

S. Pralgauskaitė

**Optoelektronikos įtaisai
telekomunikacijų sistemose**

Mokymo priemonė

Vilnius 2010

Ši mokymo priemonė yra skirta Vilniaus universiteto studentams, klausantiems kurso „Optoelektronikos įtaisai telekomunikacijų sistemose“. Mokymo priemonėje aprašyta optinėse ryšių sistemose naudojamų įtaisų sandara, veikimo principai ir charakteristikos, aptartos optoelektronikos įtaisų naudojimo ryšio sistemose ypatybės.

Skaitantieji turėtų turėti bendrosios fizikos žinių bei kietųjų kūnų fizikos ir elektronikos pagrindus.

Recenzavo: prof. habil. dr. D. Čiplys
doc. dr. J. Vyšniauskas

Mokymo priemonė apsvaistyta Vilniaus universiteto Fizikos fakulteto Tarybos posėdyje 2010 m. birželio mėn. 15 d. (protokolo Nr. 4-10); nutarta mokymo priemonę teikti spaudai.

ISBN 978-9955-33-577-1

Turinys

Dažniau vartojami žymenys	7
Santrumpos	9
Įvadas	11
1. Optoelektronikos pagrindai	17
1.1 Elektrinės puslaidininkų savybės	18
1.2 Optinės puslaidininkų savybės	19
1.2.1 Savaiminė spinduliuojamoji rekombinacija	20
1.2.2 Priverstinė spinduliuojamoji rekombinacija	23
1.2.3 Laisvųjų krūvininkų gyvavimo trukmė	24
1.2.4 Lūžio rodiklis	26
1.3 <i>pn</i> sandūros ir įvairialyčiai dariniai	27
1.3.1 Įvairialyčių <i>pn</i> sandūra	30
1.3.2 Izotipinė sandūra	31
1.3.3 Dvigubas įvairialytis darinys	32
1.4 Kvantiniai dariniai	33
2. Šviesos šaltiniai	37
2.1 Šviesos diodai	37
2.1.1 Šviesos diodo veikimo principai	40
2.1.2 Spinduliuojamieji šuoliai šviesos dioduose	42
2.1.3 Šviesos diodo spinduliuotės charakteristika	43
2.1.4 Voltamperinė šviesos diodo charakteristika	45
2.1.5 Temperatūrinės šviesos diodų charakteristikos	45
2.1.6 Šviesos diodo spinduliuotės spektras	46
2.1.7 Moduliacijos charakteristikos	48
2.1.8 Analoginės šviesos diodo valdymo grandinės	50
2.1.9 Skaitmeninės šviesos diodo valdymo grandinės	51
2.2 Lazeriniai diodai	52
2.2.1 Lazerinio diodo veikimo charakteristikos	54
2.2.2 Lazerinio spinduliavimo sąlyga	56
2.2.3 Lazerinio diodo spinduliuotės fazių sąlyga	59
2.2.4 Krūvininkų injekcija ir spinduliavimas lazeriniame diode	61
2.2.5 Lazerinių diodų efektyvumas ir išėjimo galia	61
2.2.6 Voltamperinė lazerinio diodo charakteristika	62
2.2.7 Lazerinių diodų spinduliuotės spektras	63
2.2.8 Lazerinių diodų dariniai	65
2.2.9 Lazerinio diodo aktyviosios srities sandaros ypatybės	68
2.2.10 Lazerinio diodo spinduliuotės diagrama	70
2.2.11 Vienmodžiai lazeriniai diodai	72
2.2.12 Lazerinių diodų koherentiškumas ir spektro plotis	77
2.2.13 Didelės galios LD ir lazerių masyvai.....	78
2.2.14 Lazerinių diodų moduliavimo charakteristikos	79
2.2.15 Lazerinių diodų triukšmas	84
2.2.16 Atsispindėjusios spinduliuotės įtaka lazerinių diodų veikai	85
2.2.17 Analoginės lazerinio diodo valdymo grandinės	88
2.2.18 Skaitmeninės lazerinio diodo valdymo grandinės	89
3. Fotodetektoriai	91
3.1 Fotodiodų veikimo charakteristikos	91

3.1.1	Užvertoji <i>pn</i> sandūra ir atgalinė (tamsinė) srovė	92
3.1.2	Šviesos sugertis ir kvantinis fotodiodų našumas	95
3.2	Saulės elementai	96
3.2.1	Voltamperinė saulės elementų charakteristika	96
3.2.2	Saulės elementų išėjimo galia ir efektyvumas	98
3.2.3	Saulės elementai su įvairialyčiu dariniu	99
3.3	<i>pin</i> fotodiodai	99
3.3.1	<i>pin</i> fotodiodo tamsinė srovė ir fotosrovė	102
3.3.2	Išorinis kvantinis <i>pin</i> fotodiodo našumas	103
3.3.3	Dažninė <i>pin</i> fotodiodo charakteristika	104
3.3.4	<i>pin</i> fotodiodų triukšmas, signalo ir triukšmo santykis	106
3.3.5	<i>pin</i> fotodiodai su įvairialyčiais dariniais ir bangolaidiniai <i>pin</i> fotodiodai	108
3.4	Griūtiniai fotodiodai	109
3.4.1	Smūginė jonizacija ir jonizacijos koeficientas	110
3.4.2	Griūtinis pramušimas	111
3.4.3	GFD sandaros ypatumai	111
3.4.4	Dažninė GFD charakteristika	113
3.4.5	GFD triukšmo charakteristikos	113
3.4.6	Griūtinių ir <i>pin</i> fotodiodų charakteristikos	114
3.5	Šviesos šaltiniai naudojami kaip fotodetektoriai	114
4.	Optinis kabelis	117
4.1	Daugiamodės optinės skaidulos	118
4.2	Vienmodės optinės skaidulos	118
4.3	Dispersija optinėse skaidulose	119
4.3.1	Chromatinė dispersija	120
4.3.2	Polarizacinės modos dispersija	120
4.3.3	Dispersijos skaičiavimas	121
4.4	Netiesiniai efektai optinėje skaiduloje	125
4.4.1	Priverstinė Briliujeno sklaida optinėse skaidulose	126
4.4.2	Priverstinė Ramano sklaida optinėse skaidulose	127
4.4.3	Keturbangis maišymas	127
4.4.4	Fazės moduliacija	129
4.4.5	Abipusė moduliacija	130
4.5	Optinių skaidulų jungtys	130
5.	Optiniai modulatoriai	133
5.1	Fazės modulatoriai	134
5.1.1	Dielektriniai modulatoriai	134
5.1.2	Puslaidininkiniai modulatoriai	136
5.2	Amplitudės modulatoriai	137
5.2.1	Macho ir Zenderio modulatorius	137
5.2.2	Elektrooptinis sugerties modulatorius	138
5.3	Optinių moduliatorių moduliacijos ir dažninės charakteristikos	139
5.3.1	Nykimo santykis (moduliacijos indeksas)	139
5.3.2	Optinių moduliatorių efektyvumas, įneštiniai nuostoliai, dažnio poslinkis	139
5.3.3	Dažninės optinių moduliatorių charakteristikos	140
5.3.4	Bėgančios bangos modulatoriai	141
6.	Optiniai stiprintuvai	143
6.1	Puslaidininkiniai optiniai stiprintuvai	143
6.2	Erbiu legiruoti skaiduliniai stiprintuvai	144
6.2.1	Nuostolių optiniame tinkle kompensavimas	146
6.2.2	Plačiajuostis ELSS	146
6.3	Optinis Ramano stiprintuvas	147
7.	Šakotuvai ir dalytuvai	149
7.1	Šakotuvai	149
7.2	Šakotuvų ir dalytuvų taikymas	150
8.	Kanalų perjungikliai	151

9. Signalų tankintuvai ir išskirstytuvai	153
10. Optoelektronikos įtaisų kokybės ir patikimumo problemos	155
10.1 Įtaiso apdorojimas	155
10.2 Įtaiso korpusas	156
10.3 Temperatūros valdymas	157
10.4 Optoelektronikos įtaisų patikimumas	158
10.4.1 Patikimumo įvertinimas	160
10.5 <i>pn</i> sandūros įtaisų senėjimo priežastys	162
10.5.1 Dislokacijų tinklelio augimas	164
10.5.2 <i>pn</i> įtaisų elektrodų gedimas	165
10.5.3 Katastrofinis optinis ardymas	165
10.5.4 Paslėptojo darinio gedimas	166
10.5.5 Atvirkštine kryptimi veikiančių <i>pn</i> sandūros įtaisų gedimo priežastys	167
10.6 <i>pn</i> sandūros įtaisų patikimumas	168
10.6.1 Šviesos diodų patikimumas	168
10.6.2 Lazerinių diodų patikimumas	168
10.6.3 Fotodiodų patikimumas	170
10.6.4 Optinių moduliatorių patikimumas	170
10.7 <i>pn</i> įtaisų surinkimo į korpusą įtaka jų ilgaamžiškumui	170
11. Optoelektronikos įtaisai ryšių sistemose	173
11.1 Optinė ryšio sistema	173
11.1.1 Optinės ryšio sistemos siųstuvai	173
11.1.2 Ryšio kanalas	174
11.1.3 Optinės ryšio sistemos imtuvai	175
11.2 Kanalų tankinimas	176
11.2.1 Laikinis tankinimas	176
11.2.2 Dažninis tankinimas	177
11.2.3 Kodinis tankinimas	178
11.3 Tankiojo banginio tankinimo sistemos	178
11.3.1 TBT schema	178
11.3.2 Banginio tankinimo sistemų projektavimas	180
11.4 Optiniai tinklai	182
11.4.1 Tinklo architektūra ir topologija	182
11.4.1.1 Tolimojo ryšio tinklas	182
11.4.1.2 Teritorinis tinklas	183
11.4.1.3 Vietinis tinklas	184
11.4.1.4 Vienkryptis vietinis tinklas	185
11.4.2 Tinklo protokolai ir lygmenys	185
11.4.3 Bangos ilgio maršruto parinkimo tinklas	187
11.4.4 Paketų perjungimo tinklas	188
11.4.5 Skirstomasis ir prieigos tinklas	191
11.5 Optinės ryšio sistemos projektavimas	192
11.5.1 Optinės linijos nuostolių įvertinimas	193
Pagrindinė naudota literatūra	195
Papildomam skaitymui rekomenduojama literatūra	195

Dažniau vartojami žymenys

α_{ab}	optinės sugerties koeficientas
c	šviesos greitis vakuume
E_A	akceptoriaus jonizacijos energija
E_D	donoro jonizacijos energija
E_c	elektrono, esančio laidumo juostos dugne, energija
E_{fon}	fonono energija
E_g	draudžiamosios energijos tarpas
E_v	elektrono, esančio valentinės juostos viršuje, energija
k_B	Bolcmano konstanta
κ	elektrono kvaziimpulsas
n_0	pusiausvyrisis elektronų tankis
N_c	efektinis būsenų tankis laidumo juostoje
n_i	savasis krūvininkų tankis
n_r	lūžio rodiklis
N_v	efektinis būsenų tankis valentinėje juostoje
p_0	pusiausvyrisis skylių tankis
q	elektrono krūvis
R_{sp}	savaiminės spinduliuojamosios rekombinacijos sparta
τ_e	elektronų gyvavimo trukmė
τ_h	skylių gyvavimo trukmė

Santrumpos

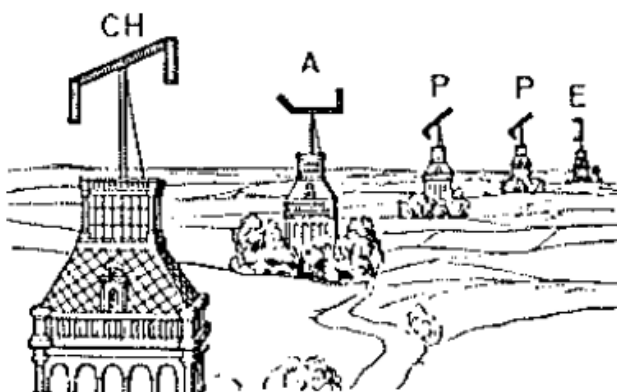
4BM	keturbangis maišymas
APV	asinchroninio persiuntimo veika
ASJ	atvirtųjų sistemų jungimas
BT	banginis tankinimas
DĮD	dvigubas įvairialytis darinys
DKM	dispersijos kompensavimo modulis
DN	dispersiniai nuostoliai
DT	dažninis tankinimas
ELSS	erbiu legiruotas skaidulinis stiprintuvas
FD	fotodiodas
FP (LD)	Fabri ir Pero (lazerinis diodas)
GFD	griūtinis fotodiodas
GR	generacinis – rekombinacinis
IP	interneto protokolas
KBD	klaidingų bitų dažnis
KFM	kryžminė fazės moduliacija
KOA	katastrofinis optinis ardymas
KT	kodinis tankinimas
LD	lazerinis diodas
LI	spinduliuotės (spinduliuotės galios priklausomybės nuo maitinimo srovės) charakteristika
LT	laikinis tankinimas
MEMS	mikroelektromechaninė sistema
NPDS	nepaslinktos dispersijos skaidula
NR	nepinduliuojamoji rekombinacija
OKS	optinis kryžminis sujungimas
OM	optinis modulatorius
PBS	priverstinė Briliujeno sklaida
PDS	paslinktos dispersijos skaidula
PGR	paskirstytasis grįžtamasis ryšys
PĮD	paslėptasis įvairialytis darinys
PL	puslaidininkinis lazeris
PMD	poliarizacinės modos dispersija
PNT	ponešlio tankinimas

POS	puslaidininkinis optinis stiprintuvas
POT	pasyvusis optinis tinklas
PRS	priverstinė Ramano sklaida
SFM	savosios fazės moduliacija
SOT	sinchroninis optinis tinklas
SSH	sinchroninė skaitmeninė hierarchija
ŠD	šviesos diodas
TBT	tankusis banginis tankinimas
TTS	Tarptautinė telekomunikacijų sąjunga

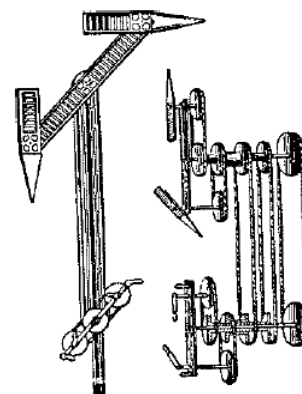
Ivadas

Optinė ryšio sistema yra mikrobangės ryšio sistemos išplėtimas – abiejose sistemose informacijos nešlys yra elektromagnetinė spinduliuotė. Pagrindinis optinės ir mikrobangės sistemų skirtumas yra jų dažnis: ~1 GHz, kai nešlio dažnis yra mikrobangų srityje, ir ~100 THz optinėje. Ryšio sistemos dažnis tiesiogiai įtakoja sistemos persiuntimo spartą: mikrobangės ryšio sistemos paprastai nepersiunčia daugiau informacijos nei 0,2 Gb/s, optinių sistemų sparta siekia 1 Tb/s.

Optinių informacijos persiuntimo sistemų galime užtikti ir tais laikais, kai žemaičių kunigaikštis Margiris nuo užpuolikų gynė Pilėnus – žinia apie priešą brovimąsi į šalį buvo persduodama uždegant laužus ant Lietuvos piliakalnių. Tačiau oficiali optinio ryšio istorija skaičiuojama nuo XVIII amžiaus pabaigos, kai 1791 m. prancūzų inžinierius Klodas Šape (Claude Chappe) išrado optinį telegrafą^{1,2}. Optinį telegrafą sudarė ant stulpų pritvirtinti semaforai, kuriuos valdė žmogus, informacija buvo persiunčiama nuo vieno stulpo iki kito (1 ir 2 pav.). XIX amžiaus viduryje optinius telegrafus pakeitė elektriniai.



1 pav. Optinio telegrafo linija².



2 pav. Mechaninis optinio telegrafo semaforas².

1880 metais Aleksandras Grahamas Belas (Alexander Graham Bell) užpatentavo optinio telefono sistemą „Photophone“ (nors ankstesnis jo išradimas telefonas buvo kur kas praktiškesnis)¹. A. G. Belo fotofonas persiuntė šviesos signalus oru. Fotofono veikimas yra analogiškas telefono veikimui, tik čia informaciją perneša šviesa, o ne elektra. Fotofonas veikė perduodant garso bangas veidrodžiui – garso vibracijos sukėlė tokias pačias veidrodžio vibracijas - nuo veidrodžio atsispindėjusios saulės šviesos intensyvumas buvo moduluotas garso banga. Priėmimo taške vibracijos vėl buvo paverčiamos garsu: šviesa sufokusuojama į seleno plokštelę (seleno varža priklauso nuo apšviestumo), kuri įjungta į įprasto elektrinio telefono grandinę. A. G. Belo fotofono veikimui didelę įtaką turėjo įvairūs išoriniai poveikiai: debesys, lietus, oro srautų turbulencija. Taigi informacijos persiuntimas oru buvo kur kas mažiau patikimas nei laidais. Tačiau tam tikrose srityse panašios informacijos persiuntimo sistemos naudojamos ir šiandien, pvz., signalizacijai tarp laivų.

¹ J. Hecht. City of light: the story of fiber optics (Oxford Univ. Press, New York, 1999).

² http://people.seas.harvard.edu/~jones/cscie129/papers/Early_History_of_Data_Networks/Chapter_2.pdf. (2009 09 15).

Informacijos persiuntimo šviesa problema išsprendė naujos technologijos, pagrįstos visiško vidaus atspindžio efektu (šviesa yra sulaikoma medžiagoje apsuptoje mažesnio lūžio rodiklio medžiaga). Pirmosios visiško vidaus atspindžio efektu paremtos šviesos persiuntimo demonstracijos buvo šviesos sklidimas vandens čiurkšle (apšviesti fontanai). Medicinos studentas Heinrichas Lamas (Heinrich Lamm) 1930 m. publikavo straipsnį apie vaizdo iš žmogaus vidaus organų persiuntimą optinių skaidulų pluoštu. Tačiau nepadengtomis stiklinėmis skaidulomis persiunčiamo vaizdo kokybė buvo prasta.

1951 m. Holgeris M. Hansenas (Holger M. Hansen) Danijos patentų biurui pateikė patentą apie vaizdų gavimą skaiduline optika, kur pasiūlė stiklines ar plastikines skaidulas padengti mažo lūžio rodiklio skaidria medžiaga. Tačiau šis patentas buvo atmestas palyginus jį su 1920 m. Džono L. Berdo (John L. Baird (Anglija)) ir Klirenso W. Hanselo (Clarens W. Hansell (JAV)) patentu apie vaizdo persiuntimą vamzdeliais. 1954 m. Abrahamas van Hylas (Abraham van Heel (Olandija)) bei Haroldas H. Hopkinsas ir Narinderis Kapani (Harold H. Hopkins ir Narinder Kapany (Anglija)) nepriklausomai žurnale *Nature*^{3,4} paskelbė straipsnius apie vaizdo persiuntimą skaidulomis. Šiomis skaidulomis šviesa persiųsta nedideliu atstumu, tačiau straipsniai padarė revoliuciją optinio ryšio vystymesi. Iki šiol naudotos skaidulos buvo nepadengtos – naudojamas visiško vidaus atspindžio efektas nuo ribos tarp stiklo ir oro. A. van Heelas stiklo ar plastiko skaidulą padengė skaidria mažesnio lūžio rodiklio medžiaga. Šis sluoksnis apsaugo skaidulos paviršių nuo užsiteršimo, o skaidula sklindančią šviesą - nuo sąveikos su kitomis skaidulomis sklindančia spinduliuote.

1960-aisiais optiniai nuostoliai dengtoje stiklinėje skaiduloje buvo 1 dB/m – neblogai medicininiam endoskopui, bet nepakankamai gerai telekomunikacijoms. Telekomunikacijų inžinieriams reikėjo platesnės dažnių juostos persiuntimo galimybių, nes didėjant televizijos ir telefoninės informacijos srautui radijo ir mikrobangų sritys netrukus turėjo būti perkrautos. Optinių bangolaidžių naudojimas kol kas buvo problemiškas dėl didelių nuostolių, ir telekomunikacijų ateitis vis dar buvo siejama su milimetriniais bangolaidžiais, nuostoliai kuriuose buvo gana maži (tiesia kryptimi). Esminis šuolis optinio ryšio sistemose įvyko, kai 1960 m. buvo išrastas lazeris.

1961 m. Elijas Snitceris (Elias Snitzer (JAV)) pagamino tokią ploną optinę skaidulą, kuria galėjo skliti tik viena moda⁵. Tačiau kol kas nuostoliai stiklinėse skaidulose optiniam ryšiui dar buvo per dideli – reikėjo, kad nuostoliai būtų mažesni nei (10-20) dB kilometrui. Čarlzo K. Kao (Charles K. Kao (2009 fizikos Nobelio premija už pasiekimus persiunčiant šviesą optinėmis skaidulomis)) vadovaujamas Antonis E. Karboviakas (Antoni E. Karbowiak) ištyrė didelį kiekį stiklinių skaidulų ir nustatė, kad nuostoliai jose yra nulemti ne paties stiklo, o jame esančių priemaišų. Taigi buvo tikimasi, kad netrukus bus pagamintos tokios švrios stiklinės skaidulos, kuriose nuostoliai neviršys 20 dB/km. Tokia optine skaidula būtų galima persiųsti 200 televizijos ar 200000 telefoninių kanalų.

Kompanijos visame pasaulyje kibo į darbą siekdamos sumažinti nuostolius optinėse skaidulose. Robertas Maureris (Robert Maurer), Donaldas Kekas (Donald Keck) ir Peteris Šulcas (Peter Schultz) iš „Corning Glass Works“ 1970 m. pademonstravo vienmodę skaidulą, nuostoliai kurioje 633 nm helio-neono lazerio spinduliuotei neviršijo 20 dB/km⁶. Tais pačiais metais Mortas Panišas (Mort Panish) ir Izuo Hajaši (Izuo Hayashi) iš Bell Labs ir Žoreso Alferovo (Zhores Alferov (2000 fizikos Nobelio premija už puslaidininkinių

³ A. C. S. van Heel, “A New Method of transporting Optical Images without Aberrations”, *Nature*, 173, pp. 39-39 (1954)

⁴ H. H. Hopkins and N. S. Kapany, “A flexible fibrescope, using static scanning”, *Nature*, 173, pp. 39-41 (1954).

⁵ http://www.google.com/patents?id=BSBNAAAEBAJ&printsec=abstract&zoom=4&source=gbs_overview_r&cad=0#v=onepage&q=&f=false (2009 09 15)

⁶ <http://www.google.com/patents?id=TNQsAAAEBAJ&printsec=abstract&zoom=4#v=onepage&q=&f=false> (2009 09 15)

(įvairialyčių darinių tobulinimą)) grupė iš Ioffe Fizikos instituto pristatė puslaidininkinį lazerį veikiantį nuolatine veika kambario temperatūroje.

Nuostoliai optinėse skaidulose sparčiai mažėjo dėl gerėjančios gamybos technologijos, ir informacijai persiūsti naudojamos spinduliuotės bangos ilgio paslinkimo į ilgesnių bangų pusę. Vienmodės skaidulos su kelių mikronų storio šerdimi gamyba buvo gana sudėtinga, tokiai skaidulai reikėjo itin tikslaus ryšio su kaupinimo šaltiniu. Todėl buvo pasukta daugiamodžių optinių skaidulų kryptimi. 1977 m. keletas JAV kompanijų ir Britanijos pašto tarnyba pademonstravo bandomuosius telefoninius tinklus (6 Mb/s „General Telephone and Electronics“, 45 Mb/s “Bell System”), persiuntimui panaudojant 850 nm GaAlAs lazerio spinduliuotę.

Pirmosios kartos optinėmis ryšio sistemomis nenaudojant kartotuvų informaciją galima buvo persiūsti 2 km atstumu, nuostoliai skaiduloje buvo 2 dB/km. Antroji optinių ryšio sistemų karta pasirodė, kai buvo sukurtas InGaAsP lazeris spinduliuojantis 1300 nm spinduliuotę. 1300 nm spinduliuotės silpimas skaiduloje buvo vos 0,5 dB/km, o impulso spektro išplitimas neviršijo 850 nm⁷. Praeito amžiaus devintojo dešimtmečio pradžioje kuriant įrangą transatlantinio ryšio kanalui, pasirodė, kad įmanoma ir vienmodė optinė ryšio sistema. Nuo to laiko vienmodė sistema naudojanti 1300 nm spinduliuotę tapo standartine. Dabar vienmodės optinio ryšio sistemos naudojamos transatlantiniams kanalams bei daugelio abonentų sistemoms: 1550 nm spinduliuotė, kurios nuostoliai skaiduloje yra (0,2-0,3) dB/km⁸, leidžia persiūsti informaciją dideliais atstumais nenaudojant kartotuvų; erbiu legiruoti skaiduliniai stiprintuvai įgalina nenaudoti elektrooptinių regeneratorių.

Mažų nuostolių optinės skaidulos yra pranašesnės už visas lig tol naudotas informacijos persiuntimo aplinkas: varinį kabelį pakeitus stiklinėms skaiduloms smarkiai išaugo informacijos persiuntimo sparta ir kiekis, informacija persiunčiama didesniais atstumais. Optinės ryšio sistemos turi daugybę privalumų prieš varinio ar bendraašio kabelio sistemas:

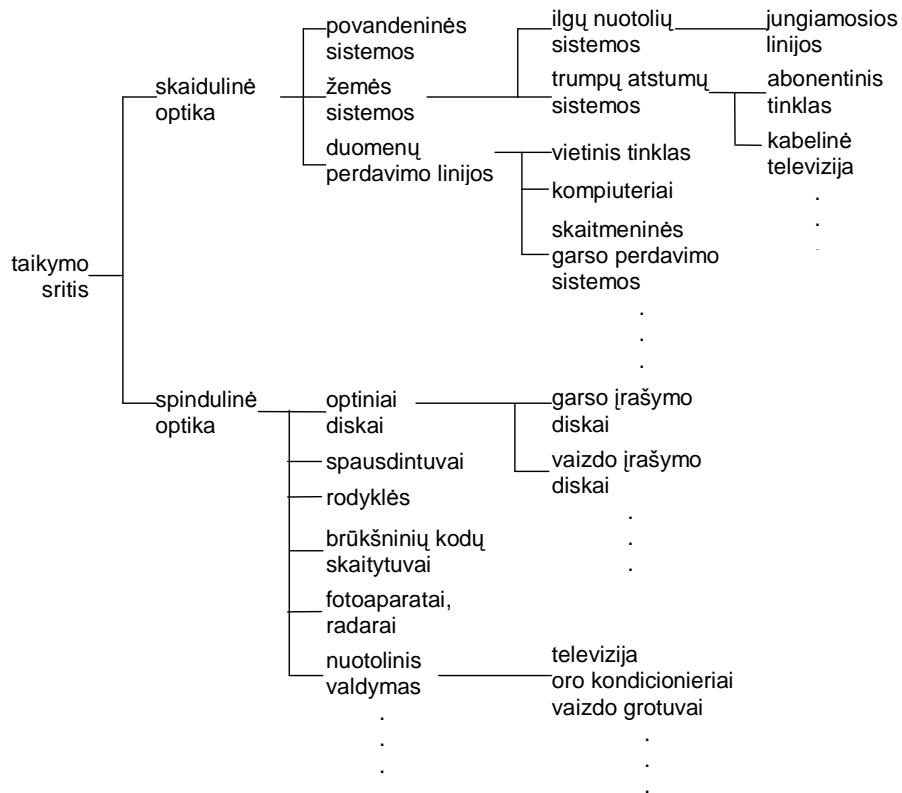
- persiunčiamas kur kas didesnis informacijos kiekis ir išlaikomas didesnis tikslumas;
- persiunčiamas didelis duomenų srautas didesniais atstumais;
- optinis kabelis yra apsaugotas nuo visų rūšių interferencijos, gali kontaktuoti su aukšta įtampa, nesusidaro nuotėkio į žemę;
- stiklinės skaidulos nerūdija ir yra atsparios daugeliui chemikalų – gali būti užkastos bet kokioje dirvoje ar naudojamos chemijos fabrikuose;
- nekibirkščiuoja – tinka naudoti sprogoje atmosferoje;
- stiklinės skaidulos atsparios atmosferos poveikiui;
- optinis kabelis yra mažesnis ir lengvesnis nei tam pačiam duomenų srautui reikalingas metalinis;
- duomenų persiuntimas optiniu kabeliu yra saugus – sunku prisijungti, o pastebėti prisijungimą lengva.

Optoelektronikos įtaisų charakteristikas nulemia jų naudojimo sritis (3 pav.): kiekviena konkreti įranga ir sistema reikalauja konkrečių įtaiso parametrų. Pagrindinė optoelektroninių *pn* sandūros įtaisų panaudojimo skaidulinėje optikoje sritis yra optinės ryšio sistemos. Šios skirstomos į dvi dalis: viešojo ryšio sistemas ir duomenų persiuntimo tinklus. Optinės viešojo ryšio sistemos yra pagrindinė informacinės visuomenės infrastruktūros dalis, be kurios neišsiverstume šiandieniniame gyvenime.

Ryšio sistemos skirstomos į povandenines, žemės ryšio sistemas ir duomenų persiuntimo tinklus (3 pav.). Povandeniniai optiniai kabeliai sujungia žemynus; žemės tinklai tarnauja ir tarp miestinėms magistralėms, ir nedideliams vartotojų tinklams, taip pat kabelinei televizijai.

⁷ T. Ito, K. Nakagawa, K. Aida, K. Takemoto, K. Suto, “Non-repeated 50 km transmission experiment using low-loss optical fibres”, *IEEE Electron. Lett.*, 14, pp. 520-521 (1978).

⁸ T. Edahiro, M. Kawachi, S. Sudo, “Transmission characteristics of 116.3 km and 65.1 km graded-index V.A.D. fibres at 1.55 μm and 1.3 μm ”, *IEEE Electron. Lett.*, 16, pp. 478-480 (1980).



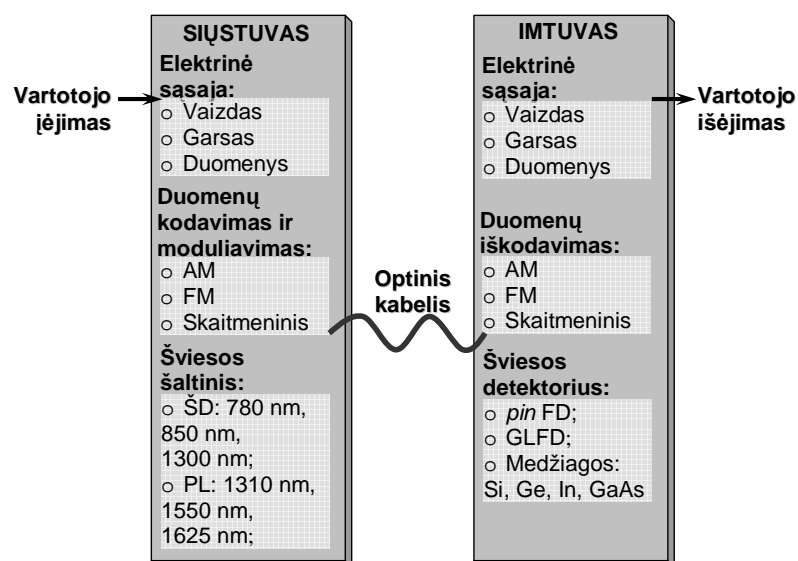
3 pav. Optoelektronikos įtaisų taikymo sritys.

Paprasčiausia tiesioginio ryšio optinė sistema susideda iš trijų pagrindinių elementų (analogiškų laidinio persiuntimo sistemoms): optinis siųstuvas, optinis kabelis ir optinis imtuvas (4 pav.). Optinis siųstuvas paverčia elektrinį analoginį ar skaitmeninį signalą į atitinkamą optinį signalą. Svarbiausias siųstuvo elementas yra šviesos šaltinis - šviesos diodas (ŠD) arba puslaidininkinis lazeris (PL). Optinis kabelis sudarytas iš vienos ar kelių stiklinių skaidulų veikia kaip bangolaidis optiniam signalui. Imtuvas optinį signalą vėl paverčia elektriniu, atitinkančiu įėjimo signalą. Kaip fotodetektorius paprastai naudojami *pin* fotodiodai (FD) ar griūtiniai lėkio fotodiodai (GLFD). Siųstuvas, imtuvas ir kabelis yra pagrindiniai ryšio sistemos elementai. Tačiau optinės sistemos gali turėti ir kitų elementų (pvz., signalo regeneratoriai, kartotuvai, optiniai stiprintuvai). Daugiakanalio persiuntimo sistemose naudojami tankintuvai, šakotuvai ir dalytuvai, dispersijos valdymo įranga, nuotolinio valdymo sąsaja, klaidų taisymo įtaisai.

Pagal moduliacijos rūšį optinio ryšio sistemos skirstomos į analogines ir skaitmenines. Ilgų nuotolių didelio duomenų srauto sistemos paprastai yra skaitmeninės.

Analoginės sistemos yra gana paprastos ir naudojamos signalui persiųsti nedideliais atstumais. Lazerio ar šviesos diodo spinduliuotė moduluojama analoginiu signalu, persiunčiama optine skaidula ir detektuojama fotodiodu. Analoginėse sistemose svarbus šviesos šaltinio tiesiškumas bei mažas spinduliuotės galios triukšmas (signalo triukšmo santykis turi būti ne mažesnis kaip 40 dB) - analoginiam optiniam ryšiui naudojami šviesos šaltiniai turi turėti tiesinę spinduliuotės charakteristiką ir 1 GHz moduliacijos juostą.

Skaitmeninės optinio ryšio sistemos yra populiariausios ir naudojamos povandeniniam ir žemės ryšiui bei duomenų persiuntimo tinklams. Lazerinio ar šviesos diodo spinduliuotė moduluojama tiesiogiai moduluojant maitinimo srovę skaitmeniniu elektriniu signalu arba šviesos šaltinio spinduliuotė moduluojama optiniu modulatoriumi maitinamu elektriniu signalu. Paprastai elektrinis signalas būna ne



4 pav. Optinio ryšio sistemos elementai.

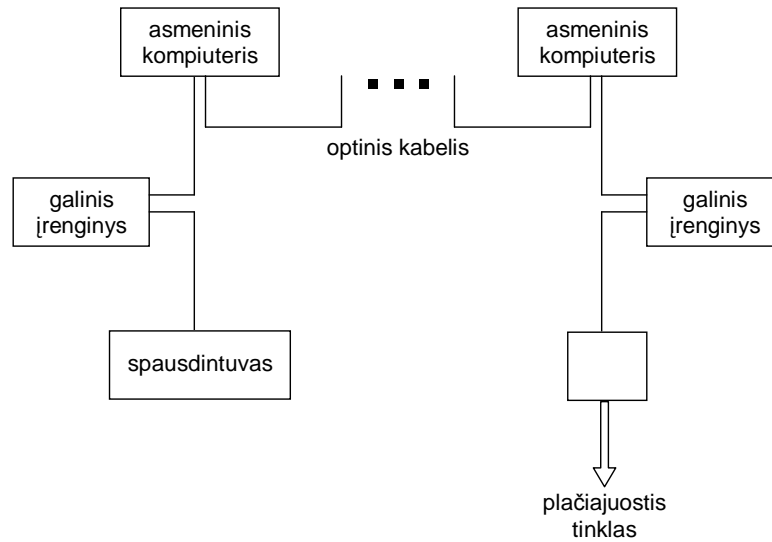
skaitmeninis, o analoginis. Taigi, visų pirma, signalas turi būti paverčiamas skaitmeniniu, o po to juo moduluojama šviesos šaltinio srovė ar spinduliuotė. Signalą detektavus fotodiodu, jį vėl reikia paversti iš skaitmeninio į analoginį. Siekiant didesnės persiuntimo spartos prieš moduliavimą signalas yra tankinamas, o priimtas signalas išskirstomas.

Skaitmeninėse sistemose spinduliuotė moduluojama impulsiniu signalu. Taigi įtaisas turi turėti plačią moduliacijos juostą bei nuostovų impulsinį atsaką. ŠD moduliacijos juosta yra gana siaura, nes ją nulemia savaiminės krūvininkų rekombinacijos trukmė (kelios nanosekundės). Taigi ŠD naudojami mažos persiuntimo spartos sistemose (iki keleto dešimčių megabitų per sekundę). Didelio nuotolio ir didelės spartos sistemose naudojami PL spinduliuojantys vieną skersinę modą. PL pasižymi didele spinduliuotės galia ir aukštadažniu atsaku (moduliacijos juostą nulemia PL relaksacinis dažnis ir parazitinės RC trukmės). Faktoriai, ribojantys persiuntimo nuotolį, naudojant PL yra impulso plitimas ir nuostoliai.

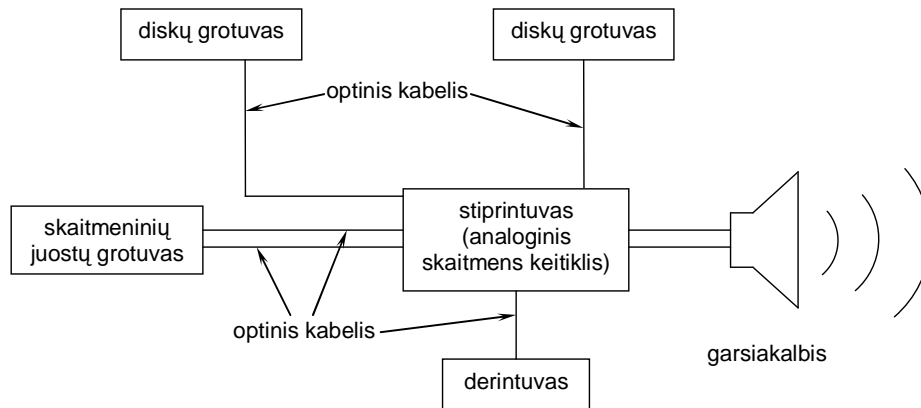
Optiniam ryšiui naudojamos spinduliuotės bangos ilgis yra parinktas toks, kuriam yra mažiausi nuostoliai skaiduloje (silicio dioksido skaidulose): 1300 nm ir 1550 nm. Todėl optiniai šaltiniai ir detektoriai paprastai gaminami iš InGaAs(P)/InP. Trumpų nuotolių tinkluose dėl pigumo naudojamos plastikinės skaidulos, tuomet naudojami ir raudonos šviesos siūstuvai bei imtuvai.

Optiniai duomenų persiuntimo tinklai naudojami itin plačiai: nuo vietinių tinklų iki kompiuterių, garso ir mobiliųjų sistemų. Optinis vietinis tinklas yra toks pat kaip ir telekomunikacijų sistemų tinklas. Optinio tinklo privalumas prieš kabelinį yra didesnė persiuntimo sparta didesniais nuotoliais. Vietinio optinio tinklo pavyzdys gali būti optiniais kabeliais sujungti įmonės kompiuteriai bei kita įranga (5 pav.). Duomenų persiuntimas optiniu tinklu įmonės viduje yra labai spartus (skaidulinio paskirstytųjų duomenų sietuvo sparta yra 100 Mb/s, bendras optinio kabelio ilgis gali būti iki kelių dešimčių kilometrų). Optinis tinklas ypač tinka naudoti įvairiose gamybose, kadangi informacijos persiuntimui netrukdo pašaliniai elektromagnetiniai trukdžiai.

Skaitmeninėje garso sistemoje įranga sujungiama optiniais kabeliais (6 pav.). Šiuo atveju visa sistema yra kur kas mažesnė nei vietinis tinklas – panaudojami vos keli metrai optinio kabelio. Garso sistemose signalo persiuntimo sparta paprastai neviršija 10 Mb/s. Ekonomiško dėlei nesant didelio duomenų srauto kaip šviesos šaltinis garso sistemose naudojami šviesos diodai, kabelis - plastikinės skaidulos.



5 pav. Vietinio optinio tinklo pavyzdys.



6 pav. Optinės garso sistemos pavyzdys.

Traukiniuose, lėktuvuose naudojamos mobiliosios optinės sistemos, kuriose duomenų persiuntimo sparta neviršija 1 Mb/s.

Optinis ryšys palydovinio ryšio sistemose naudojamas informacijai persiųsti nuo antenos iki palydovinių įrenginių⁹.

⁹ www.forceinc.com (2007 10 03).

1. Optoelektronikos pagrindai

Dauguma puslaidininkinių optoelektronikos įtaisų yra *pn* sandūros diodai. Jų veikimo charakteristikos priklauso nuo *pn* sandūros ir medžiagų, iš kurių yra pagaminti, savybių. Svarbiausios puslaidininkinių savybės yra susijusios su elektriniais ir optiniais vyksmais, bei jų sąveika. Šiame skyriuje trumpai aptartos optoelektronikos įtaisams svarbios optinės ir elektrinės puslaidininkinių savybės.

Puslaidininkiai gali būti monokristaliniai, polikristaliniai ir amorfiniai. Dauguma įtaisų gaminami iš kristalinių medžiagų (saulės elementai iš amorfinio silicio). Monokristaliniame puslaidininkyje atomai yra išsidėstę tvarkingai ir sudaro kristalinę gardelę. Kristalinės gardelės konstanta lemia energijos juostos sandarą, taigi, ir elektrines bei optines medžiagos savybes. Medžiagų, kurių gardelės konstantą maža, draudžiamosios energijos tarpas platus (1.1 lentelė). Draudžiamosios energijos tarpas įtakoja išspinduliuotos ar sugertos šviesos bangos ilgį.

Šiandieniniams optoelektronikos įtaisams daugiausia naudojami III-V puslaidininkinių junginiai. Elementarieji Si ir Ge naudojami fotodiodų gamybai, III-V bei II-VI junginiai naudojami lazeriniams ir šviesos diodams. Elementariųjų Si ir Ge kristalinė gardelė yra paviršiaus centruota kubinė (deimanto) gardelė (1.1 lentė). Daugumos III-V lydinių (GaAs, InP, AlAs, CdTe) gardelė yra cinko blizgučio pavidalo – tokios medžiagos dažniausiai ir naudojamos optoelektronikos įtaisams (1.1 lentelė). Plačiau apie medžiagų kristalines gardeles ir cheminius ryšius žiūrėkite: V. Karpus, Kietųjų kūnų fizika. Kristalinis būvis (Vilnius, UAB Ciklonas, 2002).

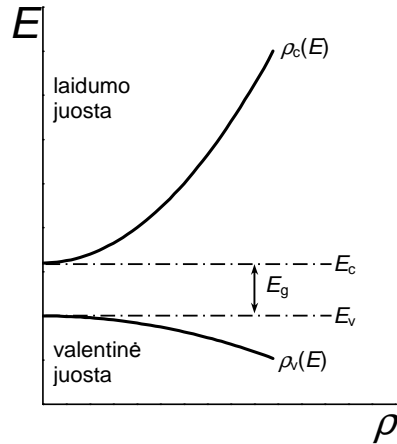
Energijos juostos sandarą nulemia periodinis atomų išsidėstymas kristale (atskirų atomų energijos lygmenys yra diskretūs). Atomams jungiantis į kristalą susiformuoja laidumo ir valentinė juostos, draudžiamosios energijos tarpas (1.1 pav.). Draudžiamosios energijos tarpas (E_g) yra lygus skirtumui tarp laidumo juostos dugno energijos (E_c) ir valentinės juostos viršaus (E_v):

$$E_g = E_c - E_v. \quad (1.1)$$

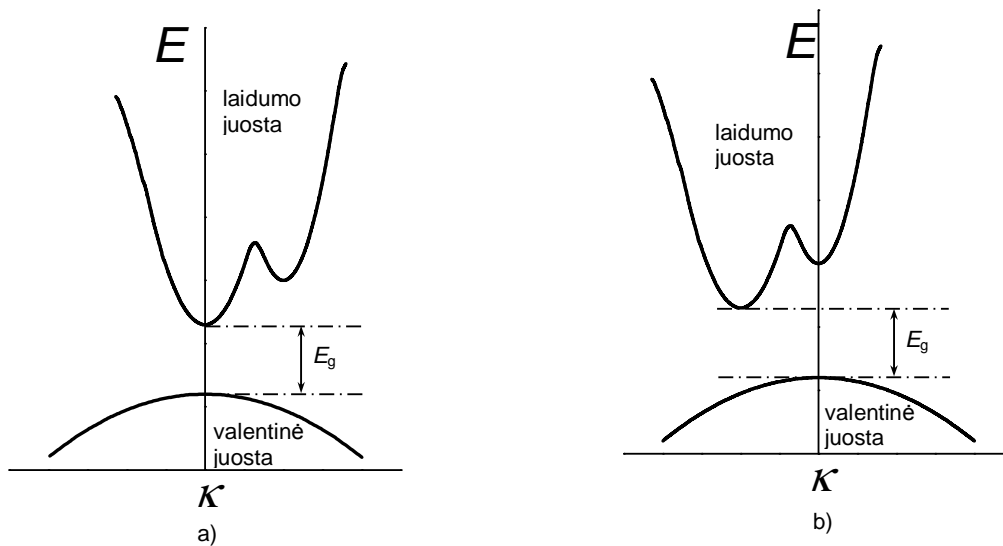
1.1 lentelė. Įvairių puslaidininkinių parametrai¹.

Medžiaga	Gardelės konstanta, Å	Kristalo sandara	Draudžiamosios energijos tarpo pobūdis	Draudžiamosios energijos tarpas, eV
Elementarieji				
Si	5,43	deimantas	netiesioginis	1,12 (X)
Ge	5,64	deimantas	netiesioginis	0,67 (L)
III-V junginiai				
AlP	5,45	cinko blizgutis	netiesioginis	2,45 (X)
AlAs	5,66	cinko blizgutis	netiesioginis	2,16 (X)
GaN	a=3,19, c=5,19	viurcitas	tiesioginis	3,39
GaP	5,45	cinko blizgutis	netiesioginis	2,26 (X)
GaAs	5,65	cinko blizgutis	tiesioginis	1,42
InN	a=3,54, c=5,71	viurcitas	tiesioginis	2,4
InP	5,87	cinko blizgutis	tiesioginis	1,35
InAs	6,06	cinko blizgutis	tiesioginis	0,36

¹ A. Dargys, J. Kundrotas. Handbook on physical properties of Ge, Si, GaAs and InP (Vilnius, Science and Encyclopedia Publishers, 1994).



1.1 pav. Laidumo, valentinė bei draudžiamosios energijos (E_g) juostos puslaidininkyje (ρ - būsenų tankis).



1.2 pav. Tiesioginio (a) ir netiesioginio (b) tarpo puslaidininkų energijos juostos sandara.

Pagal energijos juostos sandarą puslaidininkius galime skirstyti į tiesioginio tarpo ir netiesioginio tarpo medžiagas (1.2 pav.). Tiesioginio tarpo medžiagose elektrono kvaziimpulsas (κ) laidumo juostos dugne sutampa su elektrono kvaziimpulsu valentinės juostos viršuje. Netiesioginio tarpo medžiagose šie kvaziimpulsai nesutampa. Plačiau apie puslaidininkų energijos juostos sandarą žiūrėkite:

1. A. Juodviršis, M. Mikalkevičius, S. Vengris, Puslaidininkų fizikos pagrindai (Vilnius, Mokslas, 1985).
2. A. Matulis, Kietojo kūno fizika (Vilnius, Petro ofsetas, 2002).
3. E. Rosencher, B. Vinter, Optoelectronic (Cambridge University Press, 2002).

1.1 Elektrinės puslaidininkų savybės

Grynieji puslaidininkiai (be priemaišų ir defektų) laisvųjų krūvininkų (skylių ir elektronų) neturi. Laisvieji krūvininkai sukuriama puslaidininkį apšvietus, veikiant elektriniu lauku, šiluma, etc. Tada elektronai iš valentinės juostos sužadina i laidumo - sukuriama elektrono ir skylės poros.

Savojo laidumo puslaidininkyje šiluminėje pusiausvyroje elektronų ir skylių tankiai (n_0 ir p_0 , atitinkamai) yra lygūs:

$$n_0 = p_0 = n_i; \quad (1.2)$$

čia n_i yra savųjų krūvininkų tankis. Tačiau kambario temperatūroje (ar jai artimoje), kurioje paprastai veikia optoelektronikos įtaisai, laisvųjų krūvininkų tankis savojo laidumo puslaidininkyje yra be galo mažas, elektrinis laidis yra per mažas optoelektronikos įtaisų veikimui. Laisvųjų krūvininkų tankis padidinamas įvedant priemaišas – priemaišinius atomus. Priemaišomis vadinami ne tik priemaišiniai atomai, bet ir įvairūs defektai. Priemaišos į medžiagą įterpiamos kristalo auginimo metu arba difuzija per paviršių.

Priemaišos sukuria laisvuosius krūvininkus puslaidininkyje. Priemaišos, kurių atomai turi daugiau valentinių elektronų nei puslaidininkio atomai, yra vadinamos donorinėmis; jos padidina laisvųjų elektronų tankį (lieka teigiamai jonizuoti donoriai, kurių energija yra draudžiamosios energijos juostoje). Toks puslaidininkis vadinamas elektroniniu. Akceptorinės priemaišos padidina laisvųjų skylių tankį (lieka neigiamai jonizuoti akceptoriniai, kurių energija yra draudžiamosios energijos juostoje). Toks puslaidininkis vadinamas skyliniu.

Puslaidininkiai, naudojami optoelektronikoje, įprastomis sąlygomis yra laidūs elektrai dėl laisvųjų krūvininkų (elektronų ir skylių) judėjimo. Elektrinį puslaidininkių laidumą nulemia tokie vyksmai, kaip krūvininkų sklaida, dreifas, difuzija. Jei medžiagoje sužadintų krūvininkų nėra (valentinė juosta pilnai užpildyta, o laidumo tuščia), tai elektrinio laidumo nebus. Tokio puslaidininkio savybės bus panašios į dielektriko. Tačiau priemaišiniuose puslaidininkiuose kambario temperatūroje yra pakankamai šiluma sužadintų krūvininkų. Dalis sužadintų krūvininkų vėl rekombinuoja. Tačiau esant nuostoviai būsenai yra pusiausvyra tarp šiluminio krūvininkų sužadinimo ir rekombinacijos, t. y. išlaikomos sąlygos tinkamos elektriniam laidumui.

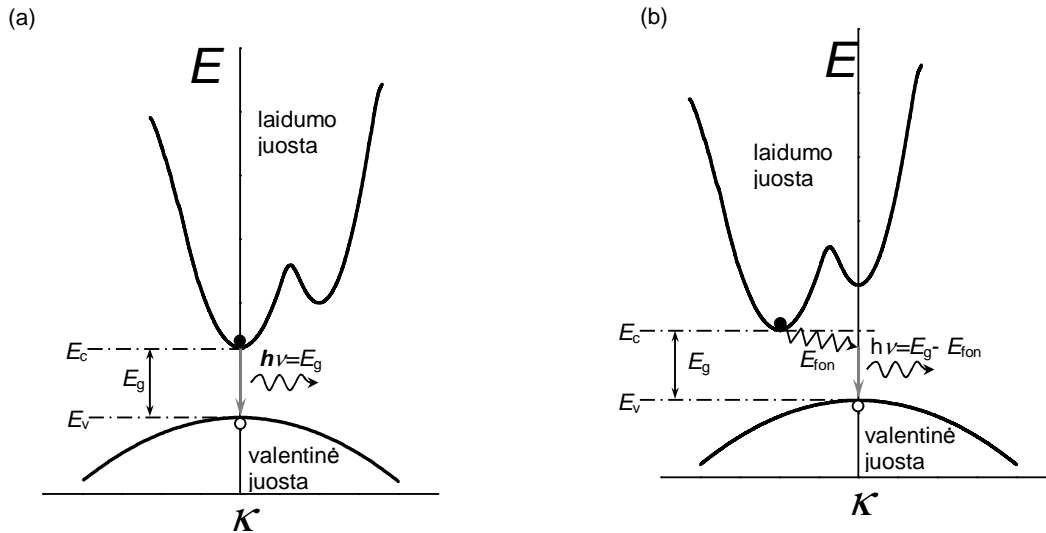
Perteklinių krūvininkų (laisvųjų krūvininkų, sukurtų žadinant šviesa ar elektros srove) skaičius puslaidininkyje mažėja šiems rekombinuojant. Taip sistema grįžta į pusiausvyrą būseną. Rekombinacija gali būti tiesioginė (tarpjuostinė) arba vykti per rekombinacijos centrus draudžiamosios energijos juostoje. Tiesioginė rekombinacija gali būti spinduliuojamoji arba nespinduliuojamoji. Visų spinduliuojančiųjų įtaisų veikimas yra paremtas tiesiogine spinduliuojamąja rekombinacija.

Nespinduliuojamąją rekombinaciją (NR) lemia kristalo defektai, priemaišos, Ože (Auger) vyksmai (daugdalelė sąveika, kai rekombinuojant elektrono ir skylės porai dalis energijos perduodama kitam trečiam krūvininkui). NR įtakoja optoelektronikos įtaisų kokybę ir patikimumą. NR atveju perteklinė energija yra išspinduliuojama ne fotonų, o fononų pavidalu. Įvairūs kristalų defektai (dislokacijos, taškiniai defektai) sukuria papildomus lygmenis draudžiamosios energijos juostoje arti laidumo juostos, per kuriuos ir įvyksta krūvininkų rekombinacija. Priemaišos sukuria rekombinacijos centrus bet kurioje draudžiamosios energijos juostos dalyje. Rekombinacijai vykstant per giliuosius centrus, gali būti išspinduliuotas ir mažos energijos fotonas. Nors tai ir spinduliuojamoji rekombinacija, tačiau nepageidautinas ilgabangis fotonas tik pablogina įtaiso charakteristikas.

1.2 Optinės puslaidininkių savybės

Svarbiausios optinės puslaidininkių savybės yra spinduliavimas, šviesos sugertis bei šviesos įtaka medžiagos lūžio rodikliui.

Tiesioginio tarpo puslaidininkiuose kvaziimpulso (κ) erdvėje laidumo juostos dugnas sutampa su valentinės juostos viršumi. Tada tarpjuostinis šuolis vyksta nekintant elektrono kvaziimpulsui (1.3 pav. (a)). Netiesioginio tarpo puslaidininkiuose (Si, Ge, GaP) laidumo juostos dugnas nesutampa su valentinės juostos viršumi. Šiose medžiagose vykstant tarpjuostiniam šuoliui elektrono kvaziimpulsas pakinta (1.3 pav. (b)).



1.3 pav. Tarpjuostiniai šuoliai tiesioginio (a) ir netiesioginio (b) tarpo puslaidininkiuose.

Kvaziimpulso tvermės dėsniai patenkinti netiesioginiuose šuoliuose turi dalyvauti ir fononas. Todėl netiesioginių šuolių tikimybė yra žymiai mažesnė, nei tiesioginių. Spinduliuojantiems įtaisams naudojami tiesioginio tarpo puslaidininkiai.

1.2.1 Savaiminė spinduliuojamoji rekombinacija

Vykimas, kai po elektronų sužadavimo į laidumo juosta praėjus tam tikrai trukmei (gyvavimo trukmei) jie grįžta į valentinę juostą išspinduliuodami fotoną (įvyksta spinduliuojamoji rekombinacija) - sistema grįžta į šiluminę pusiausvyrą, vadinamas savaiminiu spinduliuavimu. Išspinduliuoto fotono bangos ilgis (λ):

$$\lambda = \frac{hc}{E_g} \approx \frac{1,24}{E_g} [\mu\text{m}] \quad (1.3)$$

tiesioginio tarpo puslaidininkiuose ir

$$\lambda = \frac{hc}{E_g - E_{\text{fon}}} \approx \frac{1,24}{E_g - E_{\text{fon}}} [\mu\text{m}] \quad (1.4)$$

netiesioginio tarpo puslaidininkiuose ($h=4,13566743 \cdot 10^{-15}$ eV·s yra Planko konstanta, $c=299792458$ m/s yra šviesos greitis vakuume, čia energija matuojama elektronvoltais, E_{fon} – fonono, reikalingo netiesioginiam šuoliui įvykti, energija). Vykstant tarpjuostiniams šuoliams išspinduliuoto fotono energija yra artima draudžiamąjo tarpo energijai, t. y. nuo 10 meV iki 100 meV. Savaiminio spinduliuavimo metu elektronai tarp laidumo ir valentinės juostų šokinėja atsitiktinai, taigi išspinduliuotų fotonų impulsas yra atsitiktinis – spinduliuotė yra nekoherentinė. Panašiai vyksta krūvininkų rekombinacija šiems šokant tarp juostos ir priemaišinio lygmens draudžiamąjoje juostoje.

Žadinimo sąlygomis spinduliuojamosios rekombinacijos sparta yra proporcinga elektronų ir skylių tankių sandaugai, nes rekombinacijos tikimybė didėja didėjant elektronų ir skylių tankiui (n ir p , atitinkamai). Savaiminės spinduliuojamosios rekombinacijos sparta vienetiniame tūryje:

$$R_{\text{sp}} = B_{\text{sp}} np; \quad (1.5)$$

čia B_{sp} yra spinduliuojamosios rekombinacijos koeficientas (šulio tikimybė) [$\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$], kuris priklauso nuo draudžiamosios energijos tarpo ir to, ar puslaidininkis yra tiesioginio tarpo ar netiesioginio. Tiesioginio tarpo

puslaidininkiams būdingos B_{sp} vertės yra nuo $10^9 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ iki $10^{11} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$, netiesioginio tarpo – ($10^{-13} - 10^{-15}$) $\text{cm}^3 \text{ s}^{-1}$.

Savaiminės spinduliuojamosios rekombinacijos sparta susideda iš pusiausvyrinės savaiminės spinduliuojamosios rekombinacijos spartos (R_{sp0}) ir sužadintųjų perteklinių krūvininkų spinduliuojamosios rekombinacijos spartos (R_r). Jei sužadintųjų krūvininkų tankius pažymėsime Δn ir Δp , ir $\Delta n = \Delta p$, tada:

$$R_{sp} = R_{sp0} + R_r = B_{sp}(n_0 + \Delta n)(p_0 + \Delta p) = B_{sp}(n_0 p_0 + \Delta n(n_0 + p_0 + \Delta n)); \quad (1.6)$$

čia

$$R_{sp0} = B_{sp} n_0 p_0; \quad (1.7)$$

ir

$$R_r = R_{sp} - R_{sp0} = B_{sp} \Delta n (n_0 + p_0 + \Delta n). \quad (1.8)$$

Kai sužadinimas yra labai didelis, tada $\Delta n \gg n_0, p_0$, ir pusiausvyrinių krūvininkų rekombinaciją galime atmesti:

$$R_{sp} \approx R_r \approx B_{sp} \Delta n^2 \approx B_{sp} n^2. \quad (1.9)$$

Didėjant sužadintų krūvininkų skaičiui sparčiai auga ir rekombinacija. Bet taip pat dėl juostos užsipildymo efekto didėja ir išspinduliuoto fotono energija (trumpėja spinduliuotės bangos ilgis).

Puslaidininkiuose vyksta ne tik šviesos išspinduliavimas, bet ir sugertis. Yra keletas šviesos sugerties vyksmų: fundamentalioji sugertis, laisvagrūvė sugertis, sugertis per lygmenis draudžiamosios energijos juostoje ir kt. Sugerties intensyvumas nusakomas sugerties koeficientu (pagal Lambero (Lambert) dėsnį):

$$dI = -\alpha_{ab} I dx \quad (1.10 a)$$

arba

$$I = I_0 \exp(-\alpha_{ab} x); \quad (1.10 b)$$

čia I_0 yra pradinis šviesos intensyvumas, I - šviesos intensyvumas nusklidus atstumą x . Sugerties koeficientas (α_{ab} [cm^{-1}]) priklauso nuo spinduliuotės bangos ilgio. Sugerties koeficientui atvirkščias dydis vadinamas sugerties nuotoliu – spinduliuotei nusklidus sugerties nuotolį, šviesos intensyvumas sumažėja e kartų.

Fundamentalioji sugertis – tai elektronų sužadinimas iš valentinės juostos į laidumo apšvietus puslaidininkį. Šviesa, kurios fotono energija yra didesnė už draudžiamosios energijos tarpą, yra sugerama puslaidininkyje (šviesai, kurios fotono energija mažesnė, puslaidininkis yra skaidrus). Mažiausia energija (didžiausias bangos ilgis), ties kuria prasideda šviesos sugertis, vadinama sugerties kraštu (1.4 pav.). Sugerties koeficientas ties sugerties kraštu išreiškiamas taip:

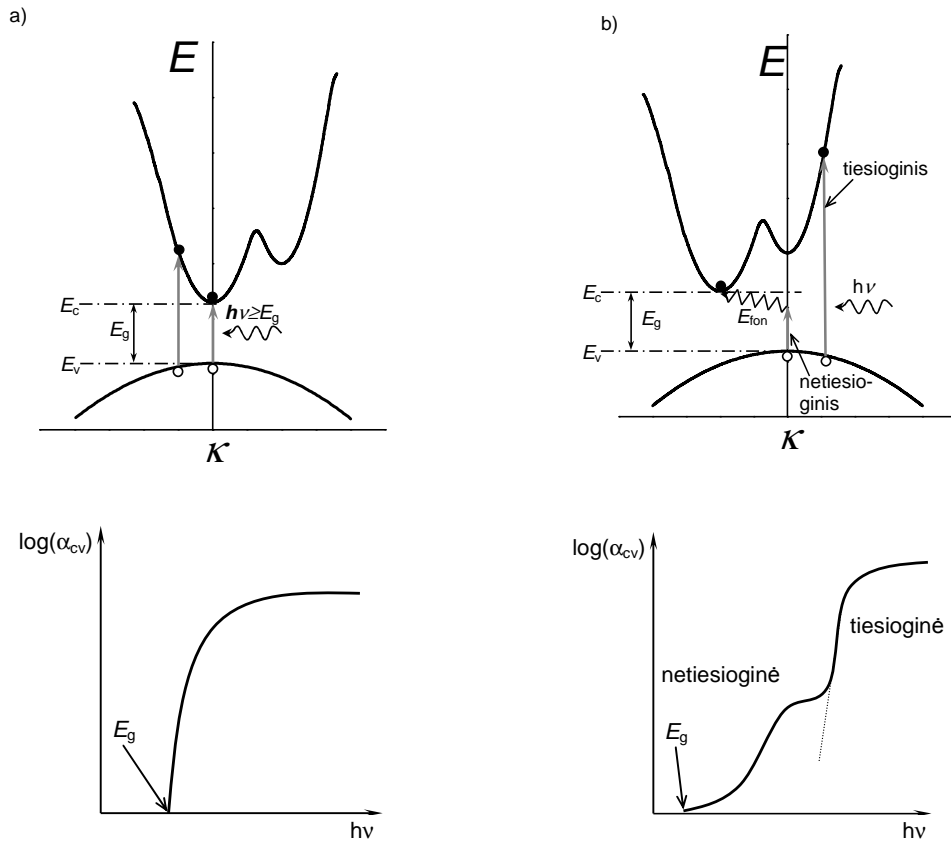
$$\alpha_{cv} \propto (\hbar \nu - E_g)^{1/2} \quad (1.11)$$

tiesioginiams šuoliams ir

$$\alpha_{cvin} \propto (\hbar \nu - E_g \pm E_{fon})^2 \quad (1.12)$$

netiesioginiams ($\hbar \nu$ – kritusio fotono energija). Netiesioginio tarpo puslaidininkiuose, esant didelei fotono energijai, prasideda ir tiesioginė sugertis (1.4 pav.).

Sugerties koeficientas didėjant fotono energijai auga eksponentiškai, po to įsisotina. Tokią sugerties koeficiento priklausomybę nuo energijos nulemia būsenų tankio laidumo juostoje kitimas. Ties sugerties kraštu sugerties koeficientas yra nedidelis, nes laidumo juostos dugne yra mažas būsenų tankis. Fotono



1.4 pav. Fundamentalią šviesos sugertis tiesioginio (a) ir netiesioginio (b) tarpo puslaidininkiuose.

energijai didėjant, elektronai sužadunami į aukštesnius lygmenis, kur būsenų tankis didesnis. Užsipildžius visoms laisvoms būsenoms, sugerties koeficientas įsisotina.

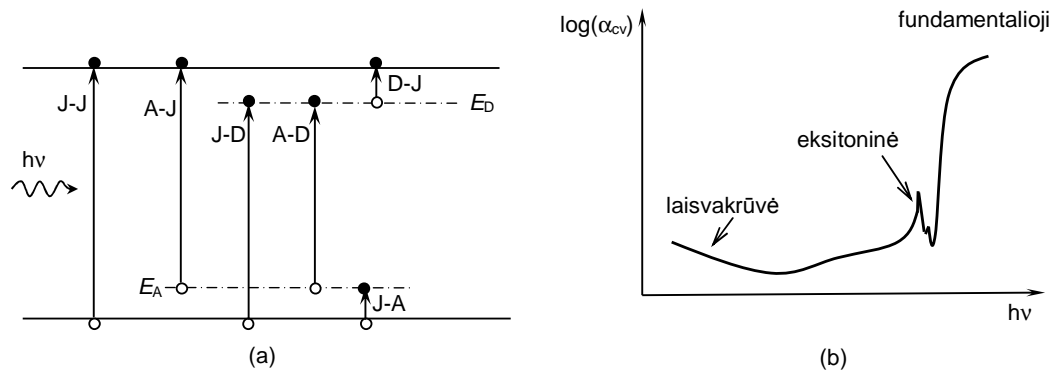
Fundamentalią sugertį įtakoja puslaidininkio legiravimo lygis. Kai medžiagoje yra daug donorinių priemaišų, donorų išlaisvinti elektronai užima apatines laidumo juostos būsenas. Taigi, elektronai iš valentinės juostos turi šokti į didesnės energijos laisvas būsenas. Šiam šuoliui reikia didesnės energijos fotonų - sugerties kraštas pasistumia į aukštesnės energijos pusę. Tačiau donoriai žemiau laidumo juostos dugno sudaro papildomus energijos lygmenis, į kuriuos gali šokti elektronai iš valentinės juostos – sugerties kraštas pasislenka į žemesnės energijos pusę.

Priemaišiniuose puslaidininkiuose šviesos sugertis gali vykti elektronui šokant tarp juostos ir priemaišinio lygmens ar tarp dviejų priemaišinių lygmenų (1.5 pav.).

Labai grynuose puslaidininkiuose žemoje temperatūroje stebima eksitoninė sugertis (eksitonas – elektrono ir skylės pora laikoma tarpusavyje Kulono sąveikos).

Elektronų šuoliai taip pat gali vykti juostoje (pvz., šuoliai tarp sunkiųjų ir lengvųjų skylių lygmenų). Šuoliai juostoje dažniau yra būdingi skyliniams puslaidininkiams. Jų sparta priklauso nuo legiravimo lygio ir temperatūros. Šuoliai juostoje yra viena iš InGaAsP/InP lazerinių diodų blogų temperatūrinių charakteristikų priežasčių.

Elektronai laidumo juostoje gali sugerti fotoną šokdami į aukštesnius lygmenis tame pačiame slėnyje. Impulso tvėrmės dėsnis patenkinamas fononinės ar priemaišinės sklaidos dėka. Tokia sugertis vadinama



1.5 pav. Šviesos sugerties vyksmai (a): J-J – tarpjuostinis šuolis, A-J – šuolis tarp akceptorinio lygmens ir laidumo juostos, J-D – šuolis tarp valentinės juostos ir donorinio lygmens, A-D – šuolis tarp akceptorinio ir donorinio lygmenų, J-A – šuolis tarp valentinės juostos ir akceptorinio lygmens, D-J – šuolis tarp donorinio lygmens ir laidumo juostos) ir sugerties koeficientas (b) tiesioginio tarpo puslaidininkiuose.

laisvavrūvė. Laisvavrūvės sugerties koeficientas yra proporcingas šviesos bangos ilgio kvadratui ir laisvųjų krūvininkų tankiui.

1.5 pav. pateikta šviesos sugerties vyksmų tiesioginio tarpo puslaidininkyje schema ir bendra sugerties koeficiento kokybinė charakteristika.

1.2.2 Priverstinė spinduliuojamoji rekombinacija

Priverstinis spinduliuavimas - tai spinduliuojamosios rekombinacijos rūšis, kurios metu išspinduliuojama koherentinė spinduliuotė. E_g energijos fotonui krintant į sužadintą būseną, sužadintas elektronas juda ta pačia faze kaip ir kritęs fotonas, nes krintančios šviesos poliarizuotų atomų dipolio virpesiai yra sinchronizuoti su krintančios spinduliuotės dažniu. Taigi išspinduliuotos šviesos energija ir fazė sutampa su kritusios spinduliuotės energija ir faze.

Elektronų tankių (n_1 ir n_2) energijos lygmenyse E_1 ir E_2 ($E_2 > E_1$) santykis (Maksvelo ir Bolcmano statistika):

$$\frac{n_2/\rho_2}{n_1/\rho_1} = \exp\left[-\frac{E_2 - E_1}{k_B T}\right]; \quad (1.13)$$

čia ρ_1 ir ρ_2 yra būsenų tankiai lygmenyse E_1 ir E_2 , T – temperatūra, $k_B = 8,617343 \cdot 10^{-5}$ eV/K yra Bolcmano konstanta. Didesnės energijos lygmenyje šiluminėje pusiausvyroje elektronų tankis yra mažesnis nei žemesnės energijos. Tokiomis sąlygomis vyksta tik šviesos sugertis, spinduliuavimas vykti negali. Jei žadinant susidaro sąlygos, kad

$$n_2/\rho_2 > n_1/\rho_1, \quad (1.14)$$

tai krintanti spinduliuotė yra stiprinama ir vyksta priverstinis spinduliuavimas. (1.14) sąlyga yra patenkinama esant neigiamai temperatūrai, todėl tokia būseną vadinama neigiamos temperatūros būseną arba užpildos apgrąža (aukštesniuose energijos lygmenyse yra didesnis elektronų tankis nei žemesniuose).

Fotonams, kurių energija $E_{21} = E_2 - E_1$ ir tankis $n_f(E_{21})$, krintant į sužadintą puslaidininkį, vyksta priverstinė rekombinacija - šuoliai iš E_2 į E_1 , kurių sparta ($r_p(E_{21})$) proporcinga elektronų tankio lygmenyje E_2 ($\rho_c(E_2 - E_c)f_2$), skylių tankio lygmenyje E_1 ($(\rho_v(E_1 - E_v)(1 - f_1))$) ir krintančių fotonų tankio sandaugai:

$$r_p(E_{21}) = B_{21} n_f(E_{21}) \rho_c(E_2 - E_c) f_2 \rho_v(E_1 - E_v) (1 - f_1); \quad (1.15)$$

čia B_{21} yra priverstinių šuolių iš E_2 į E_1 tikimybė, $f_1 = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{E_1 - E_{F_v}}{k_B T}\right]}$, $f_2 = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{E_2 - E_{F_c}}{k_B T}\right]}$, E_{F_v} ir

E_{F_c} yra Fermio kvazilygmenų energija. Priverstinis spinduliavimas yra glaudžiai susijęs su fundamentaliąja sugertimi, kurios sparta proporcinga elektronų tankio lygmenyje E_1 ($\rho_v(E_1 - E_v)f_1$), skylių tankio lygmenyje E_2 ($(\rho_c(E_2 - E_c)(1 - f_2))$) ir krantančių fotonų tankio sandaugai:

$$r_{ab}(E_{12}) = B_{12} n_f(E_{21}) \rho_c(E_2 - E_c) (1 - f_2) \rho_v(E_v - E_1) f_1; \quad (1.16)$$

čia B_{12} yra šuolių iš E_2 į E_1 tikimybė.

Priverstinių šuolių tikimybė skiriasi nuo savaiminių, nes vykstant savaiminiams šuoliams elektronai nesaveikauja su fotonais. Taigi ir savaiminio spinduliavimo sparta nepriklauso nuo fotonų tankio:

$$r_s(E_{21}) = A_{21} \rho_c(E_2 - E_c) f_2 \rho_v(E_v - E_1) (1 - f_1); \quad (1.17)$$

čia A_{21} yra savaiminio šuolio iš E_2 į E_1 tikimybė.

Šiluminėje pusiausvyroje savaiminių ir priverstinių spinduliuojamųjų šuolių sparta atsveria sugerties spartą:

$$r_p(E_{21}) + r_s(E_{21}) = r_{ab}(E_{12}). \quad (1.18)$$

Pusiausvyros atveju galioja: $E_{F_v} = E_{F_c} = E_F$. Iš (1.18) ir juodojo kūno spinduliuotės teorijos (Einšteino sąryšiai):

$$A_{21} = \frac{8\pi^3 E_{21}^2}{h^3 c^3} B_{21} \quad (1.19)$$

ir

$$B_{12} = B_{21}; \quad (1.20)$$

čia n_r yra lūžio rodiklis.

Priverstinis spinduliavimas vyks, kai šuolių iš laidumo į valentinę juostą sparta bus didesnė, nei iš valentinės į laidumo: $r_p(E_{21}) > r_{ab}(E_{12})$. Jei $B_{12} = B_{21}$, tai priverstinio spinduliavimo sąlyga yra $f_2(1 - f_1) > f_1(1 - f_2)$.

Įstačius f_1 ir f_2 išraiškas:

$$\exp\left[\frac{E_{F_c} - E_{F_v}}{k_B T}\right] > \exp\left[\frac{E_2 - E_1}{k_B T}\right] \quad (1.21)$$

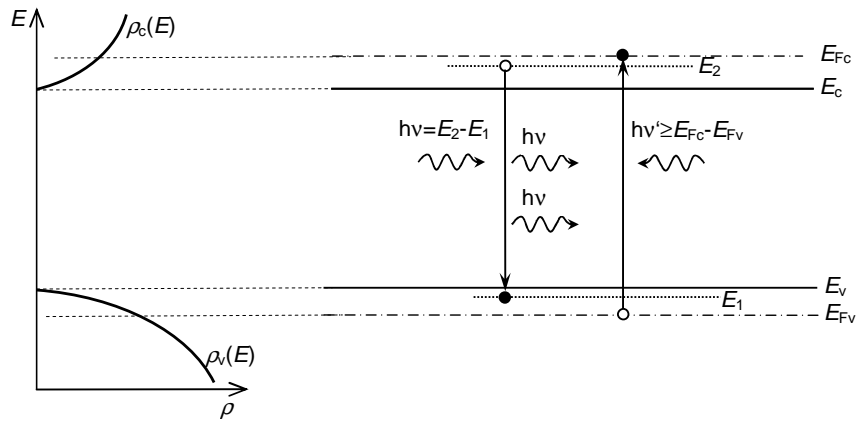
arba

$$E_{F_c} - E_{F_v} > E_2 - E_1. \quad (1.22)$$

Priverstinės rekombinacijos metu išspinduliuoto fotono energija visada yra mažesnė nei energijų skirtumas tarp Fermio kvazilygmenų (1.6 pav.). Kad vyktų priverstinė rekombinacija, turi būti labai didelis krūvininkų tankis - Fermio kvazilygmenys turi atsидurti virš laidumo juostos dugno ir žemiau valentinės juostos viršaus. Tokios sąlygos pasiekiamos lazeriniuose dioduose.

1.2.3 Laisvųjų krūvininkų gyvavimo trukmė

Pilnosios priverstinio spinduliavimo, sugerties ir savaiminio spinduliavimo spartos aprašytos (1.15), (1.16) ir (1.17) sąryšiais, kurie aprašo vyksmus tarp dviejų energijos lygmenų: E_2 ir E_1 , $E_{21} = E_2 - E_1$. Suintegravus (1.15), (1.16) ir (1.17) pagal visas energijos vertes laidumo ir valentinėje juostose, gaunamos koeficientų vertės stebimos eksperimente. Kai priverstinio spinduliavimo sparta yra labai didelė, sugerties koeficientas tampa neigiamas, t. y. spinduliuotė yra stiprinama.



1.6 pav. Priverstinis spinduliavimas ir šviesos sugertis vykstant šuoliams tarp lygmenų E_2 ir E_1 .

Krūvininkų rekombinacijos sparta skyliniame puslaidininkyje (elektronai čia yra šalutiniai krūvininkai) $R(n)$ išreiškiama tūrinės:

$$R_t = \sigma_e v_{th} N_{tp} (n - n_0),$$

paviršinės:

$$R_{pav} = \sigma_{pe} v_{th} N_{pp} A_p (n - n_0) = S_e A_p (n - n_0),$$

Ožė:

$$R_A = Cnp^2$$

ir spinduliuojamosios (1.8) rekombinacijų spartų suma:

$$R(n) = \sigma_e v_{th} N_{tp} (n - n_0) + S_e A_p (n - n_0) + Cnp^2 + B_{sp} \Delta n (n_0 + p_0 + \Delta n); \quad (1.23)$$

čia σ_e ir σ_{pe} yra elektronų pagavimo spartos tūryje ir paviršiuje, N_{tp} ir N_{pp} – pagavimo centrų tankiai tūryje ir paviršiuje, A_p – paviršiaus plotas, $v_{th} = \sqrt{\frac{3k_B T}{m^*}}$ yra šiluminis krūvininkų greitis, m^* - efektinė krūvininkų

masė, $S_e = \sigma_{pe} v_{th} N_{pp}$. Pirmieji du (1.23) dėmenys (tūrinės ir paviršinės rekombinacijos sparta) priklauso nuo kristalo kokybės, trečiasis ir ketvirtasis (Ožė ir spinduliuojamosios rekombinacijos sparta) yra nulemti medžiagos savybių. (1.23) sąryšis galioja ir elektroniniams puslaidininkiams, kuriuose šalutiniai krūvininkai yra skylės. Didelio žadinimo sąlygomis $n \approx \Delta n \gg n_0$, $p \approx \Delta p \gg p_0$ ir $\Delta n = \Delta p$, išraiška (1.23) supaprastėja:

$$R(n) = \sigma_e v_{th} N_{tp} n + S_e A_p n + Cn^3 + B_{sp} n^2. \quad (1.24)$$

(1.24) sąryšis nusako sužadintų krūvininkų rekombinacijos spartą.

Krūvininkų gyvavimo trukmė (trukmė, per kurią sužadintų krūvininkų skaičius dėl rekombinacijos sumažėja e kartų) yra atvirkščiai proporcinga rekombinacijos spartai:

$$\tau_n = \frac{n}{R(n)} = \frac{1}{\sigma_e v_{th} N_{tp} + S_e A_p + Cn^2 + B_{sp} n}. \quad (1.25)$$

Krūvininkų gyvavimo trukmė susideda iš dviejų dalių – gyvavimo trukmių dėl nespinduliuojamosios ir spinduliuojamosios rekombinacijos:

$$\frac{1}{\tau_n} = \frac{1}{\tau_{nsp}} + \frac{1}{\tau_{sp}}; \quad (1.26)$$

čia τ_{sp} yra nulemta savaiminių spinduliuojamųjų šuolių:

$$\tau_{sp} = \frac{\Delta n}{R_{sp}} = \frac{1}{B_{sp}(p_0 + n_0 + \Delta n)}. \quad (1.27)$$

Jei nestipriai legiruotame skyliniame puslaidininkyje žadinimas yra mažas (sužadinti elektronai rekombinuoja su priemaišinėmis skylėmis), tenkinamos sąlygos: $p_0 \gg n_0, p_0 \gg \Delta n$. Tada τ_{sp} išraiška supaprastėja:

$$\tau_{sp} \approx \frac{1}{B_{sp}p_0}. \quad (1.28)$$

Esant stipriam žadinimui (sužadinti elektronai rekombinuoja su sužadintomis skylėmis – bimolekulinė rekombinacija stebima nelegiruotuose ar silpnai legiruotuose puslaidininkuose) - $p_0 \gg n_0, \Delta n \gg p_0$:

$$\tau_{sp} \approx \frac{1}{B_{sp}\Delta n}. \quad (1.29)$$

Spinduliuojančių įtaisų savaiminės spinduliuotės galia pilnai apibrėžiama parametrais, kuriuos aprašo (1.24) ir (1.26) lygtys (neatsižvelgiant į šviesos sugertį, šiai sklindant per įvairius įtaiso sluoksnius, ir atspindį nuo paviršiaus).

Spinduliuojamosios rekombinacijos efektyvumas (vidinis kvantinis našumas) nusakomas krūvininkų gyvavimo trukmės dėl spinduliuojamosios rekombinacijos santykiu su pilnaja krūvininkų gyvavimo trukme (t. y. sužadintų elektronų, rekombinuojančių vykstant spinduliuojamajai rekombinacijai, skaičiaus santykis su visų rekombinuojančių elektronų skaičiumi per vienetinę trukmę):

$$\eta_v = \frac{1/\tau_{sp}}{1/\tau_n} = \frac{1}{1 + \tau_{sp}/\tau_{nsp}}. \quad (1.30)$$

Ištačius τ_{sp} išraišką (1.27):

$$\eta_v = B_{sp}\tau_n(p_0 + n_0 + \Delta n). \quad (1.31)$$

Fotodioduose dalies fotoindukuotos srovės netenkama dėl rekombinacijos, ir įtaiso efektyvumas yra įtakojamas nespinduliuojamosios rekombinacijos. Lazeriniuose dioduose nespinduliuojamoji rekombinacija įtakoja lazerinės veikos slenkstį, tačiau lazerio veikai virš slenkščio turi mažai įtakos. Esant lazerinei veikai, krūvininkų gyvavimo trukmė lazeriniame diode yra nulemta priverstinio spinduliuavimo ir yra ne didesnė kaip 10^{-12} s (savaiminio spinduliuavimo atveju neviršija 10^{-9} s).

1.2.4 Lūžio rodiklis

Medžiagos lūžio rodiklis yra svarbus medžiagos parametras kuriant lazerinius diodus, įvairius bangolaidinius įtaisy (pvz., puslaidininkinius optinius modulatorius). Lūžio rodiklis nusako elektromagnetinių bangų sklaidimo medžiagoje greitį ir yra susijęs su medžiagos dielektrine skvarba ir sugerties koeficientu.

Kompleksinis lūžio rodiklis puslaidininkyje apibrėžiamas taip:

$$n^* = n_r + ik_g; \quad (1.32)$$

čia n_r – lūžio rodiklis, k_g – gesimo koeficientas. Dielektrinė skvarba:

$$\epsilon_s = \epsilon_\infty + \epsilon(f); \quad (1.33)$$

čia ϵ_3 yra santykinė dielektrinė skvarba, ϵ_∞ – aukštadažnė dielektrinė skvarba, $\epsilon(f)$ – narys nulemtas optinio fonono dažnio, kristalo masės ir kt. (dėl šio nario dielektrinės skvarbos priklausomybėje nuo dažnio stebimi staigūs kitimai ties tam tikrais dažniais susiję su dipolio inversija kintamajame elektriniame lauke). Infraraudonosios ir matomos šviesos srityje dielektrinę skvarbą nulemia joninė ir elektroninė poliarizacija. Žemesniuose dažniuose prisideda erdvinė krūvio poliarizacija. Kai dielektriniai nuostoliai yra dideli, medžiagos savybėms apibūdinti naudojama kompleksinė dielektrinė skvarba:

$$\epsilon^* = \epsilon_1 + i\epsilon_2; \quad (1.34)$$

čia

$$\epsilon_1 = n_r^2 - k_g^2 \quad (1.35)$$

ir

$$\epsilon_2 = 2n_r k_g. \quad (1.36)$$

Elektromagnetinės spinduliuotės sugerties koeficientą galime išreikšti taip:

$$\alpha_{ab} = \frac{2\omega k_g}{c} = \frac{2\pi\nu k_g}{c} = \frac{2\pi\nu\epsilon_2}{cn_r}; \quad (1.37)$$

čia ω ir ν yra, atitinkamai, kampinis ir tiesinis spinduliuotės dažnis. Kai medžiagos laidis yra artimas nuliui, tai $n_r \approx \sqrt{\epsilon_1}$ ir $k_g \approx \epsilon_2 \approx 0$, t. y. medžiaga yra skaidri. Tada:

$$n_r \approx \sqrt{\epsilon^*}; \quad (1.38)$$

kur ϵ^* atitinka realią dielektrinės skvarbos dalį.

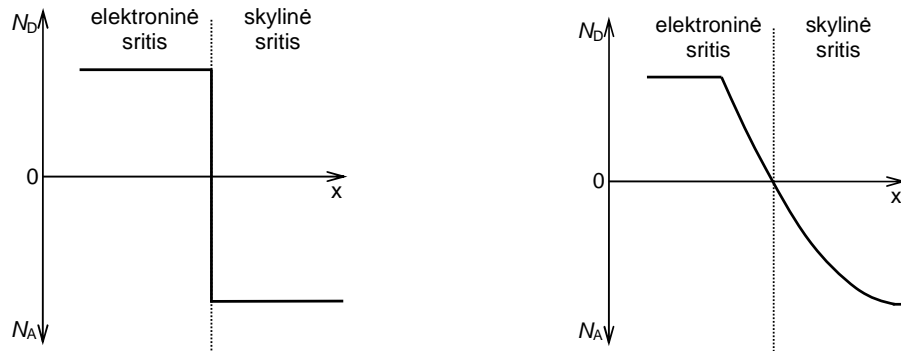
Elektrinės ir optinės puslaidininkių savybės pasikeičia, kai šie yra elektriniame lauke. Tada svarbūs fizikiniai reiškiniai yra smūginė jonizacija ir griūtinis dauginimasis (pvz., fotodiodą maitinant atvirkštine kryptimi), elektrooptinis efektas (Pokelso (Pockels) ir Kero (Kerr) efektai) sukiantis dielektrinės skvarbos pokyčius, Franco (Franz) ir Keldyšo (Keldysh) bei Štarko (Stark) efektai lemiantys lūžio rodiklio ir sugerties koeficiento pokyčius, kvantinis Štarko efektas lemiantis eksitoninę sugertį.

Išsamiau apie puslaidininkinių medžiagų elektrines ir optines savybes galite paskaityti šiose knygose:

1. A. Matulis, Kietojo kūno fizika (Vilnius, Petro ofsetas, 2002).
2. A. Juodviršis, M. Mikalkevičius, S. Vengris, Puslaidininkių fizikos pagrindai (Vilnius, Mokslas, 1985).
3. E. Rosencher, B. Vinter, Optoelectronic (Cambridge University Press, 2002).
4. P. K. Basu, Theory of optical processes in semiconductors; bulk and microstructures (Oxford University Press, 2005).
5. C. C. Coleman, Modern physics for semiconductor science (Wiley-VCH Verlag GmbH&Co., 2008).

1.3 *pn* sandūros ir įvairialyčiai dariniai

Didžioji dalis optoelektronikos įtaisų yra sudaryti iš *pn* sandūrų, jų veikimas pagrįstas *pn* sandūros savybėmis. Krūvininkų injekcija per *pn* sandūrą į laidumo ir valentinę juostas veikiant tiesioginei srovei yra reikalinga spinduliuojamajai rekombinacijai šviesos ir lazeriniuose dioduose, keisti medžiagos sugerties koeficientą ir lūžio rodiklį optinio modulatoriaus bangolaidyje. Fotodioduose šviesos sugeneruotos elektrono ir skylės poros yra išskiriamos į priešingas *pn* sandūros puses - teka fotosrovė. Elektrinis laukas,



1.7 pav. Priemaišų pasiskirstymas staigiojoje (a) ir tolydžiojoje (b) pn sandūroje.

atsirandantis pn sandūrą įjungus atgaline kryptimi, pakeičia sugerties koeficientą ir lūžio rodiklį optinio modulatoriaus bangolaidyje. Taigi pn sandūra yra būtina optoelektronikos įtaisų dalis.

Įvairialyčiai dariniai padidina įtaisų efektyvumą – dauguma pn sandūros įtaisų turi įvairialyčius ir dvigubus įvairialyčius darinius^{2,3,4}.

Sandūra puslaidininkiniuose dariniuose reiškia pereinamąją sritį tarp dviejų dalių besiskiriančių elektrinėmis savybėmis. Pagal naudojamas medžiagas galimos dvi sandūrų rūšys: vienalytis darinys – iš vienos medžiagos rūšies, ir įvairialytis darinys – sandūra iš skirtingų medžiagų. Elektrinių savybių atžvilgiu sandūras galima skirstyti į pn sandūras ir vienodo laidumo darinius (izotipines sandūras - stipriai ir silpnai legiruotų to paties tipo priemaišomis sričių sandūras).

pn sandūra susiformuoja, kai yra skylinio ir elektroninio puslaidininkų kontaktas. pn sandūros pagal gaminimo būdą gali būti difuzinės (kai priemaišos difuzijos būdu patenka į jau užaugintą darinį per jo paviršius) ir užaugintos (kai priemaišos įterpiamos auginimo metu)^{5,6}. pn sandūros profilis gali būti staigus arba tolydus (1.7 pav.).

1.8 pav. pavaizduota krūvininkų difuzija, erdvinio krūvio sritys, sandūroje elektrinis laukas ir potencialas bei energijos juostos sandara staigiojoje pn sandūroje šiluminėje pusiausvyroje. Susilietus skylinei ir elektrinei sritims, dėl skirtingo elektronų ir skylių tankio vienoje ir kitoje srityje elektronai iš elektroninės srities difunduoja į skylinę, o skylės atvirkščiai. Difundavusių elektronų ir skylių srautai yra $-D_e \frac{dn}{dx}$ ir $-D_h \frac{dp}{dx}$, atitinkamai (čia D_e ir D_h yra elektronų ir skylių difuzijos koeficientai). Difundavę elektronai ir skylės palieka jonizuotus donorus ir akceptorius pririštus prie kristalinės gardelės. Šie donorus ir akceptorius sukuria erdvinį krūvį ir elektrinį lauką – erdvinio krūvio (arba nuskurdintąją) sritį. Erdvinis krūvis sukuria elektrinį lauką, kuris stipriausias yra ties pn sandūros riba ir sumažėja iki nulio ties nuskurdintojo sluoksnio kraštu. Šis laukas sustabdo krūvininkų difuziją. Elektroninės srities potencialas yra didesnis nei skylinės, todėl susidaro kontaktinis potencialų skirtumas V_D :

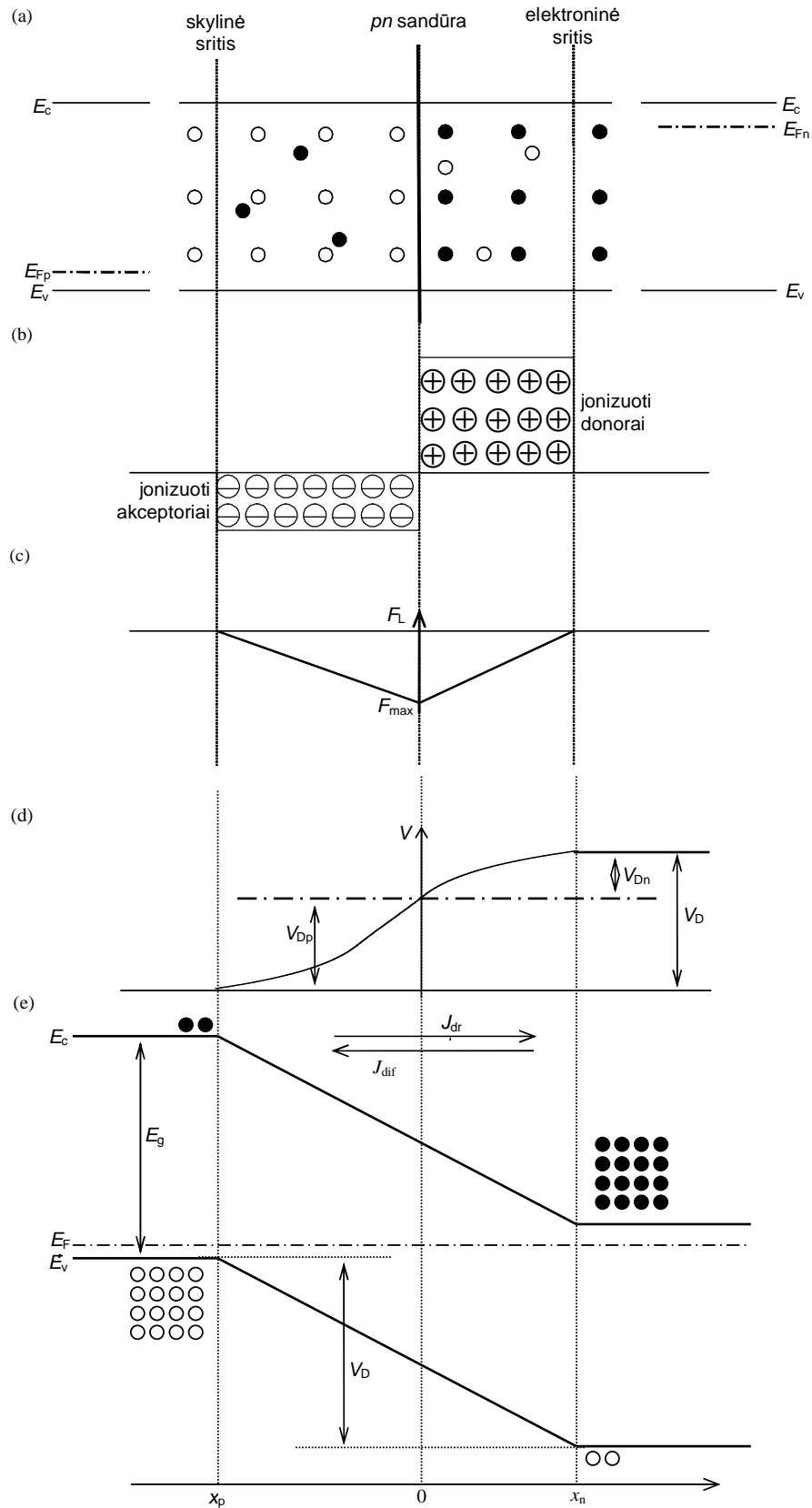
² Z. Alferov, “Double heterostructure lasers: early days and future perspectives”, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 6 pp. 832-840 (2000).

³ S. J. Chang, K. H. Lee, P. C. Chang, Y. C. Wang, C. H. Kuo, and S. L. Wu, “AlGaIn/GaN Schottky barrier photodetector with multi-Mg_xN_y/GaIn buffer”, *IEEE Sensors J.*, 9, pp. 87-92 (2009)

⁴ D.-Y. Chen, M.-W. Shao, L. Cheng, X.-H. Wang, D. D.-D. Ma, “Strong and stable blue photoluminescence: The peapodlike SiO_x@Al₂O₃ heterostructure”, *Appl. Phys. Lett.*, 94, pp.: 043101-3 (2009).

⁵ K. A. Jackson, *Kinetic processes: Crystal growth, diffusion, and phase transitions in material* (Wiley-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA, Weinheim, 2004).

⁶ S. S. Islam, *Semiconductor physics and devices* (Oxford University press, 2006).



1.8 pav. Staigioji pn sandūra šiluminėje pusiausvyroje: (a) energijos juostos sandara bei krūvininkų pasiskirstymas skyliniame ir elektroniniame puslaidininkiuose, (b) erdvinio krūvio sritis sandūroje, (c) elektrinio lauko pasiskirstymas pn sandūroje, (d) potencialo pasiskirstymas pn sandūroje, (e) energijos juostos sandara pn sandūroje šiluminėje pusiausvyroje.

$$V_D = -\int F_D dx; \quad (1.39)$$

čia F_D yra įterptinis laukas. Jei Fermio lygmenys elektroninėje ir skylinėje srityse nesutampa, tai šioms sritims susilietus elektronai ir skylės difunduoja tol, kol Fermio lygmenys susilygina. Šiluminėje

pusiausvyroje difuzijos ($J_{\text{dif}}(x) = J_{e\text{-dif}} + J_{h\text{-dif}} = q \left[D_e \frac{dn}{dx} - D_h \frac{dp}{dx} \right]$) ir dreifo

($J_{\text{dr}} = q(\mu_e n + \mu_h p) F_D$) srovės viena kitą kompensuoja ir srovė neteka.

Įvairialyčiai dariniai yra skirtingų medžiagų sandūros. Įvairialytes sandūras gali sudaryti du skirtingi puslaidininkiai arba puslaidininkis ir metalas. Pagal elektrines savybes įvairialyčiai dariniai gali būti suskirstyti į pn sandūras ir izotipines sandūras. Įvairialytė pn sandūra – skirtingų medžiagų turinčių skirtingo tipo laidumą sandūra; izotipinė įvairialytė sandūra – vienodo laidumo tipo skirtingų medžiagų sandūra.

1.3.1 Įvairialytė pn sandūra

Dažniausiai optoelektronikos įtaisuose pasitaikantis įvairialytis darinys yra sudarytas iš elektroninio laidumo plačiatarpio sluoksnio ir skylinio laidumo sluoksnio su siauru draudžiamosios energijos tarpu (1.9 pav.).

Elektroninis giminiškumas (χ_n) - tai energija reikalinga elektroną išlaisvinti iš laidumo juostos dugno į vakuumą. Elektronų išlaisvinimo darbas (ϕ_n) – energija reikalinga išlaisvinti elektroną iš Fermio lygmens į vakuumą, priklauso nuo krūvininkų tankio ir puslaidininkio laidumo tipo. Sujungiant du puslaidininkius, energijos juostos pasisenka taip, kad susijungtų ties vienoda elektroninio giminiškumo energija. Todėl atsiranda energijos juostų netolydumas (1.9 pav.):

$$\Delta E_c = \chi_p - \chi_n, \quad (1.40)$$

$$\Delta E_v = (\chi_n + E_{gn}) - (\chi_p + E_{gp}) = \Delta E_g - \Delta E_c. \quad (1.41)$$

Sujungus skylinio ir elektroninio laidumo puslaidininkius, skylės ir elektronai difunduoja į priešingo laidumo sritis, kol susilygina Fermio kvazilygmenys. Dėl šios difuzijos susidaro nuskurdintasis sluoksnis, energijos juostos užlinkimai. Įvairialytės sandūros riboje energijos juostos turi įdubimus ir smailes (1.9 pav.). Susidaro kontaktiniai potencialai: qV_{Dp} – skylinėje srityje ir qV_{Dn} – elektroninėje. Visas kontaktinis potencialas yra šių potencialų suma:

$$-qV_D = E_{Fn} - E_{Fp} = -q(V_{Dn} + V_{Dp}). \quad (1.42)$$

Išsprendus Puasono lygtį (kaip ir vienalytei sandūrai) nuskurdintojo sluoksnio plotis elektroninėje ir skylinėje srityse:

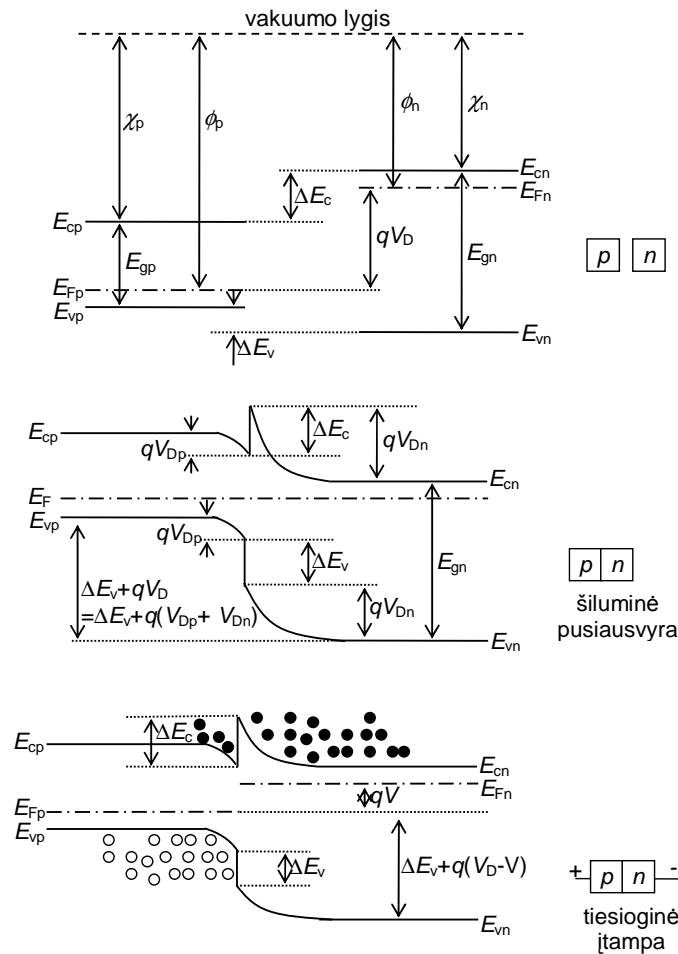
$$x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_{sn}\epsilon_{sp}\epsilon_0 N_A (V_D - V)}{qN_D(\epsilon_{sn}N_D + \epsilon_{sp}N_A)}}, \quad (1.43)$$

$$x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_{sn}\epsilon_{sp}\epsilon_0 N_D (V_D - V)}{qN_A(\epsilon_{sn}N_D + \epsilon_{sp}N_A)}}. \quad (1.44)$$

Viso nuskurdintojo sluoksnio plotis:

$$W = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_{sn}\epsilon_{sp}\epsilon_0 (N_A + N_D)^2 (V_D - V)}{qN_D N_A (\epsilon_{sn}N_D + \epsilon_{sp}N_A)}}. \quad (1.45)$$

Potencialai elektroninėje ir skylinėje srityse susieti taip:



1.9 pav. Įvairialytės pn sandūros energijos juostos sandara.

$$\epsilon_{sn} N_D (V_{Dn} - V_n) = \epsilon_{sp} N_A (V_{Dp} - V_p); \quad (1.46)$$

čia V_p ir V_n yra išorinė įtampa skylinėje ir elektroninėje dalyje ($V = V_p + V_n$), atitinkamai. Jei abiejų sričių lūžio rodikliai yra artimi, tai beveik visa išorinė įtampa yra srityje, kurioje yra mažiau priemaišų.

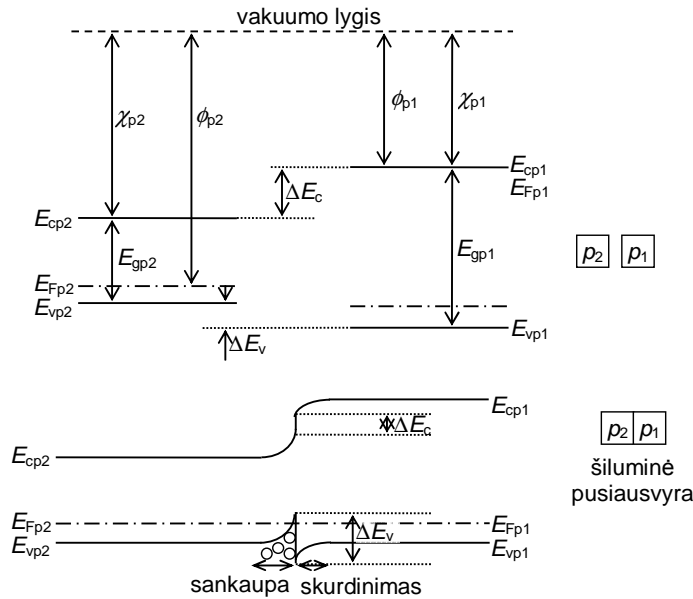
Sandūros talpa (pločio vienetui):

$$C = \sqrt{\frac{q \epsilon_{sn} \epsilon_{sp} \epsilon_0 N_A N_D}{2(\epsilon_{sn} N_D + \epsilon_{sp} N_A)(V_D - V)}}; \quad (1.47)$$

čia ϵ_{sn} ir ϵ_{sp} yra santykinės n ir p sričių dielektrinės skvarbos.

1.3.2 Izotipinė sandūra

Izotipinė įvairialytė sandūra (1.10 pav.) gaunama sujungus skirtingas vienodo laidumo tipo medžiagas (pp , nn). Elektronai ar skylės difunduoja iš medžiagos turinčios didesnę draudžiamosios energijos tarpą, kol susilygina Fermio kvazilygmenys: susidaro energijos juostų užlinkimas, susiformuoja duobės ir iškilimai. Platesnio draudžiamosios energijos tarpo medžiagoje susiformuoja nuskurdintasis sluoksnis, o kitoje pusėje – duobėje, susirenka skylės. pp tipo sandūroje dėl skylių difuzijos energijos juosta platesnio tarpo medžiagoje užlinksta žemyn, mažesnio – į viršų. Ši duobė paprastai yra ne platesnė kaip 20 nm ir suformuoja trikampę potencialinę duobę. Duobėje susirinkusios skylės sudaro dviemates dujas. Energijos juostos netolydumai ir kontaktinis potencialas išreiškiami taip:



1.10 pav. Izotipinės įvairialytės sandūros energijos juostos sandara.

$$\Delta E_c = \chi_{p1} - \chi_{p2}, \quad (1.48)$$

$$\Delta E_v = (\chi_{p1} + E_{gp1}) - (\chi_{p2} + E_{gp2}) = \Delta E_g - \Delta E_c, \quad (1.49)$$

$$-qV_{Dpp} = E_{Fp1} - E_{Fp2} = \phi_{p2} - \phi_{p1}. \quad (1.50)$$

Ši trikampė potencialinė duobė su dvimatėmis krūvininkų dujomis yra svarbi gaminant itin sparčios veikos įtaisus⁷.

1.3.3 Dvigubas įvairialytis darinys

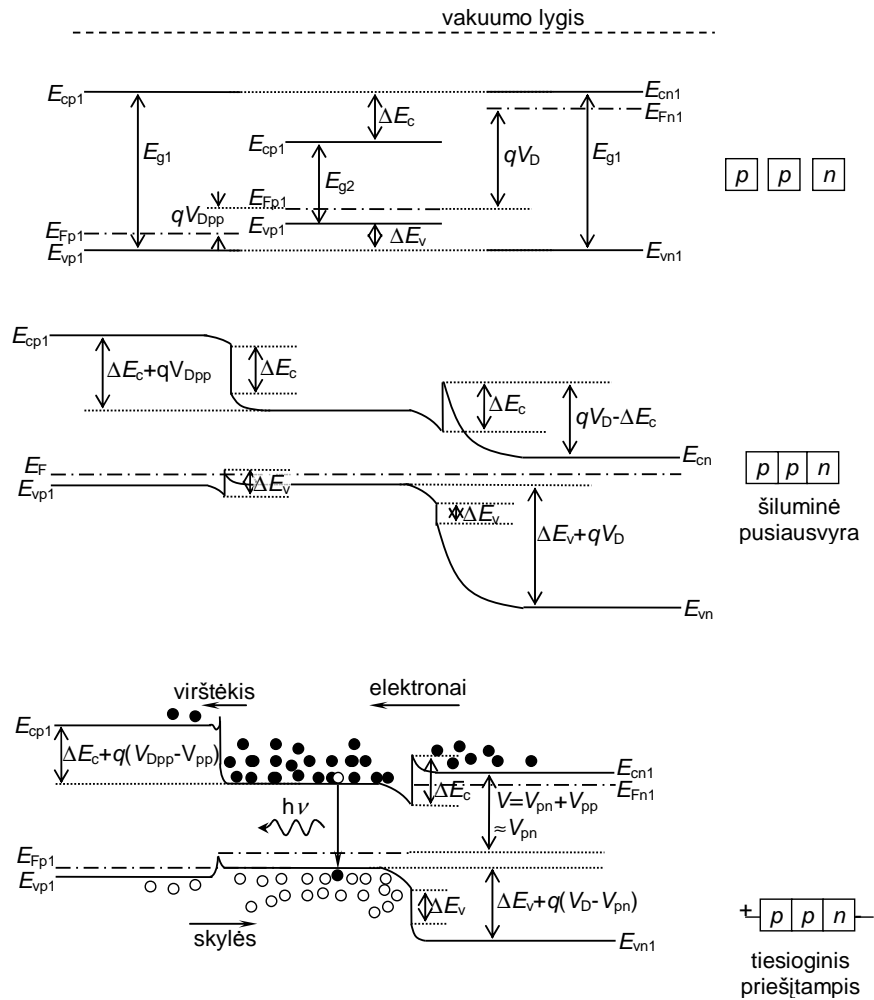
Darinys su dviem įvairialytėmis sandūromis vadinamas dvigubu įvairialyčiu dariniu (DID) (dažniausiai tai *pn* ir izotipinės sandūros darinys). Tokie dariniai itin plačiai naudojami optoelektronikos ir optinio ryšio sistemoms skirtuose įtaisuose, ir plataus vartojimo įrenginiuose (kompaktinių diskų grotuvuose ar fotoaparatuose)^{7,8,9}. Dažniausi dariniai yra tokie: plačiatarpė medžiaga (sluoksnio storis apie 500 nm) – siauratarpė (100 nm – 1500 nm) – plačiatarpė (500 nm). Siauratarpės medžiagos sluoksnio storis priklauso nuo įtaiso rūšies, pvz., lazerinių diodų – (100-200) nm, šviesos diodų – (500-1500) nm.

1.11 pav. pateikta *ppn* DID energijos juostos sandara. Sujungus medžiagas, krūvininkai difunduoja iš plačiatarpės medžiagos į siauratarpę, kol susilygina Fermio lygmenys. Tada dviejuose sandūrų paviršiuose susidaro kontaktiniai potencialai. Esant tiesioginei įtampai V , kontaktiniai potencialai sumažėja dydžiais V_{pp} ir V_{pn} ($V = V_{pp} + V_{pn}$). Kadangi V_{pp} paprastai yra mažas, tai $V \approx V_{pn}$. Taigi elektronai tiesioginės srovės yra injekuojami per *pn* sandūrą ir sulaikomi siaurajuostėje skylinėje srityje (elektronus sulaiko barjeras ties izotipine sandūra ($\Delta E_c + q(V_{Dpp} - V_{pp})$)). Jei injekuotų elektronų tankis skylinėje siaurajuostėje srityje yra didesnis nei skylių, tai krūvio neutralumui išlaikyti iš skylinės plačiauostės srities injekuojamos skylės. Ši

⁷ V. Adivarahan, M. E. Gaevski, Md. M. Islam, B. Zhang, Y. Deng, and M. A. Khan, “Double-Recessed High-Frequency AlInGaN/InGaN/GaN Metal–Oxide Double Heterostructure Field-Effect Transistors”, *IEEE Trans. Electron. Dev.*, 55, pp.: 495-499 (2008).

⁸ R. Hosten, R. Braive, M. Larque, K.-H. Lee, A. Talneau, L. Le Gratiel, I. Robert-Philip, I. Sagnes, A. Beveratos, “Room temperature spontaneous emission enhancement from quantum dots in photonic crystal slab cavities in the telecommunications C band”, *App. Phys. Lett.*, 94, pp.: 123101-3 (2009).

⁹ S. K. Lohokare, O. V. Sulima, V. A. Solov’ev, S. V. Ivanov, and D. W. Prather, “High-performance, 1.55 μ m AlGaAsSb/AlGaSb pin photodetectors”, *IEEE Electron. Lett.*, 40, pp.: 1377-1378 (2004).



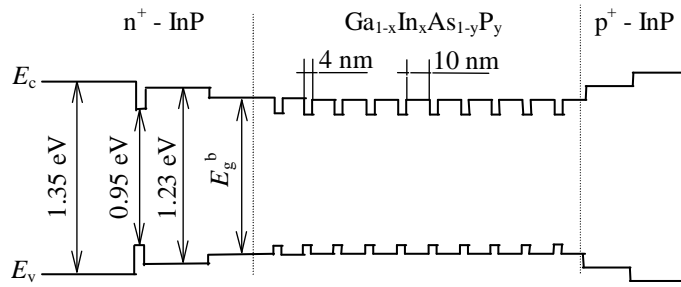
1.11 pav. Dvigubo įvairialyčio darinio energijos juostos sandara.

vienalaikė elektronų ir skylių injekcija vadinama dviguba injekcija. Analogiškame *pnn* darinyje tiesioginė srovė injekuoja skylės į siaurajuostę elektroninę sritį. Dėka dvigubos injekcijos centrinėje siaurajuostėje srityje galima pasiekti labai didelį krūvininkų tankį. Tai labai svarbu spinduliuojantiems įtaisams, nes leidžia pasiekti didelę spinduliuojamosios rekombinacijos spartą⁷.

Auginant įvairialyčius darinius, negalima sluoksniuoti bet kokias medžiagas. Turi sutapti (arba labai mažai skirtis) medžiagų, auginamų viena ant kitos, kristalinės gardelės konstantos. Jei kristalinės gardelės konstantos nesutaps, tokia medžiaga turės begalę defektų atsiradusių dėl dislokacijų. Keletas tinkamų darinių: AlGaAs/GaAs, GaAsP/GaAs, AlInGaP/GaAs, InGaAs/GaAs, InGaN/GaN, InGaAsP/InP, InGaAs/InP.

1.4 Kvantiniai dariniai

Kvantinės duobės yra dariniai panašūs į DİD: plačiajuostės – siaurajuostės – plačiajuostės medžiagų sandūra. Skiriasi tik centrinės siaurajuostės srities plotis. Mažinant centrinės siaurajuostės srities plotį optoelektronikos įtaisų charakteristikos blogėja: didėja lazerinių diodų slenkstinė srovė, nes mažėja krūvininkų sulaikymas; mažėja fotodiodų fotosrovė, nes mažėja sugerties srities plotis. Tačiau šiai sričiai suplonėjus iki elektrono de Broilio (de Broglie) bangos ilgio, stebimi kiti – kvantiniai – efektai (de Broilio bangos ilgis yra keletas dešimčių nanometrų).



1.12 pav. Daugiaduobio kvantinio darinio energijos juostos sandara.

Siaurame sluoksnyje krūvininkų judėjimas statmenai sluoksnio yra sutrikdytas, krūvininko kinetinė energija tampa kvantuota. Dariniai, kuriuose stebimi kvantiniai efektai, vadinami kvantiniais: siaurasis sluoksnis vadinamas potencialine duobe, o šalia esantis plačiatarpis sluoksnis – barjeru. Kvantinės duobės paprastai būna siauresnės nei 10 nm. Darinys gali būti su viena kvantine duobe (VKD) arba daugiaduobis kvantinis darinys (DKD; 1.12 pav.).

Tūriniame darinyje krūvininkai gali laisvai judėti visomis kryptimis, nes sluoksnio matmenys yra didesni už elektrono de Broilio bangos ilgį. Kvantinėje duobėje, kryptimi statmena sluoksniui, krūvininkų judėjimas yra sutrikdytas (kvantinis sulaukymas), o lygiagrečia sluoksniui kryptimi – laisvas. Taigi plokštumoje lygiagrečioje sluoksniui krūvininkų energija yra tolydinė. Statmena kryptimi parabolinis būsenų tankis, kuris yra tūriniame darinyje, turi būti pakeistas dvimačių krūvininkų dujų būsenų tankiu. Dvimačių dujų būsenų tankis arti laidumo juostos dugno išreiškiamas taip:

$$\rho_c(E) = \sum_{\Theta=1}^{\infty} \frac{m_{de}}{(\hbar^2/\pi)H[E - E_{\Theta}]}; \quad (1.51)$$

čia $H[x] = \begin{cases} 1 (x \geq 0) \\ 0 (x < 0) \end{cases}$, E_{Θ} – kvantinis energijos lygmuo, m_{de} – elektrono laidumo juostoje efektinės masės

tankis. Taigi kvantinėje duobėje būsenų tankis kinta šuoliškai (1.13 pav.), o laiptelio dydis yra $\frac{m_{de}}{\hbar^2/\pi}$ -

būsenų tankis nekinta, nors energija ir didėja, kol nepasiekiamas kitas kvantinis energijos lygmuo – tada būsenų tankis padidėja šuoliškai.

Kai barjerai yra pakankamai platus, kvantuotos energijos vertės matuojant nuo laidumo juostos dugno yra:

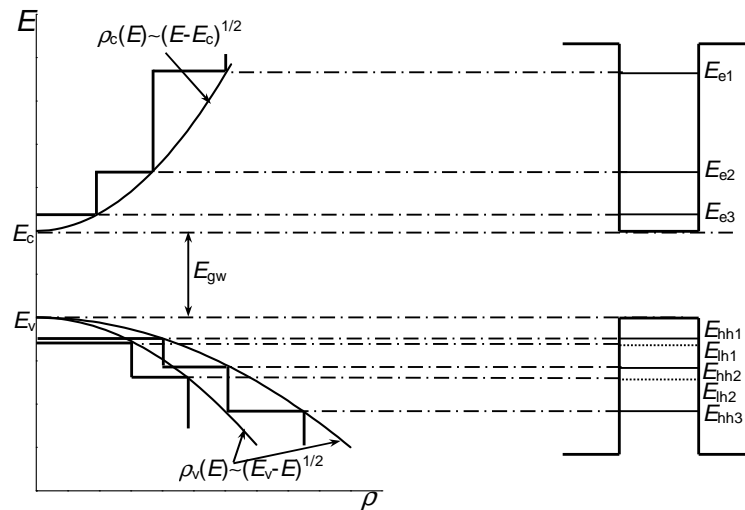
$$E_{\Theta} = \frac{(\hbar/\pi)^2}{2m_{de}} \left(\frac{\Theta\pi}{L_w} \right)^2, \quad \Theta = 1, 2, 3, \dots; \quad (1.52)$$

čia L_w yra duobės plotis. Lygmens energija yra atvirkščiai proporcinga duobės pločio kvadratui – duobei siaurėjant energijos lygmenys kyla nuo laidumo juostos dugno. Analogiškai būsenų tankį galima apskaičiuoti ir sunkioms bei lengvoms skylėms.

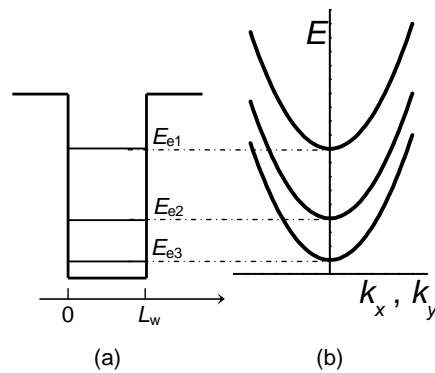
Griežtai kalbant, kadangi lygiagrečiai kvantiniam sluoksniui krūvininkai judėti gali laisvai, tai (1.52) lygtimi apibrėžta energija atitinka pojuosčių dugną (1.14 pav.). Krūvininkų energija kvantinėje duobėje κ erdvėje:

$$E_w = E_{\Theta} + \frac{(\hbar/\pi)^2}{m^* (\kappa_x^2 + \kappa_y^2)}. \quad (1.53)$$

Laiptuota būsenų tankio priklausomybė nuo energijos lemia laiptuotą optinės sugerties spektrą: bangos ilgiui didėjant, pasiekus atitinkamą energiją, sugerties koeficientas šuoliškai sumažėja.



1.13 pav. Būsenų tankis ir kvantuoti energijos lygmenys kvantinėje duobėje.



1.14 pav. Elektronų energijos pojuosčiai kvantinėje duobėje statmena duobei kryptimi (a) ir lygiagrečiai (b).

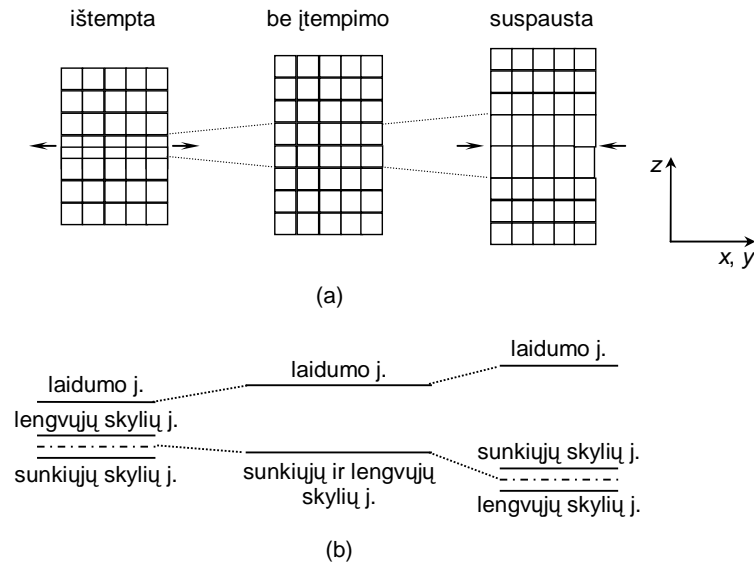
Elektronų šuoliai kvantinėje duobėje skiriasi nuo šuolių tūriniame darinyje dėl susidariusių kvantuotų energijos lygmenų duobėje. Tūriniame darinyje elektronų šuoliai vyksta tarp laidumo ir valentinės juostų, o kvantinėje duobėje – tarp kvantinių lygmenų. Todėl spinduliuotės bangos ilgis (sugerties kraštas) kvantiniuose dariniuose yra trumpesnis (energija yra didesnė). Didžioji šuolių dalis esant žadinimui vyksta tarp žemiausio elektronų lygmens ir sunkiųjų skylių lygmens, nes visi elektronai susirenka žemiausiame lygmenyje, o sunkiųjų skylių būsenų tankis yra didesnis nei lengvųjų. Taigi išspinduliuoto fotono energija:

$$h\nu \approx E_{gw} + E_{e1} + E_{hh1}; \quad (1.54)$$

čia E_{gw} yra duobės medžiagos draudžiamosios energijos tarpas.

Šviesos sugertis gali vykti tarp įvairių energijos pojuosčių. Be to kvantiniuose dariniuose gana žymi yra eksitoninė sugertis. Kvantinėse duobėse eksitoninė sugertis stebima ir kambario, ir aukštesnėje temperatūroje (tūriniuose dariniuose eksitoninę sugertį galima stebėti tik labai grynuose puslaidininkiuose žemoje temperatūroje), nes kvantinėje duobėje yra didesnė eksitono ryšio energija ir sugerties koeficientas. Eksitoninės sugerties sparta yra atvirkščiai proporcinga duobės pločiui, ir sugerties spektre eksitoninės smailės stebimos arti draudžiamojo tarpo energijos. Eksitoninė sugertis yra svarbi optiniuose modulatoriuose ir perjungikliuose, nes didžiausia eksitoninės sugerties energija elektriniame lauke pasislenka į ilgesnių bangų pusę.

Auginant įvairialyčius darinius medžiagų kristalinės gardelės konstantos turi sutapti. Jei gardelės nesutampa,



1.15 pav. Gardelės įtempimo nulemti energijos juostos pokyčiai: (a) gardelės sandara, (b) energijos juostos sandara.

tai tokia darinyje bus labai daug defektų, kurie sukuria nepageidaujamas paviršines būsenas ir taip pablogina įtaiso veikimo charakteristikas. Tačiau, jei kristalinės gardelės konstantų skirtumas neviršija kelių procentų, o duobė nėra storesnė nei tam tikras kritinis storis, tai toks sluoksnis gali būti užaugintas be dislokacijų⁵. Tokia duobė vadinama įtemptąja. Dėl gardelių nesutapimo atsiradęs įtempimas, jei sluoksnio storis neviršija kritinės vertės, yra elastingas, ir dislokacijos nesusidaro. InGaAs/GaAs, Si/Ge dariniai paprastai yra įtemptieji kvantiniai dariniai. Įtempimas gali būti dviejų tipų: ištempimas ir suspaudimas (1.15 pav.). Kristalinės gardelės deformacija lemia energijos juostos pokyčius: pasislenka laidumo ir valentinės juostų kraštai, pakinta sunkiųjų ir lengvųjų skylių juostos. Draudžiamosios energijos tarpas priklauso nuo įtempimo charakteristikų. Keičiant įtempimą galima keisti spinduliuotės bangos ilgį ir šviesos sugerties kraštą^{10,11,12}. Pvz., InGaAs/GaAs 980 nm lazeris naudojamas erbiu legiruotiems skaiduliniais stiprintuvams kaupinti – toks bangos ilgis nėra gaunamas naudojant medžiagas sutampančiomis kristalinėmis gardelėmis¹³. Įtemptuose dariniuose taip pat sumažėja efektinė krūvininkų masė. Dėl to sumažėja būsenų tankis. Tai, pvz., leidžia sumažinti lazerinių diodų slenkstinę srovę⁴.

Optoelektronikos įtaisuose naudojami ir mažesnio mato kvantiniai dariniai: kvantiniai siūlai (1D), kvantiniai taškai (0D). Kvantiniame siūle krūvininkai laisvai gali judėti tik viena kryptimi. Kvantiniame taške krūvininkai visiškai neturi galimybių laisvai judėti. Kuo mažesnis darinio matas, tuo mažesnis būsenų tankis.

Kai kvantinės duobės labai siauros (<5 nm), elektronai gretimose duobėse pradeda sąveikauti vieni su kitais per kvantmechaninį tuneliavimo mechanizmą, ir iš kvantinių energijos lygmenų susidaro minijuostos. Toks darinys vadinamas supergardele ir yra tarsi nauja medžiaga, kurios efektinis draudžiamosios energijos tarpas yra lygus tarpui tarp elektronų ir skylių minijuostų.

¹⁰ J. J. Coleman, "Strained-layer InGaAs quantum-well heterostructure lasers", *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 6, pp. 1008-1013 (2000)

¹¹ D. M. Follstaedt, S. R. Lee, A. A. Allerman, J. A. Floro, "Strain relaxation in AlGaIn multilayer structures by inclined dislocations", *J. Appl. Phys.*, 105, pp. 083507-13 (2009.)

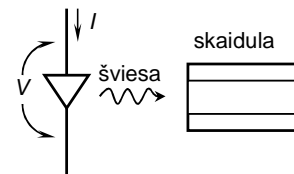
¹² Y. H. Kim, H. J. Park, K. Kim, C. S. Kim, W. S. Yun, J. W. Lee, M. D. Kim, "Strain distribution and interface modulation of highly lattice-mismatched InN/GaN heterostructure nanowires", *Appl. Phys. Lett.*, 95, pp.: 033112-3 (2009).

¹³ D. P. Xu, J. Y. T. Huang, J. H. Park, L. J. Mawst, T. F. Kuech, I. Vurgaftman, J. R. Meyer, "Characteristics of dilute-nitride GaAsSbN/InP strained multiple quantum wells", *Appl. Phys. Lett.*, 90, pp.: 171913-3 (2007).

2. Šviesos šaltiniai

Šviesos šaltinis yra pagrindinis optinės ryšio sistemos siųstuvo elementas. Optinės ryšio sistemos siųstuvas paverčia elektrinį įėjimo signalą moduliutu optiniu signalu, kuris sklinda optine skaidula (2.1 pav.). Dažniausiai naudojamas šviesos šaltinis yra šviesos arba lazerinis diodas. Siųstuvo charakteristikos nulemia visos sistemos charakteristikas, todėl naudojami įtaisai turi būti itin kokybiški ir patikimi. Be to dažniausiai tai yra brangiausias sistemos elementas. Lazeriniai diodai yra brangesni už šviesos, tačiau jų veikimo charakteristikos yra geresnės (2.1 lentelė).

Šiame skyriuje aptartos šviesos ir lazerinių diodų sandaros ypatybės, veikos charakteristikos ir jų panaudojimo optinėse ryšio sistemose ypatumai.



2.1 pav. Šviesos ar lazerinis diodas paverčia elektrinį signalą optiniu.

2.1 Šviesos diodai

Šviesos diodo (ŠD) veikimas yra paremtas optinėmis ir elektrinėmis pn sandūros savybėmis. Dauguma komercinių ŠD yra gaminami iš III-V lydinių. Taip pat naudojami II-VI medžiagos (ZnS, ZnSe). Priklausomai nuo medžiagos, iš kurios pagamintas aktyvusis (spinduliuojantysis) sluoksnis, šviesos diodų spinduliuotės bangos ilgis gali būti įvairus: InGaAsP, InP ŠD spinduliuotės bangos ilgis yra nuo 1300 nm iki 1550 nm^{1,2,3} ir jie gali būti naudojami optinėse ryšio sistemose; GaAs, AlGaAs ŠD spinduliuoja 780 nm –

2.1 lentelė. Šviesos ir lazerinių diodų charakteristikų palyginimas.

Charakteristika	Šviesos diodas	Lazerinis diodas
Atiduodama galia	tiesiškai proporcinga srovei	virš slenkščio proporcinga srovei
Srovė	valdymo srovė: (50-100) mA	slenkstinė srovė: (5-40) mA
Galios surinkimas	vidutinis	didelis
Spinduliuotės diagrama	platesnė	siauresnė
Juostos plotis	vidutinis	didelis
Bangos ilgis	(0,66-1,65) μm	(0,78-1,65) μm
Spektro plotis	platus ((40-190) nm)	siauresnis ((0,00001-10) nm)
Naudojama optinė skaidula	tik daugiamodė	daugiamodė ir vienmodė
Naudojimo sudėtingumas	paprasta	sudėtingiau
Veikimo trukmė	ilgesnė	trumpesnė
Kaina	maža ((5-300) USD)	didelė ((100-10000) USD)

¹ N. Tansu, J.-Y. Yeh, L. J. Mawst, "Improved photoluminescence of InGaAsN-(In)GaAsP quantum well by organometallic vapor phase epitaxy using growth pause annealing", *Appl. Phys. Lett.*, 82, pp.: 3008 – 3010 (2003).

² S. H. Pyun, S. H. Lee, I. C. Lee, H. D. Kim, W. G. Jeong, J. W. Jang, N. J. Kim, M. S. Hwang, D. Lee, J. H. Lee, D. K. Oh, "Photoluminescence and lasing characteristics of InGaAs/InGaAsP/InP quantum dots", *J. Appl. Phys.*, 96, pp.: 5766 – 5770 (2004).

³ Y. Takahashi and H. Kawaguchi, "Strain-Dependence of the Gain Saturations in InGaAsP/InP Quantum-Well Gain Media", *IEEE J. Quantum Electron.*, 38, pp.: 1384-1389 (2002).

900 nm srityje^{4,5,6} ir taip pat naudojami ryšio sistemose, duomenų persiuntimo sistemose, nuotolinio valdymo įtaisuose, etc. Ekranams ir indikatoriams naudojami ŠD spinduliuojantys matomą šviesą (pvz., mėlynos ((450-480) nm) ir baltos šviesos diodai gaminami iš ZnS, GaN, InGaN^{7,8,9}).

Optinėse ryšio sistemose šviesos diodai naudojami dėl keleto priežasčių:

- jie yra maži;
- jų spinduliuotė gana galinga;
- spinduliavimo diagrama pakankamai siaura;
- galima aukštadažnė moduliacija;
- ilgaamžiai ir patikimi;
- pigūs.

Šviesos diodai naudojami daugelyje sričių. Reikalavimai ŠD naudojamiems optinėse ryšio sistemose skiriasi nuo naudojamų, pvz., indikatoriams. Optinėse ryšio sistemose naudojamų ŠD spinduliuotės bangos ilgis dažniausiai yra infraraudonojoje srityje. Taip pat ryšio sistemose naudojamų ŠD spinduliavimo diagrama yra žymiai siauresnė, siekiant pagerinti šviesos surinkimą į optinę skaidulą bei garantuoti didelį moduliacijos juostos plotį. 2.2 lentelėje pateiktos ŠD savybės, svarbios optinėse ryšio sistemose.

2.2 lentelė. Šviesos diodų charakteristikos.

Charakteristika	Apibūdinimas	Įprastos vertės
Smailinis bangos ilgis	Bangos ilgis, ties kuriuo spinduliuotės galia yra didžiausia. Turi sutapti su bangos ilgiu, kuriam yra mažiausi nuostoliai optinėje skaiduloje.	780 nm 850 nm 1310 nm
Spektro plotis	Dalis spinduliuotės išspinduliuojama ne smailiniam bangos ilgiui.	
Spinduliuotės diagrama	Nulemia spinduliuotės kiekį, kuris bus sėkmingai surinktas į optinę skaidulą. Geriausia, kai į skaidulą surenkama kiek įmanoma didesnė spinduliuotės dalis. Spinduliavimo plotas turi būti palyginamas su skaidulos šerdies plotu.	
Galia	Šaltinio spinduliuotės galia turi būti pakankama užtikrinti reikiamą galią imtuve atsižvelgiant į visus galimus nuostolius.	ŠD galia yra mažesnė nei lazerinių diodų.
Sparta	Šviesos šaltinis turi būti pakankamai spartus ir atitikti sistemos juostos pločio reikalavimus.	ŠD kilimo ir kritimo trukmės yra didesnės nei lazerinių diodų.
Tiesiškumas	Parodo, kiek tiesiškai didėja spinduliuotės galia didėjant šaltinio srovei. Tiesiškumas yra svarbus analoginėms sistemoms, skaitmeninėms - mažiau svarbus. ŠD netiesiškumas lemia netiesinius iškraipymus analoginėse sistemose.	

⁴ K.-F. Huang, F.-M. Lee, C.-W. Hu, T.-C. Peng, M.-C. Wu, C.-C. Lin, T.-P. Hsieh, J.-I. Chyi, "1.32 μm InAs/GaAs quantum-dot resonant-cavity light-emitting diodes grown by metalorganic chemical vapor deposition", *J. Vacuum Science & Technol. B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 24, pp.: 1922 – 1924 (2006).

⁵ O. Kwon, J. Boeckl, M. L. Lee, A. J. Pitera, E. A. Fitzgerald, S. A. Ringel, "Growth and properties of AlGaInP resonant cavity light emitting diodes on Ge/SiGe/Si substrates", *J. Appl. Phys.*, 97, pp.: 034504-5 (2005).

⁶ J.-M. Ulloa, A. Hierro, J. Miguel-Sanchez, A. Guzman, A. Trampert, J. L. Sanchez-Rojas and E. Calleja, "Optoelectronic properties of 2-D and 3-D-grown GaInNAs/GaAs QW light emitting diodes and laser diodes", *IEE Proc.-Optoelectron.*, 151, (2004).

⁷ Sh.-J. Chang, W. S. Chen, S. C. Shei, C. T. Kuo, T. K. Ko, C. F. Shen, J. M. Tsai, W.-Ch. Lai, J.-K. Sheu, and A. J. Lin, "High-Brightness InGaN–GaN Power Flip-Chip LEDs", *J. Lightwave Technol.*, 27, pp.: 1985-1989 (2009).

⁸ T. Jung, L. K. Lee, and P.-C. Ku, "Novel Epitaxial Nanostructures for the Improvement of InGaN LEDs Efficiency", *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 15, pp.: 1073-1079 (2009).

⁹ S. Nizamoglu, H. V. Demir, "Excitation resolved color conversion of CdSe/ZnS core/shell quantum dot solids for hybrid white light emitting diodes", *J. Appl. Phys.*, 105, pp.: 083112-5 (2009).

Kuriant šviesos diodus siekiama gauti kuo didesnę spinduliuotės galią naudojant kuo mažesnę įėjimo galią. Paprastai ŠD efektyvi savaiminė spinduliuotė pasiekama naudojant dvigubą įvairialyčių darinį^{10,11}. Infraraudonųjų ŠD, naudojamų optinėse ryšio sistemose, taip pat raudonos – geltonos šviesos ŠD aktyvioji sritis dažniausiai yra tūrinis darinys. Tūrinius darinius yra lengviau (ir pigiau) pagaminti nei kvantinius. Mėlynos, žalios, baltos šviesos ŠD aktyvioji sritis gali būti daroma iš kvantinių darinių^{12,13}, naudojami nitridiniai sluoksniai (InGaN/GaN, GaN/AlGaN)^{7,8}. 2.3 lentelėje pateikiamos populiaresnės šviesos diodų medžiagos. Keletas būdingų ŠD darinių pateikti 2.2 pav.

Įprasti ŠD šviesą spinduliuoja visomis kryptimis vienodai. Tačiau galima padaryti ŠD, kurie spinduliuoja tik viena kuria kryptimi: į viršų arba į šoną (2.2 pav.). Viršun spinduliuojančiuose ŠD šviesa sklinda kryptimi statmena pn sandūrai (2.2 (a) pav.). Tai pasiekama dalį darinio padengus sluoksniu, kuriame spinduliuotė sugerama. Šviesa sklinda tik per paliktą šiuo sluoksniu neuždengtą (nuėsdintą) plotą – „lango“. Spinduliuavimo plotą galima riboti ir sudarant tokias sąlygas, kad didelis injekcinės srovės tankis būtų tik aktyviojoje srityje (panaudojant dielektriko sluoksnį (2.2 (a) pav.)).

Į šoną šviečiančiuose ŠD spinduliuotė sklinda lygiagrečiai pn sandūrai (2.2 (b) pav.) – gretimų sluoksnių lūžio rodilis yra mažesnis nei aktyviojo (sandūros) sluoksnio, susidaro bangolaidis, ir spinduliuotė sklinda lygiagrečiai sluoksniams. Šių ŠD spinduliuotės galia yra kur kas didesnė, nes aktyviojoje srityje išspinduliuota šviesa sklinda tik lygiagrečiai vienai plokštumai kryptimi, o ne visomis kryptimis (viršun spinduliuojančių šviesos diodų spinduliuotė sklindanti kitomis, ne išspinduliuavimo „lango“ kryptimis, yra tiesiog prarandama). Taip pat į šoną šviečiančių ŠD spinduliuavimo plotas yra labai mažas ((30-50) μm).

2.3 lentelė. Šviesos diodų gamybai naudojamos medžiagos.

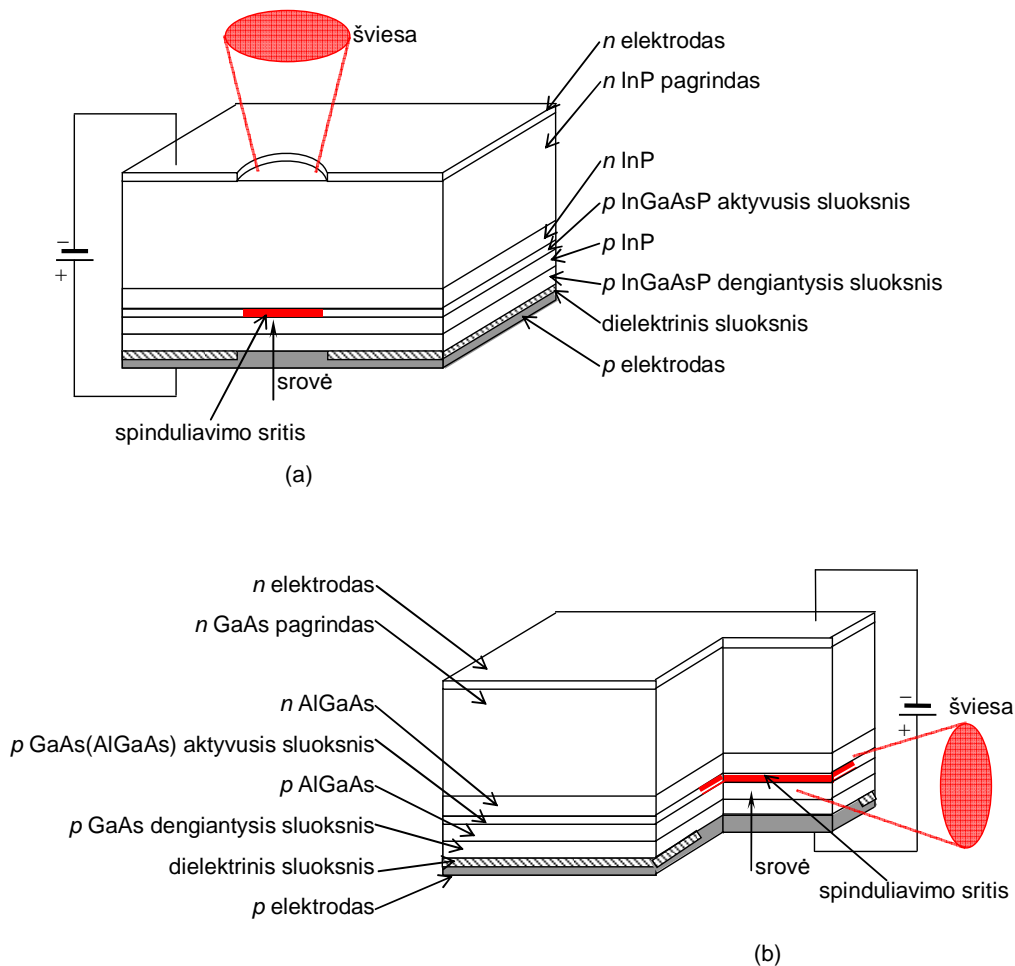
Bangos ilgis, nm	Aktyviojo sluoksnio medžiaga	Šuoliai	Išorinis kvantinis efektyvumas, %
470	ZnS:Al		<0,1
450-530	InGaN/GaN (KD)	Tiesioginiai	>5
565	GaP:N	Netiesioginiai	<0,2
590	GaAs _{0,15} P _{0,85} :N	Netiesioginiai	0,3
590-620	AlInGaP	Tiesioginiai	>2
610	GaAs _{0,25} P _{0,75} :N	Netiesioginiai	0,3
630	GaAs _{0,35} P _{0,65} :N	Netiesioginiai	0,4
650	GaAs _{0,6} P _{0,4}	Tiesioginiai	0,2-0,5
680	Al _{0,35} Ga _{0,65} As	Tiesioginiai	3-7
700	GaP:Zn-O	Netiesioginiai	1-4
850	Al _{0,03} Ga _{0,97} As	Tiesioginiai	3-7
860	GaAs	Tiesioginiai	2-3
1300	In _{0,76} Ga _{0,24} As _{0,55} P _{0,45}	Tiesioginiai	1-2
1550	In _{0,65} Ga _{0,35} As _{0,79} P _{0,21}	Tiesioginiai	1-2

¹⁰ S. J. Chang, L. W. Wu, Y. K. Su, C. H. Kuo, W. C. Lai, Y. P. Hsu, J. K. Sheu, J. F. Chen, and J. M. Tsai, “Si and Zn Co-Doped InGaN–GaN White Light-Emitting Diodes”, *IEEE Trans. Electron Dev.*, 50, pp.: 519-521 (2003).

¹¹ L. B. Chang, P. Y. Kuei, L. Z. Hsieh, L. Y. Chang, R. M. Lin, “Study of AlGaInP multiquantum-well/double heterostructure light-emitting diodes with In-added GaP window layer regrown by antimony-based liquid phase epitaxy”, *J. Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 22, pp.: 807 – 810 (2004).

¹² K.-Y. Kuo, J.-Y. Chang, M.-C. Tsai, Sh.-H. Yen, “Advantages of blue InGaN multiple-quantum well light-emitting diodes with InGaN barriers”, *Appl. Phys. Lett.*, 95, pp.: 011116-3 (2009).

¹³ C.-H. Yen, Y.-J. Liu, T.-P. Chen, L. -Y. Chen, T.-H. Tsai, and W.-Ch. Liu, “On an AlGaInP Light-Emitting Diode With a Modulation-Doped Multiquantum-Well (MD-MQW) Structure”, *IEEE J. Quantum Electron.*, 45, pp.: 367-372 (2009).



2.2 pav. Būdingi šviesos diodo dariniai: a) į viršų spinduliuojantis su dvigubu įvairialyčiu dariniu, b) į šoną spinduliuojantis.

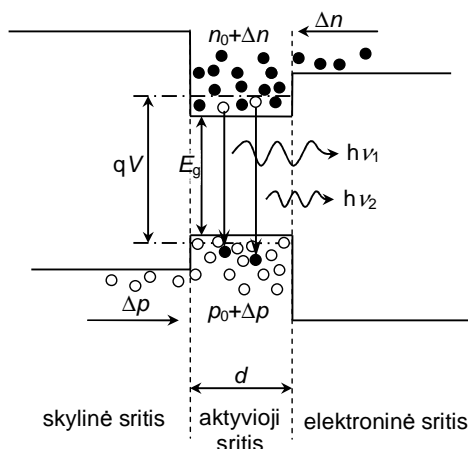
Į viršų šviečiantys ŠD yra paprastesni, pigesni, jų pilnutinė išėjimo galia yra didesnė. Tačiau dėl didesnio spinduliavimo ploto yra sunkiau surinkti spinduliuotę į optinę skaidulą – surenkamos spinduliuotės galia mažesnė.

2.1.1 Šviesos diodo veikimo principai

Šviesos diodo spinduliuotė yra savaiminė dėl injekuotųjų krūvininkų savaiminės spinduliuojamosios rekombinacijos aktyviojoje srityje (2.3 pav.). Injekavus tam tikrą elektronų skaičių į aktyviają sritį, elektriniam neutralumui palaikyti injekuojama tiek pat skylių. Kadangi aktyviosios srities plotis (keletas mikrometrų: (0,5–2,0) μm) yra mažesnis už krūvininkų difuzijos nuotolį, tai injekuotieji krūvininkai joje pasiskirsto tolygiai. Krūvininkų tankis aktyviojoje srityje esant injekcijai:

$$\begin{aligned} n &= n_0 + \Delta n, \\ p &= p_0 + \Delta p, \\ \Delta n &= \Delta p; \end{aligned} \tag{2.1}$$

čia n_0 ir p_0 yra elektronų ir skylių tankis šiluminėje pusiausvyroje ($n_0 p_0 = n_i^2$), Δn ir Δp – injekuotųjų krūvininkų tankiai. Elektronų ir skylių spinduliuojamosios rekombinacijos sparta aktyviojoje srityje yra



2.3 pav. Energijos juostos diagrama ir krūvininkų pasiskirstymas tekant tiesioginei srovei DĮD ŠD darinyje.

baigtinė, todėl krūvininkų tankis aktyviojoje srityje nuolat kinta. Į skylinę aktyviają sritį, kurios plotis d , injekuotų elektronų tankio kitimas:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{J}{qd} - R_{sp} = \frac{J}{qd} - \frac{\Delta n}{\tau_e}; \quad (2.2)$$

čia J yra injekcinės srovės tankis, R_{sp} – savaiminės spinduliuojamosios rekombinacijos sparta, τ_e – elektrono gyvavimo skyliniame aktyviajame sluoksnyje trukmė. Į elektroninį sluoksnį injekuotų skylių tankio kitimas:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{J}{qd} - R_{sp} = \frac{J}{qd} - \frac{\Delta p}{\tau_h}; \quad (2.3)$$

čia τ_h yra skylių gyvavimo trukmė. Krūvininkų tankį aktyviojoje srityje nulemia du vyksmai: krūvininkų injekcija (pirmasis (2.2) ir (2.3) lygčių narys) ir spinduliuojamoji rekombinacija (antrasis (2.2) ir (2.3) lygčių narys). Normaliomis ŠD veikos sąlygomis injekuotųjų krūvininkų tankis aktyviojoje srityje yra ne mažesnis nei 10^{17} cm^{-3} .

Didėjant priemaišų tankiui, didėja Ože rekombinacijos, tarpjuostinės sugerties ir nespinduliuojamosios rekombinacijos tikimybė (žr.: 1 skyrių). Todėl aktyvioji ŠD sritis daroma silpnai legiruota. Taigi skylinėje aktyviojoje srityje $n \approx \Delta n$, o elektroninėje srityje - $p \approx \Delta p$, ir:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{J}{qd} - \frac{n}{\tau_e}, \quad (2.4)$$

$$\frac{dp}{dt} = \frac{J}{qd} - \frac{p}{\tau_h}. \quad (2.5)$$

Nuostovioje veikoje (kokia ir yra ŠD tekant pastoviai srovei) krūvininkų tankis aktyviojoje srityje yra pastovus, t. y. $\frac{dn}{dt} = 0$ ir $\frac{dp}{dt} = 0$. Tada iš (2.4) ir (2.5):

$$n \approx \Delta n = \frac{\tau_e J}{qd}, \quad (2.6)$$

$$p \approx \Delta p = \frac{\tau_h J}{qd}. \quad (2.7)$$

Šviesos diodo spinduliuotės galia yra proporcinga išspinduliuojamų fotonų skaičiaus ir fotono energijos ($h\nu$) sandaugai. Savaiminės rekombinacijos metu išspinduliuojamų fotonų skaičius lygus vienetiniame

aktyviosios srities tūryje injekuotų krūvininkų skaičiui $\left(\frac{J}{qd}\right)$ padauginam iš vidinio kvantinio našumo (η_v ; vidinis kvantinis našumas išreiškiamas išspinduliuotų fotonų skaičiaus santykiu su injekuotų krūvininkų skaičiumi). Taigi vienetiniame aktyviosios srities tūryje išspinduliuojama galia yra

$$P_a = h\nu \frac{\eta_v J}{qd}. \quad (2.8)$$

Ištačius vidinio kvantinio našumo išraišką (1.30):

$$P_a = h\nu \frac{J}{qd} B_{sp} \tau_n \left(p_0 + n_0 + \frac{\tau_n J}{qd} \right); \quad (2.9)$$

čia τ_n yra injekuotųjų krūvininkų (elektronų (τ_e) arba skylių (τ_h)) gyvavimo trukmė. Kai injekcija yra silpna ($p_0, n_0 \gg \frac{\tau_n J}{qd}$), skyliniam sluoksniui ($p_0 > n_0$):

$$P_{a-p} = h\nu B_{sp} p_0 \frac{\tau_e J}{qd}; \quad (2.10)$$

elektroniniam:

$$P_{a-n} = h\nu B_{sp} n_0 \frac{\tau_h J}{qd}. \quad (2.11)$$

Esant stipriai injekcijai: $p_0, n_0 \ll \frac{\tau_n J}{qd}$, ir

$$P_a = h\nu B_{sp} \left(\frac{\tau_n J}{qd} \right)^2. \quad (2.12)$$

Spinduliuotės galia priklauso tik nuo krūvininkų gyvavimo trukmės ir injekcinės srovės tankio: žemo žadinimo sąlygomis spinduliuotės galia yra tiesiogiai proporcinga srovės tankiui, o didelio žadinimo atveju – srovės tankio kvadratui. Krūvininkų gyvavimo trukmė kintant krūvininkų tankiui kinta lėtai. Realiomis sąlygomis šios išraiškos nėra tikslios dėl temperatūrinių efektų.

2.1.2 Spinduliuojamieji šuoliai šviesos dioduose

Į aktyviają šviesos diodo sritį injekuotų šalutinių krūvininkų gyvavimo trukmę nulemia įvairūs spinduliuojamieji ir nespinduliuojamieji vyksmai. Tiesioginių šuolių puslaidininkiuose vyrauja šie spinduliuojamieji šuoliai: juosta – juosta, juosta – priemaiša, priemaiša – priemaiša. Minėtieji šuoliai nėra efektyvūs netiesioginių šuolių puslaidininkiuose. ŠD pagamintuose iš netiesioginių šuolių puslaidininkių dominuoja surišųjų eksitonų rekombinacija per izoelektroninius centrus. Šie centrai atsiranda kristalo auginimo metu pakeičiant pagrindinės medžiagos atomą priemaišiniu atomu su tokiu pačiu valentinių elektronų skaičiumi. Izoelektroninis centras lengvai pagauna elektroną ir tampa neigiamai jonizuotu. Skylė yra pritraukiama prie centro, ir suformuojamas surištas eksitonas. Tokio eksitono rekombinacijos tikimybė yra didelė, ir nereikia fonono pagalbos. Tokius izoelektroninius centrus galima suformuoti azoto atomais GaP, GaAsP medžiagose. Rekombinacijos per izoelektroninius centrus kvantinis našumas yra kiek mažesnis nei tiesioginių šuolių medžiagose.

2.1.3 Šviesos diodo spinduliuotės charakteristika

Šviesos diodo aktyviojoje srityje išspinduliuotos šviesos galia niekada nesutampa su ta, kurią spinduliuoja įtaisas. Kadangi savaiminė spinduliuotė sklinda visomis kryptimis, tai ŠD su korpusu spinduliuotė sklindanti tik per vieną kurį tai paviršių yra tik dalis (keletas procentų) visos spinduliuotės. ŠD spinduliuotės charakteristikos (spinduliuotės galios priklausomybės nuo srovės (LI)) polinkis (efektyvumas) yra labai mažas (0,02 W/A; 2.4 pav.). Išorinis (įtaiso) efektyvumas yra nusakomas išėjimo spinduliuotės galios (P_{is}) ir elektrinės įėjimo galios (P_{e-i}) santykiu, išreikštu procentais:

$$\eta_{cv} \equiv \frac{P_{is}}{P_{e-i}} \cdot 100\% . \quad (2.13)$$

Paprastai ŠD efektyvumas neviršija 5 %. ŠD efektyvumui nusakyti taip pat naudojamas išorinis kvantinis našumas – išspinduliuotų fotonų skaičiaus santykis su injekuotų elektronų skaičiumi:

$$\eta_{is} = \frac{P_{is}/h\nu}{I/e} \cdot 100\% = \frac{P_{is}}{IE_g} \cdot 100\% ; \quad (2.14)$$

čia I ir $E_g = h\nu/e$ yra injekcinė srovė ir draudžiamosios energijos tarpas [eV] aktyviojoje srityje. Išorinis efektyvumas ir išorinis kvantinis našumas susiję taip:

$$\eta_{cv} = \eta_{is} \frac{E_g}{V_s} ; \quad (2.15)$$

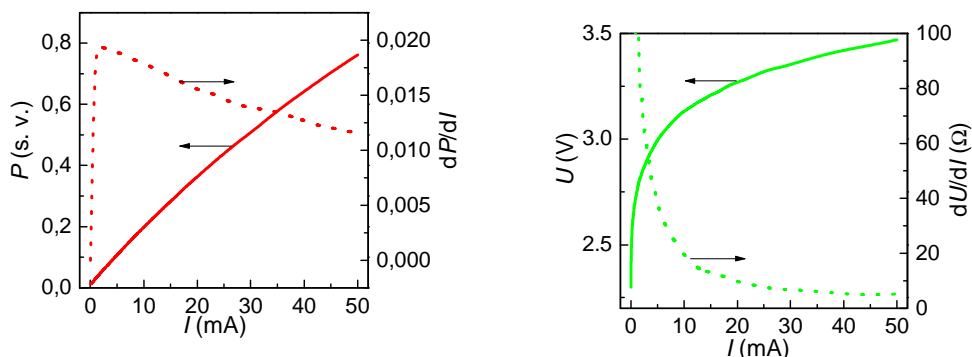
čia V_s yra pn sandūros įtampa, išreikšta elektronvoltais ($P_{e-i} = IV_s$). Jei V yra maitinimo įtampa, o R – nuosekloji visos grandinės varža, tai $V_s = V - RI$. Įprastai V_s yra didesnis nei E_g , nes srovė tekanti diodu pradeda didėti įtampai viršijus draudžiamosios energijos tarpą. Taigi įtaiso efektyvumas yra mažesnis, nei išorinis kvantinis našumas. Išorinis kvantinis našumas gali būti išreikštas vidinio kvantinio našumo (santykis spinduliuojamuoju būdu rekombinavusių krūvininkų skaičiaus su visų rekombinavusių krūvininkų skaičiumi) ir išėjimo efektyvumo (santykis galios, išspinduliuotos aktyviojoje srityje, su galia, išspinduliuojama ŠD išorėn (η_{out})), sandauga:

$$\eta_{is} = \eta_v \eta_{out} . \quad (2.16)$$

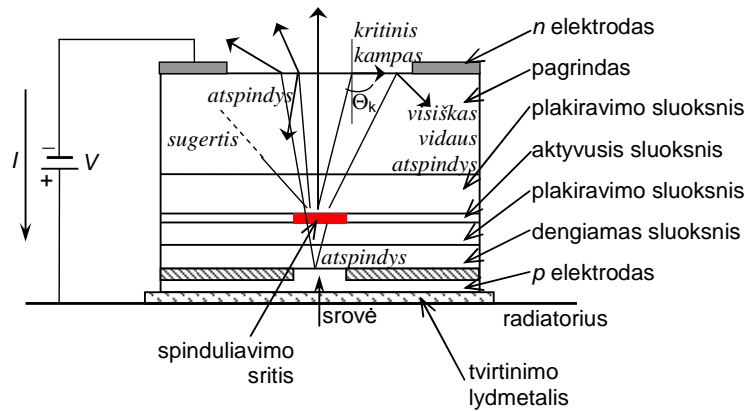
Tada ŠD išspinduliuojama galia:

$$P_{is} = \eta_{out} S_a d_a P_a ; \quad (2.17)$$

čia S_a ir d_a yra paviršiaus, per kurį spinduliuojama, plotas ir aktyviojo sluoksnio storis. Spinduliuotės



2.4 pav. Būdingos šviesos diodo spinduliuotės ir voltamperinė charakteristikos (InGaN 470 nm).



2.5 pav. Faktoriai ribojantys šviesos diodo išėjimo spinduliuotės galią.

charakteristikos polinkis (atsakas) išreiškiamas pirmąja spinduliuotės galios išvestine pagal srovę:

$$\eta_s = \frac{dP_{is}}{dI} = \eta_{out} \frac{dP_a}{dI} = \eta_{out} \eta_v S_a d_a \frac{d(J/qd_a)}{dI} = \eta_{is} \frac{hv}{q} = \frac{1,24\eta_{is}}{\lambda (\mu m)} [W/A]. \quad (2.18)$$

Išėjimo efektyvumas priklauso nuo spinduliuotės sugerties pagrindo sluoksnyje ir atspindžių nuo sluoksnių paviršių bei viso kristalo paviršiaus^{14,15,16} (2.5 pav.).

Iki šiol atsižvelgta tik į spinduliuojamąją rekombinaciją, kuri įtakoja vidinį kvantinį našumą. Tačiau realiuose įtaisuose vyksta ir nespinduliuojamoji rekombinacija. Jei legiravimo lygis neviršija 10^{18} cm^{-3} ir sluoksnio storis yra tinkamas (aptarta toliau), tai nespinduliuojamosios rekombinacijos įtaka labai maža. Tokiu atveju vidinis kvantinis našumas yra artimas vienetui. Nespinduliuojamoji rekombinacija (generacinė - rekombinacinė srovė, paviršinė rekombinacinė srovė, kurios paprastai yra iki kelių dešimčių miliamperų) sumažina išorinį galios našumą.

ŠD veikos charakteristikoms labai svarbi yra aktyviosios srities sandara. Aktyvioji sritis paprastai daroma siauresnė nei injekuotųjų krūvininkų difuzijos nuotolis. Tuo siekiama padidinti krūvininkų sulaikymą ir pasiekti didelį injekuotųjų krūvininkų tankį aktyviojoje srityje bei tolygų jų pasiskirstymą. Tolygus krūvininkų pasiskirstymas reikalingas tam, kad didelio krūvininkų tankio srityje išspinduliuota šviesa nebūtų sugerta mažesnio krūvininkų tankio srityje (spinduliuotės bangos ilgis didelio krūvininkų tankio srityje yra mažesnis nei mažesnio krūvininkų tankio srityje (juostos užpildymo reiškinys)).

Kaip jau minėta, krūvininkų tankis aktyviojoje srityje yra atvirkščiai proporcingas srities storiui. Taigi didėjant injekcinei srovei, krūvininkų tankis didėja. Tačiau esant dideliame krūvininkų tankiui prasideda intensyvi Ože rekombinacija (Ože rekombinacijos sparta proporcinga krūvininkų tankio kubui). Ypač aktuali Ože rekombinacija yra įtaisuose su siauratarpės medžiagos aktyviąja sritimi (InGaAs, InGaAsP). Tokiuose dariniuose didėja ne tik žemiausios energijos krūvininkų skaičius, bet daugėja ir krūvininkų užimančių aukštesnius energijos lygmenis. Susidaro šių krūvininkų virštėkis virš barjero, ir krūvininkai išteka iš aktyviosios srities. Taigi begalinis aktyviojo sluoksnio ploninimas nebepagerina spinduliuotės galios charakteristikų. Krūvininkų difuzijos nuotolis GaAs, AlGaAs, InGaAs, InGaAsP medžiagose yra apie (2-

¹⁴ M. K. Lee, C. L. Ho, C. H. Fan, "High light extraction efficiency of gallium nitride light emitting diode with silicon oxide hemispherical microlens", *Appl. Phys. Lett.*, 92, pp.: 061103-3 (2008).

¹⁵ C. C. Yang, C. F. Lin, C. M. Lin, C. C. Chang, K. T. Chen, J. F. Chien, C. Y. Chang, "Improving light output power of InGaN-based light emitting diodes with pattern-nanoporous p-type GaN:Mg surfaces", *Appl. Phys. Lett.*, 93, pp.: 203103-3 (2008).

¹⁶ Y.-K. Ee, R. A. Arif, N. Tansu, P. Kumnorkaew, J. F. Gilchrist, "Enhancement of light extraction efficiency of InGaN quantum wells light emitting diodes using SiO₂/polystyrene microlens arrays", *Appl. Phys. Lett.*, 91, pp.: 221107-3 (2007).

3) μm . Todėl aktyvusis sluoksnis paprastai yra daromas (0,5-2) μm . Aktyviosios srities storis taip pat svarbus ir dėl spinduliuotės charakteristikos tiesiškumo. Tiesinė spinduliuotės galios priklausomybė nuo injekcinės srovės svarbi įtaisuose naudojamuose telekomunikacijų sistemose, ypač analoginėse.

2.1.4 Voltamperinė šviesos diodo charakteristika

Šviesos diodo voltamperinė charakteristika aprašoma lygtimi:

$$I = A_{\text{pn}}(J_{\text{dif}} + J_{\text{NR}}) + A_{\text{pav}}J_{\text{pav}} \propto \exp\left(\frac{qV}{ak_{\text{B}}T}\right); \quad (2.18)$$

čia A_{pn} ir A_{pav} yra pn sandūros ir pn sandūros paviršiaus (priklauso nuo pn sandūros paviršiaus ir nuskurdintojo sluoksnio storio) plotai, J_{dif} – difuzijos srovės tankis, J_{NR} – generacinės rekombinacinės srovės per giliuosius centrus nuskurdintajame sluoksnyje tankis, J_{pav} – paviršinės rekombinacijos srovės tankis, a – diodo neidealumo faktorius (paprastai, jo vertė yra tarp 1 ir 2).

ŠD voltamperinę charakteristiką įtakoja daugelis veiksnių. Įprastų veikimo srovių srityje dominuoja difuzinė srovė:

$$I = S_{\text{a}}J_{\text{S0}} \exp\left[\frac{q(V_{\text{b}} - R_{\text{s}}I)}{k_{\text{B}}T}\right]; \quad (2.19)$$

čia R_{s} yra nuosekioji diodo varža.

Diodu tekanti srovė pradeda sparčiai didėti, kai įtampa pasiekia draudžiamosios energijos tarpo dydį (pvz.: 0,8 V InGaAsP/InP DİD ŠD). Diferencialinė varža apibrėžiama pirmąja srovės (2.19) išvestine:

$$\frac{dV_{\text{b}}}{dI} = \frac{k_{\text{B}}T}{q} \frac{1}{I} + R_{\text{s}}. \quad (2.20)$$

Injekcinei srovei didėjant, diferencialinė varža mažėja, kol pasiekia nuosekliosios varžos dydį – keletą omų (2.4 pav.).

2.1.5 Temperatūrinės šviesos diodų charakteristikos

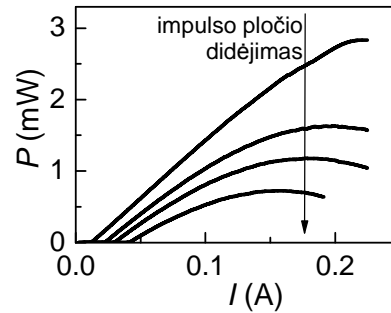
Optoelektronikos įtaisų charakteristikas ir ilgaamžiškumą labai įtakoja jų temperatūrinės savybės^{17,18}.

Tiesiogine kryptimi veikiančių įtaisų patikimumui ir charakteristikoms ypač svarbi yra aktyviosios srities temperatūra. Ji nulemia spinduliuotės charakteristiką. Aktyviosios srities temperatūra kyla dėl injekcijos (Džaulio (Joule) šilumos) arba aplinkos temperatūros (2.6 pav.). Spinduliuotės galia žymiai skiriasi maitinant diodą nuolatine srove ir impulsine dėl skirtingo išsiskiriančio Džaulio šilumos kiekio. Didėjant nuolatinei injekcinei srovei spinduliuotės galios didėjimas įsisotina, nes aktyviosios srities ir kitų ominių sričių temperatūra sparčiai didėja. Impulsinėje veikoje šviesos diodo spinduliuotės charakteristika yra tiesinė, nes diodo kaitimas yra nežymus (jei impulsų plotis neviršija kelių mikrosekundžių). Sandūros temperatūra tolygiai didėja didėjant impulso pločiui.

Pamatuoti sandūros temperatūrą yra sudėtinga. Ją galima įvertinti pagal spinduliuotės bangos ilgio poslinkį, matuojant spinduliuotės galią. Reikia išmatuoti spinduliuotės galios kitimą impulsinėje veikoje keičiant

¹⁷ X. Luo, W. Xiong, T. Cheng, S. Liu, “Temperature estimation of high-power light emitting diode street lamp by a multi-chip analytical solution”, *IET Optoelectronics*, 3, pp.: 225 – 232 (2009).

¹⁸ L. Yang, J. Hu, and M. W. Shin, “Dynamic Thermal Analysis of High-Power LEDs at Pulse Conditions”, *IEEE Electron Dev. Lett.*, 29, pp.: 863-866 (2008).



2.6 pav. Šviesos diodo spinduliuotės charakteristikos augant sandūros temperatūrai (didėjant maitinimo srovės impulso pločiui).

aplinkos temperatūrą. Sandūros temperatūra nuolatiniėje veikoje bus laikoma ta, kurią atitiks galia išmatuota impulsinėje veikoje. Temperatūros kitimas išreiškiamas šilumine varža [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$], kuri atitinka aktyviosios srities temperatūros padidėjimą kintant įėjimo galiai. Šiluminę varžą nulemia visų diodo sluoksnių, kontaktų bei korpuso šiluminis laidumas. Sandūros temperatūros pokytis apskaičiuojamas taip:

$$\Delta T_s = R_{\xi} IV_s ; \quad (2.21)$$

čia IV_s yra gaunama galia, R_{ξ} – šiluminė varža. Bendru atveju keturgubų ar trigubų junginių šilumos laidumas yra mažesnis, nei dvigubų ar vienkomponenčių. Aktyviosios srities kaitimo mažinimas ir šilumos nuvedimas yra efektyvus būdas didinti spinduliuotės galią.

Temperatūrinę spinduliuotės charakteristiką nulemia keletas faktorių. Kambario temperatūroje vyrauja injekuotųjų krūvininkų virštėkis iš aktyviosios srities, aukštesnėje temperatūroje – Ože rekombinacija ir rekombinacija juostoje.

Aplinkos temperatūra taip pat smarkiai įtakoja ŠD spinduliuotės galią. Sandūros temperatūrai didėjant vidinis kvantinis našumas mažėja, nes mažėja spinduliuojamosios rekombinacijos koeficientas ir didėja krūvininkų nuotėkis (virštėkis) iš aktyviosios srities. Siaurajuostės medžiagos aktyviosios srities ŠD taip pat sustiprėja Ože rekombinacija. Spinduliuotės galios pokytis kylant temperatūrai yra didesnis ilgabanguose ŠD nei trumpabanguose.

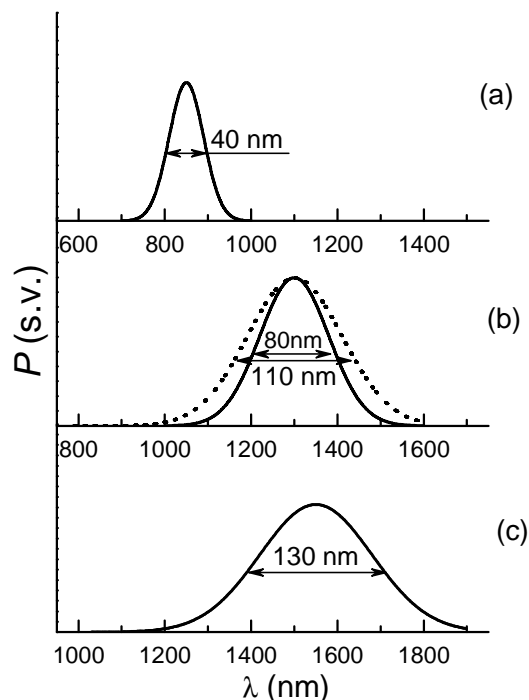
Voltamperinė ŠD charakteristika taip pat kinta kintant temperatūrai, nes nuo temperatūros priklauso draudžiamosios energijos tarpas. Tiesioginė (difuzinė) srovė pradeda tekėti, kai diodo įtampa pasiekia draudžiamosios energijos tarpo vertę. Žemoje temperatūroje draudžiamosios energijos tarpas kinta kaip temperatūros kvadratas. Tačiau kambario temperatūroje mažėja didėjant temperatūrai:

$$\frac{dE_g}{dT} = -\alpha ; \quad (2.22)$$

čia α yra temperatūrinis draudžiamosios energijos tarpo koeficientas [eV/K]. Taigi temperatūrai didėjant, diodu teka ta pati srovė esant mažesnei įtampai.

2.1.6 Šviesos diodo spinduliuotės spektras

Šviesos diodo spinduliuotės spektras atitinka savaiminės spinduliuotės spektrą, kuris yra nulemtas tiesioginių šuolių juosta - juosta. Kiti spinduliuojamieji šuoliai platina ŠD spinduliuotės spektrą. Tiesioginių šuolių atveju spinduliuotės bangos ilgis praktiškai sutampa su energijos skirtumu tarp Fermio kvazilygmenų (tiesioginių šuolių puslaidininkuose skylės ir elektronai pasiskirsto arti šuolių lygmenų):



2.7 pav. Būdingi šviesos diodų spinduliuotės spektrai: (a) 850 nm AlGaAs/GaAs ŠD, (b) 1300 nm InGaAsP/InP ŠD (ištiesinė linija – į viršų spinduliuojančio ŠD spektras, taškinė – į šoną spinduliuojančio ŠD), (c) 1550 nm InGaAsP/InP (25 °C, 100 mA).

$$\lambda_p \approx \frac{1,24}{E_g + (E_{Fc} - E_c) + (E_v - E_{Fv})} [\mu\text{m}]. \quad (2.23)$$

Taigi mažėjant draudžiamosios energijos tarpui spinduliuotės bangos ilgis didėja. ŠD spektro plotis (pusės aukščio lygyje) yra apie 40 nm (850 nm AlGaAs/GaAs ŠD), 110 nm (1300 nm InGaAsP/InP ŠD), 130 nm (1550 nm InGaAsP/InP ŠD). LI charakteristikos ir spinduliuotės spektras yra tokie patys ir į viršų, ir į šoną spinduliuojančių ŠD - skiriasi tik spektro plotis. Spinduliuotei sklindant išilgai aktyviosios srities (į šoną spinduliuojančiuose ŠD) dalis trumpabangių fotonų yra vėl sugeriami. Taigi šių ŠD spinduliuotės spektras yra siauresnis (2.7 (b) pav.).

Didėjant injekcinei srovei (ir injekuojamųjų krūvininkų skaičiui) energijos juostos užpildomos pradėdant nuo dugno. Taigi Fermio kvazilygmenys slenka tolyn nuo juostų dugno – didėja energijos skirtumas tarp šių lygmenų. Fermio kvazilygmuo laidumo juostoje tolsta nuo jos dugno greičiau nei valentinėje, nes laidumo juostoje būsenų tankis yra mažesnis nei valentinėje. Energijų skirtumo didėjimas mažina spinduliuotės bangos ilgį (juostos užpildymo efektas). Šis juostos užpildymo efektas pastebimas ŠD veikiant impulsine veika, kai nėra kaitimo efekto. ŠD veikiant nuolatine veika pasireiškia draudžiamosios energijos tarpo mažėjimas dėl temperatūros kilimo. Taigi nuolatinėje veikoje dažniausiai stebimas spinduliuotės bangos ilgio didėjimas. Dėl tos pačios priežasties spinduliuotės bangos ilgis kinta ir kintant aplinkos temperatūrai. Temperatūrinį spinduliuotės bangos ilgio kitimą aprašo formulė (gauta panaudojant (2.22)):

$$\frac{d\lambda_p}{dT} \approx \frac{1,24d(E_g^{-1})}{dT} \approx -1,24E_g^{-2} \frac{dE_g}{dT} \approx -1,24\alpha E_g^{-2}. \quad (2.24)$$

Kambario temperatūroje spinduliuotės bangos ilgio kitimas proporcingas draudžiamosios energijos tarpo temperatūriniam kitimui ir atvirkščiai proporcingas energijos tarpo kvadratui. Spinduliuotės bangos ilgio kitimas yra tuo didesnis, kuo mažesnis aktyviosios srities medžiagos draudžiamosios energijos tarpas.

2.1.7 Moduliacijos charakteristikos

Šviesos diodai spinduliuojantys infraraudonąją spinduliuotę (780 - 1550) nm srityje yra naudojami kaip šviesos šaltiniai optiniuose tinkluose. Paprastai infraraudonosios spinduliuotės ŠD gaminami iš tiesioginių šuolių puslaidininkių. Trumpų nuotolių optiniuose tinkluose gali būti naudojami ir matomąją šviesą spinduliuojantys ŠD. Optinėse ryšio sistemose ŠD spinduliuotė yra moduluojama sudedant signalo srovę su maitinimo srove arba tiesiog šviesos diodą maitinant signalo srove. Pagrindinis reikalavimas keliamas moduliacijai: spinduliuotės galia turi atitikti moduluojančios srovės stiprį – signalo srovės kitimas paverčiamas spinduliuotės intensyvumo moduliacija (2.8 pav.). Intensyvumo moduliacijos atveju atsakas mažėja didėjant moduliacijos dažniui. Yra keletas vidinių ir išorinių faktorių ribojančių moduliacijos dažnį.

Vidinis faktorius lemiantis ŠD dažninio atsako mažėjimą yra krūvininkų gyvavimo trukmė (savaiminės spinduliuotės atveju ji yra keleto nanosekundžių eilės). Suprantama, kad spinduliuotės intensyvumo kitimas negali atkartoti spartesnių srovės pokyčių nei krūvininkų gyvavimo trukmė. Vykstant moduliacijai injekuotųjų krūvininkų tankio kitimas aprašomas šia lygtimi:

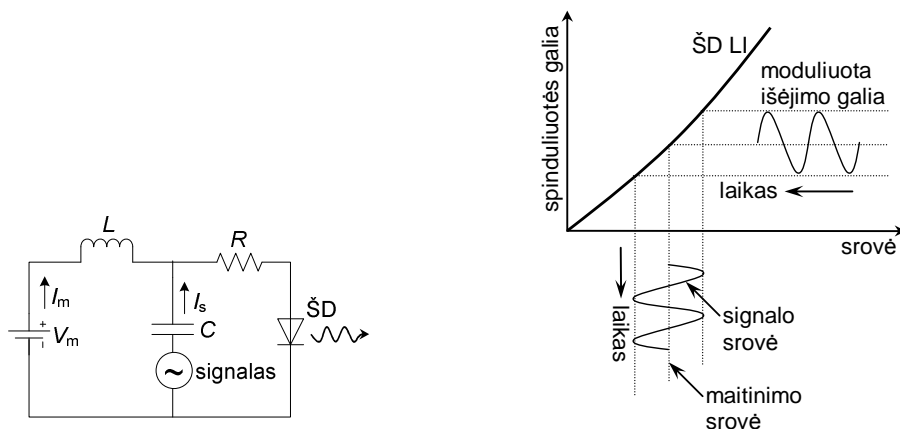
$$\frac{dn}{dt} = \frac{J_m + J_s \exp(i\omega t)}{qd} - \frac{n}{\tau_n}; \quad (2.25)$$

čia J_m ir J_s yra maitinimo ir signalo srovių tankiai, ω yra kampinis moduliacijos signalo dažnis, d – aktyviojo sluoksnio storis, τ_n – injekuotųjų šalutinių krūvininkų gyvavimo trukmė. (2.25) formulėje signalo srovė išreikšta kompleksiniu skaičiumi, kurio menamoji dalis atitinka momentinę srovės tankio vertę. Pirmasis dešinės pusės narys atitinka injekuojamųjų krūvininkų tankį, antrasis – krūvininkų praradimą dėl rekombinacijos, kuriai būdinga gyvavimo trukmė τ_n . Išsprendus (2.25) lygtį, moduluojamų krūvininkų tankis:

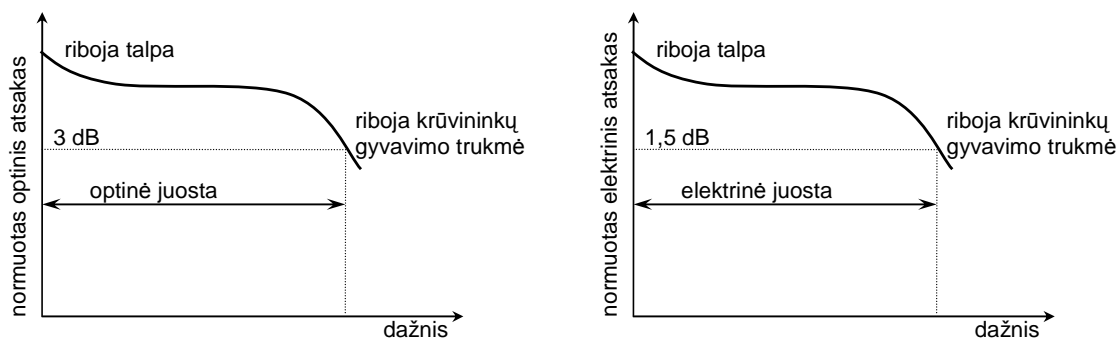
$$n = \frac{1}{\sqrt{1 + \tau_n^2 \omega^2}} \frac{\tau_n J_s}{qd} \exp(i\omega t) + \frac{\tau_n J_m}{qd}. \quad (2.26)$$

Ryšio sistemose ŠD paprastai veikia toje srityje, kur jų LI charakteristika yra tiesinė. Taigi spinduliuotės galia yra tiesiškai proporcinga injekuotųjų krūvininkų skaičiui. Moduluojamas krūvininkų tankis, taip pat ir spinduliuotės galia, priklauso nuo krūvininkų gyvavimo trukmės ir dažnio. Dažninį atsaką aprašo dažninio atsako faktorius:

$$f_{ats}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \tau_n^2 \omega^2}}. \quad (2.27)$$



2.8 pav. ŠD maitinimo grandinė ir spinduliuotės atsakas esant analoginiam moduliavimui.



2.9 pav. Moduliacijos juostos plotis.

Pagrindiniai išoriniai faktoriai lemiantys ŠD dažninę charakteristiką yra pn sandūros talpa ir maitinimo grandinės RC trukmė. Sandūros talpa priklauso nuo pn sandūros ploto (taigi pn sandūros plotą stengiamasi sumažinti chemiškai išsėdinant iki mezadarinio)¹⁹.

ŠD dažniam atsakui nusakyti naudojama moduliacijos juosta (2.9 pav.). Žemuose dažniuose ŠD dažninį atsaką riboja talpa, aukštuose – injekuotųjų šalutinių krūvininkų gyvavimo trukmė. ŠD moduliacijos juosta apibrėžiama dažniu, ties kuriuo spinduliuotės galia sumažėja per pusę (t. y. 3 dB):

$$3\text{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_{\text{iš}}(f_c)}{P_{\text{iš}}(\text{dc})}; \quad (2.28)$$

čia $P_{\text{iš}}(f_c)$ ir $P_{\text{iš}}(\text{dc})$ yra išėjimo spinduliuotės galios ties dažniu f ir esant nuolatiniam maitinimui. ŠD veikiant srityje, kur LI yra tiesinė, spinduliuotės galių santykis $\frac{P_{\text{iš}}(f_c)}{P_{\text{iš}}(\text{dc})}$ yra lygus atitinkamam fotosrovių santykiui

$\frac{I_{\text{iš}}(f_c)}{I_{\text{iš}}(\text{dc})}$. Elektriniams signalams dažnių juosta apibrėžiama taške, kai $\frac{I_{\text{iš}}(f_c)}{I_{\text{iš}}(\text{dc})} = 2^{-1/2}$ (arba 1,5 dB) (kadangi

galia yra proporcinga srovės kvadratui, tai šiame taške $\frac{I_{\text{iš}}^2(f_c)}{I_{\text{iš}}^2(\text{dc})} = 2$ (arba 3 dB)). Moduliuojamam krūvininkų

tankiui (2.26) 3 dB dažnių juosta atsižvelgiant į (2.27):

$$\frac{1}{\sqrt{1 + \tau_n^2 \omega^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad (2.29)$$

o atitinkamas ribinis dažnis:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau_n}. \quad (2.30)$$

Ribinis dažnis yra nulemtas šalutinių krūvininkų gyvavimo trukmės (t. y. priemaišų tankio aktyviojoje srityje). Pvz., gyvavimo trukmei esant 5 ns, ribinis dažnis yra 32 MHz. Šiuo metu gaminamų šviesos diodų didžiausias moduliacijos dažnis yra (16-175) MHz²⁰, laboratorijose pasiekiamas (0,5-10,0) MHz ŠD

moduliacijos dažnis²¹. Vidinis kvantinis našumas $\eta_i = \frac{\tau_n}{\tau_{\text{sp}}}$ yra atvirkščiai proporcingas ribiniam dažniui:

¹⁹ M. Balucani, S. La Monica, A. Ferrari, “200 MHz optical signal modulation from a porous silicon light emitting device”, *Appl. Phys. Lett.*, 72, pp.: 639 – 640 (1998).

²⁰ <http://www.elfaelektronika.lt/ec/25a3b/skaiduline-optika> (2009 09 22).

²¹ D. Fattal, M. Fiorentino, M. Tan, D. Houng, S. Y. Wang, R. G. Beausoleil, “Design of an efficient light-emitting diode with 10 GHz modulation bandwidth”, *Appl. Phys. Lett.*, 93, pp.: 243501-3 (2009).

$$\eta_i = \frac{1}{2\pi\tau_{sp}} \frac{1}{f_c}. \quad (2.31)$$

2.1.8 Analoginės šviesos diodo valdymo grandinės

Šviesos diodo spinduliuotės galia yra apytiksliai proporcinga maitinimo srovei. Tačiau (dažniausiai dėl temperatūros kilimo) ši priklausomybė nėra tiesinė (2.6 pav.). ŠD valdymo grandinė turi kompensuoti šį netiesiškumą ir užtikrinti ŠD spinduliuotės galios kitimą atitinkantį moduluojančios srovės pokyčius. Šiame ir 2.1.9 poskyriuose pateikti keli analoginių ir skaitmeninių šviesos diodų valdymo grandinių pavyzdžiai.

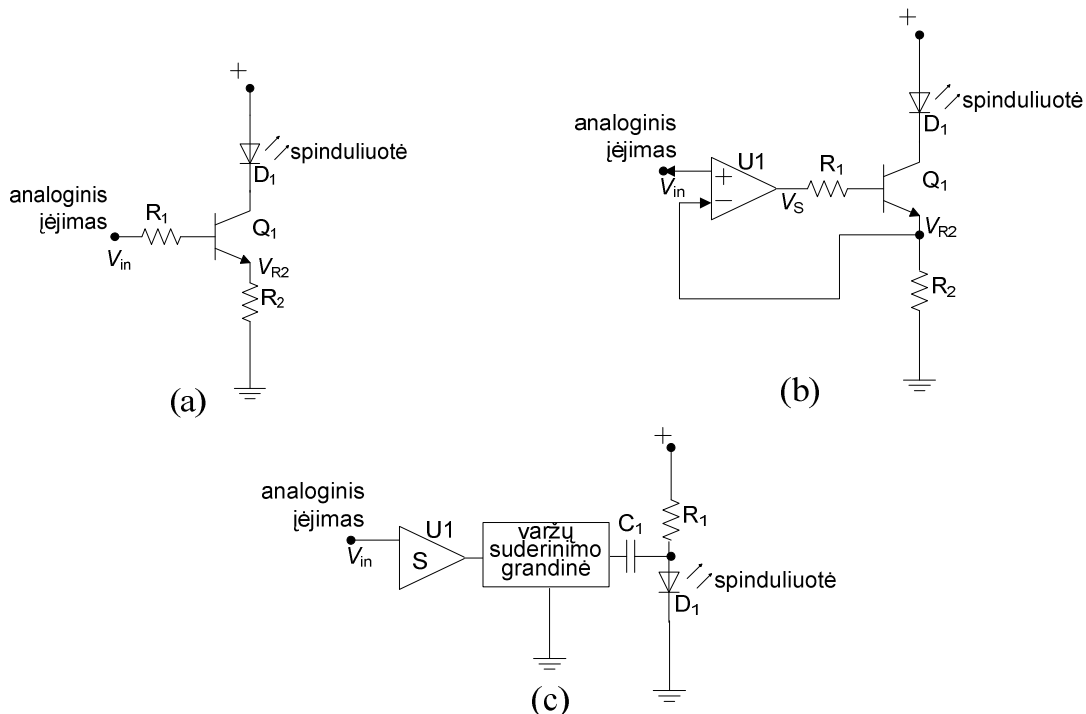
2.10 pav. pateiktos kelios analoginės ŠD valdymo grandinės. Pirmoji grandinė yra paprasčiausia (2.10 (a) pav.) ir sudaryta iš tranzistoriaus bei keleto varžų. Ši grandinė analoginę įėjimo įtampą paverčia atitinkama srove, tekančia šviesos diodu. ŠD spinduliuotės galia proporcinga juo tekančiai srovei. Mažas varžas R_1 apsaugo nuo įtampos svyravimų tranzistoriuje. Emiterio įtampa V_{R2} yra lygi bazės įtampai atėmus 0,6 V. Kadangi bazės ir emiterio įtampos skiriasi tik nuolatinės srovės sandu, tai kintamoji srovės dalis bazėje yra lygi srovei emiteryje. Emiterio įtampa V_{R2} nulemia srovę tekančią R_2 : $\frac{V_{R2}}{R_2}$. Kolektoriaus srovė

yra apytiksliai proporcinga emiterio srovei ($I_K = \frac{\beta}{\beta+1} I_E$, β dažniausiai yra tarp 10 ir 100). Tada ŠD tekanti srovė (taip pat ir spinduliuotės galia) su įėjimo įtampa yra susijusi taip:

$$I_{D1} = \frac{V_{in} - 0,6}{R_2} \cdot \frac{\beta}{\beta+1}. \quad (2.32)$$

Šios paprastos grandinės trūkumas yra tai, kad bazės talpa kinta kintant bazės įtampai. Tai lemia grandinės netiesiškumą.

2.7 (b) pav. Pavaizduota ŠD valdymo žemo dažnio grandinė eliminuojanti netiesiškumą panaudojant



2.10 pav. Analoginės šviesos diodo valdymo grandinės.

tranzistorių Q1. Čia stiprintuvas U1 sudaro grįžtamąjį ryšį, kuris valdo Q1 bazę taip, kad įtampa V_{R2} yra lygi įėjimo įtampai V_{in} . Šiuo atveju ŠD tekanti srovė ir spinduliuotės galia nuo įėjimo įtampos priklauso taip:

$$I_{D1} = \frac{V_{in}}{R_2} \cdot \frac{\beta}{\beta + 1}. \quad (2.33)$$

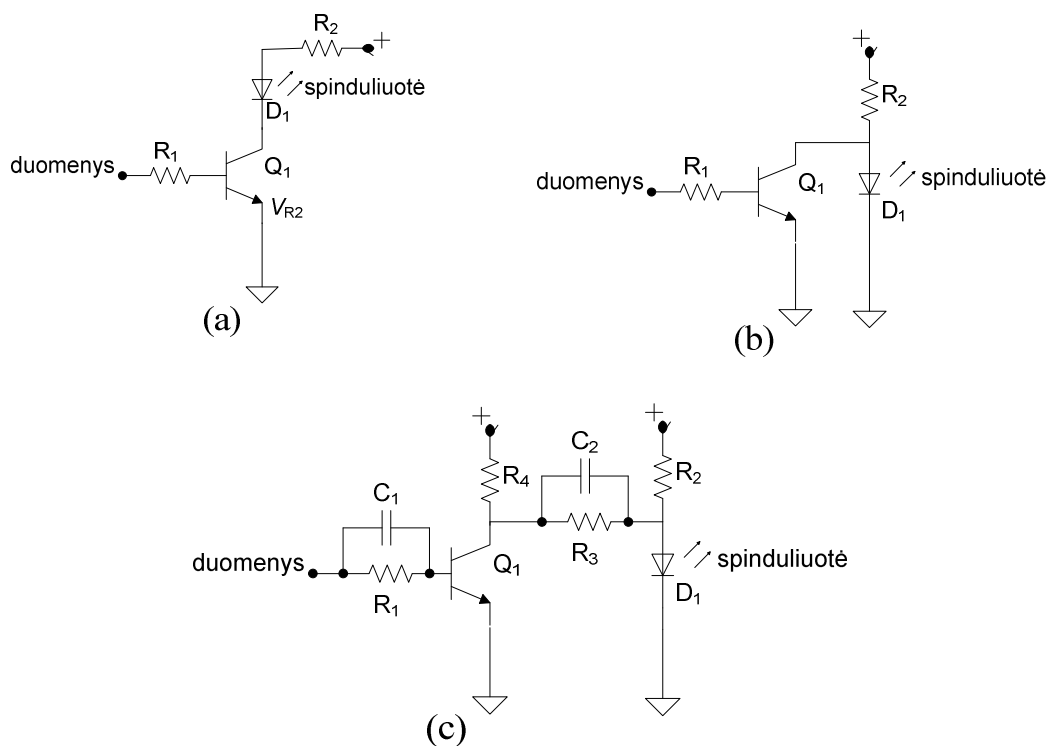
Šios grandinės netiesiškumas dėl Q1 yra kur kas mažesnis, nei 2.7 (a) pav. pavaizduotos ŠD valdymo grandinės. 2.7 (b) pav. pateiktos grandinės ribojantis faktorius yra vėlinimas dėl grįžtamojo ryšio per stiprintuvą U1 – didžiausias pasiekiamas moduliacijos dažnis yra (10-100) MHz.

Mažiausiai trūkumų turi 2.7 (c) pav. pavaizduota ŠD valdymo grandinė. Čia šviesos diodas D1 per varžą R_1 maitinamas nuolatine srove (vietoje R_1 gali būti srovės šaltinis arba grandinė, turinti temperatūros kompensaciją). Plačiajuostis stiprintuvas U1 stiprina įėjimo įtampą V_{in} (įėjimo signalas gali būti mažas) ir atskiria ŠD nuo įėjimo grandinės (tai leidžia pasiekti tikslų varžų suderinimą įėjime). Stiprintuvo U1 išėjimo varža yra 50 Ω arba 75 Ω . ŠD įėjimo varža paprastai yra (5-10) Ω . Tarp stiprintuvo ir šviesos diodo D1 yra varžų suderinimo grandinė. Kondensatorius C_1 blokuoja nuolatinę srovę susijusią su varžų suderinimo grandine. Ši valdymo grandinė leidžia pasiekti aukščiausią įmanomą ŠD moduliacijos dažnį bei užtikrina geriausią tiesiškumą.

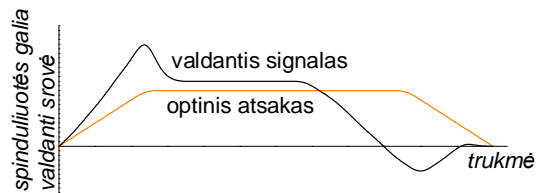
2.1.9 Skaitmeninės šviesos diodo valdymo grandinės

Kai valdymo signalas yra skaitmeninis, šviesos diodo LI charakteristikos netiesiškumas nebėra problema – ŠD yra arba įjungtas, arba išjungtas. Šiuo atveju kuriant ŠD valdymo grandinę svarbesnės yra jo spektro charakteristikos. Pagrindinė tokios valdymo grandinės užduotis yra pasiekti didžiausią moduliacijos spartą.

2.11 (a) pav. pavaizduota grandinė yra nuosekli šviesos diodo valdymo grandinė. Priklausomai nuo įėjimo įtampos tranzistoriaus bazėje tranzistorius bus atidarytas arba uždarytas. Kai tranzistorius uždarytas,



2.11 pav. Skaitmeninės šviesos diodo valdymo grandinės.



2.12 pav. Šviesos diodo atsakas į skaitmeninį valdantį signalą.

srovė šviesos diodu neteka, ir ŠD nešviečia; kai tranzistorius atidarytas, ŠD teka tiesioginė srovė (tranzistoriaus kolektoriaus potencialas sumažėja apie 0,25 V). Kai tranzistorius atidarytas, tekanti srovė bus lygi įtampai varže R_2 padalintai iš šio varžos dydžio (įtampa varže R_2 yra lygi šaltinio įtampai atėmus įtampą šviesos diode, šiam veikiant tiesiogine kryptimi, ir tranzistoriaus įsisotinimo įtampą). Pagrindinis nuoseklios ŠD valdymo grandinės privalumas yra maža vidutinė maitinimo srovė: didžiausią ŠD tekančią srovę pažymėjus I_{SDmax} , ir ŠD veikiant 50 % veikimo ciklu, vidutinė tekanti srovė bus $I_{SDmax}/2$; tada išsklaidyta galia bus $(I_{SDmax}/2) \cdot V_m$ (V_m – maitinimo šaltinio įtampa). Didžiausias 2.11 (a) pav. pateiktos grandinės trūkumas yra maža sparta. Ši grandinė retai naudojama, kai duomenų srautas viršija (30-50) Mb/s.

2.11 (b) pav. pavaizduotos ŠD valdymo grandinės sparta yra kur kas didesnė. Tranzistorius Q1 naudojamas greitai ištraukti krūvininkus iš aktyviosios srities ir išjungti šviesos diodą. Šios grandinės privalumas yra geresnė valdymo simetrija: paprastai ŠD greitai įsijungia, tačiau, dėl palyginti ilgos krūvininkų gyvavimo trukmės, užtrunka ŠD išjungimas. ŠD maitinamas per varžą R_2 , kuris paprastai yra apie 40 Ω . Taigi tekanti didžiausia srovė yra apie 100 mA. Išjungimo srovė teka tranzistoriumi: įsotinto tranzistoriaus varža yra keletas omų. Tokiu būdu gaunama didelė ŠD iškraunanti srovė. Šios grandinės trūkumas yra didelė išsklaidoma galia – bent pora kartų didesnė nei nuoseklioje grandinėje (2.11 (a) pav.): grandine teka didesnė srovė, kai ŠD yra išjungtas, nei, kai įjungtas. Išsklaidomą galią galima sumažinti naudojant didelio efektyvumo ŠD (mažinant I_{SDmax}) bei sumažinus ŠD veikimo ciklą.

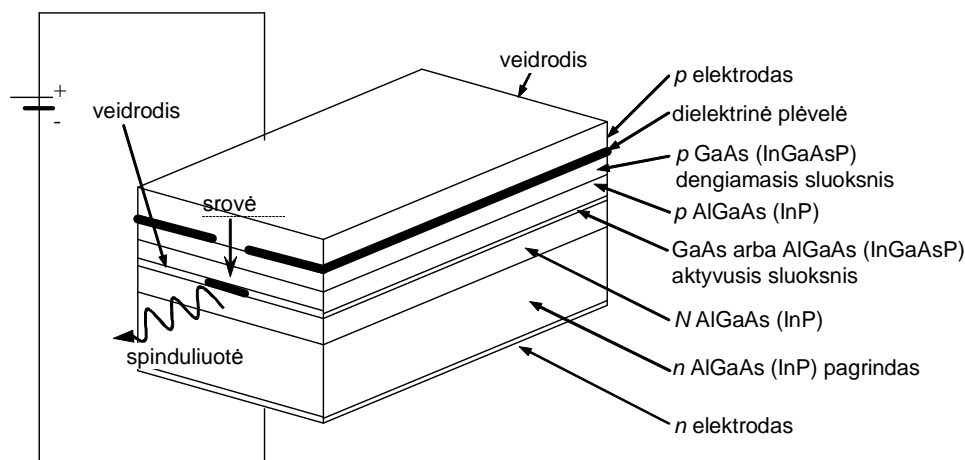
Trečioji (2.11 (c) pav.) grandinė yra atskiras (b) grandinės atvejis. Papildomi varžai ir kondensatoriai naudojami paspartinti grandinės veiką. Kondensatorius C_1 paspartina tranzistoriaus atidarymą ir uždarymą. Tačiau C_1 turi būti ne per didelis, kitaip tranzistoriaus bazė bus nuskurdinta ir sugadinta. Elementai R_3 , R_4 ir C_2 sukuria nuskurdinimą tranzistoriaus bazėje, kai ŠD yra įjungtas, ir įsotinimą, kai tranzistorius uždarytas. Nuskurdinimas ir įsotinimas paspartina pereinamuosius vyksmus ŠD. Paprastai R_3 ir C_2 trukmės konstanta parenkama artima šviesos impulso fronto trukmei ŠD valdant stačiakampiu impulsu.

Valdymo signalui įgyjant vertę loginis „1“, ŠD valdanti srovė apie 2 kartus viršija nuostovųjį lygį (2.12 pav.). Ši didesnė srovė paspartina ŠD įjungimą (sumažina atsako priekinį frontą). Nepaisant to, optinis signalas atsilieka nuo elektrinio. Būdingos sparčiųjų ŠD fronto trukmės yra 0,7 ns elektriniam signalui ir 1,5 ns optiniam. Valdymo signalui grįžtant į loginio „0“ padėtį, optinis signalas taip pat atsilieka nuo elektrinio. ŠD išjungimui paspartinti elektrinis signalas nukrinta žemiau „0“ vertės. Būdingos ŠD išjungimo trukmės yra 0,7 ns elektriniam ir 2,5 ns optiniam signalui. Loginio „0“ būsenoje ŠD srovė nėra visiškai išjungžiama – paliekamas nedidelis tiesioginis maitinimas (sudarantis kelis maksimalios srovės procentus) siekiant pagerinti dinaminį ŠD atsaką.

Visi šie metodai padidina sistemos su ŠD veikimo spartą iki 270 Mb/s.

2.2 Lazeriniai diodai

Lazeriniai diodai (LD) kaip ir šviesos yra tiesiogine kryptimi veikiančios pn sandūros įtaisai. Taigi ir LD veikimo principai yra panašūs į šviesos diodų. Lazeriniai diodai spinduliuoja koherentinę spinduliuotę atsiradusią dėl priverstinės spinduliuojamosios rekombinacijos (ŠD spinduliuotė yra nulemta savaiminės



2.13 pav. Elementaraus InGaAsP Fabri ir Pero lazerinio diodo sandara.

rekombinacijos). ŠD ir LD gamybai naudojamos medžiagos bei spinduliuotės bangos ilgiai taip pat yra panašūs: AlGaAs/GaAs – 850 nm^{22,23}, InGaAs(P)/InP – 1300 nm ir 1500 nm skirti optinio ryšio sistemoms^{24,25}; AlGaAs/AlGaAs, III grupės nitridai – matomos šviesos LD^{26,27}. 2.3 lentelėje pateikiamos LD savybės, svarbios juos naudojant optinio ryšio sistemose.

Bazinė Fabri (Fabry) ir Pero (Pérot) lazerinio diodo su dvigubu įvairialyčiu dariniu sandara pateikta 2.13 pav. Pagrindinė LD dalis yra aktyvioji sritis, kurioje vyksta priverstinė spinduliuojamoji rekombinacija. Aktyviajai sričiai naudojami įvairūs dariniai: kvantinės duobės²⁸, įtemptieji dariniai²⁹, kvantiniai siūlai³⁰ ir kvantiniai taškai³¹. Lazerinio diodo sandara nuo šviesos diodo skiriasi tuo, kad nuskėlus lusto galus (paprastai (110) kryptimi) suformuojami vedrodžiai sudarantys Fabri ir Pero (FP) rezonatorių. Norint pagaminti vienmodį lazerinį diodą suformuojama Brego gardelė ar paskirstytasis Brego atšvaitas – šie dariniai sukuria paskirstytąjį grįžtamąjį ryšį^{32,33}.

²² A. Mala, A. Jasik, M. Teodorczyk, A. Jagoda, and A. Kozłowska, “High-Power Low Vertical Beam Divergence 800-nm-Band Double-Barrier-SCH GaAsP-(AlGa)As Laser Diodes”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 18, pp.: 1582-1584 (2006).

²³ R. Hiroyama, Y. Nomura, K. Furusawa, S. Okamoto, N. Hayashi, M. Shono and M. Sawada, “High-power and highly reliable 780nm band AlGaAs laser diodes with rectangular ridge structure”, *Electron. Lett.* 37 pp.: 30-31 (2001).

²⁴ C.-W. Hu, F.-M. Lee, T.-C. Peng, T.-M. Ou, M.-C. Wu, and Y.-H. Huang, “High-Speed and Uncooled Operation of 1.3- μm InGaAsP Strain-Compensated MQW BH Lasers Fabricated on Patterned InP Substrates” *J. Lightw. Technol.*, 24, pp.: 2906-2911 (2006).

²⁵ C. Ni, Allen, G. Ortner, C. Dion, P. J. Poole, P. Barrios, J. Lapointe, G. Pakulski, W. Render, S. Fafard, S. Raymond, “External-cavity quantum-dot laser tunable through 1.55 μm ”, *Appl. Phys. Lett.*, 88, pp.: 113109-3 (2006).

²⁶ L. Q. Zhang, D. S. Jiang, J. J. Zhu, D. G. Zhao, Z. S. Liu, S. M. Zhang, H. Yang, “Confinement factor and absorption loss of AlInGaN based laser diodes emitting from ultraviolet to green”, *J. Appl. Phys.*, 105, pp.: 023104-8 (2009).

²⁷ Sh. Nakamura, “InGaN multiquantum-well-structure laser diodes with GaN-AlGaN modulation-doped strained-layer superlattices”, *IEEE Sel. Quantum Electron.*, V. 4, No. 3, pp. 483-489 (1998).

²⁸ K. Okamoto, J. Kashiwagi, T. Tanaka, M. Kubota, “Nonpolar m-plane InGaN multiple quantum well laser diodes with a lasing wavelength of 499.8 nm”, *Appl. Phys. Lett.*, 94, pp.: 071105-3 (2009).

²⁹ T. Fujisawa, M. Arai, T. Yamanaka, Y. Kondo, F. Kano, “Microscopic design of GaInNAs quantum well laser diodes on ternary substrates for high-speed and high-temperature operations”, *J. Appl. Phys.*, 105, pp: 113114-8 (2009).

³⁰ S.-M. Liu, M. Yoshita, M. Okano, T. Ihara, H. Itoh, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, K. W. West, K. W. Baldwin, “Electronic structure and efficient carrier injection in low-threshold T-shaped quantum-wire lasers with parallel p- and n-doping layers”, *J. Appl. Phys.*, 102, pp.: 043108-7 (2007).

³¹ D. G. Deppe, K. Shavritranuruk, G. Ozgur, H. Chen and S. Freisem, “Quantum dot laser diode with low threshold and low internal loss”, *Electron. Lett.*, 45, pp.: 54-56 (2009).

³² J. Carroll, J. Whiteaway, D. Plumb, Distributed feedback semiconductor lasers (The Institution of electrical engineers, UK, 1998).

³³ D. Bisping, S. Hofling, D. Pucicki, M. Fischer, A. Forchel, “Room-temperature singlemode continuous-wave operation of distributed feedback GaInNAs laser diodes at 1.5 μm ”, *Electron. Lett.*, 44, pp.: 737 – 738 (2008).

2.3 lentelė. Lazerinių diodų charakteristikos.

Charakteristika	Apibūdinimas	Įprastos vertės
Smailinis bangos ilgis	Bangos ilgis, ties kuriuo spinduliuotės galia didžiausia. Turi sutapti su bangos ilgiu, kuriam optinėje skaiduloje yra mažiausi nuostoliai.	1310 nm 1550 nm 1625 nm
Spektro plotis	Idealiu atveju visa LD spinduliuotė turi tekti tik smailiniam bangos ilgiui.	Nevisa spinduliuotė išspinduliuojama tik smailiniam bangos ilgiui.
Spinduliuotės diagrama	Nulemia spinduliuotės kiekį, kuris bus sėkmingai surinktas į optinę skaidulą. Geriausia, kai į šviesolaidį surenkama kiek įmanoma didesnė spinduliuotės dalis. Spinduliavimo plotas turi būti palyginamas su skaidulos šerdies plotu.	Gana siaura palyginus su ŠD.
Galia	Šaltinio spinduliuotės galia turi būti pakankama užtikrinti reikiamą galią imtuvė atsižvelgiant į visus galimus nuostolius.	LD galia yra didesnė nei ŠD.
Sparta	Šviesos šaltinis turi būti pakankamai spartus ir atitikti sistemos juostos pločio reikalavimus.	LD kilimo ir kritimo trukmės yra mažesnės nei šviesos diodų.
Tiesiškumas	Parodo, kiek tiesiškai didėja spinduliuotės galia didėjant šaltinio srovei. Analoginėms sistemoms tiesiškumas yra svarbus, skaitmeninėms mažiau svarbus. LI charakteristikos netiesiškumas lemia harmonikų iškraipymus analoginėse sistemose.	

2.2.1 Lazerinio diodo veikimo charakteristikos

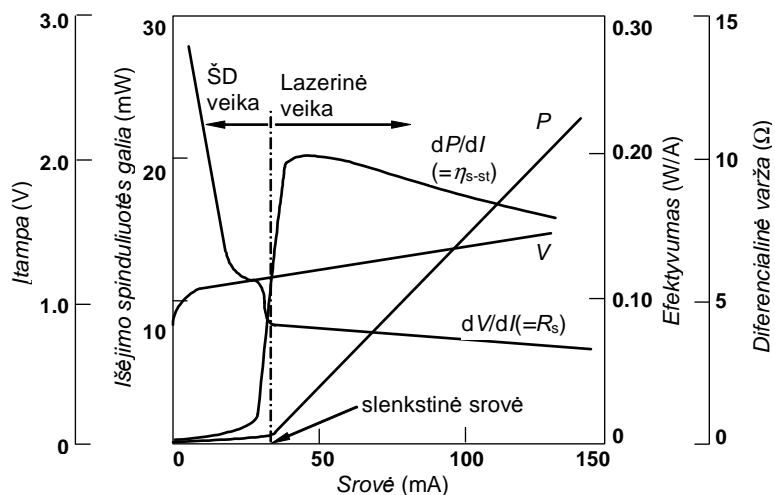
2.14 pav. pateiktos būdingos FP LD veikimo charakteristikos. Lazeriniu diodu tekant nedidelei injekcinei srovei krūvininkų tankis aktyviojoje srityje yra nedidelis ir vyrauja savaiminė rekombinacija. Injekcinei srovei didėjant aktyviojoje srityje sukuriama užpildos apgrąža – esant tam tikrai injekcinės srovės vertei – slenkstinei srovei - priverstinė spinduliuojamoji rekombinacija viršija savaiminę. Slenkstinės srovės srityje spinduliuotės nuostoliai susilygina su stiprinimu ir spinduliuotės galia, spinduliuotei nusklidus pilną ratą rezonatoriumi, nepakinta. Krūvininkų gyvavimo trukmė nulemta priverstinės spinduliuojamosios rekombinacijos yra labai maža, todėl, injekcinei srovei viršijus slenkstį, krūvininkų tankis nebedidėja.

Lazerinio diodo veikimas pagrįstas elektrono ir skylės rekombinacija išspinduliuojant fotoną (2.15 pav.). Spinduliuojamieji šuoliai vyksta tarp lygmenų, atitinkančių didžiausią elektronų ir skylių tankį laidumo ir valentinėje juostose (šviesos dioduose krūvininkų rekombinacija yra savaiminė ir vyksta atsitiktinai tuoj pat, kai krūvininkai yra injekuoti į aktyviąją sritį; lazeriniuose dioduose injekuoti krūvininkai relaxuoja į spinduliavimo lygmenis.

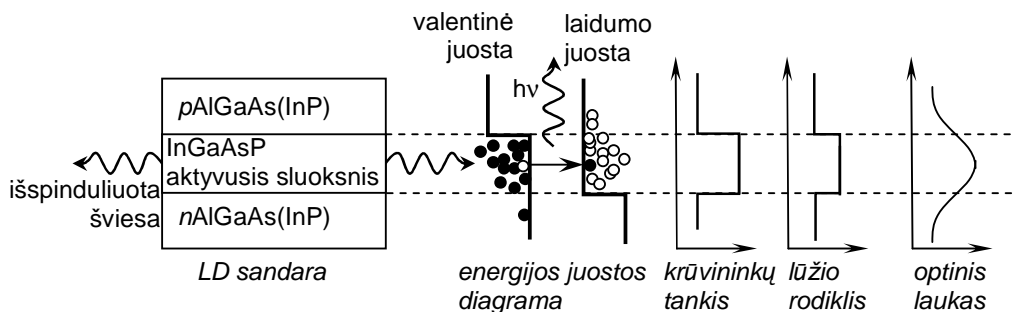
Slenkstinė srovė yra svarbiausias lazerinio diodo parametras. Siekiama sukurti LD su kuo mažesne slenkstine srove. Slenkstinė srovė gali būti sumažinta padidinus rezonatoriaus veidrodžių atspindžio koeficientą, sutrumpinus rezonatorių, modifikuojant laidumo ir valentinę juostas^{31,34,35}. Mažiausia slenkstinė srovė yra LD su kvantiniais dariniais, kuriuose slenkstinis krūvininkų tankis yra mažas. Geresniam krūvininkų sulaukymui kvantinėse duobėse – jų išplitimui į barjero ir dengiamuosius sluoksnius sumažinti,

³⁴ L. Q. Zhang, D. S. Jiang, J. J. Zhu, D. G. Zhao, Z. S. Liu, S. M. Zhang, H. Yang, “Confinement factor and absorption loss of AlInGaN based laser diodes emitting from ultraviolet to green”, *J. Appl. Phys.*, 105, pp.: 023104-8 (2009).

³⁵ S. Freisem, G. Ozgur, K. Shavritranuruk, H. Chen and D. G. Deppe, “Very-low-threshold current density continuous-wave quantum-dot laser diode”, *Electron. Lett.*, 44 pp.: 679-681 (2008).



2.14 pav. Būdingos 1330 nm InGaAsP/InP lazerinio diodo veikimo charakteristikos.



2.15 pav. Lazerinio diodo sandara ir veikimo principas.

naudojamas įvairialytis darinys su atskirtąja apriba³⁶.

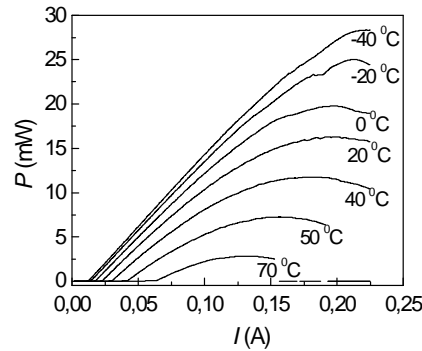
Kitas svarbus LD parametras yra slenkstinis krūvininkų tankis, kuris priklauso nuo aktyviosios srities sandaros ir krūvininkų gyvavimo trukmės. Injekcinei srovei viršijus slenkstinę, krūvininkų tankis aktyviojoje srityje nebedidėja.

Lazeriniame diode stiprinama tik ta spinduliuotės dalis, kuri išlaikoma aktyviojoje srityje. Išlaikymo faktorius apibrėžiamas kaip aktyviojoje srityje išlaikytos ir visos spinduliuotės santykis. Išlaikymo faktorius priklauso nuo aktyviosios srities storio ir sandaros. Krūvininkų pasiskirstymas, lūžio rodiklio kitimas ir optinio lauko pasiskirstymas lazeriniame darinyje pavaizduoti 2.15 pav. Labai plonoje aktyviojoje srityje išlaikymo faktorius mažėja proporcingai aktyviosios srities storio kvadratui. Mažėjant išlaikymo faktoriui, didėja LD slenkstinė srovė.

Taip pat svarbi LD charakteristika yra diferencialinis kvantinis efektyvumas, įvertinamas iš LI charakteristikos virš slenkščio (2.14 pav.).

Lazerinio diodo veikimo charakteristikos priklauso nuo temperatūros. Temperatūrai didėjant spinduliuotės galia mažėja tekant fiksuotai srovei (arba reikalinga didesnė injekcinė srovė fiksuotai spinduliuotės galiai palaikyti; 2.16 pav.). Slenkstinės srovės priklausomybė nuo temperatūros (temperatūrai pakitus nuo T_1 iki T_2) empiriškai aprašoma taip:

³⁶ P.-H. Lei, C.-C. Lin, W.-J. Ho, M.-C. Wu, and L.-W. Lai, "1.3- μ m n-Type Modulation-Doped AlGaInAs/AlGaInAs Strain-Compensated Multiple-Quantum-Well Laser Diodes", *IEEE Trans. Electron Dev.*, 49, pp.: 1129-1135 (2002).



2.16 pav. Lazerinio diodo spinduliuotės charakteristikos kitimas kintant temperatūrai (FP InGaAsP/InP LD).

$$I_{sl}(T_2) = I_{sl}(T_1) \exp \frac{T_2 - T_1}{T_0}; \quad (2.34)$$

čia T_0 yra eksperimentiškai nustatoma charakteringoji temperatūra, I_{sl} – slenkstinė LD srovė. Didesnė charakteringoji temperatūra reiškia geresnį LD temperatūrinį stabilumą. Pasiekiami (160-180) K charakteringoji temperatūra (kambario temperatūroje)^{37,38}. Tačiau charakteringoji temperatūra nėra konstanta ir mažėja didėjant sandūros įtampai. Slenkstinė srovė ir charakteringoji temperatūra negali būti optimizuotos vienu metu. Be to didelė charakteringoji temperatūra riboja ir didžiausią išėjimo galią. Charakteringąją temperatūrą nulemia krūvininkų virštekis, Ože ir kiti nespinduliuojamieji vyksmai, sugertis juostose.

LD su kvantiniais dariniais temperatūrinės charakteristikos yra geresnės nei tūrinių diodų^{37,39}. Tai lemia mažesnis krūvininkų tankis bei geresnis krūvininkų sulaikymas aktyviojoje srityje. Temperatūrinę charakteristiką taip pat pagerina mažesnė laisvakrūvė sugertis (dėl mažo spinduliuotės išlaikymo faktoriaus). Ože rekombinaciją ir sugertį juostose galima sumažinti naudojant įtemptuosius sluoksnius.

2.2.2 Lazerinio spinduliavimo sąlyga

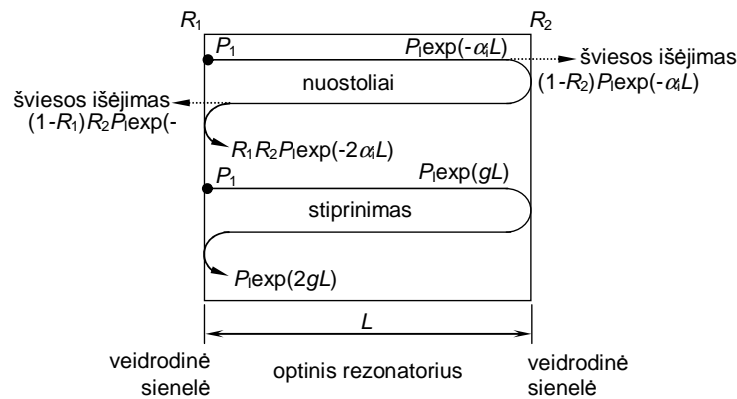
Svarbiausia lazerinio diodo charakteristika yra slenkstinė srovė. Slenkstinė srovė įvertina LD veikimą ir yra nulemta tiek medžiagos savybių, tiek ir diodo sandaros ypatybių.

Maitinimo srovei nepasiekus slenkstinės vertės, išspinduliuota šviesa sklinda išilgai aktyviojo sluoksnio, nes šio lūžio rodiklis yra didesnis nei gretimų sluoksnių. Dalis spinduliuotės atsispindi nuo galinių veidrodžių atgal, kita dalis išspinduliuojama iš kristalo. Šis spinduliuotės sklidimas, atspindys bei dalies jos praradimas kartojasi optiniame rezonatoriuje, suformuotame iš kristalo ir veidrodžių. Rezonatoriumi sklindanti spinduliuotė yra ir stiprinama, ir prarandama. Spinduliuotės nuostoliai rezonatoriuje yra dėl sugerties aktyviajame ir gretimuose sluoksniuose. Nuostoliai veidrodžiuose yra dėl to, kad nuskeltų kristalo galų atspindžio faktorius yra mažesnis nei 100 % (tik nuskėlus – apie 30 %). Veidrodžių nuostolius galima sumažinti padengus juos atspindinčiuoju sluoksniu. Sklaidos nuostoliai yra dėl įvairių kristalo defektų ir netolygumų. Spinduliuotės stiprinimas vyksta krūvininkų injekcijos dėka.

³⁷ T. Fujisawa, M. Arai, T. Yamanaka, Y. Kondo, F. Kano, “Microscopic design of GaInNAs quantum well laser diodes on ternary substrates for high-speed and high-temperature operations”, *J. Appl. Phys.*, 105, pp.: 113114-8 (2009).

³⁸ H. Y. Ryu and K. H. Ha, “Cavity-length dependent thermal characteristics of InGaN blue laser diodes”, *Electron. Lett.*, 45 pp.: 164-165 (2009).

³⁹ A. Malag, E. Dabrowska, K. Grodecki, “Temperature sensitivity (T_0) of tensile-strained GaAsP/(AlGa)As double-barrier separate confinement heterostructure laser diodes for 800 nm band”, *J. Appl. Phys.*, 103, pp.: 113109-7 (2008).



2.17 pav. Spinduliuotės stiprinimas ir nuostoliai optiniame rezonatoriuje.

Lazerinio spinduliavimo sąlygos įvertinimas pateiktas 2.17 pav. Vidiniai nuostoliai susideda iš sugerties ir sklaidos nuostolių ir yra išreiškiami sugerties koeficientu α_v [cm^{-1}] (nuostoliai vienetiniam ilgiui). Spinduliuotei apėjus rezonatorių ratą, jos galia sumažėja $R_1 R_2 \exp(-2\alpha_v L)$ kartų. Spinduliuotės stiprinimas vienetiniam ilgiui išreiškiamas stiprinimo koeficientu g [cm^{-1}]. Taigi spinduliuotės galia dėl stiprinimo apėjus rezonatorių padidėja $\exp(2gL)$ kartų. Spinduliuotės galios pokytis šiai nusklidus ratu rezonatoriumi yra:

$$R_1 R_2 \exp 2L(g - \alpha_v). \quad (2.35)$$

Lazerinis spinduliavimas prasideda, kai stiprinimas kompensuoja nuostolius. Lazerinės veikos sąlyga:

$$R_1 R_2 \exp 2L(g - \alpha_v) = 1. \quad (2.36)$$

Slenkstinis stiprinimo koeficientas išreiškiamas taip:

$$g_{\text{th}} = \alpha_v + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2}. \quad (2.37)$$

Pirmasis narys (2.37) išraiškos dešinėje pusėje atspindi vidinius nuostolius rezonatoriuje (daugiausia laisvakrūvę sugertį aktyviajame sluoksnyje), antrasis – nuostolius veidrodžiuose (spinduliuotės stiprinimas (priverstinis spinduliavimas) ir silpninimas priklauso nuo fotono buvimo rezonatoriuje trukmės, t. y. rezonatoriaus ilgio).

Rezonatoriaus veidrodžių atspindžio faktorius tuoj po kristalo nuskėlimo yra nulemtas medžiagos ir oro lūžio rodiklių skirtumo:

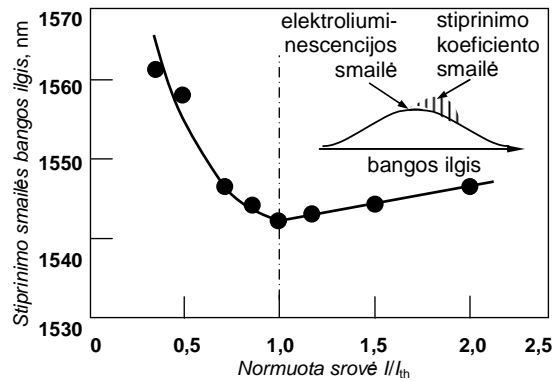
$$R_1 = R_2 = R = \left(\frac{n_r - 1}{n_r + 1} \right)^2; \quad (2.38)$$

čia n_r yra LD medžiagos lūžio rodiklis. Atsižvelgus į (2.38), slenkstinį stiprinimą galima užrašyti taip:

$$g_{\text{th}} = \alpha_v + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R}. \quad (2.39)$$

Pvz., AlGaAs/GaAs ir InGaAsP/InP 300 μm ilgio tūriniam darinyje vidiniai nuostoliai yra apie (10-20) cm^{-1} , nuostoliai veidrodžiuose (kurių atspindžio faktorius $\sim 31\%$) yra 40 cm^{-1} . Tada slenkstinis stiprinimas turi būti (50-60) cm^{-1} .

Optinio stiprinimo dydis priklauso nuo injekuotųjų krūvininkų tankio aktyviojoje srityje: krūvininkų tankiui didėjant, didėja ir stiprinimas. Dėl juostos užsipildymo efekto didėjant krūvininkų tankiui didžiausia



2.18 pav. Smailinio stiprinimo priklausomybė nuo injekcinės srovės.

stiprinimo vertė slenka į aukštesnių energijų pusę (2.18 pav). Stiprinimo smailė nesutampa su savaiminės spinduliuotės smaile, nes optiniai nuostoliai ties savaiminės spinduliuotės smaile yra didesni nei ilgesnio bangos ilgio spinduliuotei. Taigi didžiausias stiprinimas yra ties keletą dešimčių nanometrų didesniu bangos ilgiu.

Didžiausias stiprinimas, kuris sutampa su slenkstiniu, priklauso ir nuo injekuotųjų krūvininkų tankio:

$$g_{\max} = \beta \left(\frac{J}{d} - J_0 \right)^m ; \quad (2.39)$$

čia β yra konstanta vadinama stiprinimo koeficientu, J/d – srovės tankis vienetiniam aktyviojo sluoksnio storiui [$A/cm^2/\mu m$], kuris atitinka injekuotųjų krūvininkų tankį, J_0 yra skaidrinančioji srovė – srovė, reikalinga kompensuoti nuostolius rezonatoriuje.

Norint susieti slenkstinį stiprinimo koeficientą su slenkstine srove, reikia atsižvelgti į optinio lauko pasiskirstymą lazerio kristale (2.15 pav.). Sugertis rezonatoriuje susideda iš sugerties aktyviajame sluoksnyje ir sugerties gretimuose sluoksniuose. Spinduliuotės sulaikymas aktyviajame sluoksnyje įvertinamas optinio išlaikymo faktoriumi (Γ), kurio vertė paprastai yra tarp 0 ir 1. Išlaikymo faktorius priklauso nuo aktyviojo sluoksnio storio bei šviesos atspindžio nuo tarpsluoksnio tarp aktyviojo ir gretimų sluoksnių koeficiento^{40,41,42}. Pasinaudojant išlaikymo faktoriumi vidinės sugerties rezonatoriuje koeficientą galima išreikšti taip:

$$\alpha_v = \Gamma_a \alpha_a + (1 - \Gamma_a) \alpha_g ; \quad (2.40)$$

čia α_a ir α_g yra sugerties koeficientai aktyviajame ir gretimuose sluoksniuose. Optinį stiprinimą įtakoja tik aktyviajame sluoksnyje sulaikyta spinduliuotė:

$$g_{\text{th}} = \frac{1}{\Gamma_a} \left(\alpha_v + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R} \right). \quad (2.41)$$

Tada slenkstinis srovės tankis (atsižvelgiant į (2.39) ir (2.41)):

⁴⁰ L. Q. Zhang, D. S. Jiang, J. J. Zhu, D. G. Zhao, Z. S. Liu, S. M. Zhang, H. Yang, “Confinement factor and absorption loss of AlInGaN based laser diodes emitting from ultraviolet to green”, *J. Appl. Phys.*, 105, pp.: 023104-8 (2009).

⁴¹ A. Castiglia, E. Feltn, J. Dorsaz, G. Cosendey, J.-F. Carlin, R. Butte and N. Grandjean, “Blue laser diodes including lattice-matched Al_{0.83}In_{0.17}N bottom cladding layer”, *Electron. Lett.*, 44, pp.: 521-522 (2008).

⁴² J. K. Son, S. N. Lee, H. S. Paek, T. Sakong, H. K. Kim, Y. Park, H. Y. Ryu, O. H. Nam, J. S. Hwang, Y. H. Cho, “Measurement of optical loss variation on thickness of InGaN optical confinement layers of blue-violet-emitting laser diodes”, *J. Appl. Phys.*, 103, pp.: 103101-5 (2008).

$$J_{\text{th}} = d \left[\frac{1}{\beta \Gamma_a} \left(\alpha_v + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R} \right) \right]^{1/m} + dJ_0. \quad (2.42)$$

Laipsnio rodiklis m daugeliu atveju yra lygus 1. Pvz., InGaAsP/InP LD spinduliuojančio 1300 nm su tūriniu aktyviuoju sluoksniu $d=0,3 \mu\text{m}$, $\Gamma_a=0,2$, $\alpha_v=(10-20) \text{ cm}^{-1}$, $\beta=0,02$, $L=300 \mu\text{m}$, $R=30 \%$, $J_0=2000 \text{ A/cm}^2/\mu\text{m}^3$. Tokio LD slenkstinis srovės tankis yra $1,6 \text{ kA/cm}^2$. Srovės tankį padauginus iš aktyviojo sluoksnio ploto (pvz., $300 \mu\text{m}$ ilgis ir $5 \mu\text{m}$ plotis), gaunamas slenkstinės srovės stipris – pateiktame pavyzdyje – 24 mA . Skaidrinančiosios srovės dydis priklauso nuo aktyviojo sluoksnio medžiagos. Realių įtaisų slenkstinė srovė yra didesnė nei apskaičiuota, dėl įvairių nespinduliuojamųjų vyksmų kristalo tūryje ir paviršiuje (rekombinacija defektuose, Ože rekombinacija).

Slenkstinis krūvininkų tankis, atitinkantis slenkstinį srovės tankį:

$$n_{\text{th}} = \tau_s \frac{J_{\text{th}}}{qd}; \quad (2.43)$$

čia τ_s yra šalutinių injekuotųjų krūvininkų trukmė.

2.2.3 Lazerinio diodo spinduliuotės fazių sąlyga

Lazerinio diodo spinduliuotės spektras priklauso nuo aktyviosios srities medžiagos ir sandaros, bei rezonatoriaus tipo.

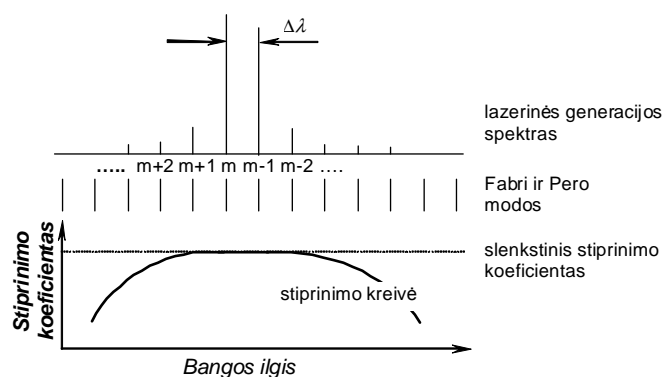
Fabri ir Perot rezonatoriuje stiprinamos bus tik tos spinduliuotės modos, kurių fazė, apėjus ratu rezonatorių sutaps su pradine. Optiniam stiprinimui pasiekus slenkstinę vertę, spinduliuojama tik ta spinduliuotė, kurios bangos ilgis patenkina fazių sąlygą:

$$m \frac{\lambda_0}{n_r} = 2L; \quad (2.44)$$

čia L yra rezonatoriaus ilgis, m – sveikasis skaičius – modos indeksas, λ_0 – bangos ilgis vakuume, n_r – lūžio rodiklis medžiagoje. (2.44) aprašo stovinčią bangą rezonatoriuje. Spinduliuojamos visos modos, atitinkančios (2.44) sąlygą ir patenkančios po stiprinimo spektru (2.19 pav.). Atstumas tarp spinduliuojamų modų:

$$\Delta\lambda = \lambda_{m+1} - \lambda_m = \frac{\lambda_0^2}{2n_{\text{ef}}L}; \quad (2.45)$$

čia n_r pakeistas efektiniu lūžio rodikliu n_{ef} , kuriame įskaitoma lūžio rodiklio priklausomybė nuo bangos ilgio:



2.19 pav. LD stiprinimo ir spinduliuotės spektras.

$$n_{\text{ef}} = n_r \left(1 - \frac{\lambda_0}{n_r} \frac{dn_r}{d\lambda_0} \right). \quad (2.46)$$

Atstumas tarp spinduliuojamų modų priklauso nuo rezonatoriaus ilgio ir spinduliuojamų išilginių modų skaičiaus. Rezonatoriaus ilgiui didėjant, atstumas tarp modų mažėja.

LD maitinimui didėjant (prieš slenkstį), smailinis bangos ilgis slenka į trumpesnių bangų pusę dėl juostos užpildymo efekto. Injekcinei srovei viršijus slenkstį, juostos užpildymas beveik nebekinta, nes krūvininkų tankis aktyviojoje srityje nebekinta. Dabar smailinis bangos ilgis didėja dėl išsiskiriančios Džaulio šilumos. Stebimi modų šuolių laipteliai, kai smailinis bangos ilgis pakinta iš vienos spinduliuojamos modos į kitą, kintant stiprinimo spektrui.

Puslaidininkinių lazerių rezonatorius, palyginus su kitais lazeriais, yra labai trumpas, todėl jų spinduliuotės spektro plotis yra gana didelis. Spektro plotis didėja dėl savaiminės spinduliuotės, kuri prisideda prie priverstinės. LD spektro plotį galima sumažinti naudojant kvantinius darinius ir ilginant rezonatorių.

LD spinduliuotės bangos ilgis priklauso nuo aktyviosios srities medžiagos ir kinta nuo matomos šviesos iki infraraudonosios spinduliuotės. Pirmieji LD buvo pagaminti iš GaAs ir AlGaAs^{43, 44}. Šiandien populiariausias LD lydinys yra GaAsInP. Lazeriai, spinduliuojantys 0.8 μm bangos ilgio spinduliuotę, paprastai gaminami iš GaAs ir GaAlAs sluoksnių^{22,23}, (1,3-1,6) μm – iš InGaAsP sluoksnių užaugintų ant InP pagrindo^{24,25}. Įtemptosios InGaAs kvantinės duobės naudojamos diodų, spinduliuojančių (0,9 – 1,1) μm, auginimui^{45,46}. Trumpabangėje srityje ((200-600) nm) spinduliuoja iš nitridų (GaN, AlN, InN) pagaminti LD^{26,27}.

Didelės spartos optinėse ryšio sistemose naudojami vienmodžiai lazeriniai diodai. Vienmodei veikai reikia, kad kitų, išskyrus vieną spinduliuojamą modą, modų stiprinimas būtų žemiau slenkstinės vertės. Norint palaikyti nuostovią vienmodę LD veiką, reikia kontroliuoti skersines modas, slopinti savaiminę spinduliuotę, užtikrinti temperatūrinį stabilumą. Lazeriai su kvantiniais ir įtemptaisiais kvantiniais dariniais pasižymi mažesniu spektro pločiu ir nuostovia vienmode veika.

Vienmodė lazerinė veika gaunama dioduose su paskirstytuju grįžtamuju ryšiu (PGR) ar paskirstytuju Brego atšvaitu (LD su Fabri ir Pero rezonatoriumi spinduliuotės spektras paprastai yra daugiamodis). Brego gardelė sukuria grįžtamąjį ryšį tik spinduliuotei, kurios bangos ilgis atitinka Brego bangos ilgį. PGR lazeriniuose dioduose stiprinimo slenkstis yra mažesnis. Todėl Brego gardelės nulemta moda pradeda spinduliuoti tekant mažesnei injekcinei srovei nei kitos modos.

Lazeriniuose dioduose su paskirstytuju Brego atšvaitu galima keisti spinduliuotės bangos ilgį keičiant srovės, tekančios Brego atšvaito sritimi, stiprį⁴⁷. Brego atšvaito srityje spinduliuotės stiprinimas nevyksta, gardelės žingsnis kinta kintant tekančios srovės stipriui. Spinduliuotės bangos ilgį galima keisti šimto nanometrų srityje.

⁴³ H. Kressel, F. Z. Hawrylo, "Red-light-emitting laser diodes operating cw at room temperature", *Appl. Phys. Lett.*, 28, pp.: 598 – 600 (1976).

⁴⁴ L. Wandinger, K. L. Klohn, "p-n Junction Lasers for Communication Systems", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, AES-2, pp.: 271 – 277 (1966).

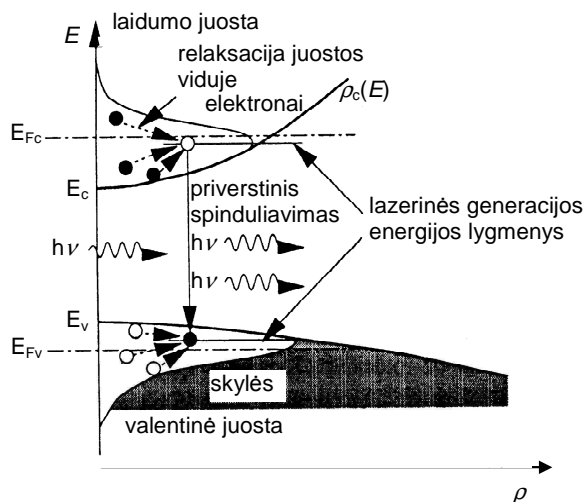
⁴⁵ Y. Chriqui, G. Saint-Girons, S. Bouhoule, J.-M. Moison, G. Isella, H. von Kaenel and I. Sagnes, "Room temperature laser operation of strained InGaAs/GaAs QW structure monolithically grown by MOVCD on LE-PECVD Ge/Si virtual substrate", *Electron. Lett.*, 39 pp.: 1658 – 1660 (2003).

⁴⁶ M. Yuda, T. Sasaki, J. Temmyo, M. Sugo and C. Amano, "High-power, highly reliable 1.05 μm InGaAs strained quantum well laser diodes as pump sources for thulium-doped fibre amplifiers", *Electron. Lett.*, 38 pp.: 45 – 46 (2002).

⁴⁷ P. Signoret, M. Myara, J.-P. Tourrenc, B. Orsal, M.-H. Monier, J. Jacquet, P. Leboudec, and F. Marin, "Bragg Section Effects on Linewidth and Lineshape in 1.55-μm DBR Tunable Laser Diodes", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 16, pp.: 1429-1431 (2004).

2.2.4 Krūvininkų injekcija ir spinduliavimas lazeriniame diode

Krūvininkų injekcija į aktyviąją sritį lemia optinį stiprinimą. Injekcinei srovei pasiekus slenkstinę, stiprinimas išsotina ir injekuotųjų krūvininkų tankis aktyviojoje srityje palaikomas pastovus – krūvininkų perteklius nedelsiant paverčiamas koherentine spinduliuote. Žadinimui (injekuojamų krūvininkų skaičiui) didėjant, intensyvėja spinduliuotė, o krūvininkų tankis nekinta. Vykstant lazeriniam spinduliavimui krūvininkų šuoliai vyksta tarp energijos lygmenų, atitinkančių didžiausią elektronų ir skylių tankį laidumo ir valentinėje juostose (2.20 pav.).



2.20 pav. Energijos juostos sandara tūriniame lazeriniame darinyje vykstant priverstiniam spinduliavimui.

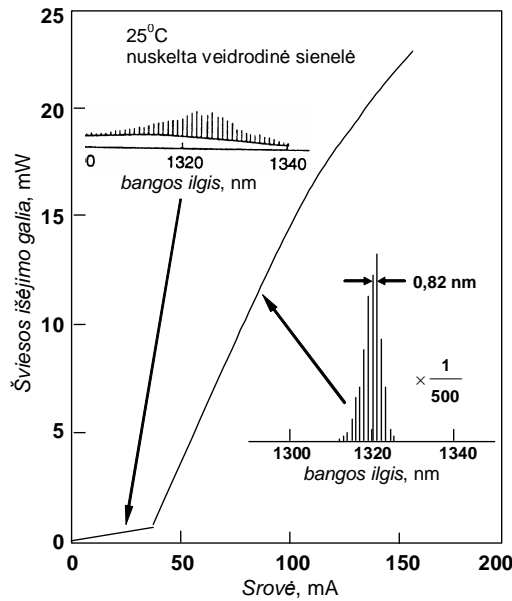
Į aktyviąją sritį injekuoti krūvininkai atsitiktinai pasiskirsto laidumo ir valentinėje juostose. Šviesos diode šie krūvininkai tuoj pat atsitiktinai rekombinuoja. Tačiau lazeriniame diode injekuotieji krūvininkai, visų pirma, turi pasiekti lazerinio spinduliavimo lygmenis ir tik tada rekombinuoja. Šis vyksmas vadinamas relaksacija juostos viduje. Relaksacijai reikalinga trukmė vadinama relaksacijos trukme ir yra apibrėžta krūvininkų sklaidos. Būdinga relaksacijos į priverstinio spinduliavimo lygmenis trukmė yra ($10^{-12} - 10^{-13}$) s. Į lazerinio spinduliavimo lygmenis relaksavę krūvininkai iš karto dalyvauja priverstinėje spinduliuojamoje rekombinacijoje. O lazerinio spinduliavimo lygmenys iš karto užpildomi naujais krūvininkais. Krūvininkų gyvavimo trukmė dėl savaiminio spinduliavimo yra apie 10^{-9} s. Nespinduliuojamosios rekombinacijos būdingoji trukmė yra ($10^{-9} - 10^{-10}$) s. Taigi krūvininkų gyvavimo trukmė dėl priverstinės spinduliuojamosios rekombinacijos yra mažiausia, ir dauguma injekuotųjų krūvininkų dalyvauja būtent šiame vyksme.

2.2.5 Lazerinio diodo efektyvumas ir išėjimo galia

Lazerinio diodo veika srovei nepasiekus slenkstinės vertės yra panaši į šviesos diodo veiką: spinduliuotė yra savaiminė, galia maža (2.21 pav.). Injekcinei srovei pasiekus slenkstį, priverstinė spinduliuojamoji rekombinacija viršija savaiminę ir vertimo efektyvumas sparčiai išauga. Išėjimo galia atitinka nuostolius veidrodyje. LD efektyvumas (veikiant virš slenkščio) įvertinamas išoriniu diferencialiniu kvantiniu našumu (išspinduliuotų fotonų skaičiaus padidėjimo santykiu su injekuotųjų krūvininkų skaičiaus padidėjimu):

$$\eta_d = \eta_{vd} \frac{2\Delta P_{iš-st}/h\nu}{\Delta I/q} = \eta_{vd} \frac{(1/2L)\ln[1/R_1R_2]}{\alpha_v + (1/2L)\ln[1/R_1R_2]}; \quad (2.47)$$

čia η_{vd} yra vidinis diferencialinis kvantinis našumas išreikštas procentais ir nusakantis fotonų skaičiaus padidėjimo santykį su injekuotųjų krūvininkų skaičiaus padidėjimu aktyviojoje srityje:



2.21 pav. LD spinduliuotės veika prieš ir po slenkščio.

$$\eta_{vd} = \frac{\Delta P_{a-st}/h\nu}{\Delta I/q}; \quad (2.48)$$

čia P_{a-st} yra spinduliuotės dėl priverstinės rekombinacijos aktyviajame sluoksnyje galia. Panaudojant diferencialinį kvantinį našumą, spinduliuotės galia per vieną veidrodį gali būti išreikšta taip:

$$P_{is-st} = \frac{1}{2} h\nu\eta_d S_a \frac{J - J_{sl}}{q} = \frac{1}{2} h\nu\eta_d \frac{I - I_{sl}}{q}; \quad (2.49)$$

čia S_a yra aktyviojo sluoksnio plotas, I ir I_{sl} – tiesioginė injekcinė srovė ir slenkstinė LD srovė.

LD veikimo efektyvumui įvertinti dažnai naudojamas ir polinkio efektyvumas (atsakas), kuris išreiškiamas pirmąją spinduliuotės galios išvestine pagal injekcinę srovę:

$$\eta_{p-st} = \frac{dP_{is-st}}{dI} = \frac{1}{2} \eta_d \frac{h\nu}{q} = 0,62 \frac{\eta_d}{\lambda[\mu m]} \quad [W/A]. \quad (2.50)$$

Naudojant polinkio efektyvumą, spinduliuotės galia išreiškiama paprasčiau:

$$P_{is-st} = \frac{1}{2} h\nu\eta_d \frac{I - I_{sl}}{q} = \eta_{p-st} (I - I_{sl}). \quad (2.51)$$

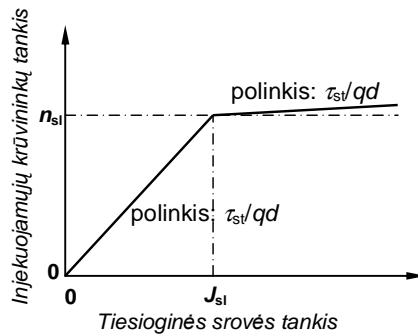
Idealiu atveju LD spinduliuotės galia didėja didėjant srovei, kaip aprašo (2.49) ir (2.51). Tačiau realiuose įtaisuose spinduliuotės galios didėjimas yra mažesnis dėl optinio nestabilumo, Džaulio šilumos išsiskyrimo.

2.2.6 Voltamperinė lazrinio diodo charakteristika

Lazrinio diodo voltamperinė charakteristika yra tokia pati kaip šviesos diodo, kol nevyksta lazerinis spinduliuavimas. Tiesioginei įtampai viršijus draudžiamosios energijos tarpą (0,95 V 1300 nm LD), srovė greitai didėja, kaip ir šviesos diodui (2.14 pav.). Šviesos diodo veikoje vyrauja difuzinė srovė:

$$I = S_a J_{s0} \exp \frac{q(V_b - R_s I)}{k_B T}. \quad (2.52)$$

Injektuotųjų krūvininkų tankis, srovei, neviršijant slenkstinės, sparčiai didėja (2.22 pav.). Diferencialinę varžą galima apskaičiuoti (2.52) išdiferencijavus pagal srovę I :



2.22 pav. Injektuotųjų krūvininkų tankio priklausomybė nuo tiesioginės srovės.

$$\frac{dV_b}{dI} = \frac{k_B T}{q} \frac{1}{I} + R_s. \quad (2.53)$$

Šviesos diodo veikoje diferencialinė varža sparčiai mažėja didėjant injekuotųjų krūvininkų tankiui, kol pasiekia nuosekliosios varžos vertę R_s . Pasiekus slenkstinę srovę, diferencialinė varža toliau nebekinta dėl Fermio kvazilygmenų „pagavimo“.

Pasiekus slenkstį, sparčiai vyksta injekuotųjų krūvininkų priverstinė spinduliuojamoji rekombinacija. Kadangi priverstinės spinduliuojamosios rekombinacijos sparta yra 3-4 eilėmis didesnė nei savaiminės spinduliuojamosios ar nespinduliuojamosios rekombinacijos, visi injekuotieji krūvininkai tuojau pat paverčiami lazerinės spinduliuotės galia. Taigi krūvininkų tankis aktyviojoje srityje nekinta ir Fermio kvazilygmenys yra „pagaunami“ tame lygyje, kuris yra ties slenkstine srove. Sandūros įtampa taip pat įsisotina, nes ji atitinka Fermio kvazilygmenų energijų skirtumą. Taigi virš slenksčio lazerinio diodo voltamperinė charakteristika iš esmės skiriasi nuo šviesos diodo:

$$V_j = V_b - R_s I. \quad (2.54)$$

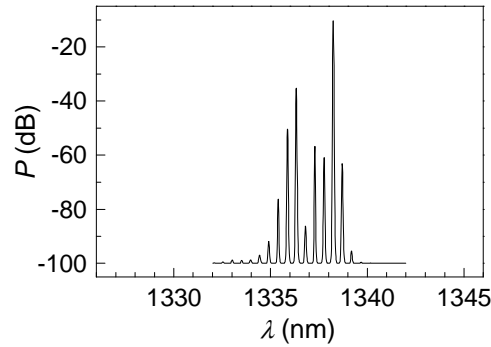
Laikant, kad pirmoji sandūros įtampos išvestinė lygi nuliui $\left(\frac{dV_j}{dI} \approx 0\right)$:

$$\frac{dV_b}{dI} = R_s. \quad (2.55)$$

Taigi didėjant injekcinei LD srovei diferencialinė varža sparčiai kinta nuo vertės (2.20) iki vertės (2.55), kurią pasiekia, kai srovė yra lygi slenkstinei. LD veikiant virš slenksčio voltamperinės charakteristikos polinkis yra pastovus, nulemtas nuosekliosios įtaiso varžos. Realiose lazeriniuose dioduose injekuotųjų krūvininkų tankis šiek tiek didėja didėjant injekcinei srovei. Šis didėjimas yra nulemtas baigtinės priverstinės spinduliuojamosios rekombinacijos trukmės. Tačiau, kadangi ši trukmė yra labai maža, tai ir krūvininkų tankio augimas viršijus slenkstinę srovę yra 3 eilėmis mažesnis, nei prieš slenkstį.

2.2.7 Lazerinio diodo spinduliuotės spektras

LD spinduliuojamas modas ir atstumą tarp jų aprašo (2.35) ir (2.45). Spinduliuojamų modų skaičius (ir atstumas tarp jų) priklauso nuo stiprinimo spektro pločio ir rezonatoriaus ilgio. Rezonatoriui trumpėjant spinduliuojamų modų skaičius mažėja (atstumas tarp modų didėja). LD, kurių rezonatoriaus ilgis mažesnis nei 100 μm , spinduliuoja vieną išilginę modą. Tačiau tokių LD yra didelė slenkstinė srovė (spinduliuotei sklindant trumpu rezonatoriumi neužtenka laiko jai pakankamai sustiprinti). Įprastų Fabri ir Pero lazerinių diodų spektrai susideda iš keleto išilginių modų (2.23 pav.).



2.23 pav. Fabri ir Pero lazerinio diodo spinduliuotės spektras šiam veikiant virš slenksčio ($L=500 \mu\text{m}$)⁴⁸.

Fabri ir Pero LD injekcinei srovei didėjant, smailinis bangos ilgis prieš slenkstį pasilenka į trumpesnių bangų pusę dėl juostos užpildos reiškinio (2.18 pav.). Kartu pasilenka ir visų spinduliuojamų modų bangos ilgis, nes pakinta medžiagos lūžio rodiklis (žr.: (2.44)). Naudojant (2.44) galima apskaičiuoti bangos ilgio poslinkio dydį:

$$\delta\lambda_m(n) = \frac{\lambda_0}{n_r} \frac{dn_r}{dn} \Delta n. \quad (2.56)$$

Lūžio rodiklio pokytis yra nulemtas plazminio efekto dėl krūvininkų tankio didėjimo. Lūžio rodiklio pokytis dėl plazminio efekto:

$$\Delta n_{r-pl} = \frac{n_{r0} q^2}{2m^* \omega_0^2 \epsilon_s} \Delta n; \quad (2.57)$$

čia n_{r0} yra medžiagos lūžio rodiklis, kai krūvininkų tankis lygus nuliui, m^* - efektinė injekuotųjų krūvininkų masė, ϵ_s - dielektrinė konstanta. Injektuotųjų krūvininkų efektinę masę nulemia elektrono efektinė masė, kuri yra mažesnė nei skylės. Δn yra injekuotųjų krūvininkų tankio pokytis, o ω_0 – spinduliuotės dažnis.

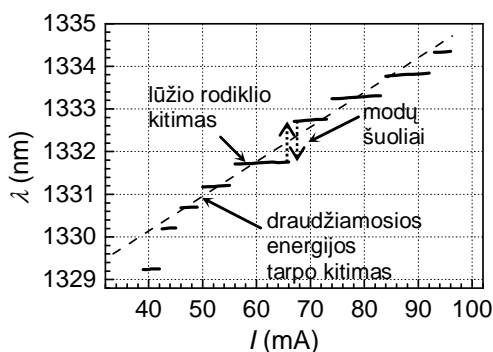
Lūžio rodiklio pokytis kintant krūvininkų tankiui $\left(\frac{dn_r}{dn}\right)$ yra apie $(-1 \times 10^{-21} - -5 \times 10^{-21}) \text{ cm}^3$ (LD spinduliuojantiems infraraudonojoje srityje).

Prasidėjus lazerinei veikai (injekcinei srovei viršijus slenkstį) juostos užpildos ir plazminis reiškiniai praktiškai nebeįtakoja spinduliuotės spektro, nes mažai kinta injekuotųjų krūvininkų tankis. Smailinis bangos ilgis laipsniškai didėja dėl išsiskiriančios Džaulio šilumos tekant didelei tiesioginei srovei. Spinduliuotės bangos ilgis kinta kintant įtaiso temperatūrai dėl draudžiamosios energijos tarpo kitimo. Šio bangos ilgio poslinkio dydis:

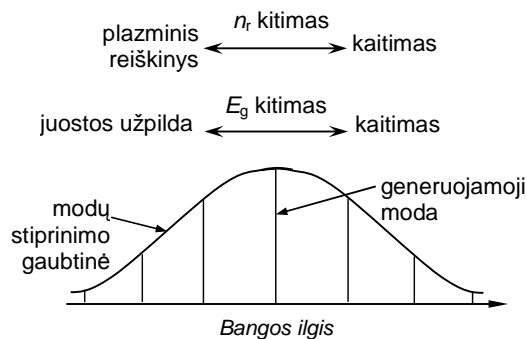
$$\delta\lambda_m(T_j) = \frac{\lambda_0}{n_r} \frac{dn_r}{dT_j} \Delta T_j; \quad (2.58)$$

čia T_j yra sandūros temperatūra. Infraraudonųjų LD būdingosios lūžio rodiklio kitimo vertės kintant temperatūrai yra tarp $2 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ir $5 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$. Vidutinis modos bangos ilgio pokytis kintant temperatūrai (dėl draudžiamosios energijos tarpo kitimo) yra $0,25 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 850 nm AlGaAs/GaAs, $0,4 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 1300 nm InGaAsP/InP, $0,6 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 1550 nm InGaAsP/InP lazeriniams diodams.

⁴⁸ V. Palenskis, S. Pralgauskaitė, J. Matukas, J. G. Simmons, S. Smetona, R. Sobiestianskas, "Experimental investigations of the effect of the mode-hopping on the noise properties of InGaAsP Fabry-Pérot multiple-quantum-well laser diodes", *IEEE Trans. Electron Dev.*, V. 50, No. 2, pp. 366-371 (2003).



2.24 pav. Smailinio bangos ilgio kitimas didėjant injekcinei Fabri ir Pero InGaAsP/InP 1330 nm LD⁴⁸.



2.25 pav. Spinduliuotės bangos ilgio kitimas veikiant lazeriniam diodui.

2.24 pav. pateiktas smailinės modos bangos ilgio kitimas kintant injekcinei srovei. Stebimas šuoliškas smailinės modos bangos ilgio kitimas, kai stiprinimo spektro didžiausia vertė pasislenka ties kitos išilginės modos bangos ilgiu. Šuoliškai keičiantis smailinei modai paprastai stebima histerezė. Stiprinimo spektro didžiausia vertė tolygiai slenka į didesnio bangos ilgio pusę kintant draudžiamosios energijos tarpui. Tačiau stiprinimas yra akumuliuojamas spinduliuojamoje smailinėje modeje. Ir modų šuolis įvyksta tik tada, kai gretimoms modoms stiprinimas viršija spinduliuojamos modos stiprinimą.

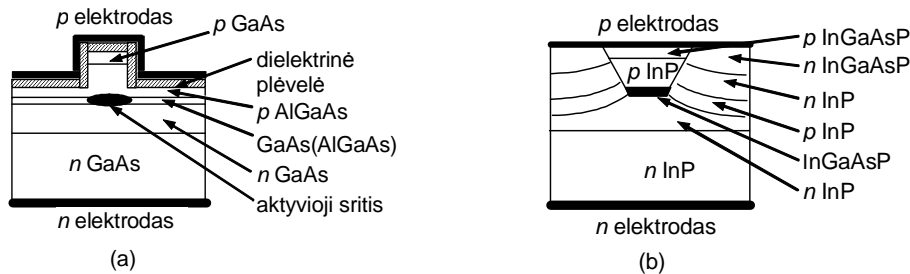
(2.56) ir (2.58) formulėmis aprašytas spinduliuotės bangos ilgio kitimas dėl lūžio rodiklio kitimo pakitus krūvininkų tankiui ir spinduliuotės bangos ilgio kitimo pakitus temperatūrai veikia vienas kitam priešingai (2.25 pav.)

LD rezonatoriuje spinduliuotė sklinda išilgai aktyviojo sluoksnio - aktyviojo ir gretimų sluoksnių sukurtu bangolaidžiu. Sklindantį elektromagnetinį lauką galima suskirstyti į skersinę elektrinę ir skersinę magnetinę modas. Šias dar galima skirstyti į statmenąją (statmenai aktyviajam sluoksniui) ir šoninę (lygiagrečiai aktyviajam sluoksniui). LD paprastai spinduliuoja skersinę elektrinę modą, kurios slenkstis yra mažesnis nei magnetinės.

2.2.8 Lazerinių diodų dariniai

Krūvininkų ir spinduliuotės išlaikymas aktyviojoje LD srityje yra svarbus uždavinys. Nuotėkio iš aktyviosios srities srovė lemia didesnę slenkstinę srovę, nenuostovų spinduliuotės spektrą, įtaiso kaitimą ir netiesinę spinduliuotės charakteristiką.

Statmenoji skersinė moda yra stovinčioji banga tarp dviejų įvairialyčių sandūrų. Statmena aktyviajam sluoksniui kryptimi optinio lauko sulaikymas priklauso nuo aktyviosios srities storio, lūžio rodiklių skirtumo



2.26 pav. Stiprinimo valdymo (a) ir lūžio rodiklio valdymo (b) lazeriniai dariniai.

tarp aktyviojo sluoksnio medžiagos ir gretimų sluoksnių, spinduliuotės bangos ilgio. Aktyviojo sluoksnio storis paprastai neviršija 200 nm, o lūžio rodiklių skirtumas – 10 %. Tokiu atveju LD spinduliuoja tik vieną pagrindinę statmenąją modą. Aukštesnės eilės modos spinduliuojamos tik, jei aktyviojo sluoksnio storis viršija 1 μm .

Tačiau optinis sulaikymas ploname aktyviajame sluoksnyje yra mažas. Paprastai optinio išlaikymo faktorius neviršija 50 %, o dažniausiai tėra 20 %. Kvantinių darinių aktyviojoje LD srityje naudojimas pagerina optinį sulaikymą ir sumažina LD slenkstinę srovę.

Šoninė skersinė moda yra stovinčioji banga kryptimi lygiagrečia aktyviajam sluoksniui. Jos įtaka LD veikai svarbi tik, kai aktyviojo sluoksnio storis viršija 1 μm . Šoninei skersinei modai stabilizuoti naudojami įvairūs LD dariniai. Šiuose dariniuose šoninė moda valdoma naudojant stiprinimo valdymą arba lūžio rodiklio valdymą. Darinius, skirtus padidinti optinį ir elektrinį išlaikymą aktyviojoje srityje, galima suskirstyti į stiprinimo valdymo ir lūžio rodiklio valdymo darinius (2.26 pav.).

LD dariniuose su keteriniu bangolaidžiu (2.26 (a) pav.) nėra potencialinio barjero, kuris sustabdytų krūvininkų tekėjimą iš aktyviosios srities į darinio šonus^{49,50,51}. Stiprinimo valdymas yra realizuojamas per krūvininkų injekciją (2.27 pav.). Šviesos stiprinimas priverstine spinduliuojamąja rekombinacija vyksta tikrai stiprios injekcijos srityje, kur yra didelis stiprinimas. Esant itin didelei krūvininkų injekcijai, centrinėje aktyviojo sluoksnio srityje krūvininkų tankis sumažėja dėl sparčios priverstinės krūvininkų rekombinacijos – stebimas erdvinio krūvininkų išdeginimo reiškinys. Šis krūvininkų tankio sumažėjimas lemia lūžio rodiklio padidėjimą – tokiu būdu spinduliuotė sulaikoma aktyviojoje srityje (vyksta savifokusacija). Tačiau šis spinduliuotės sulaikymo būdas yra gana nenuostovus: spinduliuavimo srities centras pasislenka į didesnio lūžio rodiklio srities kraštą, jei tik yra kokia lūžio rodiklio pasiskirstymo asimetrija. Ir didžiausio spinduliuavimo sritis nebesutampa su didžiausio stiprinimo sritimi, padidėja injekcinė srovė reikalinga tai pačiai spinduliuotės galiai pasiekti – spinduliuotės charakteristikoje stebimi įlinkiai (2.28 pav.). Taigi esant didelei spinduliuotės galiai stiprinimo valdymo lazeriniuose dioduose šoninė skersinė moda yra nestabili.

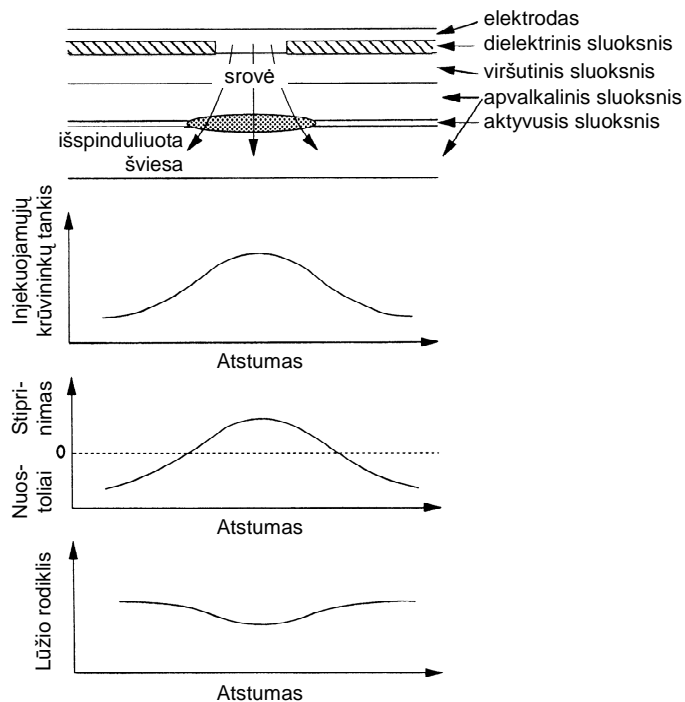
LD su keteriniu bangolaidžiu privalumas yra maža talpa, todėl jų moduliacijos sparta gali būti itin didelė. Be to jų gamyba, palyginus, yra paprasta ir pigi, šie įtaisai yra ilgaamžiai.

Lazeriniai dariniai su paslėptuoju įvairiatarpiu dariniu (lūžio rodiklio valdymu) pasižymi geresnėmis charakteristikomis (slenkstinė srovė yra mažesnė, efektyvumas didesnis, o LI charakteristika tiesiškesnė) nei

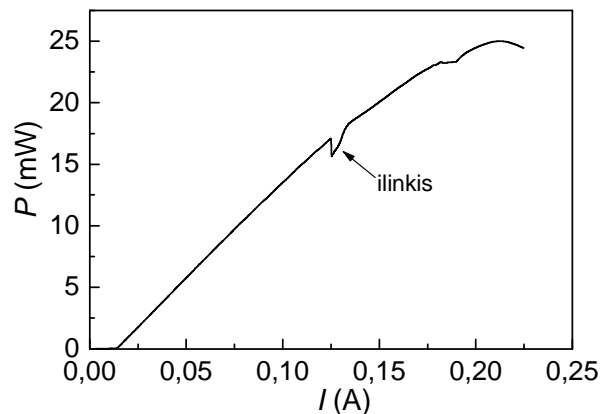
⁴⁹ D. Wu, H. Wang, B. Wu, H. Ni, S. Huang, Y. Xiong, P. Wang, Q. Han, Z. Niu, I. Tangring and S. M. Wang, “Low threshold current density 1.3 μm metamorphic InGaAs/GaAs quantum well laser diodes”, *Electron. Lett.*, 44, pp.: 474-475 (2008).

⁵⁰ J. A. Gupta, P. J. Barrios, G. C. Aers and J. Lapointe, “1550 nm GaInNAsSb distributed feedback laser diodes on GaAs”, *Electron. Lett.*, 44 pp.: 578-579 (2008).

⁵¹ K. C. Kim, D.-K. Jang, J. I. Lee, T. G. Kim, W. W. Lee, J. H. Kim, E. J. Yang, B. J. Koo, and I. K. Han, “High-Power Single-Mode 1.3- μm InGaAsP-InGaAsP Multiple-Quantum-Well Laser Diodes With Wide Apertures”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 21, pp.: 1438-1440 (2009).



2.27 pav. Stiprinimo valdymas lazeriniame diode.



2.28 pav. Įlinkis LD spinduliuotės charakteristikoje.

stiprinimo valdymo diodai. Čia srovės tekėjimo sritis ir spinduliuotė yra griežtai apribotos pačios įtaiso sandaros (2.26 (b) pav.) - tokiu būdu pasiekama daug mažesnė slenkstinė LD srovė (žymiai didesnis slenkstinis srovės tankis)^{52,53,54}. Aktyvioji sritis yra apsupta kitos rūšies medžiagų, lūžio rodiklio pasiskirstymas yra kaip optinėje skaiduloje. Tokiame darinyje, jei aktyviosios srities matmenys yra tinkami, spinduliuojama tik pagrindinė šoninė skersinė moda ir ji yra stabili. Pvz., aktyviosios srities plotį padarius

⁵² F.-M. Lee, C.-L. Tsai, C.-W. Hu, F.-Y. Cheng, M.-C. Wu, and C.-C. Lin, "High-Reliable and High-Speed 1.3 μm Complex-Coupled Distributed Feedback Buried-Heterostructure Laser Diodes With Fe-Doped InGaAsP/InP Hybrid Grating Layers Grown by MOCVD", *IEEE Trans. Electron Dev.*, 55, pp.: 540-546 (2008).

⁵³ C.-W. Hu, F.-M. Lee, T.-C. Peng, T.-M. Ou, M.-C. Wu, and Y.-H. Huang, "High-Speed and Uncooled Operation of 1.3- μm InGaAsP Strain-Compensated MQW BH Lasers Fabricated on Patterned InP Substrates", *J. Lightw. Technol.*, 24, pp.: 2906-2911 (2006).

⁵⁴ S. H. Oh, J.-M. Lee, K. S. Kim, C.-W. Lee, H. Ko, S. Park, and M.-H. Park, "Fabrication of Wavelength-Tunable Butt-Coupled Sampled Grating DBR Lasers Using Planar Buried Heterostructure", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 15, pp.: 1680-1682 (2003).

1,8 μm InGaAsP/InP 1300 nm LD sklis tik pagrindinė šoninė moda (1,5 μm 1550 nm spinduliuojančiam LD). Tinkamas aktyviosios srities plotis priklauso nuo jos storio ir gretimų slepiančiųjų sluoksnių lūžio rodiklio.

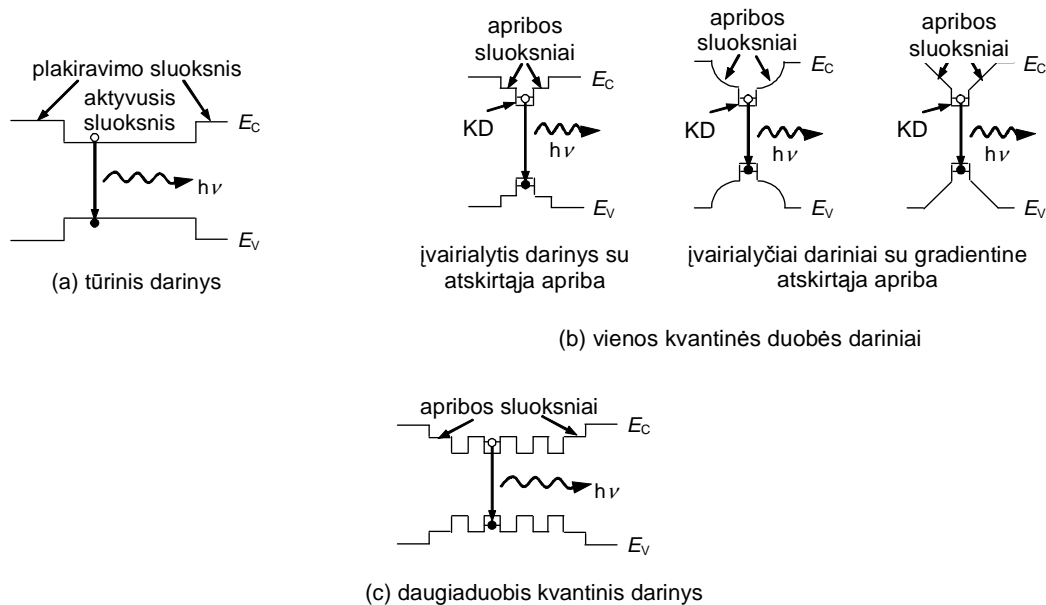
Srovės tekėjimo sritį PĮD dioduose riboja slepiantieji sluoksniai, kurie sudaro *pn* sandūras veikiančias atvirkštine kryptimi, kai diodas įjungtas tiesiogine kryptimi. Srovės blokavimo *pnpn* sluoksniai suformuoja tiristorių. Tačiau per šiuos sluoksnius teka nuotėkio srovė, dėl kurios padidėja slenkstinė srovė, blogėja temperatūrinės įtaiso charakteristikos. Taip pat tiristoriniai srovės blokavimo sluoksniai padidina įtaiso talpą. Srovės sulaikymui taip pat naudojami ypač didelės varžos sluoksniai (pvz., Fe legiruotas InP sluoksnis InGaAsP/InP dioduose)⁵⁵. Naudojant pusiau izoliuojančiuosius sluoksnius, išvengiama trūkumų, kurie stebimi LD su tiristoriniais sluoksniais.

LD su PĮD yra dažniausiai naudojami optinėse ryšio sistemose. Tačiau paslėptasis įvairialytis darinys yra papildomas įtaiso gedimo šaltinis: genda paslėptojo darinio paviršius^{56,57}.

2.2.9 Lazerinio diodo aktyviosios srities sandaros ypatybės

Svarbiausia lazerinio diodo sritis yra aktyvioji, kur vyksta priverstinė spinduliuojamoji rekombinacija, o injekuotųjų krūvininkų tankis yra didelis. Priverstiniam spinduliavimui reikia labai didelio krūvininkų tankio (virš 10^{18} cm^{-3}) sukurti užpildos apgražai.

Pirmųjų lazerinių diodų aktyvioji sritis buvo sudaryta iš tūrinio darinio (2.29 (a) pav.). Tūrinės aktyviosios srities storis yra (0,08-0,2) μm – tokiaame sluoksnyje gerai sulaikomi krūvininkai. Jei sluoksnio storis yra mažesnis, nei 0,05 μm, krūvininkų sulaikymas aktyviojoje srityje yra prastesnis ir slenkstinė srovė išauga.



2.29 pav. Būdingi lazerinių diodų aktyviosios srities dariniai (KD – kvantinė duobė).

⁵⁵ C.-W. Hu, F.-M. Lee, K.-F. Huang, M.-C. Wu, C.-L. Tsai, Y.-H. Huang, and C.-C. Lin, “Uncooled 1.3-μm Complex-Coupled DFB BH Laser Diodes With the Fe-Doped InGaAsP–InP Hybrid Current-Blocking Grating”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 18, pp.: 1551-1553 (2006).

⁵⁶ R. Sobiestianskas, J. G. Simmons, G. Letal, and R. E. Mallard, “Experimental Study on the Intrinsic Response, Optical and Electrical Parameters of 1.55-μm DFB BH Laser Diodes During Aging Tests”, *IEEE Trans. Device Mater. Rel.*, 5, pp.: 659-664 (2005).

⁵⁷ S. Pralgauskaitė, V. Palenskis, J. Matukas, “Fluctuations of optical and electrical parameters of distributed feedback lasers and their reliability”, *Fluct. Noise Lett.*, 4, pp. L365-L374 (2004).

Siauroje tūrinėje aktyviojoje srityje taip pat sumažėja optinis spinduliuotės sulaikymas – sumažėja diferencialinis efektyvumas.

Šiuolaikiniuose LD naudojami įvairūs kvantiniai dariniai, taip pat įtemptieji dariniai. Pirmiausia krūvininkų ir spinduliuotės sulaikymui aktyviojoje srityje padidinti buvo panaudotas įvairialytis darinys⁵⁸. Dvigubas įvairialytis darinys, kurio vidinio sluoksnio lūžio rodiklis yra didesnis nei išorinių, gerai sulaiko krūvininkus ir fotonus aktyviojoje srityje^{59,60}. Geresnis elektrinio ir optinio lauko sulaikymas aktyviojoje srityje sumažina slenkstinę srovę, padidina kvantinį efektyvumą, pagerina temperatūrinės LD charakteristikas.

Energijos lygmenys kvantinėse duobėse yra kvantuoti, būsenu tankio funkcija yra laiptuota (žr.: 1.4 poskyrį). Būdingas kvantinių duobių plotis yra nuo 5 nm iki 10 nm. Tokiame darinyje būsenu tankis yra mažesnis nei tūriniame, krūvininkai susikaupia kvantuotuose energijos lygmenyse, tarp kurių vyksta priverstiniai spinduliuojamieji šuoliai. Lazeriniuose dioduose su kvantinėmis duobėmis spinduliuotės stiprinimas yra didelis, slenkstinė srovė maža^{28,29}.

Dariniuose su viena kvantine duobe krūvininkų išlaikymas, palyginti, yra mažas – tekant stipriai injekcinei srovei, vyksta krūvininkų virštėkis iš duobės. Krūvininkų ir fotonų išlaikymui aktyviojoje srityje padidinti naudojami papildomi sluoksniai sukuriantys atskirtą apribą (2.29 (b) pav.). Efektyviausiai krūvininkus aktyviojoje srityje išlaiko gradientinės atskirtosios apribos darinys⁶¹. LD su daugiaduobiu kvantiniu dariniu (2.29 (c) pav.) pasižymi maža slenkstine srove ir, nenaudojant atskirtosios apribos – pakankamą išlaikymą sukuria pats daugiaduobis darinys^{62,63}.

Būsenu tankis kvantinėje duobėje yra baigtinis, todėl vienos kvantinės duobės darinyje užsipildžius žemiausiam energijos lygmeniui optinis stiprinimas įsisotina. LD su daugiaduobiu dariniu stiprinimas neįsisotina, ir šių diferencialinis efektyvumas yra didesnis nei lazerių su viena kvantine duobe.

Krūvininkų pasiskirstymas daugiaduobiame kvantiniame darinyje priklauso nuo barjerų pločio. Kai barjerai platūs, stiprus skersinis krūvininkų pasiskirstymas ir šoninė injekcinė srovė nulemia labai nevienalytį skersinį krūvininkų pasiskirstymą^{64,65}. Krūvininkų pasiskirstymas tampa tolygesnis, kai barjerų plotis sumažinamas nuo 10 nm iki 5 nm arba užauginant nesimetrišką daugiaduobį darinį⁶⁶.

Įtemptieji kvantiniai dariniai pirmą kartą buvo panaudoti siekiant sukurti lazerinį diodą, spinduliuojantį (900–1100) nm šviesą. Įtemptiems dariniams yra apibrėžiamas kritinis sluoksnio storis – auginant sluoksnius, kurių storis neviršija kritinio, esant gardelės nesutapimui nesusidaro dislokacijos. Pvz., kai ištempimas dėl

⁵⁸ C. Weisbush, B. Vinter, *Quantum semiconductor structures* (Academic Press Inc., 1991).

⁵⁹ A. Mala, A. Jasik, M. Teodorczyk, A. Jagoda, and A. Kozłowska, “High-Power Low Vertical Beam Divergence 800-nm-Band Double-Barrier-SCH GaAsP–(AlGa)As Laser Diodes”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 18, pp.: 1582-1584 (2006).

⁶⁰ D. Gollub, S. Moses, M. Fischer and A. Forchel, “1.42 μm continuous-wave operation of GaInNAs laser diodes” *Electron. Lett.*, 39, pp.: 777-778 (2003).

⁶¹ M. J. Hump, D. T. Cassidy, B. J. Robinson, Q. C. Zhao, D. A. Thompson, “Effect of barrier thickness on the carrier distribution in asymmetric multiple-quantum-well InGaAsP lasers”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, V. 12, No. 2, pp. 134-136 (2000).

⁶² M. Legge, G. Bache, S. Bader, A. Forchel, H.-J. Lugaur, A. Waag, G. Landwehr, “Strongly index-guided II-VI laser diodes”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, V. 12, No. 3, pp. 236-238 (2000).

⁶³ T. R. Tolliver, N. G. Anderson, F. Agahi, K. M. Lau, “Characteristic temperature study of GaAsP–AlGaAs tensile strained quantum well lasers”, *J. Appl. Phys.*, 88, pp.: 5400 – 5409 (2000).

⁶⁴ T. C. Newell, M. W. Wright, H. Hou, L. F. Lester, “Carrier distribution, spontaneous emission and gain engineering in lasers with nonidentical quantum wells”, *IEEE J. Sel. Quantum Electron.*, V. 5, No. 3, pp. 620-626 (1999).

⁶⁵ J.-R. Chen, T.-S. Ko, P.-Y. Su, T.-C. Lu, H.-C. Kuo, Y.-K. Kuo, and S.-C. Wang, “Numerical Study on Optimization of Active Layer Structures for GaN/AlGaIn Multiple-Quantum-Well Laser Diodes”, *J. Light. Technol.*, 26, pp.: 3155-3165 (2008).

⁶⁶ J. J. Coleman, “Strained-layer InGaAs Quantum-well heterostructure lasers”, *IEEE J. Sel. Quantum Electron.*, 6, pp. 1008-1013 (2000).

gardelės konstantų nesutapimo yra ~1 %, kritinis sluoksnio storis yra 20 nm⁶⁷. Lazeriniai diodai su įtemptaisiais kvantiniais dariniais pasižymi mažesniais vidiniais nuostoliais, mažesne slenkstine srove, didesniu efektyvumu ir aukšta charakteringąja temperatūra^{29,68}. Įtemptųjų darinių efektyvumas yra didesnis, nes gardelės įtempimas sumažina skylių efektinę masę – lemia simetriškesnę elektronų ir skylių injekciją, tuo pačiu, sumažėja slenkstinis krūvininkų tankis, reikalingas užpildos apgražai pasiekti.

Lazerinių diodų aktyviajai sričiai taip pat naudojami kvantiniai siūlai ir kvantiniai taškai. Naudojant šiuos kvantinius darinius labai sumažėja medžiagos tūris, kuriame reikia sukurti užpildos apgražą – tai lemia itin mažą slenkstinę srovę, didelį efektyvumą ir temperatūrinį stabilumą^{31,69,70,71}.

Geras krūvininkų išlaikymas kvantiniuose dariniuose pasiekiamas tik parinkus tinkamas darinio medžiagas. GaInNAs lydinys pasižymi geresnėmis temperatūrinėmis charakteristikomis nei įprastai (1.2-1.55) μm LD naudojamas GaInAsP. Įprasto GaInAsP lydinio energijos šuolis laidumo juostoje yra mažas ($\Delta E_c=100$ meV), o valentinėje - didelis ($\Delta E_v=150$ meV – per didelis sunkiosioms skylėms). GaInNAs energijos šuolių vertės yra geresnės: $\Delta E_c=570$ meV ir $\Delta E_v=60$ meV – 570 meV yra pakankamas energijos šuolis elektronų išlaikymui užtikrinti. Derinant GaInNAs su plačiatarpiu AlGaAs galima pasiekti gerą krūvininkų išlaikymą aktyviojoje srityje ir labai geras LD temperatūrinės charakteristikas.

2.2.10 Lazerinio diodo spinduliuotės diagrama

LD spinduliuotės diagramą nulemia skersinė moda. Artimoji spinduliuotės diagrama aprašo spinduliuotės galios pasiskirstymą veidrodžio plokštumoje. Tolimoji spinduliuotės diagrama yra svarbi naudojant LD įvairiose sistemose.

Paprastai lazeriniai diodai spinduliuoja vieną statmenąją skersinę modą, kurios spinduliuotės diagrama yra sudaryta iš vienos smailės (statmena aktyviajai sričiai kryptimi). Tolimosios spinduliuotės diagramos plotis atvirkščiai proporcingas aktyviosios srities storiui – tai lemia šviesos difrakcija pro aktyviosios srities storio plyšį. Aktyviosios srities storiui mažėjant, difrakcija didėja. Tolimoji spinduliuotės diagrama aprašoma kampiniu plokščiu pusės intensyvumo lygyje (2.30 pav.). Statmenąją aktyviajam sluoksniui kryptimi LD spinduliuotės diagramos plotis yra apie 40 laipsnių.

Stiprinimo valdymo LD srovės tekėjimo sritis paprastai apima 5 μm plotį. Tokiu atveju spinduliuojama viena šoninė moda, ir spinduliuotės diagramą sudaro vienas maksimumas⁷². Jei injekcijos srities plotis viršija 10 μm spinduliuavimas vyksta keliose vietose, ir spinduliuotės diagramą sudaro keletas atskirų maksimumų⁷³. Kiekvieno iš maksimumų lygiagrečiai aktyviajam sluoksniui kryptimi spinduliuotės diagramos plotis yra apie 20 laipsnių.

⁶⁷ T. C. Newell, P. M. Varangis, E. Pease, A. Stintz, G. T. Liu, K. J. Malloy, L. F. Lester, “High-power AlGaInAs strained multi-quantum well lasers operating at 1.52 μm”, *Electron. Lett.*, 36, pp. 955-956 (2000).

⁶⁸ G. Tsvid, J. Kirch, L. J. Mawst, M. Kanskas, J. Cai, R. A. Arif, N. Tansu, P. M. Smowton, and P. Blood, “Spontaneous Radiative Efficiency and Gain Characteristics of Strained-Layer InGaAs–GaAs Quantum-Well Lasers”, *IEEE J. Quantum Electron.*, 44, pp.: 732-739 (2008).

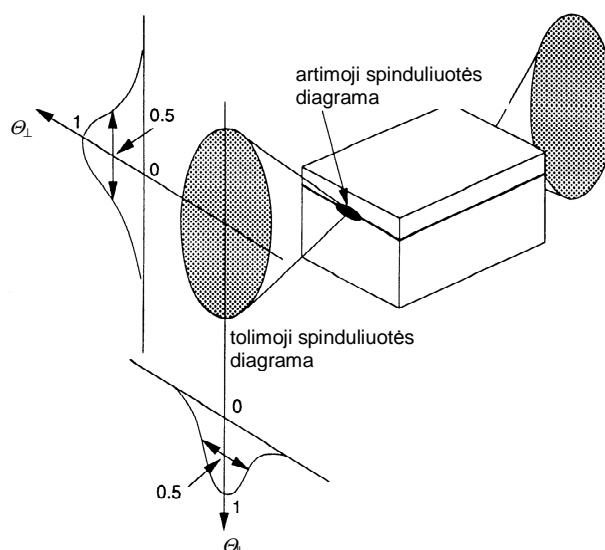
⁶⁹ C. L. Tan, Y. Wang, H. S. Djie, and B. S. Ooi, “The Dynamic Characteristics and Linewidth Enhancement Factor of Quasi-Supercontinuum Self-Assembled Quantum Dot Lasers”, *IEEE J. Quantum Electron.*, 45, pp.: 1177-1182 (2009).

⁷⁰ S.-M. Liu, M. Yoshita, M. Okano, T. Ihara, H. Itoh, H. Akiyama, L. N. Pfeiffer, K. W. West, K. W. Baldwin, “Electronic structure and efficient carrier injection in low-threshold T-shaped quantum-wire lasers with parallel p- and n-doping layers”, *J. Appl. Phys.*, 102, pp.: 043108-7 (2007).

⁷¹ Z. Alferov, “Double heterostructure lasers: early days and future perspectives”, *IEEE J. Sel. Quantum Electron.*, 6, pp. 832-840 (2000).

⁷² S. Uchida, M. Takeya, S. Ikeda, T. Mizuno, T. Fujimoto, O. Matsumoto, S. Goto, T. Tojyo, and M. Ikeda, “Recent Progress in High-Power Blue-Violet Lasers”, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 9, pp.: 1252-1259 (2003).

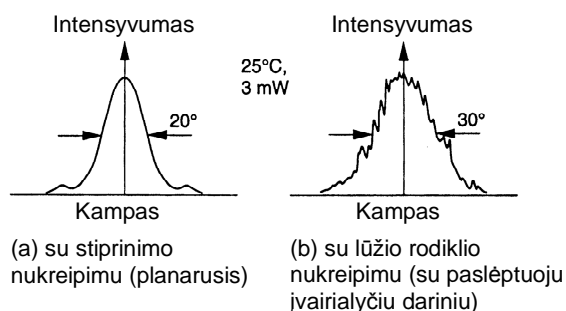
⁷³ H. Braun, S. Rogowsky, U. T. Schwarz, S. Brünninghoff, A. d. Lell, S. Lutgen, and U. Strauß, “Supermodes in Broad Ridge (Al,In)GaN Laser Diodes”, *IEEE J. Quantum Electron.*, 45, pp.: 1074-1083 (2009).



2.30 pav. Lazerinio diodo spinduliuotės diagrama.

Lūžio rodiklio valdymo dioduose didžiausio stiprinimo ir didžiausio lūžio rodiklio sritys sutampa. Taigi šių diodų spinduliuotėje nestebima kelių smalių spinduliuotės diagrama – skersinė moda yra stabili. Įprastų LD su PĮD spinduliuotės diagramos plotis yra apie 30 laipsnių⁷⁴. Tačiau LD su PĮD stebimas netolygus spinduliuotės kitimas erdvėje, kuris būdingas stiprinimo valdymo LD (2.31 pav.). Šie netolygumai yra nulemti spinduliuotės interferencijos tarp atspindžių nuo įvairių aktyviosios srities paviršiaus netolygumų, kurie atsiranda ęsdinant suformuotą įvairiatarpį darinį. Šiuos netolygumus galima sumažinti tobulinant darinio auginimo technologiją. Užauginus LD su PĮD bei panaudojus keturinį bangolaidį spinduliuotės diagramos plotį galima sumažinti iki 10 laipsnių⁷⁵.

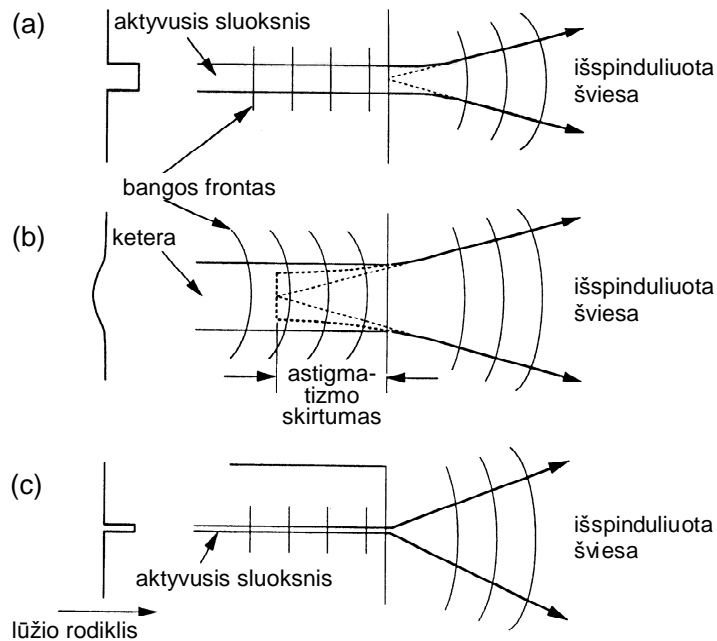
Spinduliuotės sklaidimas rezonatoriumi skiriasi stiprinimo ir lūžio rodiklio valdymo lazeriniuose dioduose. Lūžio rodiklio valdymo dioduose lūžio rodiklis yra šuoliškai kinta ir statmena, ir lygiagrečia aktyviajai sričiai kryptimi. Spinduliuotė sklinda patirdama visišką vidaus atspindį nuo aktyviosios srities ribos, ir spinduliuotės frontas yra plokščias (2.32 pav.). Spindulio židinio padėtis ir statmeną ir lygiagrečią kryptimis praktiškai sutampa su veidrodžio paviršiumi. Toks spindulys panaudojant lęšius lengvai transformuojamas į lygiagretųjų pluoštą ir gali būti sufokusuotas į labai mažą plotą. Stiprinimo valdymo LD sklindančios bangos frontas lygiagrečią aktyviajai sričiai kryptimi nėra plokščias, ir spindulio židiny yra



2.31 pav. LD su stiprinimo valdymu (a) ir lūžio rodiklio valdymo LD spinduliuotės diagramos.

⁷⁴ S. W. Park, C. K. Moon, D. Y. Kim, Y. K. Kim, and J. I. Song, "A Two-Step Laterally Tapered 1.55- μm SSC DFB Laser Fabricated by Using a Nonselective Grating Process", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 16, pp.: 732-734 (2004).

⁷⁵ S. W. Park, J. H. Han, Y. T. Han, S. S. Park, B. Y. Yoon, B. K. Kim, H. K. Sung, and J. I. Song, "Two-Step Laterally Tapered Spot-Size Converter 1.55- μm DFB Laser Diode Having a High Slope Efficiency", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 18, pp.: 2138-2140 (2006).



2.32 pav. Bangos sklidimas rezonatoriuje: (a) lūžio rodiklio valdymo LD (vaizdas iš viršaus), (b) stiprinimo valdymo LD (vaizdas iš viršaus), (c) vaizdas iš šono.

rezonatoriaus viduje (2.32 (b) pav.). Statmeną aktyviajai sričiai kryptimi bangos frontas yra plokščias ir stiprinimo valdymo dioduose, nes šia kryptimi susidaro lūžio rodiklio valdymas. Šis židinių skirtingomis kryptimis nesutapimas (astigmatizmas) yra apie $30 \mu\text{m}$ ir neleidžia įprastais lęšiais suformuoti lygiagrečiojo pluošto bei sufokusuoti jo į mažą plotą.

2.2.11 Vienmodžiai lazeriniai diodai

Banginio tankinimo optinėse ryšio sistemose reikia itin stabilių siauro spinduliuotės spektro šviesos šaltinių. Tokie yra vienmodžiai lazeriniai diodai: paskirstytojo grįžtamojo ryšio (PGR) ir paskirstytojo Brego atšvaito (PBA) LD. Šiuose dioduose taip pat gali būti realizuotas bangos ilgio keitimas.

Paskirstytojo grįžtamojo ryšio lazerinių diodų sandara beveik nesiskiria nuo Fabri ir Pero – vienintelis skirtumas yra aktyviojoje srityje suformuota difrakcinė gardelė (2.33 pav.).

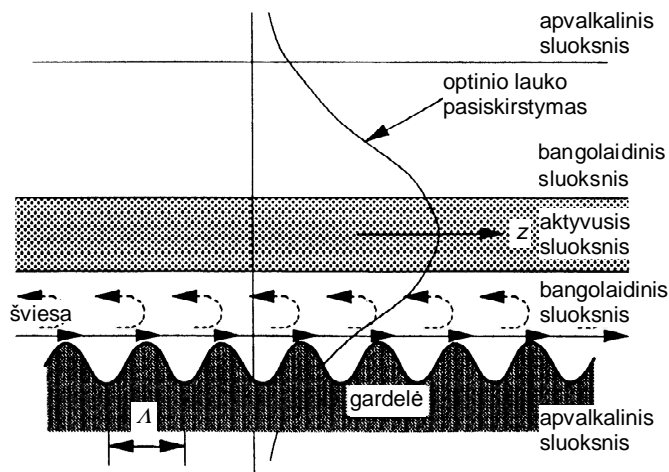
Difrakcinė gardelė sukuria periodinį lūžio rodiklio kitimą aktyviojoje srityje. Jei gardelės profilis yra sinuso pavidalo, tada lūžio rodiklio kitimas:

$$n_r(z) = n_{ek} + \Delta n_r \cos(2\beta_0 z + \Omega_g); \quad (2.59)$$

čia n_{ek} yra ekvivalentinis lūžio rodiklis (įvertinus visų sluoksnių lūžio rodiklius), Δn_r yra lūžio rodiklio skirtumas gardelės viršuje ir apačioje, Ω_g yra gardelės fazė centrinėje gardelės dalyje (vienalytėse gardelėse $\Omega_g = 0$),

$$\beta_0 = \frac{2m\pi n_{ek}}{\lambda_B} = \frac{m\pi}{\Lambda} \quad m = 1, 2, 3, \dots; \quad (2.60)$$

čia Λ yra gardelės žingsnis. Gardelė atspindi tik tą stiprinamą modą, kurios bangos ilgis sutampa su Brego bangos ilgiu – iš daugiamodžio FP lazerinio diodo spektro išrenkama viena moda. Keičiant gardelės žingsnį ir ekvivalentinį lūžio rodiklį galima keisti spinduliuojamos modos bangos ilgį. Spinduliuojamos modos bangos ilgio nesutapimas su stiprinimo didžiausia verte vadinamas išderinimu. PGR LD spinduliuojamos



2.33 pav. Paskirstytojo grįžtamojo ryšio LD skerspjūvis.

modos bangos ilgį galima apskaičiuoti iš (2.60):

$$\lambda_{\text{PGR}} = \frac{2n_{\text{ek}}\Lambda}{m}, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (2.61)$$

Kai m yra lygus 1, 2 ar 3, gardelė vadinama pirmos, antros ar trečios eilės. 1300 nm ir 1550 nm InGaAsP/InP PGR lazeriniuose dioduose dažniausiai naudojamos pirmos ir antros eilės gardelės; 850 nm AlGaAs/GaAs – antros ir trečios eilės. Aukštesnių eilių gardelių gamyba yra sudėtinga.

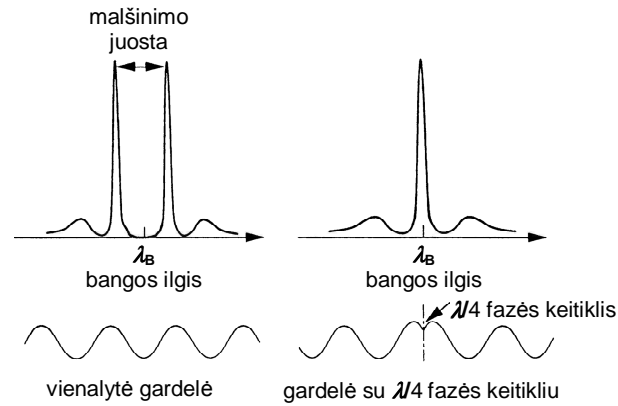
Nuo gardelės atspindėjusios spinduliuotės intensyvumas priklauso nuo gardelės formos, aukščio ir atstumo iki aktyviojo sluoksnio. Gardelės forma ir aukštis yra susiję su lūžio rodiklio pokyčio dydžiu – lūžio rodiklio pokyčiui didėjant didėja atspindėjusios spinduliuotės intensyvumas. Gardelės atstumas iki aktyviojo sluoksnio priklauso nuo aktyviojo ir bangolaidinio sluoksnių storių (2.33 pav.) ir nulemia kaip gardelė įtakoja optinį lauką indukuotą aktyviojoje srityje. Šios įtakos stiprumas priklauso nuo spinduliuotės sulaikymo aktyviojoje srityje bei optinio lauko pasiskirstymo ir yra aprašomas ryšio konstanta:

$$\gamma = \frac{2\pi\Delta n_{\text{r}}}{\lambda_{\text{B}}} \quad [\text{cm}^{-1}]. \quad (2.62)$$

Visas nuo gardelės atspindėtos šviesos kiekis priklauso ir nuo rezonatoriaus (gardelės) ilgio. Todėl grįžtamasis ryšys įvertinamas ryšio konstantos ir rezonatoriaus ilgio sandauga: \mathcal{L} . LD su vienalyte gardele paprastai kuriami tokie, kurių $\mathcal{L} = 1$; su paslinktosios fazės gardele - $\mathcal{L} = 2$.

Optinių bangų sklaidimą dviem priešingomis kryptimis 2.33 pav. pateiktame darinyje aprašo surištųjų modų teorija. Tokiame darinyje į vieną ir į kitą pusę sklindančių bangų fazės skiriasi $\pi/2$. Todėl spinduliuojamos dvi modos, kurių bangos ilgiai yra abipus Brego bangos ilgio (2.34 (a) pav.). Sritis tarp šių dviejų modų vadinama malšinimo juosta, kurios plotį nulemia gardelės ryšio konstanta. Šią situaciją galima pataisyti pakeitus gardelės fazę. Jei gardelės fazė Ω_{g} yra lygi $\pi/2$, tai priešingomis kryptimis sklindančios bangos susideda, ir spinduliuojama viena moda, kurios bangos ilgis yra lygus Brego bangos ilgiui (2.34 (b) pav.). Fazės poslinkis per $\pi/2$ atitinka $\lambda_0/4n_{\text{ek}}$ (λ_0 yra spinduliuotės bangos ilgis vakuume) ir $\Lambda/2$ pirmos eilės gardelei. Paslinktosios fazės PGR lazerių slenkstinė srovė yra mažesnė nei LD su vienalyte gardele, nes paslinktosios fazės LD susideda dvi sklindančios bangos.

Aptarta lazerių su difrakcine gardele teorija tinka, kai LD veidrodžiai visiškai neatspindi. Realiai LD



2.34 pav. PGR su vienalyte (a) ir paslinktosios fazės (b) gardele LD spinduliuotės spektrai.

veidrodžiai nuskeliami visiškai neatsižvelgiant į gardelės padėtį ir įtakoja sklindančių ir nuo veidrodžių atsispindinčių bangų fazę. Veidrodžių įtaka fazės pokyčiui lemia, kad LD su paslinktosios fazės gardele dažnai spinduliuoja daugiau nei vieną modą. O LD su vienalyte gardele su tam tikra tikimybe spektras yra vienmodis. Taigi LD su paslinktosios fazės gardele veidrodžiai yra dengiami neatspindinčiais sluoksniais - veidrodžių atspindžio faktorius sumažinamas iki 1 %. LD su vienalyte gardele veidrodžiai dengiami dielektriniais sluoksniais, taip, kad priekinio atspindžio faktorius neviršytų 1 %, o galinio būtų didesnis už 90 %. Tada tikimybė, kad bus spinduliuojama viena moda viršija 90 %, kai $\gamma\mathcal{L} = 1$. Šiuo atveju stipriai atspindintis veidrodis veikia kaip fazės keitiklis⁷⁶.

PGR LD slenkstinė srovė yra mažesnė nei Fabri ir Pero. Nes PGR modos slenkstis yra žemesnis, nei Fabri ir Pero rezonatoriaus nulemtų modų. Lazeriui veikiant žemiau slenkščio Fabri ir Pero bei PGR modų intensyvumas yra vienodas (2.35 pav.). PGR LD slenkstinė srovė aprašoma stiprinimo ir nuostolių sąryšiu:

$$J_{sl-PGR} = Ad \frac{\alpha_{nuost} + \Gamma_a \alpha_{in}}{\Gamma_a^2}; \quad (2.63)$$

čia A yra konstanta, d – aktyviojo sluoksnio storis, Γ_a – optinio išlaikymo aktyviojoje srityje faktorius. Narys $\Gamma_a \alpha_{in}$ aprašo nuostolius, kol yra sukurta užpildos apgrąža ir rezonatorius yra skaidrus. α_{nuost} aprašo visus nuostolius:

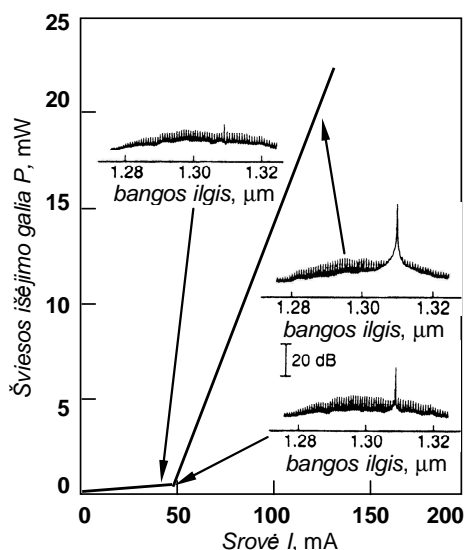
$$\alpha_{nuost} = \Gamma_a \alpha_a + \Gamma_b \alpha_b + (1 - \Gamma_a - \Gamma_g) \alpha_{deng} + \alpha_{sl}; \quad (2.64)$$

čia α_a , α_b ir α_{deng} yra sugerties koeficientai aktyviajame, bangolaidiniame ir dengiamajame sluoksniuose, Γ_b yra optinio išlaikymo faktorius bangolaidiniame sluoksnyje, α_{sl} yra mažiausias reikalingas slenkstinis stiprinimas nulemtas gardelės. Dėl paskirstytojo atspindžio didėjant ryšio stiprumui ($\gamma\mathcal{L}$), slenkstinė srovė mažėja. Šis efektas atitinka Fabri ir Pero lazerinio diodo veidrodžių padengimą stipriai atspindinčiu sluoksniu. Tačiau esant stipriam ryšiui su gardele mažėja išorinis diferencialinis kvantinis našumas:

$$\eta_d = \eta_{vd} P_S \frac{\alpha_{sl}}{\alpha_{nuost}}; \quad (2.65)$$

čia P_S yra spinduliuotės galios per priekinį veidrodį santykis su visa galia (per abu veidrodžius).

⁷⁶ Y. Huang, K. Sato, T. Okuda, N. Suzuki, S. Ae, Y. Muroya, K. Mori, T. Sasaki, and K. Kobayashi, "Low-Chirp and External Optical Feedback Resistant Characteristics in $\lambda/8$ Phase-Shifted Distributed-Feedback Laser Diodes Under Direct Modulation, *IEEE J. Quantum Electron.*, 38, pp.: 1479-1484 (2002).



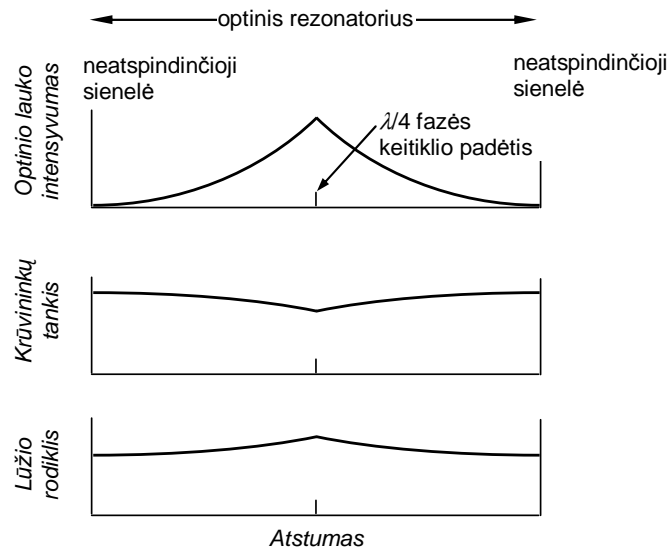
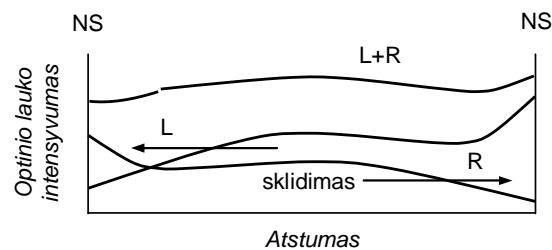
2.35 pav. Spinduliuotės spektro kitimas kintant injekcinei srovei PGR LD.

PGR LD veikiant PGR modos ir stiprinimo spektro kitimas nesutampa, nes PGR modos bangos ilgis priklauso nuo efektinio gardelės žingsnio, o stiprinimo spektras - nuo draudžiamosios energijos tarpo. Pvz., kintant temperatūrai 1300 nm ir 1550 nm InGaAsP/InP LD stiprinimo kitimo temperatūrinis koeficientas yra $0,4 \text{ nm}^{\circ}\text{C}$ ir $0,6 \text{ nm}^{\circ}\text{C}$. O tokio pat lazerio PGR modos temperatūrinis kitimo koeficientas (nulemtas efektinio gardelės žingsnio kitimo kintant aktyviosios srities lūžio rodikliui) yra $0,1 \text{ nm}^{\circ}\text{C}$ ir $0,4 \text{ nm}^{\circ}\text{C}$. Šis temperatūrinių koeficientų skirtumas riboja PGR LD naudojimą kintančios temperatūros sąlygomis. Pakitus temperatūrai PGR moda nebesutampa su didžiausia stiprinimo verte. Blogiausiu atveju yra pradedamos spinduliuoti FP modos, nes PGR moda visai nebestiprinama. Temperatūrinis diapazonas priklauso nuo ryšio stiprumo (κL): didėja stiprėjant ryšiui. Galima pasiekti 100 K temperatūros intervalą aplink kambario temperatūrą, kai $\kappa L > 1$ ⁷⁷. Tačiau, kai ryšys su gardele yra didelis PGR LD veikia tampa nenuostovi – nenuostovios yra spinduliuotės ir spektrinės charakteristikos^{78,79}. Dėl paskirstytojo grįžtamojo ryšio PGR lazeryje susidaro nevienalytis optinio lauko pasiskirstymas (2.36 pav.). Šis pasiskirstymo netolygumas yra tuo didesnis, kuo stipresnis ryšys su gardele. Kai ryšys yra didelis išspinduliuoti fotonai pasilieka rezonatoriuje. Nevienalytis optinis laukas lemia netiesinę (supertiesinę) spinduliuotės charakteristiką. Spinduliuotės bangos ilgis šiuo atveju trumpėja srovei didėjant ir prasidėjus lazeriniam spinduliavimui. Taip yra todėl, kad krūvininkų tankio didėjimas nesustoja ties slenkstine verte, o toliau didėja srovei didėjant virš slenksčio. Spinduliuotės bangos ilgis didėja, nes didėjant krūvininkų tankiui, mažėja lūžio rodiklis (plazminis efektas) ir mažėja efektinis gardelės žingsnis. Gali įvykti erdvinis skylių išdeginimas (padidėjus fotonų tankiui smarkiai sumažėja krūvininkų gyvavimo trukmė, todėl sumažėja jų tankis). Skylys išdeginamos ten, kur yra didžiausias optinis laukas (2.36 pav.). Sumažėjus krūvininkų gyvavimo trukmei, sumažėja ir optinio lauko stipris – LD veikia yra nenuostovi. Įvykus krūvininkų išdeginimui sumažėja spinduliuojamos modos optinis laukas ir padidėja kitos, gretimos iš trumpesnio bangos ilgio pusės, modos. Pradėjus spinduliuoti dvi modos stebimas spinduliuotės charakteristikos įlinkis. Šis įlinkis dėl nestabilios išilginės modos yra kur kas ryškesnis nei stebimi dėl skersinės modos nenuostovumo.

⁷⁷ S. W. Park, C. K. Moon, J. C. Han, and J. -I. Song, "1.55- μm DFB Lasers Utilizing an Automatically Buried Absorptive InAsP Layer Having a High Single-Mode Yield", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 16, pp.: 1426-1428 (2004).

⁷⁸ M. R. Phillips, T. E. Darcie, and E. J. Flynn, "Experimental Measure of Dynamic Spatial-Hole Burning in DFB Lasers", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, pp.: 1201-1203 (1992).

⁷⁹ R. Vinzio, Z. Toffano, and A. Destrez, "Analytical Formulation of Distortion and Chirp in CATV DFB Lasers Including Spatial Hole Burning", *IEEE J. Quantum Electron.*, 34, pp.: 311-317 (1998).

a) su $\lambda/4$ fazės keitikliu ir neatspindinčiomis sienelėmis

b) su vienalyte gardele ir nuskeltomis sienelėmis

2.36 pav. Optinio lauko, krūvininkų tankio ir lūžio rodiklio pasiskirstymas PGR LD.

PGR LD su paslinktosios fazės gardele didžiausias optinis laukas yra ties fazės keitikliu; ties neatspindinčiais veidrodžiais optinio lauko smailių nėra. Didžiausio optinio lauko padėtis LD su vienalyte gardele priklauso nuo fazės pokyčio, kurį lemia atspindintys veidrodžiai ir aktyviojo sluoksnio vienalytiškumas išilgai rezonatoriaus. Optinio lauko smailių dydis priklauso nuo ryšio su gardele stiprumo ir rezonatoriaus ilgio. Tiesiščiausia PGR LD spinduliuotės charakteristika gaunama, kai LD su vienalyte gardele ryšio konstanta yra nuo 0,7 iki 1,2, o LD su paslinktosios fazės gardele – apie 2,0.

Keičiamo bangos ilgio PGR LD viršutinis kontaktas yra padalintas į tris sritis – spinduliuotės bangos ilgis keičiamas keičiant efektyvią gardelės žingsnį, kuris priklauso nuo aktyviojo sluoksnio lūžio rodiklio. Atskirose srityse (atskirtose elektrodais) leidžiant skirtingo stiprio srovę keičiamas krūvininkų tankis, nuo kurio ir priklauso lūžio rodiklis⁸⁰.

Keičiamo bangos ilgio PGR LD bangos ilgio keitimo diapazonas nėra didelis. Žymiai didesnis bangos ilgio diapazonas pasiekiamas LD su paskirstytuoju Brego atšvaitu⁸¹. PBA lazeriuose vienas ar abu veidrodžiai yra pakeisti paskirstytuoju Brego atšvaitu. Paskirstytojo atspindžio stiprumas valdomas keičiant ryšio konstantą kaip ir PGR LD. Šiuose dioduose PBA srityje šviesos stiprinimas nevyksta, todėl efektyvus gardelės žingsnis gali būti keičiamas didesnėse ribose keičiant PBA sritimi tekančios srovės stiprį.

⁸⁰ R. Todt, T. Jacke, R. Meyer, M.-C. Amann, “Thermally widely tunable laser diodes with distributed feedback”, *Appl. Phys. Lett.*, 87, pp.: 021103-3 (2005).

⁸¹ P. Signoret, M. Myara, J.-P. Tourrenc, B. Orsal, M.-H. Monier, J. Jacquet, P. Leboudec, and F. Marin, “Bragg Section Effects on Linewidth and Lineshape in 1.55- μm DBR Tunable Laser Diodes”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 16, pp.: 1429-1431 (2004).

2.2.12 Lazerinių diodų koherentiškumas ir spektro plotis

Lazerinių diodų spinduliuotė laikoma koherentiška tiek laike, tiek ir erdvėje. Vienmodžių PGR ir PBA LD koherentiškumas yra didesnis nei daugiamodžių LD. Spinduliuotės koherentiškumui įvertinti naudojamas koherentiškumo ilgis:

$$l_k = \frac{\pi c_0}{n_r \Delta f} = \frac{\pi \lambda^2}{n_r \Delta \lambda}; \quad (2.66)$$

čia c_0 yra šviesos greitis vakuume, n_r – aplinkos lūžio rodiklis, λ – bangos ilgis. Δf ir $\Delta \lambda$ yra, atitinkamai, spektro plotis dažnio vienetais ir bangos ilgio vienetais:

$$\Delta f = \frac{c_0}{\lambda^2} \Delta \lambda. \quad (2.67)$$

1300 nm daugiamodžio LD, kurio spektro plotis yra 5 nm (888 GHz), koherentiškumo ilgis silicio skaiduloje yra 0,73 mm. 1300 nm vienmodžio LD (modos spektro plotis yra 1 MHz) koherentiškumo ilgis yra 650 m.

Koherentiškumo ilgis yra susijęs su spektro juostos pločiu. LD juostos plotis išplinta dėl savaiminės spinduliuotės, kuri susimaišo su priverstine. Savaiminis spinduliavimas vyksta atsitiktinai ir lemia fazės bei intensyvumo triukšmą. Taip pat, spinduliuotės intensyvumo fluktuacijos sukelia krūvininkų skaičiaus aktyviojoje srityje fluktuacijas. Dėl šios priežasties fluktuuoja ir spinduliuotės dažnis (dėl lūžio rodiklio kitimo). Spektro plotis išreiškiamas Šavlovo (Schawlow) ir Taunso (Townes) lygtį padauginus iš pastovaus nario $(1 + \alpha^2)$:

$$\Delta \nu = \frac{g n_s}{4\pi I_f} (1 + \alpha^2); \quad (2.68)$$

čia g ir I_f yra stiprinimo koeficientas ir fotonų skaičius spinduliuojamoje modoje rezonatoriuje. n_s yra savaiminės spinduliuojamosios rekombinacijos koeficientas:

$$n_s = \frac{1}{1 - \exp\left(\frac{h\nu - (E_{Fc} - E_{Fv})}{k_B T}\right)}. \quad (2.69)$$

Paprastai PGR ir PBA lazeriams savaiminės rekombinacijos koeficientas yra tarp 1 ir 2. α yra vadinamas juostos pločio išplitimo faktoriumi.

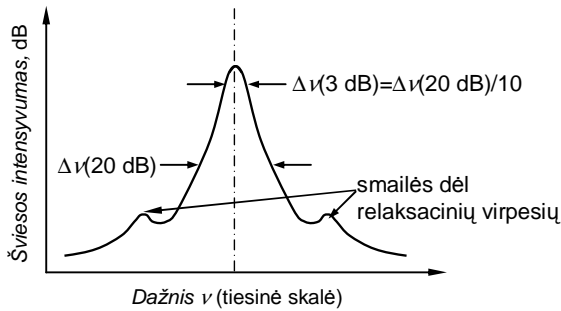
LD spektrą galima atvaizduoti Lorencio spektru (2.37 pav.). Spektro šonuose stebimos nedidelės smailės dėl relaksacinių virpesių. Šios smailės tolsta nuo centrinio dažnio didėjant maitinimo srovei. Taigi prie spektro pločio išraiškos reikia pridėti pastovų narį C_{rl} :

$$\Delta \nu = \frac{h\nu n_s}{4\pi P_{out}} v_g^2 (\alpha_v + \alpha_{veidr}) \alpha_{veidr} (1 + \alpha^2) + C_{rl}; \quad (2.70)$$

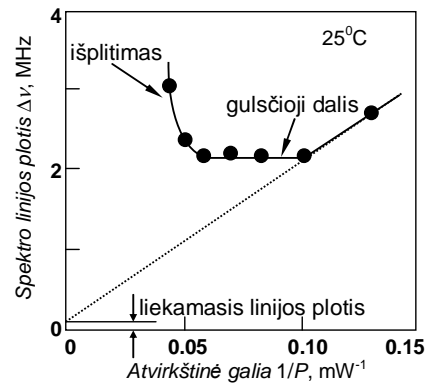
čia $h\nu$ ir P_{out} yra spinduliuojamos modos fotono energija ir pro abu veidrodžius išeinančios spinduliuotės galia, v_g yra grupinis greitis, α_i ir α_{veidr} yra vidiniai (sugerties) nuostoliai rezonatoriuje ir nuostoliai veidrodžiuose bei gardelėje. Konstanta C_{rl} vadinama liekamuoju juostos pločiu, atitinkančiu juostos plotį, kai

$\frac{1}{P_{out}} = 0$. Taigi juostos plotis tolygiai didėja mažėjant spinduliuotės galiai. Kuo plonesnis aktyvusis LD

sluoksnis, tuo mažesni vidiniai nuostoliai rezonatoriuje – mažesnis ir juostos plotis. LD su kvantiniais



2.37 pav. PGR LD spektro juostos plotis.



2.38 pav. Būdingas LD spektro juostos išplitimas esant didelei spinduliuotės galiai.

dariniais vidiniai nuostoliai dar mažesni, tuo pačiu mažesnis ir juostos plotis^{69,82}. Padidinus rezonatoriaus ilgį, sumažėja nuostoliai veidrodžiuose – tai taip pat sumažina juostos plotį. Liekamąjį juostos plotį nulemia $1/f$ triukšmas.

Kai spinduliuotės galia labai didelė, spektro juostos plotis nebemažėja, o išsotina ir pradeda didėti (2.38 pav.). Šio spektro išplitimo priežastys yra erdvinis ir spektrinis skylių išdeginimas (smarkiai sumažėja smailinį spinduliuotės bangos ilgį atitinkamos energijos skylių), šoninių modų nestabilumas. Norint išvengti juostos pločio išplitimo esant didelei spinduliuotės galiai reikia parinkti tinkamą ryšio su gardele stiprumą.

PBA lazeriniuose dioduose didėjant rezonatoriaus ilgiui ir atšvaito atspindžio koeficientui spektro plotis mažėja. Keičiamo bangos ilgio PBA LD spektro plotis yra žymiai didesnis dėl spinduliuotės bangos ilgio kitimo kintant efektingam gardelės žingsniui, kai atšvaito srityje teka srovė.

Juostos išplitimo faktorius (α) atspindi spektro išplitimą dėl injekuotųjų krūvininkų tankio fluktuacijų. Juostos išplitimo faktorių nulemia LD aktyviosios srities sandara. Jį galima išreikšti taip:

$$\alpha = \frac{\partial n_r / \partial n}{\partial g / \partial n} \quad (2.71)$$

Stiprinimas ir lūžio rodiklis kinta kartu kintant injekuotųjų krūvininkų tankiui. Kai juostos išplitimo faktorius yra mažas, maži yra lūžio rodiklio pokyčiai, ir stebimas didelis spinduliuotės koherentiškumas.

2.2.13 Didelės galios LD ir lazerių masyvai

Didelės galios lazeriniams diodams yra svarbios šios savybės:

- maži vidiniai nuostoliai (maža slenkstinė srovė ir didelis kvantinis našumas);
- stabili skersinė moda;
- aukšta charakteringoji temperatūra;
- aukštas visiško optinio sugedimo slenkstis.

Didelė spinduliuotės galia pasiekama didele injekcine srove. Bet didelė srovė lemia didelį Džaulio šilumos išsiskyrimą. Džaulio šiluma pakelia aktyviosios srities temperatūrą, ir, jei charakteringoji temperatūra yra maža, spinduliuotės galios didėjimas išsotina.

Vidiniai nuostoliai LD rezonatoriuje mažinami naudojant kvantinius darinius su įtemptaisiais sluoksniais⁸³. Siekiant sumažinti veikimo srovę ir šiluminę varžą naudojamas ilgas rezonatorius. Beje ilgas rezonatorius

⁸² K. C. Kim, I. K. Han, Y. C. e Yoo, J. I. Lee, Y. M. Sung, and T. G. Kim, "Optical Characteristics and the Linewidth Enhancement Factor Measured from InAs/GaAs Quantum Dot Laser Diodes", *IEEE Trans. Nanotechnol.*, 7, pp.: 135-139 (2008).

sumažina spinduliuotės charakteristikos polinkį.

Skersinei modai stabilizuoti naudojami paslėptasis įvairiatarpis darinys ar keterinis bangolaidis^{49,52}.

Siekiant padidinti visiško optinio sugedimo slenkstį lazerio veidrodžiuose turi būti sugerta kuo mažiau spinduliuotės (visišką optinį sugedimą lemia veidrodžio išsilydymas dėl didelio sugertos spinduliuotės kiekio)⁸⁴.

Tvirtinant didelės galios LD svarbu naudoti didelio šiluminio laidumo lydmetalį^{85,86}. Dažnai didelės galios LD tvirtinami „apversti“ – *pn* sandūra yra apačioje.

Lazerių masyvai naudojami, kai reikia galingos siauro spektro spinduliuotės. Naudojant lazerių masyvus taip pat galima pagaminti daugelio bangos ilgių spinduliuojantį šviesos šaltinį^{87,88,89}. Banginio tankinimo sistemose naudojami lazerių masyvai turi pasižymėti stabiliu vienmodžiu spinduliuavimu, ir intervalai tarp spinduliuojamų bangos ilgių turi būti vienodi. Gaminami lazerių masyvai skirti 100 banginio tankinimo kanalų sistemoms, atstumas tarp kanalų gali būti sumažintas iki 0,3 nm⁹⁰.

2.2.14 Lazerinių diodų moduliavimo charakteristikos

LD veikia moduluojant priklauso nuo krūvininkų ir fotonų tankio kitimo vykstant moduliacijai. Krūvininkų tankio kitimą aprašo

$$\frac{dn}{dt} = \frac{J}{qd} - \frac{n}{\tau_s} - gn_f ; \quad (2.72)$$

čia τ_s yra injekuotųjų krūvininkų gyvavimo trukmė. Pirmasis (2.72) lygties dešinėsios pusės narys aprašo per vienetinę trukmę į vientinį tūrį injekuotų krūvininkų skaičių, antrasis – krūvininkų netekimą dėl savaiminės spinduliuojamosios rekombinacijos, trečiasis – dėl priverstinės spinduliuojamosios rekombinacijos (g yra stiprinimas, n_f – fotonų tankis spinduliuojamoje modoje). Fotonų tankio kitimas:

$$\frac{dn_f}{dt} = gn_f - \frac{n_f}{\tau_f} + \frac{\beta_s n}{\tau_s} ; \quad (2.73)$$

čia τ_f yra fotonų gyvavimo trukmė. Pirmasis (2.73) lygties dešinėsios pusės narys aprašo fotonų skaičių sugeneruotą priverstinės spinduliuojamosios rekombinacijos, antrasis – fotonų netekimą iš rezonatoriaus.

⁸³ L. Li, G. Liu, Z. Li, M. Li, H. Li, X. Wang, and C. Wan, “High-Efficiency 808-Nm InGaAlAs–AlGaAs Double-Quantum-Well Semiconductor Lasers With Asymmetric Waveguide Structures”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 20, pp.: 566-568 (2008).

⁸⁴ A. Furuya, M. Sugano, Y. Kito, T. Fukushima, H. Sudo, C. Anayama, M. Kondo and T. Tanahashi, “High-Power Operation Of Selfaligned Stepped Substrate (Sa) AlGaInP Visible Laser Diode”, *Electron. Lett.*, 29 pp.: 1364-1366 (1993).

⁸⁵ W. Pittroff, G. Erbert, G. Beister, F. Bugge, A. Klein, A. Knauer, J. Maege, P. Ressel, J. Sebastian, R. Staske, and G. Traenkle “Mounting Of High Power Laser Diodes On Boron Nitride Heat Sinks Using An Optimized Au/Sn Metallurgy”, *IEEE Trans. Adv. Packag.*, 24, pp.: 434-441 (2001).

⁸⁶ M. Labudovic, and M. Burka, “Heat Transfer And Residual Stress Modeling Of A Diamond Film Heat Sink For High Power Laser Diodes”, *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.*, 26, pp.: 575-581 (2003).

⁸⁷ K. Tsuzuki, Y. Shibata, N. Kikuchi, M. Ishikawa, T. Yasuie, H. Ishii, and H. Yasaka, “Full C-Band Tunable DFB Laser Array Copackaged With InP Mach-Zehnder Modulator For DWDM Optical Communication System”, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 15, pp.: 521-527 (2009).

⁸⁸ H. Ishii, K. Kasaya, and H. Oohashi, “Spectral Linewidth Reduction In Widely Wavelength Tunable DFB Laser Array”, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 15, pp.: 514-520 (2009).

⁸⁹ B. G. Lee, H. A. Zhang, C. Pflügl, L. Diehl, M. A. Belkin, M. Fischer, A. Wittmann, J. Faist, and F. Capasso “Broadband Distributed-Feedback Quantum Cascade Laser Array Operating From 8.0 To 9.8 μm ”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 21, p.: 914-916 (2009).

⁹⁰ A. Larrue, O. Bouchard, A. Monmayrant, O. Gauthier-Lafaye, S. Bonnefont, A. Arnoult, P. Dubreuil, and F. Lozes-Dupuy, “Precise Frequency Spacing In Photonic Crystal DFB Laser Arrays”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 20, pp.: 2120-2122 (2008).

Trečiasis narys nurodo savaiminės rekombinacijos indėlį į spinduliuojamąją modą. β_s yra savaiminio spinduliavimo faktorius:

$$\beta_s = \frac{\Gamma_a \lambda_0^4}{4\pi^2 n_r^3 \Delta\lambda_s V_a}; \quad (2.74)$$

čia Γ_a ir λ_0 yra optinio išlaikymo faktorius ir spinduliuotės bangos ilgis, $\Delta\lambda_s$ ir V_a yra savaiminės spinduliuotės spektro plotis ir aktyviosios srities tūris. Taigi β_s vertė priklauso nuo darinio ir yra tarp 10^{-4} ir 10^{-6} .

Priverstinės rekombinacijos sugeneruoti fotonai prarandami per veidrodžius arba sugeriami rezonatoriuje per fotonų gyvavimo trukmę:

$$\tau_f = \frac{1}{\frac{c_0}{n_r} \left(\alpha_v + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \right)}; \quad (2.75)$$

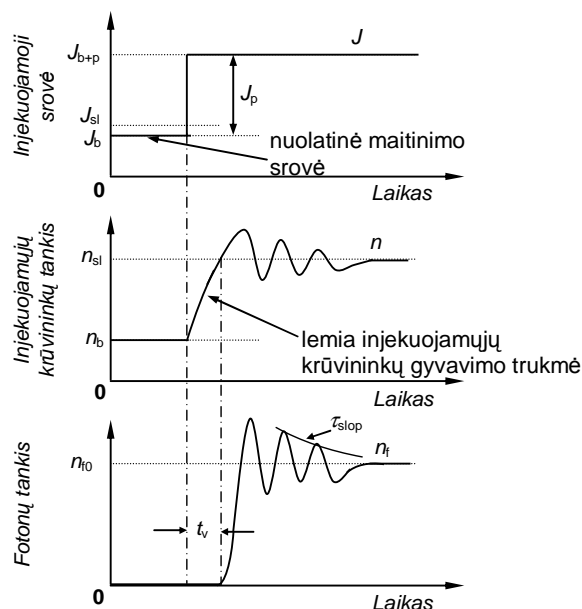
čia $\frac{c_0}{n_r}$ yra šviesos greitis rezonatoriuje. Fotonų gyvavimo trukmė yra maždaug pikosekundžių eilės (pvz., $n_r=3,5$, $\alpha_v=20 \text{ cm}^{-1}$ ir $L=300 \mu\text{m}$, $R_1=R_2=30\%$ – $\tau_f=2*10^{-12} \text{ s}$). Fotonų gyvavimo trukmė yra apie tris eiles mažesnė nei injekuotųjų krūvininkų.

Nuostovioje būsenoje $\frac{dn}{dt} = 0$ ir $\frac{dn_f}{dt} = 0$. Tada, neatsižvelgiant į savaiminę spinduliuotę, iš (2.72) ir (2.73) galima išreikšti slenkstinę srovę ir slenkstinį stiprinimą:

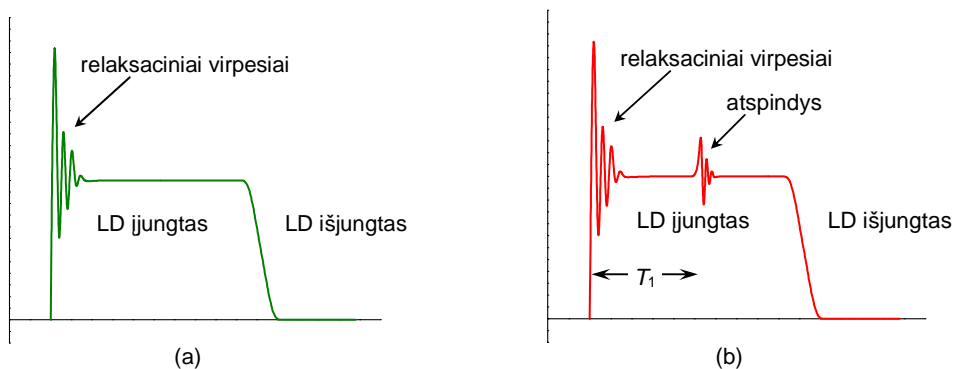
$$J_{sl} = qd \frac{n_{sl}}{\tau_s}, \quad (2.76)$$

$$g(n_{sl}) = \frac{1}{\tau_f}. \quad (2.77)$$

2.39 pav. pavaizduotas LD atsakas į srovės šuolį: LD atsake į srovės impulsą pereinamojoje fazėje stebimi relaksaciniai injekuotųjų krūvininkų ir fotonų tankio virpesiai. LD maitinant impulsine srove, šie virpesiai



2.39 pav. Injekuojamųjų krūvininkų ir fotonų tankio atsakas į srovės šuolį.



2.40 pav. Lazerinio diodo spinduliuotės impulsas be atspindėjusios šviesos (a) ir esant grįžtančiai atspindėjusiai šviesai (b).

atspindimi ir optiniame signale (2.40 (a) pav.)^{91,92}. Tokių virpesių priežastis yra injekuotųjų krūvininkų ir fotonų gyvavimo trukmių skirtumas – reikalingas skirtingas laiko tarpas krūvininkų ir fotonų populiacijoms grįžti į pusiausvyrą būseną.

Srovės impulsui tekant lazeriniu diodu, šviesti diodas pradeda praėjus vėlinimo trukmei nuo impulso pradžios:

$$t_v = \tau_s \ln \frac{I_p}{I_0 + I_p - I_{sl}} ; \quad (2.78)$$

čia τ_s yra injekuotųjų krūvininkų gyvavimo trukmė, I_p – srovės impulso amplitudė, I_0 – nuolatinė LD maitinimo srovė. Paprastai, vėlinimo trukmė yra keletas nanosekundžių. Didėjant impulso amplitudei ar nuolatinėi LD maitinimo srovei vėlinimo trukmė mažėja.

Relaksaciniai virpesiai aprašomi spartos lygtimis. Kai moduliacijos amplitudė nedidelė: $J = J_0 + J_m(\omega)\exp(i\omega t)$, $n = n_0 + n_m(\omega)\exp(i\omega t)$, $n_f = n_{f0} + n_{fm}(\omega)\exp(i\omega t)$. Šias srovės tankio, krūvininkų ir fotonų skaičiaus kitimo išraiškas įstačius į (2.72) ir (2.73), išsprendus gaunama virpesių dažnio išraiška:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{n_{f0} \frac{dg/dn}{\tau_f}} \quad (2.79)$$

arba apytiksliai:

$$f_r \approx \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{\tau_s \tau_f}} \sqrt{\frac{I - I_{sl}}{I_{sl}}} ; \quad (2.80)$$

čia dg/dn yra vadinamas diferencialiniu stiprinimu. Slopinimo konstanta τ_{slop} paprastai yra apie $2\tau_s$. Relaksacinių virpesių dažnis atitinka rezonansinį LD dažnį, ir ties juo triukšmo spektre stebimas maksimumas. Relaksacinius virpesius tūrinuose LD dariniuose reguliuoja erdvinė krūvininkų difuzija: spinduliavimo srityje injekuotiesiems krūvininkams rekombinavus, jų vietą tuojau pat užpildo iš gretimų sričių difundavę krūvininkai. Taip sustabdomas krūvininkų tankio kitimas spinduliavimo srityje ir nuslopinami relaksaciniai virpesiai.

⁹¹ M. V. Dubov, D. Giannone, I. Y. Khrushchev, I. Bennion, “Pulse tail suppression in laser diode output by tunable notch filter”, *Electron. Lett.*, 37, pp.: 1404 – 1405 (2001).

⁹² S. Nakamura, M. Senoh, S.-I. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, Y. Sugimoto, H. Kiyoku, “Longitudinal mode spectra and ultrashort pulse generation of InGaN multi-quantum well structure laser diodes”, *Appl. Phys. Lett.*, 70, pp.: 616 – 618 (1997).

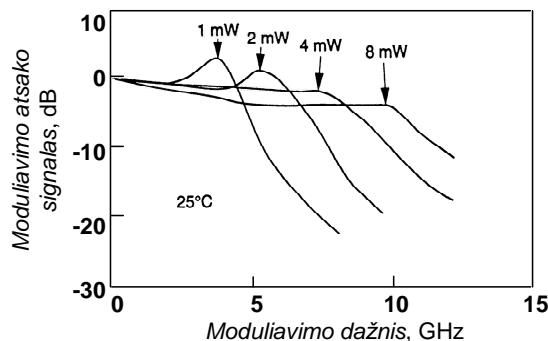
Vykstant relaksaciniams virpesiams krūvininkų tankio nukrypimas nuo pusiausvyrinio yra keletas procentų. Šis krūvininkų tankio svyravimas lemia spinduliuotės bangos ilgio kitimą (plazminis efektas (2.57)). Taigi išplinta spinduliuotės spektras: spinduliuojama platesnė PGR moda; jei relaksaciniai virpesiai itin intensyvūs, gali būti pasiektas FP modų spinduliuavimo slenkstis, ir prasidėti daugiamodė veika. Taip pat, jei PGR moda yra ilgabangiame stiprinimo spektro pakraštyje, dėl moduliacijos injekavus papildomą krūvininkų kiekį, stiprinimo spektras pasislenka į trumpesnių bangų pusę (juostos užpildymo efektas), ir PGR moda „išeina“ už stiprinimo spektro ribų. Šie pereinamieji reiškiniai žymiai pablogina spektrines LD charakteristikas vykstant moduliacijai.

Kartais impulsinėje LD veikoje stebimi ilgalaikiai svyravimai. Šių svyravimų priežastis yra išotinamasis sugėriklis, kurį sukuria defektai, priemaišos ir kristalo netolygumai. Išotinamojo sugėriklio sugerties koeficientas priklauso nuo sugertos šviesos kiekio (fotoindukuotieji krūvininkai užpildo vis aukštesnius energijos lygmenis (Buršteino (Burstein) ir Moso (Moss) poslinkis) – sugerties kraštas slenka į aukštesnių energijų pusę – sugerties koeficientas sumažėja). Sugerties koeficientui sumažėjus, staigiai išauga fotonų skaičius rezonatoriuje, kuris nulemia staigų krūvininkų skaičiaus sumažėjimą. Sumažėjus krūvininkų tankiui išauga sugėriklio sugerties koeficientas, ir t. t.

Maitinimo srovei staigiai sumažėjus, greitai sumažėja ir fotonų bei krūvininkų skaičius. Fotonų skaičiui spinduliuojamoje modoje pasiekus nulį, krūvininkų skaičius mažėja nuosekliai priklausomai nuo krūvininkų gyvavimo trukmės.

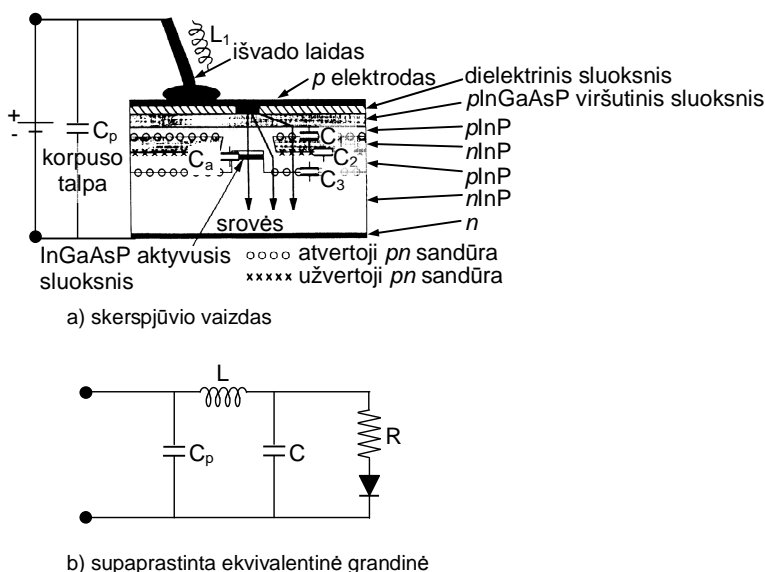
Mažo signalo (signalų srovė pakankamai maža, kad nekeistų lazerinio spinduliuavimo sąlygų) moduliacijos atsakas pavaizduotas 2.41 pav. Moduliacijos dažniui didėjant atsakas mažėja dėl įtaiso ir jungiamosios grandinės parazitinių talpų, kol pasiekiamas rezonansinis dažnis, ties kuriuo stebima atsako smailė. Kai moduliacijos dažnis viršija rezonansinį, atsakas sparčiai mažėja, nes priverstinė spinduliuojamoji rekombinacija nespėja reaguoti į krūvininkų tankio pokyčius. Rezonansinis dažnis ir parazitiniai efektai yra pagrindiniai faktoriai, kurie nulemia lazerinio diodo moduliacijos charakteristikas.

Relaksacinis dažnis nurodo LD moduliavimo juostos pločio ribą. Relaksacinį dažnį galima padidinti: didinant fotonų tankį rezonatoriuje, mažinant fotonų gyvavimo trukmę, didinant diferencialinį stiprinimą (žr.: (2.79)). Fotonų tankį galima padidinti didinant injekcinę srovę. Tačiau didesnė srovė spartina visišką optinį sugedimą (InGaAsP/InP LD). Fotonų gyvavimo trukmę galima sumažinti sutrumpinus rezonatoriaus ilgį: 100 μm ir 300 μm ilgio LD rezonansinis dažnis skiriasi du kartus. Fotonų gyvavimo trukmę taip pat galima sumažinti padidinus rezonatoriaus nuostolius (sumažinus veidrodžių atspindžio koeficientus). Tačiau šie pakeitimai pablogina kitas LD charakteristikas. Kvantinių darinių naudojimas aktyviojoje srityje efektyviai padidina diferencialinį stiprinimą. Pramonės gaminamų lazerinių diodų sparta šiuo metu siekia 10 GHz⁹³.



2.41 pav. Mažo signalo LD moduliacijos atsakas.

⁹³ http://www.bookham.com/datasheets/vcsels/vcsels_850_high_speed.cfm (2009 10 15).



2.42 pav. InGaAsP/InP LD su paslėptuoju įvairiatarpiu dariniu skerspjūvis (a) ir ekvivalentinė grandinė (b) tekant tiesioginei srovei.

Dar vienas moduliacijos juostą ribojantis faktorius yra netiesinis stiprinimas⁹⁴:

$$g_{nt} = g(1 - \varepsilon n_f); \quad (2.81)$$

čia ε yra stiprinimo mažinimo faktorius. Netiesinis stiprinimas yra ryškesnis įtemptuose kvantiniuose dariniuose nei tūriniuose LD. Netiesinis stiprinimas aiškinamas erdviu ir spektriniu skylių išdeginimu. Atsižvelgus į netiesinį stiprinimą, rezonansinis dažnis:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{n_{f0} \frac{dg}{dn} \frac{1 - \varepsilon n_f}{\tau_f}}. \quad (2.82)$$

Didžiąją dalį parazitinės talpos sudaro pn sandūrų talpa. 2.42 pav. pateiktas InGaAsP/InP LD su paslėptuoju įvairiatarpiu dariniu skerspjūvis. Esant tiesioginei įtampai srovė teka aktyviaja sritimi – ji yra efektyviai ribojama dielektrinio sluoksnio ir atvirkščiai maitinamų pn sandūrų. Tačiau yra ir srovės nuotėkio kanalai. Talpos C_1 , C_2 ir C_3 yra arti aktyviojo sluoksnio. Dėl skirtingo nuskurdintųjų sluoksnių storio atvirkštine kryptimi maitinamos pn sandūros talpa yra mažesnė nei tiesiogine kryptimi. Visa talpa tarp p ir n elektrodų 2.42 (b) pav. pavaizduota kaip talpa C , kuri priklauso nuo LD darinio. Varžas R atspindi ominių kontaktų ir puslaidininkio varžą. Talpa C_p ir induktyvumas L_1 yra jungiamųjų laidų ir korpuso talpa bei induktyvumas. Pilnutinė LD varža įskaitant valdymo grandinės varžą ir suderinimo varžą (paprastai 50Ω):

$$Z_{LD} = \frac{V}{I} = (50 + R - \omega^2 L_1 C R) + (L_1 + 50 C R); \quad (2.83)$$

čia neatsižvelgta į korpuso talpą. Naudojant (2.76) galima apskaičiuoti ribinį dažnį (atitinkanti $\frac{I(\omega)}{I(\omega=0)} = \frac{1}{2}$)

nulemtą parazitinių efektų:

$$f_{r-par} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{50 + R}{L_1 C R}}. \quad (2.84)$$

Pvz., LD su paslėptuoju įvairiatarpiu dariniu, kurio talpa yra 100 pF , $R=50 \Omega$, $L_1=1,5 \text{ nH}$, ribinis dažnis yra

⁹⁴ C. H. Lin and Y. H. Lo, "Empirical Formulas For Design And Optimization Of $1.55 \mu\text{m}$ InGaAs/InGaAsP Strained-Quantum-Well Lasers", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 5, pp.: 288-290 (1993).

1,4 GHz.

Parazitinė talpa mažinama išėsdinant griovelį aktyviosios srities šonuose – taip atskiriama aktyviosios srities pn sandūra nuo kitų sričių. Pusiauizoliuojančių sluoksnių (Fe legiruotas InP) naudojimas paslėptajam dariniui sudaryti taip pat mažina parazitinę LD varžą.

Kitas parazitinis faktorius yra krūvininkų pernaša, tuneliavimas ir pagavimas dvigubame įvairiatarpiame darinyje. Vėlinimas dėl krūvininkų pernašos atskirtosios apribos darinyje yra žymus, jei slepiantysis sluoksnius yra storas.

Paprasčiausias būdas moduluoti LD spinduliuotę yra tiesioginė moduliacija^{95,96}: diodas maitinamas signalo srove, ir spinduliuotės intensyvumas atitinka signalo srovės stiprį. LD moduliacijos charakteristikos priklauso nuo injekuotųjų krūvininkų ir fotonų tankio kitimo.

Relaksaciniai virpesiai bei amplitudės viršijimas yra stipresni, jei moduluojant lazeris yra pilnai išjungiamas ir įjungiamas. Todėl daugelyje sistemų lazerinis diodas visada yra įjungtas (LD veikia visada palaikoma šiek tiek virš slenksčio).

Lazerinio diodo juostos plotis net ir nuolatiniame veikoje yra baigtinis. Esant moduliacijai, juostos plotis išplinta. Kadangi medžiagos lūžio rodiklis priklauso nuo injekuotųjų krūvininkų tankio, tai stebimas dažnio poslinkio efektas. Didesnį juostos plotį taip pat lemia modų persiskirstymo triukšmas. Sumažinti dažnio poslinkį ir modų persiskirstymo triukšmą galima naudojant modų fiksavimo veiką, kai LD yra kaupinamas optiškai^{97,98}.

2.2.15 Lazerinių diodų triukšmas

Spinduliuotės amplitudės ir fazės (dažnio) triukšmas yra labai svarbus šviesos šaltinio parametras, nes didelis triukšmas žymiai pablogina visos įrangos veikimo charakteristikas.

Elektronai, skylės ir fotonai elgiasi kaip kvantinės dalelės – jų išnykimo ir generavimo vyksmai yra atsitiktiniai. Tai nulemia kvantinį (šratinį) triukšmą optoelektronikos įtaisuose. Jei šviesos dioduose kvantinis triukšmas yra tik dėl savaiminės spinduliuojamosios rekombinacijos, tai lazeriniuose dioduose savaiminė spinduliuotė susimaišo su priverstine. Šratinio triukšmo intensyvumas nepriklauso nuo dažnio – triukšmo spektras yra „baltas“. Žemo dažnio srityje lazerinių diodų triukšmo intensyvumas auga atvirkščiai proporcingai dažniui – stebimas papildomas $1/f$ tipo triukšmas⁵⁷.

Amplitudės ir fazės triukšmą įtakoja išilginių ir skersinių spinduliuojamų modų elgsena. Kintant skersinei modai, triukšmas išauga. Esant nestabiliai išilginei modai triukšmas taip pat padidėja. Vienmodžių LD santykinis amplitudės triukšmas paprastai neviršija -140 dB/Hz, daugiamodžių LD sunku pasiekti amplitudės triukšmą mažesnę nei -140 dB/Hz^{99,100}.

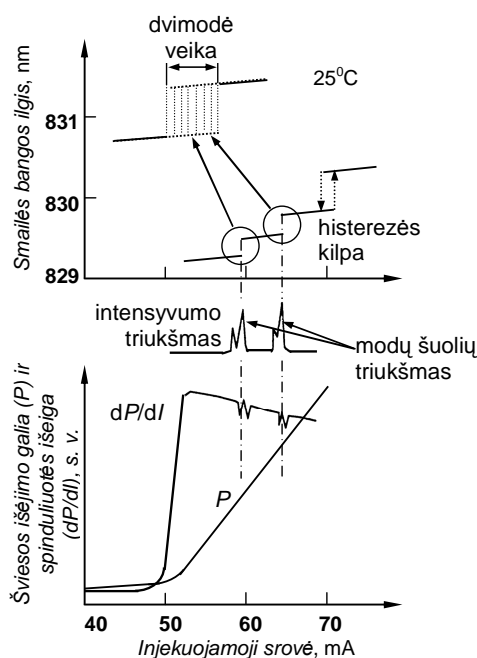
⁹⁵ M. Arai, T. Tadokoro, T. Fujisawa, W. Kobayashi, K. Nakashima, M. Yuda and Y. Kondo, “Uncooled (25–858C) 10 Gbit/s operation of 1.3 μ m-range metamorphic Fabry-Perot laser on GaAs substrate”, *Electron. Lett.*, 45 pp.: 359 - 360 (2009).

⁹⁶ I. Garce's, J. C. Aguado, J. J. Mart'inez, A. Lo'pez, A. Villafranca, and M. A. Losada, ‘Analysis of narrow-FSK downstream modulation in colourless WDM PONs’, *Electron. Lett.*, 43, pp.: 471 – 472 (2007).

⁹⁷ M. Yoshita, M. Kuramoto, M. Ikeda, H. Yokoyama, “Mode locking of a GaInN semiconductor laser with an internal saturable absorber”, *Appl. Phys. Lett.*, pp.: 061104-3 (2009).

⁹⁸ L. Hou, P. Stolarz, R. P. Green, C. N. Ironside, M. Sorel and A. C. Bryce, “Subpicosecond Pulse Generation at Quasi-40-GHz Using a Passively Mode Locked AlGaInAs/InP 1.55 μ m Strained Quantum Well Laser”, *IEEE Photon. Technol. Lett.* (2009)

⁹⁹ K.-Y.Park and C.-H. Lee, “Intensity Noise in a Wavelength-Locked Fabry–Perot Laser Diode to a Spectrum Sliced ASE”, *IEEE J. Quantum Electron.*, 44, pp.: 209-215 (2008).



2.43 pav. Modų šuolių triukšmas ir spinduliuotės charakteristikos.

Lazerinių diodų veikoje stebimi modų persiskirstymo ir modų šuolių triukšmai^{48,101,102}. Daugiamodžių LD vienos atskiros modos modų persiskirstymo triukšmas yra mažesnis nei viso spinduliuojamo spektro. Modų persiskirstymo triukšmo priežastis yra atsitiktinis galios patekimas į vieną iš spinduliuojamų modų.

Vienmodžių ar keletą (nedaug) modų spinduliuojančių lazerių veikoje stebimas spinduliuojamos (ar pagrindinės) modos šuolis į kitą modą kintant temperatūrai ir injekcinei srovei. Vykstant modų šuoliams, dvi modos konkuruoja tarpusavyje – atsitiktinai spinduliuojama tai viena, tai kita išilginė moda. Dėl modų šuolių spinduliuotės ir voltamperinėje charakteristikose stebimi nedideli įlinkiai (2.43 pav.). Daugiamodžių LD veikoje modų šuoliai nestebimi.

2.2.16 Atsispindėjusios spinduliuotės įtaka lazerinio diodo veikai

Optinėse ryšio sistemose naudojamų šviesos šaltinių charakteristikas nulemia ir lazerinio ar šviesos diodo montavimo bei surinkimo į korpusą ypatybės. Lazerinių diodų veika yra labai jautri grįžtančiai atsispindėjusiai šviesai. Nuo įvairių paviršių atsispindėjusi ir į LD rezonatorių grįžusi spinduliuotė interferuoja su pagrindine išspinduliuota šviesa ir labai pablogina LD veikimo charakteristikas^{103,104,105}.

Daugelio LD impulsinėje veikoje priekiniame fronte stebimi relaksaciniai virpesiai. Atspindėtos ir grįžusios į lazerio kanalą spinduliuotės įtaka spinduliuotės impulsui yra panaši kaip ir relaksacinių virpesių (2.40 (b) pav.). Trukmė T_1 priklauso nuo atstumo tarp LD veidrodžio ir atspindžio paviršiaus: kuo arčiau yra

¹⁰⁰ Y. Takagi, N. Kumazaki, M. Ishihara, K. Kasahara, A. Sugiyama, N. Akikusa and T. Edamura, “Relative intensity noise measurements of 5 μm quantum cascade laser and 1.55 μm semiconductor laser”, *Electron. Lett.*, 44 pp.: 860 - 861 (2008).

¹⁰¹ S. Nakamura, “GaN-Based Blue/Green Semiconductor Laser”, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 3, pp.: 435-442 (1997).

¹⁰² B. Olle Nilsson, “Noise Mechanisms in Laser Diodes”, *IEEE Trans. on Electron Dev.*, 41, 2139-2150 (1994).

¹⁰³ B. R. Clarke, “The Effect of Reflections on the System Performance of Intensity Modulated Laser Diodes”, *J. Lightw. Technol.*, 9, pp.: 741-749 (1991).

¹⁰⁴ Y. Yu, J. Xi, J. F. Chicharo, and T. M. Bosch, “Optical Feedback Self-Mixing Interferometry With a Large Feedback Factor C: Behavior Studies”, *IEEE J. Quantum Electron.*, 45, pp.: 840-848 (2009).

¹⁰⁵ G. Morthier, “Feedback Sensitivity of Distributed-Feedback Laser Diodes in Terms of Longitudinal Field Integrals”, *IEEE J. Quantum Electron.*, 38, pp.: 1395-1397 (2002).

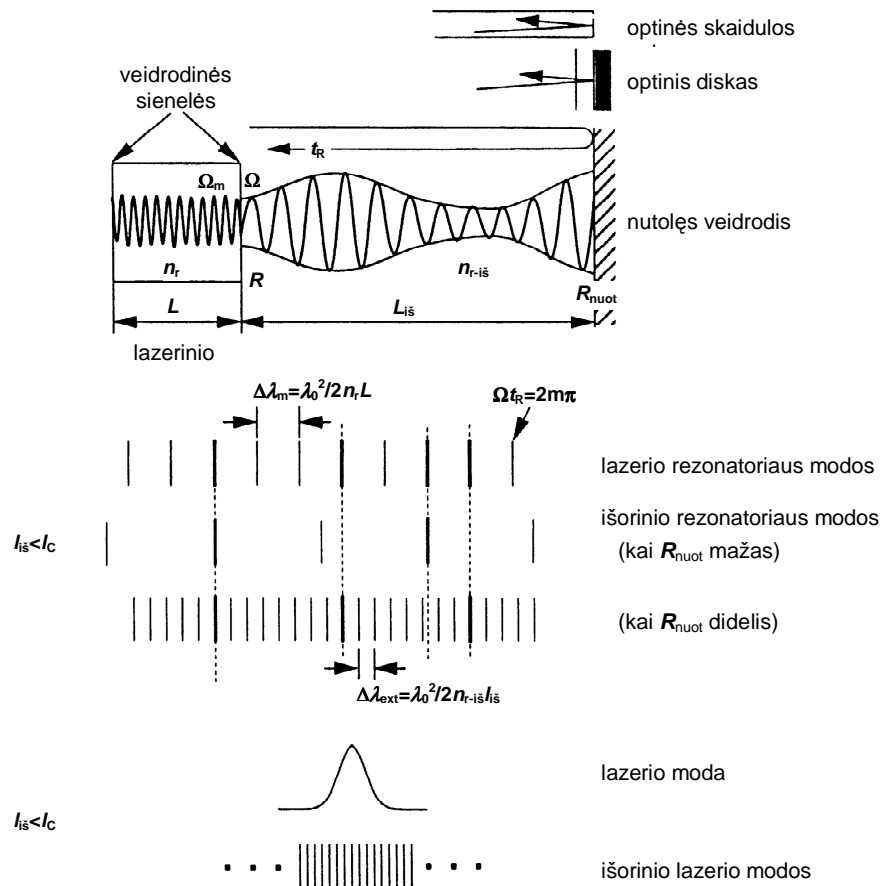
atspindžio paviršius, tuo didesnis atspindžio efektas stebimas. 1310 nm ir 1550 nm spinduliuotės slopinimas optinėje skaiduloje yra silpnas, todėl gali būti svarbūs ir atspindžiai nuo tolimų paviršių.

Dalis spinduliuotės atsispindėjusi nuo nutolusio veidrodžio grįžta į LD rezonatorių po pilno rato laiko tarpo t_R :

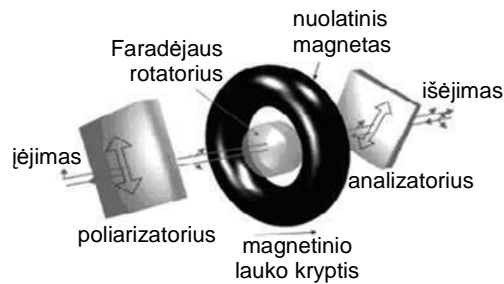
$$t_R = \frac{2n_{r-iš}l_{iš}}{c_0}; \tag{2.84}$$

čia $n_{r-iš}$ ir $l_{iš}$ yra medžiagos tarp LD ir nutolusio veidrodžio lūžio rodiklis ir atstumas tarp LD veidrodžio ir nutolusio. Atspindėtos spinduliuotės fazės skirtumas aprašomas pilno rato apėjimo trukmės ir kampinio spinduliuotės dažnio sandauga (Ωt_R). Kai fazės skirtumas tarp atspindėtos ir spinduliuojamos bangos yra lygus $2\pi m$ ($m=1, 2, 3, \dots$), abi bangos susideda, ir sudėtiniam rezonatoriuje susiformuoja stovinti banga. Šiuo atveju efektinis veidrodžių atspindžio faktorius padidėja: sumažėja slenkstinė srovė ir padidėja spinduliuotės galia. Tačiau, jei fazės skirtumas yra $(2\pi m-1)$, slenkstinė srovė padidėja, spinduliuotės galia sumažėja. Šios fazių sąlygos kinta kintant temperatūrai, atstumui iki nutolusio veidrodžio, injekcinei srovei, spinduliuotės bangos ilgiui ir t. t. Atspindėta ir grįžusi šviesa lemia spinduliuotės amplitudės fluktuacijas – stebimi „bangavimai“ spinduliuotės ir voltamperinėje charakteristikose. Atspindėtos šviesos grįžimo problema aktuali tik lazerinių diodų veikoje. Šviesos diodų, kurių spinduliuotė yra nekoherentinė, veikos atspindėta spinduliuotė neįtakoja.

Atspindėtos ir grįžusios šviesos įtaka yra svarbi, kai atstumas iki nutolusio veidrodžio yra mažesnis nei koherentiškumo ilgis (2.44 pav.). Šiuo atveju, jei LD rezonatoriaus modos fazė sutampa su išorinio



2.44 pav. Atspindėtos šviesos grįžimas į LD rezonatorių.

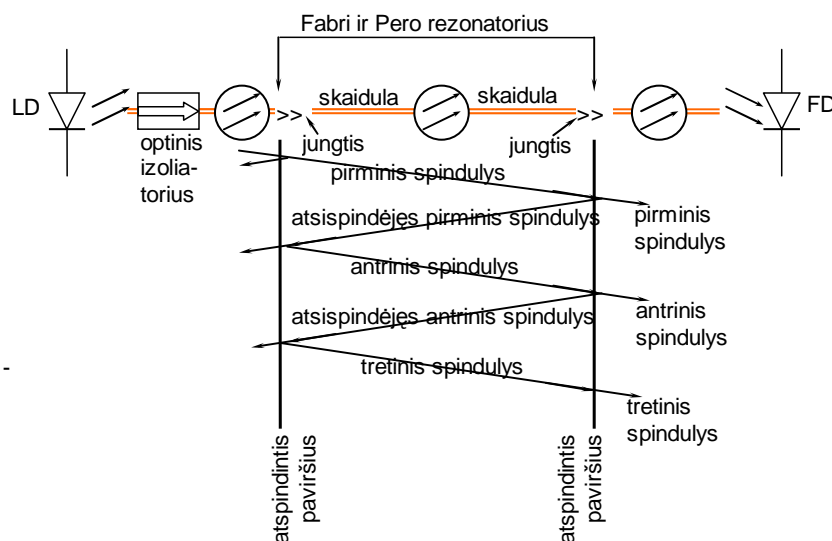


2.45 pav. Optinis izoliatorius panaudojant Faradėjaus efektą (Faradėjaus rotatorius).

rezonatoriaus modos faze, spinduliuojamos modos intensyvumas padidėja – stebima amplitudės fluktuacija. Kai atstumas iki nutolusio veidrodžio yra didesnis nei spinduliuotės koherentiškumo ilgis, fazių sąlyga nebetenka prasmės.

Vienas būdų sumažinti grįžtančios atspindėjusios šviesos kiekį yra tarp lazerio veidrodžio ir skaidulos įmontuoti optinį izoliatorių^{106,107}. Įmontavus dvigubą optinį izoliatorių atspindėtos šviesos kiekį galima sumažinti iki 50 %. Faradėjaus rotatorius paremtas Faradėjaus efektu yra vienas iš galimų optinių izoliatorių (2.45 pav.). Faradėjaus rotatorius paprastai yra itrio – geležies - granato kristalas. Spinduliuotė prieš patekdamą į rotatorių yra poliarizuojama. Faradėjaus rotatorius šviesos poliarizaciją pasuka 45° kampų. Po to spinduliuotė praeina polarizatorių, pirmojo atžvilgiu pasuktą 45° kampų. Visi izoliatoriaus paviršiai turi būti padengti neatspindinčia danga. Tik 45° poliarizuota atspindžio spinduliuotės dalis gali praeiti šia sistema atgal ir patekti į lazerinio diodo aktyviąją sritį. Šiuo būdu grįžtančios atspindėtos šviesos kiekis sumažinamas (20-45) dB.

Optinis izoliatorius negali atstoti idealiai nupoliruotų mažo atspindžio optinių jungčių. Šių dienų sistemose montuojamos optinės jungtys, kurios yra pagrindinis interferencinio intensyvumo triukšmo šaltinis. Šis triukšmas sukuriamas Fabri ir Pero rezonatoriuose, kurie susidaro tarp daugelio lygiagrečių atspindinčių



2.46 pav. Interferencinio intensyvumo triukšmo atsiradimas Fabri ir Pero rezonatoriuje.

¹⁰⁶ R. Katayama, Y. Yamanaka, K. Kubota, T. Ishikawa, "Low-noise 0.78 μm -band laser diode unit containing Faraday rotator", *Electron. Lett.*, 24 pp.: 480 - 481 (1988).

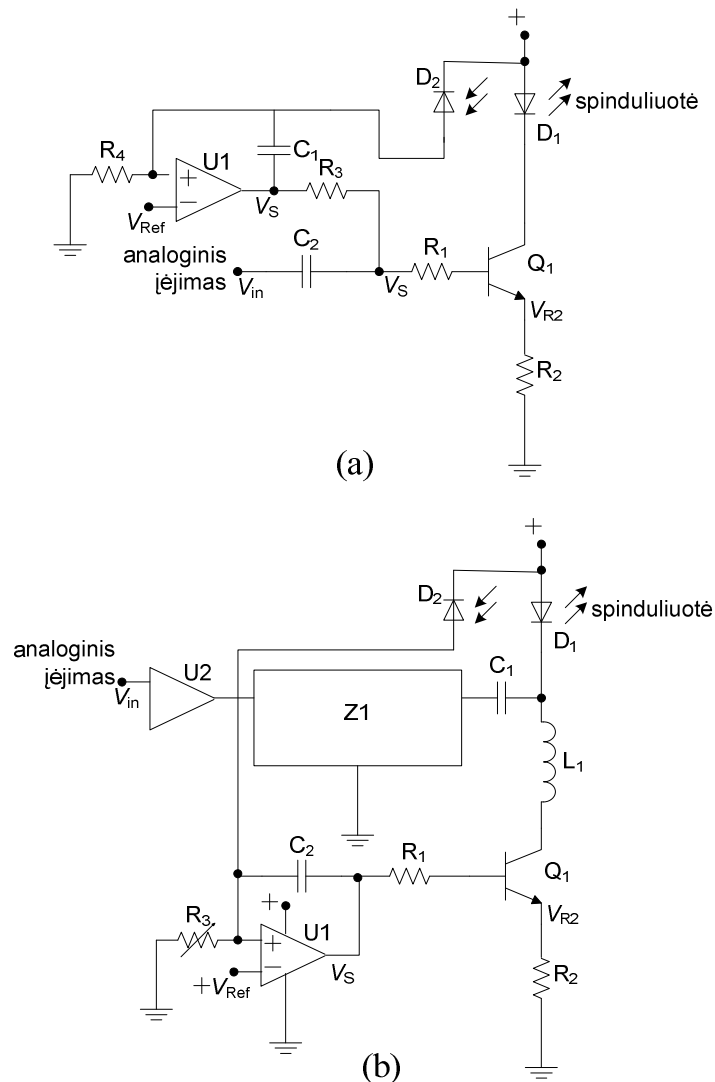
¹⁰⁷ K. Drogemuller, "A Compact Optical Isolator With a Plano-Convex YIG Lens for Laser-to-Fiber Coupling", *J. Lightw. Technol.*, 7, pp.: 340 -352 (1989).

paviršių visoje optinėje sistemoje (2.46 pav.). Kovoiant su atspindžiais buvo sukurtos fizinio kontakto poliruotos jungtys (optinė jungtis, kai skaidulos galai susiliečia), vėliau kampinis fizinis kontaktas (optinė jungtis, kur skaidulų galai nupoliruoti $(5-15)^\circ$ kampu).

2.2.17 Analoginės lazerinio diodo valdymo grandinės

Lazerinių diodų veikimo charakteristikos priklauso nuo temperatūros: kylant temperatūrai didėja slenkstinė srovė ir mažėja efektyvumas. Taigi projektuojant LD valdymo grandines yra reikalinga LD temperatūros stabilizavimo įranga. Tam naudojamas fotodiodas, kuris matuoja spinduliuotės, išeinančios pro galinį veidrodį, galią ir pagal tai valdo LD maitinimo srovę. 2.47 pav. pavaizduotos dvi analoginės LD valdymo grandinės.

Paprastesnė grandinė (2.47 (a) pav.) pasižymi vidutiniu tiesiškumu ir patikimai veikia moduliacijos dažniui neviršijant 500 MHz. Tranzistorius Q1 veikia kaip pereinamojo laidumo pakopa, kurioje įtampa pakeičiama srove. Kondensatorius C_1 praleidžia tik kintamąją įėjimo signalo dalį. Varžas R1, paprastai keliasdešimt omų, panaikina svyravimus tranzistoriuje. Kintamoji įėjimo įtamos dalis patenka į tranzistoriaus Q1 bazę ir emiterį, varžą R_2 – taip sukuriama moduluojanti srovė, kurios stipris V_{in}/R_2 . Operacinis stiprintuvas U1 sukuria valdymo grandinę, kuri palaiko pastovią srovę per galinio veidrodžio fotodetektorių D2 (pin fotodiodą).



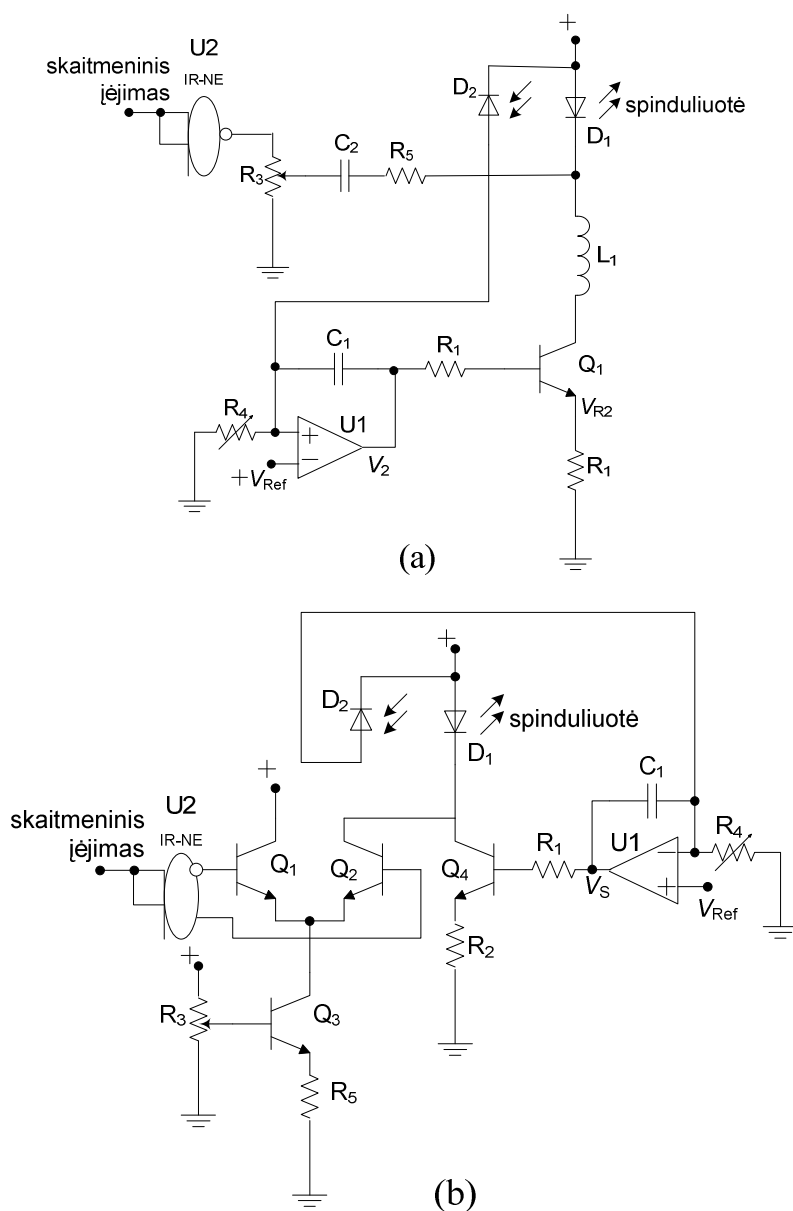
2.47 pav. Analoginės lazerinio diodo valdymo grandinės.

Grandinė pavaizduota 2.47 (b) pav. pasižymi geresniu tiesiškumu bei didesne sparta (gigahercų srityje). Šioje grandinėje stiprintuvas U2 sutapatina ir stiprina įėjimo signalą, atskiria lazerinį diodą D₁ nuo išorinių sąlygų poveikio. Blokas Z1 atlieka keletą funkcijų – visų pirma, suderina stiprintuvo išėjimo varžą (50 Ω ar 75 Ω) su lazerio impedansu ((5-25) Ω).

2.2.18 Skaitmeninės lazerinio diodo valdymo grandinės

Daugybė įvairių skaitmeninių integrinių grandinių yra naudojama lazerinių diodų valdymui. 2.48 pav. pateikti du tokių grandinių pavyzdžiai, kurie iliustruoja skaitmeninių LD valdymo integrinių grandinių principus.

2.48 (a) pav. pavaizduota grandinė tinkamai veikia moduliacijos dažniui neviršijant kelių šimtų megahercų. Skaitmeninis įėjimo signalas praeina IR-NE elementą U2, kuris sukaupia signalą ir išlaiko stačius frontus. Potenciometras R₃ reguliuoja į lazerinį diodą ateinančio signalo stiprį (moduliacijos gylį), kondensatorius C₂



2.48 pav. Skaitmeninės lazerinio diodo valdymo grandinės.

blokuoja bet kokią nuolatinę srovę, varžas R_5 suderina impedansus. Ritė L_1 leidžia lazerinį diodą pasiekti kintamai ir nuolatinėi srovei. Galinio veidrodžio fotodetektoriaus D_2 grandine teka srovė proporcinga lazerinio diodo spinduliuotės galiai. Ši srovė teka papildoma grandine, kuri užtikrina pastovią vidutinę lazerio spinduliuotės galią. Papildomos grandinės pagrindinis elementas yra operacinis stiprintuvas $U1$. Kondensatorius $C1$ stiprintuvą $U1$ paverčia integratoriumi. Potenciometras R_4 reguliuoja $U1$ srovę ir nustato vidutinę lazerinio diodo galią. Ši neigiama srovė padidina įtampą V_2 $U1$ išėjime. Padidėjus V_2 , atsidaro tranzistorius $Q1$ – padidėja srovė tekanti per D_1 ir L_1 - padidėja spinduliuotės galia, ir padidėja srovė per D_2 . Šis srovės augimas vyksta tol, kol srovė per D_2 pasiekia varžo R_4 ribojamos srovės vertę. Trys grandinės elementai: C_2 , L_1 ir C_1 , yra skirti riboti žemo dažnio signalą – ribojama veikia maža duomenų sparta. Paprastai skaitmeninės lazerinių diodų valdymo grandinės veikia nuo dažnio, kuris sudaro šimtąsias dalis dažnio, kuriam sukurta ta grandinė (grandinė sukurta persiūsti duomenis 622 Mb/s sparta taip pat turi veikti ir 6,22 MHz dažniu).

Sudėtingesnė LD valdymo grandinė (2.48 (b) pav.) skirta veikti ypač aukštu dažniu. Pagalbinė grandinė stabilizuojanti LD maitinimo srovę siekiant pastovios vidutinės spinduliuotės galios sutampa su grandinės 2.48 (a) paveiksle pateikta pagalbine grandine (išskyrus ritę L_1 , kuri čia pakeista itin sparčiu mažos talpos tranzistoriumi $Q4$). Su įėjimo signalu nesisiejantis $Q4$ kolektorius veikia kaip srovės šaltinis. Potenciometras R_4 riboja fotodiodo srovę (vidutinę lazerinio diodo spinduliuotės galią).

Skaitmeninis įėjimo signalas patenka į IR-NE elementą $U2$. $U2$ skirtuminis išėjimas valdo tranzistorinį skirtuminį stiprintuvą sudarytą iš $Q1$ ir $Q2$. $Q3$ sukuria pastovios srovės šaltinį. Potenciometras R_3 riboja $Q3$ kolektoriumi tekančią srovę. Srovė tekanti $Q3$ nulemia moduluojančios srovės stiprį: moduluojančioji srovė tekanti $Q3$ kolektoriumi svyruoja tarp $Q1$ maitinimo ir lazerinio diodo $D1$ srovių, kai $U2$ išėjimas įjungiamas ir išjungiamas. Norint išlaikyti didelę moduliacijos spartą, reikia neleisti grandinei įsisotinti: tranzistoriai $Q1$, $Q2$ ir $Q3$ veikia tiesinėje veikoje, tai lemia didelę veikimo spartą.

3. Fotodetektoriai

Ryšio sistemos imtuve optiniu kabeliu atsklidusi moduluota šviesa paverčiama elektriniu signalu, atitinkančiu įėjimo signalą. Imtuvo pagrindinis elementas yra fotodetektorius. Fotodetektorius paprastai yra *pin* arba griūtinis lėkio fotodiodas. Šiame skyriuje aptartos fotodiodų sandaros ypatybės ir veikimo charakteristikos svarbios optinėms ryšio sistemoms.

Svarbu, kad naudojamos sistemos būtų suderintos, t. y. lazerinis ar šviesos diodas, optinė skaidula bei fotodiodas turi būti suderinti pagal spinduliuotės stiprumą ir spektrą. Optiniu kabeliu atsklidusi šviesa paprastai yra gana silpna, todėl imtuve yra įmontuoti vidiniai stiprintuvai. Jei į imtuvą atsklistų didesnės galios šviesos impulsas, sistema gali būti perkrauta. Pvz., jei imtuvas ir siūstuvas pritaikyti vienmodei veikai, o optinė skaidula yra daugiamedė, tai daugiamedės skaidulos gale bus gana didelis spinduliuotės kiekis. Tokiu atveju priimamas signalas yra iškraipomas. Taip pat, jei imtuvas ir siūstuvas yra daugiamedžiai, o kabelis vienmodis, tai imtuvą pasiekia nepakankamas šviesos kiekis.

Svarbiausios optinių ryšio sistemų detektorių charakteristikos:

- atsakas – srovės stiprio fotodiode santykis su krintančios spinduliuotės kiekiu – kuo didesnis fotodetektoriaus atsakas, tuo didesnis imtuvo jautris;
- kvantinis efektyvumas – pirminių elektrono ir skylės porų, sukurtų krintant fotonams, skaičiaus santykis su kritusių fotonų skaičiumi;
- fotodetektoriaus talpa priklausanti nuo aktyviosios srities ploto bei atgalinės įtampos;
- atsako trukmė – trukmė reikalinga fotodiodui sureaguoti į optinį įėjimo signalą; atsako trukmę nulemia tamsinė fotodetektoriaus srovė, triukšmas, tiesiškumas, atspindžiai, kraštinis efektas.

3.1 Fotodiodų veikimo charakteristikos

Fotodiodas (FD) yra atgaline kryptimi veikiančios *pn* sandūros įtaisas. Nors jo veikimo principai, kaip ir šviesos bei lazerinio diodų, remiasi optinėmis ir elektrinėmis puslaidininkių bei *pn* sandūros savybėmis, tačiau funkcija yra visai kita – fotodioduose naudojamas fizikinis reiškinys yra optinė sugertis. Optinė sugertis yra vyksmas priešingas savaiminei ir priverstinei spinduliuotei. Sugeriamos spinduliuotės bangos ilgis priklauso nuo medžiagos draudžiamosios energijos tarpo. Plačiausiai fotodetektorių gamybai naudojami Si ir Ge, III-V, II-VI lydiniai (GaAs, InP, CdTe). FD iš silicio naudojami plataus vartojimo elektronikoje, Ge ir InGaAs(P)/InP – optinėse ryšio sistemose, ilgabangei spinduliuotei sugerti naudojami InAs, InSb fotodiodai^{1,2,3,4,5}.

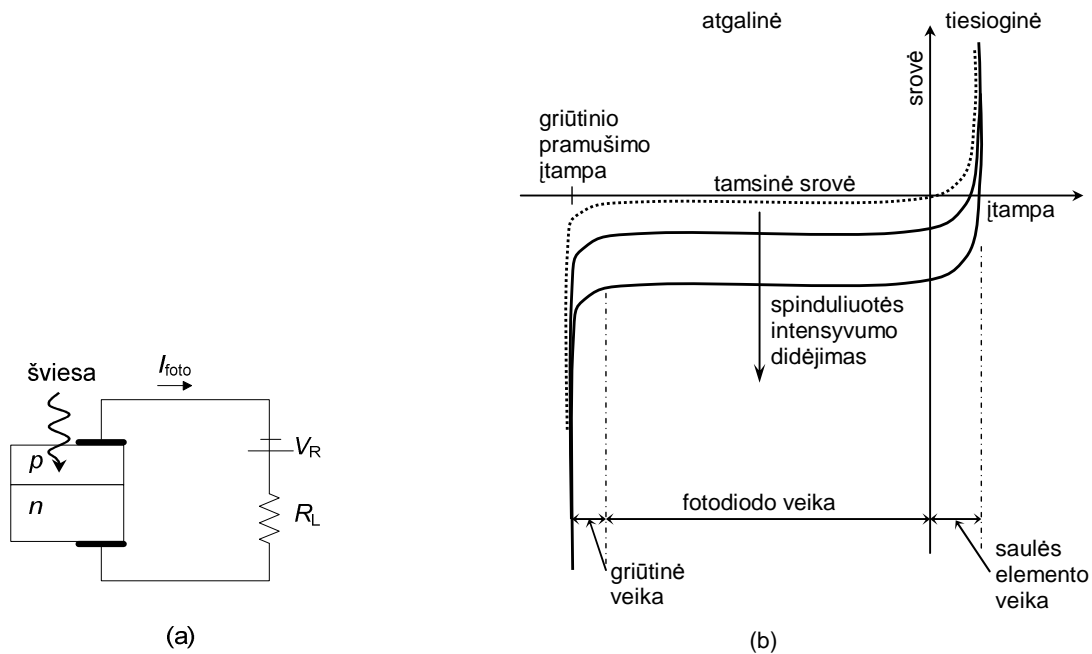
¹ L. Colace, and G. Assanto, “Germanium on Silicon for Near-Infrared Light Sensing”, *IEEE Photonics J.*, 1, pp.: 69-79 (2009).

² J. Mathews, R. Roucka, J. Xie, S.-Q. Yu, J. Menendez, J. Kouvetakis, “Extended performance GeSn/Si(100) p-i-n photodetectors for full spectral range telecommunication applications”, *Appl. Phys. Lett.*, 95, p.: 133506-3 (2009).

³ X. M. Sun, H. Zhang, H. Zhu, P. Xu, G. R. Li, J. Liu and H. Z. Zheng, “High responsivity resonant-cavity-enhanced InGaAs/GaAs quantum-dot photodetector for wavelength of ~1 μm at room temperature”, *Electron. Lett.*, 45, pp.: 329-331 (2009).

⁴ O. Klin, P. C. Klipstein, E. Jacobsohn, E. Saguy, I. Shtrichman, A. Raizman, E. Weiss, “Molecular beam epitaxy grown In_{1-x}Al_xSb/InSb structures for infrared detectors”, *J. Vacuum Science & Technol. B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 24, pp.: 1607 – 1612 (2006).

⁵ R. Pal, A. Malik, V. Srivastav, B. L. Sharma, V. R. Balakrishnan, V. Dhar, and H. P. Vyas, “Engineering Interface Composition for Passivation of HgCdTe Photodiodes” *IEEE Trans. Electron Dev.*, 53, pp.: 2727-2734 (2006).



3.1 pav. Fotodiodo jungimo grandinė (a) ir veikos sritys (b).

Puslaidininkį apšvietus spinduliuote, kurios fotono energija viršija draudžiamosios energijos tarpą, šviesa yra sugerama – sukuriama elektrono ir skylės poros. Fotoindukuotieji elektronai ir skylės rekombinuoja spinduliuojamuoju (fotoluminescencija) arba nespinduliuojamuoju būdu. Jei puslaidininkis yra elektriniame lauke, dalis indukuotųjų krūvininkų dalyvauja elektriniame laidume ir sumažina puslaidininkio varžą. Šis reiškinys vadinamas fotolaidumu.

Apšvietus pn sandūrą, elektronai ir skylės yra išskiriami pn sandūros kontaktinio elektrinio lauko – generuojama elektrovaros jėga. Šis reiškinys vadinamas fotogalvaniniu. Fotogalvaninis reiškinys yra toks pat vienalytėje ir įvairialygtėje pn sandūrose, bei Šotkio barjere. Taigi šviesos galia gali būti paverčiama elektrine naudojant fotodiodus.

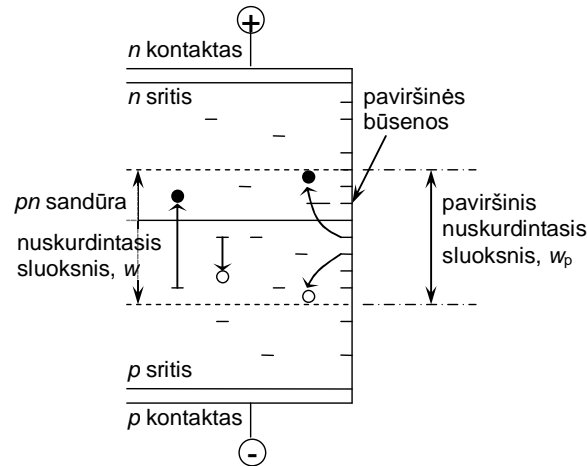
3.1 pav. pavaizduota fotodiodo jungimo grandinė bei voltamperinė charakteristika. Tamsinė fotodiodo srovė – grandine tekanti srovė, nesant apšvietimo. Tamsinė FD srovė atgaline kryptimi sutampa su diodo soties srove:

$$J_{s0} = q \left(\frac{D_{ep} n_p}{L_{ep}} + \frac{D_{hn} p_n}{L_{hn}} \right); \quad (3.1)$$

čia n_p ir p_n yra šalutinių krūvininkų tankis p ir n srityse, D_{ep} ir D_{hn} yra elektronų difuzijos p srityje ir skylių difuzijos n srityje konstantos, L_{ep} ir L_{hn} yra elektronų ir skylių difuzijos nuotoliai. Tamsinė FD srovė yra nulemta generacinės - rekombinacinės ir paviršinės rekombinacinės srovės. Apšvietus fotodiodą generuojama fotosrovė ir todėl atgalinė FD srovė didėja. Priklausomai nuo atgalinės srovės stiprio, FD gali veikti kaip griūtinis diodas, fotodiodas ar saulės elementas.

3.1.1 Užvertoji pn sandūra ir atgalinė (tamsinė) srovė

Idealiame diode tiek tiesiogine, tiek atgaline kryptimi teka tik difuzijos srovė (difuzijos srovė atgaline kryptimi yra soties srovė). Tačiau realiuose įtaisuose teka keletas srovių. Pagrindinės jų yra paviršinė nuotėkio srovė (I_{tp}), generacinė - rekombinacinė (I_{g-r}) ir tunelinė (I_{tt}) (3.2 pav.). Dėl šių papildomų srovių atgalinės srovės stipris nėra pastovus ir lygus soties srovės stipriui, o tolygiai didėja didėjant įtampai. Visos



3.2 pav. Generacinės - rekombinacinės ir paviršinės nuotėkio srovės atsiradimas.

tamsinės srovės stipris (I_t) yra lygus minėtųjų srovių stiprių sumai:

$$I_t = I_{td} + I_{tp} + I_{tg-r} + I_{tt} \quad (3.2)$$

Šios srovės nulemia įtaiso tamsinę srovę, triukšmą, įtakoja patikimumą.

Difuzinės srovės stipris esant atvirkštinei įtampai (soties srovė) (3.1) yra nulemtas medžiagos draudžiamosios energijos juostos pločio. Soties srovė beveik nepriklauso nuo atvirkštinės įtampos ir nekinta plačioje įtampų srityje. Kintant temperatūrai difuzinė srovė kinta eksponentiškai:

$$J_{s0} = q \left(\frac{D_{ep} n_p}{L_{ep}} + \frac{D_{hp} p_n}{L_{hp}} \right) N_c N_v \exp \left(\frac{E_g}{kBT} \right); \quad (3.3)$$

čia N_c ir N_v yra efektingieji būsenų tankiai laidumo ir valentinėje juostoje. Įtaiso paviršius labai įtakoja jo veikimą mažų srovių (esant ir tiesioginei, ir atvirkštinei įtampai) srityje. Įtaiso paviršius paprastai būna daug defektiškesnis nei vidiniai sluoksniai - paviršiuje susidaro paviršinės būsenos. Nuo paviršiaus kokybės priklauso tamsinės paviršinės nuotėkio srovės dydis. Papildomos būsenos taip pat susidaro skiriamuosiuose paviršiuose (pvz., tarp puslaidininkio ir dielektriko sluoksnio). Paviršinės būsenos lengvai pagauna krūvininkus, kaip generaciniai – rekombinaciniai centrai. Jei pagavimo centras yra ties draudžiamosios energijos tarpo viduriu, ir elektrono bei skylės pagavimo skerspjūviai yra apylygiai, tai generacinė srovė padidėja tokiu paviršinės nuotėkio srovės sandu:

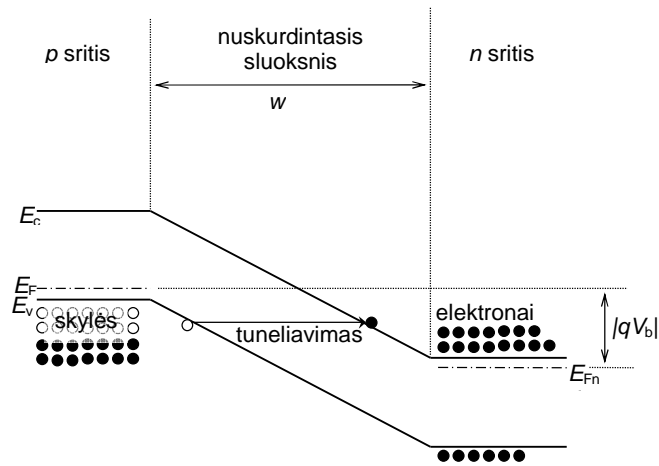
$$I_{tp} = \frac{q w_p}{2} n_i \sigma v_{th} N_{pc}; \quad (3.4)$$

čia w_p yra pn sandūros nuskurdintojo sluoksnio paviršiaus plotas, σ yra krūvininkų pagavimo skerspjūvis, N_{pc} - pagavimo centrų paviršiuje tankis, v_{th} – šiluminis krūvininkų greitis. Taigi norint sumažinti tamsinę srovę paviršinių defektų kiekis turi būti kuo mažesnis^{6,7}.

Generacinę – rekombinacinę (GR) srovę aprašo formulė:

⁶ T. H. Loh, H. S. Nguyen, R. Murthy, M. B. Yu, W. Y. Loh, G. Q. Lo, N. Balasubramanian, D. L. Kwong, J. Wang, S. J. Lee, "Selective epitaxial germanium on silicon-on-insulator high speed photodetectors using low-temperature ultrathin Si_{0.8}Ge_{0.2} buffer", *Appl. Phys. Lett.*, 91, pp.: 073503-3 (2007).

⁷ C. L. Yu, R. W. Chuang, S. J. Chang, P. C. Chang, K. H. Lee, and J. C. Lin, "InGaN–GaN MQW Metal–Semiconductor–Metal Photodiodes With Semi-Insulating Mg-Doped GaN Cap Layers", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 19, pp.: 846-848 (2007).



3.3 pav. Tunelinė srovė esant atvirkštinei įtampai.

$$J_{\text{tg-r}} = \frac{qw}{2} n_i \sigma_r v_{\text{th}} N_t \exp\left(-\frac{qV}{2k_B T}\right); \quad (3.5)$$

čia w yra nuskurdintojo sluoksnio plotis, σ_r – rekombinacinių centrų pagavimo skerspjūvis, N_t – efektinis pagavimo centrų būsenų tankis. Esant tiesioginei įtampai, GR srovę nulemia injekuotųjų krūvininkų rekombinacija. Tačiau esant atvirkštinei įtampai, kai krūvininkai neinjekuojami, GR srovę lemia krūvininkų generacija. (3.5) padauginus iš pn sandūros ploto A_{pn} , GR srovė išreiškiama taip:

$$I_{\text{tg-r}} = A_{pn} J_{\text{tg-r}} = \frac{A_{pn} q n_i w}{\tau_{g-r}} = A_{pn} q n_i w \sigma_r v_{\text{th}} N_t = A_{pn} q w \sigma_r v_{\text{th}} N_t (N_c N_v)^{1/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right). \quad (3.6)$$

GR srovė eksponentiškai didėja didėjant temperatūrai ir mažėjant draudžiamosios energijos tarpui. Taip pat GR srovė priklauso nuo defektų nuskurdintajame sluoksnyje skaičiaus – auginant įtaiso darinį reikia siekti sukurti kuo mažiau defektų⁸.

Tunelinę srovę lemia kvantmechaninis tuneliavimas per pn sandūrą (3.3 pav.). Tuneliavimo tikimybė yra didelė tiesioginių šuolių puslaidininkuose (GaAs, InP, GaAs), nes tuneliavimo metu išsilaiko energija ir impulsas. Netiesioginių šuolių puslaidininkuose (Si, Ge) tuneliavimo tikimybė yra maža, nes čia šuoliuose turi dalyvauti ir fononai. Taigi su tuneliavimo problema susiduriama daugiausia fotodioduose pagamintuose iš tiesioginių šuolių puslaidininkų ir veikiančiuose esant didelei atvirkštinei įtampai. Tuneliavimo tikimybė didėja mažėjant potencialinio barjero pločiui (taip atsitinka esant didelei atvirkštinei įtampai). Tunelinė srovė aprašoma formule:

$$I_{\text{tt}} = A_{pn} \frac{\sqrt{2} q^3 F_{\text{max}} |V_b|}{\pi \hbar^2} \sqrt{\frac{m_e}{E_g}} \exp\left(-\frac{\pi^2 m_e^{1/2} E_g^{2/3}}{\sqrt{2} \hbar q F_{\text{max}}}\right); \quad (3.7)$$

čia F_{max} yra didžiausias pn sandūros elektrinis laukas, m_e – efektinė elektrono masė. Taigi tunelinė srovė yra didelė fotodioduose pagamintuose iš stipriai legiruotų mažo draudžiamosios energijos tarpo puslaidininkų, kuriuose maža efektinė elektrono masė, esant didelei atvirkštinei įtampai. Atvirkštinei įtampai didėjant tunelinė srovė sukelia tunelinį pramušimą.

Temperatūrinė tamsinės srovės priklausomybė yra nulemta medžiagos draudžiamosios energijos tarpo, darinio sandaros, kokybės, etc. Temperatūrai didėjant tamsinė srovė didėja. Nors kvantmechaninio

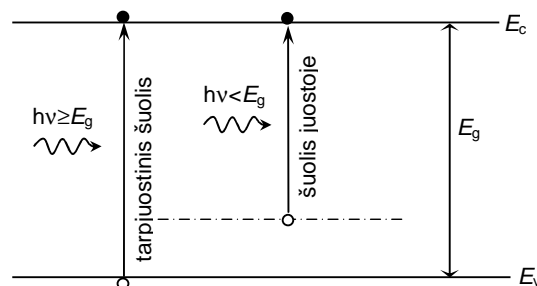
⁸ H. N. Becker and A. H. Johnston, “Dark Current Degradation of Near Infrared Avalanche Photodiodes from Proton Irradiation”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 51, pp.: 3572-3578 (2004).

tuneliavimo tikimybė nuo temperatūros nepriklauso, tačiau ją įtakoja temperatūrinė draudžiamosios energijos tarpo priklausomybė.

Vyraujanti fotodiodu tekančios srovės rūšis priklauso nuo veikos tipo: fotodiodo veikoje vyrauja generacinė - rekombinacinė ir difuzinė srovės, kurios ir nulemia tamsinės srovės temperatūrinę priklausomybę; grūtinės veikos srityje atsiranda tunelinė srovė ir stipriai įtakoja tamsinės srovės priklausomybę nuo temperatūros (pvz., Si ir Ge kristaluose tamsinė srovė padidėja eile temperatūrai pakilus 30 °C)⁹. Tamsinė srovė taip pat padidina fotodiodo srovės triukšmą aukštesnėje temperatūroje.

3.1.2 Šviesos sugertis ir kvantinis fotodiodų našumas

Apšvietus puslaidininkį yra sukuriama fotoindukuotieji krūvininkai (3.4 pav.). Šviesa yra paverčiama elektrine galia. Fotolaidumo efektas stebimas fotopulsalaidininkuose (CdS, PbS, Zn(Ge), GaSb, etc.) kintant kristalo varžai.



3.4 pav. Optinė sugertis.

Šuolio juostoje atveju elektronai yra sužadinami iš gilaus priemaišinio lygmens. Tokie puslaidininkiai naudojami ilgabangėje srityje (>5 μm), bet nėra populiarūs, nes jų atsakas ir sparta yra maži. Plačiau naudojami puslaidininkiai, kuriuose vyrauja tarpjuostiniai šuoliai – detektuojama spinduliuotė, kurios energija yra nemažesnė nei draudžiamosios energijos tarpas.

Fotodiodo kvantinis našumas aprašomas elektrono ir skylės porų, dalyvaujančių fotosrovėje, skaičiaus santykiu su kritusių fotonų skaičiumi:

$$\eta_f = \frac{I_f/q}{P_i/h\nu} \cdot 100\% ; \quad (3.8)$$

čia I_f yra fotosrovė, P_i – krintančios spinduliuotės galia. Vietoje kvantinio našumo fotodiodo efektyvumui apibūdinti dažnai yra naudojamas atsakas (S [A/W]):

$$S = \frac{I_f}{P_i} = \frac{q\eta_f}{h\nu} = \frac{\eta_f \lambda [\mu m]}{1,24} . \quad (3.9)$$

Kvantinį našumą įtakoja šviesos atsispindėjimas nuo fotodiodo paviršiaus, indukuotųjų krūvininkų rekombinacija paviršiuje ir nuskurdintame sluoksnyje, šviesos sugertis kituose, ne nuskurdintajame, sluoksniuose¹⁰. Kadangi puslaidininkių atspindžio faktorius yra apie 3,5, tai 30 % krintančios spinduliuotės atsispindi nuo įtaiso paviršiaus. Siekiant sumažinti šviesos atspindį nuo paviršiaus, fotodiodų paviršius padengiamas skaidrinančiu sluoksniu – atspindys sumažinamas iki 1 %. Paviršinei rekombinacijai sumažinti reikia siekti išvengti defektų atsiradimo auginant darinį. Sumažinti paviršinę rekombinaciją galima paviršių

⁹ A. Zemel, I. Lukomsky, "Weiss Mechanism of carrier transport across the junction of narrow band-gap planar n⁺p HgCdTe photodiodes grown by liquid-phase epitaxy", *J. Appl. Phys.*, 98, pp.: 054504-7 (2005).

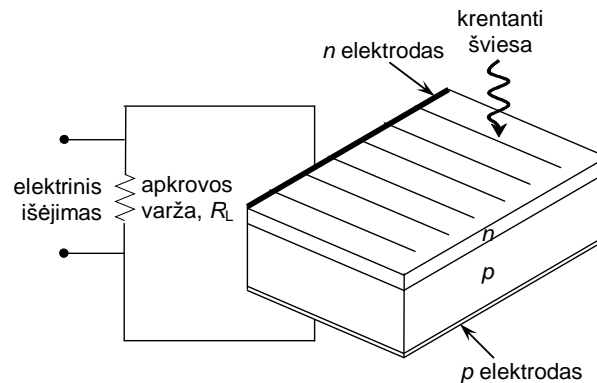
¹⁰ S. Mou, J. V. Li, and S. L. Chuang, "Quantum Efficiency Analysis of InAs–GaSb Type-II Superlattice Photodiodes", *IEEE J. Quantum Electron.*, 45, p.: 737-743 (2009).

padengus šviesą sugeriančiu sluoksniu su didesniu draudžiamosios energijos tarpu¹¹.

Laipsniškas kvantinio našumo mažėjimas mažėjant spinduliuotės bangos ilgiui yra susijęs su šviesos sugertimi sluoksniuose tarp apšviesto paviršiaus ir aktyviosios srities. Našumo mažėjimas didėjant bangos ilgiui yra nulemtas aktyviosios srities draudžiamosios energijos tarpo.

3.2 Saulės elementai

Saulės elementai yra naudojami pradedant elektrinėmis ir baigiant įprastais kasdieniniais elektronikos prietaisais. Pagrindinė jų funkcija yra generuoti elektros energiją panaudojant saulės šviesą. Saulės šviesos spektras yra nuo 200 nm iki 3000 nm, taigi saulės elementams tinka dauguma puslaidininkių. Populiariausios saulės elementų medžiagos yra polikristalinis silicis, Ge, GaAs, CdTe^{12,13,14,15}.



3.5 pav. Saulės elemento schema.

Saulės elementas yra fotodiodas naudojamas be jokios įtampos (3.5 pav.). Šukų ar kitų geometrinių formų n elektrodas naudojamas siekiant sumažinti nevienalyčio elektrinio potencialo generavimą pn sandūroje (nevienalytiškumą lemia skersinis srovės tekėjimas paviršiniu sluoksniu) bei padidinti šviesos praėjimą pro elektrodą¹⁶.

3.2.1 Voltamperinė saulės elementų charakteristika

Pusiausvyroje būsenoje saulės elemento energijos juostos diagrama yra kaip įprasto diodo (3.6 pav.). Jei krintančios spinduliuotės kvanto energija yra didesnė už darinio medžiagos draudžiamosios energijos tarpą, tai generuojamos elektrono ir skylės poros. Kontaktinis elektrinis laukas atskiria sukurtus elektronus ir skylės ir šie dreifuoja į n ir p sritis. Elektronai, sugeneruoti p srityje, difunduoja gilyn į p ritį ir rekombinuoja su skylėmis (analogiškai elgiasi skylės n srityje). Elektronai ir skylės sukurti arčiau nuskurdintojo sluoksniu

¹¹ J. Burm, K. I. Litvin, D. W. Woodard, W. J. Schaff, P. M., M. A. Jaspan, M. M. Gitin, and L. F. Eastman, "High-Frequency, High-Efficiency MSM Photodetectors", *IEEE J. Quantum Electron.*, 31, pp.: 1504-1509 (1995).

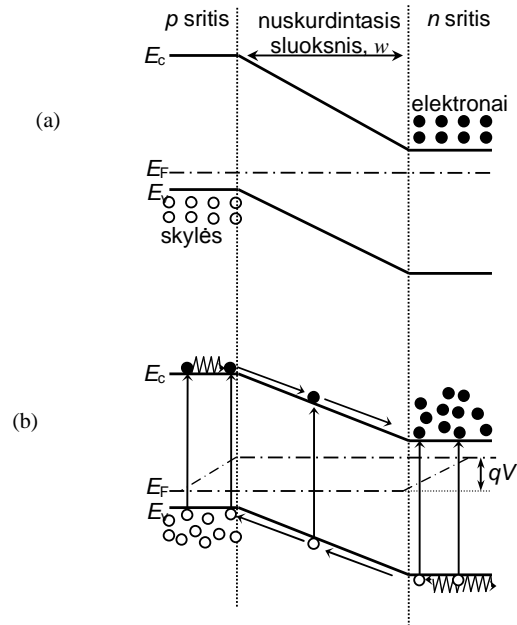
¹² H. Fujiwara, T. Kaneko, M. Kondo, "Application of hydrogenated amorphous silicon oxide layers to c-Si heterojunction solar cells", *Appl. Phys. Lett.*, 91, pp.: 133508-3 (2007).

¹³ M.-C. Tseng, R.-H. Horng, Y.-L. Tsai, D.-S. Wu, and H.-H. Yu, "Fabrication and Characterization of GaAs Solar Cells on Copper Substrates" *IEEE Electron Dev. Lett.*, 30, pp.: 940-942 (2009).

¹⁴ I. Prieto, B. Galiana, P. A. Postigo, C. Algora, L. J. Martinez, I. Rey-Stolle, "Enhanced quantum efficiency of Ge solar cells by a two-dimensional photonic crystal nanostructured surface", *Appl. Phys. Lett.*, 94, pp.: 191102-3 (2009).

¹⁵ Y. Y. Proskuryakov, K. Durose, M. K. Al Turkestani, I. Mora-Sero, G. Garcia-Belmonte, F. Fabregat-Santiago, J. Bisquert, V. Barrioz, D. Lamb, S. J. C. Irvine, E. W. Jones, "Impedance spectroscopy of thin-film CdTe/CdS solar cells under varied illumination", *J. App. Phys.*, 106, pp.: 044507 - 044507-9 (2009).

¹⁶ Y. Nasuno, N. Kohama, K. Nishimura, T. Hayakawa, H. Taniguchi, M. Shimizu, "Effect of perforated transparent electrodes on light transmittance and light scattering in substrates used for microcrystalline silicon thin-film solar cells", *Appl. Phys. Lett.*, 88, pp.: 071909-3 (2007).



3.6 pav. Saulės elemento su vienalyte pn sandūra energijos juostų diagrama: (a) pusiausvyroje būsenoje, (b) apšvietus.

krašto nei difuzijos nuotolis, pasiekia nuskurdintąjį sluoksnį, ir elektronai dreifuoja į n sritį, o skylės į p . Šis fotoindukuotų krūvininkų dreifas sukuria fotosrovę. Saulės elementui veikiant be maitinimo ar esant tiesioginei įtampai nuskurdintojo sluoksnio storis yra mažesnis už krūvininkų difuzijos nuotolį. Fotosrovė aprašoma tokia formule:

$$I_f \approx qA_{pn}G_f(L_{ep} + L_{hn}); \quad (3.10)$$

čia G_f yra elektrono ir skylės poros generacijos sparta [cm^{-3}/s], L_{ep} ir L_{hn} – elektronų difuzijos nuotolis p srityje ir skylių n srityje. pn sandūra dėl fotogalvaninio reiškinio yra maitinama tiesiogine kryptimi. Uždarius grandinę apkrovos varžoje R_L yra įtampa (3.5 pav.). Tiesioginė srovė yra grynai difuzinė srovė. Visa saulės elemento grandine tekanti srovė bus dviejų priešingomis kryptimis tekančių srovių suma:

$$I_{ph} = -I_f + A_{pn}J_{s0} \left(\exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right); \quad (3.11)$$

čia antrasis dešinės pusės narys yra tiesioginė srovė. Jei apkrovos varža yra labai maža (arba lygi nuliui) arba krintanti šviesa labai silpna, tai apkrovos varžos įtampa bus labai maža (arba lygi nuliui). Tokiu atveju I_{ph} išraiškoje antrasis narys yra nykstamai mažas ir trumpojo jungimo atveju srovės stipris bus lygus fotosrovei:

$$I_{ph-s} = -I_f = -qA_{pn}G_f(L_{ep} + L_{hn}). \quad (3.12)$$

Fotosrovės stipris yra proporcingas šviesos intensyvumui. Kai apkrovos varža yra didelė (arba begalinė – atviroji grandinė), tai $I_{ph} = 0$ ir įtampa:

$$V_0 = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{I_f}{I_{s0}} + 1\right) \approx \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{I_f}{I_{s0}}\right); \quad (3.13)$$

čia $I_{s0} = A_{pn}J_{s0}$. Soties srovei I_{s0} mažėjant, atvirosios grandinės įtampa didėja. Šviesos intensyvumui didėjant apkrovos varžos įtampa didėja logaritmiškai didėjant fotosrovei, t. y. krintančios šviesos intensyvumui.

3.2.2 Saulės elementų išėjimo galia ir efektyvumas

Saulės elemento išėjimo galia:

$$P_f = I_{ph}V = -I_fV + I_{s0}V \left(\exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right). \quad (3.14)$$

Didžiausia išėjimo galia gaunama, kai $\frac{dP_d}{dV} = 0$. Išdiferencijavus (3.14):

$$I_f = I_{s0} \left(\exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right) + I_{s0} \frac{qV}{k_B T} \exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right); \quad (3.15)$$

$$V_{max} = \frac{k_B T}{q} \ln \frac{I_f/I_{s0} + 1}{\frac{qV_{max}}{k_B T} + 1} = V_0 - \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{qV_{max}}{k_B T} + 1 \right) \approx V_0; \quad (3.16)$$

čia V_{max} yra įtampa, kai generuojama didžiausia galia. Tada didžiausią galią atitinkanti srovė:

$$I_{max} = I_{s0} \frac{qV_{max}}{k_B T} \exp\left(\frac{qV_{max}}{k_B T}\right). \quad (3.17)$$

Didžiausia išėjimo galia:

$$P_{f-max} = I_{max}V_{max} \approx I_{s0} \frac{qV_{max}^2}{k_B T} \exp\left(\frac{qV_{max}}{k_B T}\right). \quad (3.18)$$

Saulės elemento keitimo efektyvumas išreiškiamas didžiausios išėjimo elektrinės galios santykiu su optine įėjimo galia:

$$\eta_k = \frac{P_{f-max}}{P_i} = \frac{I_{max}V_{max}}{P_i} = \frac{I_{s0} \frac{qV_{max}^2}{k_B T} \exp\left(\frac{qV_{max}}{k_B T}\right)}{P_i} \cdot 100\%. \quad (3.19)$$

Realus saulės elementų keitimo efektyvumas visada yra mažesnis už teorinį dėl defektų, šviesos sugerties ne nuskurdintajame sluoksnyje. Keitimo efektyvumas kai kuriems (pagamintiems iš Si, GaAs) saulės elementams viršija (10-20) %^{17,18}.

Svarbus saulės elementų parametras yra užpildos faktorius, nusakantis galios išgavimą ir aprašomas šiuo santykiu:

$$\frac{I_{max}V_{max}}{I_{ph-s}V_0}. \quad (3.20)$$

Keitimo efektyvumas priklauso nuo krintančios šviesos bangos ilgio, nes nuo jo priklauso sugerties koeficientas, šviesos išsiskverbimo gylio. Saulės elemento spektrinis atsakas aprašomas trumpojo jungimo srovės kitimu kintant šviesos bangos ilgiui:

$$\frac{dI_{ph-s}(\lambda)}{d\lambda} \approx \alpha_{ab}\lambda(L_{ep} + L_{hn})\exp(-\alpha_{ab}x_{pn}), \quad (3.21)$$

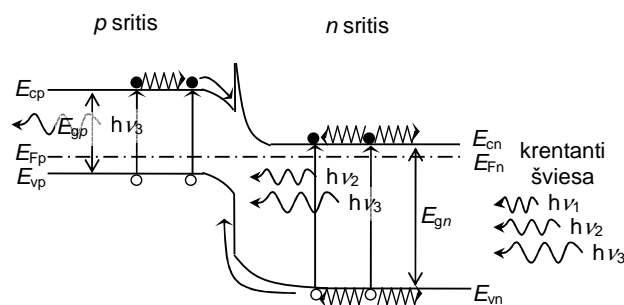
čia x_{pn} yra pn sandūros atstumas nuo apšviečiamo paviršiaus, α_{ab} – šviesos sugerties koeficientas.

¹⁷ D. Kray and K. R. McIntosh, "Analysis of Selective Phosphorous Laser Doping in High-Efficiency Solar Cells", *IEEE Trans. Electron Dev.*, 56, pp.: 1645-1650 (2009).

¹⁸ C. O. McPheeters, C. J. Hill, S. H. Lim, D. Derkacs, D. Z. Ting, E. T. Yu, "Improved performance of In(Ga)As/GaAs quantum dot solar cells via light scattering by nanoparticles", *J. Appl. Phys.*, pp.: 056101-3 (2009).

3.2.3 Saulės elementai su įvairialyčiu dariniu

Daugelyje įtaisų naudojami pigesni saulės elementai su vienalyte pn sandūra iš polikristalinio silicio. Norint padidinti atsaką, ypač trumpabangėje srityje, pn sandūra turi būti kuo arčiau apšviečiamo paviršiaus (paviršinė rekombinacija sumažina kvantinį našumą). Šviesos sugerties koeficientas didėja didėjant priemaišų kiekiui (priemaišų kiekis yra didinamas norint sumažinti paviršinio sluoksnio varžą – šios varžos mažinimas yra svarbus siekiant mažesnio nevienalyčio elektrinio lauko stiprio). Visų šių trūkumų galima išvengti naudojant įvairialyčius darinius (3.7 pav.)^{19,20} Saulės elemente su įvairialyčiu dariniu šviesa krinta į plačiatarpę medžiagą. Fotonai, kurių energija didesnė už plačiatarpės medžiagos draudžiamosios energijos tarpą, čia yra sugeriami; fotonai, kurių energija yra tarp plačiatarpės ir siauratarpės medžiagų draudžiamosios energijos tarpų energijos yra sugeriami siauratarpėje medžiagoje; o mažos energijos fotonai praeina pro visą pn sandūrą. Taigi saulės elementuose su įvairialyčiu dariniu plačiatarpio sluoksnio plotis ir priemaišų tankis gali būti didinami neįtakojant sugerties siauratarpiame sluoksnyje.



3.7 pav. Saulės elemento su įvairialyčiu pn sandūra energijos juostos diagrama.

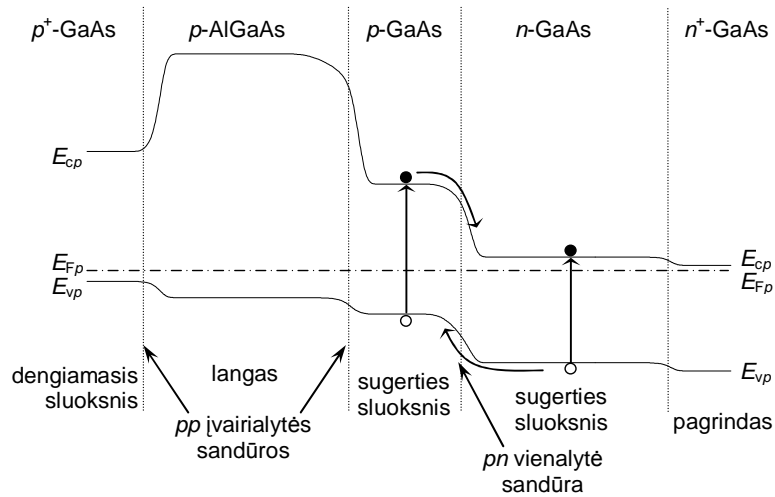
Didžioji fotosrovės dalis yra sudaryta iš paviršinės rekombinacinės srovės. Todėl, susidaręs energijos juostos įlinkis įvairialyčio darinio tarp sluoksnyje sudaro barjerą fotoindukuotiesiems krūvininkams ir gali žymiai sumažinti fotosrovę. Šį įlinkį galima panaikinti auginant izotipinę įvairialyčių sandūrą ir vienalytę pn sandūrą (3.8 pav.). Tokiu būdu išnaudojami įvairialyčio darinio pranašumai ir išvengiama jo trūkumų: fotoindukuotieji krūvininkai gali laisvai tekėti nesulaikomi jokių barjerų. Dengiamasis sluoksnis šiame darinyje reikalingas ominiui kontaktui sudaryti: kontaktinė varža tarp puslaidininkio ir metalo yra tuo mažesnė, kuo mažesnis puslaidininkio draudžiamosios energijos tarpas. Saulės elementai su įvairialyčiais dariniais gaminami iš III-IV medžiagų: AlGaAs/GaAs, InGaAs(P)/InP.

3.3 pin fotodiodai

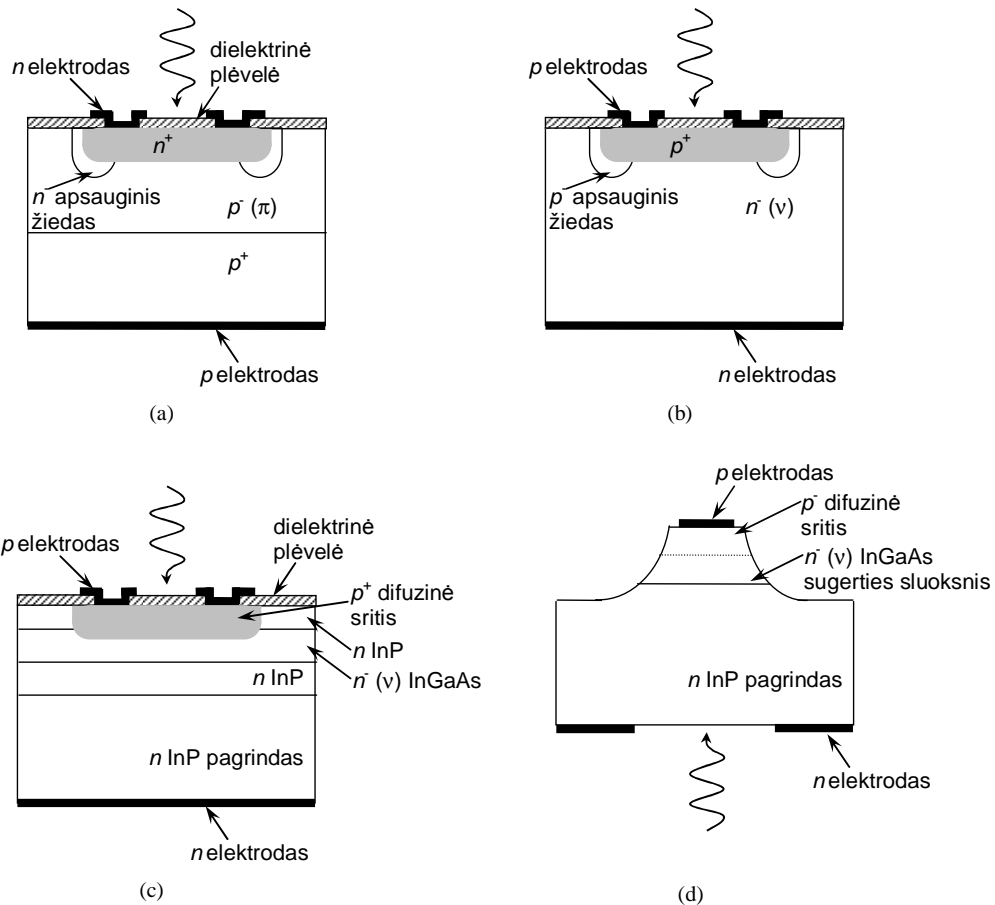
pin fotodiodai naudojami įvairiausiose srityse: nuo optinių ryšio sistemų iki kasdienės elektronikos. Jų kvantinis našumas yra žymiai didesnis nei saulės elementų, o tamsinė srovė ir darbinė įtampa yra mažesnės nei griūtinių fotodiodų. Saulės elementai naudoja fotogalvaninį efektą be papildomos įtampos, pin fotodiodai naudoja tą patį fotogalvaninį efektą esant maitinimui - atvirkštinei įtampai. Populiariausios pin fotodiodų medžiagos yra Si spinduliuotei, kurios bangos ilgis trumpesnis nei 800 nm, ir Ge, InGaAs, InGaAsP

¹⁹ D. Pysch, J. Ziegler, J.-P. Becker, D. Suwito, S. Janz, S. W. Glunz, M. Hermle, "Stretched-exponential increase in the open-circuit voltage induced by thermal annealing of amorphous silicon-carbide heterojunction solar cells", *Appl. Phys. Lett.*, 94, pp.: 093510-3 (2009).

²⁰ M. Nath, P. Chatterjee, J. Damon-Lacoste, P. Roca i Cabarrocas, "Criteria for improved open-circuit voltage in a-Si:H(N)/c-Si(P) front heterojunction with intrinsic thin layer solar cells", *J. Appl. Phys.*, 103, pp.: 034506-9 (2008).



3.8 pav. Saulės elemento su įvairialyte izotopine sandūra ir vienalytė pn sandūra energijos juostos diagrama.



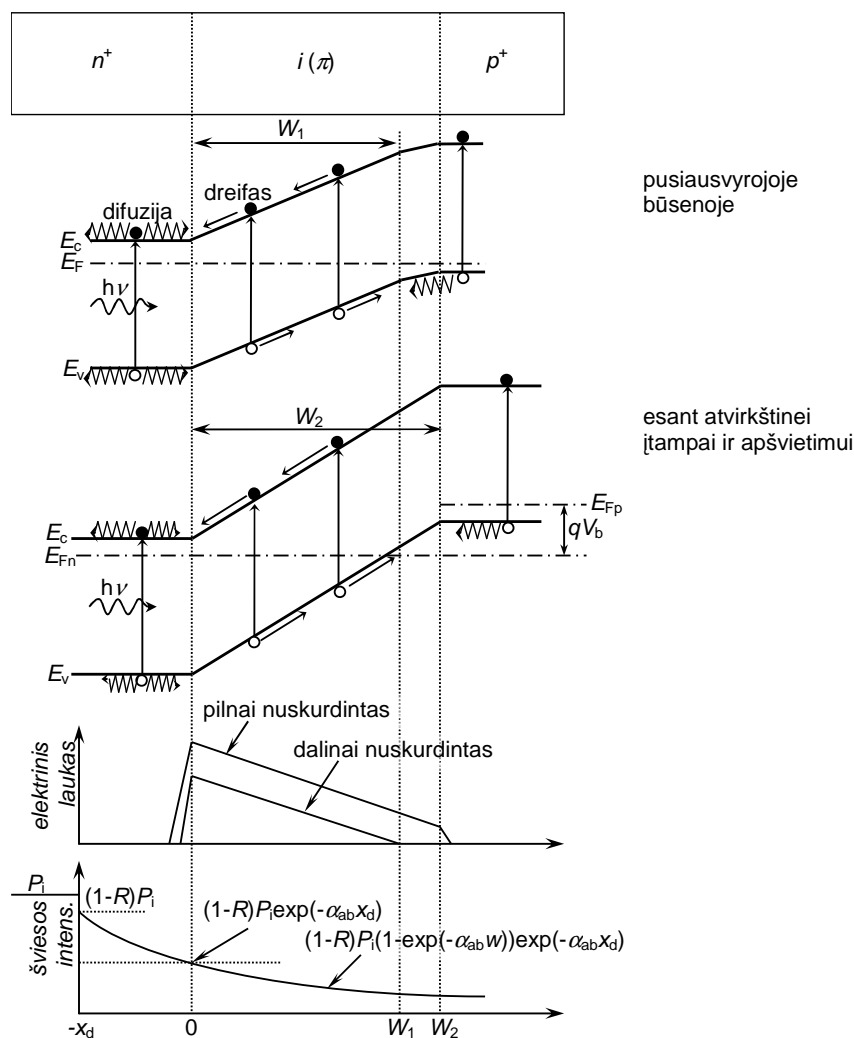
3.9 pav. pin fotodiodų dariniai: (a) $n^+p^-p^+$ darinys, (b) vienalytės pn sandūros darinys, (c) planarusis darinys, (d) mezadarinys.

spinduliuotei, kurios bangos ilgis didesnis kaip $1 \mu\text{m}^{21,22,23}$.

²¹ G. Wang, Y. Yoneda, I. Hanawa, H. Aono, K. Araki, M. Takechi, Y. Momma, T. Odagawa, T. Fujii, K. Sato and M. Kobayashi, "Highly reliable high performance waveguide-integrated InP/InGaAs pin photodiodes for 40 Gbit/s fibre-optical communication application", *Electron, Lett.*, 39, pp.: 1147-1449 (2003).

3.9 pav. pavaizduoti įvairūs *pin* fotodiodų dariniai. *pin* fotodioduose naudojama *pn* sandūra susideda iš stipriai legiruotų *p* ir *n* sluoksnių bei silpnai legiruoto (*i* sluoksniu) sluoksnio tarp jų: *p* sluoksnis, *i* sluoksnis ir *n* laidumo sluoksnis. Šviesos patekimo langas apribojamas žiediniu elektrodu (apie (30-300) μm diametro) ir padengiamas šviesą neatspindinčiu sluoksniu (siekiant sumažinti nuo fotodiodo paviršiaus atsispindėjusios spinduliuotės kiekį). Apie difuzinę *pn* sandūrą difuzijos ar jonų implantacijos būdu dažnai suformuojamas apsauginis žiedas, kuris apsaugo nuo šoninio pramušimo dėl stipraus elektrinio lauko ties *pn* sandūros kraštu²⁴. Šių fotodiodų veiką nulemia nelegiruotojo (silpnai legiruoto *i* sluoksnio) sluoksnio savybės (sluoksnio storis, legiravimo lygis).

i sluoksnis *pin* fotodioduose dažniausiai būna labai silpnai legiruotas n^- arba p^- (kitaip dar vadinamas ν arba π). Krūvininkų tankis *i* sluoksnyje būna apie $(10^{13} - 10^{16}) \text{ cm}^{-3}$ (krūvininkų tankis sluoksniuose n^+ ir p^+ būna



3.10 pav. *pin* fotodiodo energijos juostos diagrama, elektrinio lauko ir šviesos intensyvumo pasiskirstymas.

²² F. Y. Huang, K. Sakamoto, K. L. Wang, P. Trinh, and B. Jalali, "Epitaxial SiGeC Waveguide Photodetector Grown on Si Substrate with Response in the 1.3–1.55- μm Wavelength Range" *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 9, pp.: 229-231 (1997).

²³ S.-H. Chang, Y.-K. Fang, S.-F. Ting, S.-F. Chen, C.-Y. Lin, C.S. Lin and C.-Y. Wu, "Fabrication of very high quantum efficiency planar InGaAs PIN photodiodes through prebake process", *IEE Proc. Circuits Device Syst.*, 152, pp.: 637-640 (2005).

²⁴ M. Sun, K. Xie, and Y. Lu, "Robust PIN Photodiode With a Guard Ring Protection Structure", *IEEE Trans. Electron. Dev.*, 51, 833-838 (2004).

ne mažesnis nei 10^{18} cm^{-3}). *pin* fotodioduose sukuriama staigioji sandūra, kurios nuskurdintasis sluoksnis visada išplinta į *i* sluoksnį. Beveik visa atvirkštinė įtampa yra *i* sluoksnyje (3.10 pav.). Taigi *i* sluoksnis yra pilnai nuskurdinamas esant labai mažai atvirkštinei įtampai arba ir visai be įtampos. Didinant atgalinę įtampą, nuskurdintasis sluoksnis plečiasi, kol pasiekia p^+ sluoksnį – atitinkama įtampa vadinama pradūros įtampa. *pin* fotodiodo kvantinis našumas didėja proporcingai didėjant nuskurdintojo sluoksnio pločiui *i* srityje. Pasiekus pradūros įtampą, tolesnis atvirkštinės įtampos didinimas beveik nekeičia nuskurdintojo sluoksnio storio, nes p^+ sritis yra stipriai legiruota, ir didžiausias elektrinis laukas susidaro *i* srityje (3.10 pav.). Taigi pasiekus ir viršijus pradūros įtampą, nuskurdintojo sluoksnio storis yra maždaug lygus *i* sluoksnio storiui (III-V medžiagų *pin* fotodioduose tai yra apie 3 μm , Si ir Ge fotodioduose - kelios dešimtys mikrometrų).

3.3.1 *pin* fotodiodo tamsinė srovė ir fotosrovė

Fotodiodo veikoje visada naudojama atvirkštinė įtampa. Fotodiodo įtampa susideda iš fotodiodo nuosekliosios varžos įtampos ir apkrovos varžos įtampos dėl fotosrovės (I_{ph}) skirtumo (3.11 pav.):

$$V_b = V_R - I_{\text{ph}} R_L. \quad (3.22)$$

Idealiu atveju fotosrovė:

$$I_{\text{ph}} = I_f + I_{s0}; \quad (3.23)$$

čia I_f yra fotoindukuotoji srovė. Fotodiodui veikiant realiomis sąlygomis prie šios srovės dar prisideda srovė atsirandanti dėl foninio apšvietimo iš aplinkos I_{fono} :

$$I_{\text{ph}} = I_f + I_{s0} + I_{\text{fono}}. \quad (3.24)$$

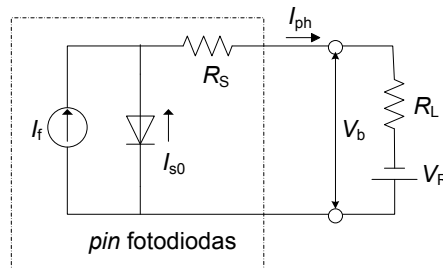
Normaliomis fotodiodo veikimo sąlygomis tamsinė srovė yra keliomis eilėmis mažesnė už fotosrovę. Taigi fotosrovė praktiškai yra lygi fotoindukuotajai srovei. Fotoindukuotoji srovė susideda iš dreifinės (dėl nuskurdintame sluoksnyje fotoindukuotų krūvininkų) ir difuzinės (dėl fotoindukuotų šalutinių krūvininkų, sukurtų ne toliau kaip per difuzijos nuotolį nuo nuskurdintojo sluoksnio krašto) srovių. Abi šias sroves padalinus iš *pn* sandūros ploto, gauname fotosrovės tankį:

$$J_{\text{ph}} = J_{\text{ph-dr}} + J_{\text{ph-dif}}. \quad (3.25)$$

Elektrono ir skylės poros generavimo sparta ($G_{\text{ph}}(x)$) gali būti apskaičiuojama pagal Lamberto dėsnį atsižvelgiant į krintančios spinduliuotės galią P_i ir atspindžio nuo paviršių faktorių R :

$$G_{\text{ph}}(x) = (1 - R) \frac{P_i}{A_{\text{pn}} h \nu} \alpha_{\text{ab}} \exp(-\alpha_{\text{ab}} x); \quad (3.26)$$

čia krintančios spinduliuotės galia perskaičiuota į fotonų srautą $\frac{P_i}{A_{\text{pn}} h \nu}$. Suintegravus šią lygtį nuo 0 iki



3.11 pav. Ekvivalentinė *pin* fotodiodo schema.

nuskurdintojo sluoksnio krašto gaunamas elektrono ir skylės porų skaičius nuskurdintajame sluoksnyje. Šviesos sugertį nuskurdintajame sluoksnyje aprašo: $(1-R)P_1[1-\exp(-\alpha_{ab}x)]$. Sugertis dengiamajame sluoksnyje yra nežymi. Taigi, jei visa nuskurdintajame sluoksnyje sugerta spinduliuotė generuoja elektrono ir skylės poras, tai dreifo srovė:

$$J_{\text{ph-dr}} = q(1-R)\frac{P_1}{A_{\text{pn}}h\nu}\alpha_{\text{ab}}[1-\exp(-\alpha_{\text{ab}}w)]. \quad (3.27)$$

Normalios veikos sąlygomis pasiekus pradūros įtampą difuzijos srovę lemia fotoindukuotieji šalutiniai krūvininkai. Vienmatė difuzijos lygtis elektronams, dalyvaujantiems fotolaidume:

$$D_{\text{ep}}\frac{\partial^2 n_p}{\partial x^2} - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_{\text{ep}}} + G_{\text{ph}}(x) = 0; \quad (3.28)$$

čia D_{ep} yra elektronų difuzijos p srityje konstanta, τ_{ep} – perteklinių elektronų gyvavimo p srityje trukmė, n_p ir n_{p0} – perteklinių ir pusiausvyrųjų elektronų tankis p srityje. Išsprendus (3.28) lygtį (kraštinės sąlygos: taške $x=\infty$: $n_p=n_{p0}$; taške $x=w$: $n_p=0$):

$$n_p = n_{p0} - [n_{p0} + C_0 \exp(-\alpha_{\text{ab}}w)] \exp\left[\frac{w-x}{L_{\text{ep}}}\right] + C_0 \exp(-\alpha_{\text{ab}}w); \quad (3.29)$$

$$\text{čia } C_0 = (1-R)\frac{P_1}{A_{\text{pn}}h\nu}\alpha_{\text{ab}}\frac{L_{\text{ep}}^2}{D_{\text{ep}}}\left(1 - \alpha_{\text{ab}}^2 L_{\text{ep}}^2\right).$$

Tada difuzijos srovė:

$$J_{\text{dif}} = qD_{\text{ep}}\left.\frac{\partial n_p}{\partial x}\right|_{x=w} = q(1-R)\frac{P_1}{A_{\text{pn}}h\nu}\frac{\alpha_{\text{ab}}L_{\text{ep}}}{1 + \alpha_{\text{ab}}L_{\text{ep}}}\exp(-\alpha_{\text{ab}}w) + qn_{p0}\frac{D_{\text{ep}}}{L_{\text{ep}}}. \quad (3.30)$$

Pilnutinė pin fotodiodo fotosrovė išreiškiamą formule:

$$J_{\text{ph}} = q(1-R)\frac{P_1}{A_{\text{pn}}h\nu}\left\{1 - \frac{\exp(-\alpha_{\text{ab}}w)}{1 + \alpha_{\text{ab}}L_{\text{ep}}}\right\} + qn_{p0}\frac{D_{\text{ep}}}{L_{\text{ep}}}. \quad (3.31)$$

pin fotodiodui veikiant normaliomis sąlygomis paskutinysis (3.31) narys yra mažas, taigi pilnutinė fotosrovė:

$$J_{\text{ph}} = q(1-R)\frac{P_1}{A_{\text{pn}}h\nu}\left\{1 - \frac{\exp(-\alpha_{\text{ab}}w)}{1 + \alpha_{\text{ab}}L_{\text{ep}}}\right\}. \quad (3.32)$$

Fotosrovė yra proporcinga fotonų srauto tankiui, t. y. krintančios spinduliuotės intensyvumui.

3.3.2 Išorinis kvantinis pin fotodiodo našumas

Normaliomis veikimo sąlygomis nuskurdintasis sluoksnis pin fotodiode yra gana storas. Kai i sluoksnis yra plonas (pvz., InGaAs pin dioduose), tai pasiekus pradūros įtampą nuskurdintasis sluoksnis sutampa su i sluoksniu. Jei visi fotoindukuotieji krūvininkai nuskurdintajame sluoksnyje ir per difuzijos nuotolį nuo jo dalyvauja fotolaidume, tai kvantinis fotodiodo našumas:

$$\eta_{\text{ph-ex}} = \frac{J_{\text{ph}}/q}{P_1/A_{\text{pn}}h\nu} = (1-R) \left\{ 1 - \frac{\exp(-\alpha_{\text{ab}}w)}{1 + \alpha_{\text{ab}}L_{\text{ep}}} \right\}. \quad (3.33)$$

Iš tikrųjų, realiuose įtaisuose ne visi fotoindukuotieji krūvininkai dalyvauja fotolaidume (dėl paviršinių defektų, defektų nuskurdintajame sluoksnyje). Taigi vidinis kvantinis našumas yra mažesnis nei 100 %. Vidinis kvantinis našumas išreiškiamas fotoindukuotųjų elektrono ir skylės porų skaičiaus santykiu su sugertų fotonų skaičiumi. Tada išorinis kvantinis našumas:

$$\eta_{\text{ph-ex}} = \frac{J_{\text{ph}}/q}{P_1/A_{\text{pn}}h\nu} = (1-R) \left\{ 1 - \frac{\exp(-\alpha_{\text{ab}}w)}{1 + \alpha_{\text{ab}}L_{\text{ep}}} \right\} \eta_{\text{ph-in}}. \quad (3.34)$$

Iš III-V medžiagų pagamintų *pin* fotodiodų skirtų ryšio sistemoms atsakas siekia 0,99 A/W (1300 nm ir 1500 nm bangų ilgiams). Tada kvantinis našumas gali būti iki 96 %^{23,25}. Panašus ir Si bei Ge fotodiodų efektyvumas.

3.3.3 Dažninė *pin* fotodiodo charakteristika

Optinėse ryšio ir duomenų persiuntimo sistemose be kvantinio našumo labai svarbios yra elementų dažninės charakteristikos. Fotodiodų dažnines charakteristikas riboja trukmė, reikalinga fotoindukuotajam krūvininkui pereiti nuskurdintąjį sluoksnį (lėkio trukmė) ir CR trukmės konstanta, kurią nulemia maitinimo grandinė.

CR trukmės konstanta riboja visų fotodiodų spartą. Kol atvirkštinė įtampa yra mažesnė už pradūros, *i* sluoksnis yra iš dalies nuskurdintas. Nuskurdintasis sluoksnis veikia kaip talpa (sandūros talpa), o likusi *i* sluoksnio dalis veikia kaip didelė elektrinė varža (dėl mažo krūvininkų tankio). Taigi prieš pasiekiant pradūrą *pin* fotodiodų sparta yra maža. Priešįtampiai didėjant, nuskurdintasis sluoksnis plėtėja ir jo talpa mažėja atvirkščiai proporcingai $\sqrt{|V_R|}$, didelės varžos sritis siaurėja ir jos varža mažėja. Pasiekus pradūrą, nuskurdintasis sluoksnis sutampa su *i* sluoksniu ir sandūros talpą galime išreikšti taip:

$$C_s = \frac{\epsilon_s \epsilon_0}{w_i}; \quad (3.35)$$

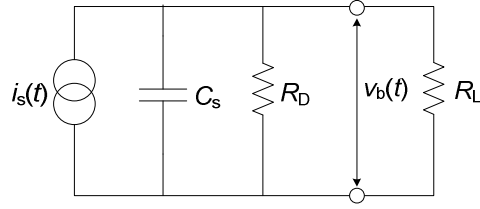
čia ϵ_0 yra dielektrinė konstanta, w_i yra *i* sluoksnio storis, ϵ_s yra medžiagos dielektrinė skvarba. Taigi sistemose, kuriose reikia didelės spartos, *pin* fotodiodai naudojami įtampai viršijant pradūros vertę. 3.12 pav. pateikta ekvivalentinė *pin* fotodiodo schema esant didelei įtampai (virš pradūros; šioje schemeje neatsižvelgta į jungiamųjų laidų induktyvumą, korpuso talpą ir nuosekliają varžą, kontaktų varžą). Iš 3.12 pav. galima užrašyti tokią lygtį pereinamųjų vyksmų fotodiode analizei:

$$C_s \frac{dv_b(t)}{dt} + \frac{v_b(t)}{R_{\text{DL}}} = i_s(t); \quad (3.36)$$

$$\text{čia } R_{\text{DL}} = \frac{1}{\frac{1}{R_D} + \frac{1}{R_L}}.$$

Jei krintanti spinduliuotė moduluojama harmoniniu signalu, tai ir sugeneruota fotosrovė turės harmoninį pavidalą: $i_s(t) = i_0 \exp(i\omega t)$. Tada įtampa:

²⁵ M. Förtsch, H. Zimmermann, and H. Pless, "220-MHz Monolithically Integrated Optical Sensor With Large-Area Integrated PIN Photodiode", *IEEE Sensors J.*, 6, pp.: 385-390 (2006).



3.12 pav. Ekvivalentinė *pin* fotodiodo schema atvirkštinei įtampai viršijant pradūros įtampą ir krintant moduluotai šviesai (R_D yra vidinė diodo varža, R_L – apkrovos varža).

$$v_b(t) = \frac{i_0 R_{DL}}{1 + i\omega C_s R_{DL}} \exp(i\omega t). \quad (3.37)$$

Įtampos amplitudės žemuose dažniuose ($i_0 R_{DL}$) santykis su amplitude aukštuose dažniuose yra lygus

$\sqrt{\frac{1}{1 + (\omega C_s R_{DL})^2}}$. Tada fotodiodo ribinis dažnis (dažnis atitinkantis įtampos sumažėjimą $\sqrt{2}$ karto):

$$f_{c-CR} = \frac{1}{2\pi C_s R_{DL}}. \quad (3.38)$$

Įprasto InGaAs *pin* fotodiodo atveju: $C_s=100$ fF, $R_D=100$ M Ω , $R_L=50$ Ω - teoriškai apskaičiuotas ribinis dažnis būtų 30 GHz. Mokslinėse laboratorijose *pin* fotodiodų ribinis dažnis pasiekiamas (20-40) GHz^{21,26,27,28}. Optoelektronikos įtaisų gamintojai gamina 10 GHz *pin* fotodiodus skirtus optinio ryšio linijoms, kurių sparta neviršija 10 Gb/s²⁹.

Krintančią šviesą moduluojant stačiakampiais impulsais, sukuriama fotosrovės ir taip pat apkrovos varžos įtampos impulsai. Kilimo ir kritimo trukmės nulemia $C_s R_{DL}$ trukmės konstanta:

$$v_{b-\uparrow}(t) = i_0 R_{DL} \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{C_s R_{DL}}\right) \right]; \quad (3.39)$$

$$v_{b-\downarrow}(t) = i_0 R_{DL} \left[1 - \exp\left(\frac{-t_{off}}{C_s R_{DL}}\right) \right] \exp\left(\frac{-(t - t_{off})}{C_s R_{DL}}\right); \quad (3.40)$$

čia t_{off} yra srovės tekėjimo (impulso) trukmė. Dėl baigtinės $C_s R_{DL}$ trukmės konstantos, esant didelei moduliacijos spartai, išėjimo impulsas yra iškraipomas.

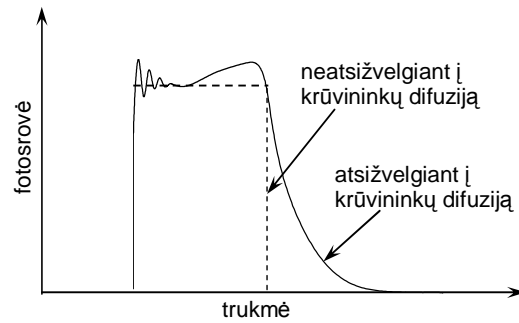
Lėkio per nuskurdintąjį sluoksnį trukmę nulemia fotoindukuotųjų krūvininkų dreifo greitis, kuris yra proporcingas krūvininkų judriui ir elektrinio lauko stipriui ($v_d = \mu F$). Didėjant elektrinio lauko stipriui (didinant atvirkštinę įtampą) dreifo greitis didėja, kol pasiekia sklaidos (susidūrimų su gardele) nulemtą soties vertę (Si, Ge, GaAs – $v_{ds} \sim 10^7$ cm/s). Įprastomis *pin* fotodiodo veikos sąlygomis (kai pasiekta pradūra ir dreifo greitis yra lygus soties greičiui) krintančios spinduliuotės intensyvumą moduluojant harmoniniu signalu ($P_{i0} \exp(i\omega t)$), fotosrovės tankis yra išreiškiamas elektronų, pasiekusių i sluoksnio kraštą, skaičiumi.

²⁶ N. R. Das, M. J. Deen, "On the optimum design of the front-end PIN-heterojunction bipolar transistor optoelectronic integrated circuit photoreceiver", *J. Vacuum Science & Technol. A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 20, pp.: 1067 – 1071 (2002).

²⁷ A. Miras-Legros, E. Legros, L. Giraudet, G. Wanlin, S. Vuye and C. Joly, "Very high gain, high sensitivity, 40 GHz narrowband photoreceiver for clock recovery", *Electron. Lett.*, 34, pp.: 297-299 (1998).

²⁸ K. Takahata, Y. Muramoto, H. Fukano, K. Kato, A. Kozen, O. Nakajima, S. Kimura and Y. Imai, "20 Gbit/s monolithic photoreceiver consisting of a waveguide *pin* photodiode and HEMT distributed amplifier", *Electron. Lett.*, 33, pp.: 1576-1577 (1997).

²⁹ http://www.bookham.com/common/receiver_lines.cfm (2009 10 21).



3.13 pav. Fotosrovės impulso deformacija dėl krūvininkų difuzijos.

Jei elektronai sugeneruojami taške x , tai fotosrovės tankis laiko momentu $t - \frac{x}{v_{ds}}$ apskaičiuojamas vidurkinant elektronų skaičių i sluoknyje:

$$J_{ph}(t) = \frac{1}{w_i} \int_0^{w_i} \frac{qP_{i0}}{A_{pn}h\nu} \exp\left(i\omega\left(t - \frac{x}{v_{ds}}\right)\right) dx = \frac{qP_{i0}}{A_{pn}h\nu} \frac{1 - \exp(-i\omega t_{tr})}{i\omega t_{tr}} \exp(i\omega t); \quad (3.41)$$

čia t_{tr} yra krūvininkų lėkio trukmė lygi w_i/v_{ds} . Fotosrovės amplitudės žemuose dažniuose ($\approx \frac{qP_{i0}}{A_{pn}h\nu}$)

santykis su amplitude aukštuose dažniuose yra $\frac{1 - \exp(-i\omega t_{tr})}{i\omega t_{tr}}$. Tada ribinis dažnis:

$$f_{c-tr} \approx \frac{2,8}{2\pi t_{tr}} \approx \frac{0,4}{t_{tr}}. \quad (3.43)$$

Taigi krūvininkų lėkio per nuskurdintąjį sluoksnį trukmė dar sumažina ribinį dažnį nulemtą CR trukmės konstantos. Jei i sluoksnio storis $40 \mu\text{m}$, tai lėkio trukmė bus $0,4 \text{ ns}$, ir ribinis dažnis – 1 GHz . Taigi lėkio trukmė (difuzinės srovės vėlavimas dėl baigtinės lėkio trukmės) stipriau riboja ribinį dažnį, nei CR trukmės konstanta (3.13 pav.). Kol fotodiodo įtampa yra maža (nepasiekta pradūros įtampa), pin fotodiodo ribinis dažnis yra mažas; atvirkštiniam prieštampui didėjant ribinis dažnis didėja, nes plėtėja nuskurdintoji sritis; viršijus pradūros įtampą ribinis dažnis toliau didėja dėl lėkio trukmės mažėjimo.

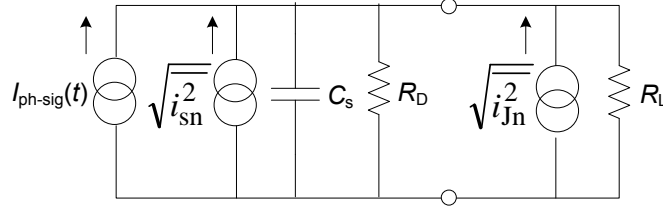
Pilnai dažninės charakteristikos analizei reikėtų įskaityti visus ekvivalentinės grandinės elementus, atsižvelgti į parazitines talpas ir induktyvumus, fotoindukuotųjų krūvininkų dreifo ir difuzijos sroves.

Siekiant pagerinti pin fotodiodų dažninę charakteristiką, galima ploninti i sluoksnį (sumažės lėkio trukmė), tačiau tada padidės CR trukmės konstanta ir sumažės kvantinis našumas. Taigi reikia surasti kompromisinį variantą. CR trukmės konstantą galima sumažinti mažinant pn sandūros plotą.

3.3.4 pin fotodiodų triukšmas, signalo ir triukšmo santykis

Fotodiodą naudojant duomenų persiuntimo sistemose svarbus yra įtaiso elektrinis triukšmas. Pagrindinės triukšmo rūšys stebimos pin fotodioduose yra kvantinis (šratinis) triukšmas ir šiluminis. Šratinis triukšmas yra esminis pin fotodiodų triukšmas, sukeltas fotoindukuotųjų krūvininkų bei krintančių fotonų (traktuojant juos kaip daleles). Šiluminį triukšmą lemia atsitiktinis krūvininkų judėjimas varžoje.

Fotosrovė pin fotodiode yra generuojama dėl atsitiktinių ir nepriklausomų įvykių, kai sugeriamas krintantis fotonas. Sugeneruotų krūvininkų judėjimas taip pat yra atsitiktinis. Šis atsitiktinis krūvininkų generavimas bei judėjimas ir sukuria šratinį fotosrovės triukšmą (taip pat ir tamsinės srovės). Šratinio triukšmo srovės

3.14 pav. Ekvivalentinė *pin* fotodiodo schema atsižvelgiant į triukšmo šaltinius.

spektrinis tankis:

$$\overline{i_{sn}^2} = 2q\bar{I}\Delta f; \quad (3.44)$$

čia \bar{I} yra nuostoviosios būsenos srovė, Δf – dažnių juostos plotis. Šratinio triukšmo spektras praktiškai yra baltas. Atsižvelgus į (3.24) lygtį:

$$\overline{i_{sn}^2} = 2q(I_f + I_t + I_{fono})B_{dj}; \quad (3.45)$$

čia $B_{dj} = \Delta f$.

Šiluminis (Džonsono (Johnson)) triukšmas atsiranda dėl atsitiktinio krūvininkų judėjimo medžiagoje, esant temperatūrai T su vidutine šilumine energija $\frac{3}{2}k_B T$. Vidutinė kvadratinė šiluminio triukšmo srovė dažnių juostoje B_{dj} yra:

$$\overline{i_{Jn}^2} = \frac{4k_B T B_{dj}}{R_{ek}}; \quad (3.46)$$

čia R_{ek} yra elektrinė varža. Šiluminio triukšmo srovės spektras taip pat yra baltas.

Kai dažnis aukštesnis už 1 kHz triukšmas nuo dažnio nebesipriklauso (jo spektras yra baltas), o žemesniuose dažniuose dominuoja $1/f$ triukšmas. 3.14 pav. pavaizduota *pin* fotodiodo ekvivalentinė schema papildyta triukšmo šaltiniais. Naudojantis šia schema galima apskaičiuoti *pin* fotodiodo signalo ir triukšmo galių santykį (S/N). Tegu krintanti galia yra moduluojama analoginiu būdu: $P(\omega) = P_{i0}(1 + M_i \sin(\omega t))$ (čia P_{i0} yra vidutinė galia, M_i – moduliacijos indeksas). Tada nuostoviosios būsenos fotoindukuotoji srovė:

$$I_{ph-sig} = \frac{\eta_{ph} q P_{i0}}{h\nu}, \quad (3.47)$$

o vidutinė kvadratinė srovės vertė:

$$\overline{i_{ph-sig}^2} = \frac{1}{2} M_i^2 I_{ph-sig}^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{M_i \eta_{ph} q P_{i0}}{h\nu} \right)^2. \quad (3.48)$$

Tada pilnutinė signalo galia yra lygi $R_{ek} \overline{i_{ph-sig}^2}$, o triukšmo galia - $R_{ek} (\overline{i_{sn}^2} + \overline{i_{Jn}^2})$. Signalo ir triukšmo santykis (indeksas „vk“ reiškia: vidutinis kvadratinis):

$$\frac{S_{vk}}{N_{vk}} = \frac{\overline{i_{ph-sig}^2}}{\overline{i_{sc}^2} + \overline{i_{Jn}^2}} = \frac{\frac{1}{2} (M_i I_{ph-sig})^2}{2q(I_{ph-sig} + I_t + I_{fono})B_{dj} + 4k_B T B_{dj} / R_{ek}}. \quad (3.49)$$

Kadangi varža $R_D (\approx 10^{10} \Omega) \gg R_L$, tai $R_{ek} \approx R_L$. Taip pat fotosrovė dėl foninio apšvietimo (I_{fono}) yra labai maža. Taigi signalo ir triukšmo santykiui didžiausią įtaką turi tamsinė srovė (I_t) ir apkrovos varža (R_L). Jei reikia

atsižvelgti į papildomus elementus (parazitinę korpuso talpą, prijungiamos įrangos įėjimo varžą ir pn.), juos reikėtų prijungti lygiagrečiai apkrovos varžui R_L 3.14 pav. pateiktoje schemeje.

Fotodiodų triukšmui įvertinti dažnai naudojama ekvivalentinė triukšmo galia P_{ek-tr} (vidutinė kvadratinė optinė galia tenkanti vienetiniam dažnių intervalui, kuriai esant fotosrovė yra lygi triukšmo srovei), kuri

atitinka mažiausią krintančios spinduliuotės galią, kuri gali būti detektuojama, kai $\frac{S_{vk}}{N_{vk}} = 1$. Į (3.49) įstačius

$\frac{S_{vk}}{N_{vk}} = 1$ ir naudojant (3.48):

$$P_{ek-tr} = \sqrt{\frac{P_{10}}{1/2}} \Big|_{S/N=1} = \frac{h\nu}{m_i \eta_{ph} q} \sqrt{\frac{2q(I_{ph-sig} + I_t + I_{fono})B_{dj} + 4k_B T B_{dj} / R_{ek}}{B_{dj}}} \quad [W/Hz^{1/2}]. \quad (3.50)$$

Šioje lygtyje bei 3.14 pav. pateiktoje schemeje neatsižvelgta į nuosekliają varžą, nes ji yra maža.

Signalą moduluojant skaitmeniniu būdu, moduliacijos indeksas praktiškai yra lygus 1. Ir signalo srovė atitinka srovę esant didžiausiai impulso vertei P_{max} . Tada vidutinė kvadratinė srovės vertė:

$$\overline{i_{ph-dig}^2} = I_{ph-dig}^2 = \left(\frac{\eta_{ph} q P_{max}}{h\nu} \right)^2. \quad (3.51)$$

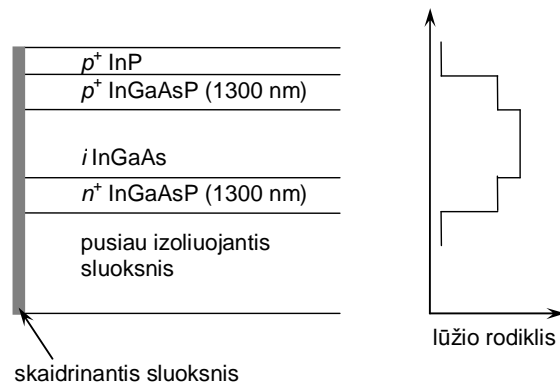
Ir signalo ir triukšmo santykis:

$$\frac{S_{imp}}{N_{vk}} = \frac{\overline{i_{ph-dig}^2}}{i_{sc}^2 + i_{Jn}^2} = \frac{I_{ph-dig}^2}{2q(I_{ph-dig} + I_t + I_{fono})B + 4k_B T B / R_{ek}}. \quad (3.52)$$

Naudojant (3.52) galima apskaičiuoti mažiausią detektuojamą krintančios spinduliuotės galią duotam signalo ir triukšmo santykiui.

3.3.5 *pin* fotodiodai su įvairialyčiais dariniais ir bangolaidiniai *pin* fotodiodai

Didėjant puslaidininkio draudžiamosios energijos tarpui mažėja fotodiodo tamsinė srovė bei didėja pramušimo įtampa. Didesnė pramušimo įtampa leidžia pagerinti fotodiodo dažnines charakteristikas, nes diodas gali veikti esant didesniems elektriniams laukams nuskurdintajame sluoksnyje. Šiuos fotodiodo



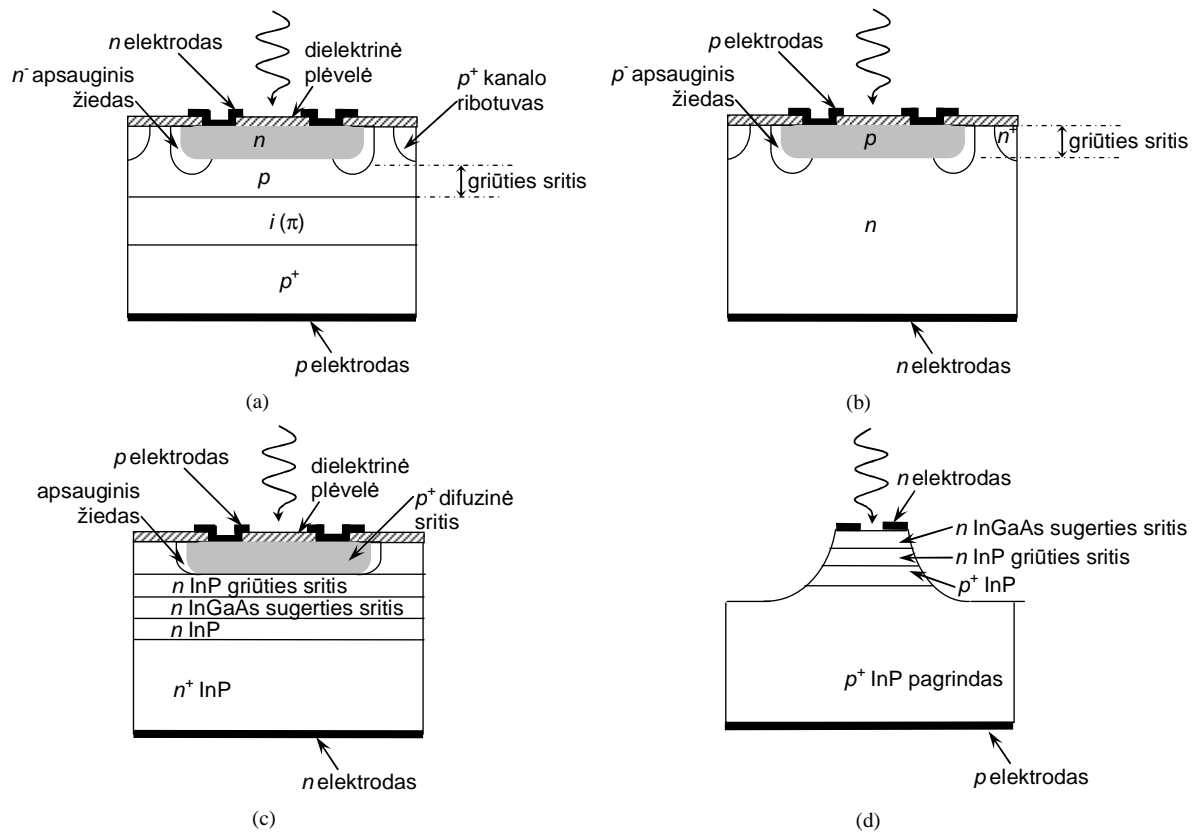
3.15 pav. Bangolaidinio *pin* fotodiodo su įvairialyčiais *pn* sandūra schema.

patobulinimus galima gauti naudojant įvairialyčius darinius (3.15 pav.)^{30,31}. Įvairialyčius darinius kartu suformuoja ir bangolaidį krintančiai spinduliutei. Tai leidžia padidinti fotodiodo efektyvumą nebloginant jo dažnių charakteristikų.

3.4 Griūtiniai fotodiodai

Griūtiniai fotodiodai (GFD) plačiai naudojami optinio ryšio sistemose. GFD veikia arti pramušimo įtampos ir fotoindukuotąją srovę sustiprina dėl griūtinio krūvininkų dauginimo. Todėl jie retai naudojami paprastoje elektronikoje (dėl didelės veikimo įtampos). GFD gaminami iš Si (700 nm ir 800 nm), Ge, InGaAs ir InGaAsP (spinduliutei, kurios bangos ilgis viršija 1 μm)^{32,33,34,35}.

GFD aktyvioji sritis susideda iš spinduliuotės sugerties sluoksnio ir krūvininkų griūties sluoksnio. 3.16 pav. pateikta keletas griūtinųjų fotodiodų darinių. Griūties sluoksnis yra padarytas taip, kad veikiant atvirkštinei



3.16 pav. Griūtinųjų fotodiodų dariniai: (a) planarusis Si darinys, (b) planarusis Ge darinys, (c) planarusis InGaAs/InP darinys, (d) InGaAs/InP mezadarinys.

³⁰ A. I. Moseley, M. Q. Kearley, R. C. Morris, J. Urquhart, M. J. Goodwin, G. Harris, “8x8 Flipchip Assembled InGaAs Detector Arrays For Optical Interconnect”, *Electron. Lett.*, 27 pp.: 1566-1567 (1991).

³¹ S. W. Choi, S. Furue, N. Hayama, K. Nishida, and M. Ogura, “Gain-Enhanced InGaAs–InP Heterojunction Phototransistor With Zn-Doped Mesa Sidewall”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 21, 1187-1189 (2009).

³² S. Zhu, K.-W. Ang, S. C. Rustagi, J. Wang, Y. Z. Xiong, G. Q. Lo, and D. L. Kwong, “Waveguided Ge/Si Avalanche Photodiode With Separate Vertical SEG-Ge Absorption, Lateral Si Charge, and Multiplication Configuration”, *IEEE Electron Dev. Lett.*, 30, pp.: 934-936 (2009).

³³ J. B. Limb, D. Yoo, Y. Zhang, J. H. Ryou, S. C. Shen and R. D. Dupuis, “GaN ultraviolet avalanche photodiodes grown on 6H-SiC substrates with SiN passivation”, *Electron. Lett.*, 44, pp.: 313 – 314 (2008).

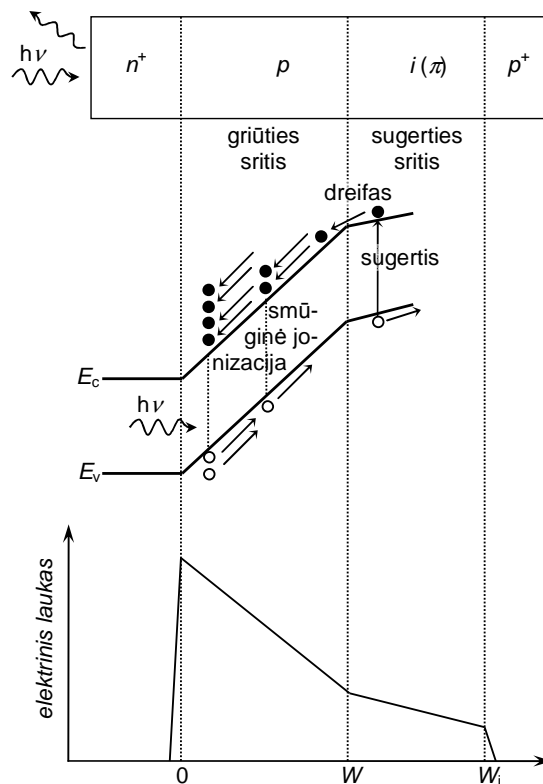
³⁴ L. Xu, E. Wu, X. Gu, Y. Jian, G. Wu, H. Zeng, “High-speed InGaAs/InP-based single-photon detector with high efficiency”, *Appl. Phys. Lett.*, 94, pp.: 161106-3 (2009).

³⁵ K. A. McIntosh, J. P. Donnelly, D. C. Oakley, A. Napoleone, S. D. Calawa, L. J. Mahoney, K. M. Molvar, E. K. Duerr, S. H. Groves, D. C. Shaver, “InGaAsP/InP avalanche photodiodes for photon counting at 1.06 μm ”, *Appl. Phys. Lett.*, 81, pp.: 2505 – 2507 (2002).

įtampai jame sukuriamas didžiausias elektrinis laukas. Spinduliuotės sugerties sritis sutampa su griūties sluoksniu arba yra gretima jam. Diodų, kuriuose griūties sritis atskirta nuo sugerties, yra didesnis efektyvumas, mažesni triukšmai^{36,37}. Spinduliuotės sugerties langas apribojamas (30-300) μm srityje žiediniu elektrodu ir padengiamas spinduliuotę sugeriančiu (neatspindinčiu) sluoksniu. Aplink difuzijos sritį suformuojamas apsauginis žiedas, saugantis nuo elektrinio pramušimo ties sandūros kraštu (ties kraštu sukuriamas stipriausias elektrinis laukas). Taigi tokia diode krūvininkų griūtis vyksta tik centrinėje dalyje. Dauguma GFD veikia įtampai viršijant pradūros vertę – taip pasiekiamas didesnis efektyvumas ir didesnė sparta.

3.4.1 Smūginė jonizacija ir jonizacijos koeficientas

Apšvietus GFD sukuriama fotoindukuotieji krūvininkai, kurie injekuojami į griūties sritį, kur yra greitinami elektrinio lauko (3.17 pav). Elektrinis laukas griūties srityje paprastai būna (10^4 - 10^5) V/cm. Griūties srityje elektronai pasiekia soties greitį nulemtą susidūrimu su gardele (šis soties greitis yra vidutinis elektronų greitis, t. y. egzistuoja ir greitesni, ir lėtesni elektronai). Greitam elektronui susidūrus su gardele įvyksta smūginė jonizacija (elektronas sužadina į laidumo juostą). Smūginė jonizacija yra trijų dalelių sąveika: pradinis didelės energijos elektronas sukuria elektrono ir skylės porą (vyksmas atvirkščias Ože rekombinacijai). Mažiausia energija reikalinga jonizacijai yra lygi draudžiamosios energijos tarpui. Realiai griūties vyksmui reikalinga pradinio krūvininko energija turi būti bent $3/2E_g$. Smūginės jonizacijos metu atsiradę krūvininkai taip pat yra greitinami ir vykdo smūginę jonizaciją. Jonizuojančių susidūrimų skaičius



3.17 pav. Supaprastinta GFD energijos juostos diagrama ir elektrinio lauko pasiskirstymas diode.

³⁶ M. S. Carroll, K. Childs, R. Jarecki, T. Bauer, K. Saiz, "Ge-Si separate absorption and multiplication avalanche photodiode for Geiger mode single photon detection", *Appl. Phys. Lett.*, 93, pp.: 183511-3 (2008).

³⁷ X. Guo, L. B. Rowland, G. T. Dunne, J. A. Fronheiser, P. M. S., A. L. Beck, and J. C. Campbell, "Demonstration of Ultraviolet Separate Absorption and Multiplication 4H-SiC Avalanche Photodiodes", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 18, pp.: 136-138 (2006).

per vienetinį ilgį vadinamas jonizacijos koeficientu. Skylių jonizacijos koeficiento santykis su elektronų jonizacijos koeficientu (arba atvirkščiai) vadinamas jonizacijos koeficientų santykiu ir yra GFD triukšmo matas.

3.4.2 Griūtinis pramušimas

Smūginė jonizacija lemia atgalinės diodo srovės didėjimą - pasiekus griūtinio pramušimo įtampą, atgalinė srovė didėja labai greitai. Visa srovė (srovės tankis) griūties srityje yra vienodas (taip pat ir visose diodo dalyse):

$$J_{\text{tot}} = J_e(x) + J_h(x); \quad (3.53)$$

čia J_e ir J_h yra elektroninės ir skylinės dreifo srovių tankiai, atitinkamai. Elektroną iš p^+ srities injekavus į griūties sritį, elektroninė srovė padidėja $M_e J_{ei}$ kartų (griūties srities gale, t. y. taške $x=w$). Taigi elektronų dauginimo faktorius:

$$M_e = \frac{J_e(w)}{J_{ei}}. \quad (3.54)$$

Analogiškai galima užrašyti skylių dauginimo faktorių. Dauginimo faktorius įvertinamas pagal sustiprintos fotosrovės esant didelei įtampai (griūtinio fotodiodo veikoje) $I_{\text{ph-M}}$ santykį su fotosrove esant mažai įtampai (fotodiodo veikoje) I_{ph} :

$$M = \frac{I_{\text{ph-M}}}{I_{\text{ph}}} = \frac{I_{\text{M-m}} - I_{\text{dM-m}}}{I_{\text{m}} - I_{\text{dm}}}; \quad (3.55)$$

čia $I_{\text{M-m}}$ ir $I_{\text{dM-m}}$ yra sustiprinta srovė ir sustiprinta tamsinė srovė esant griūtinio fotodiodo veikai, atitinkamai, I_{m} ir I_{dm} yra srovė ir tamsinė srovė esant fotodiodo veikai, atitinkamai. Dauginimo faktorius didžiausias yra, kai diodo įtampa lygi pramušimo įtampai. Apskaičiavus elektronų ir skylių dauginimo faktorius didžiausias dauginimo faktorius išreiškiamas taip:

$$M_{\text{max}} = \sqrt{\frac{|V_B|}{m_M I_{\text{ph}} R_{ek}}}; \quad (3.56)$$

čia V_B yra atvirkštinė įtampa, m_M – nuo medžiagos priklausanti konstanta. Didžiausias dauginimo faktorius daugeliui medžiagų viršija 50, siliciui – $100^{38,39}$. Tiesinė priklausomybė tarp dauginimo faktoriaus ir stiprinamos fotoindukuotosios srovės išnyksta artėjant prie pramušimo įtampos. Taip atsitinka dėl įtampos griūties srityje mažėjimo diodui veikiant ties pramušimu ir padidėjus fotosrovei (t. y. sumažėjus varžai).

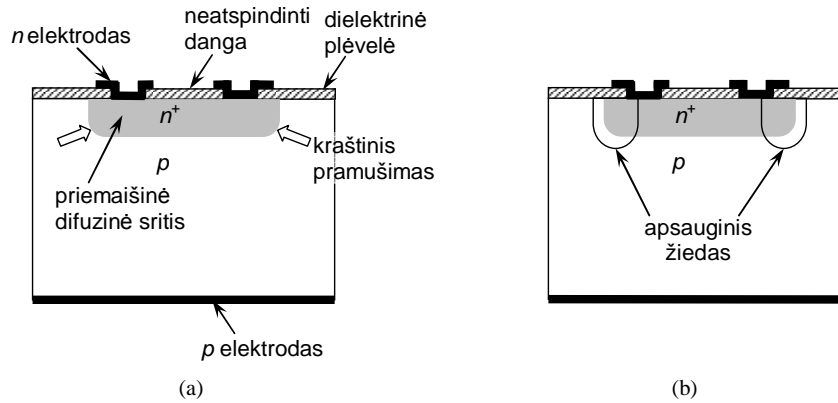
3.4.3 GFD sandaros ypatumai

Griūtinis dauginimas yra būtinas GFD veikai. Tačiau sudarius didelę įtampą griūties srityje gali vykti griūtinis pramušimas ir kitose srityse įtampai esant mažesnei nei reikalinga pramušimui.

Elektriniam laukui viršijus 10^6 V/cm dėl tunelinio pramušimo sparčiai didėja tunelinė srovė. Šis pramušimas įvyksta esant mažai įtampai, nes GFD nuskurdintojo sluoksnio legiravimo tankis yra didelis ir draudžiamosios energijos tarpas mažas. Taigi, norint išvengti tunelinio pramušimo GFD sluoksnio, atitinkančio nuskurdintąją sritį, legiravimo lygis turi būti kuo mažesnis – mažiau nei 10^{16} cm⁻³ – šis sluoksnis

³⁸ H. Kuwatsuka, Y. Kito, T. Uchida, and T. Mikawa, "High-speed InP/InGaAs Avalanche Photodiodes with a Compositionally Graded Quaternary Layer", *IEEE Trans. Photon. Technol. Lett.*, 3, pp.: 1113-1114 (1991).

³⁹ I. Watanabe, M. Tsuji, K. Makita, and K. Taguchi, "A New Planar-Structure InAlGaAs-InAlAs Superlattice Avalanche Photodiode with a Ti--Implanted Guard-Ring", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 8, pp.: 821-829 (1996).

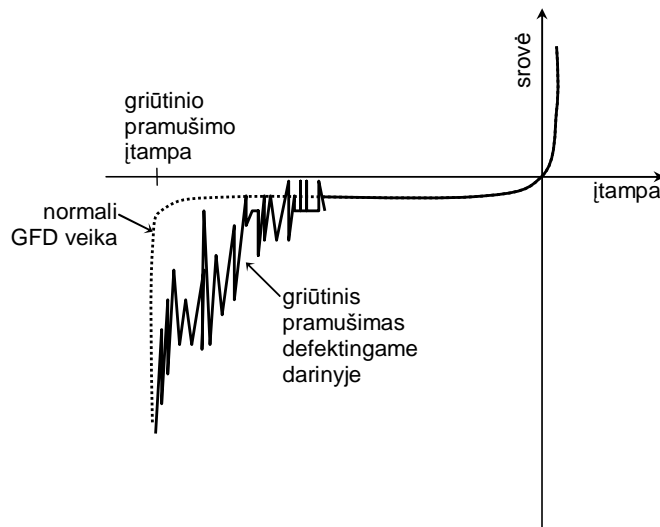


3.18 pav. Kraštinio pramušimo sritis (a) ir planarusis GFD darinys su apsauginiu žiedu.

turi būti storas ir mažai legiruotas⁴⁰.

Elektrinio lauko pasiskirstymas pn sandūroje yra netolygus: didžiausias elektrinis laukas yra ties sandūros kraštais (3.18 pav.). Taigi ties kraštu pramušimas įvyksta esant mažesnei įtampai nei centrinėje dalyje. Įvykus pramušimui krašte, centrinėje dalyje (kur patenka didžioji spinduliuotės dalis) pramušimas nebeįvyksta – taigi nepasiekama GFD veika. Siekiant padidinti kraštinio pramušimo įtampą naudojamas apsauginis žiedas (3.18 pav.)^{41,42}. Suformavus apsauginį žiedą sandūra yra nebe staigioji, o tolydžioji.

Jei GFD darinys turi labai daug defektų, tai jo voltamperinė charakteristika yra triukšminga ir griūtinis pramušimas vyksta ne prie vienos fiksuotos įtampos (3.19 pav.). Šis reiškinys vyksta dėl mikroplazminio



3.19 pav. Kokybiško ir defektingo GFD voltamperinė charakteristika.

⁴⁰ S. C. Mun, T. Liew; C. H. Tan, Y. L. Goh, A. R. J. Marshall, J. P. R. David, “Modeling of avalanche multiplication and excess noise factor in $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ avalanche photodiodes using a simple Monte Carlo model”, *J. Appl. Phys.*, 104, pp.: 013114-6 (2008).

⁴¹ J. Wei, J. C. Dries, H. Wang, M. L. Lange, G. H. Olsen, and S. R. Forrest, “Optimization of 10-Gb/s Long-Wavelength Floating Guard Ring InGaAs–InP Avalanche Photodiodes”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 14, pp.: 977-979 (2002).

⁴² S. R. Cho, S. K. Yang, J. S. Ma, S. D. Lee, J. S. Yu, A. G. Choo, T. I. Kim, and J. Burm, “Suppression of Avalanche Multiplication at the Periphery of Diffused Junction by Floating Guard Rings in a Planar InGaAs–InP Avalanche Photodiode”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 12, pp.: 534-536, (2000).

efekto – defektų vietose susidaro mažos didelio elektrinio lauko sritys, ir įvyksta vietiniai pramušimai⁴³. Defektai taip pat didina tamsinę srovę bei trumpina įtaiso amžių.

3.4.4 Dažninė GFD charakteristika

Dažninę fotodiodo charakteristiką nulemia CR trukmės konstanta, krūvininkų lėkio trukmė ir dauginimo trukmė. Krūvininkų lėkio trukmė griūtiniuose dioduose yra apie du kartus didesnė nei *pin* fotodioduose dėl griūties mechanizmo: elektronas injekuotas į griūties sritį dalyvauja daugkartinėje smūginėje jonizacijoje, kuri sulėtina krūvininką – sumažėja vidutinis krūvininko lėkio greitis. Trukmė reikalinga griūtiniam dauginimui vadinama dauginimo trukme ir nustatoma matuojant sustiprintos srovės fronto trukmę. Dauginimo faktoriaus dažninė priklausomybė gali būti išreikšta taip:

$$M(\omega) = \frac{M_0}{\sqrt{1 + (\omega M_0 \tau_{d-gr})^2}}; \quad (3.57)$$

čia M_0 yra dauginimo faktorius žemų dažnių srityje, τ_{d-gr} – vidutinė dreifo trukmė griūties srityje. Dreifo trukmė priklauso nuo smūginės jonizacijos koeficiento:

$$\tau_{d-gr} = N_{ic} \left(\beta_{jon} / \alpha_{jon} \right) \frac{w}{v_{ds}}; \quad (3.59)$$

čia N_{ic} yra konstanta priklausanti nuo jonizacijos koeficientų santykio, α_{jon} ir β_{jon} – elektronų ir skylių jonizacijos koeficientai, w - griūties srities storis, v_{ds} – krūvininkų soties greitis.

GFD dažninė charakteristika yra tuo geresnė, kuo didesnis skirtumas tarp jonizacijos koeficientų (skylių ir elektronų). Didelis jonizacijos koeficientų skirtumas yra pasiekiamas griūtiniuose fotodioduose su supergardele^{44,45}. Gaminami griūtiniai fotodiodai skirti ryšio linijoms, kurių duomenų persiuntimo sparta yra iki 10 Gb/s²⁹, laboratorijose pasiekama didesnė GFD veikimo sparta⁴⁶.

3.4.5 GFD triukšmo charakteristikos

GFD veikiant esant mažai įtampai (nevykstant griūtiniam dauginimui), triukšmo charakteristikos yra panašios į *pin* fotodiodų ir yra nulemtos šratinio triukšmo. Vykstant griūtiniam dauginimui, padauginamas šratinis triukšmas, ir dar sukuriamas papildomas triukšmas dėl jonizuojančiųjų susidūrimų atsitiktinių fliktuacijų^{47,48}. Šis papildomas triukšmas įvertinamas triukšmo faktoriumi. Elektronų papildomo triukšmo faktorius (kai į griūties sritį injekuojami elektronai):

$$F_e = M \left(1 - \left(1 - k_{jon} \left(\frac{M-1}{M} \right)^2 \right) \right); \quad (3.60)$$

⁴³ A. Osinsky, M.S. Shur, R. Gaska and Q. Chen, "Avalanche breakdown and breakdown luminescence in *pn-n* GaN diodes", *Electron. Lett.*, 34, pp.: 691-692 (1998).

⁴⁴ S. Mallick, K. Banerjee, S. Ghosh, E. Plis, J. B. Rodriguez, S. Krishna, C. Grein, "Ultralow noise midwave infrared InAs-GaSb strain layer superlattice avalanche photodiode", *Appl. Phys. Lett.*, 91, pp.: 241111-3(2007).

⁴⁵ K. Banerjee, S. Ghosh, S. Mallick, E. Plis, S. Krishna, C. Grein, "Midwave infrared InAs/GaSb strained layer superlattice hole avalanche photodiode", *Appl. Phys. Lett.*, 94, pp.: 201107-3 (2009).

⁴⁶ J.-W. Shi, Y.-S. Wu, Z.-R. Li, and P.-S. Chen, "Impact-Ionization-Induced Bandwidth-Enhancement of a Si-SiGe-Based Avalanche Photodiode Operating at a Wavelength of 830 nm With a Gain-Bandwidth Product of 428 GHz", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 19, pp.: 474-476(2007).

⁴⁷ S. Pralgauskaitė, V. Palenskis, J. Matukas, A. Vizbaras, „Noise characteristic and quality investigation of ultrafast avalanche photodiodes“ *Fluctuations and Noise Lett.*, 7, pp. L379-L389 (2007).

⁴⁸ T. Nakata, J. Ishihara, K. Makita, and K. Kasahara, "Multiplication Noise Characterization of InAlAs-APD with Heterojunction", *IEEE Photon. Technol. Lett.* (2009).

skyllių (į griūties sritį injekuojant skylės):

$$F_h = M \left(1 + \frac{1 - k_{\text{jon}}}{k_{\text{jon}}} \left(\frac{M - 1}{M} \right)^2 \right); \quad (3.61)$$

čia k_{jon} yra elektronų ir skylių jonizacijos koeficientų santykis. Triukšmo faktorius didėja didėjant dauginimo faktoriui, bei priklauso nuo jonizacijos koeficientų santykio (triukšmas yra mažesnis, kai į griūties sritį injekuojami didesni jonizacijos koeficientą turintys krūvininkai).

3.4.6 Griūtinių ir *pin* fotodiodų charakteristikos

GFD ir *pin* fotodiodų charakteristikos pateiktos 3.1 lentelėje. GFD veikai reikalinga didelė įtampa ((30-70) V InGaAs GFD, >300 V Si GFD)⁴⁹. Taip pat GFD charakteristikos yra labai jautrios temperatūrai^{29,50}. Šie GFD trūkumai verčia daryti sudėtingesnes fotodiodo valdymo grandines. GFD daugiausia naudojami skaitmeninėse sistemose, nes gana prastas yra jų charakteristikų tiesiškumas. Dėl visų minėtų priežasčių GFD patikimumas yra mažesnis nei *pin* fotodiodų^{51,52}. Pagrindinis GFD pranašumas yra didelis jų atsakas^{25,29,53}. Kai duomenų srauto tankis nedidelis, *pin* fotodiodų charakteristikos beveik sutampa su GFD. Todėl mažesnio duomenų srauto sistemose montuojami *pin* fotodiodai. Tačiau didelio duomenų srauto sistemose pirmenybė teikiama GFD⁵⁴.

3.5 Šviesos šaltiniai naudojami kaip fotodetektoriai

Šviesos šaltiniai (šviesos ir lazeriniai diodai) gali veikti ir kaip fotodetektoriai. Vieną įtaisą sistemoje galima naudoti dviem funkcijoms atlikti: ŠD ar LD pakaitomis veikia tai kaip šviesos šaltinis, tai kaip detektorius. Tokiu atveju informacija gali sklirti abiem kryptimis nenaudojant papildomos įrangos. Nors visi ŠD ir LD yra jautrūs šviesai, bet ne visi yra tinkami naudoti fotodetektoriais. Šiuo atveju svarbus parametras yra geras ryšys tarp optinės skaidulos ir įtaiso.

3.1 lentelė. Griūtinių ir *pin* fotodiodų charakteristikos.

Parametras	<i>pin</i> fotodiodas	Griūtinis fotodiodas
medžiaga	Si, Ge, InGaAs	Si, Ge, InGaAs
bangos ilgis	(0,4 – 1,8) μm	(0,4 – 1,8) μm
atsakas	(0,4 – 0,9) A/W	(3 - 130) A/W
juostos plotis	nuo 0 iki >40 GHz	nuo 0 iki >40 GHz
valdymo grandinės ypatumai	jokių	aukšta veikimo įtampa, reikalinga temperatūros kontrolė
kaina	(1-500) \$	(100-2000) \$

⁴⁹ D. Yoo, J. Limb, J.-H. Ryou, Y. Zhang, S.-C. Shen, R. D. Dupuis, D. Hanser, E. Preble, and K. Evans, "Al_xGa_{1-x}N Ultraviolet Avalanche Photodiodes Grown on GaN Substrates", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 19, pp.: 1313-1315 (2007).

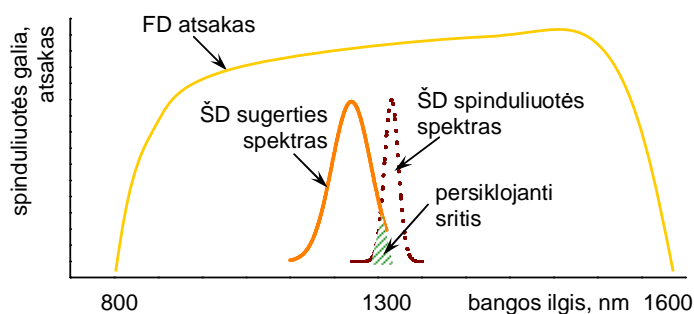
⁵⁰ H.-Y. Cha, S. Soloviev, S. Zelakiewicz, P. Waldrab, and P. M. Sandvik, "Temperature Dependent Characteristics of Nonreach-Through 4H-SiC Separate Absorption and Multiplication APDs for UV Detection", *IEEE Sensors J.*, 8, pp.: 233-237 (2008).

⁵¹ E. Yagyu, E. Ishimura, M. Nakaji, S. Ihara, Y. Mikami, H. Itamoto, T. Aoyagi, K. Yoshiara, and Y. Tokuda, "Design and Characteristics of Guardring-Free Planar AlInAs Avalanche Photodiodes", *J. Lightw. Technol.*, 27, pp.: 1011-1017 (2009).

⁵² C. P. Skrimshire, J. R. Farr, D. F. Sloan, M. J. Robertson, P. A. Putland, J. C. D. Stokoe, R. R. Sutherland, "Reliability of mesa and planar InGaAs PIN photodiodes", *IEE Proc.*, 137, pp.: 74-78 (1990).

⁵³ H. Liu, D. McIntosh, X. Bai, H. Pan, M. Liu, J. C. Campbell, and H. Y. Cha, "4H-SiC PIN Recessed-Window Avalanche Photodiode With High Quantum Efficiency" *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 20, pp.: 1551-1553 (2008).

⁵⁴ J. C. Campbell, "Recent Advances in Telecommunications Avalanche Photodiodes", *J. Lightw. Technol.*, 25, pp.: 109-121 (2007).

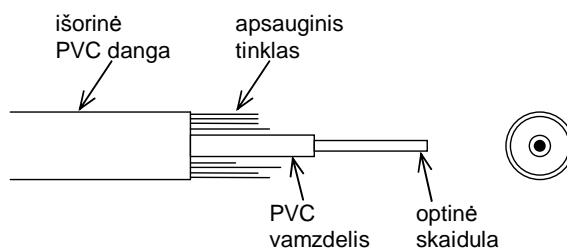


3.20 pav. Šviesos diodo naudojamo kaip šviesos šaltinis ir fotodiodo spektrinės charakteristikos.

Šviesos šaltinį naudojant ir detekcijai, ŠD ar LD turi turėti tinkamas spektrines charakteristikas (3.20 pav.). Vis tik, jei gero fotodiodo atsakas yra bent $0,8 \text{ A/W}$, tai šviesos diodo tik $0,08 \text{ A/W}$ (1310 nm). Mažo atsako priežastis yra palyginti siauras ŠD atsako spektras, kuris neperkloja ŠD spinduliuotės spektro. Kaip pavaizduota 3.20 pav., įprasto InGaAs fotodiodo atsako spektras yra labai platus – nuo 800 nm iki 1600 nm. Taigi FD sugeria visus ŠD emituotus fotonus. ŠD spinduliuotės spektras gana siauras – apie 60 nm. Be to, to paties ŠD sugerties spektras paslinktas į trumpesnių bangų pusę spinduliuotės spektro atžvilgiu. Nors sugerties spektras yra kiek platesnis nei spinduliuotės, tačiau jis neperkloja viso spinduliuotės spektro, ir atsakas yra mažesnis. Problema padidėja, kai spinduliuojantis ŠD ir detektuojantis ŠD yra skirtingos temperatūros (spektras priklauso nuo temperatūros). Šviesos šaltinio ir detektoriaus funkcijoms naudojant lazerinį diodą iškyla analogiškos spektro nesutapimo problemos.

4. Optinis kabelis

Optinių kabelių spinduliuotė sklinda nuo vieno sistemos įrenginio iki kito. Optinio kabelio sandara gali būti įvairi, ji priklauso nuo panaudojimo srities. 4.1 pav. pateikta būdinga optinio kabelio sandara. Optinė skaidula turi apsauginį sluoksnį, yra įvilкта į PVC vamzdelį, aplink kurį yra apsauginis tinklas sugeriantis įvairius mechaninius įtempimus. Visas šis kabelis įvilκtas į išorinį PVC apvalkalą.



4.1 pav. Būdinga optinio kabelio sandara.

Skirtingų tipų optinės skaidulos turi skirtingas charakteristikas ir yra naudojamos skirtingose sistemose. Daugeliu atveju naudojamos stiklo skaidulos. Storos šerdies ir plastikinės skaidulos naudojamos retai (plastikinės skaidulos dėl jų pigumo kartais naudojamos sistemose su šviesos diodais persiuntimui labai mažais atstumais).

Dvi pagrindinės optinių skaidulų rūšys yra daugiamodės ir vienmodės skaidulos. Daugiamodės skaidulos gali būti naudojamos artimam optiniam ryšiui (pvz., vietiniam tinklui, vaizdo sekimo sistemose)¹. Vienmodės skaidulos sukurtos informacijos persiuntimui dideliais atstumais (didelio nuotolio telefonija, daugiakanalė televizija)².

Nuostoliai optiniame kabelyje yra (4-6) dB/km spinduliuotei, kurios bangos ilgis 850 nm, (3-4) dB - 1300 nm, 1500 nm bangos ilgio spinduliuotei nuostoliai yra dar mažesni. Ypač geros skaidulose nuostoliai neviršija 3 dB – 850 nm, 1 dB – 1300 nm, 0,5 dB – 1550 nm^{3,4}. Šviesos nuostoliai optinėje skaiduloje yra nulemti atsitiktinės sklaidos bei priemaišinės sugerties. Dar vienas nuostolių optiniame kabelyje šaltinis yra per didelis skaidulos sulenkimas, dėl ko dalis spinduliuotės išeina iš skaidulos šerdies. Visi šie nuostoliai nepriklauso nuo juostos pločio, t. y. 3 dB tiesiog reiškia, kad bus prarasta 50 % šviesos nepriklausomai, koku dažniu ji bus moduluota. Tačiau yra ir nuostolių susijusių su moduliacijos sparta.

Šiame skyriuje aptartos optinių skaidulų rūšys, jų sandaros ypatybės, fizikiniai vyksmai, vykstantys skaidula sklindant šviesai ir svarbūs optinėse ryšio sistemose.

¹ Y. L. Guennec, A. Pizzinat, S. Meyer, B. Charbonnier, P. Lombard, M. Lourdiane, B.e Cabon, C. Algani, A.-L. Billabert, M. Terré, C. Rumelhard, J.-L. Polleux, H. Jacquinot, S. Bories, and C. Sillans, “Low-Cost Transparent Radio-Over-Fiber System for, In-Building Distribution of UWB Signals”, *J. Lightw. Technol.*, 27, pp.: 2649-2657 (2009).

² G.-S. Hwang, U.-S. Pyun, Y. Chung, B.-W. Kim and J.-S. Lee, “WDM channels over 2000 km of standard singlemode fibre”, *Electron. Lett.*, 43, pp.: 889 - 890 (2007).

³ K. Kurokawa, K. Nakajima, K. Tsujikawa, T. Yamamoto, and K. Tajima, “Ultra-Wideband Transmission Over Low Loss PCF”, *J. Lightw. Technol.*, 27, pp.: 1653-1662 (2009).

⁴ T. Lewi, A. Tsun, A. Katzir, J. Kaster, F. Fuchs, “Silver halide single mode fibers for broadband middle infrared stellar interferometry”, *Appl. Phys. Lett.*, 94, pp.: 261105-3 (2009).

4.1 Daugiamodės optinės skaidulos

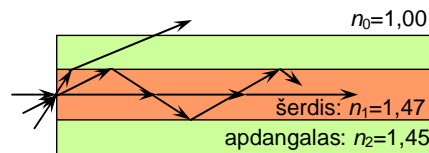
Pirmiausia sukurtos ir gaminamos buvo daugiamodės optinės skaidulos. Daugiamodė skaidula yra bangolaidis, kuriuo sklinda daug modų. Šių skaidulų šerdis yra daug storesnė nei vienmodžiū, jas lengviau prijungti prie siūstuvo ar imtuvo. Daugiamodės skaidulos gali būti suskirstytos į pakopinio lūžio rodiklio skaidulas ir gradientinio lūžio rodiklio.

Pakopinio lūžio rodiklio optinėse skaidulose lūžio rodiklis kinta šuoliškai pereinant iš šerdies į dengiamąjį sluoksnį (4.2 pav.). Kadangi šerdies lūžio rodiklis yra didesnis nei dengiamojo sluoksnio, tai šviesa kritusi kampu ne didesniu nei priėmimo kampas sklinda skaidula. Kaip matyti 4.2 pav., bent trys skirtingos bangos gali sklirti skaidula: viena banga sklinda tiesiai šerdies centru, antrasis spindulys sklinda dideliu kampu ir atsispindi nuo šerdies sienelių, trečiasis spindulys krinta kampu didesniu už kritinį priėmimo kampą ir patenka į dengiamąjį sluoksnį. Antrasis spindulys nueina didesnę kelią nei pirmasis ir skaidulos galą šios dvi modos pasiekia skirtingu laiku. Šis laikų skirtumas lemia dispersiją.

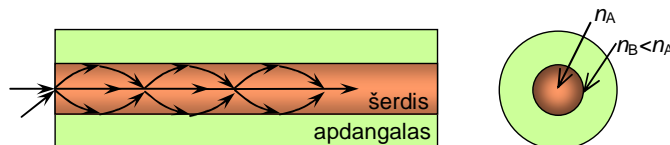
Gradientinio lūžio rodiklio optinių skaidulų lūžio rodiklis tolygiai kinta nuo centro link išorės: šerdies centre lūžio rodiklis yra didžiausias, einant iš centro į pakraštį parboliškai mažėja (4.3 pav.). Didesnis lūžio rodiklis centrinėje šerdies dalyje sulėtina tiesiai šerdies centru sklindantį spindulį. Šiuo atveju nuo šerdies ir dengiamojo sluoksnio ribos atsispindintys spindulys sklinda ne tiesiomis, o lenktomis linijomis (4.3 pav.). Tai sumažina sklidimo trukmių skirtumą. Taigi įvairiu keliu sklindantys spinduliai skaidulos galą pasiekia maždaug vienu metu. Tokiu būdu sumažinama dispersija.

4.2 Vienmodės optinės skaidulos

Vienmodėmis optinėmis skaidulomis neiškraipytas signalas nusklinda didesnę atstumą (mažesnis slopinimas), ir galima persiųsti didesnę informacijos kiekį nei daugiamodėmis. Kadangi vienmode skaidula sklinda tik viena optinė moda, tai šiose skaidulose nėra dispersijos dėl skirtingų modų. Pirmosios vienmodės skaidulos, kaip ir daugiamodės, buvo pakopinio lūžio rodiklio, t. y. šerdies lūžio rodiklis šuoliškai padidėja šerdies ir dengiamojo sluoksnio riboje. Šiuolaikinių skaidulų sandara yra kur kas sudėtingesnė - naudojami suderinto dengiamojo sluoksnio ir kiti dariniai^{5,6,7}.



4.2 pav. Visiškas vidaus atspindys daugiamodėje pakopinio lūžio rodiklio skaiduloje (n_i – lūžio rodiklis).

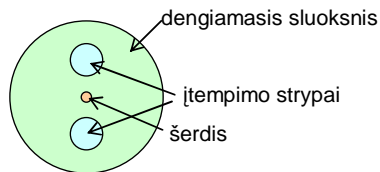


4.3 pav. Daugiamodė gradientinio lūžio rodiklio skaidula (n_α – lūžio rodiklis).

⁵ L. Dong, T.-W. Wu, H. A. McKay, L. Fu, J. Li, and H. G. Winful, “All-Glass Large-Core Leakage Channel Fibers”, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 15, 47-53 (2009).

⁶ A. Schülzgen, L. Li, X. Zhu, V. L. Temyanko, and N. Peyghambarian, “Microstructured Active Phosphate Glass Fibers for Fiber Lasers”, *J. Light. Technol.*, 27, pp.: 1734-1740 (2009).

⁷ A. Amezcua-Correa, A.C. Peacock, J. Yang, P.J.A. Sazio and S.M. Howdle, “Loss measurements of microstructured optical fibres with metal-nanoparticle inclusions”, *Electron. Lett.*, 44, pp.: 795 – 796 (2008).



4.4 pav. Poliarizaciją išlaikančios optinės skaidulos skerspjūvis.

Vienmodžių optinių skaidulų trūkumas yra labai siaura šerdis, į kurią sunku surinkti spinduliuotę. Todėl vienmodžių skaidulų jungtys ir sujungimai turi būti labai tikslūs.

Šiuolaikinėse ryšių sistemose daugiausia naudojamos trijų rūšių vienmodės skaidulos. Seniausios ir labiausiai paplitusios yra nepaslinktos dispersijos skaidulos (NPDS). Šios skaidulos buvo skirtos persiųsti 1310 nm bangos ilgio spinduliuotei. 1550 nm bangos ilgio spinduliuotei NPDS netinka dėl labai didelės dispersijos jose. Taigi buvo sukurtos paslinktos dispersijos skaidulos (PDS), kuriose nulinės dispersijos taškas paslinktas ties 1550 nm bangos ilgiu. Tačiau pasirodė, kad PDS puikiai veikiant tiksliai ties 1550 nm, persiunčiant keleto artimų bangų ilgių spinduliuotę tankiojo banginio tankinimo sistemose atsiranda rimtų problemų dėl netiesiškumo. Netiesiškumo problemai išspręsti suskurta nauja skaidulų klasė – ne nulinės paslinktos dispersijos skaidulos (NN-PDS). Paslinktos nenulinės dispersijos skaidulos gali turėti ir teigiamą, ir neigiamą dispersiją⁸.

Dar viena vienmodžių optinių skaidulų atmaina yra poliarizaciją išlaikančios (PI) skaidulos. Įprastomis skaidulomis gali sklirti atsitiktinės poliarizacijos spinduliuotė. PI skaidulomis sklinda tik vienos poliarizacijos spinduliuotė⁹. Tai svarbu prijungiant išorinius įrenginius, pvz., išorinius modulatorius, kurių įėjime turi būti tam tikros poliarizacijos spinduliuotė.

PI skaiduloje šalia šerdies yra du įtempimo strypai (4.4 pav.), kurie šerdyje sukuria įtempimą taip, kad sąlygos būtų palankios sklirti tik vienos poliarizacijos spinduliuotei.

Optinės skaidulos rūšį galima nustatyti išmatavus jos storį: vienmodžių skaidulų išorinis diametras yra 125 μm , daugiamodžių – 125 μm , 140 μm arba 230 μm . Dengiamojo sluoksnio storis yra svarbus skaidulos parametras parenkant optinių skaidulų jungties dydį.

Norint nustatyti optinės skaidulos šerdies storį reikės 50 kartų didinančio mikroskopo. Šiam tikslui skaidulos galas turi būti nuskeltas idealiai statmenai. 4.5 pav. pavaizduoti dažniausiai naudojamų optinių skaidulų skerspjūvių vaizdai, iš kurių galime spręsti apie skaidulos rūšį. Dažniausiai naudojamos yra vienmodės skaidulos, rečiausiai – daugiamodė, kurios šerdies ir dengiamojo sluoksnio storiai yra, atitinkamai, 110 μm ir 125 μm .

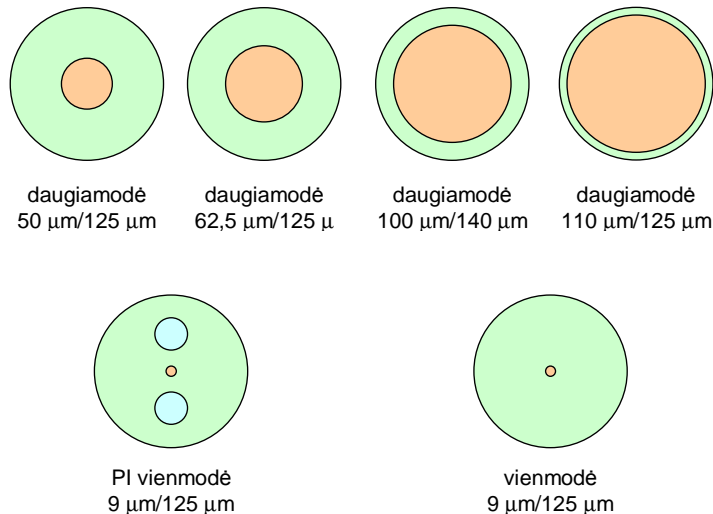
4.3 Dispersija optinėse skaidulose

Optinių ryšio sistemų pradžių pradžioje buvo manyta, kad optinė skaidula turi begalinį juostos plotį, ir informacijos persiuntimas jomis bus užtikrintas ir tolimiausioje ateityje. Tačiau didėjant optinių kabelių ilgiui bei persiunčiamų duomenų srautui nebebuvo galima išvengti nuostolių dėl dispersijos.

Didžiausia dispersija yra pakopinio lūžio rodiklio skaidulose, kiek mažesnė gradientinio lūžio rodiklio skaidulose. Mažiausia dispersija yra vienmodėse skaidulose, nes čia eliminuojami su daugiamodiškumu

⁸ N. T. Dang, A. T. Pham, and Z. Cheng, "Performance Analysis of Spectral Amplitude Encoding OCDM Systems Over a Linear Dispersive Optical Channel", *J. Opt. Commun. Netw.*, 1, pp.: 521-529 (2009).

⁹ N. Kishi and E. Yamashita, "Optical Broadband Phase Devices Using Axially Nonsymmetrical W-Type Optical Fibers", *J. Lightw. Technol.*, 16, pp.: 301-306 (1998).



4.5 pav. Įvairių optinių skaidulų skerspjūviai.

susiję reiškiniai, ir lieka tik chromatinė ir poliarizacinės modos dispersija. Šiame poskyryje aptartos dispersijos optinėse skaidulose priežastys ir metodai, kaip ją sumažinti.

4.3.1 Chromatinė dispersija

Kiekvienas šviesos šaltinis (taip pat ir lazeris) spinduliuoja tam tikrą bangos ilgių rinkinį. Šviesos greitis silicio dioksido (optinėje skaiduloje) priklauso nuo bangos ilgio (4.6 pav.). Tai ir yra chromatinės dispersijos priežastis.

Kadangi kiekvienas šviesos impulsas susideda iš keleto bangos ilgių, šviesai nusklidus tam tikrą atstumą skirtingo bangos ilgio spinduliuotės modos išsiskiria laike: ilgesnio bangos ilgio spinduliuotė sklinda greičiau, trumpesnio - lėčiau. Taigi priimtas impulsas yra platesnis nei išsiųstas (tiksliau, susideda iš keleto įvairiai vėluojančių impulsų)⁸. Be to lazeriui įsijungiant (jei LD veikia jį pilnai išjungiant), jo spinduliuotės spektras šiek tiek paslenkamas.

4.3.2 Poliarizacinės modos dispersija

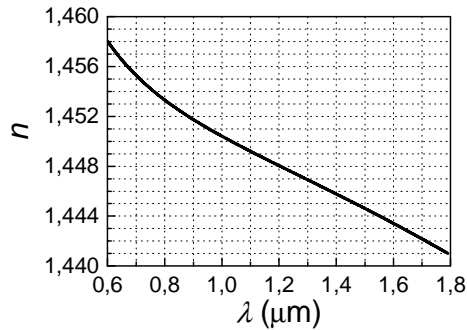
Poliarizacinės modos dispersija (PMD) yra sudėtinis optinis efektas vykstantis vienmodėse optinėse skaidulose. Vienmode skaidula sklinda dvi statmenos viena kitai poliarizacijos modos (4.7 pav.). Jei skaidula būtų idealiai apvali ir tiesi, tai šios dvi poliarizacinės modos sklistų vienodu greičiu, ir PMD būtų lygi nuliui.

Tačiau optinės skaidulos nėra idealios ir skirtingos poliarizacijos bangos sklinda skirtingu greičiu ir skaidulos galą pasiekia skirtingu laiku: optinė skaidula turi greitąją ir lėtąją ašis. Poliarizacinės modos vėlavimas įvertinamas normuojant skaidulos ilgiui: PMD [ps/km^{0.5}].

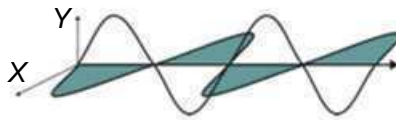
PMD kartu su chromatine dispersija ir spektro poslinkiu sukuria mišrius antros eilės iškreipimus naudojant amplitudinę moduliaciją vaizdo persiuntimo sistemose (skersai TV ekrano matoma banguojanti ar trūki linija)^{10,11}.

¹⁰ C. R. Menyuk and B. S. Marks, "Interaction of Polarization Mode Dispersion and Nonlinearity in Optical Fiber Transmission Systems", *J. Lightw. Technol.*, 24, pp.: 2806-2826 (2006).

¹¹ A. Demir and A. T. Erdogan, "Emulation and Inversion of Polarization Mode Dispersion: A Lumped System and Pade Approximation Perspective", *J. Lightw. Technol.*, 26, pp.: 3071-3089 (2008).



4.6 pav. Lūžio rodiklio kitimas silicio dioksido.



4.7 pav. Poliarizacinės modos dispersija.

Kaip ir chromatinė dispersija, PMD lemia skaitmeninių impulsų išplitimą. Didelės spartos sistemose tai gali padidinti klaidų skaičių.

4.3.3 Dispersijos skaičiavimas

Apskaičiuoti poliarizacinės modos dispersijos dydį yra gana sudėtinga. Be to PMD efektas yra daug mažesnis už chromatinę dispersiją. Todėl čia pateikiamas tik chromatinės dispersijos skaičiavimas populiariausioje nepaslinktos dispersijos vienmodėje optinėje skaiduloje.

NPDS nulinės dispersijos bangos ilgis yra tarp 1301 nm ir 1321 nm. Nulinės dispersijos bangos ilgio spinduliuotei skaidulos juostos plotis yra labai didelis. Tačiau šioje bangų ilgių srityje silpninimas skaiduloje yra 0,5 dB/km. Toks silpninimas riboja optinio kabelio ilgį iki 60 km. Optinei ryšio sistemai geriau veikti yra ties 1550 nm, kur silpninimas skaiduloje yra 0,2 dB/km, ir informaciją galima persiųsti iki 150 km (kol persiuntimo nuotolį pradeda riboti dispersija).

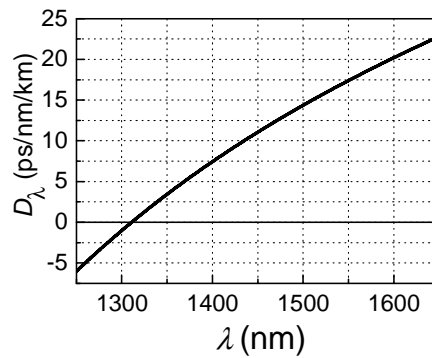
Dispersijai (D_λ [ps/nm/km]) apskaičiuoti naudojama formulė:

$$D_\lambda = \frac{S_0}{4} \left(\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right); \quad (4.1)$$

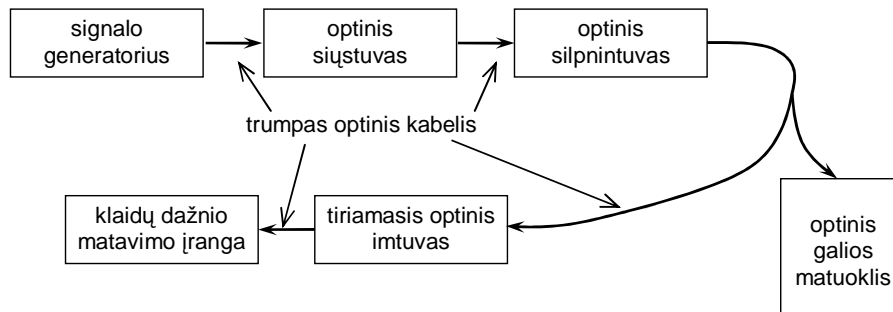
čia S_0 ir λ_0 yra gamintojo pateikiami parametrai (pvz., Corning SMF-28 vienmodei skaidulai: $S_0=0,092$ ps/(nm²*km), $\lambda_0=1311$ nm)¹². 4.8 pav. pateikta dispersija nepaslinktos dispersijos vienmodėje optinėje skaiduloje. Nulinė dispersija yra ties 1311 nm bangos ilgiu. Ties 1550 nm dispersija yra apie 17 ps/nm/km – t. y. kai lazerio spinduliuotės centrinis bangos ilgis yra 1550 nm, o spektro plotis 1 nm, tai dispersija bus 17 ps/km/nm. Žinant skaidulos dispersiją, galima įvertinti jos įtaką signalo persiuntimui.

Norint išmatuoti dispersijos įtaką imtuvo jautriui, reikia atlikti eksperimentą naudojant 4.9 ir 4.10 pav. pateiktas schemas. Imtuvo jautris įvertinamas optiniu silpnintuvu mažinant spinduliuotės galią, kol klaidų dažnis neviršija užduotos vertės (paprastai klaidų dažnis yra 10^{-9} ar 10^{-12}).

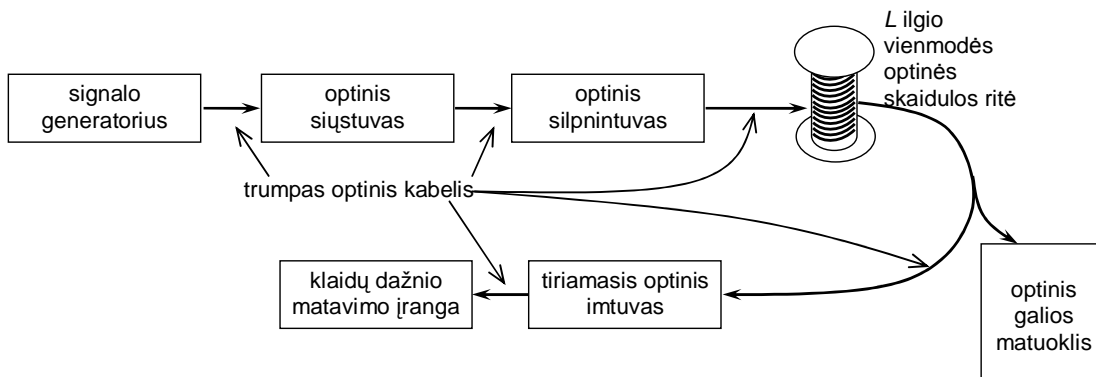
¹² <http://www.corning.com/opticalfiber/> (2009 10 26).



4.8 pav. Dispersija vienmodėje skaiduloje.



4.9 pav. Imtuvo jautrio tyrimas neatsižvelgiant į dispersiją optinėje skaiduloje.



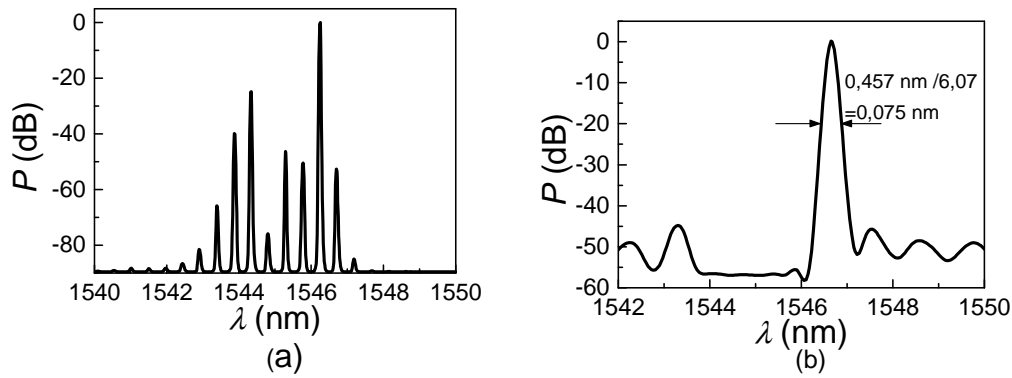
4.10 pav. Imtuvo jautrio tyrimas atsižvelgiant į dispersiją optinėje skaiduloje.

Optinės galios nuostoliai dėl dispersijos aprašomi duomenų persiuntimo spartos (F_R) santykiu su dispersijos nulemtu juostos pločiu ($F_L = f/L$ [Hz]; čia $f = \frac{1n(4)}{\pi}$ [Hz·km] yra skaidulos juostos plotis, $\tau = \omega D_\lambda$ [ps/km], ω yra LD spektro plotis [nm], L – optinės skaidulos ilgis [km]) paraboline funkcija:

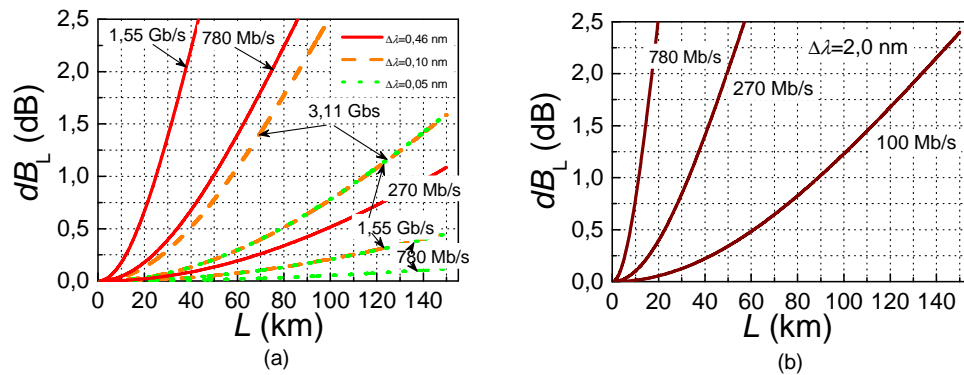
$$\eta_L = c \left(\frac{F_R}{F_L} \right)^2; \tag{4.2}$$

čia c yra konstanta lygi 0,5. Galios nuostoliai optinėje skaiduloje dėl dispersijos (dB_L [dB]):

$$dB_L = 10 \log(1 + \eta_L). \tag{4.3}$$



4.11 pav. Daugiamodžio (a) ir vienmodžio (b) lazerinių diodų spinduliuotės spektrai.



4.12 pav. Galios nuostoliai dėl dispersijos optinėje skaiduloje esant skirtingam duomenų srauto tankiui (dispersija 17 ps/nm/km): (a) šviesos šaltinis vienmodis PGR lazeris, (b) šviesos šaltinis daugiamodis FP lazeris.

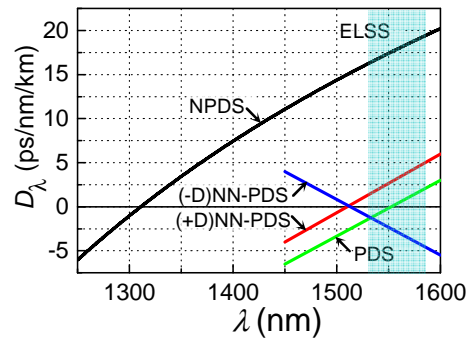
Norint įvertinti optinės galios nuostolius dėl dispersijos, reikia žinoti šviesos šaltinio spinduliuotės spektro plotį. Daugiamodžio lazerinio diodo spektro plotis įvertinamas vidutiniu kvadratinu spektro pločiu, vienmodžio – matuojamas spektro plotis 20 dB lygyje ir padalinamas iš 6,07 (t. y. įvertinamas Gauso pavidalo spektro plotis 20 dB lygyje) (4.11 pav.).

4.12 (a) pav. pavaizduoti galios nuostoliai trims skirtingiems duomenų srauto tankiams (lazerio spektro plotis 0,1 nm, centrinis bangos ilgis 1550 nm, dispersija skaiduloje 17 ps/nm/km). Didžiausi leistini galios nuostoliai skaiduloje dėl dispersijos paprastai yra 2 dB. Pateiktame pavyzdyje, kai duomenų srautas yra 3,11 Gb/s, optinio kabelio ilgis neturi viršyti 85 km. 1550 nm bangos ilgio spinduliuotės slopinimas 85 km ilgio skaiduloje bus 20 dB. Tai yra kur kas mažiau, nei palikta 30 dB atsarga. Taigi šiuo atveju persiuntimo nuotolį riboja dispersija skaiduloje.

Naudojant siauresnio spektro šviesos šaltinį (LD, kurio spektro plotis yra 0,05 nm) dispersija sumažėja daugiau kaip du kartus (4.12 (a) pav.): kai duomenų srauto tankis yra 3,11 Gb/s, galios nuostoliai neviršija 2 dB ir 150 km ilgio skaiduloje. Tačiau tokio ilgio skaiduloje spinduliuotės silpninimas jau viršija leistiną 30 dB ribą. Šiuo atveju ryšio linijos ilgį riboja spinduliuotės silpninimas.

4.12 (b) pav. pateiktas optinės galios nuostolių dydis, kai šviesos šaltinis yra daugiamodis FP lazerinis diodas, kurio spektro plotis yra 2,0 nm. Naudojant daugiamodį lazerį duomenų persiuntimas gali būti realizuotas tik nedideliais atstumais ir esant mažam duomenų srauto tankiui.

Kadangi dispersija labai priklauso nuo lazerinio diodo spinduliuotės spektro pločio (4.12 pav.), tai svarbu parinkti tinkamą šviesos šaltinį. Fabri ir Pero daugiamodžių LD spektro plotis yra (1-4) nm (arba (125-500) GHz, t. y. 1 nm atitinka 125 GHz). Standartinio PGR vienmodžio LD spektro plotis yra apie 0,1 nm



4.13 pav. Dispersija įvairiose vienmodėse optinėse skaidulose: NPDS – nepaslinktos dispersijos optinė skaidula, PDS – paslinktos dispersijos optinė skaidula, (-D)NN-PDS – nenulinės paslinktos dispersijos su neigiamu polinkiu optinė skaidula, (+D)NN-PDS – nenulinės paslinktos dispersijos su teigiamu polinkiu optinė skaidula.

(12 GHz) – tai yra ribinis spektro plotis norint persiųsti gigabitinį duomenų srautą (iki 50 km). Ypatingai siauro spektro PGR lazerių spektro plotis – (0,1-0,05) nm ((1-5) GHz).

Naudojant PGR lazerį veikiančią nuolatinėje veikoje ir išorinį moduliatorių išvengiama spektro poslinkio, ir spektro plotis sumažėja iki (1-2) MHz ((0,000008-0,000016) nm)^{13,14,15}. Išorinis moduliatorius veikia kaip elektroninis užraktas, ir tada nereikia išjungti - įjungti lazerio. Šios sistemos trūkumas yra, kad itin siauro spektro spinduliuotė gali lemti netiesinius efektus optinėje skaiduloje (priverstinė Briliujeno (Brillouin) sklaida).

4.13 pav. pateikta dispersija kitose šiuo metu populiariose optinėse skaidulose, skirtose 1550 nm spinduliuotei. Sritis, pažymėta ELSS, atitinka bangų ilgus, kuriuose veikia erbiu legiruoti skaiduliniai stiprintuvai, naudojami TBT sistemose. Nepaslinktos dispersijos optinėse skaidulose dispersija lygi nuliui spinduliuotei, kurios bangos ilgis yra 1310 nm, paslinktos dispersijos skaidulose – 1550 nm. Tačiau paslinktos dispersijos optinės skaidulos tinka tik vienkanalėms sistemoms, TBT sistemose iškyla problemų dėl teisiškumo. Taip pat naudojamos optinės skaidulos, kuriose dispersija lygi nuliui yra spinduliuotei, kurios bangos ilgis nepatenka į ELSS langą. Dispersijos priklausomybės nuo bangos ilgio polinkis gali būti ir teigiamas, ir neigiamas (4.13 pav.).

Dispersijos įtaką optiniam ryšiui galima sumažinti naudojant kai kuriuos pasyviuosius elementus. Paprastai naudojami elementai, kuriuose šviesos dispersija yra priešingo ženklo, nei optinėje skaiduloje – dispersijos kompensavimo moduliai (DKM)^{16,17}. Tai gali būti tiesiog tam tikro ilgio skaidulos, pasižyminčios priešinga dispersija, ritė. Naudojant tokią specialią skaidulą galima pasiekti, pvz., -1000 ps/nm dispersiją. Tačiau šis dispersijos mažinimo būdas turi ir trūkumų – atsiranda nemaži papildomi nuostoliai (>8 dB).

DKM gali būti sumontuotas kartu su cirkuliatoriumi. Pvz., 4.14 pav., šviesa įeinanti pro pirmą petį išeiti gali tik pro antrą. Išėjusi pro antrą petį šviesa praeina pro DKM, atsispindi ir grįžta pro antrą petį. Tada išeina pro trečią petį. Sistemos su cirkuliatoriumi privalumas yra, kad šviesa du kartus praeina DKM, t. y. reikia perpus

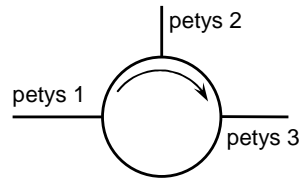
¹³ H. Bulow, "System Outage Probability Due to First- and Second-Order PMD", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 10, pp.: 696-698 (1998).

¹⁴ K.-I. Suto, H. Yoshinaga, T. Kokubun, K. Kikushima, and E. Yoneda, "Intermodulation Distortion in 48 TV Channel FM-FDM Optical Transmission", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 3, pp.: 844-846 (1991).

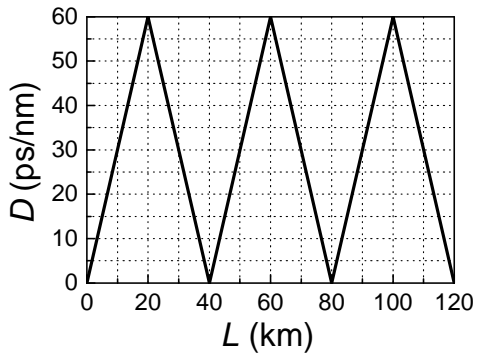
¹⁵ G. H. Smith, D. Novak, and Z. Ahmed "Overcoming Chromatic-Dispersion Effects in Fiber-Wireless Systems Incorporating External Modulators", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 45, pp.: 1410-1415 (1997).

¹⁶ T. Kotanigawa, T. Kawasaki, H. Masuda, T. Matsuda, A. Naka, and S. Matsuoka, "Dispersion Compensation Configuration Applying a Combination of EDC and Tunable-ODC for Extended L-Band WDM Transmission", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 21, pp.: 350-352 (2009).

¹⁷ L. Ranzani, P. Boffi, R. Siano, S. Rondineau, Z. Popovic, and M. Martinelli, "Microwave-Domain Analog Predistortion Based on Chirped Delay Lines for Dispersion Compensation of 10-Gb/s Optical Communication Signals", *J. Lightw. Technol.*, 26, pp.: 2641-2646 (2008).



4.14 pav. Cirkulatoriaus naudojimas dispersijai optinėje skaiduloje kompensuoti.



4.15 pav. Dispersijos kitimas optiniame kabelyje, kai sujungtos teigiamos ir neigiamos dispersijos optinės skaidulos.

trumpesnės optinės skaidulos siekiant to paties dispersijos kompensavimo efekto.

Dispersijos mažinimui gali būti naudojamas cirkulatorius su Brego (Bragg) atšvaitu¹⁸. Atšvaitas prijungiamas prie antrojo peties ir yra skirtas neigiamai dispersijai sudaryti. Tačiau Brego atšvaitas tinka naudoti tik labai siauroje bangos ilgių srityje, t. y. vienam kanalui TBT sistemoje.

Dar vienas sprendimas, kaip panaikinti dispersiją skaiduloje, yra pakaitomis sujungtos teigiamos ir neigiamos dispersijos skaidulos ((-D)NN-PDS ir (+D)NN-PDS). 4.15 pav. pateiktas dispersijos kitimas tokia optiniame kabelyje. Nors dispersijos kompensavimas šiuo būdu nebus idealus kiekvienam kanalui, bet gana geras visai naudojamai dažnių juostai.

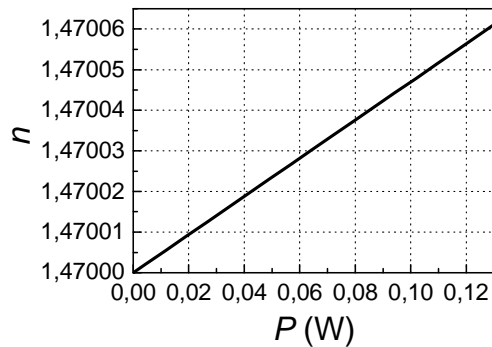
4.4 Netiesiniai efektai optinėje skaiduloje

Netiesinių efektų optinėje skaiduloje svarba išauga didėjant duomenų srautui, persiuntimo nuotoliui, kanalų skaičiui, optinės galios lygiui. Optinio ryšio eros pradžioje pagrindinės išskylančios problemos buvo didelis silpninimas skaiduloje ir, kartais, dispersija. Tačiau didėjant duomenų srautui ir persiuntimo atstumams svarbūs pasidarė netiesiniai efektai: priverstinė Briliujeno (Brillouin) sklaida (PBS), priverstinė Ramano (Raman) sklaida (PRS), keturbangis maišymas (4BM), savosios fazės moduliacija (SFM), kryžminė fazės moduliacija (KFM), abipusė moduliacija. Optinės skaidulos netiesiškumas riboja didžiausią duomenų kiekį, kuris gali būti persiųstas viena skaidula.

Yra dvi pagrindinės netiesinių efektų optinėje skaiduloje priežastys. Žalingiausias netiesinis mechanizmas atsiranda dėl to, kad medžiagos lūžio rodiklis priklauso nuo spinduliuotės kiekio sklindančio medžiaga. Bendra lygtis lūžio rodikliui skaidulos šerdyje apskaičiuoti:

$$n = n_0 + n_2 \frac{P}{A_{ef}}; \quad (4.4)$$

¹⁸ L. A. Östlund, "Figure-of-Merit of Dispersion Compensating Devices Based on Chirped Bragg Gratings", *J. Lightw. Technol.*, 26, pp.: 782-790 (2008).



4.16 pav. Silicio dioksido lūžio rodiklio priklausomybė nuo spinduliuotės galios.

čia n_0 yra lūžio rodiklis, kai nėra spinduliuotės, n_2 – netiesinio lūžio rodiklio koeficientas (silicio dioksidui $2,35 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$), P – optinė galia vatais, A_{ef} – efektinis skaidulos šerdies plotas kvadratiniais metrais.

Netiesiškumas dėl lūžio rodiklio priklausomybės nuo spinduliuotės galios mažėja mažėjant spinduliuotės galiai ir didėjant šerdies plotui. Lūžio rodiklio kitimas kintant optinei galiai yra gana mažas (4.16 pav.) ir svarbus tik, kai skaidulos ilgis yra šimtai kilometrų. Ši lūžio rodiklio priklausomybė sukelia SFM, KFM, 4BM, abipusę moduliaciją.

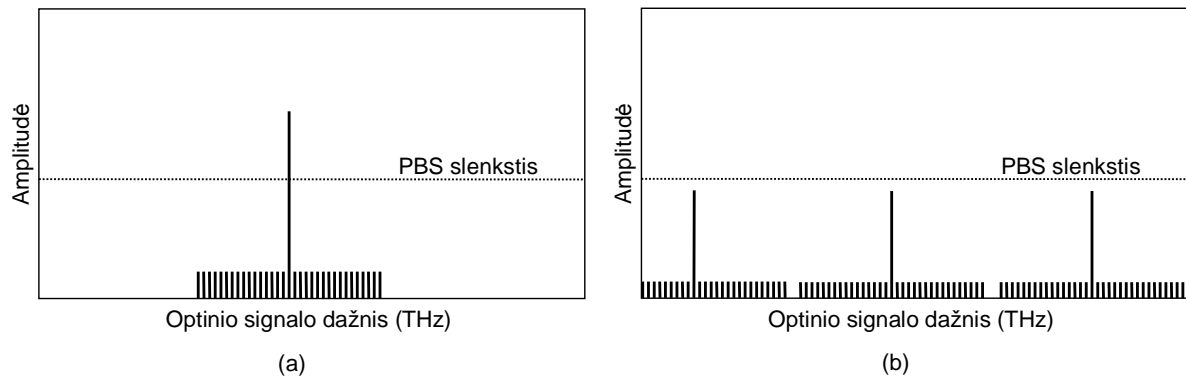
4.4.1 Priverstinė Briliujeno sklaida optinėse skaidulose

Priverstinė Briliujeno (Brillouin) sklaida (PBS) apriboja didžiausią galią, kuria gali būti kaupinama optinė skaidula. Kai spinduliuotės galia pasiekia PBS slenkstį, didžioji spinduliuotės dalis yra atspindima atgal į siūstuvą. Tai nulemia galios išsotinimą imtuve, bei atsiranda problemų dėl atsispindėjusios spinduliuotės sukulto triukšmo siūstuve, kuris padidina klaidų skaičių. Tai gi svarbu kontroliuoti PBS didelės spartos sistemose.

Briliujeno sklaida - tai laike kintančio elektrinio lauko skaidulos viduje sąveika su skaidulos medžiagos akustinių virpesių moda. Optinėje skaiduloje didelio elektrinio lauko šaltinis yra sklindanti spinduliuotė. Periodinis lūžio rodiklio kitimas dėl sklindančios spinduliuotės lemia spinduliuotės atspindį panašiai kaip nuo Brego atšvaito. Spinduliuotės galiai pasiekus PBS slenkstį didėja atgal atsispindėtos spinduliuotės dalis. PBS slenkstis yra didžiausia optine skaidula galima persiųsti galia. PBS slenkstį įtakoja spinduliuotės bangos ilgis ir spektro plotis. 1310 nm ir 1550 nm spinduliuotei PBS slenkstis yra mažesnis: būdingos slenkščio vertės tiesiogiai moduluojant 1550 nm spinduliuotei standartinėje vienmodėje optinėje skaiduloje yra (+8 - +10) dB.

PBS slenkstinė galia priklauso nuo spinduliuotės spektro pločio: siauresnis spektras lemia žemesnį PBS slenkstį. Itin siauro spektro (<10 MHz) lazerinius diodus naudojant su išoriniu moduliatoriumi 1550 nm spinduliuotei PBS slenkstis bus (+4 - +6) dB. Tai gi PBS efektas sumažinamas naudojant šviesos šaltinį, kurio spinduliuotės spektras platesnis.

Naudojant išorinę moduliaciją siūstuvo spektro plotį galima padidinti prie nuolatinio šviesos šaltinio maitinimo pridedant nedidelį kintamą moduluojantį signalą. Taip siūstuvo spektro plotis padidėja, ir PBS slenkstis išauga. Deja tai padidina siūstuvo jautrumą dispersijai (ypač 1550 nm spinduliuotei sklindant nepaslanktos dispersijos vienmode skaidula). Praktiškai įgyvendintos PBS silpninimo schemos paremtos lazerio maitinimo moduliavimu gali padidinti PBS slenkstį penkiais decibelais.



4.17 pav. Optinis signalo spektras be fazės moduliavimo (a) ir su (b).

Kitas būdas padidinti PBS slenkstį yra išorinio moduliatoriaus išėjimo fazės moduliavimas^{19,20}. Paprastai aukšto dažnio signalas (du kart aukštesnio nei didžiausias persiunčiamo signalo dažnis) paduodamas į abu moduliatoriaus išėjimus. Šis signalas moduliuoja spinduliuotės fazę ir efektyviai išplečia spektrą. 4.17 (a) pav. pateiktas spektras su liekamosiomis šalinėmis juostomis persiūsto signalo naudojant amplitudinę moduliaciją be fazės moduliavimo: centrinis nešlys viršija PBS slenkstį. Tokiu atveju sistemos veikia bus nepatenkinama. Pritaikius fazės moduliavimą visos spektro linijos yra žemiau PBS slenkščio (4.17 (b) pav.).

Erbiu legiruotų skaidulinių stiprintuvų naudojimas labai sumažina PBS slenkstį: jei linijoje naudojama N stiprintuvų, tai PBS slenkstis sumažėja N kartų. Tai labai pablogina persiuntimo sistemos charakteristikas.

4.4.2 Priverstinė Ramano sklaida optinėse skaidulose

Priverstinė Ramano (Raman) sklaida (PRS) yra kur kas mažesnė problema optinėse skaidulose nei Briliujeno sklaida. Jos slenkstis yra artimas 1 W – apie tūkstantį kartų didesnis nei PBS. Tačiau realių optinių ryšio sistemų su ELSS galia jau dabar yra 0,5 W ir ateityje ji tik augs. Optinis kanalas su trimis skaiduliniais stiprintuvais jau gali pasiekti PRS slenkstį. PRS gali lemti priverstinę Briliujeno sklaidą, tačiau visų pirma pastebimas trumpiausio bangos ilgio kanalo galios sumažėjimas (ši galia „nukeliauja“ į ilgabangius kanalus (mechanizmas panašus į ELSS veikimą: 980 nm maitinimo galia stiprina 1550 nm signalą)). 4.18 pav. pavaizduotas būdingas 6 kanalų TBT signalas 1550 nm lange. Be priverstinės Ramano sklaidos visų bangos ilgių impulsų amplitudės yra vienodos (4.18 (a) pav.). PRS šį signalą iškraipo: trumpabangių kanalų galia sumažėja, o ilgabangių išauga (4.18 (b) pav.)²¹.

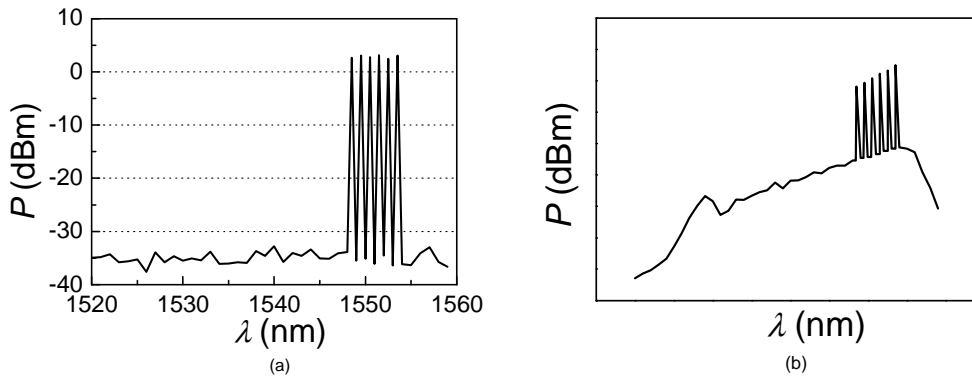
4.4.3 Keturbangis maišymas

Keturbangis maišymas (4BM) pasireiškia tik tose optinėse ryšio sistemose, kuriose vienu metu persiunčiama daug kanalų (TBT). Keturbangį maišymą nulemia netiesinė lūžio rodiklio priklausomybė. 4BM efektas panašus į kombinuotus trigubos mūšos iškreipius kabelinės televizijos sistemose. Abu šie efektai yra trečios eilės iškreipiai, kurie generuoja trečios eilės harmonikas ir įvairius interferencinius reiškinius vieno kanalo

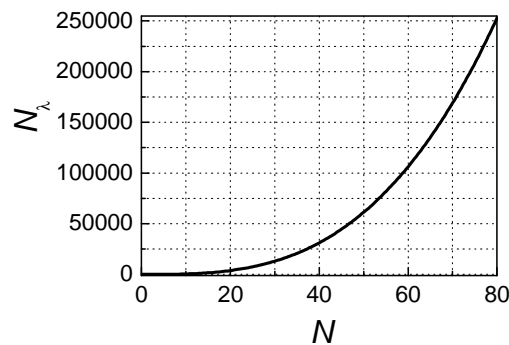
¹⁹ M. R. Lorenzen, D. Noordegraaf, C. V. Nielsen, O. Odgaard, L. Gruner-Nielsen and K. Rottwitt, “Suppression of Brillouin scattering in fibre-optical parametric amplifier by applying temperature control and phase modulation”, *Electron. Lett.*, 45, pp.: 125 - 126 (2009).

²⁰ P. Mitchell, A. Janssen, J. K. Luo, “High performance laser linewidth broadening for stimulated Brillouin suppression with zero parasitic amplitude modulation”, *J. Appl. Phys.*, 105, pp.: 093104-6 (2009).

²¹ P. M. Krummrich and M. Birk, “Experimental Investigation of Compensation of Raman-Induced Power Transients From WDM Channel Interactions”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 17, pp.: 1094-1096 (2005).



4.18 pav. Šešių kanalų TBT sistema perduoto signalo optinis spektras (a) ir priverstinės Ramano sklaidos įtaka tokiam signalui (b).



4.19 pav. Interferencinių kanalų skaičiaus priklausomybė nuo pradinių kanalų skaičiaus.

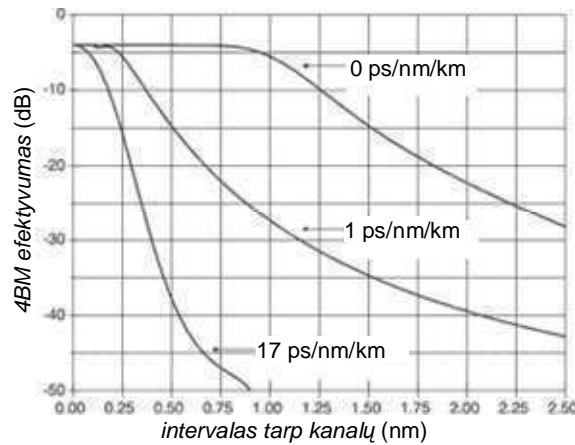
sistemose²². Pvz., turint trijų bangų sistemą (λ_1 , λ_2 ir λ_3) galime gauti devynis interferencinius bangų ilgius, kurie yra kombinacija dviejų ar daugiau pradinių bangos ilgių ir yra toje pačioje bangos ilgių srityje. Tegu $\lambda_1=1551,72$ nm, $\lambda_2=1552,52$ nm, $\lambda_3=1553,32$ nm. Tada aktualūs interferenciniai bangų ilgiai bus:

$$\begin{array}{lll}
 \lambda_1+\lambda_2-\lambda_3=1550,92 \text{ nm}; & 2 \cdot \lambda_1-\lambda_3=1550,12 \text{ nm}; & \underline{2 \cdot \lambda_2-\lambda_1=1553,32 \text{ nm}}; \\
 \underline{\lambda_1-\lambda_2+\lambda_3=1552,52 \text{ nm}}; & 2 \cdot \lambda_1-\lambda_2=1550,92 \text{ nm}; & 2 \cdot \lambda_3-\lambda_2=1554,12 \text{ nm}; \\
 \lambda_2+\lambda_3-\lambda_1=1554,12 \text{ nm}; & 2 \cdot \lambda_3-\lambda_1=1554,92 \text{ nm}; & \underline{2 \cdot \lambda_2-\lambda_3=1551,72 \text{ nm}}.
 \end{array}$$

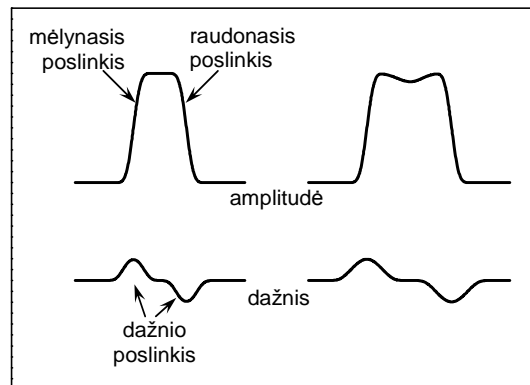
Trys iš šių interferencinių bangos ilgių sutampa su pradiniais bangų ilgiais. Kiti šeši yra greta, ir jų spinduliuotė gali būti nufiltruota optiniu filtru. Tačiau nėra būdų pašalinti minėtiesiems trims. Interferencinių kanalų skaičius didėja kaip $\frac{1}{2}(N^3 - N^2)$, čia N yra kanalų skaičius (4.19 pav.).

Kadangi pašalinti sutampančius interferencinius kanalus būdų nėra, reikia išvengti jų susidarymo. 4BM efektas įvertinamas maišymosi efektyvumu, kuris didėja mažėjant intervalui tarp kanalų. Taip pat maišymosi efektyvumas atvirkščiai proporcingas dispersijai ir yra stipriausias nulinės dispersijos taške. Optinio ryšio sistemoje su nepaslinktos dispersijos optine skaidula, dispersija kurioje yra 17 ps/nm/km, ir mažiausiu TTS rekomenduojamu TBT intervalu tarp kanalų 0,8 nm, maišymosi efektyvumas yra -48 dB (4.20 pav.). Tokio efektyvumo keturbangis maišymasis turės tik nedidelę įtaką informacijos persiuntimui. Tačiau naudojant

²² S. Liu, "Four-wave mixing and modulation instability of continuous optical waves in single-mode optical fibers", *Appl. Phys. Lett.*, 89, pp.: 171118-3 (2006).



4.20 pav. Keturbangio maišymosi efektyvumas vienmodėse optinėse skaidulose, esant skirtingai dispersijai skaiduloje.



4.21 pav. Savosios fazės moduliacijos įtaka impulsui.

paslinktos dispersijos skaidulas, kuriose dispersija yra 1 ps/nm/km, ir 0,4 nm intervalą tarp kanalų, maišymosi efektyvumas bus -12 dB – šiuo atveju keturbangio maišymosi poveikis bus žymus. Be to, maišymosi efektyvumas kinta ir keičiant spinduliuotės optinę galią, skaidulos ilgį, spinduliuotės bangos ilgį.

4.4.4 Fazės moduliacija

Savosios fazės moduliacija (SFM) taip pat yra nulemta lūžio rodiklio priklausomybės nuo spinduliuotės galios. Optiniam impulsui sklindant skaidula, priekinis jo frontas padidina lūžio rodiklį (mėlynasis poslinkis), o užpakalinis frontas sumažina (raudonasis poslinkis; 4.21 pav.). Šie poslinkiai lemia spektro poslinkį ir išplečia impulsą²³. Savosios fazės moduliacija sąveikauja su chromatine dispersija. Tik, jei, dispersijai didėjant, 4BM efektas mažėja, tai SFM didėja.

Kryžminės fazės moduliacijos (KFM) efektas panašus į SFM tik šiuo atveju dalyvauja du optiniai impulsai^{24,25}. Jei dviem impulsams sklindant optine skaidula jie persikloja, tai atsiranda iškraipymai dėl KFM.

²³ L. Fu, A. Fuerbach, I. C. M. Littler, B. J. Eggleton, "Efficient optical pulse compression using chalcogenide single-mode fibers", *Appl. Phys. Lett.*, 88, pp.: 081116-3 (2006).

²⁴ M. Shtaif, M. Eiselt, and L. D. Garrett, "Cross-Phase Modulation Distortion Measurements in Multispan WDM Systems", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 12, pp.: 88-90 (2000).

4.4.5 Abipusė moduliacija

Abipusės moduliacijos efektas yra panašus į SFM ir KFM. Šiuo atveju optinė skaidula kaupinama dviem šviesos šaltiniais (dviem lazeriniais diodais). Kintant šių dviejų skirtingo dažnio (f_1 ir f_2) signalų galiai atitinkamai keičiasi ir lūžio rodiklis. Lūžio rodikliui kintant dėl dviejų signalų atsiranda naujų dažnių - pirmųjų kombinacijų: $2f_1-f_2$ ir $2f_2-f_1$, signalai.

4.5 Optinių skaidulų jungtys

Optines skaidulas galima sujungti mechaniniu (optine jungtimi) arba lydymo būdu. Abu šie metodai duoda labai mažus nuostolius: nuo 0,5 dB iki 0,1 dB²⁶. Atliekant mechaninį sujungimą abu galai nukertami, nuvalomi, tiksliai sudedami ir mechaniškai sutvirtinami. Optine jungtimi sujungtas skaidulas galima vėl atskirti ir sujungti, ko negalima padaryti su sulydytomis skaidulomis. Sujungiant skaidulas lydymo būdu jos yra išlydomos ir gaunama vientisa skaidula. Skaidulų lydymui reikalinga brangi įranga, bet sujungimas atliekamas itin greitai. Sulydyta vieta yra trapi, taigi jai reikalinga papildoma apsauga.

Skirtingos optinių skaidulų jungtys turi skirtingas charakteristikas, savus plusus ir minusus (4.1 lentelė). Ir parenkamos jos priklausomai nuo konkretaus panaudojimo. Tačiau visos jungtys turi keturis pagrindinius elementus:

- įmovą – optinė skaidula yra įmontuojama į siaurą ilgą cilindrą, kuriuo skaidula yra išlyginama; įmovos diametras vos viršija skaidulos diametrą; įmovos paprastai gaminamos iš metalo ar keramikos, bet gali būti ir iš plastiko;
- jungties korpusas – jungties korpusas laiko įmovą; yra pagamintas iš metalo ir plastiko; jo paskirtis yra laikyti skaidulą reikiamoje vietoje; į ryšio prietaisą iš jungties korpuso išlenda įmova;
- kabelis – kabelis prijungiamas prie korpuso ir tarnauja kaip skaidulos įėjimo taškas; paprastai naudojama įtempimo pašalinimo apsauga, suteikianti jungčiai stiprumo;
- ryšio prietaisas – sujungimo įtaisai; pvz., išlyginimo mova, naudojama sujungti sujungimus.

Kaip minėta, skirtingos jungtys naudojamos skirtingais atvejais, pvz., ST jungtis yra puiki nesudėtingomis aplinkos sąlygomis; FC turi slankią įmovą, kuri užtikrina gerą mechaninę apsaugą; SC jungtis yra mažų matmenų bei suteikia galimybę lengvai atjungti ir sujungti skaidulas iš naujo.

Idealus optinių skaidulų sujungimas yra toks, kai dvi skaidulos optiškai ir fiziškai tiksliai sujungiamos jungtimi ar sulydomos tiksliai sutaikant išilginę šerdies ašį. Tačiau, atliekant realius sujungimus, spinduliuotės nuostoliai dėl sujungimo yra neišvengiami. Įneštiniai nuostoliai yra svarbiausias jungties parametras. Įneštiniai nuostoliai atsiranda dėl keleto priežasčių: su skaidula susiję nuostoliai, su jungtimi susiję nuostoliai, sistemos savybės didinančios nuostolius^{27,28}. Tiksliausi nuostolių įvertinimo rezultatai gaunami, kai optinis kabelis sujungiamas su šviesos šaltiniu ir detektoriumi, kurie yra nuolatinė tyrimo įrangos dalis. Taip išvengiama rezultatų kitimo dėl skirtingų šaltinio ar detektoriaus.

Nuostoliai dėl šerdies ar dengiamojo sluoksnio diametro nesutapimo įvertinami pagal šią formulę:

$$Nuostoliai_d = 10 \log_{10} \left(\frac{r_r}{r_t} \right)^2 ; \quad (4.6)$$


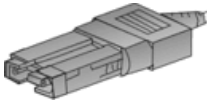
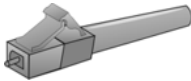
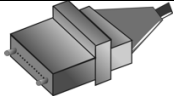
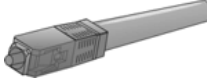
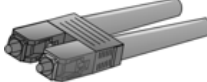

²⁵ B. C. Collings and L. Boivin, "Nonlinear Polarization Evolution Induced by Cross-Phase Modulation and Its Impact on Transmission Systems", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 12, pp.: 1582-1584 (2000).

²⁶ <http://www.hirose-connectors.com/connectors-productcategory/opticalconnectorsanddevices.htm> (2009 10 28).

²⁷ Y. Ando and H. Hanafusa, "Low-Loss Optical Connector Between Dissimilar Single-Mode Fibers Using Local Core Expansion Technique by Thermal Diffusion", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 4, pp.: 1028-1031 (1992).

²⁸ Y. Ando, "Statistical Analysis of Insertion-Loss Improvement for Optical Connectors Using the Orientation Method for Fiber-Core Offset", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 3, pp.: 939-941 (1991).

4.1 lentelė. Optinių jungčių rūšys.

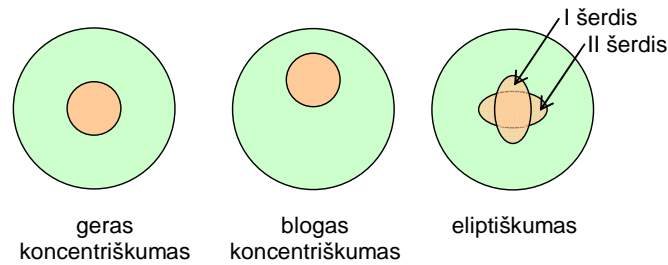
Aprašymas	Vaizdas	Įneštinai nuostoliai	Optinių skaidulų tipai	Taikymas
FC - srieginė optinė jungtis, pasižyminti itin mažu atspindžiu		(0,50-1,00) dB	vienmodės daugiamodės	duomenų persiuntimo ir ryšio sistemos
FDDI – jungtis naudojama paskirstytojo skaidulinio duomenų sietuvo tinkluose		(0,20-0,70) dB	vienmodės daugiamodės	skaidulinės optikos tinklai
LC		0,15 dB (vienmodėms skaiduloms) 0,10 dB (daugiamodėms skaiduloms)	vienmodės daugiamodės	vidiniai sujungimai didelio tankio sistemose
MT matrica		0,30-1,00 dB	vienmodės daugiamodės	vidiniai sujungimai didelio tankio sistemose
SC – abonentinio kanalo jungtis pasižyminti mažais nuostoliais, mažu atspindžiu, pigi		(0,20-0,45) dB	vienmodės daugiamodės	duomenų persiuntimo tinklai
SC Duplex		(0,20-0,45) dB	vienmodės daugiamodės	duomenų persiuntimo tinklai
ST – viena populiariausių tiesaus galo jungtis		0,40 dB (vienmodėms skaiduloms) 0,50 dB (daugiamodėms skaiduloms)	vienmodės daugiamodės	tinklai pastatų viduje, apsaugos sistemos, ryšio sistemos laivuose

čia r_r ir r_t yra iš imtuvo išeinančios skaidulos diametras ir iš siųstuvo išeinančios skaidulos diametras, atitinkamai. Ši formulė nuostoliams apskaičiuoti tinka tik, kai visos galinčios skaidula sklaidos modos yra sužadintos. Kai sužadinamos tik žemiausios eilės modos, nuostoliai yra kur kas mažesni.

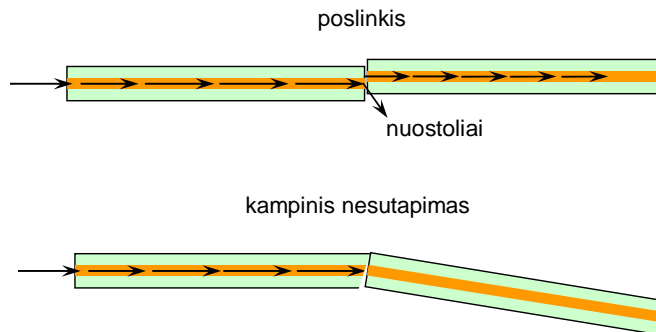
Skaidulos koncentriškumas prarandamas, kai šerdis yra ne tiksliai dengiamojo sluoksnio centre (4.22 pav.). Eliptiškumo problema iškyla, kai skaidulos šerdis ar dengiamasis sluoksnis yra ne apskritas, o ovalus (4.22 pav.). Sujungiant dvi skaidulas su eliptinėmis šerdimis, jų sulyginimas priklausys nuo sujungiamų šerdžių padėties. Skaidulų nekoncentriškumas ir eliptiškumas taip pat įneša papildomus nuostolius jas sujungiant²⁸.

Papildomi nuostoliai sujungiant skaidulas įnešami netiksliai sujungus skaidulų ašis. Nesutapimai gali būti: poslinkio, kampinis ir galų atskyrimas (4.23 pav.). Jungtis turi sulyginti skaidulas pagal jų centrinę ašį. Kai ašys nėra sulyginamos, atsiranda šerdies poslinkis. Jei optinės skaidulos šerdis yra apie 50 μm , tai paklaida turi neviršyti tūkstantųjų centimetro dalių - 10 % nesutapimas lemia 0,5 dB nuostolius. Taip pat sujungiamų skaidulų galai turi būti statmeni centrinių ašių (savo ir prijungiamos skaidulos) atžvilgiu. Kitaip atsiranda kampinis nesutapimas.

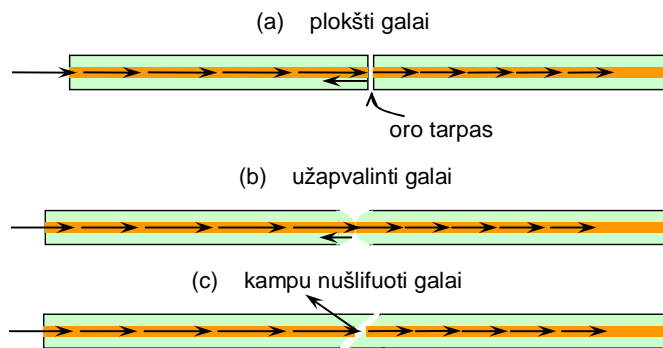
Kai kuriose jungtyse tarp skaidulų galų paliekamas nedidelis tarpas norint išvengti galų trynimosi vienas į kitą (trynimasis sugadintų tinkamą galų paviršių). Tokie atskirti galai lemia nuostolius dėl Frenelio (Fresnel) atspindžio (arba atskirtų galų nuostolius). Frenelio atspindžio nuostolius lemia skirtingas lūžio rodiklis skaiduloje ir oro tarpe atsiradusiame tarp skaidulų galų. Frenelio atspindžiui sumažinti kartais naudojamas



4.22 pav. Skaidulų koncentriškumas ir eliptiškumas.



4.23 pav. Netiksliai mechaniškai sujungtos skaidulos.



4.24 pav. Optinių skaidulų galų paruošimas jungčiams.

lūžio rodiklių suderinimo gelis. Be to, šiame tarpe gali susikaupti dulkės, kurios gadina skaidulų galus.

Vienmodėje jungtyje su plokščiais skaidulų galais Frenelio nuostoliai gali būti iki -11 dB, nes dalis spinduliuotės atsispindi atgal nuo skaidulos galo paviršiaus besiliečiančio su oru (4.24 (a) pav.). Toks atspindys gali sutrikdyti lazerinio diodo veiką. Nuostoliai gali būti sumažinti vienos skaidulos galą užapvalinant (4.24 (b) pav.). Skaidulų galus nušlifavus kampu (4.24 (c) pav.), nuo skaidulos galo atsispindinti spinduliuotė išeina iš šerdies ir yra išsklaidoma dengiamajame sluoksnyje. Taip atsispindėjusi spinduliuotė neįtakoja LD veikos.

Su sistema susijusius nuostolius nulemia modų pasiskirstymas skaiduloje. Ilgo optinio kabelio atveju skaiduloje nusistovi pusiausvyris modų pasiskirstymas (PMP). PMP gali būti pasiektas optinėmis priemonėmis, filtruojant arba esant dideliame skaidulos ilgiui. Jungties nuostoliai ilgo kabelio sąlygomis yra (0,4-0,5) dB, trumpo kabelio atveju - (1,3-1,4) dB.

5. Optiniai modulatoriai

Optinėse ryšio sistemose naudojant šviesos ar lazerinį diodą dažnai naudojama tiesioginė moduliacija – diodo maitinimo srovė moduluojama siunčiamu signalu^{1,2}. Šis metodas yra paprastas ir patogus. Tačiau naudojant tiesioginę moduliaciją dėl dispersijos atsiranda dažnio poslinkis (kintant diodo maitinimo srovei, kinta krūvininkų skaičius darinyje - keičiasi lūžio rodiklis), kuris įtakoja blogesnę persiuntimo kokybę. Signalo moduliavimas be dažnio poslinkio leistų persiųsti informaciją didesniu atstumu ir didesne sparta. Išvengti dažnio poslinkio galima spinduliuotę moduluojant išoriniu optiniu moduliatoriumi³. Išoriniai modulatoriai leidžia išvengti dispersijos ir dažnio poslinkio laikant lazerinį diodą pastoviai įjungtą. Todėl tiesioginė moduliacija naudojama tik nedidelio duomenų tankio ir trumpų nuotolių (<100 km) sistemose. Svarbiausi išorinių moduliatorių parametrai:

- pusbangio įtampa – įtampa reikalinga pakeisti signalo fazę dydžiu π ;
- maitinimo taškas – nuolatinė srovė, apie kurią svyruoja įėjimo signalas;
- įneštiniai nuostoliai – spinduliuotės galios nuostoliai dėl papildomo įtaiso - modulatoriaus (paprastai yra apie (3-5) dB);
- mažiausia spinduliuotės galia išėjime (paprastai 5 % didžiausios vertės);
- didžiausia spinduliuotės galia išėjime (paprastai (3-5) dB mažiau nei įėjime);
- vidutinė spinduliuotės galia išėjime (paprastai 3 dB mažiau nei didžiausia, jei moduliatorius veikia 50 % veikimo ciklu).

Optiniai modulatoriai (OM) būna puslaidininkiniai (III-V junginių) ir dielektriniai (pvz., LiNbO_3)^{4,5,6}. Puslaidininkiniai OM yra pn sandūros įtaisai ir gali veikti esant tiesioginei ar atvirkštinei įtampai.

Signalo moduliavimas atliekamas modulatoriaus lūžio rodiklį arba sugerties koeficientą moduluojant siunčiamu signalu. Lūžio rodiklis ir sugerties koeficientas priklauso vienas nuo kito, juos sieja Kramerio ir Krionigo (Kramers-Kronig) sąryšiai. Lūžio rodikliui optiniame moduliatoriuje keisti naudojama keletas fizikinių reiškinių: elektrooptinis efektas (Pokelso (Pockels) ir Kero (Kerr) efektai): puslaidininkio ar dielektriko lūžio rodiklis kinta medžiagą veikiant žemo dažnio ar nuolatinio elektrinio lauku, Franco ir Keldyšo (Franz-Keldysh) efektas: puslaidininkio energinė juosta pakinta veikiant stipriu elektriniu lauku, Štarko (Stark) efektas: atomo energijos lygmenys elektriniame lauke pakinta, kvantinis Štarko efektas (Štarko efektas kvantiniuose dariniuose), laisvųjų krūvininkų efektas: sugerties koeficientas ir draudžiamosios energijos tarpas kinta kintant laisvųjų krūvininkų tankiui darinyje.

¹ A. López, I. Garcés, M. A. Losada, J. J. Martínez, A. Villafranca, and J. A. Lázaro, “Narrow-FSK Optical Packet Labeling Scheme for Optical Ethernet Networks” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 18, pp.:1696-1698 (2006).

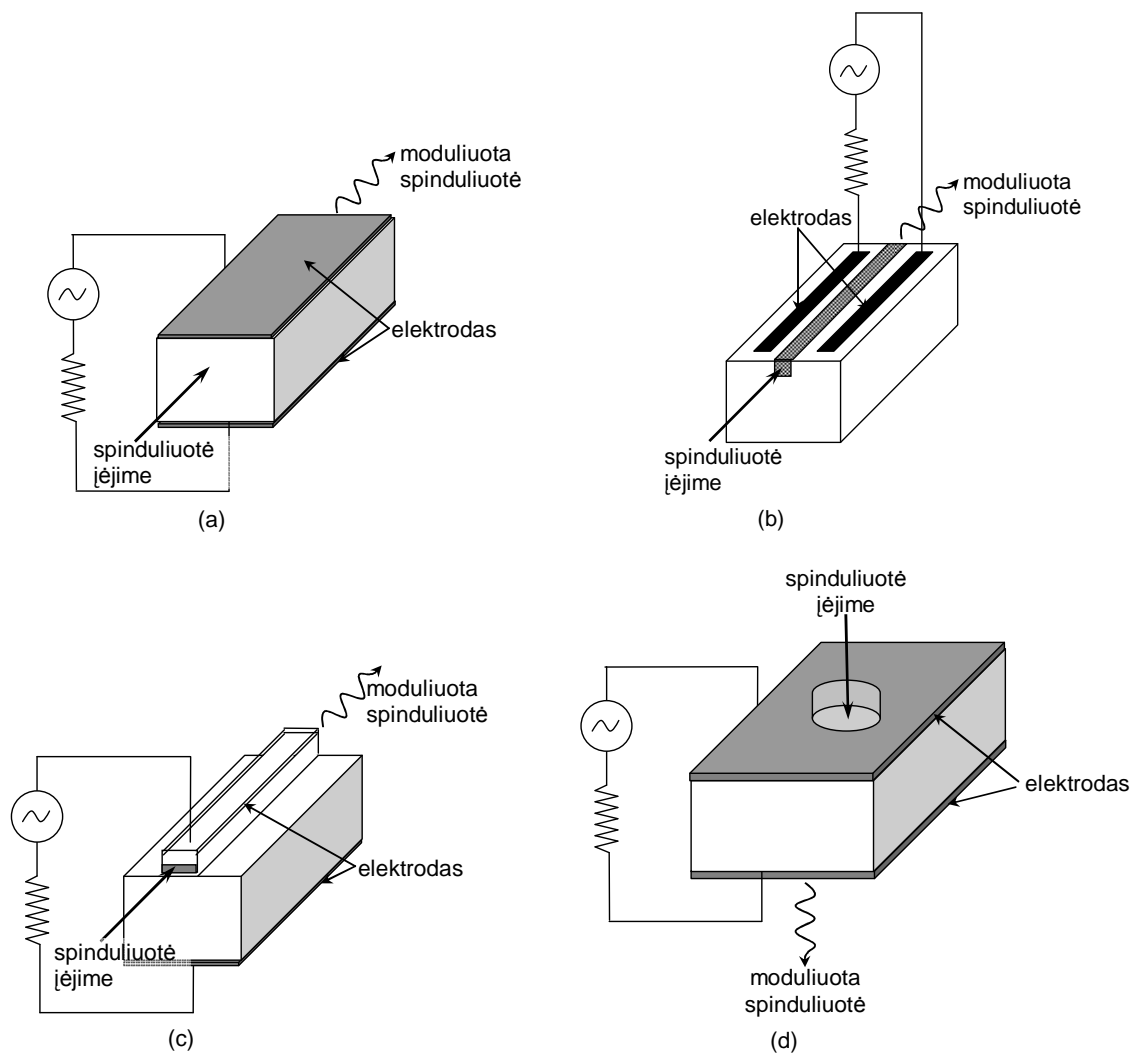
² S. H. Oh, J.-U. Shin, Y.-J. Park, S.-H. Park, K. S. Kim, S.-B. Kim, H.-K. Sung, Y.-S. Baek, and K.-R. Oh, “Wavelength-Tuning of Hybrid Integrated Multiwavelength Lasers Using a Heater”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 20, pp.: 422-424 (2008).

³ L. Billia, J. Zhu, T. Ranganath, D. P. Bour, S. W. Corzine, and G. E. Höfler, “40-Gb/s EA Modulators With Wide Temperature Operation and Negative Chirp”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 17, pp.: 49-51 (2005).

⁴ X. T. Wang, F. C. Jain, “Influence of intrinsic strain on the surface acoustic wave-induced birefringence in InGaAs–GaAs and InGaAsP–InP multiple-quantum-well optical modulators”, *Appl. Phys. Lett.*, 82, pp.: 1535 – 1537 (2003).

⁵ Y.-H. Kuo, Y. K. Lee, Y. Ge, S. Ren, J. E. Roth, T. I. Kamins, D. A. B. Miller, and J. S. Harris, Jr., “Quantum-Confined Stark Effect in Ge/SiGe Quantum Wells on Si for Optical Modulators”, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 12, pp.: 1503 -1513 (2006).

⁶ M. Doi, M. Sugiyama, K. Tanaka, and M. Kawai, “Advanced LiNbO_3 Optical Modulators for Broadband Optical Communications”, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 12, pp.: 745-750 (2006).



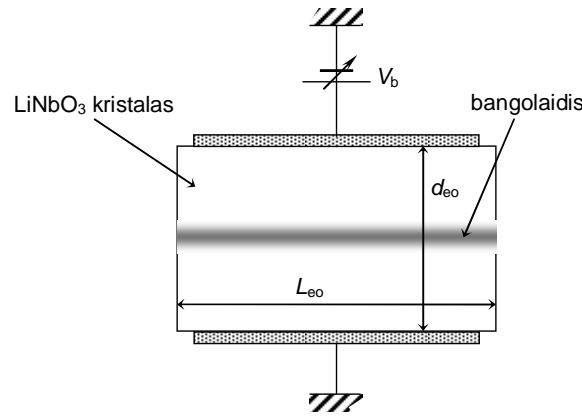
5.1 pav. Būdingi optinių moduliatorių dariniai: (a) tūrinis darinys, (b) bangolaidinis darinys, (c) bangolaidinis darinys (mezadarinys), (d) vertikalaus kritimo darinys.

Kaip minėta, OM paprastai yra pn (rečiau Šotkio) sandūros, nes sandūroje galima sudaryti stiprų elektrinį lauką. Optiniai moduliatoriai skirstomi į fazės moduliatorius ir amplitudės (sugerties) moduliatorius. 5.1 pav. pateikti keli būdingi OM dariniai. Bangolaidiniai moduliatoriai yra efektyvesni nei tūriniai – jų moduliacijos efektyvumas yra didesnis, o veikimo įtampa - mažesnė.

5.1 Fazės moduliatoriai

5.1.1 Dielektriniai moduliatoriai

Dielektriniai elektrooptiniai moduliatoriai gaminami iš kristalo turinčio didelį elektrooptinį koeficientą (pvz., LiNbO_3). 5.2 pav. pateikta elektrooptinio fazės moduliatoriaus, kuris neturi pn sandūros, schema. Elektrooptinio moduliatoriaus lūžio rodiklis kinta keičiant elektrinio lauko stiprį. Tokiame moduliatoriuje apie bangolaidį yra du elektrodai. Apatinis elektrodas yra įžemintas, o viršutinis valdomas išorine įtampa, kuriai kintant atitinkamai kinta bangolaidžio medžiagos lūžio rodiklis. Taip moduluojama spinduliuotės fazė, o galia nekinta. Šis moduliacijos būdas leidžia išvengti priverstinės Briliujeno sklaidos (netiesinio efekto).



5.2 pav. Dielektrinis optoelektroninis modulatorius.

Populiariausia išorinių moduliatorių medžiaga yra ličio niobatas, kuris pasižymi mažais optiniais nuostoliais bei dideliu elektrooptiniu koeficientu^{6, 7}. Ličio niobato kristale sukuriama bangolaidis (papildomai legiruojant kaip ir optinės skaidulos šerdį), ir toks įtaisas tampa pritaikomas skaidulinėje optikoje. Jei bangolaidžio matmenys yra palyginami su vienmodės skaidulos šerdies diametru (9 μm), tai šviesa įeis ir išeis iš modulatoriaus patirdama mažus nuostolius.

Jei modulatoriaus maitinimo įtampa V_b , o kristalo storis d_{eo} , tai elektrinis laukas jame $F = V_b/d_{eo}$. Tada medžiagos lūžio rodiklio pokytis:

$$\Delta n_r = n_r^3 r_1 V_b / 2d_{eo}, \quad (5.1)$$

o fazės pokytis $\Delta\phi_{eo}$ L_{eo} ilgio moduliatoriuje:

$$\Delta\phi_{eo} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta n_r L = \pi L n_r^3 r_1 V_b / 2\lambda_0 d_{eo}; \quad (5.2)$$

čia λ_0 yra krintančios spinduliuotės bangos ilgis vakuume, r_1 – tiesinis elektrooptinis (Pokelso) koeficientas. Fazės pokytis yra proporcingas modulatoriaus maitinimo įtampai. Bangolaidiniame moduliatoriuje moduluojama tik bangolaidžiu sklindanti spinduliuotė. Tada fazės pokytį reikia padauginti iš optinio išlaidymo faktoriaus Γ :

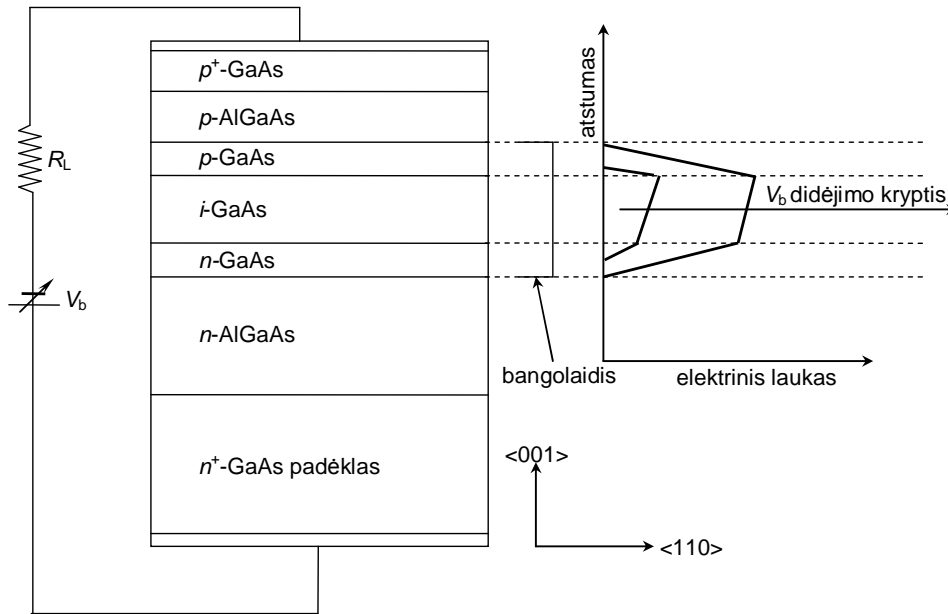
$$\Delta\phi_{eo} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Gamma \Delta n_r L. \quad (5.3)$$

Taigi spinduliuotės fazė kinta dydžiu $\Delta\phi_{eo}$, kuris priklauso nuo modulatoriaus kristalo ilgio ir maitinimo įtampos. Pusbangio įtampa (įtampa, kuriai esant fazė pakinta dydžiu π) naudojama nusakyti modulatoriaus efektyvumui: kuo ši įtampa mažesnė, tuo modulatorius efektyvesnis. Pusbangio įtampą galime išreikšti iš (5.2) formulės:

$$V_\pi = \frac{\lambda_0 d_{eo}}{L n_r^3 r_1}. \quad (5.4)$$

Pusbangio įtampa yra tiesiog proporcinga šviesos bangos ilgiui ir atvirkščiai proporcinga modulatoriaus ilgiui. Jei elektrinio lauko moduliatoriuje kryptis yra lygiagreti šviesos sklaidimo kryptčiai, tai modulatoriaus ilgis sutampa su storiu: $d_{eo} = L$, ir pusbangio įtampa nepriklauso nuo modulatoriaus matmenų:

⁷ K. Aoki, J. Kondo, Y. Iwata, A. Hamajima, T. Ejiri, O. Mitomi, and M. Minakata, “High-Speed X-Cut Thin-Sheet LiNbO₃ Optical Modulator With Folded Structure”, *J. Lightw. Technol.*, 25, pp.: 1805-1810 (2007).



5.3 pav. Puslaidininkinio fazės modulatoriaus su GaAs/AlGaAs dvigubu įvairialyčiu dariniu schema.

$$V_{\pi} = \frac{\lambda_0}{n_r^3 \eta}. \quad (5.5)$$

Optinių moduliatorių pusbangio įtampa yra keletu voltų eilės^{7,8}.

5.1.2 Puslaidininkiniai modulatoriai

Puslaidininkinių moduliatorių veikimas yra gana sudėtingas dėl pasireiškiančių įvairių fizikinių efektų, kurių stiprumas priklauso nuo elektrinio lauko stiprio ir šviesos bangos ilgio. Moduluojamos šviesos bangos ilgis turi būti didesnis už modulatoriaus medžiagos sugerties kraštą (kitaip vyks spinduliuotės sugertis ir amplitudinė moduliacija).

5.3 pav. pateikta tūrinio puslaidininkinio OM su dvigubu įvairialyčiu dariniu sandara. *i* sluoksnis naudojamas išplėsti stipraus elektrinio lauko sritį veikiant atvirkštinei įtampai. GaAs sluoksniai suformuoja bangolaidį: šviesa sklindanti ribotoje erdvėje yra efektyviai moduluojama. Dažnai šviesos sklidimas apribojamas ne tik statmena sandūrai kryptimi, bet ir lygiagrečia, naudojant keterinį bangolaidį ar paslėptąjį įvairialytį darinį^{8,9}.

Puslaidininkinio lūžio rodiklio (taip pat ir fazės) pokytis veikiant elektriniam laukui susideda iš dviejų dėmenų: tiesinio (Pockelso (Pockels) efektas) ir kvadratinio (Franco ir Keldyšo (Franz-Keldysh) efektas):

$$\Delta n_r = \frac{n_r^3}{2} \Gamma \left[\pm \eta F + s_{p-FK}(\lambda) F^2 \right], \quad (5.6)$$

$$\Delta \phi_{eo} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Gamma L \frac{n_r^3}{2} \Gamma \left[\pm \eta F + s_{p-FK}(\lambda) F^2 \right]; \quad (5.7)$$

čia koeficientas s_{p-FK} yra moduluojamos šviesos bangos ilgio funkcija (GaAs: $4,3 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{V}^2$ ($1,06 \mu\text{m}$ bangos ilgio spinduliuotei), $1,3 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{V}^2$ ($1,3 \mu\text{m}$)).

⁸ K. Noguchi, O. Mitomi, and H. Miyazawa, "Millimeter-Wave Ti:LiNbO₃ Optical Modulators", *J. Lightw. Technol.*, 16, pp.: 615-619 (1998).

⁹ D. M. Gill, D. Jacobson, C. A. White, C. D. W. Jones, Y. Shi, W. J. Minford, and A. Harris, "Ridged LiNbO₃ Modulators Fabricated by a Novel Oxygen-Ion Implant/Wet-Etch Technique", *J. Lightw. Technol.*, 22, pp.: 887-894 (2004).

Puslaidininkiniai OM vietoj tūrinių sluoksnių gali turėti sluoksnį su daugiaduobiu kvantiniu dariniu. Kvantiniuose dariniuose vyraujantis elektrooptinis efektas yra kvantinis Štarko (Stark) efektas. Kvantinis Štarko efektas yra proporcingas elektrinio lauko stiprio kvadratui:

$$\Delta n_r = \frac{n_r^3}{2} s_q F^2; \quad (5.8)$$

čia s_q yra kvadratinis elektrooptinis koeficientas (pvz., InGaAs/InAlAs dariniui jis yra $10^{-14} \text{ cm}^2/\text{V}^2$ eilės). Tada fazės pokytis:

$$\Delta \phi_{eo} = \frac{\pi}{\lambda_0} \Gamma L n_r^3 s_q F^2. \quad (5.9)$$

Modulatoriaus efektyvumas taip pat priklauso nuo darinio įtempimo – gali būti tiek didesnis, tiek ir mažesnis priklausomai nuo medžiagos bei įtempimo pobūdžio (tempimas ar suspaudimas)¹⁰.

5.2 Amplitudės modulatoriai

Amplitudės modulatorius gali būti pagamintas iš fazės modulatoriaus ir interferometro arba naudojant spinduliuotės sugerties efektus (Franzo ir Keldyšo (Franz-Keldysh), kvantinį Štarko (Stark) efektą). Amplitudinė moduliacija taip pat gali būti atlikta naudojant optinio perjungimo įtaisus (kryptinį, X ar Y šakotuvus), kuriuose optiniam perjungimui naudojamas lūžio rodiklio kitimas.

5.2.1 Macho ir Zenderio modulatorius

InGaAs/InAlAs Macho ir Zenderio (Mach-Zehnder) modulatoriaus su daugiaduobiu kvantiniu dariniu schema pateikta 5.4 pav. Šis modulatorius susideda iš dviejų Y šakotuvų ir dviejų fazės moduliatorių, kurie įmontuoti keterinių bangolaidžių darinyje (5.4 (b) pav.). Įeinanti šviesa Y šakotuvu (išskirstytuvu) padalinama į du srautus, kurie patenka į du fazės modulatorius. Kitame Y šakotuve (tankintuve) fazinė spinduliuotės moduliacija yra paverčiama amplitudine: jei šių dviejų šviesos srautų fazės sutampa, tai šviesos intensyvumas padidėja, jei fazės yra priešingos – šviesos srautai panaikina vienas kitą ir sklindančios spinduliuotės intensyvumas yra lygus nuliui. Šiuo atveju pusbangio įtampa atitinka mažiausią modulatoriaus išėjimo galią, kai moduluojamas tik vienas srautas – spinduliuotės galia persiskirsto tarp išsklaidomos ir sklindančios šviesos). Jei modulatoriuje nėra šviesos sugerties, tai išėjimo ir įėjimo galių santykiai:

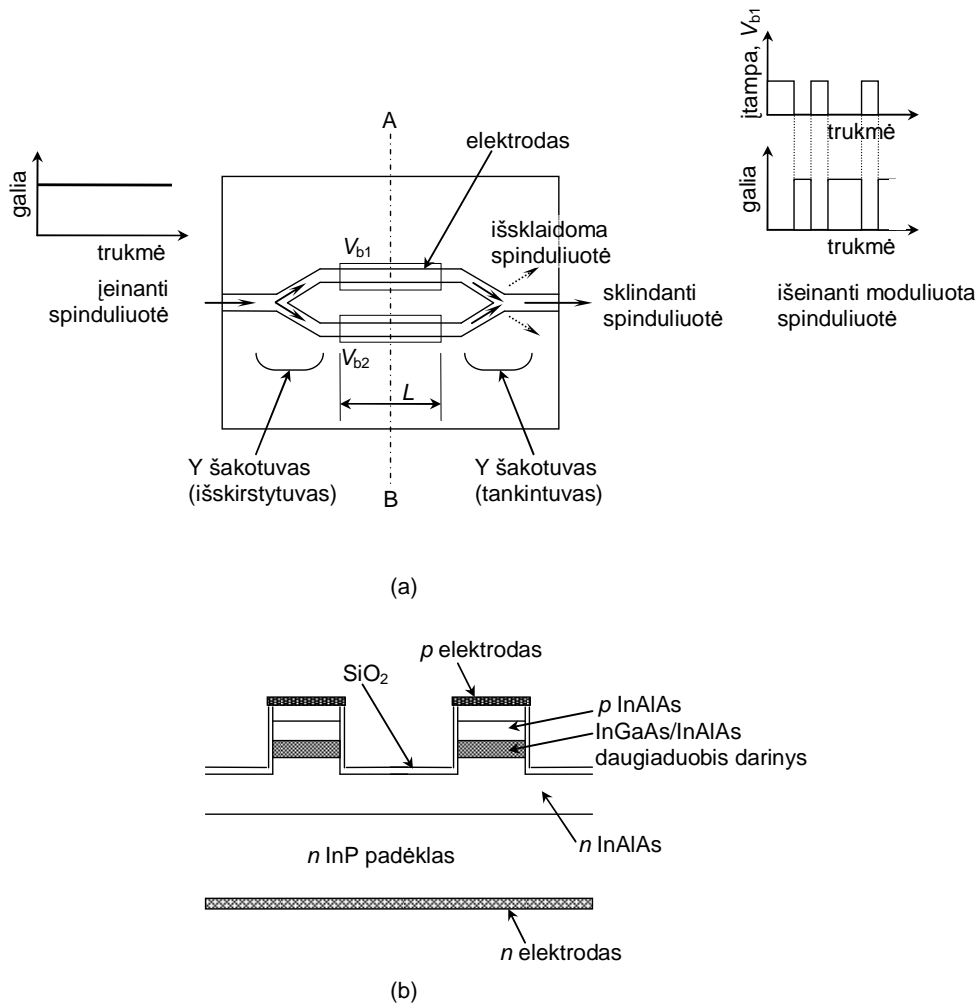
$$\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{1}{2} (1 + \cos[\Delta\phi(V_{b1}) - \Delta\phi(V_{b2}) + \phi_0]); \quad (5.10)$$

čia ϕ_0 yra fazių skirtumas šakose, kai nėra jokio elektrinio lauko, $\Delta\phi(V_{b1})$ ir $\Delta\phi(V_{b2})$ yra fazių pokyčiai nulemti įtampų V_{b1} ir V_{b2} kiekvienoje šakoje (šie fazės pokyčiai apskaičiuojami taip pat, kaip fazės modulatoriui ((5.1) – (5.3))). Jei šakose vyksta šviesos sugertis, tai:

$$\begin{aligned} \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = & \frac{1}{4} (\exp(-\Gamma\Delta\alpha_{ab1}L) + \exp(-\Gamma\Delta\alpha_{ab2}L)) \\ & + \frac{1}{2} \exp\left(-\Gamma(\Delta\alpha_{ab1} + \Delta\alpha_{ab2})\frac{L}{2}\right) \cos[\Delta\phi(V_{b1}) - \Delta\phi(V_{b2}) + \phi_0]; \end{aligned} \quad (5.11)$$

čia $\Delta\alpha_{ab1}$ ir $\Delta\alpha_{ab2}$ yra sugerties koeficiento pokyčiai, L – šakų ilgis. Visuose realiuose modulatoriuose yra didesnė ar mažesnė šviesos sugertis¹¹.

¹⁰ D. Marris-Morini, L. Vivien, G. Rasigade, J.-M. Fedeli, E. Cassan, X. Le Roux, P. Crozat, S. Maine, A. Lupu, P. Lyan, P. Rivallin, M. Halbwax, S. Laval, "Recent Progress in High-Speed Silicon-Based Optical Modulators", *IEEE Proc.*, 97, pp.: 1199-1215 (2009).



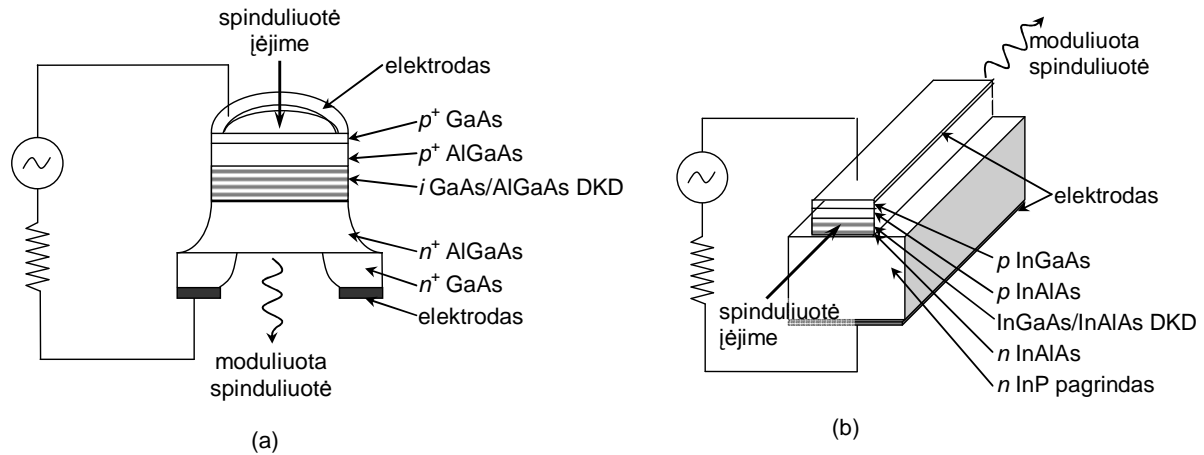
5.4 pav. Macho ir Zenderio moduliatoriai: (a) vaizdas iš viršaus, (b) skerspjūvis (A-B).

5.2.2 Elektrooptinis sugerties moduliatorius

Sugerties moduliatoriaus veikimas yra pagrįstas šviesos sugerties koeficiento kitimu veikiant elektriniam laukui¹². Sugerties moduliatoriuose naudojami Franzo ir Keldyšo (Franz-Keldysh), kvantinis Štarko (Stark) bei Vanje ir Štarko (Wannier-Stark) elektrooptiniai efektai. 5.5 pav. pateikti elektrooptinių moduliatorių pavyzdžiai. Elektrinis laukas sugerties moduliatoriuose sukuriama statmenai pn sandūrai. Moduluojamos spinduliuotės bangos ilgis turi būti arti sugerties krašto. Sugerties koeficientas kinta kintant elektriniam laukui, ir taip moduluojama sklindanti spinduliuotė. Sugerta šviesa virsta fotosrove. Moduliatoriuose su kvantiniais dariniais daugiausia naudojamas kvantinis Štarko efektas.

¹¹ H. Kiuchi, T. Kawanishi, M. Yamada, T. Sakamoto, M. Tsuchiya, J. Amagai, and M. Izutsu, "High Extinction Ratio Mach-Zehnder Modulator Applied to a Highly Stable Optical Signal Generator", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 55, pp.: 1964-1972 (2007).

¹² M. D. Guina, A.-M. Vainionpää, L. Orsila, A. Härkönen, J. Lyytikäinen, L. A. Gomes, and O. G. Okhotnikov, "Saturable Absorber Intensity Modulator", *IEEE J. Quantum Electron.*, 39, pp.: 1143-1149 (2003).



5.5 pav. Elektrooptinių sugerties moduliatorių dariniai:
(a) vertikalusis mezadarinys, (b) darinys su keteriniu bangolaidžiu.

5.3 Optinių moduliatorių moduliacijos ir dažninės charakteristikos

5.3.1 Nykimo santykis

Nykimo santykis nusakomas „įjungta“ ir „išjungta“ galių lygių santykiu - didžiausios išėjimo galios santykiu su mažiausia, ir yra svarbus amplitudės moduliatorių parametras.

Modulioriaus, kuris sudarytas iš fazės moduliatoriaus ir Macho ir Zenderio interferometro, nykimo santykį nusako (5.10) ir (5.11) formulės: kuo P_{\max}/P_{\min} santykis didesnis, tuo didesnis nykimo santykis. Taigi nykimo santykis priklauso nuo šviesos išlaikymo faktoriaus, fazės moduliatoriaus ilgio, sugerties koeficiento kitimo kintant elektriniam laukui. Sugerties koeficientas priklauso nuo šviesos bangos ilgio. Modulioriaus medžiaga paprastai parenkama taip, kad būtų didelis šviesos lūžio rodiklis (t. y. spinduliuotės bangos ilgis yra artimas draudžiamosios energijos tarpui). Tačiau tada yra ir didelis sugerties koeficientas. Taigi, šviesos bangos ilgiui pasiekus sugerties kraštą pusbangio įtampa sumažėja dėl pakitusio lūžio rodiklio ir išaugusios sugerties. Sugerties moduliatoriaus nykimo santykis išreiškiamas taip:

$$\frac{P_{\max}}{P_{\min}} \propto \exp(-\Gamma\Delta\alpha L); \quad (5.12)$$

čia $\Delta\alpha$ yra sugerties koeficiento pokytis veikiant elektriniam laukui. Šiuolaikiniuose moduliatoriuose nykimo santykis yra (40-50) dB^{13,14}.

5.3.2 Optinių moduliatorių efektyvumas, įneštiniai nuostoliai, dažnio poslinkis

Maža veikimo įtampa, maži įneštiniai nuostoliai bei kuo mažesnis dažnio poslinkis yra siektini moduliatorių parametrai.

Fazės moduliatorių veikimo įtampai įvertinti naudojama pusbangio įtampa, amplitudės moduliatorių - reikiamą nykimo santykį užtikrinanti įtampa. Veikimo įtampai sumažinti moduliatorių dariniai turi būti sukurti taip, kad naudojamų elektrooptinių reiškinų efektas būtų kuo didesnis. Taigi pranašesni yra

¹³ I. Ozdur, S. Ozharar, F. Quinlan, D. Mandridis, and P. J. Delfyett, "An Interferometric Method for High Extinction Ratio Measurements With 60-dB Dynamic Range", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 20, pp.: 2075-2077 (2008).

¹⁴ C. T. Shih, Z. W. Zeng, and S. Chao, "Design and Analysis of Metal-Oxide-Semiconductor-Capacitor Microring Optical Modulator With Solid-Phase-Crystallization Poly-Silicon Gate", *J. Lightw. Technol.*, 27, pp.: 3861-3873 (2009).

bangolaidiniai dariniai¹⁵. Elektrooptiniai efektai yra ryškesni, jei moduluojamos spinduliuotės bangos ilgis yra artimas draudžiamosios energijos tarpui. Beje, fazės moduliatorių veikimo įtampa yra didesnė nei amplitudės^{6,16,17}.

Įneštiniai nuostoliai (spinduliuotės nuostoliai tarp įėjimo ir išėjimo) susideda iš įvedimo, sklidimo ir atspindžio nuostolių. Įneštiniai nuostoliai atsiranda dėl modų (matmenų) nesutapimo tarp modulatoriaus įėjimo ar išėjimo ir optinės skaidulos. Sklidimo nuostolius lemia šviesos sugertis moduliatoriuje. Atspindžio nuostoliai atsiranda šviesai atsispindėjus nuo paviršių įėjime ir išėjime. Šiuos sumažinti galima naudojant neatspindinčiuosius sluoksnius.

Dažnio poslinkis yra susijęs su moduliacijos mechanizmu. Jį sukelia lūžio ir sugerties rodiklių vienalaikis kitimas kintant maitinimo įtampai. Atitinkamai šiems pokyčiams kinta ir šviesos bangos ilgis. Dažnio poslinkio laipsnis įvertinamas linijos išplitimo faktoriumi (lūžio rodiklio pokyčio santykiu su sugerties koeficiento pokyčiu). Dažnio poslinkį galima sumažinti parenkant moduluojamos šviesos bangos ilgį ties sugerties kraštu¹⁸.

5.3.3 Dažninės optinių moduliatorių charakteristikos

Sugerties koeficiento ir lūžio rodiklio kitimo sparta yra labai didelė, pvz., 100 GHz III-V puslaidininkių amplitudės modulatoriuose veikiančiuose sugerties principu. Ši vertė yra nulemta plazminių virpesių dažnio. Tačiau realių OM veikimo spartą riboja ne fiziniai efektai naudojami moduliacijai, o modulatoriaus sandara ir matmenys. Tai CR trukmės konstanta, šviesos sklidimo per moduliatorių trukmė.

Įprastų moduliatorių ekvivalentinė schema yra artima *pin* fotodiodo schemai (5.6 pav.). Modulatoriaus pilnutinė varža mažėja didėjant moduliacijos indeksui. Taigi moduluoto elektrinio lauko intensyvumas mažėja. Dažnis, kuriam esant įtampa sumažėja $\sqrt{2}$ karto lyginant su žemadažne įtampa, vadinamas 3-dB juosta:

$$f_{3\text{-dB/CR}} = \frac{1}{\pi R_L C_m}; \quad (5.13)$$

čia R_L yra apkrovos varža, C_m – moduliatorių atitinkančio kondensatoriaus talpa (5.6 pav.).

Moduliacijos spartai didėjant atvirkštinis moduliacijos dažnis pasiekia trukmę, per kurią šviesa prasklinda per moduliatorių. Moduluojančiojo signalo įtampa pradeda keisti šviesą, kuri dar neprasklido modulatoriaus – šviesos signalas iškraipomas „kitos“ įtampos. Šviesos sklidimo moduliatoriumi trukmė:

$$\tau_m = \frac{n_r L_m}{c_0}; \quad (5.14)$$

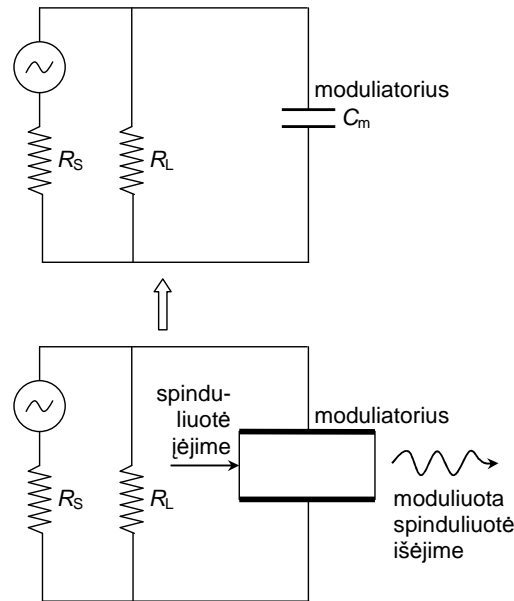
čia n_r ir c_0 yra efektyvusis lūžio rodiklis bangolaidyje ir šviesos greitis vakuume, L_m yra modulatoriaus ilgis. Tada 3-dB dažnių juosta:

¹⁵ K. K. McLaughlan and S. T. Dunham, “Analysis of a Compact Modulator Incorporating a Hybrid Silicon/Electro-Optic Polymer Waveguide”, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 12, pp.: 1455-1460 (2006).

¹⁶ S. C. Cao, J. Noad, L. Sun, R. James, D. Coulas, G. Lovell, and E. Higgins, “Small AC Driving Voltage for MZI-Based GaAs–GaAlAs Electrooptic Modulators/Switches With Coplanar Electrodes”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 21, pp.: 584-586 (2009).

¹⁷ J. Kondo, A. Kondo, K. Aoki, S. Takatsuji, O. Mitomi, M. Imaeda, Y. Kozuka and M. Minakata, “High-speed and low-driving-voltage X-cut LiNbO₃ optical modulator with two step backside slot”, *Electron. Lett.*, 38, pp.: 472-473 (2002).

¹⁸ M. Matsuda, K. Morito, K. Yamaji, T. Fujii, and Y. Kotaki, “A Novel Method for Designing Chirp Characteristics in Electroabsorption MQW Optical Modulators”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 10, pp.: 364-366 (1998).



5.6 pav. Supaprastinta optinio modulatoriaus ekvivalentinė schema.

$$f_{3\text{-dB/tr}} \approx \frac{1,4/\pi}{\tau_m} = \frac{1,4c_0}{\pi n_r L_m}. \quad (5.15)$$

Puslaidininkinio bangolaidžio lūžio rodiklis yra apie 3,2. Tada dažnių juosta apskaičiuota 500 μm ilgio modulatoriui būtų apie 84 GHz. Gaminamų optinių moduliatorių dažnių juosta siekia (40-60) GHz^{6,19,20}. Šviesos sklidimo per moduliatorių trukmė įtakoja modulatoriaus dažninę charakteristiką, jei moduliacijos dažnis viršija 100 GHz. Šis trūkumas gali būti pašalintas bėgančios bangos modulatoriuose²¹.

5.3.4 Bėgančios bangos modulatoriai

Principinė bėgančios bangos modulatoriaus schema pateikta 5.7 pav. Elektrodas naudojamas kaip perdavimo linija, šviesa ir moduliuojančiosios mikrobangos sąveikauja paskirstytųjų parametrų grandinėje. Jei šviesos greitis bangolaidyje yra toks pat kaip mikrobangų greitis išilgai elektrodo, šviesa moduliuojama be iškraipymų. Bėgančios bangos modulatoriaus dažnių juostą riboja šviesos ir mikrobangų sklidimo modulatoriumi trukmių skirtumas. Bėgančios bangos modulatoriaus 3-dB dažnių juosta:

$$f_{3\text{-dB/tr}} \approx \frac{1,4c_0}{\pi |n_r - n_{\text{ele}}| L_m}; \quad (5.16)$$

čia n_{ele} yra efektyvus mikrobangų lūžio rodiklis modulatoriuje. Realių įtaisų dažnių juostą taip pat įtakoja įprastų konstrukcinių elementų nulemti apribojimai.

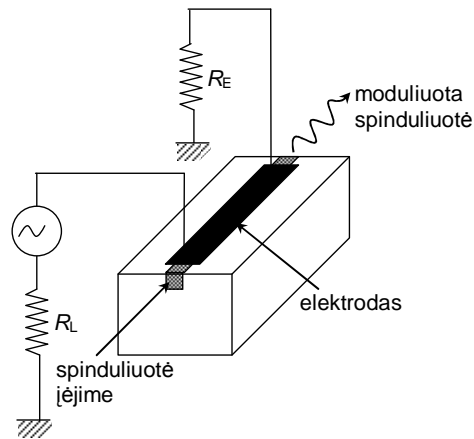
Sugerties moduliatorių dažninę charakteristiką blogina fizikiniai efektai susiję su erdviu krūviu, kai šviesos galia yra labai didelė.

Siektinos modulatoriaus charakteristikos yra didelė dažnių juosta ir maža naudojama elektrinė galia. Tačiau šios negali būti pasiektos kartu su dideliu moduliacijos indeksu: sugerties ir lūžio rodiklių pokyčiai yra

¹⁹ M. Mbabele and C. S. Aitchison, "MQW Electroabsorption Optical Modulator Performance Enhancement Using an Artificial Transmission Line Configuration", *J. Lightw. Technol.*, 23, pp.: 1791-1799 (2004).

²⁰ http://www.oclaro.com/product_type/External_Modulators.php (2009 11 03).

²¹ C. D. Watson, M. G. F. Wilson, "Proposal for a 94-GHz phase-reversal optical modulator using a loaded transmission line", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 9, pp.: 52-54 (1997).



5.7 pav. Supaprastinta bėgančios bangos moduliatoriaus schema.

didesni ilgesniame moduliatoriuje, tačiau ilgas moduliatorius lemia didesnę veikimo įtampą ir mažesnę dažnių juostą.

Optinio moduliatoriaus charakteristikos yra labai jautrios temperatūrai^{22, 23}. OM dažniausiai veikia kontroliuojant ir stabilizuojant jų temperatūrą.

²² C. T. Shih, Z. W. Zeng, and S. Chao, “Design and Analysis of Metal-Oxide-Semiconductor–Capacitor Microring Optical Modulator With Solid-Phase-Crystallization Poly-Silicon Gate”, *J. Lightw. Technol.*, 27, pp.: 3861-3873 (2009).

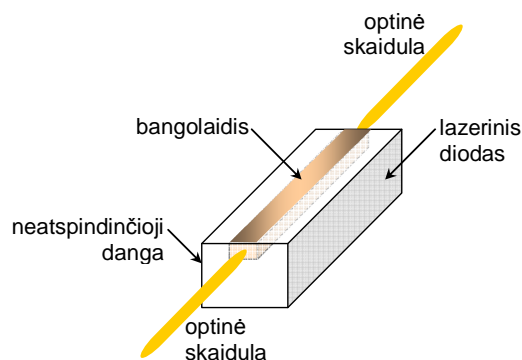
²³ M. Allard, R. A. Masut, and M. Boudreau, “Temperature Determination in Optoelectronic Waveguide Modulators”, *J. Lightw. Technol.*, 18, pp.: 813-818 (2000).

6. Optiniai stiprintuvai

Optinėse ryšio sistemose informacija persiunčiama šviesos (ne elektrinio signalo) pavidalu. Svarbu, kad persiunčiant optinis signalas patirtų ku mažesni silpninimą ir dispersiją. Optiniai stiprintuvai yra efektyvus būdas sustiprinti optinį signalą neverčiant jo į elektrinį. Yra keletas optinių stiprintuvų rūšių: puslaidininkiniai optiniai stiprintuvai (POS), Ramano (Raman) optiniai stiprintuvai (šie kartu sumažina ir dispersiją), tačiau populiariausi yra retųjų žemių metalais legiruoti skaiduliniai stiprintuvai.

6.1 Puslaidininkiniai optiniai stiprintuvai

Puslaidininkiniai optiniai stiprintuvai, iš esmės, yra lazeriniai diodai be galinių veidrodžių (6.1 pav.). Prie abiejų POS galų prijungiama optinė skaidula. Bet kuria skaidula atsklidęs signalas yra sustiprinamas ir persiunčiamas į kitą skaidulą. Paprastai POS gaminami 1310 nm ir 1550 nm bangos ilgio spinduliuotei. POS privalumas prieš erbiu legiruotus skaidulinius stiprintuvus yra dvikryptiškumas. Tačiau trūkumai yra dideli inėstiniai nuostoliai, priklausomybė nuo šviesos poliarizacijos, didelis triukšmo faktorius^{1,2,3,4}.



6.1 pav. Puslaidininkinis optinis stiprintuvas.

Optinio ryšio sistemose POS naudojami kaip galios stiprintuvai (daugelio lazerinių diodų išėjimo spinduliuotės galia yra silpna, todėl ji iš karto yra stiprinama), linijos stiprintuvai (optinis signalas stiprinamas tiesiog „kelyje“), imtuvo priešstiprintuvai (POS montuojamas prieš detektorius siekiant padidinti jo jautrumą)^{5,6,7,8}. Dažnai puslaidininkiniai optiniai stiprintuvai gaminami viename įtaise kartu su šviesos šaltiniu ir optiniu modulatoriumi^{9,10}.

¹ T. Watanabe, N. Sakaida, H. Yasaka, F. Kano, and M. Koga, “Transmission Performance of Chirp-Controlled Signal by Using Semiconductor Optical Amplifier”, *J. Lightw. Technol.*, 18, pp.: 1069-1077 (2000).

² S. S. Maicas, F. Öhman, J. Capmany, and J. Mørk, “Controlling Microwave Signals by Means of Slow and Fast Light Effects in SOA-EA Structures”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 19, pp.: 1589-1591 (2007).

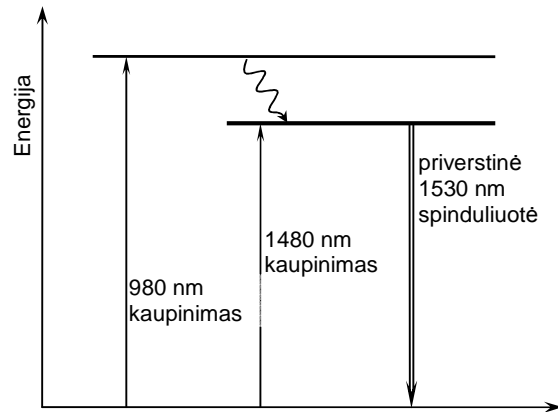
³ S. Fu, W.-D. Zhong, P. P. Shum, and C. Lin, “Frequency Multiplication of Microwave Signals by Self-Induced Nonlinear Polarization Rotation in Semiconductor Optical Amplifiers (SOAs)”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 21, pp.: 1081-1083 (2009).

⁴ S. Tanaka, A. Uetake, S. Yamazaki, M. Ekawa, and K. Morito, “Polarization-Insensitive GaInNAs–GaInAs MQW-SOA With Low Noise Figure and Small Gain Tilt Over 90-nm Bandwidth (1510–1600 nm)”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 20, pp.: 1311-1313 (2008).

⁵ M. Duell and R. Gutiérrez-Castrejón, “4×25-Gb/s 40-km PHY at 1310 nm for 100 GbE Using SOA-Based Pre-amplifier”, *J. Lightw. Technol.*, 26, pp.: 1681-1689 (2008).

6.2 Erbiu legiruoti skaiduliniai stiprintuvai

Skaiduliniai stiprintuvai plačiai naudojami tiek analoginėse, tiek banginio tankinimo sistemose. Spartio tankio banginio tankinimo sistemų plėtra padarė erbiu legiruotą skaidulinį stiprintuvą (ELSS) privalomu optinės ryšio sistemos įtaisu, kuris leidžia nenaudoti įprastų kartotuvų. ELSS išėjimo galia yra gana didelė, taigi reikia mažiau stiprintuvų sistemoje. Stiprinimas nepriklauso nuo duomenų srauto, taigi keičiant, tobulinant sistemą, nereikia keisti stiprintuvų.



6.2 pav. Erbiu legiruoto skaidulinio stiprintuvo kaupinimo schema.

Skaiduliniam stiprintuve optinis stiprinimas vyksta dėl priverstinės spinduliuojamosios rekombinacijos tarp dviejų lygmenų (6.2 pav.). Šie lygmenys sukuriama optinę skaidulą legiruojant retųjų žemių jonais (Er^{3+} , Nd^{3+} , Pr^{3+}). Lygmenų energija priklauso nuo legiravimo jonų: 1550 nm priverstinė spinduliuotė gaunama legiruojant erbiu, 1300 nm - prazeodimiu.

Priverstinei spinduliuotei ir stiprinimui gauti reikalingas kaupinimas. ELSS kaupinimui naudojami didelės galios LD (>100 mW), bet jų koherentiškumui, dažniam atsakui ir kitoms charakteristikoms nekeliama dideli reikalavimai. Tačiau, norint pasiekti efektyvų kaupinimą, kaupinimo LD bangos ilgis turi būti stabilus. Bangos ilgio stabilumui užtikrinti naudojama kaupinimo šaltinio temperatūros stabilizavimo įranga.

6.3 pav. pateikta skaidulinio stiprintuvo sandaros schema. Optinis įėjimo signalas ir kaupinimo spinduliuotė sujungiami ir patenka į erbiu legiruotą skaidulą. Silpnam 1310 nm ar 1550 nm signalui patekus į skaidulą, šviesa sužadina retųjų žemių atomus, kurie išlaisvina sukauptą energiją, kaip papildomą 1310 nm ar 1550 nm spinduliuotę. Taip signalui sklindant skaidula jis stiprėja, ir optinis signalas sustiprinamas neverčiant jo į elektrinį. Šakotuvai įėjime ir išėjime dalį spinduliuotės (apie 1 %) nukreipia į fotodetektorius skirtus stebėti ir kontroliuoti stiprintuvo veiką.

Erbiu legiruotoje skaiduloje yra gana dideli optiniai nuostoliai. Taigi reikia parinkti optimalų skaidulos ilgį, siekiant užtikrinti didžiausią reikiamos (1550 nm) spinduliuotės stiprinimą. Stiprinimui padidinti naudojamas

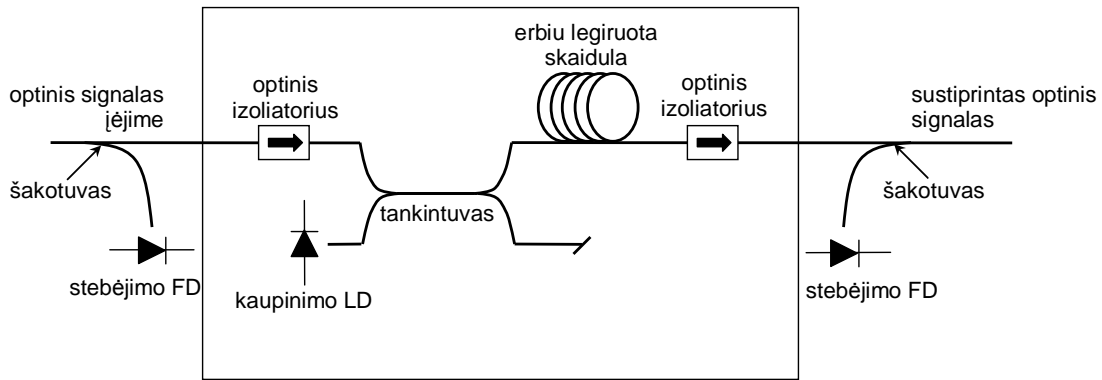
⁶ M. L. Nielsen, K. Tsuruoka, T. Kato, T. Morimoto, S. Sudo, T. Okamoto, K. Mizutani, H. Sakuma, K. Sato, and K. Kudo, "SOA-booster integrated Mach-Zehnder Modulator: Investigation of SOA Position", *J. Lightw. Technol.* (2009).

⁷ Z. Li and G. Li, "Linear and Nonlinear Crosstalk Suppression for DWDM RZ-DPSK Transmitter Using a Saturated SOA as Power Booster Amplifier", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 18, pp.: 811-813 (2006).

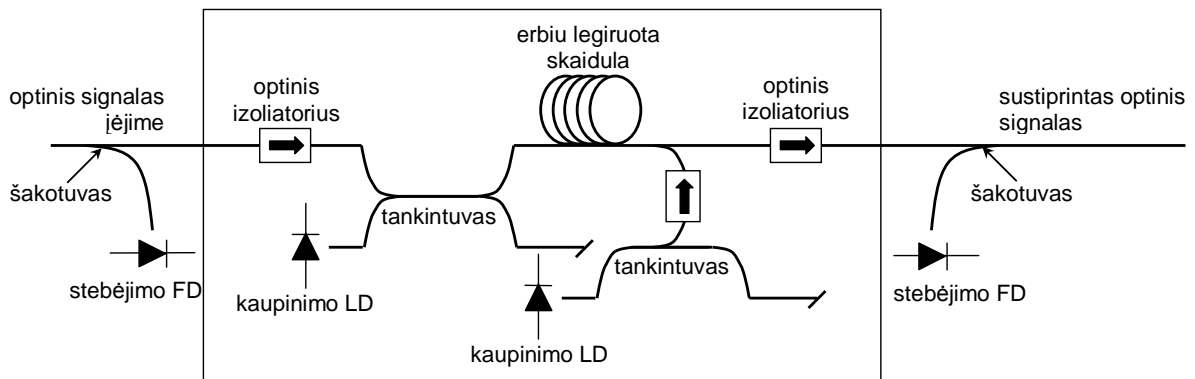
⁸ S. Singh, "Performance Comparison of Optical Network Topologies in the Presence of Optimized Semiconductor Optical Amplifiers", *J. Opt. Commun. Netw.*, 1, pp.: 313-323 (2009)

⁹ L. A. Johansson, Y. A. Akulova, G. A. Fish, and L. A. Coldren, "Sampled-grating DBR laser integrated with SOA and tandem electroabsorption modulator for chirp-control", *Electron. Lett.*, pp.: 70-71 (2004).

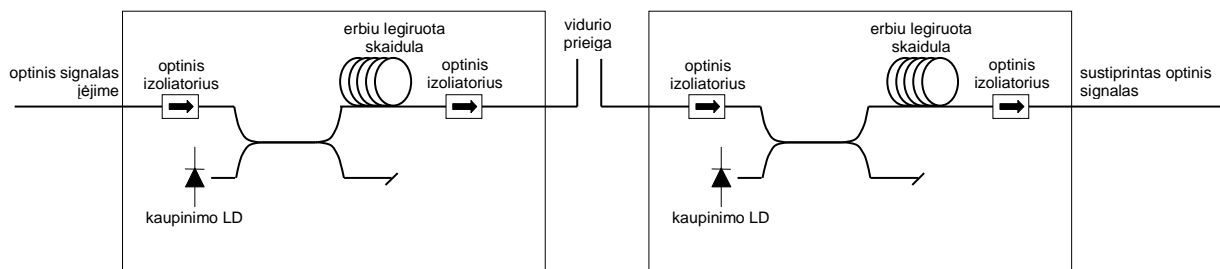
¹⁰ T. Yasui, Y. Shibata, K. Tsuzuki, N. Kikuchi, M. Ishikawa, Y. Kawaguchi, M. Arai, and H. Yasaka, "10-Gb/s 100-km SMF Transmission Using InP Mach-Zehnder Modulator Monolithically Integrated With Semiconductor Optical Amplifier", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 20, pp.: 1178-1180 (2008).



6.3 pav. Erbiu legiruoto skaidulinio stiprintuvo schema.



6.4 pav. Dvigubo kaupinimo erbiu legiruoto skaidulinio stiprintuvo schema.



6.5 pav. Dviejų pakopų erbiu legiruoto skaidulinio stiprintuvo su vidurio prieiga schema.

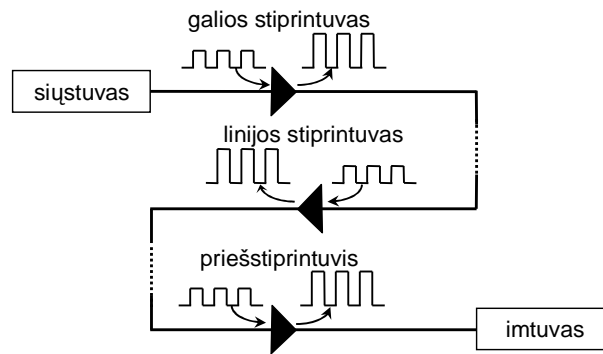
antras kaupinimo šaltinis (lazerinis diodas), kurio spinduliuoatė įvedama į kitą erbiu legiruotos skaidulos galą (6.4 pav.).

6.5 paveiklėse pateikta dviejų pakopų ELSS su vidurio prieiga schema. Šiuo atveju naudojami du atskiri stiprintuvai. Pirmojo stiprintuvo išėjimas ir antrojo įėjimas yra nenaudojami vartotojo - vidurio prieiga naudojama dispersijos kompensavimo skaidulai prijungti.

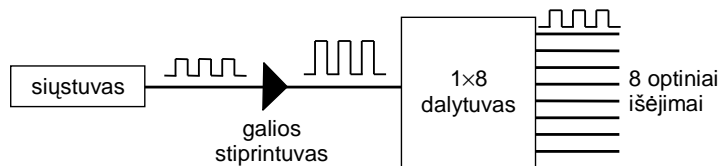
Kaip ir POS, ELSS naudojami kaip galios stiprintuvai, linijos stiprintuvai, priešstiprintuvai (6.6 pav.)¹¹.

Galios stiprintuvai montuojami tuoj pat po siųstuvo^{7,12}. Šiuo atveju ELSS turi maksimaliai sustiprinti sąlyginai didelį signalą. Galios stiprintuvams nėra svarbus mažo signalo atsakas, nes siųstuvo išėjimo galia paprastai yra bent -10 dBm. Taip pat nelabai svarbus šio stiprintuvo įneštas triukšmas, nes signalo ir

¹¹ G. Sacchi, S. Sugliani, A. Bogoni, F. Di Pasquale, R. Di Muro, R. Magri, G. Bruno, and F. Cavaliere, "Design and Experimental Characterization of EDFA-Based WDM Ring Networks With Free ASE Light Recirculation and Link Control for Network Survivability", *J. Lightw. Technol.*, 23, pp.: 1170-1181 (2005).



6.6 pav. ELSS taikymas.



6.7 pav. Nuostolių kompensavimas optiniame tinkle.

triukšmo santykis yra gana didelis.

Linijos stiprintuvas (kartotuvus) pastiprina persiuntimo linija sklindantį mažą signalą ir persiunčia jį toliau. Šiuo atveju svarbūs yra mažo signalo atsakas ir triukšmas.

Šiuolaikinių imtuvų jautrumas yra -30 dBm (622 Mb/s). Tačiau poreikis yra $(-40 - -45)$ dBm jautrumui, kurį galima pasiekti prieš detektorių pastačius optinį stiprintuvą¹³. Sustiprinus signalą šioje vietoje, sumažėja reikalavimai detektoriumi. Šis ELSS taikymas reikalauja itin mažo triukšmo stiprintuvų^{14,15}.

6.2.1 Nuostolių optiniame tinkle kompensavimas

Optinė galia „prarandama“ šviesos pluoštą išskirstant į daug kanalų. Šiuos optinius nuostolius galima kompensuoti prieš dalytuvą montuojant ELSS. ELSS sumontuotas prieš 8×1 dalytuvą (6.7 pav.) padidina galią beveik $+19$ dBm, t. y. kiekviena iš 8 šakų gauna papildomus $+9$ dBm. Tokiu būdu kiekviename iš 8 išėjimų galia yra artima įėjimo galiai. Optinio dalytuvo be stiprintuvo įneštiniai nuostoliai yra 10 dB. Jei įėjimo galia būtų 10 dBm, tai dalytuvo be stiprintuvo išėjimuose būtų 0 dB. Tai tiktų daugeliui skaitmeninių sistemų, tačiau analoginėms sistemoms (pvz., kabelinės televizijos), tai yra mažiausia galima galia.

6.2.2 Plačiajuostis ELSS

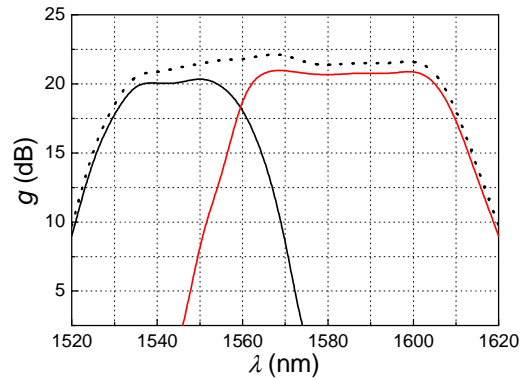
Optinė ryšio sistema persiunčianti 100 ir daugiau signalų reikalauja padidinti stiprintuvų praleidžiamą juostą bent iki 80 nm. ELSS naudingas juostos plotis tėra 30 nm (1530 nm – 1560 nm). Spinduliuotei

¹² R. Proietti, A. D'Errico, L. Giorgi, N. Calabretta, G. Contestabile, and E. Ciaramella, "16×10 Gb/s DPSK Transmission Over 140-km SSMF by Using Two Common SOAs", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 18, pp.: 1675-1677 (2006).

¹³ Y. Liang, J. Li, P. C. Chui, and K. K. Y. Wong, "High-Sensitivity Optical Pre-amplifier for WDM Systems Using an Optical Parametric Amplifier", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 21, pp.: 1562-1564 (2009).

¹⁴ J. H. Ji, L. Zhan, L. L. Yi, C. C. Tang, Q. H. Ye, and Y. X. Xia, "Low Noise-Figure Gain-Clamped L-Band Double-Pass Erbium-Doped Fiber Ring Lasing Amplifier With an Interleaver", *J. Lightw. Technol.*, 23, pp.: 1375-1379 (2005).

¹⁵ F. Roy, A. Grillet, L. Lolivier, G. Peigne, D. Giannone and D. Hamoir, "Experimental optimisation of central wavelength and bandwidth of reflective FBG for efficiency improvement of low-noise L-band EDFAs", *Electron. Lett.*, 41, pp.: 464-466 (2005).



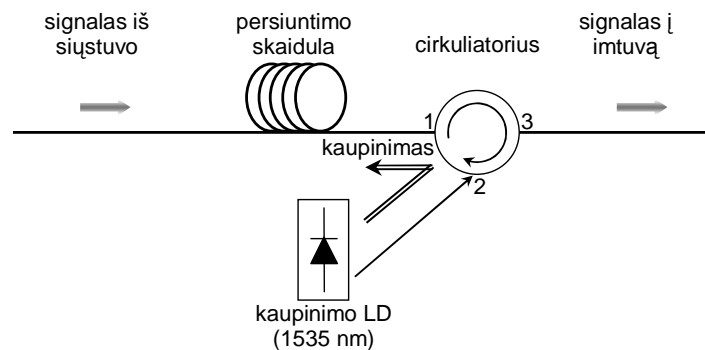
6.8 pav. Plačiajuosčio ELSS stiprinimo spektras (brūkšninė linija (išsistinės linijos rodo atskirai naudojamų stiprintuvų stiprinimo spektrus)).

sklindant skaidula, pakankamai maži nuostoliai yra ir 1500 nm – 1600 nm srityje. Dvigubos juostos skaiduliniai stiprintuvai (DJSS) išsprendžia juostos pločio problemą¹⁶. DJSS juostos plotis yra nuo 1530 nm iki 1610 nm, t. y. 80 nm. DJSS susideda iš dviejų stiprintuvų: pirmojo dažnių juosta atitinka ELSS juostą, o antrojo – praplėstos juostos skaidulinio stiprintuvo juostą (6.8 pav.). Praplėstos juostos skaidulinis stiprintuvas gaminamas naudojant papildomą legiravimą.

6.3 Optinis Ramano stiprintuvas

Optinių Ramano (Raman) stiprintuvų veikimo principas skiriasi nuo pirmųjų dviejų (puslaidininkinių ir skaidulinių)¹⁷. Šie optiniai stiprinimai panaudoja priverstinę Ramano sklaidą (PRS), stiprinimas vyksta toje pačioje skaiduloje, kuria ir sklinda signalas. Ramano stiprintuvų juostos plotis siekia iki 10 nm, signalas sustiprinamas apie 10 dB. Ramano stiprintuvai gali būti suderinti su ELSS siekiant praplėsti dažnių juostą.

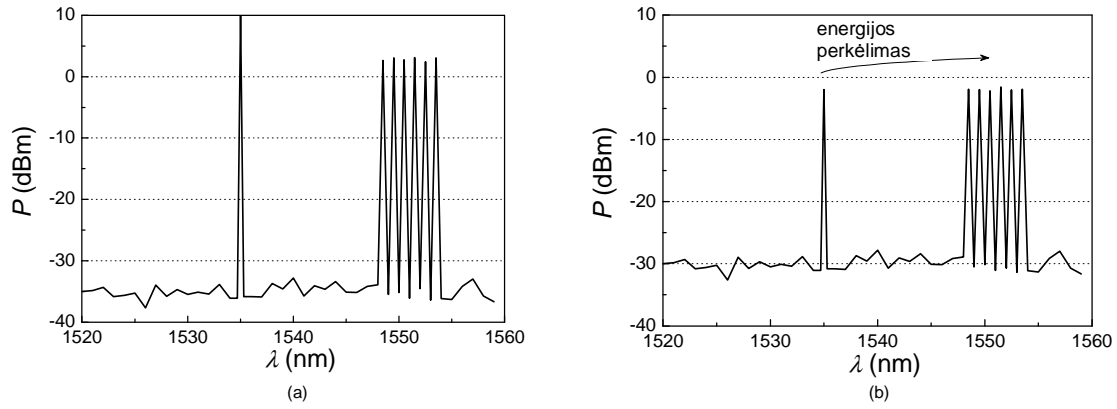
Du pagrindiniai Ramano stiprintuvo elementai yra kaupinimo lazeris ir cirkulatorius (6.9 pav.). Cirkulatorius užtikrina šviesos nukreipimą į persiuntimo skaidulą su mažiausiais nuostoliais. 6.10 pav. pateikti 6 kanalų TBT sistemos siunčiamo signalo stiprinamo Ramano stiprintuvu spektrai: kaupinimo signalo (1535 nm) amplitudė yra gerokai didesnė nei siunčiamo signalo (6.10 (a) pav.). Kadangi PRS iš



6.9 pav. Optinio Ramano stiprintuvo schema.

¹⁶ H. Masuda and Y. Miyamoto, “Low-noise extended L-band phosphorus co-doped silicate EDFA consisting of novel two-stage gain-flattened gain blocks”, *Electron. Lett.*, 44, pp.: 1082-1083 (2008).

¹⁷ F. Amaya, J. Martinez, X. Yu and I.T. Monroy, “Hybrid RSOA and fibre Raman amplified long reach feeder link for WiMAX-on-fibre”, *Electron. Lett.*, 45, pp.: 949-951 (2009).



6.10 pav. 6 kanalų TBT sistemos signalo stiprinimas optiniu Ramano stiprintuvu.

trumpesnio bangos ilgio signalo energiją permeta į ilgesnio, tai 6 duomenų signalai sustiprėja (6.10 (b) pav.) - gauna energiją iš 1535 nm kaupinimo signalo.

7. Šakotuvai ir dalytuvai

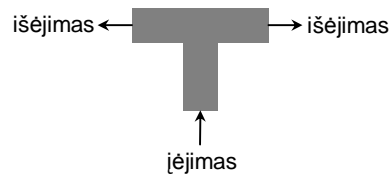
Optinis kabelis, jungtys ir sujungimai yra svarbiausi pasyvieji optinės ryšio sistemos elementai. Tačiau optinės sistemos neapsieina be prievadų, kanalų perjungtuvų, bangos ilgių tankintuvų, šakotuvų ir dalytuvų. Šie įrenginiai dalina ir jungia signalus, parenką maršrutą.

Šakotuvai ir dalytuvai daugiausia naudojami:

- vietiskai kontroliuojant šviesos šaltinio galingumą;
- vienalaikiam bendro signalo paskirstymui (pvz., 8 prievadų šakotuvus leidžia vienu siūstuvu valdyti aštuonis imtuvus);
- atsišakančioje skaidulinio ryšio magistralėje (kiekvienas dalytuvas nukreipia (5-95) % energijos į atšaką, likusi energijos dalis sklinda tolyn magistrale).

7.1 Šakotuvai

Skaidulinės optikos šakotuvai arba padalina optinį signalą į daugelį šakų, arba sujungia daugelį signalų į vieną šaką. Optinių signalų šakotuvai yra sudėtingesni nei elektrinių. Kaip ir elektrinę srovę, taip ir optinį signalą sudaro signalo nešlys (šiuo atveju fotonai). Tačiau optinis signalas nenuteka per imtuvą į žemę - imtuve detektorius sugeria visą signalą. Daug imtuvų sujungus nuosekliai, pirmasis sugers visą signalą, o kiti signalo negaus. Taigi daug lygiagrečių optinių prievadų turi padalinti signalą tarp daugelio prievadų, sumažinant signalo galią. Įėjimo ir išėjimo prievadų skaičius, $N \times M$ konfigūracija (N yra įėjimo prievadų skaičius, M – išėjimo), yra pagrindinė šakotuvo charakteristika.

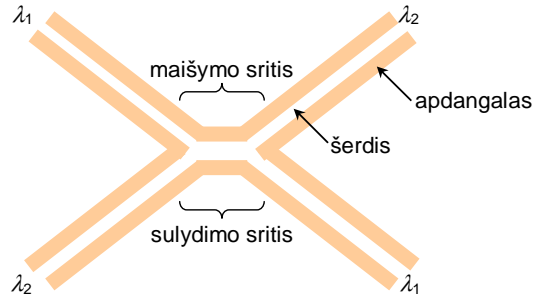


7.1 pav. „T“ šakotuvus.

Paprasciausi šakotuvai yra skaiduliniai optiniai dalytuvai. Šie įtaisai turi mažiausiai 3 prievadus (7.1 pav.), sudėtingesni – iki 32. 7.1 pav. pavaizduotą šakotuvą galima vadinti kryptiniu: viena skaidula vadinama bendrąja skaidula, o kitos dvi gali būti įėjimo arba išėjimo prievadai. Šakotuve nustatomas galių tarp dviejų išėjimų santykis. Gali būti parinktas bet koks galių santykis, bet populiariausi yra: 50 %-50 %, 90 %-10 %, 95 %-5 %, 99 %-1 %. Pvz., naudojant 90 %-10 % šakotuvą, signalo galiai esant $50 \mu\text{W}$, viename išėjime turėtų būti $45 \mu\text{W}$, kitame – $5 \mu\text{W}$. Tačiau šakotuvus įneša ir papildomus nuostolius – suminė išėjimo galia visada bus mažesnė už įėjimo galią. Įneštiniai šakotuvo nuostoliai gali būti nuo 0,05 dB iki 2 dB. Visi šakotuvai yra simetriniai, t. y. jei $50 \mu\text{W}$ spinduliuotė pateks į 10 % įėjimą, tai tik $5 \mu\text{W}$ pasieks bendrąjį prievadą.

7.2 Šakotuvų ir dalytuvų taikymas

Šakotuvai naudojami visose optinio ryšio sistemose (išskyrus tik tiesiogines linijas): dvipusėse linijose, vietiniuose tinkluose^{1,2}. Vietiniame tinkle šakotuvai naudojami žvaigždės ar magistralės topologijos tinkluose.



7.2 pav. Lydytinis skaidulinis šakotuvai.

Žvaigždės topologijos tinkluose naudojami žvaigždiniai šakotuvai turi daug prievadų (prievadų skaičius dažniausiai yra dvejetainis) – 32 ar 64, ir padalina visus išėjimus taip, kad kiekvienas mazgas susisiektų su kiekvienu kitu mazgu. Žvaigždinio šakotuvo naudojimas sukuria didelę dalinai linijinę grandinę. Daug imtuvų ir siūstuvų, prijungtų prie žvaigždinio šakotuvo, turi ryšį su visais kitais imtuvais ir siūstuvais (naudojamas protokolas užtikrina, kad vienu metu siunčia tik vienas mazgas). Žvaigždinio šakotuvo trūkumas yra dideli įneštiniai nuostoliai (20 dB 64 prievadų įtaisui). Taip pat reikalingas sudėtingas susidūrimų išvengimo protokolas.

Magistralės topologijos tinkluose naudojami „T“ šakotuvai (7.1 pav.), kurie atskirus mazgus prijungia prie vieno centrinio kabelio. Magistraliniame tinkle šakotuvai ties kiekvienu mazgu atskiria dalį centriniu kabeliu sklindančio signalo galios ir perduoda imtuvui - siūstuvui. N galinių įrenginių sistemoje signalas, prieš pasiekdamas imtuvą, praeina $N-1$ šakotuvą. Nuostoliai tokioje sistemoje didėja tiesiškai didėjant N .

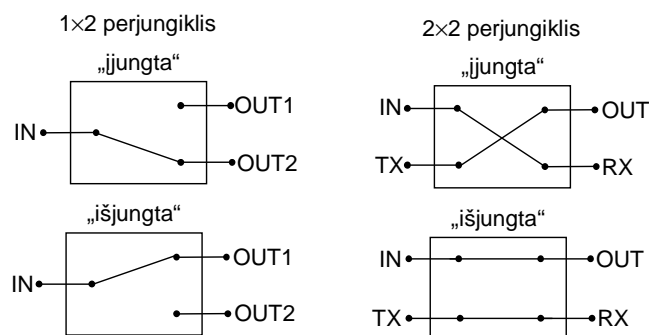
Šiuo metu populiariausi yra lydytiniai šakotuvai. Šiuose šakotuvuose susukamos ir sulydomos dvi ar daugiau optinių skaidulų (7.2 pav.). Ši technologija tinka naudoti 50 %-50 % ir 99 %-1 % šakotuvams bei banginio tankinimo sistemose. Lydytinio šakotuvo prievadų skaičius yra dvejetainis: 2×2 , 4×4 , 8×8 , ir t. t. Lydytinių šakotuvų gamyba yra gana pigi, nereikalaujanti papildomų įtaisų. Svarbiausia žinoti, kaip sukurti, lydyti ir tempti - rezultatas priklauso nuo sujungimo (sulydymo) srities ilgio, taip pat nuo susukimų skaičiaus bei tempimo lydant.

¹ J. Shi, M. Guo, B. Li, "Assembly of arbitrary and vertical optical couplers using flexible polymer micro/nanowires", *Appl. Phys. Lett.*, 93, pp.: 121101-3 (2008).

² N. Kamiyama, "A Large-Scale AWG-Based Single-Hop WDM Network Using Couplers With Collision Avoidance", *J. Light. Technol.*, 23, pp.: 2194-2205, (2005).

8. Kanalu perjungikliai

Daugumai optinių tinklų reikalingi optiniai perjungikliai, kurie sukuria, nutraukia ar pakeičia linijų sujungimus (8.1 pav.). Svarbiausia perjungiklių charakteristika yra jų patikimumas ir ilgalaikiškumas. Veikimo sparta nėra tokia svarbi, ir perjungimo trukmė gali siekti dešimtis milisekundžių.



8.1 pav. Optinių perjungiklių schemas (IN – įėjimas, OUT – išėjimas, TX – siųstuvai, RX - imtuvai).

Populiariausi optiniai perjungikliai yra optomechaniniai (mikroelektromechaninės sistemos (MEMS)). Šiuose įtaisuose perjungimas atliekamas mechaniškai pastumiant optinę skaidulą ar kitus optinius elementus žingsniniu varikliu ar perdavimo svirtimi¹. Šis veikimo principas yra gana lėtas – perjungimo trukmė (10-100) ms. Optomechaniniai perjungikliai yra patikimi, pasižymi mažais įneštiniais nuostoliais ir iškraipymais.

Termooptiniai perjungikliai gaminami iš polimerinių ar silicio bangolaidžių². Jų veikimas remiasi lūžio rodiklio priklausomybe nuo temperatūros (temperatūra keičiama šildytuvu virš bangolaidžio).

Elektrooptiniai perjungikliai gaminami iš puslaidininkių. Jų veikimas pagrįstas lūžio rodiklio priklausomybe nuo elektrinio lauko³. Elektrooptiniai perjungikliai yra itin spartūs ir vartoja mažai energijos. Tačiau juos visus dėl įneštinių nuostolių, atspindžių bei patikimumo lenkia optomechaniniai perjungikliai¹.

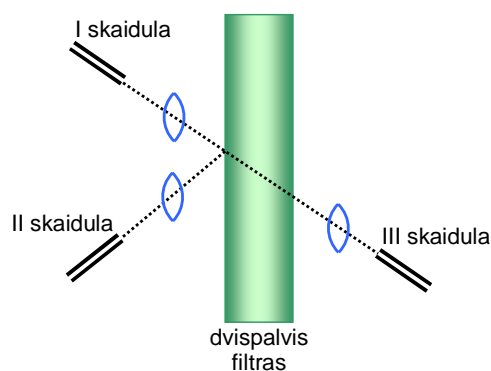
¹ K.-C. Fan, W.-L. Lin, L.-H. Chiang, S.-H. Chen, T.-T. Chung, and Y.-J. Yang, “A 2x2 Mechanical Optical Switch With a Thin MEMS Mirror”, *J. Lightw. Technol.*, 27, pp.: 1155-1161 (2009).

² T. Zhong, X. M. Zhang, A. Q. Liu, J. Li, C. Lu, and D. Y. Tang, “Thermal-Optic Switch by Total Internal Reflection of Micromachined Silicon Prism”, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 12, pp.: 348-358 (2007).

³ M. Krishnamurthi, L. Tian, V. Gopalan, “Design and simulation of planar electro-optic switches in ferroelectrics”, *Appl. Phys. Lett.*, 93, pp.: 052912-3 (2008).

9. Signalų tankintuvai ir išskirstytuvai

TBT sistemose naudojami tankintuvai ir išskirstytuvai turi sugebėti valdyti itin artimų bangos ilgių signalus^{1,2,3}. Norint išskirti gretimus kanalus reikia siauros praleidžiamosios juostos (paprastai 0,4 nm), stataus fronto bei nuostovios veikos kintant temperatūrai. Šiuolaikiniai tankintuvai gali būti naudojami aukšto dažnio, 192 THz - 200 THz, persiuntimo sistemose. Tokios sistemos gali siųsti iki 16 kanalų viena optine skaidula.



9.1 pav. Dvispalvis filtras.

Šiuo metu dažniausiai naudojami išskirstytuvai yra šakotuvai ir dvispalviai filtrai (9.1 pav.). Išskirstytuvai turi pašalinti kanalų interferenciją ir abipusius triukšmus. Dvispalvis filtras garantuoja stabilumą ir puikų atskirų kanalų izoliavimą.

TBT sistemose kanalų sutankinimui ir išskirstymui naudojamos skaidulinės Brego (Bragg) gardelės. Brego gardelė sufuormuojama optinėje skaiduloje, kurios šerdis periodiškai pakeičiama (paprastai, eksponuojant interferencinį šabloną). Skaidulinė gardelė veikia kaip bangos ilgiams atrankus veidrodis preciziškai atskiriantis skirtingų bangos ilgių spinduliuotę.

¹ H. Guo, G. Xiao, and J. Yao, "Interrogation of a Long Period Grating Fiber Sensor With an Arrayed-Waveguide-Grating-Based Demultiplexer Through Curve Fitting", *IEEE Sensors J.*, 8, pp.: 1771-1775 (2008).

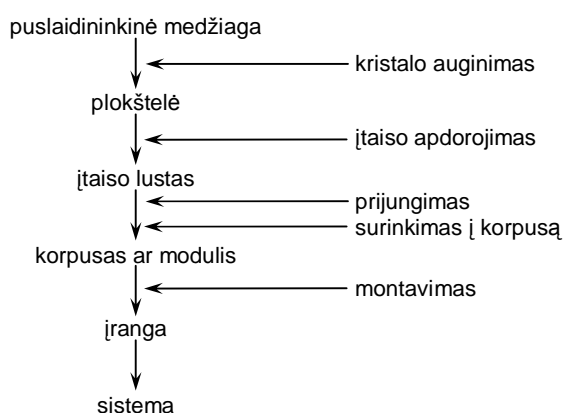
² Y. Nasu, K. Watanabe, M. Itoh, H. Yamazaki, S. Kamei, R. Kasahara, I. Ogawa, A. Kaneko, and Y. Inoue, "Ultrasml 100 GHz 40-Channel VMUX/DEMUX Based on Single-Chip 2.5%- Δ PLC", *J. Lightw. Technol.*, 27, pp.: 2087-2094 (2009).

³ H. L. Minh, Z. Ghassemlooy, and W. P. Ng, "Characterization and Performance Analysis of a TOAD Switch Employing a Dual Control Pulse Scheme in High-speed OTDM Demultiplexer", *IEEE Commun. Lett.*, 12, pp.: 316-318 (2008).

10. Optoelektronikos įtaisų kokybės ir patikimumo problemos

Patikima ilgalaikė sistemos veika priklauso nuo atskirų jos mazgų kokybės ir patikimumo. Sugebus vienam įtaisui, sutrinka visos sistemos veika, reikalingas laikas ir lėšos pašalinti gedimus. Todėl labai svarbu tiek sistemoje naudoti kokybiškus ir patikimus įtaisy, tiek ir numatyti jų ilgalaikiškumą.

Įtaisų gamyba susideda iš daugelio technologinių procesų (10.1 pav.). Kiekvienas jų įtakoja įtaiso veikimo charakteristikas, kurios priklauso nuo puslaidininkio kokybės, paviršinių ir tarpsluoksnių būsenų tankio, parazitinių korpuso talpų ir t. t.



10.1 pav. Puslaidininkinio įtaiso gamybos eiga.

Įtaiso kokybė ir patikimumas priklauso ne tik nuo kristalo auginimo, bet ir nuo jo tolesnio apdorojimo, surinkimo į korpusą. Šiame skyriuje trumpai apžvelgti įtaisų apdorojimo procesai ir jų įtaką kokybei.

10.1 Įtaiso apdorojimas

Užauginus įtaiso darinį (plokštelę), pradedamas įtaiso apdorojimas - gaminamas lustas. Šis procesas itin smarkiai įtakoja įtaiso kokybę ir ilgalaikiškumą.

Daugumai pn sandūros įtaisų suformuojami ominiai p ir n elektrodai. Norint sumažinti įtaisų veikimo įtampas ir kaitimo efektus, elektrodų elektrinė ir šiluminė varža turi būti kuo mažesnės, (mažesnė elektrinė varža – mažesnė Džaulio šiluma išsiskiria, maža šiluminė varža – geresnis šilumos nuvedimas)¹.

Siekiant išvengti priemaišų difuzijos įtaiso kristalas padengiamas dielektriko sluoksniu. Savasis oksido sluoksnis susiformavęs puslaidininkio paviršiuje yra nestabilus, o jo varža per maža izoliuoti įtaiso dalis nuo elektrodų. Paviršiaus padengimui dažniausiai naudojami SiO_2 , SiN_x , Al_2O_3 dielektriniai sluoksniai². Dielektriko sluoksnis elektriškai izoliuoja kristalą bei gali būti šviesą atspindintis ar neatspindintis.

Atliekant padengimą dielektriko sluoksniu pažeidžiamas puslaidininkio paviršius – atsiranda didelės nuotėkio srovės. Paviršinės nuotėkio srovės padidina tamsinę fotodiodų srovę, mažina LED ir LD

¹ A. N. AL-Omari and K. L. Lear, "VCSELs With a Self-Aligned Contact and Copper-Plated Heatsink", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 17, pp.: 1767-1769 (2007).

² Y. Z. Chiou, S. J. Chang, Y. K. Su, C. K. Wang, T. K. Lin, and Bohr-Ran Huang, "Photo-CVD SiO_2 Layers on AlGaIn and AlGaIn-GaN MOSHFET" *IEEE Trans. Electron Devices*, 50, pp.: 1748-1752 (2003).

efektyvumą, didina jų slenkstinę srovę, blogina įtaisų temperatūrinės charakteristikas, vykdo ardomąjį darbą – trumpina įtaiso veikimo trukmę^{3,4}.

Tokių įtaisų, kaip lazeriniai diodai, spinduliuotės išėjimo ir įėjimo langų atspindžio faktorius gali būti keičiamas naudojant dielektrinius sluoksnius (tai itin svarbu norint išvengti kaupinimo nuostolių bei nestabilumo dėl atsispindėjusios šviesos grįžimo į įtaiso aktyviają sritį)^{5,6,7}. Tokio sluoksnio atspindžio faktorius keičiamas keičiant sluoksnio storį. Itin didelio atspindžio faktorius sluoksniai formuojami naudojant daug dviejų dielektrinių medžiagų $\lambda/4$ sluoksnių.

10.2 Įtaiso korpusas

Įtaiso surinkimas į korpusą taip pat yra svarbus gamybos etapas: įtaiso tvirtinimas ant radiatoriaus nulemia temperatūrinės charakteristikas; spinduliuotės įėjimo ir išėjimo langai nulemia optinius nuostolius sistemoje.

Pirmasis surinkimo į korpusą etapas yra lusto tvirtinimas ant radiatoriaus ar laikiklio. Svarbu, kad tvirtinimo medžiaga (lydmetalio) būtų laidi šilumai ir drėkintų tvirtinamus paviršius^{8,9}. Taip pat neturi skirtis kristalo ir tvirtinimo medžiagos šiluminio plėtimosi koeficientai - kitaip neišvengiami mechaniniai įtempimai^{10,11}. Lydmetalio sluoksnis turi būti pakankamai plonas (storesnis sluoksnis turi didesnę šiluminę varžą).

Tvirtinant įtaiso lustą ant radiatoriaus ar laikiklio atsiranda mechaninis įtempimas bei padidėja elektrinė ir šiluminė varžos tarp lusto ir radiatoriaus bei radiatoriaus ir laikiklio. Dėl tvirtinimo atsiradęs mechaninis įtempimas vienetiniam ilgiui gali būti išreikštas taip:

$$S_{tv.} = |\alpha_{\xi 2} - \alpha_{\xi 1}|(T_{tv.} - T_a)E_{Ym}; \quad (10.1)$$

čia $\alpha_{\xi 1}$ ir $\alpha_{\xi 2}$ yra tvirtinamų paviršių šiluminio plėtimosi koeficientai, $T_{tv.}$ – tvirtinimo (litavimo) temperatūra, T_a – įtaiso veikimo aplinkos temperatūra, E_{Ym} – laikiklio (radiatoriaus) Jungo modulis (artimas puslaidininkio Jungo moduliui). Pvz., GaAs tvirtinant ant Cu radiatoriaus AuSn lydmetaliu ($T_{tv.}=290$ °C) mechaninis įtempimas 25 C temperatūroje bus $2 \cdot 10^4$ N/cm², o In pasta ($T_{tv.}=130$ °C) – $9 \cdot 10^3$ N/cm². Esant dideliame mechaniniam įtempimui įtaisas greitai genda, atsiranda dislokacijų.

Litavimo medžiagos skirstomos į kietas ir minkštas. Tvirtinant kietu lydmetaliu mechaninis įtempimas bus

³ Y. Yang, X. A. Cao, "Complete suppression of surface leakage currents in microperforated blue light-emitting diodes", *Appl. Phys. Lett.*, 95, pp.: 011109-3 (2009).

⁴ J. R. Pedrazzani, S. Maimon and G. W. Wicks, "Use of nBn structures to suppress surface leakage currents in unpassivated InAs infrared photodetectors", *Electron. Lett.*, 44, pp.: 1487-1488 (2008).

⁵ V. Palenskis, S. Pralgauskaitė, J. Matukas, J. G. Simmons, S. Smetona, R. Sobiestianskas, "Experimental investigations of the effect of the mode-hopping on the noise properties of InGaAsP Fabry-Pérot multiple-quantum-well laser diodes", *IEEE Trans. Electron Devices*, V. 50, No. 2, pp. 366-371 (2003).

⁶ H. Ukita, "A Tunable Laser Diode With a Photothermally Driven Integrated Cantilever and Related Properties", *IEEE IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 10, pp.: 622-628 (2004).

⁷ C. L. Tseng, M. J. Youh, G. P. Moore, M. A. Hopkins, R. Stevens, W. N. Wang, "Mechanism for the increased light transmission through Ni/Au/ZnO contacts on p-GaN for high power optoelectronic devices", *Appl. Phys. Lett.*, 83, pp.: 3677 – 3679 (2003).

⁸ V. Khuu, M. Osterman, A. Bar-Cohen, and M. Pecht, "Effects of Temperature Cycling and Elevated Temperature/Humidity on the Thermal Performance of Thermal Interface Materials" *IEEE Trans. Device Mater. Rel.*, 9, pp.: 379-391 (2009).

⁹ R. S. Prasher and J. C. Matayabas, Jr., "Thermal Contact Resistance of Cured Gel Polymeric Thermal Interface Material", *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.*, 27, pp.: 702-709 (2004).

¹⁰ S. Weiß, E. Zakel, and H. Reichl, "Mounting of High Power Laser Diodes on Diamond Heatsinks", *IEEE Trans. on Compon. Packag. Manuf. Technol.-Part A*, 19, pp.: 46-53 (1996).

¹¹ L. L. Mercado, G. Hsieh, and S. Girouard, "Electronic Packaging Solder Joint Reliability Assessment With a Mechanics-Based Strain Gage Methodology", *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.*, 29, pp.: 5-12 (2006).

didesnis, nes kietųjų lydmetalių lydimosi temperatūra yra aukštesnė¹². Be to, minkštieji lydmetaliai sugeria atsiradusį mechaninį įtempimą, nes jie deformuojasi neelastiškai¹³. Tačiau, ilgai naudojant, minkštieji lydmetaliai tampa nestabilūs, nes atsiranda terminis nuovargis (dėl sugerto mechaninio įtempimo). Kietieji lydmetaliai yra stabilūs ilgą laiką. Dažniausiai optoelektronikos įtaisams tvirtinti naudojamas AuSn¹².

Geras šilumos nuvedimas sumažina mechaninį įtempimą. pn sandūros šiluminė varža nustatoma matuojant sandūros įtampos pokytį keičiant srovę. pn sandūros įtampa tiesiogine kryptimi yra nulemta puslaidininkio draudžiamosios energijos tarpo, ir sandūros temperatūra kinta maždaug tiesiškai kintant aplinkos temperatūrai. Kol sandūra teka nedidelė tiesioginė srovė (Džaulio šiluma generuojama sandūroje yra nykstamai maža):

$$\frac{dV_j}{dT} = -K_j; \quad (10.2)$$

čia V_j yra sandūros įtampa, K_j – temperatūrinis sandūros koeficientas. Šis sąryšis naudojamas sandūros temperatūros kontroliavimui.

Medžiaga, iš kurios gaminami radiatoriai, visų pirma, turi būti labai laidi šilumai^{10,14,15}. Sistemose, kur naudojama aukštadažnė moduliacija, įtaisų radiatoriai ir laikikliai turi turėti didelę elektrinę varžą ir mažą dielektrinę skvarbą. Nemetaliniai radiatoriai (didelės elektrinės varžos) negali būti tiesiogiai lituojami – taigi juos reikia metalizuoti (radiatorių medžiagos gana lengvai metalizuojamos).

Optoelektronikos įtaisuose ypač svarbus yra optinis kaupinimas, nes nuo jo kokybės priklauso spinduliuotės įvedimo ir išvedimo nuostoliai¹². Šviesos spindulio diametras yra labai mažas, todėl reikalingas itin tikslus įtaisų suderinimas. Šviesos kritimo į optinę skaidulą ar bangolaidį kampas turi būti mažesnis už visiško vidaus atspindžio nuo skaidulos šerdies ir apvalkalo ribinį kampą. Didesniu kampu krintanti šviesa prarandama.

Montuojant optinę sistemą yra du justiravimo būdai: aktyvusis ir pasyvusis. Justiravimas atliekamas siekiant didžiausios spinduliuotės galios montuojant ŠD ir LD arba didžiausios fotosrovės montuojant OM ir FD. Justiravimas aktyviuoju būdu atliekamas veikiant šviesos ar lazeriniam diodui, kuris ir yra montuojamas. Justiruojant pasyviuoju būdu montuojamasis įtaisas neveikia. Pasyviojo justiravimo atveju padaroma forma, pagal kurią montuojami visi optiniai elementai.

Didelio patikimumo įtaisai naudojami optinėse ryšio sistemose yra montuojami į hermetinį korpusą. Jei įtaisų patikimumui keliami mažesni reikalavimai, naudojamas pigesnis plastikinis korpusas.

10.3 Temperatūros valdymas

Puslaidininkinių įtaisų veikimo charakteristikos yra labai jautrios temperatūrai, nes jos priklauso nuo draudžiamosios energijos tarpo, kurio vertė smarkiai kinta kintant temperatūrai^{16,17}. Įtaisų temperatūra, kai

¹² W.-H. Cheng, M.-T. Sheen, G.-L. Wang, S.-C. Wang, and J.-H. Kuang, “Fiber Alignment Shift Formation Mechanisms of Fiber-Solder-Ferrule Joints in Laser Module Packaging”, *J. Lightw. Technol.*, 19, pp.: 1177-1184 (2001).

¹³ M. O. Alam, Hua Lu, Chris Bailey, and Y. C. Chan, “Finite-Element Simulation of Stress Intensity Factors in Solder Joint Intermetallic Compounds”, *IEEE Trans. Device Mater. Rel.*, 9, pp.: 40-48 (2009).

¹⁴ Y. Wang, G.-F. Ding and S. Fu, “Highly efficient manifold microchannel heatsink”, *Electron. Lett.*, 43, pp.: 978-980 (2007).

¹⁵ M. Tsunekane and T. Taira, “Design and Performance of Compact Heatsink for High-Power Diode Edge-Pumped, Microchip Lasers”, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 13, pp.: 619-625 (2007).

¹⁶ B. Dupont, A. Dupret, E. Belhaire, and P. Villard, “FPN Sources in Bolometric Infrared Detectors”, *IEEE Sensors J.*, 9, pp.: 944-952 (2009).

reikia palaikyti pastovų spinduliuotės bangos ilgį ar spinduliuotės galią, ar spinduliuotės bangos ilgis turi būti priderintas prie sugerties krašto (optiniuose moduliatoriuose), yra kontroliuojama elektroniskai¹⁸. Temperatūros kontrolė taip pat naudojama įtaiso charakteristikoms pagerinti. Paprastai optoelektronikos įtaisų šaldymui ir temperatūrai reguliuoti naudojami termoelektriniai (Peltje) šaldymo elementai ir termistoriai^{17,19}. Didelės galios LD gali būti šaldomi ir vandeniu¹⁵.

10.4 Optoelektronikos įtaisų patikimumas

Sistemos patikimumas priklauso nuo ją sudarančių įtaisų patikimumo. Taigi atskirų įtaisų patikimumas yra svarbi jų charakteristika, kuri nulemia, ar šie įtaisai bus gaminami ir montuojami į optines ryšio sistemas. Patikimu įtaisu laikomas tas, kuris tam tikrą laiką veikia tam tikromis sąlygomis. Patikimumas nusakomas tikimybe, kad įtaisas nesuges per tam tikrą nustatytą veikimo tam tikromis sąlygomis trukmę. Įtaisas laikomas sugedusiu, kai jo parametrai nebeatitinka reikiamų.

Įtaiso patikimumui aprašyti naudojamos patikimumo ir nepatikimumo funkcijos. Patikimumo funkcija $R(t)$ nusako, kiek procentų tiriamosios grupės įtaisų veikė nustatytą laiko tarpą. Šios funkcijos vertė laiko momentu 0 yra lygi 1, o laiko momentu ∞ - 0. Jei nepatikimumo funkciją pažymėtume $F(t)$, tai

$$R(t) + F(t) = 1. \quad (10.3)$$

Nepatikimumo funkcija nusako tikimybę įtaisu sugesti per laiko tarpą t – tai yra sugedimo tikimybės pasiskirstymo funkcija (10.2 pav.). Sugedimo tikimybės tankis nusako pasiskirstymo funkcijos augimo spartą:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt}. \quad (10.4)$$

Tikimybė, kad įtaisas suges per laiko intervalą nuo t iki $t+dt$:

$$P_F = R(t)\lambda_f(t)dt = f(t)dt. \quad (10.5)$$

Gedimų sparta:

$$\lambda_f(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{-dR(t)/dt}{R(t)}. \quad (10.6)$$

Pavyzdžiui, jei gedimų sparta $\lambda=0,001$, tai per vieną veikimo valandą sugenda 0,1 % įtaisų. Įtaiso gyvavimo trukmė yra laiko tarpas, kurį įtaisas veikia nuo įjungimo iki sugedimo.

Gedimų spartos priklausomybė nuo veikimo trukmės pavaizduota 10.3 pav. Šią kreivę galima suskirstyti į tris sritis: ankstyvųjų gedimų periodas, atsitiktinių gedimų periodas ir susidėvėjimo periodas. Įtaisų sugedimą ankstyvuju periodu lemia gamybiniai defektai. Ankstyvųjų gedimų periodui aprašyti naudojamas Veibulio (Weibull) skirstinys, pagal kurį sugedimo tikimybės tankis:

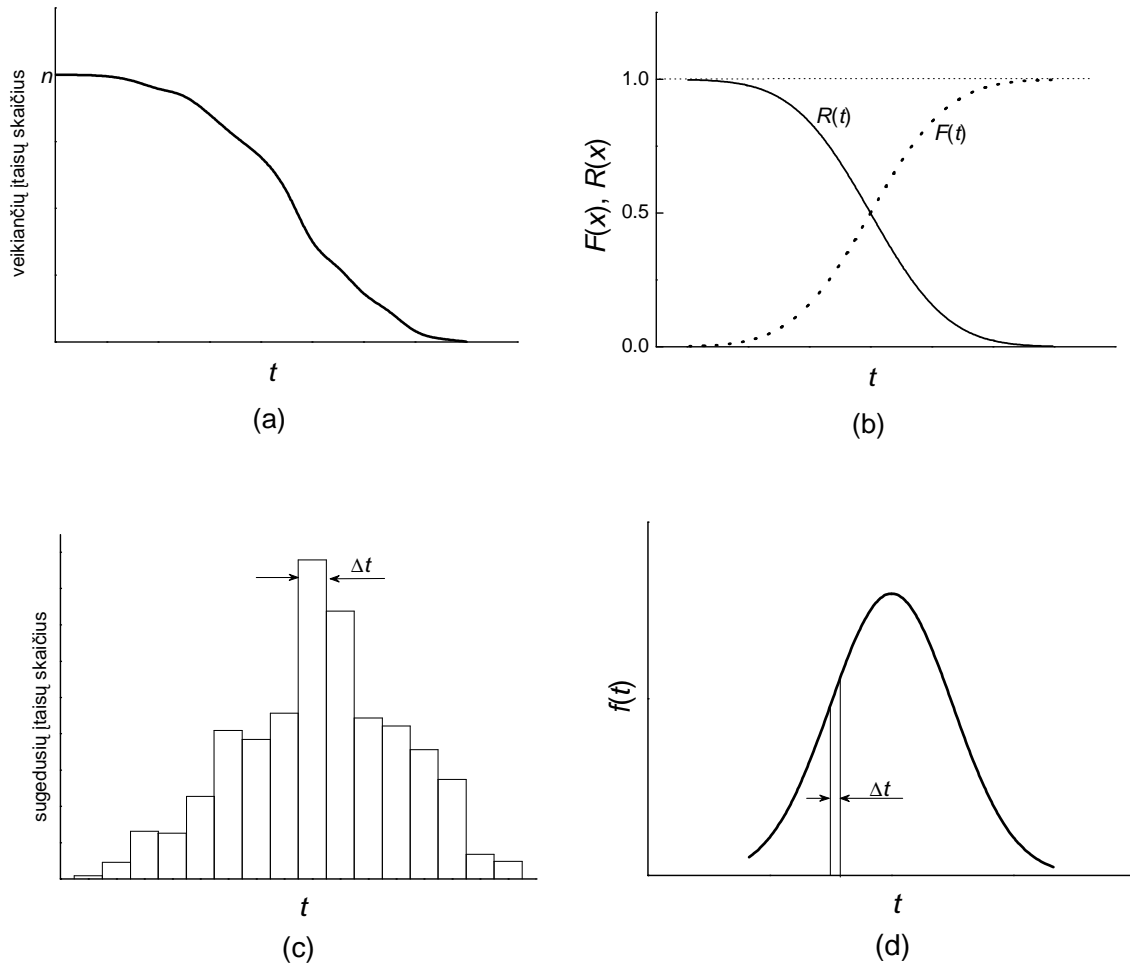
$$w(t) = \lambda_1 t^{-\alpha} \exp\left[\frac{-\lambda_1 t^{1-\alpha}}{1-\alpha}\right]; \quad (10.7)$$

čia λ_1 yra konstanta, o $0 < \alpha < 1$. Tada sugedimo sparta ankstyvuju periodu mažėja laikui bėgant:

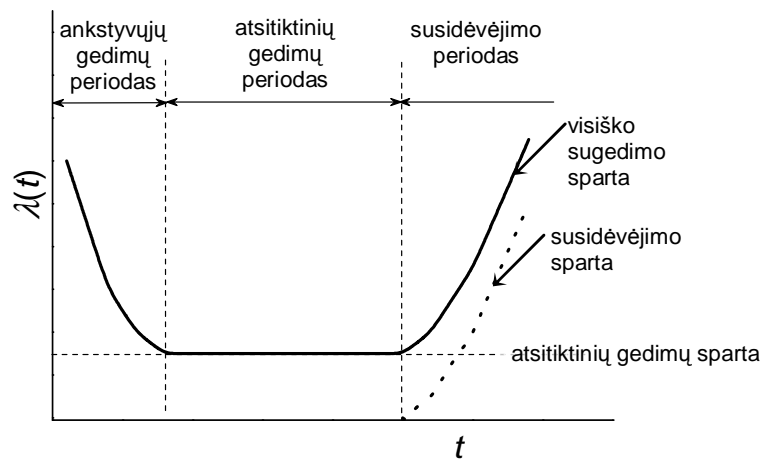
¹⁷ M. A. Belkin, Q. J. Wang, C. Pflugl, A. Belyanin, S. P. Khanna, A. G. Davies, Ed. H. Linfield, and F. Capasso, "High-Temperature Operation of Terahertz Quantum Cascade Laser Sources", *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 15, pp.: 952-967 (2009).

¹⁸ Y. Zhang, J. Christofferson, A. Shakouri, G. Zeng, J. E. Bowers, and E. T. Croke, "On-Chip High Speed Localized Cooling Using Superlattice Microrefrigerators", *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.*, 29, pp.: 395-401 (2006).

¹⁹ H. Lv, Y. Yu, D. Huang, and T. Shu, "A Fast Optical Wavelength-Tunable Transmitter With a Linear Thermoelectric Cooler Driver", *IEEE Electron Device Lett.*, 30, pp.: 353-355 (2009).



10.2 pav. Veikiančių įtaisų skaičiaus kitimas ilgėjant veikimo trukmei (a), patikimumo ($R(t)$) ir nepatikimo ($F(t)$) funkcijos (b), sugedusių įtaisų skaičiaus per trukmę Δt histograma (c) ir įtaiso sugedimo tikimybės tankis (d).



10.3 pav. Sugedimo sparta.

$$\lambda = \lambda_1 t^{-\alpha}. \quad (10.8)$$

Ankstyvųjų gedimų periodas paprastai eliminuojamas atliekant brokuojamąjį bandymą.

Kai $\alpha=0$, Veibulio skirstinys tampa eksponentiniu, kuris aprašo įtaisų sugedimo spartą nuostoviu atsitiktinių gedimų periodu. Eksponentinio skirstinio atveju gedimų tikimybės tankis:

$$w(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad (10.9)$$

o sugedimų sparta yra lygi konstantai (10.3 pav.).

Įtaisų gedimui susidėvėjimo periodu bei paspartinto sendinimo eksperimentų rezultatams aprašyti naudojamas lognormalusis skirstinys. Šiuo atveju sugedimų spartos natūrinis logaritmas yra pasiskirstęs pagal normalųjį dėsnį, o sugedimo tikimybės tankis:

$$w(t) = \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(\ln t - \mu)^2}{\sigma^2}\right]; \quad (10.10)$$

čia μ ir σ yra teigiamos konstantos.

10.4.1 Patikimumo įvertinimas

Aptariami optoelektronikos įtaisai yra netaisomi įtaisai – jų veikimo trukmė yra lygi veikimo iki sugedimo trukmei. Taigi reikia nustatyti šių įtaisų patikimumą jų veikimo sąlygomis. Šviesos diodai paprastai veikia esant fiksuotai srovei, o lazeriniai – fiksuotai spinduliuotės galiai. Įtaisui senėjant, ŠD spinduliuotės galia mažėja, o LD spinduliuotės galia palaikoma pastovi, t. y. didėja srovė reikalinga tai pačiai spinduliuotės galiai gauti. ŠD senėjimui įvertinti naudojamas jų spinduliuotės galios kitimas esant fiksuotai maitinimo srovei, o LD – maitinimo srovės kitimas fiksuotai spinduliuotės galiai. Fotodiodai veikia esant fiksuotai atvirkštinei įtampai (arba be jokios įtampos). Atgalinės nuotėkio srovės vertė (tamsinė srovė) yra naudojama FD senėjimui įvertinti. Moduliatorių, veikiančių esant užtvariniam priešįtampiui, senėjimui įvertinti naudojama tamsinė srovė arba nykimo santykis.

Optoelektronikos įtaisų parametrai paprastai prieš visiškai sugesdami blogėja lėtai ir tolygiai. Dažniausiai naudojami sugedimo kriterijai:

- ŠD spinduliuotės galios sumažėjimas 1 dB;
- LD srovės padidėjimas 1,5 karto;
- 10 kartų išaugusi fotodiodo tamsinė srovė.

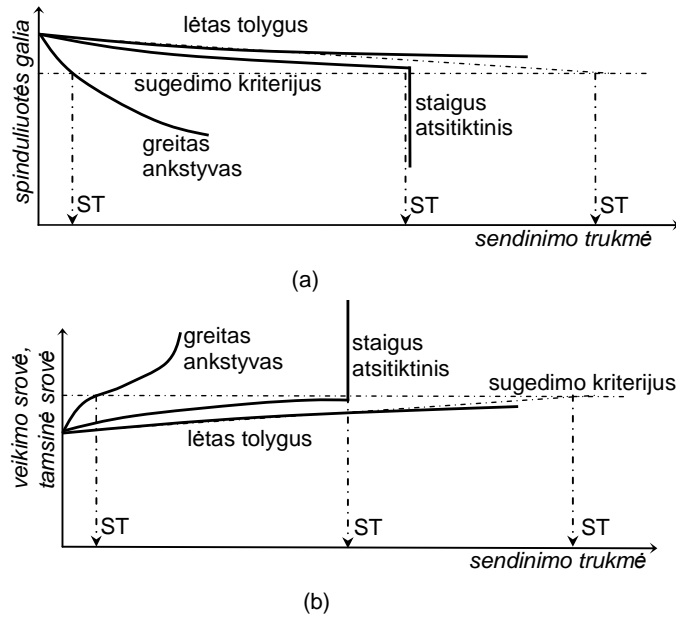
Įtaisų sugedimo trukmė įvertinama atlikus senėjimo bandymą (10.4 pav.). Iš tyrimo duomenų taip pat apskaičiuojamos gedimų pasiskirstymo ir patikimumo funkcijos.

Veikimo iki sugedimo trukmė pavaizduojama grafiškai, kaip parodyta 10.5 pav. Iš šio grafiko įvertinama veikimo iki sugedimo trukmės mediana (t_m - trukmė, per kurią sugedo pusė tiriamųjų įtaisų) bei vidutinis kvadratinis nuokrypis, taip pat nustatoma gedimų sparta.

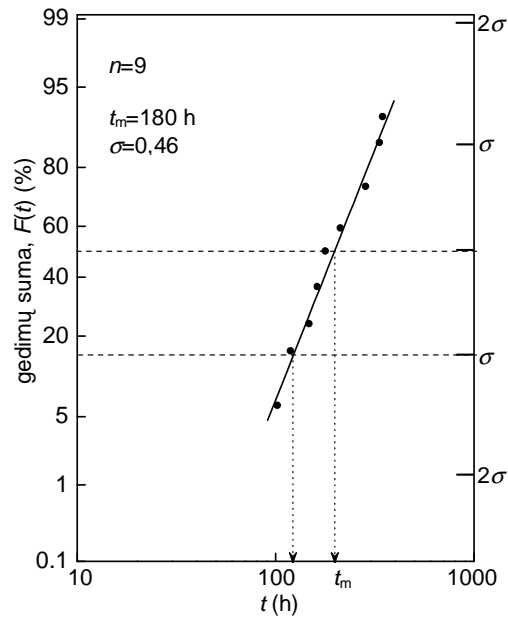
Yra keletas metodų tirti įtaisų patikimumą:

- ilgalaikio patvarumo bandymas;
- paspartinto senėjimo bandymas;
- didelės įtampos bandymas;
- tolydžios įtampos bandymas;
- mažos įtampos bandymas;
- aplinkos bandymas ir kt.

Svarbiausia šių bandymų užduotis yra nustatyti įtaisų patikimumą realiomis jų veikimo sąlygomis. Svarbu



10.4 pav. Būdingos optoelektronikos įtaisų senėjimo kreivės: (a) ŠD ir LD fiksuotos srovės senėjimas, (b) LD fiksuotos spinduliuotės galios senėjimas, FD ir OM (ST – sugedimo trukmė).



10.5 pav. Lognormaliojo skirstinio naudojimas patikimumo analizei

tinkamai parinkti patikimumo bandymų sąlygas, nes įtaisų sugedimo mechanizmai yra skirtingi skirtingomis veikimo sąlygomis. Paprastai patikimumo tyrimai atliekami paspartinto senėjimo sąlygomis, kuriomis sugedimo mechanizmai yra tie patys, kaip ir normaliomis įtaiso veikimo sąlygomis. Tada galioja ši lygybė:

$$\Delta D = \Delta S t ; \quad (10.11)$$

kur ΔD yra gedimų skaičius, ΔS - įtampos dydis, t - senėjimo trukmė. Senėjimo trukmė gali būti sumažinta didinant įtampą. Bet tik tose ribose, kuriose išlieka tie patys įtaiso sugedimo mechanizmai, t. y. normaliomis įtaiso veikimo sąlygomis ir paspartinto senėjimo sąlygomis turi galioti tas pats sugedimo

tikimybės skirstinys. Tada įtaiso veikimo iki sugedimo trukmę įprastomis veikimo sąlygomis, t_1 , galime apskaičiuoti taip:

$$t_1 = At_2; \quad (10.12)$$

čia t_2 yra veikimo iki sugedimo trukmė paspartinto senėjimo sąlygomis, A – senėjimo spartinimo faktorius. Jei sendinimo parametras yra tiksliai temperatūra, tai empiriškai gauta sugedimo trukmės mediana (STM) yra susieta su temperatūra Arenijaus (Arrhenius) sąryšiu:

$$STM(T) = A_T \exp\left(\frac{E_a}{k_B T}\right); \quad (10.13)$$

čia E_a yra aktyvacijos energija, A_T – konstanta (jei kiti sendinimo parametrai yra konstantos). Tokiu pačiu būdu patikimumo charakteristikos susijusios ir su kitu bet kuriuo sendinimo parametru (įtampa):

$$STM(T) = A_{\text{įtampa}} \Delta S^{-m}; \quad (10.14)$$

čia S yra įtampos dydis, konstanta m yra didesnė už nulį. Sugedimo spartą įprastomis veikimo sąlygomis λ_1 , kai sugedimo sparta paspartinto senėjimo sąlygomis yra λ_2 , galima apskaičiuoti taip:

$$\lambda_1(t) = \frac{1}{A} \lambda_2(t). \quad (10.15)$$

Tiesiogine kryptimi veikiantiems įtaisams (ŠD ir LD) naudojamas fiksuotos srovės (srovė ir temperatūra) arba fiksuotos galios (spinduliuotės galia ir temperatūra) sendinimas (10.4 pav.). Fiksuotos įtampos (įtampa ir temperatūra) sendinimas naudojamas užtvarine kryptimi veikiantiems FD ir OM.

Kita svarbi patikimumo bandymų užduotis (po gyvavimo trukmės nustatymo) yra nustatyti įtaiso gedimo mechanizmus, fizikines priežastis. Išaiškinus senėjimo procesus galima sukurti ilgalaikiškesnius įtaisus, užkirsti kelią gedimo procesų vystymuisi.

Atliekant paspartinto senėjimo tyrimą ištiriama atsitiktinai parinkta įtaisų grupė. Šis metodas yra ardomasis – tirtieji įtaisai sugadinami, tyrimai atliekami neįprastomis įtaiso veikimo sąlygomis, rezultatai yra statistiniai. Kitas metodas įvertinti optoelektroninių įtaisų ilgaamžiškumą yra žemo dažnio triukšmo spektroskopija. Tai jautrus, neardomasis ir spartus puslaidininkinių įtaisų patikimumo įvertinimo būdas, atliekamas įprastomis įtaiso veikimo sąlygomis. Kadangi triukšmo intensyvumas ir pobūdis yra susiję su puslaidininkinių darinių defektiškumu – įvairūs defektai ir priemaišos lemia didesnę triukšmą, o taip pat įtakoja spartesnę įtaisų gedimą, tai triukšmo charakteristikų analizė leidžia įvertinti įtaiso ilgaamžiškumą bei atskleisti gedimo mechanizmus bei fizikines priežastis^{20,21,22,23,24}.

10.5 pn sandūros įtaisų senėjimo priežastys

Įtaiso patikimumą nulemia silpniausia jo dalis. Patikimumas priklauso tiek nuo medžiagos, tiek nuo technologinių gamybos procesų. Senėjimo mechanizmus galima suskirstyti į lemiančius greitą ankstyvą

²⁰ L. K. J. Vandamme, "Noise as a Diagnostic Tool for Quality and Reliability of Electronic Devices", *IEEE Trans. Electron Devices*, 41, pp.: 2116-2187 (1994).

²¹ B. K. Jones, "Electrical noise as a reliability indicator in electronic devices and components", *IEE Proc.-Circuits Devices Syst.*, 149, pp.: 13-22 (2002).

²² S. Pralgauskaitė, V. Palenskis, J. Matukas, "Fluctuations of optical and electrical parameters of distributed feedback lasers and their reliability", *Fluctuations and Noise Lett.* V. 4, No. 2, pp. L365-L374 (2004).

²³ S. Pralgauskaitė, V. Palenskis, J. Matukas, J. Petrusis, G. Kurilėik, „Noise characteristics and reliability of light emitting diodes based on nitrides“, *Fluctuations and Noise Lett.* V. 7, No. 3, pp. L367-L378 (2007).

²⁴ S. Pralgauskaitė, V. Palenskis, J. Matukas, A. Vizbaras, „Noise characteristic and quality investigation of ultrafast avalanche photodiodes“ *Fluctuations and Noise Lett.* V. 7, No. 3, pp. L379-L389 (2007).

sugedimą, staigų atsitiktinį sugedimą po tam tikro veikimo laiko ir palaipsni senėjimą. Ankstyvą LD ir ŠD sugedimą lemia^{25,26}:

- dislokacijų augimas^{27,28,29,30};
- paslėptojo įvairialyčio darinio sugedimas^{31,32};
- savųjų atomų nusėdimas.

Staigų LD ir ŠD sugedimą po tam tikro laiko tarpo lemia^{25,26}:

- lydmetaliu nestabilumas;
- elektrodų sugedimas³³;
- katastrofinis optinis ardymas³⁴;
- veidrodžių oksidacija.

Lėtą palaipsni lazerinių ir šviesos diodų senėjimą nulemia^{25,26}:

- paslėptojo įvairialyčio darinio gedimas^{22,31,32};
- taškinių defektų daugėjimas^{23,29,35}.

Pagrindiniai fotodiodų ir optinių moduliatorių ankstyvo sugedimo mechanizmai:

- dielektrinio sluoksnio pramušimas;
- elektrodų sugedimas;
- mikroplazmos susidarymas^{36,37}.

Staugus FD ir OM sugedimas po laiko tarpo įvyksta dėl pn sandūros suirimo paviršiuje, o lėtas senėjimas – dėl paviršinės nuotėkio srovės didėjimo^{24,38}.

Įtaisų, veikiančių esant tiesioginei įtampai, pagrindiniai senėjimą skatinantys faktoriai yra srovė ir išspinduliuojama šviesa (10.1 lentelė); užtvarine kryptimi – stiprus elektrinis laukas pn sandūroje

²⁵ L. A. Johnson, “Laser diode burn-in and reliability testing”, *IEEE Opt. Commun.*, 44, pp.: S7-S10 (2006).

²⁶ S. Buso, G. Spiazzi, M. Meneghino, and G. Meneghesso, “Performance Degradation of High-Brightness Light Emitting Diodes Under DC and Pulsed Bias”, *IEEE Trans. Device Mater. Rel.*, 8, pp.: 312-322 (2008).

²⁷ M. Rossetti, T. M. Smeton, W.-S. Tan, M. Kauer, S. E. Hooper, J. Heffernan, H. Xiu, C. J. Humphreys, “Degradation of InGaN/GaN laser diodes analyzed by microphotoluminescence and microelectroluminescence mappings”, *Appl. Phys. Lett.*, 92, pp.: 151110-3 (2008).

²⁸ S. Tomiya, T. Hino, S. Goto, M. Takeya, and M. Ikeda, “Dislocation Related Issues in the Degradation of GaN-Based Laser Diodes”, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, 10, pp.: 1277-1286 (2004).

²⁹ Y. Sun, T. Yu, H. Zhao, X. Shan, X. Zhang, Z. Chen, X. Kang, D. Yu, G. Zhang, “Microanalyses of the reverse-bias leakage current increase in the laser lift off GaN-based light emitting diodes”, *J. Appl. Phys.*, 106, pp.: 013101-4 (2009).

³⁰ B. Monemar, B. E. Sernelius, “Defect related issues in the “current roll-off” in InGaN based light emitting diodes”, *Appl. Phys. Lett.*, 91, pp.: 181103-3 (2007).

³¹ G. Letal, S. Smetona, R. Mallard, J. Matukas, V. Palenskis, S. Pralgauskaitė, “Reliability and Low-Frequency Noise Measurements of InGaAsP MQW Buried-Heterostructure Lasers”, *J. Vac. Sci. Technol.*, V. A20, pp. 1061-1066 (2002).

³² H. Ichikawa, S. Matsukawa, K. Hamada, N. Ikoma, T. Nakabayashi, “Electrostatic-discharge-induced degradation of 1.3 μm AlGaInAs/InP buried heterostructure laser diodes”, *J. Appl. Phys.*, 106, pp.: 083101-3 (2009).

³³ H. Kim, H. Yang, C. Huh, S.-W. Kim, S.-J. Park, and H. Hwang, “Electromigration-induced failure of GaN multi-quantum well light emitting diode”, *Electron. Lett.*, 36, pp.: 908-910 (2000).

³⁴ H. Y. Ryu, K. H. Ha, S. N. Lee, K. K. Choi, T. Jang, J. K. Son, J. H. Chae, S. H. Chae, H. S. Paek, Y. J. Sung, T. Sakong, H. G. Kim, K. S. Kim, Y. H. Kim, O. H. Nam, and Y. J. Park, “Single-Mode Blue-Violet Laser Diodes With Low Beam Divergence and High COD Level”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 18, pp.: 1001-1003 (2006).

³⁵ L. Marona, P. Wisniewski, P. Prystawko, I. Grzegory, T. Suski, S. Porowski, P. Perlin, R. Czernecki, M. Leszczynski, “Degradation mechanisms in InGaN laser diodes grown on bulk GaN crystals”, *Appl. Phys. Lett.*, 88, pp.: 201111-3 (2006).

³⁶ H. Mawatari, M. Fukuda, K. Kato, T. Takeshita, M. Yuda, A. Kozen, and H. Toba, “Reliability of Planar Waveguide Photodiodes for Optical Subscriber Systems”, *J. Lightw. Technol.*, 16, pp.: 2428-2434 (1998).

³⁷ A. Osinsky, M.S. Shur, R. Gaska, and Q. Chen, “Avalanche breakdown and breakdown luminescence in pn - n GaN diodes”, *Electron. Lett.*, pp.: 691-692 (1998).

³⁸ Y. Z. Chiou, “Leakage Current Analysis of Nitride-Based Photodetectors by Emission Microscopy Inspection”, *IEEE Sensors J.*, 8, pp.: 1506-1510 (2008).

10.1 lentelė. Pagrindinės lazerinių ir šviesos diodų (pn sandūros įtaisų, veikiančių esant tiesioginei įtampai) senėjimo priežastys.

Įtaiso dalis	Priežastis	Skatinantis faktorius
Vidinė sritis	dislokacijos, atomų nusėdimas	srovė, aplinkos temperatūra (šviesa ir šiluma)
Paviršius, veidrodžiai	oksidacija	šviesa, drėgmė
Elektrodai	metalo difuzija, lydinių reakcija	srovė, aplinkos temperatūra (šiluma)
Tvirtinimas	lydmetaliu nestabilumas (reakcija ir migracija)	srovė, aplinkos temperatūra (šiluma)
Radiatorius	atsiskyrimas nuo metalo	srovė, aplinkos temperatūra (šiluma)
Paslėptojo įvairialyčio darinio paviršius	defektai paslėptojo įvairialyčio darinio paviršiuje	srovė, aplinkos temperatūra (šiluma)

10.2 lentelė. Pagrindinės fotodiodų ir optinių moduliatorių (pn įtaisų, veikiančių esant atvirkštinei įtampai) senėjimo priežastys.

Įtaiso dalis	Priežastis	Skatinantis faktorius
pn sandūra: vidinė sritis	mikroplazmos susidarymas	elektrinis laukas (srovė), aplinkos temperatūra (šiluma)
pn sandūra: sąlytis, paviršius	paviršinės būsenos, nuskurdintojo sluoksnio siaurėjimas	elektrinis laukas (srovė), nuotėkio srovės, aplinkos temperatūra (šiluma)
Dielektrinis sluoksnis	žema dielektrinio sluoksnio kokybė	elektrinis laukas (srovė), aplinkos temperatūra (šiluma)
Elektrodai	metalo difuzija, lydinių reakcija	srovė, aplinkos temperatūra (šiluma)

(10.2 lentelė). Stiprus elektrinis laukas pn sandūroje lemia nevienalytį srovės tekėjimą sandūroje: srityse, kur srovė didesnė, prasideda sandūros ardymas. Šie senėjimo mechanizmai pasireiškia įvairios sandaros įtaisuose: tūriniuose, kvantiniuose, įtemptuose kvantiniuose dariniuose.

10.5.1 Dislokacijų tinklelio augimas

Pagrindinė ŠD ir LD staigaus sugedimo priežastis yra dislokacijų susidarymas, rečiau savųjų atomų nusėdimas. Dislokacijos puslaidininkiniame darinyje veikia kaip injekuotų krūvininkų ir išspinduliuotos šviesos sugėrikliai. Dislokacijos gali būti aptiktos kaip tamsiosios linijos defektas^{39,40,41}.

Optoelektronikos įtaisuose dislokacijų tinklelis $\langle 100 \rangle$ kryptimi auga dėl nespinduliuojamosios rekombinacijos skatinamos defektų migracijos³⁸. Energija, išlaisvinta nespinduliuojamosios rekombinacijos per įvairius defektus (dislokacijas, taškinius defektus) metu emituojant daugelį fononų, pavirsta gardelės virpesiais ir taip sukelia žematemperatūrinį defektų judėjimą. Šiuo atveju defektai yra priemaišiniai atomai ar vakansijos. Sugeriant priemaišinį atomą ar emituojant vakanciją dislokacija ilgėja ir taip sukuriama dislokacijų tinklelis. Dislokacijų augimo sparta priklauso nuo medžiagos: spartus dislokacijų augimas dažnai stebimas III-V dariniuose su sąlyginai dideliu draudžiamosios energijos tarpu (AlGaAs/GaAs) spinduliuojantiems matomą šviesą (InGaAs(P)/InP dariniuose dislokacijų augimo sparta labai maža). Pagrindinė dislokacijų atsiradimo priežastis yra defektai padėkle bei sukibimo klaidos augant kristalui^{27,28,30,40,41}. Taigi dislokacijų tankis gali būti sumažintas tobulinant kristalų auginimo technologiją bei naudojant kokybiškus mažai defektų turinčius padėklus.

³⁹ D. K. McElfresh, L. D. Lopez, D. Vacar, "Reverse-bias emission sheds light on the failure mechanism of degraded vertical-cavity surface-emitting lasers", *J. Appl. Phys.*, 99, pp.: 123113-8 (2006).

⁴⁰ M. Yoshikawa, R. Sugie, M. Murakami, T. Matsunobe, K. Matsuda, H. Ishida, "Defect characterization of Si-doped GaN films by a scanning near-field optical microscope-induced photoluminescence", *Appl. Phys. Lett.*, 88, pp.: 161905-3 (2006).

⁴¹ N. Pauc, M. R. Phillips, V. Aimez, D. Drouin, "Carrier recombination near threading dislocations in GaN epilayers by low voltage cathodoluminescence", *Appl. Phys. Lett.*, 89, pp.: 161905-3 (2006).

Dislokacijų tinklelis $\langle 110 \rangle$ kryptimi susidaro dėl mechaninio įtempimo. Šių defektų augimo sparta priklauso nuo įtempimo dydžio. Jei mechaninis įtempimas yra didesnis nei 10^3 N/cm^3 (pvz., sąlytyje su elektrodu atsirandantis mechaninis įtempimas tekant srovei), paviršiuje ar sąlytyje atsiranda poslinkio dislokacija. Dislokacijai pasiekus aktyviąją sritį atsiranda tamsiosios linijos defektas. Sumažinti šių dislokacijų tankį galima mažinant mechaninius įtempimus, pvz., tobulinant įtaiso tvirtinimo technologiją.

Įtaisai, kuriuose stebimos dislokacijos, yra eliminuojami iš tolesnio naudojimo brokuojamuoju bandymu.

Lėtas palaipsnis senėjimas įtaisuose, kuriuose pasireiškia nespinduliuojamosios rekombinacijos aktyvuota defektų migracija, yra nulemtas taškinių defektų atsiradimo.

Savųjų atomų nusėdimas dažniausiai stebimas keturgubuose lydiniuose ir pasireiškia tamsiojo taško defektais. Indžio ar galio atomai nusėda ir veikia kaip spinduliuotės sugėrikliai.

10.5.2 *pn* įtaisų elektrodų gedimas

pn įtaisų elektrodai paprastai yra ominiai kontaktai. Puslaidininkį padengus metalu puslaidininkyje susidaro energinis barjeras, kurio įtaką reikia panaikinti, kad kontaktas būtų ominis. Kontaktai gali būti lydinio (pvz., AuZnNi) arba Šotkio (Schottky) kontaktai⁴².

Lydinio tipo kontaktuose, siekiant sumažinti energinį barjerą, naudojamas metalas turi gerai reaguoti su puslaidininkiu. Įtaisui veikiant lydinio reakcija su puslaidininkiu tęsiasi ir kontaktai senėja įprastomis įtaiso veikimo sąlygomis: metalai difunduoja į puslaidininkinio darinio vidų, susidaro atskiri metalas-III ir metalas-V sluoksniai (metalas-III yra kontakto lydinys, o V medžiaga yra įtaiso darinio medžiaga)⁴³. Metalas-V sluoksnio varža yra palyginti didelė su metalas-III sluoksnio. Taigi srovė teka siaurais metalas-III kanalais – susidaro šios medžiagos iškyšuliai įtaiso darinyje. Kai lydinio kyšuliai pasiekia aktyviąją sritį, *pn* sandūra iš dalies suardoma, stebimi tamsiojo taško defektai. Iš kontakto difundavę metalo atomai veikia kaip nespinduliuojamosios rekombinacijos centrai ir mažina įtaiso efektyvumą⁴³. Lydinio iškyšuliams augant taip pat atsiranda mechaninis įtempimas ir susidaro poslinkio dislokacijos.

Formuojant Šotkio kontaktą barjeras tarp elektrodo ir puslaidininkio sumažinamas stipriai legiruoju puslaidininkį. Šotkio kontaktui naudojamas metalas turi sudaryti nepaslankų sąlytį su puslaidininkiu. Normaliomis veikimo sąlygomis Šotkio kontaktai (pvz., Ti/Pt/Au) yra gana stabilūs dėl nepaslankaus sąlyčio. Tik esant ypatingoms veikimo sąlygoms (pvz., aplinkos temperatūra 200°C , srovės tankis 30 kA/cm^2) vyksta kontakto metalų difuzija.

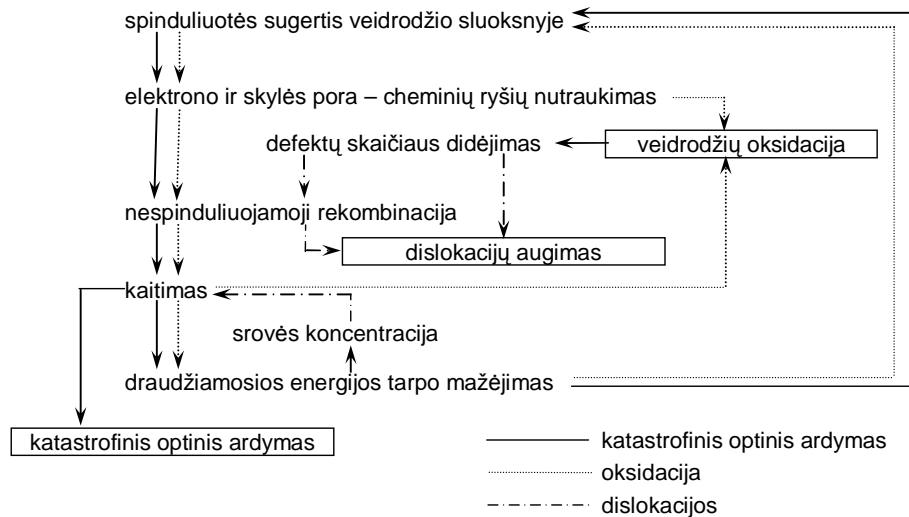
10.5.3 Katastrofinis optinis ardymas

Veidrodžių sugedimo problemos aktualiausias yra lazeriniams diodams, nes optinės galios tankis ties veidrodžiais būna itin didelis (keli megavatai kvadratiniam centimetrui)^{34,44}. Veidrodžių sugedimas yra sukiamas optinės spinduliuotės sugerties juose. Fotoindukuotieji elektronai ir skylės nespinduliuojamuoju būdu rekombinuoja veidrodžio sluoksnyje ir sukelia kaitimą. Kaitimas papildomai sumažina draudžiamosios energijos tarpą ir padidina spinduliuotės sugertį. Toks teigiamas grįžtamasis ryšys (10.6 pav.) skatina veidrodžio oksidavimąsi ir katastrofinį optinį ardymą (KOA). Fotoindukuotųjų elektrono ir skylės porų

⁴² M. Mikulics, M. Marso, S. Wu, A. Fox, M. Lepsa, D. Grützmacher, R. Sobolewski, and P. Kordos, "Sensitivity Enhancement of Metal–Semiconductor–Metal Photodetectors on Low-Temperature-Grown GaAs Using Alloyed Contacts", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 20, pp.: 1054-1056 (2008).

⁴³ E. Belas, R. Grill, M. Bugár, J. Procházka, P. Hlídek, P. Práus, J. Franc, and P. Höschl, "Electromigration of Mobile Defects in CdTe", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 56, pp.: 1752-1757 (2009).

⁴⁴ M. Fukuda, M. Okayasu, J. Temmyo, and J.-I. Nakano, "Degradation Behavior of 0.98- μm Strained Quantum Well InGaAs/AlGaAs Lasers Under High-Power Operation", *IEEE J. Quantum Electron.*, 30, pp.: 471-476 (1994).



10.6 pav. Teigiamas grįžtamasis veidrodžių senėjimo procesų ryšys.

susidarymas nutraukia ryšius veidrodžio sluoksnyje, tai lemia spartesnę oksidaciją. Veidrodžių oksidavimosi sparta priklauso nuo naudojamų medžiagų.

KOA įvyksta staiga temperatūrai pakilus iki puslaidininkio lydimosi temperatūros. Įvykus KOA spinduliuotės galia staiga sumažėja. Temperatūrai nukritus susidaro dislokacijų kilpa, kuri stebima kaip tamsiosios linijos defektas. Pakartotinas KOA vyksta tose srityse, kuriose spinduliuotės galios tankis pasiekia ardomąją vertę.

Veidrodžių sugedimas priklauso nuo naudojamų medžiagų: AlGaAs/GaAs dariniams būdinga spartesnė oksidacija ir didesnis kaitimas nei InGaAs(P)/InP. Spinduliuotės galia, kurią pasiekus vyksta KOA, yra žemesnė, o oksidacijos sparta didesnė tose medžiagose, kuriose vyksta nespinduliuojamosios rekombinacijos nulemta defektų migracija – daug energijos išskiriama vykstant nespinduliuojamajai rekombinacijai, taigi veidrodžių temperatūra yra aukštesnė. Lazериuose su įtemptais kvantiniais dariniais veidrodžių sugedimas yra skatinamas draudžiamosios energijos tarpo sumažėjimo.

Veidrodžių sugedimo spartą galima sumažinti nutraukiant grįžtamąjį ryšį bet kurioje iš 10.6 pav. pavaizduotų kilpų. Paprasčiausias būdas tai padaryti yra LD dariniams naudoti spinduliuotės nesugeriančias medžiagas, mažinti defektų skaičių bei naudoti darinio paviršiaus pasyvaciją prieš padengiant jį dielektrine plėvele^{44,45,46}. Gaminant spinduliuotės nesugeriančius veidrodžius veidrodžio sluoksnis turi turėti didesnę draudžiamosios energijos tarpą. Tai padaroma užauginat atitinkamą veidrodžio sluoksnį arba legiruojant priemaišomis vidinius sluoksnius. Veidrodžių padengimas dielektriko sluoksniu sumažina oksidaciją (sumažinamas veidrodžio sąlytis su oru) bei KOA tikimybę (sumažėja paviršinių būsenu skaičius).

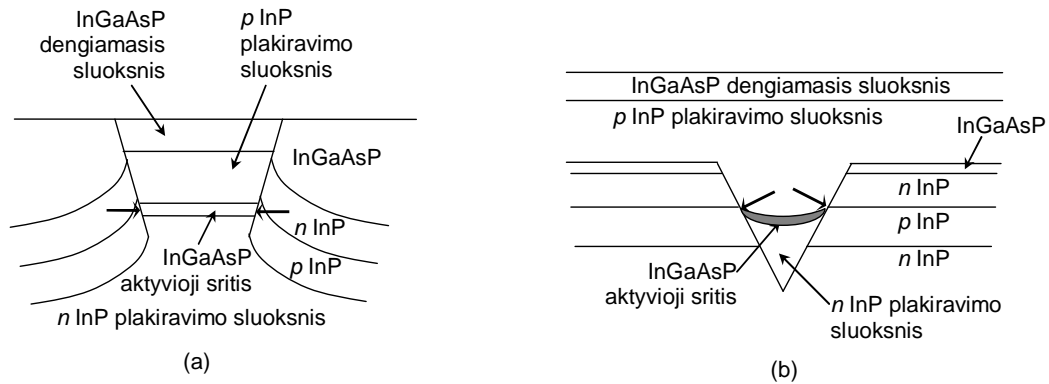
10.5.4 Paslėptojo darinio gedimas

Paslėptojo darinio paviršiaus sugedimas yra aktualus lazeriniams diodams ir kai kuriems ŠD. Galimi du paslėptojo darinio auginimo būdai:

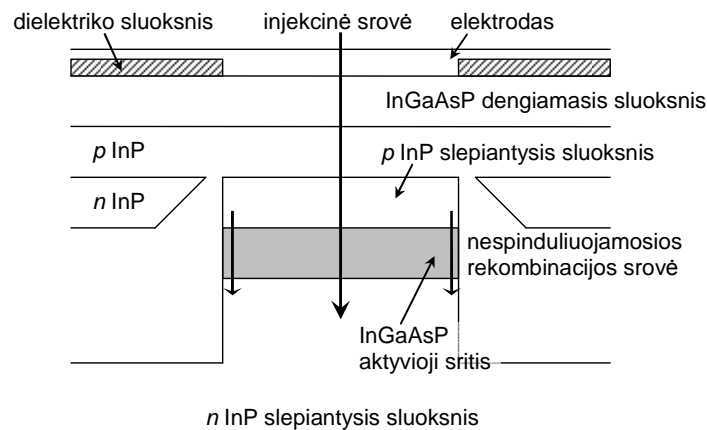
- užauginti aktyviosios srities sluoksniai nuėsdinami ir užauginami slepiantieji sluoksniai (10.7 (a) pav.);

⁴⁵ T. Kamikawa, Y. Kawaguchi, P. O. Vaccaro, S. Ito, H. Kawanishi “Highly reliable 500 mW laser diodes with epitaxially grown AlON coating for high-density optical storage”, *Appl. Phys. Lett.*, 95, pp.: 031106-3 (2009).

⁴⁶ R. W. Lambert, T. Ayling, A. F. Hendry, J. M. Carson, D. A. Barrow, S. McHendry, C. J. Scott, A. McKee, and W. Meredith, “Facet-Passivation Processes for the Improvement of Al-Containing Semiconductor Laser Diodes”, *J. Lightw. Technol.*, 24, pp.: 956-961 (2006).



10.7 pav. Paslėptieji dariniai: (a) suformuotas nuėsdinant užaugintus sluoksnius, (b) užaugintas slepiančiųjų sluoksnių griovyje (rodyklės žymi spartaus gedimo sritis).



10.8 pav. Paslėptojo įvairialyčio darinio paviršiaus sugedimas.

- aktyvioji sritis užauginama paslėptojo darinio griovyje (10.7 (b) pav.).

Paslėptojo darinio paviršiaus gedimas yra nulemtas defektų daugėjimo šiame paviršiuje – sąlytyje su slepiančiais sluoksniais^{31,32}. Šie defektai padidina nespinduliuojamosios rekombinacijos nuotėkio srovę (10.8 pav.). Paslėptojo darinio paviršiaus gedimą įtakoja įtaiso sandara: sparčiau genda paslėptojo darinio, kuris suformuotas nuėsdinant sluoksnius (10.7 (a) pav.), paviršius, nes sąlyčio paviršius buvo tiesiogiai ės dintas.

Dažniausiai pasitaikantis įtaisas su paslėptuoju dariniu yra lazerinis diodas. Pagrindinė paslėptojo darinio gedimo pasekmė yra nespinduliuojamosios rekombinacijos srovės, kuri mažina injekuotųjų krūvininkų gyvavimo trukmę, didėjimas, o tai padidina LD slenkstinę srovę. Slenkstinis krūvininkų tankis senėjimo procese išlieka pastovus, taigi pastovus išlieka ir efektyvumas (spinduliuotės priklausomybės nuo srovės polinkis). Paslėptojo darinio gedimo rezultatas: didesnė slenkstinė bei veikimo (esant fiksuotai galiai) LD srovė bei pakitęs spinduliuotės bangos ilgis. Defektų skaičiaus didėjimas paslėptojo darinio paviršiuje gali būti sumažintas tobulinant darinio auginimo technologiją ir gerinant paviršiaus kokybę.

10.5.5 Atvirkštine kryptimi veikiančių pn sandūros įtaisų gedimo priežastys

Įtaisų, veikiančių esant atvirkštinei įtampai (fotodiodų ir optinių moduliatorių), pagrindinės gendančios dalys yra pn sandūra, elektrodai, dielektriko sluoksnis tarp elektrodų ir puslaidininkio.

Kristalo paviršius ar jo sąlytis su dielektriko sluoksniu yra itin defektinga sritis, nes čia baigiasi kristalinė sandara ir atsiranda daug paviršinių būsenų bei defektų^{4,38}. Taigi darinio paviršius įtaisui veikiant genda

sparčiau nei vidiniai sluoksniai. Jei pn sandūra yra paviršiuje, tai defektų daugėjimas lemia nuotėkio srovės padidėjimą. Dalis pn sandūros elektrinio lauko tenka dielektriko sluoksniui, kuriame judrūs jonai akumuliuoja šį lauką: karštos skylės injekuojamos iš puslaidininkio į dielektriką pagal pn sandūros perimetrą – susidaro inversinis sluoksnis, o nuskurdintasis sluoksnis susiaurėja – nuotėkio srovė padidėja. Šiuo atveju nutraukus maitinimą ir palikus kuriam laikui įtaisą, nuotėkio srovė sumažėja, nes judrieji jonai pasiskirsto krūvį. Kadangi nuotėkio srovė nors ir maža (mikroamperai), bet teka pn sandūros paviršiumi, tai nuotėkio vietose srovės tankiui pasiekus kritinę ribą puslaidininkis staiga išsilydo, ir pn sandūra yra suardoma. Siekiant sumažinti paviršinių būsenų skaičių bei nuotėkio srovę per šias būsenas įtaisų paviršius yra pasyvuojamas^{47,48}.

Srityse, kur pn sandūra yra pažeista dislokacijų, labai sumažėja sandūros pramušimo įtampa ir srovė susikoncentruoja į siaurą kanalą. Ši srovė defekto vietoje sukuria mikroplazmą^{36,37}. Tai lemia voltamperinės charakteristikos nestabilumą bei triukšmus. Srovės tankiui pasiekus kritinę vertę defekto sritis išsilydo, ir pn sandūra sugadinama.

Įtaisui veikiant vyksta sąveika tarp puslaidininkio ir elektrodo. Elektrodo lydiniui su puslaidininkiu pasiekus pn sandūrą, išauga nuotėkio srovė.

Įtaisui veikiant, esant atvirkštiniam priešįtampiui, pn sandūroje ir aplink ją sukuriama labai stiprus elektrinis laukas. Paprastai elektrodas nuo puslaidininkio izoliuojamas dielektriko sluoksniu, išskyrus sritį, kur suformuotas ominis kontaktas. Dielektriko sluoksnio storis neviršija 1 μm , ir jame sukuriama stiprus elektrinis laukas. Jei sluoksnio kokybė maža, tai įvyksta elektrinis pramušimas (dažniausiai ties elektrodo kraštu, nes ten laukas stipriausias). Įvykus pramušimui padidėja nuotėkio (tamsinė) srovė. Sumažinti pramušimo tikimybę galima tobulinant gamybos technologiją.

10.6 pn sandūros įtaisų patikimumas

Šiame skyriuje aptariamos pasekmės, kurias nulemia 10.5 skyriuje aprašytos įtaisų gedimo priežastys. Taip pat pateikti įtaisų sugedimo kriterijai ir jų įvertinimo metodai.

10.6.1 Šviesos diodų patikimumas

Šviesos diodai įprastai veikia tekant pastoviai maitinimo srovei. Todėl jų sugedimas pastebimas mažėjant spinduliuotės galiai. Spinduliuotės galia paprastai mažėja dėl dislokacijų tinklelio augimo ir elektrodų gedimo^{29,30,33}. Abi šios priežastys lemia aktyviosios srities sugedimą. Šviesos diodų paspartintas sendinimas atliekamas tekant (5-30) kA/cm^2 tankio srovei (50-200) $^{\circ}\text{C}$ temperatūroje. Sugedusiu ŠD laikomas, kai jo spinduliuotės galia sumažėja 1 dB. Įprastai ŠD gyvavimo trukmė yra ($10^5 - 10^6$) h ⁴⁹.

10.6.2 Lazerinių diodų patikimumas

Lazeriniai diodai naudojami arba pastovios injekcinės srovės, arba pastovios galios veikoje. Taigi atitinkamai įvertinamas ir jų sugedimas: pirmuoju atveju sumažėjus spinduliuotės galiai, antruoju – padidėjus injekcinei srovei. Šie pakitimai atsiranda dėl padidėjusios slenkstinės srovės bei sumažėjusio efektyvumo, t. y. dėl injekuotųjų krūvininkų gyvavimo trukmės sumažėjimo (ilgo bangos ilgio spinduliuotės lazeriams iš

⁴⁷ A. Jozwikowska, K. Jozwikowski, J. Antoszewski, C. A. Musca, T. Nguyen, R. H. Sewell, J. M. Dell, L. Faraone, Z. Orman, "Generation-recombination effects on dark currents in CdTe-passivated midwave infrared HgCdTe photodiodes", *J. Appl. Phys.*, 98, pp.: 014504-11 (2005).

⁴⁸ M. R. Ravi, A. DasGupta, and N. DasGupta, "Effect of Sulfur Passivation and Polyimide Capping on InGaAs-InP PIN Photodetectors", *IEEE Trans. Electron Devices.*, 50, pp.: 532-534 (2003).

⁴⁹ <http://www.philipslumileds.com> (2009 11 16).

InGaAs(P)/InP, InGaAs/GaAs) ir vidinių optinių nuostolių išaugimo (matomos šviesos lazeriams iš AlGaAs/GaAs)⁵⁰. LD paspartinto sendinimo bandymai atliekami neviršijant 100 °C temperatūros (kitaip nei ŠD, LD veikimo temperatūra neviršija 100 °C), todėl sendinimo bandymas turi būti ilgesnės trukmės.

Perduodant optinę spinduliuotę iš siųstuvo ji turi patekti į optinę skaidulą. Jei optinės skaidulos kaupinimas yra nenuostovus, tai ir spinduliuotės persiuntimas bus nenuostovus – tai nulems žemą informacijos persiuntimo kokybę. Nenuostovus erdvinis spinduliuotės pasiskirstymas taip pat blogina optinių duomenų saugojimo įrenginių ir spausdintuvų veikimą. Taigi šviesos šaltinis turėtų pasižymėti nuostovia skersine spinduliuotės moda. Lazeriniai diodai su lūžio rodiklio nukreipimo dariniu (pvz., su paslėptuoju dariniu) spinduliuoja vieną nuostovią skersinę modą (kol neatsiranda didelių defektų). O lazerių su stiprinimo nukreipimo dariniu skersinė moda yra gana nenuostovi^{51,52}.

Informacijos siuntimo kokybę stipriai įtakoja ir išilginių modų nenuostovumas. AlGaAs/GaAs lazerių išilginių modų nenuostovumą nulemia defektai, kurie veikia kaip įsisotinantis sugėrikliai ir lemia spinduliuotės galios pulsacijas. InGaAsP/InP dariniai yra mažiau jautrūs defektams ir juose spinduliuotės galios pulsacijos nevyksta. Lazeriui senėjant keičiasi spinduliuotės bangos ilgis ir didėja spektro plotis (kiekvienos modos plotis), nes LD gedimas lemia rezonatoriaus kokybės mažėjimą. Signalų siuntimo sparta yra skirtinga skirtingiems bangos ilgiams - jei spinduliuotės spektras yra daugiamodis, tai siunčiamas impulsas bus iškraipomas (stebimas dažnio poslinkis). Taigi spartaus persiuntimo sistemose (kai persiuntimo sparta viršija 1 Gb/s) naudojami vienmodžiai lazeriniai diodai. Tačiau vienmodžiam lazeriui senėjant mažėja šoninių modų slopinimas ir pereinama į daugiamodę veiką (dėl defektų difrakcinėje gardelėje atsiradimo).

Dėl juostos užsipildymo efekto ir Džaulio šilumos išsiskyrimo kinta lazerinių diodų spinduliuotės bangos ilgis. Lazeriui senėjant pastovios galios veikoje paprastai stebimas bangos ilgio didėjimas, nes didėja injekcinė srovė reikalinga tai pačiai spinduliuotės galiai pasiekti, taigi didėja ir išsiskirianti Džaulio šiluma. Lazeriui senėjant pastovios injekcinės srovės veikoje spinduliuotės bangos ilgis trumpėja dėl vyraujančio juostos užsipildymo efekto, kuris lemia slenkstinės srovės didėjimą. Lazeriui senėjant slenkstinis krūvininkų tankis išlieka toks pat, todėl didėja slenkstinė srovė, bet spinduliuotės priklausomybės nuo srovės polinkis išlieka nepakitęs⁵⁰. Tačiau atsiradus itin daug defektų slenkstinis krūvininkų tankis ima keistis dėl išaugusių vidinių optinių nuostolių. Padidėjus krūvininkų tankiui aktyviojoje srityje, pasikeičia aktyviojo sluoksnio lūžio rodiklis ir dėl to pakinta spinduliuotės bangos ilgis.

Lazeriniam diodui senėjant auga spinduliuotės galios triukšmas. Galios fliktuacijos yra svarbios analoginėse ryšio sistemose naudojančiose amplitudinę moduliaciją. Padidėjęs spinduliuotės galios triukšmas yra susijęs ir su padidėjusiu fazės triukšmu. Lazeriui senėjant spektro plotis didėja dėl didėjančio $1/f$ triukšmo, vidinių optinių nuostolių.

Lazerinių diodų ilgaamžiškumas ir gedimo priežastys priklauso nuo jų gamybos medžiagos ir sandaros. Ilgabangių InGaAsP/InP LD su paslėptuoju dariniu ir Šotkio kontaktais pagrindinė blogėjimo priežastis yra paslėptojo darinio paviršiaus blogėjimas^{31,32}. Nepaisant to, šie LD yra pagrindiniai šviesos šaltiniai optinio ryšio sistemose.

InGaAs/GaAs LD su įtemptosiomis kvantinėmis duobėmis spinduliuojantys 980 nm naudojami kaip

⁵⁰ M. Meneghini, N. Trivellin, K. Orita, M. Yuri, D. Ueda, E. Zanoni, and Gaudenzio Meneghesso, "Analysis of the Role of Current, Temperature, and Optical Power in the Degradation of InGaN-Based Laser Diodes", *IEEE Trans. Electron Devices.*, 56, pp.: 222-228 (2009).

⁵¹ K. C. Kim, D.-K. Jang, J. I. Lee, T. G. Kim, W. W. Lee, J. H. Kim, E. J. Yang, B. J. Koo, and I. K. Han, "High-Power Single-Mode 1.3- μ m InGaAsP-InGaAsP Multiple-Quantum-Well Laser Diodes With Wide Apertures", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 21, pp.: 1438-1440 (2009).

⁵² J. A. Gupta, P. J. Barrios, G. C. Aers and J. Lapointe, "1550 nm GaInNAsSb distributed feedback laser diodes on GaAs", *Electron. Lett.*, 44 pp.: 578-579 (2008).

kaupinimo šaltiniai erbiu legiruotiems skaiduliniams stiprintuvams. Šiam tikslui reikalinga didelė galia (>100 mW), todėl pagrindinė tokių lazerių sugedimo priežastis, jei veidrodžiai nebuvo pasyvuoti, yra KOA³⁴.

AlGaAs/GaAs lazeriai bei LD spinduliuojantys matomą šviesą yra linkę gesti dėl nespinduliuojamąją rekombinaciją lemiančių defektų migracijos^{23,29,35}.

Šiuolaikinių lazerinių diodų gyvavimo trukmė yra $(10^5 - 10^6)$ h^{53,54}.

10.6.3 Fotodiodų patikimumas

pn sandūros įtaisai veikiantys esant atvirkštinei įtampai paprastai genda lėčiau nei veikiantys esant tiesioginei įtampai dėl mažesnės energijos skatinančios senėjimo procesus. Fotodiodų charakteristikų blogėjimą daugiausia lemia didėjanti nuotėkio srovė – didėja tamsinė srovė^{55,56}. Taigi tamsinė srovė yra fotodiodų kokybės vertinimo kriterijus. Fotodiodų veikimo temperatūra yra gana didelė, palyginus su ŠD ir LD. Todėl atliekant paspartinto sendinimo bandymą naudojama $(100-300)$ °C temperatūra bei atgalinė srovė ar įtampa. Fotodiodų sugedimo kriterijai priklauso nuo konkrečios jų naudojimo srities. Tai gali būti tamsinė srovė – pvz., jai išaugus dviem eilėmis FD laikomas sugedusiu. Įprastai FD gyvavimo trukmė viršija 10^6 h.

10.6.4 Optinių moduliatorių patikimumas

Abiejų tipų, sugerties ir fazės, moduliatorių sugedimo priežastys yra panašios kaip ir fotodiodų. Energija yra maža, taigi ir energijos spartinami gedimo veiksniai yra silpni - moduliatorių ilgaamžiškumas yra gana didelis. Sugerties moduliatoriuose teka kelių miliamperų srovė. Srovės tekėjimas dažnai yra nevienalytis: didesnis srovės tankis yra optinio įėjimo pusėje. Taigi šioje pusėje ir įvyksta sugedimas. Sugedimo laipsnis įvertinamas matuojant tamsinę srovę. Moduliatorių veikimo trukmė viršija 10^5 valandų.

10.7 pn įtaisų surinkimo į korpusą įtaka jų ilgaamžiškumui

Optoelektroniniai pn sandūros įtaisai paprastai yra montuojami ant radiatoriaus bei į korpusą. Montavimas, dažniausiai tvirtinimas, nulemia papildomas įtaiso sugedimo priežastis. Taip pat gali būti naudojami ir papildomi įtaisai, pvz., įtaiso temperatūrai valdyti, kurie taip pat įtakoja įtaiso ilgaamžiškumą. Visi surinkimo į korpusą technologiniai procesai gali spartinti įtaiso gedimą, todėl bendra gedimo sparta gaunama įvertinant visas šias priežastis.

Įtaisui tvirtinti naudojant minkštą lydmetali (In, Sn), jis sumažina mechaninį įtempimą, tačiau ilgai jame atsiranda įtrūkimų¹³. Kitos problemos susijusios su tvirtinimu yra lydmetali ištekėjimas, tuštumų susidarymas, lydmetali reakcija su puslaidininkiu – visi šie reiškiniai nulemia staigų įtaiso sugedimą. Ištekėjimai bei lydmetali reakcija su puslaidininkiu gali nulemti trumpą jungimą tarp įtaiso n ir p elektrodų. Terminis pavargimas ir tuštumų susiformavimas nulemia staigų įtaiso sugedimą dėl padidėjusios šiluminės ir elektrinės varžos. Susidarius nevienalyčiam srovės tekėjimui atsiranda nevienalytis srovės tankio pasiskirstymas. Minkštasis lydmetalis yra pernešamas iš srities, kur srovės tankis didelis į sritį, kur srovės

⁵³ J.-H. Han and S.-W. Park, “Wafer Level Reliability and Lifetime Analysis of InGaAsP/InP Quantum-Well Fabry–Pérot Laser Diode”, *IEEE Trans. Device Mater. Rel.*, 5, pp.: 683-687 (2005).

⁵⁴ F.-M. Lee, C.-L. Tsai, C.-W. Hu, F.-Y. Cheng, M.-C. Wu, and C.-C. Lin, “High-Reliable and High-Speed 1.3 μ m Complex-Coupled Distributed Feedback Buried-Heterostructure Laser Diodes With Fe-Doped InGaAsP/InP Hybrid Grating Layers Grown by MOCVD”, *IEEE Trans. Electron Devices*, 55, pp.: 540-546 (2008).

⁵⁵ H. S. Joo, S. C. Jeon, B. Lee, H. Yoon, Y. H. Kwon, J.-S. Choe, and I. Yun, “Reliability of InGaAs Waveguide Photodiodes for 40-Gb/s Optical Receivers”, *IEEE Trans. Device Mater. Rel.*, 5, pp.: 262-267 (2005).

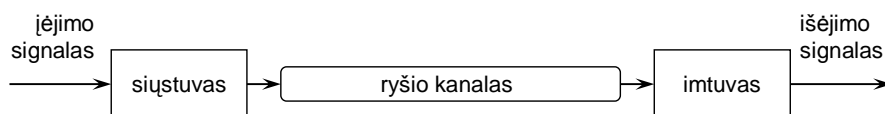
⁵⁶ J. Jung, Y. H. Kwon, K. S. Hyun, and I. Yun, “Reliability of Planar InP–InGaAs Avalanche Photodiodes With Recess Etching”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 8, pp.: 1160-1162 (2002).

Svarbi problema yra įtaiso atsparumas elektriniam viršįtampiui ir elektrostatinei iškrovai. Įtaisų atsparumas viršįtampiui ir gedimo pobūdis priklauso nuo įtampos krypties, nes pn sandūros įtaisuose vienu atveju bus srovės smūgis tiesiogine kryptimi, kitu – įtampos smūgis atgaline kryptimi. Tiesioginis smūgis dažnai lemia KOA ir tarpsluoksnio tarp puslaidininkio ir elektrodo tirpimą. Atgalinis smūgis suardo pn sandūrą.

11. Optoelektronikos įtaisai ryšių sistemose

11.1 Optinė ryšio sistema

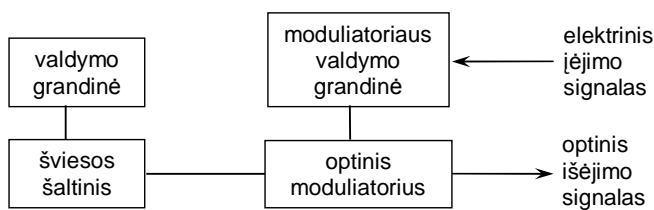
Optinė ryšio sistema nuo mikrobangės skiriasi tik informaciją pernešančio signalo dažniu. Pagrindiniai ryšio sistemos elementai yra siųstuvas, ryšio kanalas ir imtuvas (11.1 pav.). Optinės ryšio sistemos pagal ryšio kanalo prigimtį skirstomo į dvi kategorijas. Kai kuriose srityse (pvz., palydovinio ryšio sistemose) optinis signalas sklinda oru ar vakuumu^{1,2,3}. Nukreiptosios šviesos optinėse sistemose spinduliuotė visame siuntimo kelyje yra apribota erdvėje - optinėje skaiduloje. Tokios sistemos vadinamos skaidulinės optikos sistemomis.



11.1 pav. Ryšio sistemos elementai.

11.1.1 Optinės ryšio sistemos siųstuvas

Optinio siųstuvo funkcija yra paversti elektrinį signalą optiniu ir persiųsti jį į optinę skaidulą (ryšio kanalą). Optinį siųtuvą galima išskaidyti į šiuos elementus: spinduliuotės šaltinį, moduliatorių, elektronines valdymo ir maitinimo grandines (11.2 pav.).



11.2 pav. Blokinė optinio siųstuvo schema.

Šviesos šaltinis spinduliuoja nuolatinę fiksuoto bangos ilgio (λ_0) spinduliuotę, kurios dažnis yra $\nu_0 = c/\lambda_0$ (čia c yra šviesos greitis vakuume). Kaip šviesos šaltinis naudojamas šviesos ar lazerinis diodas (žr.: 2 skyrių).

Šiuolaikinių optinių sistemų signalo dažnis parenkamas iš pateiktų Tarptautinės telekomunikacijų sąjungos (TTS) standartuose. Spektra sritis ties $1,55 \mu\text{m}$ skirstoma į du diapazonus: standartinę (arba C) juostą ir ilgabangę (arba L) dažnių juostą. C juosta yra nuo 191 THz iki 196 THz (intervalas tarp kanalų dažnių yra 50 GHz); atitinkami bangos ilgiai: nuo $1,53 \mu\text{m}$ iki $1,57 \mu\text{m}$. L juosta apima dažnius nuo 186 THz iki 191 THz ($(1,57-1,61) \mu\text{m}$). Informacijos srautams augant, optiniam ryšiui gali būti panaudota ir trumpabangė (arba S) juosta apimanti $(1,48 - 1,53) \mu\text{m}$ bangos ilgius ($(196-203) \text{THz}$). Svarbu paminėti, kad šaltinio

¹ <http://www.freepatentsonline.com/7103280.pdf> (2009 11 19).

² <http://www.pavdata.com/en/technology/whatisfso.html> (2009 11 19).

³ S.-L. Tsao, H.-C. Yu, and Y.-C. Lin, "Analysis of an optical satellite communication system with stabilized microwave reference note transmission", *Microwave and Opt. Technol. Lett.*, 33, pp.: 149-151 (2002).

spinduliuotės bangos ilgis turi būti labai tikslus. Pvz., jei kanalo dažnis yra 193 THz, tai spinduliuotės bangos ilgis turi būti 1,5533288 μm ($c=299792458$ m/s).

Šviesos šaltinio spinduliuotė prieš patekdamą į ryšio kanalą turi perimti siunčiamą informaciją. Šią funkciją atlieka optinis moduliatorius. Didelės spartos sistemose naudojami išoriniai optiniai moduliatoriai (žr.: 5 skyrių). Mažos spartos sistemose kartais naudojama tiesioginė moduliacija^{4,5}.

Svarbus optinės ryšio sistemos parametras yra spinduliuotės galia patenkanti į ryšio kanalą. Bendru atveju, ši galia turi būti kiek įmanoma didesnė, siekiant padidinti signalo ir triukšmo santykį imtuvo įėjime. Tačiau spinduliuotės galią riboja įvairūs netiesiniai efektai, veikiantys kanalu sklindantį signalą (žr. 4.4 poskyrį). Spinduliuotės galia įvertinama milidecibelais:

$$galia(\text{dBm}) = 10 \log_{10} \left(\frac{galia}{1 \text{ mW}} \right). \quad (11.1)$$

Kai šaltinis yra šviesos diodas, spinduliuotė patenkanti į ryšio kanalą yra nedidelė – neviršija -10 dBm. Kai šviesos šaltinis yra lazerinis diodas, ši galia gali viršyti 5 dBm^{6,7}. Dauguma optinių ryšio sistemų kaip šviesos šaltinį naudoja puslaidinikinį lazerį. Šiose sistemose persiuntimo spartą riboja elektronika, bet ne šviesos šaltinio sparta. Optinių siųstuvų naudojančių lazerinį diodą sparta siekia 40 Gb/s⁸ (standartinių komercinių siųstuvų sparta yra 10 Gb/s⁹). Šviesos diodai naudojami mažos spartos ir mažo duomenų tankio vietiniuose tinkluose¹⁰.

11.1.2 Ryšio kanalas

Ryšio kanalo funkcija yra pernešti optinį signalą nuo siųstuvo iki imtuvo su kuo mažesniais nuostoliais. Daugumoje žemės optinių sistemų signalo pernešimui naudojamos optinės skaidulos (žr.: 4. skyrių). Optiniai nuostoliai jose neviršija 0,2 dB/km (spinduliuotei, kurios bangos ilgis yra artimas 1,5 μm)¹¹. Ilgose optinėse sistemose dažnai naudojami optiniai stiprintuvai ir regeneratoriai, kurių dėka kompensuojami spinduliuotės nuostoliai skaiduloje (11.3 pav.). Tokiu būdu signalas gali nusklisti šimtus ir tūkstančius kilometrų.

Idealiu atveju, ryšio kanalas turėtų nesumažinti siunčiamo signalo kokybės. Realiai impulsai sklisdami skaidula išplinta dėl dispersijos (žr.: 4.3 poskyrį). Dispersijos problema ypač aktuali naudojant daugiamodes skaidulas. Todėl daugumoje optinių sistemų naudojamos vienmodės skaidulos. Vienmodėse optinėse skaidulose vistiek stebima chromatinė dispersija, bet ji gali būti valdoma kontroliuojant spektro plotį ar naudojant dispersijos valdymo įrangą^{12,13}.

⁴ J. Prat, V. Polo, C. Bock, C. Arellano, and J. J. V. Olmos, "Full-Duplex Single Fiber Transmission Using FSK Downstream and IM Remote Upstream Modulations for Fiber-to-the-Home", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 17, pp.: 702-704 (2005).

⁵ J. J. Martínez, J. I. G. Gregorio, A. L. Lucia, A. V. Velasco, J. C. Aguado, and M. Á. L. Binué, "Novel WDM-PON Architecture Based on a Spectrally Efficient IM-FSK Scheme Using DMLs and RSOAs", 26, p.: 350-356 (2008).

⁶ C. H. Kim, K. Lee, and S. B. Lee, "Effects of In-Band Crosstalk in Wavelength-Locked Fabry-Pérot Laser-Diode-Based WDM PONs", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 21, pp.: 596-598 (2009).

⁷ S.-M. Lee, M.-H. Kim, and C.-H. Lee, "Demonstration of a Bidirectional 80-km-Reach DWDM-PON With 8-Gb/s Capacity", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 19, pp.: 405-407 (2007).

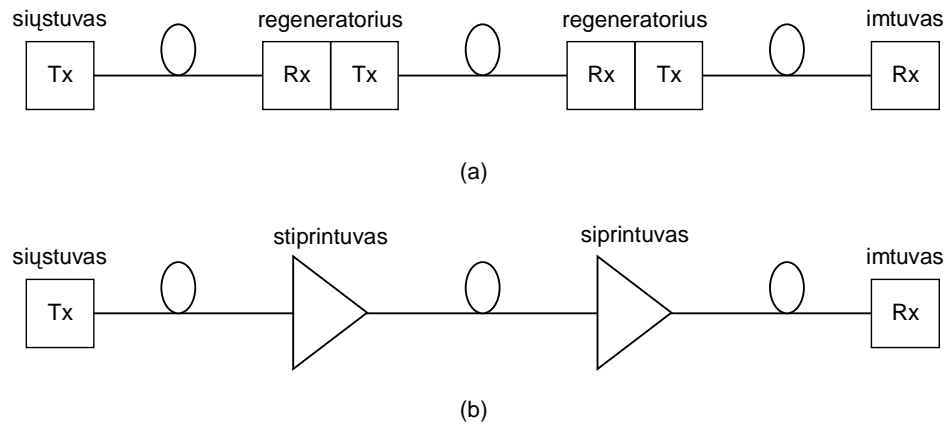
⁸ J. Yu, Z. Jia, M.-F. Huang, M. Haris, P. N. Ji, T. Wang, and G.-K. Chang, "Applications of 40-Gb/s Chirp-Managed Laser in Access and Metro Networks", *J. Lightw. Technol.*, 27, pp.: 253-265 (2009).

⁹ http://www.bookham.com/common/trans_machzehnder.cfm (2009 11 19).

¹⁰ A. Caballero, J. Bevensen Jensen, X. Yu and I. Tafur Monroy, "5 GHz 200 Mbit/s radio over polymer fibre link with envelope detection at 650 nm wavelength", *Electron. Lett.*, 44, pp.: 1479-1480 (2008).

¹¹ K. Kurokawa, K. Nakajima, K. Tsujikawa, T. Yamamoto, and K. Tajima, "Ultra-Wideband Transmission Over Low Loss PCF", *J. Lightw. Technol.*, 27, pp.: 1653-1662 (2009).

¹² T. Kotanigawa, T. Kawasaki, H. Masuda, T. Matsuda, A. Naka, and S. Matsuoka, "Dispersion Compensation Configuration Applying a Combination of EDC and Tunable-ODC for Extended L-Band WDM Transmission", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 21, pp.: 350-352 (2009).



11.3 pav. Regeneratorių (a) ir optinių stiprintuvų (b) naudojimas optinėse ryšio sistemose.

Optine skaidula sklindantis signalas taip pat yra iškraipomas dėl netiesinių efektų - dėl medžiagos lūžio rodiklio priklausomybės nuo sklindančios spinduliuotės galios (žr.: 4.4 poskyrį). Netiesiniai efektai yra aktualūs povandeninėms optinėms linijoms, kurių ilgis yra tūkstančiai kilometrų.

11.1.3 Optinės ryšio sistemos imtuvas

Optinis imtuvas priimtą optinį signalą paverčia atgal į pradinį elektrinį signalą. Optinis signalas pasiekęs imtuvą, pirmiausia patenka į fotodetektorių, kuris paverčia jį elektriniu (11.4 pav.). Kaip fotodetektoriai, dažniausiai naudojami *pin* arba griūtiniai fotodiodai (žr.: 3.3 ir 3.4 poskyrius), kurių išėjimo srovė kinta kintant krįntančiam optiniam signalui. Be abejo, fotodetektorius lemia papildomą triukšmą, kuris sumažina signalo ir triukšmo santykį.

Demoduliacijos funkcija yra atkurti pradinį elektrinį signalą nepaisant jo kokybės sumažėjimo sklindant kanalu ir papildomo fotodetektoriaus triukšmo. Demoduliacijos sandara priklauso nuo signalo tipo (analoginis ar skaitmeninis) ir moduliacijos būdo. Dauguma šiandieninių sistemų naudoja skaitmeninę dvejetainę schemą vadinamą tiesioginės detekcijos amplitudės moduliacija¹⁴.

Skaitmeninės optinės sistemos veikimas įvertinamas klaidingų bitų dažniu (KBD (angl.: BER – bit error rate)). KBD yra klaidų skaičius per sekundę arba tikimybė, kad bitas bus nustatytas neteisingai.

Svarbiausias imtuvo parametras yra jo jautris^{15,16,17}. Imtuvo jautrį nusako mažiausia krįntančios spinduliuotės galia, kuriai esant KBD yra lygus 10^{-9} . Imtuvo jautris priklauso nuo signalo ir triukšmo santykio, kuris, savo ruožtu, yra nulemtas įvairių triukšmo šaltinių. Netgi ir idealiaime imtuve yra papildomas triukšmas, kurį lemia pats fotodetekcijos procesas. Šis kvantinis triukšmas vadinamas šratiniu ir yra nulemtas kvantinės elektrono prigimties (žr. 3.3.4 ir 3.4.5 poskyrius). Realiuose imtuvuose stebimi ir kiti triukšmo šaltiniai, pvz., šiluminis. Be to signalo ir triukšmo santykis blogėja ir signalui sklindant ryšio kanalu. Papildomą triukšmą

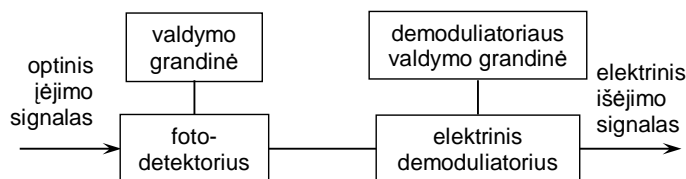
¹³ L. Ranzani, P. Boffi, R. Siano, S. Rondineau, Z. Popovic, and M. Martinelli, "Microwave-Domain Analog Predistortion Based on Chirped Delay Lines for Dispersion Compensation of 10-Gb/s Optical Communication Signals", *J. Lightw. Technol.*, 26, pp.: 2641-2646 (2008).

¹⁴ I. B. Djordjevic and B. Vasic, "Multilevel Coding in *M*-ary DPSK/Differential QAM High-Speed Optical Transmission With Direct Detection", *J. Lightw. Technol.*, 24, pp.: 420-428 (2006).

¹⁵ Y.-T. Han, Y.-J. Park, S.-H. Park, J.-U. Shin, D.-J. Kim, S.-W. Park, S.-H. Song, K.-Y. Jung, D.-J. Lee, W.-Y. Hwang, and H.-K. Sung, "1.25-Gb/s Bidirectional Transceiver Module Using 1.5%- Δ Silica Directional Coupler-Type WDM", 17, pp.: 2442-2444 (2005).

¹⁶ R. Swoboda, J. Knorr, and H. Zimmermann, "A 2.5-Gb/s Receiver PDIC With Low-Noise Integrated Charge Pump", *IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs*, 53, pp.: 1308-1312 (2006).

¹⁷ J. P. Helme, P. A. Houston, and C. H. Tan, "Large-Signal Charge Control Modeling of Photoreceivers for Applications up to 40 Gb/s", *IEEE J. Quantum Electron.*, 45, pp.: 834-840 IEEE (2009).



11.4 pav. Blokinė optinio imtuvo schema.

lemia kiekvienas pakeliui esantis stiprintuvas. Bendru atveju, imtuvo jautris priklauso ir nuo duomenų srauto tankio ir persiuntimo spartos.

11.2 Kanalų tankinimas

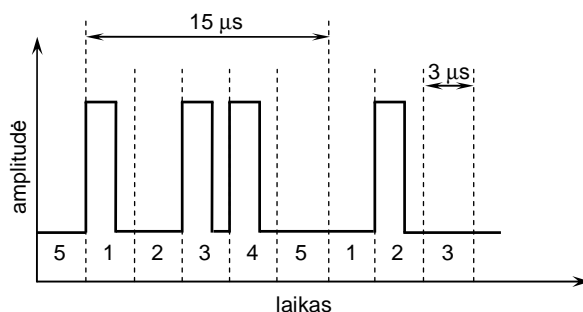
Dauguma optinių sistemų gali persiųsti informaciją didesne nei 1 Gb/s sparta^{18,19,20}. Norint pilnai išnaudoti sistemos pajėgumą, reikia vienu metu viena skaidula persiųsti keletą kanalų. Tai galima padaryti tankinant kanalus. Plačiausiai naudojamos laikinio ir dažninio tankinimo schemos. Mobiliojo ryšio sistemose naudojama kodinio tankinimo schema. Šiame poskyryje aptartos kanalų tankinimo schemos.

11.2.1 Laikinis tankinimas

Laikinio tankinimo (LT) schemoje skirtingų kanalų bitai išdėstomi laike ir suformuoja sudėtinį bitų srautą. Tarkime intervalas tarp bitų viename garso 64 kb/s kanale yra 15 μ s. Tada galima sutankinti 5 tokius kanalus jungiant juos į vieną srautą kiekvieną vėlinant 3 μ s (11.5 pav.). Gaunamas sudėtinis 320 kb/s srautas. LT dažnai naudojamas skaitmeniniams signalams tankinti telekomunikacijų sistemose.

Laikinio tankinimo koncepcija naudojama skaitmeninei hierarchijai sudaryti. Pirmajame lygyje (DS-1) Europoje tankinama 30 kanalų į 2,048 Mb/s srautą (Šiaurės Amerikoje ir Japonijoje – 24 kanalai į 1,544 Mb/s srautą). Sutankinto signalo bitų dažnis yra didesnis nei vieno kanalo spartos sandauga su kanalų skaičiumi dėl papildomų bitų, kurie naudojami kanalų išskirstymui imtuve. Antrajame lygyje (DS-2) tankinami keturi DS-1 kanalai, trečiajame (DS-3) – septyni DS-2, t. t.

Laikinio tankinimo schemą aprašo du standartai: sinchroninio optinio tinklo (angl.: SONET (synchronous optical network)) ir sinchroninės skaitmeninės hierarchijos (angl.: SDH (synchronous digital hierarchy)). Šie



11.5 pav. Penkių kanalų laikinis tankinimas.

¹⁸ G.-R. Lin, H.-L. Wang, G.-C. Lin, Y.-H. Huang, Y.-H. Lin, and T.-K. Cheng, "Comparison on Injection-Locked Fabry-Perot Laser Diode With Front-Facet Reflectivity of 1% and 30% for Optical Data Transmission in WDM-PON System", *J. Lightw. Technol.*, 27, pp.: 2779-2785 (2009).

¹⁹ T. Suzuki, H. Suzuki, M. Fujiwara, H. Nakamura, K. Iwatsuki, H. Kimura, M. Tsubokawa, Y. Shibata and A. Ohki, "Loss budget of 12.5 GHz-spaced wide-area carrier-distributed WDM-PON considering excess spectral broadening caused by SOA modulation", *Electron. Lett.*, 44 pp.: 226-228 (2008).

²⁰ G. Talli and P.I.D. Townsend, "Hybrid DWDM-TDM Long-Reach PON for Next-Generation Optical Access", *J. Lightw. Technol.*, 24, pp.: 2827-2834 (2006).

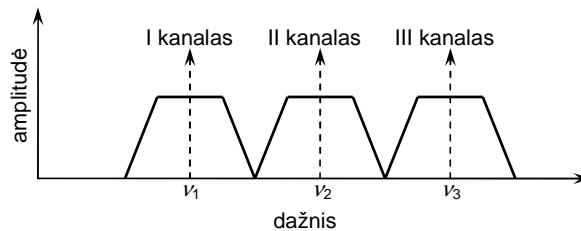
tarptautiniai standartai aprašo skaitmeninio laikinio tankinimo signalo kadro sandarą. Pagrindinis sinchroninio optinio tinklo (SOT) blokas persiunčiamas 51,84 Mb/s sparta (signalas vadinamas OC-1). Pagrindinio sinchroninės skaitmeninės hierarchijos (SSH) bloko (STN-1) sparta yra 155,52 Mb/s. Nuo 2002 metų veikia STM-256 (OC-768) komercinės sistemos, kuriose persiuntimo sparta yra 39,8 Gb/s (persiunčiama 516 kanalų). Sutankinus keturis šiuos kanalus galima gauti 160 Gb/s spartos optinį srautą. Tačiau tokia sparta nepasiekama naudojant išorinį optinį moduliatorių dėl ribotos elektronikos veikimo spartos.

Laikinio tankinimo schema gali būti naudojama tiek optiniams, tiek ir elektriniams signalams tankinti.

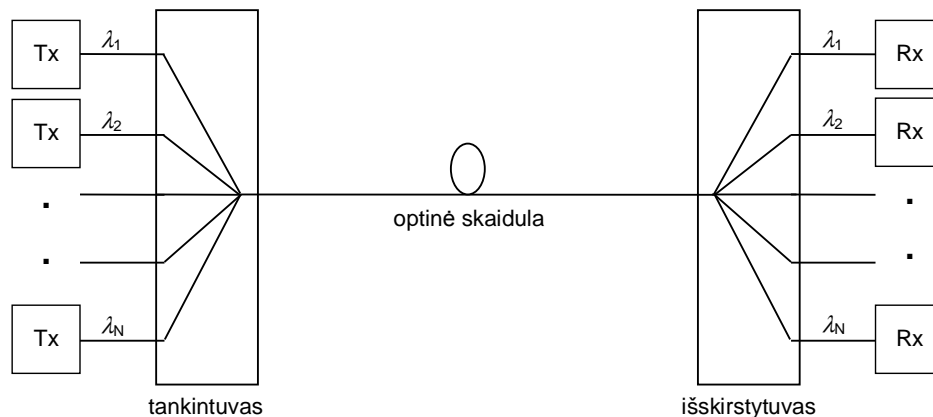
11.2.2 Dažninis tankinimas

Tankinant kanalus pagal dažninio tankinimo (DT) schemą kanalai išdėstomi dažnių intervale, kiekvienam kanalui skiriamas atskiras dažnis, jie gali persikloti laike. Intervalas tarp nešlio dažnių yra didesnis nei signalo spektro plotis – signalų spektrai nepersikloja (11.6 pav.).

Dažninis tankinimas dažnai vadinamas banginiu tankinimu (BT). Kiekvienam kanalui skiriamas atskiras dažnis ir šviesos šaltinis spinduliuojantis atitinkamo bangos ilgio spinduliuotę. Taigi BT sistemų siųstuvų ir imtuvų sandara yra gana sudėtinga (11.7 pav.). Daug skirtingo bangos ilgio kanalų yra suvedami į vieną optinę skaidulą naudojant tankintuvą. Imtuve kanalai atskiriami naudojant išskirstytuvą (paprastai optiniai filtrai). Bendru atveju intervalai tarp kanalų yra vienodi. Siekiant sumažinti kryžinius iškreipius, tarp kanalų paliekama saugos juosta. Intervalas tarp kanalų, kurių persiuntimo sparta yra 10 Gb/s, paprastai yra 50 GHz, tačiau gali būti ir kitoks. Banginio tankinimo sistemos skirstomos į retojo ir tankiojo tankinimo sistemas priklausomai nuo intervalo tarp kanalų. Tankiojo banginio tankinimo (TBT) sistemos yra pagrindinė optinių ryšio sistemų technologija. TBT sistemose sutankinama daugiau kaip 100 kanalų. Šiuo atveju intervalas tarp kanalų neviršija 25 GHz. TBT sistemų persiuntimo geba priklauso nuo to, kaip arti vienas kito galima išdėstyti kanalus bangos ilgių srityje. Mažiausią intervalą tarp kanalų riboja kryžminiai



11.6 pav. Trijų analoginių kanalų dažninis tankinimas.



11.7 pav. Banginio tankinimo sistemos blokinė schema.

iškreipiai. Intervalas tarp kanalų dažnių turi būti ne mažesnis nei dvigubas dažnis reikalingas didžiausiai persiuntimo spartai. Spektrinis TBT sistemos efektyvumas: $\eta_s = B/\Delta\nu_k$ (čia B yra bitų dažnis, $\Delta\nu_k$ – atstumas tarp dažnių), turi būti kuo įmanoma didesnis.

Pirmieji TBT kanalų dažniai buvo apibrėžti TTS standarte: intervalas tarp kanalų nustatytas 100 GHz (spektrinis efektyvumas 0,1 b/s/Hz) dažnių juostoje nuo 186 THz iki 196 THz (C ir L juostos ((0,8 – 1,552) μm)). Esant tokiems sistemos parametrams išnaudojama tik 10 % sistemos persiuntimo gebos (kai bitų dažnis yra 10 Gb/s). Šiuo metu TTS standartizavo ir sistemas su 50 GHz intervalu tarp dažnių (spektrinis efektyvumas 0,8 b/s/Hz).

Banginis ir laikinis tankinimas gali būti naudojami kartu, ir taip sukuriama itin efektyvūs tinklai^{21,22}.

11.2.3 Kodinis tankinimas

Laikinio ir banginio tankinimo schemas dažnai naudojamos optinėse ryšio sistemose. Tačiau be privalumų jos turi ir trūkumų. Taikant laikinį tankinimą suformuojamas vienas didelės spartos kanalas, kuriame laiko intervalas tarp bitų labai mažas (<10 ps) - reikalingi vis trumpesni impulsai, kurie labai jautrūs dispersijai ir išskrypimams. Šių trūkumų nėra banginio tankinimo sistemose. Tačiau šiose reikalingas itin siauras šviesos šaltinio spinduliuotės spektro plotis. Kai kurių paminėtų trūkumų galima išvengti naudojant kodinį tankinimą (KT). Kodinio tankinimo schemoje kiekvienas kanalas užkoduojamas taip, kad jo spektras išplečiamas daug didesnėje srityje nei originalus signalas. Kodinio tankinimo schema nuo laikinio ir banginio skiriasi tuo, kad čia visi kanalai naudoja tą pačią dažnių ir laiko sritį (laikinio ir banginio tankinimo schemose skirtingiems kanalams išskiriama atskira laiko ar dažnių juostos dalis).

KT sistemose papildomai reikalingi koduotuvai siųstuve ir iškoduotuvai imtuve. Koduotuvai išplečia signalo spektrą daug platesnėje srityje nei reikalinga signalui persiųsti. Spektro išplėtimas atliekamas naudojant unikalų kodą, kuris nesujęs su siunčiamu signalu. Kiekvienam kanalui priskiriamas atskiras kodas. Iškoduotuvai naudoja tą patį kodą signalo spektrui susiaurinti ir atstatyti duomenis.

Kodinio tankinimo privalumas yra tai, kad sudėtinga sugadinti ar perimti signalą. Tai itin svarbu duomenų apsaugai.

11.3 Tankiojo banginio tankinimo sistemos

Kanalų tankinimas dažnių (bangos ilgių) srityje plačiai taikomas radijo dažnio ir mikrobangėje srityse. Šios tankinimo schemas naudojimas optinio ryšio tinkluose leidžia optinėms sistemoms pasiekti 10 Tb/s persiuntimo spartą²³. Optinės dažninio tankinimo sistemos siųstuve turi būti daug šviesos šaltinių spinduliuojančių skirtingo bangos ilgio šviesą. Todėl šios sistemos dažniau vadinamos banginio tankinimo.

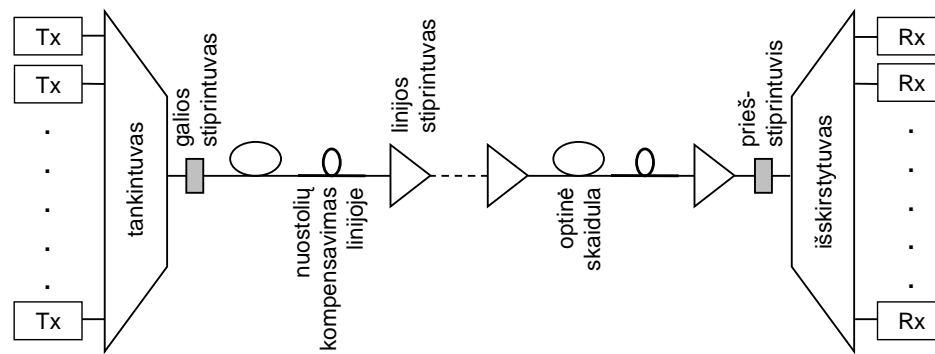
11.3.1 TBT schema

Banginio tankinimo schemoje sistemos persiuntimo geba padidinama sukuriama daug skirtingo bangos ilgio nešlio signalų. Kiekvienas nešlio signalas moduluojamas atskirai elektriniu signalu. Atskirų siųstuvų signalai tankintuvu sujungiami į vieną ir siunčiami viena optine skaidula (11.8 pav.). Imtuvo gale

²¹ F. Saliou, P. Chanclou, F. Laurent, N. Genay, J. A. Lazaro, F. Bonada, and J. Prat, “Reach Extension Strategies for Passive Optical Networks”, *J. Opt. Commun. Netw.*, 1, pp.: C51-C60 (2009).

²² P. J. Urban, B. Huiszoon, R. Roy, M. M. de Laat, F. M. Huijskens, E. J. Klein, G. D. Khoe, A. M. J. Koonen, and H. de Waardt, “High-Bit-Rate Dynamically Reconfigurable WDM–TDM Access Network”, *J. Opt. Commun. Netw.*, 1, pp.: A143-A159 (2009).

²³ F. Kiyoshi, K. Tadashi, and I. Toshiharu, “10-Tb/s ultradense WDM transmission using three wavelength-bands”, *Oyo Butsuri*, 71; pp.: 1335-1341 (2002).



11.8 pav. Valdomos dispersijos banginio tankinimo optinė ryšio linija.

išskirstytuvas atskiria kiekvieną signalą ir persiunčia atskiriems imtuvams.

Banginis tankinimas padidina sistemos persiuntimo gebą dėka vienalaikiškai viena skaidula siunčiamų daugelio kanalų. Jei vienu metu L ilgio skaidula persiunčiama N kanalų, kurių bitų dažnis yra B_1, B_2, \dots, B_N , tai BT linijos bitų dažnis bus:

$$B_S = B_1 + B_2 + \dots + B_N. \quad (11.2)$$

Svarbiausi BT sistemos parametrai yra kanalų skaičius, kiekvieno kanalo bitų dažnis ir intervalas tarp kanalų $\Delta \nu_k$. Jei visų kanalų persiuntimo sparta yra vienoda - B , tai BT linijos persiuntimo sparta apskaičiuojama vieno kanalo spartą B padauginus iš kanalų skaičiaus. NB nusako linijos persiuntimo gebą, o sandauga $N\Delta \nu_k$ – juostos plotį užimamą BT sistemos.

Pirmosiomis BT sistemomis buvo persiunčiami du kanalai: $1,3 \mu\text{m}$ ir $1,55 \mu\text{m}$ – intervalas tarp kanalų buvo 250 nm . 1995 m. atsiradusių pirmųjų komercinių BT sistemų persiuntimo sparta buvo tik 40 Gb/s , tačiau jau 2000 m. buvo pasiekta $1,6 \text{ Tb/s}$ sparta^{23,24}. Šiuo metu laboratorinės BT sistemos pasiekia 10 Tb/s persiuntimo spartą²⁵.

BT sistemos persiuntimo geba priklauso nuo to, kaip tankiai galima išdėstyti kanalus duotoje dažnių juostoje. Intervalas tarp kanalų turi viršyti bitų dažnį, kad signalo spektras tilptų išskirtoje dažnių juostoje. Realiose sistemose intervalas tarp kanalų viršija bitų dažnį du ar daugiau kartų. Dėl šio reikalavimo dažnių juosta išnaudojama neefektyviai – spektrinis efektyvumas neviršija $0,5 \text{ b/s/Hz}$. Naujos moduliavimo schemas leidžia pasiekti 1 b/s/Hz spektrinį efektyvumą.

Optinės BT sistemos veikia dviejose plačiose dažnių juostose, kuriose optiniai nuostoliai skaidulose yra maži: ties $1,3 \mu\text{m}$ ir $1,55 \mu\text{m}$. Kiekvienos šių juostų spektro plotis viršija 10 THz . Naudojant „sausąsias“ optines skaidulas, kuriose panaikinta „OH“ sugerties smailė (išvengiant vandens garų patekimo į skaidulą gamybos metu), optiniam persiuntimui galima panaudoti spektro sritį nuo $1,25 \mu\text{m}$ iki $1,65 \mu\text{m}$. Tada galima laikyti, kad BT sistemoje naudojama spinduliuotė, kurios spektras yra nuo $1,30 \mu\text{m}$ iki $1,60 \mu\text{m}$, t. y. spektro plotis 300 nm . Mažiausias intervalas tarp 40 Gb/s kanalų yra 50 GHz ($0,4 \text{ nm}$). Tokiu atveju 750 kanalų gali būti sutankinti, ir sistemos persiuntimo geba bus 30 Tb/s . Jei šis signalas, naudojant optinius stiprintuvus ir dispersijos valdymo įranga bus persiustas 1000 km , tai sandauga NBL viršys 30000 (Tb/s)km (III kartos komercine optine sistema persiunčiant vieną 10 Gb/s kanalą 80 km atstumu sandauga NBL būtų tik $0,8 \text{ (Tb/s)km}$).

²⁴ Neal S. Bergano, "Wavelength Division Multiplexing in Long-Haul Transoceanic Transmission Systems", *J. Lightwave Technol.*, 23, pp.: 4125-4139 (2005).

²⁵ H. Sotobayashi, W. Chujo, and K.-I. Kitayama, "1.6-b/s/Hz 6.4-Tb/s QPSK-OCDM/WDM (4 OADM 40 WDM 40 Gb/s) Transmission Experiment Using Optical Hard Thresholding", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 14, pp.: 555-557 (2002).

Realiose sistemose naudojamos spektro juostos plotį riboja daugelis faktorių. Visų pirma, baigtinis yra optinių stiprintuvų juostos plotis (žr.: 6.2 poskyrį). Erbiu legiruotų skaidulinių stiprintuvų juostos plotis tėra 40 nm. Stiprintuvų juostos plotį galima šiek tiek padidinti naudojant Ramano stiprintuvus. Kanalų skaičių taip pat riboja spinduliuotės bangos ilgio stabilumas ir galimybė keisti lazerinio diodo spinduliuotės bangos ilgį, signalo blogėjimas dėl netiesinių efektų siunčiant signalą, kryžminiai iškreipiai išskirstant kanalus.

11.3.2 Banginio tankinimo sistemų projektavimas

Kuriant šiuolaikinę daugelio kanalų banginio tankinimo sistemą, kurios persiuntimo sparta ne mažesnė nei 10 Gb/s reikia atsižvelgti į begalę faktorių: dispersiją ir netiesinius efektus, triukšmą, poreikį sumažinti intervalą tarp kanalų.

Galutinis ryšio sistemos tikslas yra užtikrinti pakankamą pasiekiančio imtuvą signalo galią. Sistema neveiks, jei signalo galia bus netinkama. Ryšio sistemos kūrimą galima suskirstyti į keletą etapų:

- tinkamų siųstuvo ir imtuvo parinkimas atsižvelgiant į persiunčiamą signalą (analoginis, skaitmeninis, garso, vaizdo, RS-232, RS-422, RS-485, etc.);
- galimos maitinimo galios (kintama ar nuolatinė) nustatymas;
- specialiųjų poreikių (pilnutinės varžos, juostos pločio, specialių jungčių, specialaus optinio kabelio ir t. t.) nustatymas;
- visų sistemos nuostolių (įskaitant kabelio, sujungimų, jungčių nuostolius) apskaičiavimas;
- apskaičiuotų nuostolių palyginimas su galimais nuostoliais imtuvo įėjime (reikia uždėti bent 3 dB atsargą);
- optinio kabelio, kurio juostos plotis yra tinkamas reikiamam signalui persiųsti, parinkimas.

Projektuojant BT sistemą svarbu pasiekti kuo didesnę spektrinę efektyvumą. Daugelio komercinių BT sistemų sukurtų persiųsti 10 Gb/s sparta, ir kuriose intervalas tarp kanalų yra 50 GHz, spektrinis efektyvumas neviršija 0,2 b/s/Hz. Norint padidinti sistemos efektyvumą, reikia išplėsti naudojamą dažnių juostą ir sumažinti intervalą tarp kanalų. BT sistemos persiunčiančios 40 Gb/s kanalus, tarp kurių intervalas yra 50 GHz, spektrinis efektyvumas yra 0,8 b/s/Hz.

Koks gali būtų didžiausias BT sistemos spektrinis efektyvumas? Šenonas (Shannon) nustatė, kad didžiausia tiesinio baigtinio juostos pločio Δf_k kanalo, esant Gauso triukšmui, persiuntimo geba yra

$$C_k = \Delta f_k \log_2(1 + \text{SNR}); \quad (11.2)$$

čia SNR yra signalo ir triukšmo santykis imtuve. Kanalo juostos plotis yra artimas bitų dažniui B ir nusako persiuntimo gebą vienetiniam juostos pločiui:

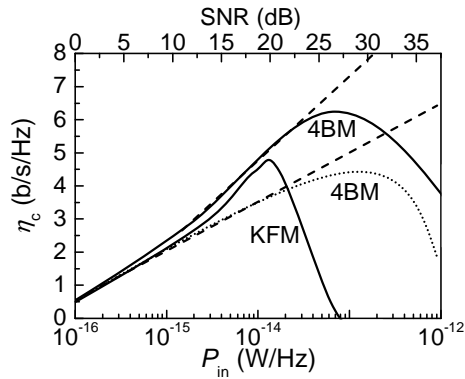
$$\eta_c = \frac{C_k}{\Delta \nu_k} = \eta_s \log_2(1 + \text{SNR}); \quad (11.3)$$

čia $\eta_s = \frac{B}{\Delta \nu_k}$. Taigi tiesinio kanalo spektrinis efektyvumas η_c gali būti didesnis už 1 b/s/Hz, ir nėra

viršutinės ribos (kol pakankamai didelis yra signalo ir triukšmo santykis). Tačiau optinių skaidulų kanalas nėra tiesinis, ir (11.3) formulės taikyti negalima. Netiesiniai efektai blogina persiuntimo charakteristikas ir riboją didžiausią spektrinę efektyvumą ties 5 b/s/Hz (11.9 pav.). Realiose sistemose taikant dvejetainę moduliavimo schemą pasiekiamas 1 b/s/Hz spektrinis efektyvumas. Dar šiek tiek padidinti spektrinę efektyvumą galima naudojant poliarizacinį tankinimą²⁶.

Iki šiol dispersija skaiduloje buvo nagrinėta kaip pastovi visoje skaiduloje bei nekintanti laike (žr.:

²⁶ K. Roberts, M. O'Sullivan, K.-T. Wu, H. Sun, A. Awadalla, D. J. Krause, and C. Laperle, "Performance of Dual-Polarization QPSK for Optical Transport Systems", *J. Lightwave Technol.*, 27, pp.: 3546-3559 (2009).



11.9 pav. Spektrinio efektyvumo priklausomybė nuo įeinančios spinduliuotės galios tankio (brūkšninės linijos – neatsižvelgiant į netiesinius efektus, taškinė linija – pastovus signalas, išštinės – moduluotas signalas).

4.3 poskyrį). Abu šie artiniai nėra realizuojami realiose skaidulose. Nulinės dispersijos bangos ilgis priklauso nuo skaidulos šerdies diametro, kuris atsitiktinai kinta (keletą procentų) per skaidulos ilgį. Nulinės dispersijos bangos ilgio kitimas lemia dispersijos dydžio kitimą ir įtakoja sistemos veikimą. Šios dispersijos fluktuacijos yra statinės.

Kitas dispersijos kitimo šaltinis yra kintančios aplinkos sąlygos. Dispersijos dydis priklauso nuo temperatūros – daliai skaidulos atsidūrus kitokios temperatūros aplinkoje, šioje dalyje pakinta ir dispersijos dydis. Šios dinaminės dispersijos fluktuacijos įtakoja 40 Gb/s kanalų persiuntimo kokybę. Dispersijos priklausomybę nuo bangos ilgio aprašo formulė

$$D(\lambda) = \frac{S_0}{4} \left(\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right); \quad (11.4)$$

čia S_0 yra dispersijos polinkis nulinės dispersijos bangos ilgiui λ_0 . Abu parametrai S_0 ir λ_0 kinta kintant skaidulos ilgiui ir temperatūrai. Nuo dispersijos pasiskirstymo per skaidulos ilgį priklauso klaidingų bitų dažnis. Tiesinėse sistemose dispersijos fluktuacijų įtaką galima panaikinti pritaikius dinaminę dispersijos kompensavimo schemą. Tačiau ši schema neveiks, jei yra didelė netiesinių efektų įtaka.

Polarizacinės modos dispersija (PMD) ir dispersiniai nuostoliai (DN) taip pat blogina BT sistemos veikimą. Pagrindinė problema yra dvejetainis lūžimas skaiduloje, kuris atsitiktinai kinta laike kintant skaidulos temperatūrai ir įtempimui. PMD ir DN lemia tokius skaidulos gedimus, dėl kurių išauga klaidingų bitų dažnis, ir ryšio kanalas nebetinka informacijos persiuntimui. Šių gedimų atsiradimo laikas ir trukmė yra visiškai atsitiktiniai. Vienintelis šios problemos sprendimas yra sukurti tokią sistemą, kurioje gedimų dėl PMD ir DN trukmė būtų labai maža – gedimo tikimybė neviršytų 10^{-5} (t. y. 5 min per metus).

Projektuojant BT sistemą reikia ypatingai suderinti siųstuvo ir imtuvo charakteristikas. Itin svarbus yra kanalo nešlio dažnio (bangos ilgio) pastovumas. Daugelyje BT sistemų siųstuvų kiekvienam kanalui naudojamas vienmodis paskirstytojo grįžtamojo ryšio lazerinis diodas ar lazeris su paskirstytuoju Brego atšvaitu. Tokio šviesos šaltinio spinduliuotės ilgis yra fiksuotas ir nulemtas įmontuotos difrakcinės gardelės. Tačiau vienmodžio LD spinduliuotės bangos ilgis priklauso nuo temperatūros ($0,1 \text{ nm}^\circ\text{C}$), taip pat kinta lazeriui senėjant. Šie bangos ilgio pokyčiai nėra svarbūs vienkanalėms ar retojo BT sistemoms, kuriose intervalas tarp kanalų viršija 2 nm. Tačiau tankiojo BT sistemose, kuriose intervalas tarp kanalų yra mažesnis nei 25 GHz, o persiuntimo sparta yra 10 Gb/s, nešlio dažnis negali kisti daugiau nei 1 GHz.

Daugumos LD temperatūra stabilizuojama termoelektriniu šaldytuvu, kuris įmontuotas įtaiso korpuse²⁷. Termoelektrinis šaldytuvas neleidžia LD temperatūrai kisti daugiau nei 1°C – to užtenka sistemoms, kuriose intervalas tarp kanalų yra 100 GHz. Tačiau, kai intervalas tarp kanalų yra 50 GHz ar mažiau, tokia temperatūros kontrolė nėra pakankama. LD bangos ilgio stabilizavimui naudojamos inertinės dujos, kurių specifinis rezonansinis dažnis sutampa su spinduliuotės dažniu²⁸. Kitas bangos ilgio stabilizavimo metodas pririša LD spinduliuotės dažnį prie atomų ar molekulių rezonanso²⁹. Tačiau šie rezonansiniai dažniai ne visada sutampa su nustatytu kanalo dažniu. Tai ko reikia BT sistemai, yra stabilių tolygiai išdėstytų dažnių šukos. Šiam tikslui galima panaudoti fiksuoto spinduliuotės dažnio lazeriniu diodu valdomą Maikelsono (Michelson) interferometrą³⁰. Taip pat gali būti naudojamas bet koks filtras praleidžiantis tolygiai išdėstytų dažnių spinduliuotę (pvz., difraccinių gardelių matrica)³¹.

11.4 Optiniai tinklai

Šiame poskyryje aprašyti optiniai tinklai sujungiantys daugelį vartotojų tiesioginėmis ryšio linijomis aptartomis 11.3 poskyryje.

11.4.1 Tinklo architektūra ir topologija

Pagal tinklo architektūrą visus tinklus galima suskirstyti į tris kategorijas pagal tai, kokią teritoriją jie apima: vietinis tinklas, teritorinis ir tolimojo ryšio tinklas (11.10 pav.).

11.4.1.1 Tolimojo ryšio tinklas

Tolimojo ryšio tinklas apima didelę teritoriją – šalį ar visą žemyną. Šiam tinklui naudojama aktyviųjų mazgų technologija ir SOT/SSH protokolai. Tinklo mazgai išdėstyti didžiuosiuose miestuose turi elektroninius perjungiklius, kurie sujungia bet kuriuos du tinklo mazgus sukurdami tarp jų virtualias linijas. Tokia tinklo schema vadinama dvipusio ryšio kanalų perjungimu. Kita schema, naudojama internetui, vadinama paketų perjungimu, parenka paketų maršrutą naudodama interneto protokolą (IP). Įvairių paslaugų (garso, vaizdo, duomenų) persiuntimui naudojama asinchroninio persiuntimo veika.

Ne visi tinklo mazgai yra sujungti tiesioginėmis linijomis. Todėl, norint sujungti du pasirinktus mazgus, reikia atlikti vieną ar daugiau perjungimų tarpiniuose mazguose. Atsiradus BT technologijai paskutiniame praėjo amžiaus dešimtmetyje daug kanalų vienaikiškai buvo persiunčiami tik tiesioginėmis linijomis. Elektroninio perjungimo galimybė mazguose atsirado tik 2004 m. Tokiam persiuntimui kiekviename mazge reikia optinį signalą paversti elektriniu ir vėl optiniu. Šiame tinkle, nepakeitus įrangos visuose mazguose, negalima pakeisti signalo bitų dažnio ar moduliavimo schemas.

Pagrindiniame tinkle optinis BT signalas praeina tarpinius mazgus neverčiamas elektriniu. Toks tinklas

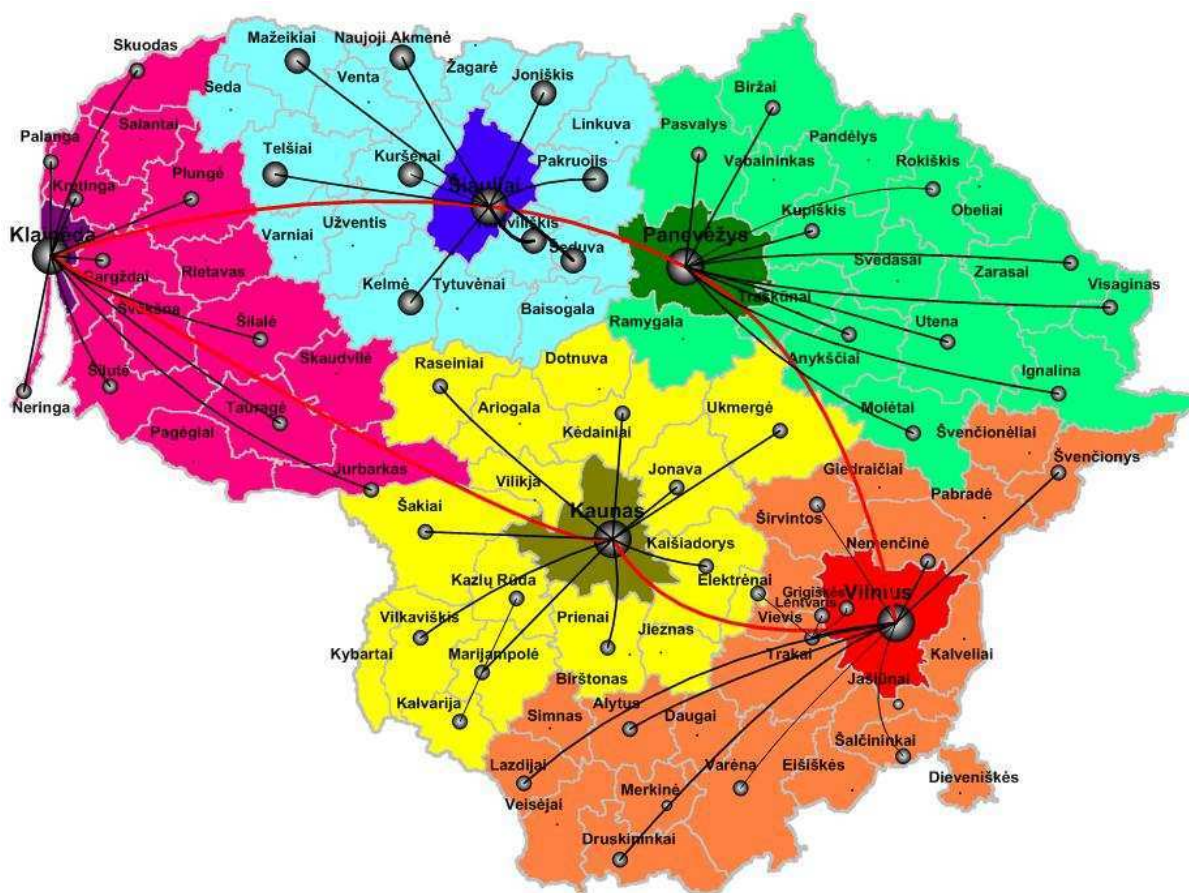
²⁷ M. Ishihara, T. Morimoto, S. Furuta, K. Kasahara, N. Akikusa, K. Fujita, and T. Edamura, "Linewidth enhancement factor of quantum cascade lasers with single phonon resonance-continuum depopulation structure on Peltier cooler", *Electron. Lett.*, 45, pp.: 1168-1169 (2009).

²⁸ A. Mizutori, Y. Nishizato, K. Mori, T. Yamamoto, K. Suzuki, A. Takada, and M. Koga, "Laser diode optical frequency stabilization technique on ITU-T frequency grid employing modulated sideband light", *Electron. Lett.*, 45, pp.: 683-684 (2009).

²⁹ P. D. McDowall, M. F. Andersen, "Acousto-optic modulator based frequency stabilized diode laser system for atom trapping", *Rev. Scient. Instruments*, 80, pp.: - 053101-4 (2009).

³⁰ P.-Y. Chien and C.-L. Pan, "Frequency Stabilization of Laser Diodes at 0.83 μm Using a Fiber Optic Coupler", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2, pp.: 328-330 (1990).

³¹ K. Mori, "Stabilisation of optical frequency of modelocked laser diode with Fabry-Perot filter for supercontinuum-based optical ITU grid", *Electron. Lett.*, 41, pp.: 328-329 (2005).



11.10 pav. Tolimojo ryšio ir teritorinio ryšio tinklas Lietuvoje.

vadinamas skaidriuoju³². Paskirties mazge naudojamas skirstantysis tankintuvas, kuris prijungia ir atjungia reikiamus kanalus. Skaidriuosiuose BT tinkluose nereikia išskirstytuvų ir optinio signalo keitiklių elektriniu. Taigi persiuntimo sparta nėra ribojama elektronikos. Taip pat tokie tinklai yra pigesni, lengviau įdiegiami ir prižiūrimi.

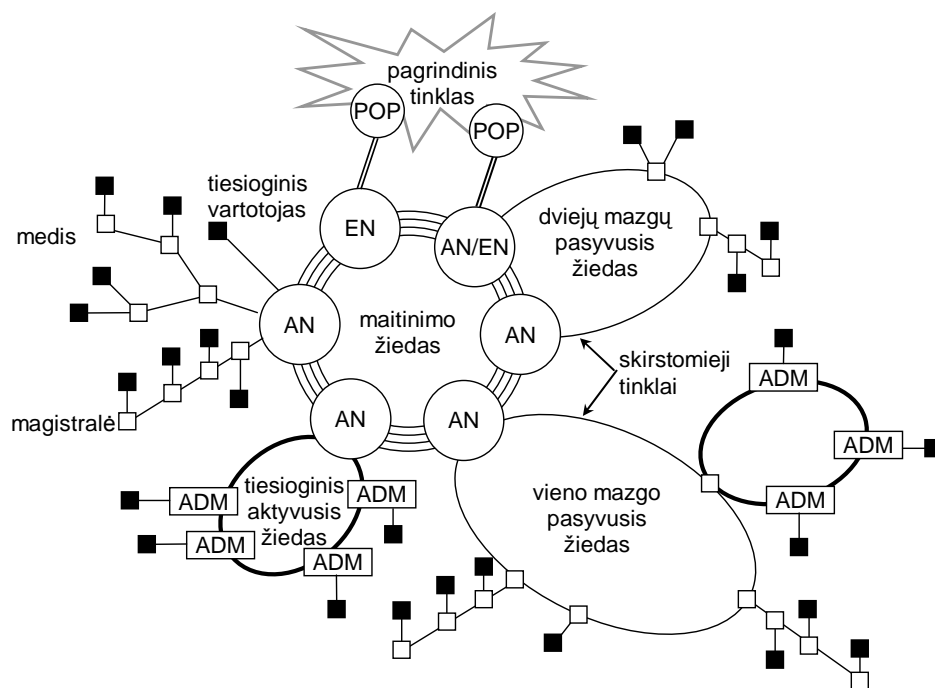
11.4.1.2 Teritorinis tinklas

Tolimojo ryšio tinklo mazgas paprastai yra teritorinio tinklo apimamoje teritorijoje ir sujungia tolimojo ryšio ir teritorinį tinklus. Teritoriniam tinklui naudojama žiedo topologija, ir per vieną ar du mazgus jis prijungiamas prie tolimojo ryšio tinklo (11.11 pav.). Tinklo patikimumui užtikrinti žiedui naudojami 4 optiniai kabeliai. Du kabeliai naudojami duomenų persiuntimui laikrodžio rodyklės ir priešinga kryptimi. Kiti du kabeliai yra atsarginiai ir naudojami nutrūkus tiesioginiam ryšiui. Centrinis žiedas vadinamas maitinimo žiedu, nes jis per įėjimo mazgus suteikia priėjimą daugeliui vietinių tinklų.

Keletas teritorinių tinklų gali būti sujungti į tolimojo ryšio tinklą. Teritorinio tinklo naudojimo kaip tolimojo ryšio žiedas privalumas yra atsparumas gedimams. Atsarginiai kabeliai kiekviename žiede užtikrina, kad tiesioginiam ryšiui nutrūkus visada bus alternatyvus kelias tarp dviejų mazgų.

Tolimojo ryšio ir teritoriniai tinklai skiriasi dydžiu. Teritoriniame tinkle duomenų persiuntimo sparta yra nedidelė palyginus su tolimojo ryšio tinklu, kuris sudaro persiuntimo tinklo pagrindą. Paprastai kiekvieno teritorinio tinklo kanalo persiuntimo sparta yra 2,5 Gb/s. Dėl pigumo teritoriniame tinkle naudojama retojo

³² M. Gagnaire and S. Al Zahr, "Impairment-Aware Routing and Wavelength Assignment in Translucent Networks: State of the Art", *IEEE Commun. Mag.*, 47, pp.: 55-61 (2009).



11.11 pav. Žiedinės topologijos teritorinio tinklo schema³³ (AN – įėjimo mazgas, EN – išėjimo mazgas, ADM – skirstantysis tankintuvas, □ - pasyvisis dalytuvas, ■ - vartotojo įranga).

BT sistema. Dažnai maitinimo žiedui naudojami tik du kabeliai: vienas duomenų persiuntimui, antras – apsauginis. Šiuo metu teritoriniuose tinkluose pereinama nuo elektroninio perjungimo mazguose prie optinio^{34,35}.

11.4.1.3 Vietinis tinklas

Vietinis tinklas sujungia daugelį vartotojų taip, kad kiekvienas jų gali persiųsti duomenis bet kuriam kitam. Paprastai vietinis tinklas apima nedideles teritorijas, persiuntimo nuotolis neviršija 10 km. Nuostoliai skaiduloje, dispersija ir netiesiniai efektai šiuose tinkluose nėra svarbūs. Optinės sistemos vietiniam tinklui naudojamos dėl kur kas didesnio juostos pločio nei naudojant bendraašį kabelį.

Vietiniam tinklui dažniausiai naudojamos trys topologijos: magistralės, žiedo ir žvaigždės (11.12 pav.). Magistraliniame tinkle vartotojai bendrauja vienas su kitu persiūsdami duomenis į centrinį kabelį – magistralę, kur duomenys persiunčiami viena kryptimi. Dalis optinės galios nuteka kiekviename magistralės mazge. Magistralinis tinklas dažnai naudojamas kabelinės televizijos tinkluose.

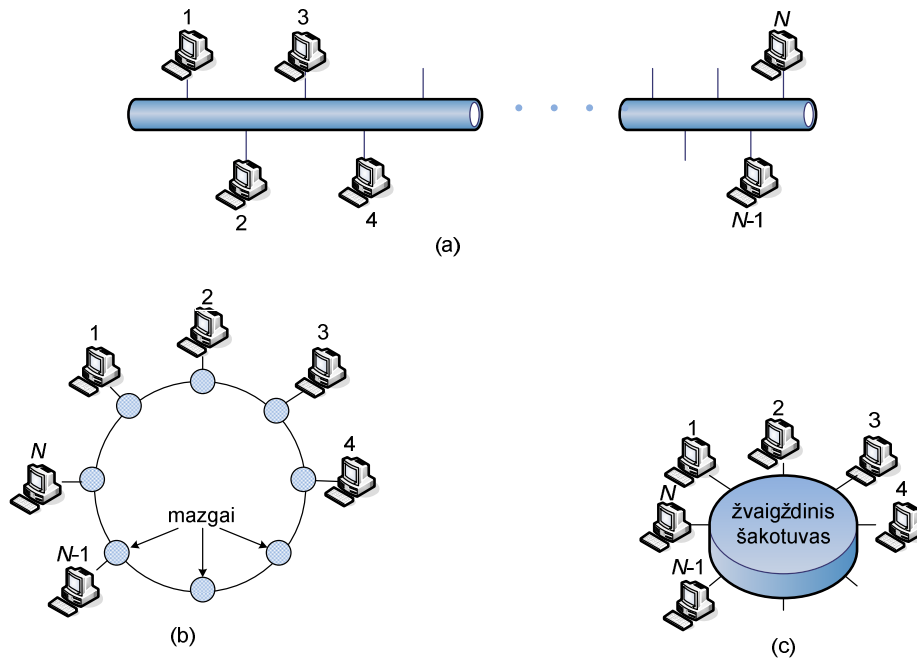
Žiedo topologijos tinkle vartotojų įranga yra prijungta prie ratu išdėstytų mazgų (11.12 (b) pav.). Žiedinis tinklas veikia ratu persiunčiant žymę (apibrėžtą bitų grupę). Kiekvienas mazgas patikrina žymę, ir perima duomenis, jei randa savo adresą. Arba persiunčia savo duomenis, jei žymė tuščia. Standartinė vietinio žiedinio tinklo sąsaja yra skaidulinis paskirstytųjų duomenų sietuvas (SPDS). Naudojant SPDS protokolą duomenys persiunčiami daugiamažu skaidula 100 Mb/s sparta, siūstuvus naudoja 1,3 μm šviesos diodą.

Žvaigždiniame tinkle visi mazgai yra sujungti su žvaigždiniu šakotuvu (11.12 (c) pav.). Žvaigždinis

³³ A. A. M. Saleh, J. M. Simmons, “Architectural principles of optical regional and metropolitan access networks“, *J. Lightwave Technol.*, V. 17, p. 2431-2448 (1999).

³⁴ S.-H. Chen, K.-C. Fan, T.-T. Chung, and Y.-J. J. Yang, “A $N \times N$ Architecture for 2-D Mirror-Type Optical Switches“, *J. Lightwave Technol.*, 27, pp.: 2843-2851 (2009).

³⁵ Y. Zha, D.-G. Sun, T.-G. Liu, Y. Z., X. Li, and X. Fu, “Rearrangeable Nonblocking 8×8 Matrix Optical Switch Based on Silica Waveguide and Extended Banyan Network“, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 19, pp.: 390-392 (2007).



11.12 pav. Magistralės (a), žiedo (b) ir žvaigždės (c) topologijų schemas.

šakotuvus gauna duomenis iš siunčiančio mazgo ir signalo galią paskirsto vienodai visiems prijungtiems mazgams. Signalų galia pasiekianti mazgą priklauso nuo vartotojų skaičiaus – vartotojų daugėjant, galia mažėja. Šie nuostoliai vadinami paskirstymo nuostoliais ir yra kur kas mažesni nei magistraliniame tinkle. Paskirstymo nuostolių galima išvengti įmontuojant stiprintuvą.

11.4.1.4 Vienkryptis vietinis tinklas

Kai kuriuose vietiniuose tinkluose informacija persiunčiama tik viena kryptimi. Pvz., kabelinės televizijos tinkle daugelis vaizdo kanalų yra persiunčiami vartotojų grupei. Kiekvienas vartotojas pasirenka reikiama kanalą iš viso signalo, gali kanalą perjungti. Kabelinės televizijos tinkluose optinės sistemos pakeitė bendraašio kabelio tinklus dėl didesnio juostos pločio, t. y. optiniu tinklu galima persiųsti daugiau vaizdo kanalų. Raiškioji televizija taip pat reikalauja persiuntimo optiniu tinklu.

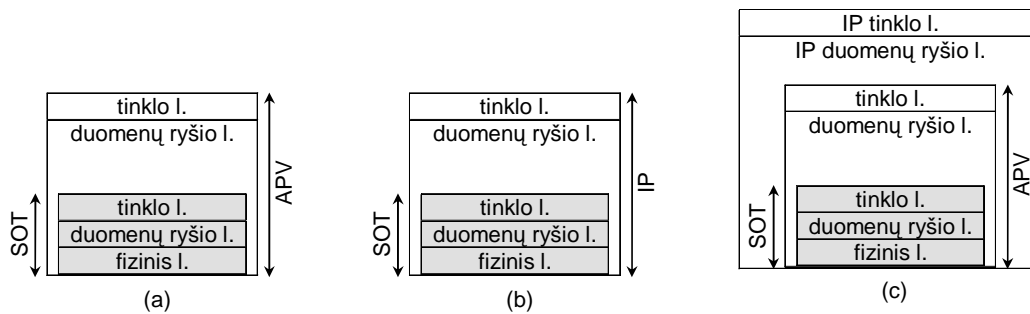
Dauguma kabelinės televizijos sistemų naudoja magistralinį tinklą. Vienu optiniu kabeliu persiunčiama daug vaizdo kanalų naudojant ponešlių tankinimo schemą. Signalų paskirstymas realizuojamas dalį signalo energijos nutekinant kiekviename magistralės mazge. Magistralinio tinklo trūkumas yra dideli paskirstymo nuostoliai, kurie auga eksponentiškai didėjant vartotojų skaičiui. Nuostoliams kompensuoti periodiškai galima įmontuoti stiprintuvus.

11.4.2 Tinklo protokolai ir lygmenys

Sudėtingas tinklo projektavimas ir priežiūra yra valdomi naudojant tam tikrus protokolus ir sluoksninę sandarą, kur skirtingos tinklo funkcijos paskirstytos atskiriems lygmenims. Kiekvienas lygmuo atlieka tam tikrą funkciją. Šiame poskyryje aptarti keletas tinklo protokolų ir jų panaudojimas BT sistemose.

Atvirųjų sistemų jungimo (ASJ) lygmenų protokolų modelis pagal atliekamas funkcijas tinklą suskirsto į septynis lygmenis. Lygmenų sąsaja nustato, kaip vienas lygmuo yra susijęs su kitu. Kiekvienas lygmuo kuria tam tikras paslaugas aukštesniajam lygmeniui ir reikalauja konkrečių paslaugų iš žemesniojo.

Žemiausias ASJ modelio lygmuo vadinamas fiziniu. Jo funkcija yra sukurti optinį kanalą su tam tikru juostos



11.13 pav. APV tinklo lygmenų sandara: (a) APV virš SOT, (b) IP virš SOT, (c) IP virš SOT ir IP virš APV.

pločiu aukščiau esančiam duomenų ryšio lygmeniui. Antrasis lygmuo turi sukurti sutankintą ir sinchronizuotą bitų srautą, kuris persiunčiamas fiziniu lygmeniu. Trečiasis lygmuo vadinamas tinklo lygmeniu ir sukuria virtualias grandis tarp dviejų tinklo mazgų užtikrindamas tiesioginį ryšį. Paketu perjungimo atveju šis tinklas parenka maršrutą paketams ar datagramoms. Ketvirtasis siuntimo lygmuo atsako už duomenų persiuntimą be klaidų tarp dviejų tinklo mazgų. Trys aukščiausieji sluoksniai: seansų, pateikimo ir taikomasis, tiekia aukštesnės eilės paslaugas.

Trijų žemiausių SSH dvipusio ryšio kanalų perjungimo tinklo lygmenų kombinacija realizuoja SOT protokolą (11.13 pav.). Tokiuose tinkluose fizinis lygmuo susideda iš optinių skaidulų, stiprintuvų, siųstuvų, imtuvų ir kitų tinklo elementų. Duomenų ryšio lygmuo sutankina įvairius 64 kb/s garso kanalus į norimo dažnio bitų srautą naudojant elektrinį laikinį tankinimą. Tinklo lygmuo atlieka perjungimus tarpiniuose mazguose ir sujungia du tinklo mazgus.

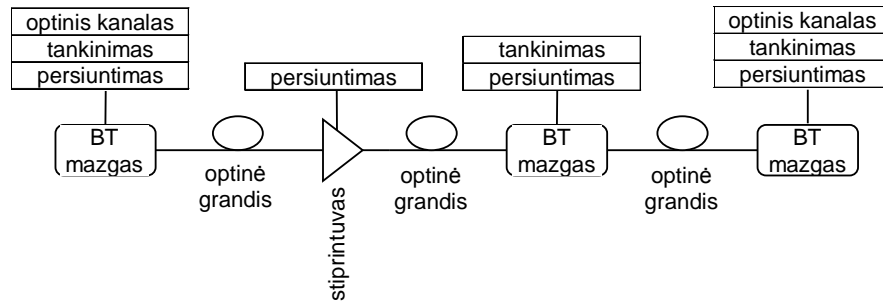
Aptarta paprasta tinklo schema buvo pakeista, kai reikėjo vienu fiziniu kanalu persiųsti garsą ir kompiuterinius duomenis. Sukurtas naujas paketų persiuntimo protokolas - asinchroninio persiuntimo veika (angl.: ATM (asynchronous transfer mode)). Pagal asinchroninio persiuntimo veikos (APV) protokolą tinklu siunčiami 53 baitų paketai (5 baitai skirti antraštei). APV protokolas buvo sukurtas remiantis SOT protokolu: SOT infrastruktūra (trys žemiausieji lygmenys) tapo fiziniu APV lygmeniu (11.13 (a) pav.). Atsiradus internetui, tuo pačiu principu, virš SOT lygmenų atsirado interneto protokolo lygmenys (11.13 (b) pav.). Interneto protokolo paketų dydis gali kisti nuo šimtų iki tūkstančių bitų. Paketo antraštyje yra informacija apie paketo dydį, šaltinį ir paskirties tašką. Interneto pranešimų srautas gali būti persiųstas SOT arba naudojant APV protokolą (11.13 (c) pav.). Ateityje interneto pranešimų srautas planuojamas persiųsti tiesiogiai BT tinklu – optinio interneto BT tinklu³⁶.

Atsiradus BT sistemoms TTS įvedė naują ASJ modelio lygmenį – optinį lygmenį. Optinis lygmuo yra pačioje apačioje, ir gali būti laikomas fizinio lygmens dalimi. Optinis tiesioginis dviejų tinklo mazgų sujungimas vadinamas šviesos keliu.

Optinis lygmuo susideda iš trijų posluoksnių: optinio persiuntimo, optinio tankinimo ir optinio kanalo (11.14 pav.). Nebūtinai visi posluoksniai yra kiekviename optinio ryšio kanalo elemente. Pvz., stiprintuve, kur vienodai stiprinami visi BT kanalai ir nevyksta kanalų perjungimas, yra tik persiuntimo posluoksnis.

Alternatyviame ryšio tinklo modelyje (ne ASJ) tinklas yra padalintas į tris plokštumas: siuntimo, kontrolės ir valdymo.

³⁶ M. C. Yuang, S. S. W. Lee, P.-L. Tien, Y.-M. Lin, J. Shih, F. T., and A. Chen, "Optical Coarse Packet-Switched IP-over-WDM Network (OPSINET): Technologies and Experiments", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 24, pp.: 117-127 (2006).



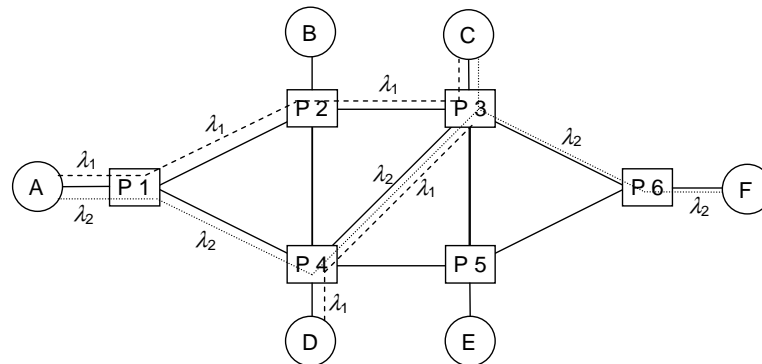
11.14 pav. Optinio lygmens ryšys su optine BT ryšio linija.

11.4.3 Bangos ilgio maršruto parinkimo tinklas

Optiniame tinkle su automatinu perjungimu šviesos kelias siuntimo plokštumoje sujungia du bet kuriuos tinklo mazgus. Tarpiniuose mazguose šviesos kelias sukuriama naudojant kryžminį optinį ryšį. Nors daug BT kanalų persiunčiama kiekviena tiesiogine linija, kiekvienas šviesos kelias persiunčia vieną kanalą į paskirties mazgą. Pagrindiniame tinkle kiekvieno kanalo sparta viršija 10 Gb/s, todėl svarbu pranešimų srautą sutvarkyti taip, kad juostos plotis būtų išnaudotas efektyviai. SOT atveju tai pasiekama naudojant elektrinį laikinį tankinimą. Naudojant IP protokolą, daugelis IP paketų sudedami į laikinio tankinimo kadra, kuris persiunčiamas vienu BT kanalu.

11.15 pav. pavaizduotas šešių mazgų BT tinklas, kuriame naudojant kryžminį optinį ryšį (KOR) daugeliu šviesos kelių sklinda du kanalai (λ_1 ir λ_2). Brūkšninės ir taškinės linijos vaizduoja kelius, kuriais persiunčiami kanalai. Nesant bangos ilgio keitiklio, šviesos kelias turi turėti tą patį bangos ilgį visose skaidulinėse grandyse ir sujungti bet kuriuos du mazgus. Šis apribojimas vadinamas bangos ilgio išlaikymu. Kitas apribojimas: du šviesos keliai, persiunčiami ta pačia fizine grandimi, turi turėti skirtingą bangos ilgį. Šie du apribojimai nustato taisykles, kaip turi būti priskirti bangos ilgiai. Tinkamai parinkti šviesos kelio bangos ilgį nėra paprasta, ir gali nepavykti sujungti dviejų tinklo taškų vienu šviesos keliu. 11.15 pav. pateiktame pavyzdyje yra du nenutrūkstantys šviesos keliai: mazgai A ir C sujungti bangos ilgio λ_1 šviesos keliu, mazgai A ir F - λ_2 .

Bangos ilgio maršruto parinkimo tinklo projektavimas supaprastėja, jei kryžminiame sujungime įmontuojamas bangos ilgio keitiklis. Bangos ilgio keitiklis pakeičia kanalo bangos ilgį neįtakojant persiunčiamos informacijos. 11.15 pav. pateiktame pavyzdyje neįmanoma tiesiogiai sujungti D ir C mazgų, nes į perjungiklį P3 ateina to paties bangos ilgio λ_1 signalas iš perjungiklių P2 ir P4. Tačiau jei perjungiklyje

11.15 pav. Supaprastinta 6 mazgų tinklo schema³⁷ (P – bangos ilgio maršruto parinkimo perjungiklis).

³⁷ R. Ramamurthy, B. Mukherjee, „Fixed-alternate routing and wavelength conversion in wavelength-routed optical networks“, *IEEE Trans. Networking.*, V. 10, p. 351-3672 (2002).

P3 bangos ilgio keitiklis vieno iš šių kanalų bangos ilgį pakeistų į λ_2 , tai mazgus C ir D galima būtų sujungti šviesos keliu, kurio bangos ilgis keičiasi perjungiklyje P3. 11.15 pav. matyti, kad du tinklo mazgai gali būti sujungti daugiau nei vienu šviesos keliu. Pvz., mazgai A ir B gali būti sujungti maršrutu pro perjungiklius P1 ir P2 arba P1, P4 ir P2. Fiksuotos alternatyvos maršruto parinkimo schemoje kiekvienas bangos ilgio maršruto parinktuvas turi maršruto parinkimo lentelę, kuri nustato maršruto prioritetą. Maršruto parinktuvas pirmiausia bando persiųsti signalą aukščiausio prioriteto maršrutu. Jei šis šviesos kelias neįmanomas, parenkamas sekantis maršrutas iš lentelės.

Adaptuoto maršruto parinkimo schemoje šviesos kelias sujungiantis du mazgus parenkamas dinamiškai, priklausomai nuo tinklo būsenos konkrečiu laiko momentu. Geriausio maršruto parinkimui naudojamas algoritmas, kuris įvertina tinklo efektyvumą, optimalų juostos pločio panaudojimą, mažiausią tarpinių mazgų skaičių, mažiausią bangos ilgio keitimų skaičių.

Bangos ilgio maršruto parinkimo tinklo kiekviename mazge naudojamas kryžminis optinis ryšys. Kuriant KOR reikia atsižvelgti ir į funkcijas, kurias jis turi atlikti, ir į įrangos kainą. Pvz., būtų gerai, jei kiekviename KOR perjungiklyje būtų bangos ilgio keitiklis. Tačiau tai labai padidintų įrangos kainą.

Kryžminis optinis ryšys turi atlikti daugybės įėjimų ir išėjimų perjungimus pagal nustatytą tvarką. Perjungimui naudojami elektrooptiniai LiNbO_3 perjungikliai, termooptiniai silicio bangolaidžių perjungikliai, mikroelektromechaninės sistemos (MEMS), skystųjų kristalų perjungikliai (žr.: 8 skyrių).

Dažniausiai naudojami MEMS perjungikliai, kurie, palyginus, yra mažų matmenų³⁸. MEMS sudaro mikroskopiniai veidrodžiai, kurie pasukami elektriniu signalu. MEMS skirstomos į dvimates ir trimates. Perjungimo trukmė naudojant MEMS yra 5 ms. Įneštiniai nuostoliai priklauso nuo lusto matmenų – pvz., 3 dB 16×16 perjungikliui, kurio dydis $2 \times 2 \text{ cm}^2$. Lusto dydis didėja tiesiškai didėjant įėjimų ir išėjimų skaičiui N , veidrodžių skaičius – kaip N^2 . Dvimatės MEMS retai daromos didesnės, nei $N=100$. Trimatės MEMS naudojamos kai įėjimų ir išėjimų skaičius didelis. Trimatėse sistemose reikia tik $2N$ veidrodžių, prievadų skaičius gali siekti tūkstančius.

11.4.4 Paketų perjungimo tinklas

Interneto pranešimų srautas susideda iš IP paketų, kurie maršruto parinktuvu yra elektroniškai perjungiami naudojant paskirties informaciją paketo antraštėje. Kuriant optinio interneto sistemą, paketų perjungimas pagrindiniame tinkle turi būti vykdomas optiškai. Tam reikalingi optiniai maršruto parinktuvai³⁹.

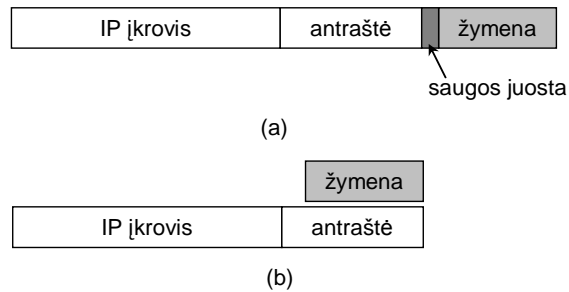
Optiniai maršruto parinktuvai paketų perjungimo tinkle naudoja optinę žymeną, kuri užkoduota maršruto parinkimo informacijoje (pvz., paskirties adrese).

Vienoje iš paketų perjungimo schemų, bitų srautas susideda iš fiksuoto ilgio laiko tarpinių, kurie sinchroniškai užpildomi paketais. Šioje schemoje visi paketai yra vienodo dydžio, o kai kurie tarpiniai gali būti tušti, priklausomai nuo tinklo apkrovimo. Kiekvienam tarpiniui priskiriama optinė žymena – perjungimas vykdomas tarpnis po tarpnio.

Kitoje paketų perjungimo schemoje, internetiniai paketai surenkami kraštiniame maršruto parinktuve, ir suformuojamas beveik nepertraukiamas bitų srautas (atliekamas statistinis tankinimas). Kiekvienam paketui priskiriama optinė žymena, kurioje yra visa maršruto parinkimo informacija. Paketas persiunčiamas pagrindiniam maršruto parinktuvui tarpiniame mazge. Čia maršruto parinktuvas perskaito žymeną, priskiria,

³⁸ K.-C. Fan, W.-L. Lin, L.-H. Chiang, S.-H. Chen, T.-T. Chung, and Y.-J. Yang, "A 2×2 Mechanical Optical Switch With a Thin MEMS Mirror", *J. Lightwave Technol.*, 27, pp.: 1155-1161 (2009).

³⁹ V. Eramo and M. Listanti, "Power Consumption in Bufferless Optical Packet Switches in SOA Technology", *J. Opt. Commun. Netw.*, 1, pp.: B15-B29 (2009).



11.16 pav. Optinės žymenos kodavimo schemas.

naują žymeną, jei reikia, pakeičia bangos ilgį, ir persiunčia paketą į kitą mazgą. Šiame persiuntime IP paketo informacija nėra verčiama į elektrinį signalą – maršruto parinkimui naudojama tik optinė žymena. Tik pasiekus paskirties mazgą, optinė žymena yra nuimama, o paketo informacija paverčiama elektriniu signalu, ir atstatomi siūsti duomenys. Ši persiuntimo schema vadinama optinės žymenos persiuntimu⁴⁰.

Kiekviename optiniame maršruto parinktuve yra vidinė maršruto parinkimo lentelė, kurios pagalba mazgų IP adresai verčiami į optines žymenes.

Optinės žymenos persiuntimo schema yra naudinga tuo, kad žymena gali būti sukurta mažesnio bitų dažnio ir naudoti kitą moduliavimo schemą, nei pats paketas. Taigi maršruto parinktuve nereikalinga itin sparti elektroninė įranga.

Optinei žymenai pridėti prie IP paketo naudojamos dvi schemas. Pirmojoje (11.16 (a) pav.) žymena prijungiama nuosekliai prie paketo atskiriant saugos juosta. Žymenos bangos ilgis yra toks pat kaip ir persiunčiamo IP paketo. Maršruto parinktuvas turi sugebėti atpažinti optinę žymeną ir apdoroti atskirai nuo IP paketo. Nuosekliosios žymenos naudojimas reikalauja paketo ir žymenos sinchronizavimo, sumažina tinklo pralaidumą, nes žymena ir saugos juosta užima laiko tarpusį.

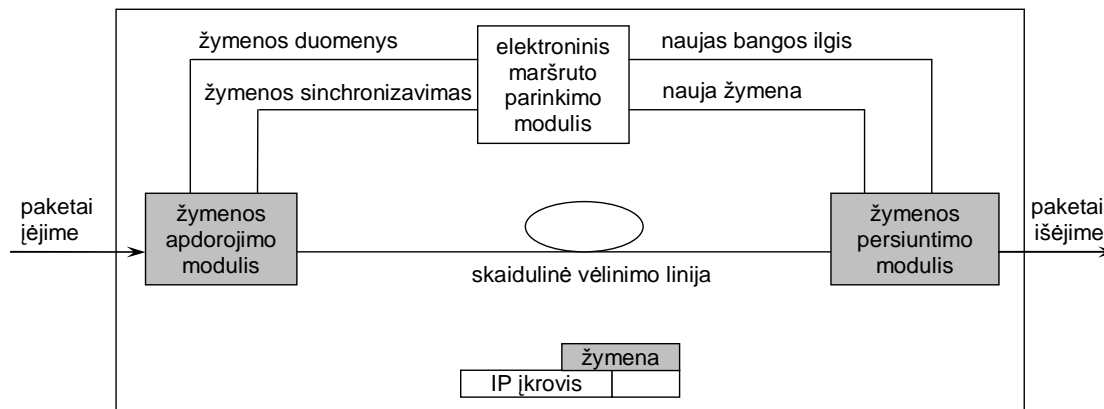
Kitas būdas priskirti paketui žymeną yra lygiagretusis (11.16 (b) pav.): žymena ir IP paketas persikloja laike, tačiau yra atskirti spektriškai – paketo ir žymenos nešlių bangos ilgiai yra skirtingi. Šiuo būdu eikvojamas skaidulos juostos plotis.

Alternatyva minėtoms žymenos priskyrimo schemoms yra ponešlio tankinimo (PNT) schemas naudojimas: atskiras mikrobangis ponešlis, kurio dažnis didesnis nei paketo bitų dažnis (>12 GHz, kai kanalo dažnis 10 Gb/s), naudojamas žymenai ir paketui persiūsti (optinės žymenos ir paketo bangos ilgis yra tas pats)⁴¹. Žymena persiunčiama lygiagrečiai su paketu. Šiuo atveju nereikalinga saugos juosta, žymenos ilgį riboja tik laiko tarpusnis, kurį užima persiunčiamas paketas. Taigi žymenos bitų dažnis gali būti kur kas mažesnis, nei IP paketo.

Maršruto parinktuvo naudojančio PNT schema pavaizduota 11.17 pav. Žymenos apdorojimo modulyje paimama keletas procentų signalo galios, kuri naudojama žymenai iškoduoti ir laiko sekai atkurti. Likusi signalo dalis patenka į vėlinimo liniją (tam tikro ilgio optinę skaidulą). Vėlinimas parenkamas taip, kad signalo sklidimo trukmė sutaptų su žymenos apdorojimo trukme ir abu signalai vienu metu patektų į žymenos persiuntimo modulį. Žymenos apdorojimo modulis optinį signalą paverčia elektriniu ir persiunčia pro filtrą, kuriame pašalinami paketo įkrovos bitai. Tada atkuriamą žymenos informacija, kuri persiunčiama į

⁴⁰ H. Furukawa, N. Wada, H. Harai, M. Naruse, H. Otsuki, K. Ikezawa, A. Toyama, N. Itou, H. Shimizu, H. Fujinuma, H. Iizuka, and T. Miyazaki, "Demonstration of 10 Gbit Ethernet/Optical-Packet Converter for IP Over Optical Packet Switching Network", *J. Lightwave Technol.*, 27, pp.: 2379-2390 (2009).

⁴¹ L. Giorgi, F. Cavaliere, P. Ghiggino, F. Ponzini, A. Bianchi, and A. D'Errico, "Characterization of a High Capacity Multi-User Optical Access Network Using 1 Gb/s 16 QAM Subcarrier Multiplexing", *J. Lightwave Technol.*, 27, pp.: 1203-1211 (2009).



11.17 pav. Maršruto parinktuvo naudojančio ponešlio tankinimą schema.

centrinį maršruto parinktuvą. Čia, naudojant maršruto parinkimo lentelę, parenkamas maršrutas, sukuriama nauja žymena, priskiriamas reikiamas bangos ilgis. Žymenos persiuntimo modulius suformuoja išėjimo paketą su nauja žymena.

PNT schemos naudojimo trūkumas yra neišvengiama žymenos ir paketo įkrovos interferencija. Taip pat PNT sistemoms reikalinga sparčioji elektronika, nes ponešlio dažnis turi viršyti signalo bitų dažnį.

Dar vienas būdas persiųsti IP paketą ir optinę žymeną yra taikyti ortogonalias moduliavimo schemas: paketui ir žymenai naudojamas tas pats nešlio bangos ilgis, tačiau skirtinga moduliavimo schema (pvz., amplitudės ir fazės moduliavimas)⁴².

Paminėti žymenos persiuntimo metodai optinę žymeną apdoroja pavertę ją elektriniu signalu. Naudojant kodinį tankinimą galima apdoroti optinį žymenos signalą. Skirtingiems mazgams persiunčiamiems paketams priskyrimas skirtingus ortogonaliuosius kodus galima sukurti optinį įrenginį, kuris parinks paketą maršrutą atsižvelgiant į priskirtą kodą: kiekvienam mazgui priskiriamas unikalus kodinio tankinimo kodas. Jei žymena užkoduota vienu iš kodų, tai mazgas, perskaitęs žymeną, paketą arba praleidžia, arba nukreipia.

Paketų perjungimo tinkle dviems paketams vienu metu pasiekus mazgą įvyksta konfliktas. Elektroniniuose maršruto parinktuvuose šis konfliktas išsprendžiamas laikinai vieną paketą saugant tarpiniame kaupiklyje (liekamojoje atmintinėje). Toks metodas netinkamas optiniams signalams. Optinis tarpinio kaupiklio analogas yra vėlinimo linija – reikiamo ilgio skaidula. Skaidulinė vėlinimo linija tam tikrą laiką sulaukia vieną iš dviejų vienu metu gautų paketų. Išspręsti konfliktą galima ir naudojant bangos ilgio keitimą: vieno iš paketų bangos ilgis pakeičiamas; optiniai maršruto parinktuvai gali vienalaikiškai apdoroti du skirtingo bangos ilgio paketus. Naudojant bangos ilgio pakeitimą neatsiranda papildomo vėlinimo. Trečiasis konfliktų sprendimo metodas: vienas iš paketų nukreipiamas į kitą mazgą. Šiuo atveju gali nutikti taip, kad paketas bus siuntinėjamas tarp mazgų be galo ilgai. Norint išvengti begalinio siuntinėjimo žymenoje įrašomas didžiausias leistinas tarpinių persiuntimų skaičius (pasiekus šį skaičių paketas atmetamas).

Paketų perjungimo tinkle maršruto parinkimas kiekvienam paketui atliekamas mažiau nei per 1 μ s. Optinių maršruto parinktuvų veikai turi būti itin sparti. Paketų konfliktų problema darosi vis didesnė didėjant tinklo pralaidumui. Šioms problemoms spręsti sukurta keletas kitų maršruto parinkimo schemų.

Naudojant optinę blyksnių perjungimo schemą suformuojamos ir persiunčiamos tos pačios paskirties paketų grupės. Tam iš karto nustatomas fizinis ryšys (šviesos kelias) tarp išsiuntimo ir paskirties mazgų. Reikalingas ryšys išlaikomas, kol persiunčiama visa paketų grupė. Tai gali trukti nuo kelių milisekundžių iki kelių minučių.

⁴² J. Armstrong, "OFDM for Optical Communications", *J. Lightwave Technol.*, 27, pp.: 189-204 (2009).

Fotoninių grupių maršruto parinkimo schemoje sudaromos laikinos paketų grupės, kurių užimamo laiko tarpsnio trukmė kinta nuo kelių nanosekundžių iki kelių sekundžių. Kiekvienoje grupėje, vadinamoje fotonine grupe, gali būti skirtingų bangos ilgių paketai. Vienoje grupėje esančių paketų paskirties taškas yra tas pats. Maršrutas parenkamas visai fotoninei grupei, todėl tarpiniuose mazguose nereikia išskirstyti kiekvieno bangos ilgio.

Maršruto parinkimo schema naudojanti laikinį tankinimą nuosekliai sujungia paketus į grupę suspaudžiant juos laike. Gaunamas didelės spartos bitų srautas (>100 Gb/s). Šioje grupėje sujungiami vienodo bangos ilgio paketai.

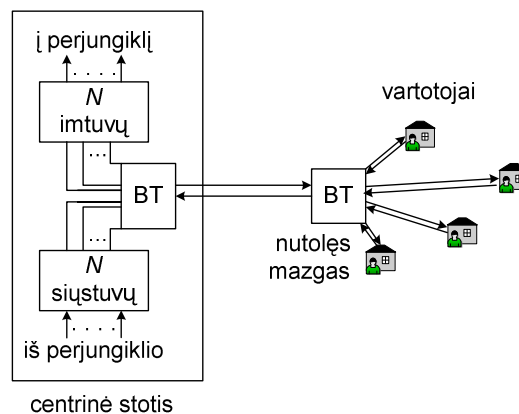
11.4.5 Skirstomasis ir prieigos tinklas

Šiame poskyryje aptariami lėtesni ir mažesnę teritoriją apimantys teritoriniai ir vietiniai tinklai.

Kabelinės televizijos sistemoms naudojami transliavimo tinklai. Kol kas kabelinės televizijos tinkle daugelio vaizdo kanalų persiuntimui naudojama ponešlio tankinimo schema. Banginio tankinimo panaudojimas transliavimui suteikia naujas galimybes. Kanalo bangos ilgį panaudojant kaip žymę skirtą maršruto parinkimui, galima įgyvendinti visiškai optinį transliavimo tinklą. Kadangi bangos ilgis naudojamas daugkartiniai prieigai, tokia schema vadinama banginio tankinimo daugkartinė prieiga (BTDP). BTDP tinklus galima suskirstyti į vieno šuolio ir daugelio šuolių tinklus. Vieno šuolio tinkluose kiekvienas mazgas yra sujungtas su visais kitais mazgais. Daugelio šuolių tinkle optinis signalas pasiūstas iš vieno mazgo praeina keletą tarpinių mazgų, kol pasiekia paskirties mazgą.

Prieigos tinklas sujungia atskirus vartotojus į vietinį tinklą ir prijungia prie teritorinio tinklo. Šiandien prieigos tinkluose vyrauja elektroninė įranga, tačiau siekiama atvesti optinį kabelį iki kiekvieno vartotojo. Optiniame vietiniame tinkle neturėtų būti jokių aktyviųjų perjungimo elementų tarp stoties ir vartotojo^{43,44}. Tokie tinklai vadinami pasyviaisiais optiniais tinklais (POT).

Pasyviosios fotoninės linijos konfigūracijos tinklas persiunčia daugelio bangos ilgių signalą tarp vartotojų ir centrinės stoties. Tinklo, aptarnaujančio N vartotojų, centrinė stotis turi N siųstuvų, spinduliuojančių $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ signalus, ir N imtuvų, priimančių $\lambda_{N+1}, \lambda_{N+2}, \dots, \lambda_{2N}$ (11.18 pav.). Du bangos ilgiai λ_k ir λ_{k+1} skiriami



11.18 pav. Pasyviosios fotoninės linijos schema⁴⁵.

⁴³ G. Kramer and G. Pesavento, "Ethernet Passive Optical Network (EPON): Building a Next-Generation Optical Access Network", *IEEE Commun. Mag.*, 40, pp.: 66-73 (2002).

⁴⁴ J.-I. Kani, F. Bourgart, A. Cui, A. Rafel, M. Campbell, and R. Davey, S. Rodrigues, "Next-Generation PON—Part I: Technology Roadmap and General Requirements", *IEEE Commun. Mag.*, 47, pp.: 43-49 (2009).

⁴⁵ S. S. Wagner, H. L. Lemberg, "Technology and system issues for the WDM-based fiber loop architecture", *J. Lightwave Technol.*, V. 7, pp. 1759-1768 (1989).

k -tajam vartotojui – vienas duomenims išsiųsti, kitas gauti. Nutoles mazgas sutankina kelių vartotojų signalus ir persiunčia juos į centrinę stotį.

POT funkcijos yra kiekvienam vartotojui suteikti plačiajuostę prieigą, kuo pigiau persiųsti garso, vaizdo ir interneto srautus. Plačiajuosčiame POT aukštakrypčiam persiuntimui naudojamas 1,3 μm bangos ilgis. Žemakrypčiam persiuntimui naudojami du bangos ilgiai: telefonijos ir interneto srautai siunčiami 1,50 μm bangos ilgiu, vaizdo signalas – 1,55 μm . Žemakryptis srautas plačiajuosčiame POT persiunčiamas 622 Mb/s, o aukštakryptis 155 Mb/s sparta naudojant APV protokolą. Siekiama padidinti žemakrypčio srauto spartą virš 1 Gb/s.

11.5 Optinės ryšio sistemos projektavimas

Pirmasis žingsnis kuriant skaidulinės optikos ryšio sistemą yra sprendimas, kokie reikalingi visų įtaisų parametrai. Svarbiausi skaitmeninės sistemos parametrai yra duomenų persiuntimo sparta ir bitų klaidų dažnis, analoginės - signalo ir triukšmo santykis. Visose sistemose aktualus yra persiuntimo nuotolis. Taigi pagrindiniai klausimai į kuriuos reikia atsakyti:

- kiek toli?
- kaip gerai?
- kaip greitai?

Visi sprendimai yra vienas su kitu susiję, o svarbiausias jų yra persiuntimo nuotolis. Persiuntimo nuotolis nulemia siųstuvo galingumą, taigi ir spinduliuotės šaltinio tipą. Atitinkamai reikia parinkti optinės skaidulos rūšį (ilgesniems atstumams geriau tinka vienmodis optinis kabelis). Siųstuvas ir naudojamas kabelis nulemia imtuvo parametrus. Persiuntimo nuotolis taip pat įtakoja moduliacijos schemą. 11.1 lentelėje pateiktas visas optinių sistemų parametrų sąrašas.

Yra parengta keletas optinių ryšio sistemų kūrimo metodikų. Viena jų remiasi linijos optinių nuostolių apskaičiavimu. Šioje metodikoje įvertinama siųstuvo išėjimo galia, spinduliuotės bangos ilgis, silpninimas skaiduloje, skaidulos juostos plotis, imtuvo optinis jautris.

Projektuojant kitu metodu, nustatotamas galimas impulsų frontas, kuris nulemia persiuntimo įtaisų sugebėjimą pakankamai sparčiai išjungti ir įjungti signalą.

11.1 lentelė. Optinių ryšio sistemų parametrai.

Parametras	Pasirinkimas
Persiuntimo nuotolis	Nuotoliui didėjant didėja sistemos sudėtingumas
Optinio kabelio rūšis	Vienmodis ar daugiamodis
Dispersija	Reikalingi signalo regeneratoriai ir dispersijos kompensavimo moduliai
Optinės skaidulos netiesiškumas	Reikiamos skaidulos charakteristikos, spinduliuotės bangos ilgis ir galia
Spinduliuotės bangos ilgis	780 nm, 850 nm, 1310 nm, 1550 nm ar 1625 nm
Siųstuvo galia	Išreiškiama milidecibelais
Šviesos šaltinio rūšis	Lazerinis ar šviesos diodas
Imtuvo jautris, perkrovimo charakteristikos	Išreiškiamas milidecibelais
Fotodetektoriaus rūšis	pin ar griūtinis fotodiodas
Moduliavimo schema	Amplitudinė, fazės, kodinė ar skaitmeninė
Bitų klaidų dažnis (skaitmeninėms sistemoms)	10^{-9} , 10^{-12}
Signalų ir triukšmo santykis	Išreiškiamas decibelais
Jungčių ir sujungimų skaičius	Daugėjant jungčių skaičiui sistemoje didėja signalo nuostoliai
Aplinkos reikalavimai	Temperatūra, drėgmė, saulės poveikis

Jautrumo analizė nustato mažiausią optinę galią, kuri turi pasiekti imtuvą tam, kad sistemos veikimas būtų patenkinamas. Imtuvo jautrį įtakoja šaltinio triukšmas, skaidulos triukšmas, imtuvo triukšmas, trukmės drebinimas, tarp simbolinę interferencija (iškraipymai dėl impulsų persiklojimo), bitų klaidų dažnis.

Taip pat reikia atsižvelgti į sistemos veikimo aplinką. Temperatūros pokyčiai įtakoja šviesos šaltinio veikimą, taip pat optinės skaidulos parametrus. Įdiegiant sistemą turi būti atsižvelgta į priešgaisrinius ir spinduliuotės reikalavimus.

Nemažiau svarbus sistemos parametras yra jos kaina. Visų įtaisų parinkimas turės įtakos ir sistemos veikimo parametrams, ir sistemos kainai.

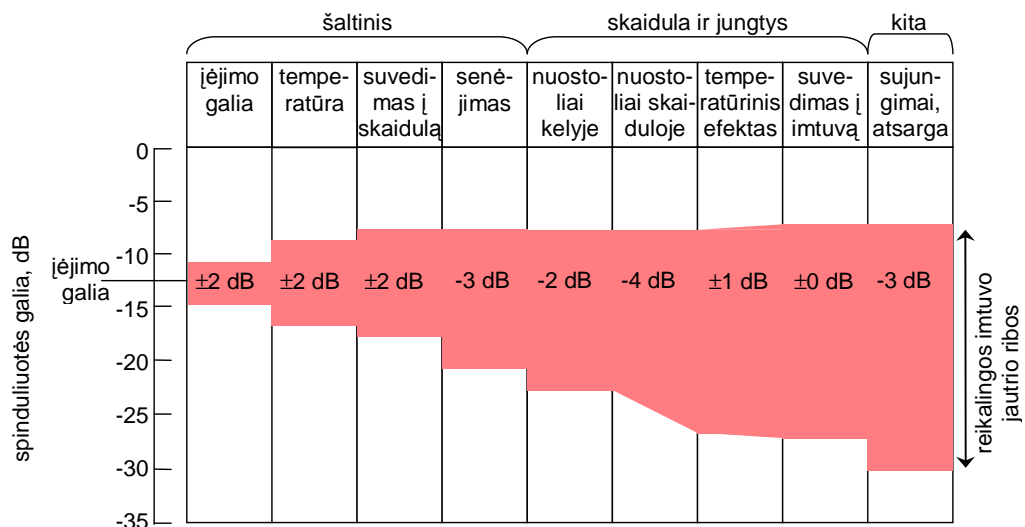
Projektuojant optinę ryšio sistemą reikia aptarti šiuos klausimus:

1. Kokie nuostoliai optinėje skaiduloje? Nuostoliai skaiduloje yra juostos pločio ir persiuntimo nuotolių sandauga; jie nusako optinio silpninimo dydį tam tikram skaidulos ilgiui. Žinant persiuntimo nuotolį (atstumą tarp siųstuvo ir imtuvo) galima šiuos nuostolius apskaičiuoti. Nuostoliai optinėje skaiduloje nulemia siųstuvo parametrus bei regeneratorių sistemoje poreikį.
2. Kokio tipo (garso, vaizdo, duomenų) signalas bus siunčiamas - taigi, analoginis ar skaitmeninis?
3. Kokio tipo (vienmodė ar daugiamodė) optinė skaidula bus naudojama? Skaidulos parinkimas priklausys nuo persiuntimo nuotolio, signalo tipo. Paprastai didelių nuotolių, didelės spartos ar daugiakanaliam persiuntimui naudojamos vienmodės skaidulos. O trumpų nuotolių, nesparčiam vienkanaliam persiuntimui - pigesnės daugiamodės skaidulos.
4. Kokios bus naudojamos optinės jungtys?
5. Kokybė, kurios tikimės imtuvo gale (dažniausiai aktualu vaizdo signalui). Nors logiškas atsakymas būtų „geriausia“. Tačiau realiai gali būti: aukšta kokybė, transliavimo kokybė, studijos kokybė ir kt.
6. Kokia bus sistemos konfigūracija (topologija)?

11.5.1 Optinės linijos nuostolių įvertinimas

Optinės ryšio sistemos kūrimą galima pradėti nuo nuostolių linijoje įvertinimo. 11.19 pav. iliustruoja pagrindinius reikalavimus optiniams skaičiavimams kuriant optinės skaidulos liniją. Realiai linija turi toleruoti tam tikrą optinių nuostolių dydį. 11.19 paveiksle pateikti hipotetinės linijos įvertinimai.

Nuostolių skaičiavimas pradedamas nuo siųstuvo išėjimo galios (būdinga galia -12,5 dBm). Spinduliuotės šaltinio (ŠD ar LD) galia gali kisti ± 2 dB. Taigi išėjimo galia kinta nuo -14,5 dBm iki -10,5 dBm. Dėl



11.19 pav. Optiniai nuostoliai linijoje.

temperatūros svyravimų ši galia gali dar papildomai kisti ± 2 dB. Papildomi ± 2 dB atsiranda dėl lazerio ir skaidulos ryšio. Turi būti atsižvelgta ir į senėjimo efektą – $-(1-3)$ dB. Prideda ir nuostoliai dėl optinių jungčių (-2 dB). Šios sistemos optiniame kabelyje patiriami nuostoliai yra 4 dB/km. Temperatūros įtaka kabeliui įvertinama ± 1 dB. Nuostolius imtuve galima sumažinti naudojant didelio ploto detektorius. Papildomi -3 dB turėtų užtikrinti patikimą sistemos veiką. Taigi, atsižvelgus į visus nuostolius, imtuvas turi priimti ir galingą $-5,5$ dBm, ir silpną $-31,5$ dBm optinį signalą.

Klaidinga manyti, kad, norint apibrėžti optinę sistemą, reikia nurodyti siųstuvo galią, imtuvo jautrį bei nuostolius optinėje linijoje. Užtenka nurodyti tik nuostolius optinėje linijoje, ir pagal tai bus galima parinkti siųstuvo ir imtuvo porą. Pvz., jei nuostoliai grandyje yra 10 dB, tai tinkamai veiks ir siųstuvo su 0 dBm išėjime bei imtuvo su -10 dBm pora, ir -10 dBm siųstuvą su -20 dBm imtuvu.

Pagrindinė naudota literatūra:

1. M. Fukuda. Optical semiconductor devices (John Willey&Sons, New York, 1998).
2. G. P. Agrawal. Lightwave technology. Components and devices (John Willey&Sons, New York, 2004).
3. G. P. Agrawal. Lightwave technology. Telecommunication systems (John Willey&Sons, New York, 2005).
4. www.fiber-optics.info (2007 m. rugsėjo mėn.).
5. V. Palenskis, J. Matukas, S. Pralgauskaitė, Lazeriniai diodai, *pagalbinė mokymo priemonė bakalaurams ir magistrams* (Vilnius, 2000).
6. E. Rosencher, B. Vinter. Optoelectronics (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2002).
7. Low-dimensional semiconductor structures : fundamentals and device applications. Ed. by K. Barnham, D. Vvedensky (Cambridge University Press, Cambridge, 2001).
8. P. K. Basu. Theory of optical processes in semiconductors: bulk and microstructures (Clarendon Press, Oxford, 2005).
9. J.-M. Liu. Photonic devices (Cambridge University Press, Cambridge, 2005).

Papildomam skaitymui rekomenduojama literatūra:

1. A. Žukauskas. Puslaidininkiniai šviestukai (Vilniaus universitetas, Vilnius, 2008).
2. A. Krotkus. Puslaidininkų optoelektronikos sistemos ir prietaisai (Vilniaus universitetas, Vilnius, 2008).
3. D. Čiplys, A. Krotkus, V. Smilgevičius. Šviesolaidžių optika (Vilniaus universiteto leidykla, Vilnius, 2008).
4. V. Karpus. Kristalinis būvis. Kietųjų kūnų fizika (UAB Ciklonas, Vilnius, 2002).

