# Parametrinis aukštadažnės spinduliuotės stiprinimas ir harmonikų generacija GaAs/AlGaAs supergardelėse

# Parametric gain of high frequency radiation and harmonic generation in GaAs/AlGaAs superlattices

Gintaras Valušis[1], Vladislovas Čižas[1], Liudvikas Subačius[1], Natalia V. Alexeeva[1], Dalius Seliuta[1], Timo Hyart[2], Klaus Köhler[3], Kirill N. Alekseev[1,4]
[1]Fizinių ir technologijos mokslų centras, Savanorių pr. 231, 02300 Vilnius
[2]Department of Applied Physics, Aalto University, 00076 Aalto, Espoo, Finland
[3]Fraunhofeer-Institut fur Angewandte Festkorperphysik, Tullastrasse 72, Freiburg D-79108, Germany
[4]Department of Physics, Loughborough University, Loughborough LE11 3TU, United Kingdom
gintaras.valusis@ftmc.lt

Terahercinių (THz) dažnių diapazonas (0,1 – 10 THz, 1 THz yra $10^{12}$ Hz) yra labai patrauklus įvairiems spektroskopiniams ir vaizdinimo taikymams [1]. Viena iš pagrindinių problemų, kuri vis dar išlieka siekiant išplėsti tokių taikymų asortimentą, yra kompaktiškų ir efektyvių spinduliuotės emiterių, galinčių dirbti kambario temperatūros sąlygomis, trūkumas.

Šiame pranešime mes pristatome pirmą kartą eksperimentiškai stebėtą disipacinį parametrinį aukštadažnės spinduliuotės stiprinimą GaAs/AlGaAs supergardelėse kambario temperatūroje. Nors ankstesni teoriniai darbai [2,3] atskleidė, kad disipacinis aukštadažnės spinduliuotės stiprininimas gali būti stebimas plačiame dažnių ruože, eksperimentinio šio parametrinio reiškinio patvirtinimo iki šiol nebuvo.

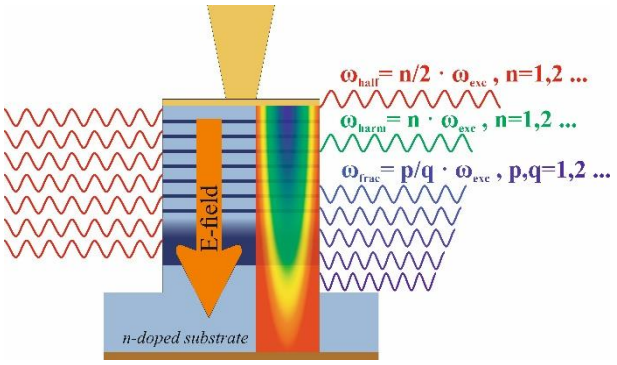
Tyrimo objektas buvo siliciu legiruota GaAs/AlGaAs supergardelė susidedanti iš 30 periodų, kurių kiekvienas buvo 5 nm GaAs: Si legiruotas kvantinis šulinys ir 1 nm $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ barjeras, tuo būdu formuojantis plačią 104 meV minijuostą. Struktūra buvo auginama naudojant n+ legiruotą GaAs padėklą (storis -- 500 μm; legiravimas – $10^{18}$ $cm^{-3}$), naudojant molekulinių pluoštelių epitaksiją (MBE). Supergardelės legiravimo lygis $N$=$10^{16}$ $cm^{-3}$ buvo parinktas $L$ = 180 nm struktūros ilgiui, kad būtų patenkintas Kroemerio elektrinio stabilumo kriterijus, atsižvelgiant į kritinį $E_{cr}$≈5,5 kV/cm dydžio elektrinį lauką nurodyto pločio minijuostai.

Mūsų eksperimente tirtos kvantinės struktūros darbo taškas buvo Esaki-Tsu neigiamo diferencinio dreifo greičio ruože. Kai toks bandinys buvo patalpintas į mikrobangų elektrinį lauką bangolaidyje, buvo nustatyta, jog jis stiprina į jį krintančią 8.2 – 12.4 GHz dažnio spinduliuotę [4]. Stebimi išsigimusio ir neišsigimusio parametrinio stiprinimo režimai, pasireiškiantys įvairių harmonikų generacija. Parametrinis stiprinimo mechanizmas remiasi elektromagnetinių bangų konversija į neslopinamas išilgines dreifo-relaksacines modas supergardelėje. Šios lėtos plazminės bangos, plintančios tūkstantį kartų lėčiau už šviesą medžiagoje, įgalina gauti didelį stiprinimą, siekiantį 10000 $cm^{-1}$ [4].

Parodyta, jog supergardelė generuoja plačiajuostį harmonikų spektrą, kuris gali pasiekti THz dažnių sritį. Dėl didelio supergardelės netiesiškumo kiekviena emisijos linija dalyvauja keliuose daugiafotoniniuose procesuose vienu metu.

Mes teigiame, kad jei supergardelė yra Esaki-Tsu režime, nustoja galioti įprastiniai Manley-Rowe sąryšiai, todėl yra galimi tiek konversijos aukštyn (*up-conversion*), tiek konversijos žemyn (*down-conversion*) procesai [4]. Taigi, supergardelės elgiasi sudėtingiau nei įprastinės optinės parametrinės sistemos [5].

Parodyta, jog bendru atveju spinduliuotės stiprinimo supergardelėse mechanizmas gali būti sudarytas iš nuo fazės nepriklausančio Bloch'o stiprinimo ir fazei jautraus parametrinio stiprinimo komponenčių [6].




1 pav. Elektromagnetinės spinduliuotės stiprinimo bei harmonikų generacijos puslaidininkinėje supergardelėje iliustracija. Metalinė antena (viršuje) koncentruoja krintančią elektromagnetinę spinduliuotę į supergardelę, kurioje yra sužadinama išilginė plazmoninė banga.

*Reikšminiai žodžiai: parametrinis stiprinimas, puslaidininkinės supergardelės, harmonikų generacija.*

## Literatūra

[1] G. Valušis, A. Lisauskas, H. Yuan, W. Knap, and H. G. Roskos, Sensors **21**, 4092 (2021).
[2] T. Hyart, A.V. Shorokhov, and K. N. Alekseev, Phys. Rev. Lett. **98**, 220404 (2007).
[3] T. Hyart, N.V. Alexeeva, J. Mattas, and K.N. Alekseev, Phys. Rev. Lett. **102**, 140405 (2009).
[4] V. Čižas, L. Subačius, N. V. Alexeeva, D. Seliuta, T. Hyart, K. Kohler, K. N. Alekseev, and G. Valušis, Phys. Rev. Lett. **128,** 236802 (2022).
[5] S. Longhi, Opt. Lett. **41**, 1813 (2016).
[6] V. Čižas, N. V. Alexeeva, K. N. Alekseev, and G. Valušis, Nanomaterials **13**, 1993 (2023).