

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Lazerinių tyrimų centras

Laboratorinis darbas Nr. MNFT-3

TRIMATIS SPAUSDINIMAS DINAMINĖS PROJEKCIJOS LITOGRAFIJOS BŪDU

Lazerinė fizika ir optinės technologijos ir Lazerinė technologija magistro programų studentams

Vilnius 2017

1 Darbo tikslai

1. Susipažinti su dinaminės projekcinės litografijos technologija, jos pranašumais ir apribojimais.
2. Pagaminti savo sugalvotą trimatį objektą.

2 Uždaviniai

2.1 Namų darbai:

1. Grupėje sugalvoti ir pasirinkta CAD programa nubraižyti 3D modelį, turintį periodinę struktūrą (išsaugoti .STL formatu), kuri keisdami pagal jūsų pasirinktą dėsnį (mažinimas, didinimas ar kt.) galėtumėte nustatyti DPL spausdintuvo raišką. Atspausdinti galėsite tiek iteracijų, kiek grupėje narių, todėl numatykite tikslingą raiškos keitimo algoritmą. (Pastaba: dėl laiko taupymo sumetimo apsiribokite ne didesniais nei $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}^3$ dariniais)
2. Individualiai sugalvoti ir nubraižyti jums įdomios (ar reikalingos) detalės 3D modelį. (Pastaba: dėl laiko taupymo sumetimo apsiribokite ne didesniais nei $2 \times 2 \times 1,5 \text{ cm}^3$ dariniais)

2.2 Laboratorijoje:

1. Atspausdinkite savo sugalvotą periodinį darinį keliomis iteracijomis. Nustatykite charakteringus darinio elementų matmenis (apytiksliai) kuomet (a) suformuojamas geometriškai taisyklingas, save išlaikantis darinys; (b) darinio elementai išskiriami tarpusavyje, tačiau aiškiai matomi geometrijos pažeidimai; (c) darinio elementai XY koordinatėse nebeišskiriami.
2. Eksperimentiškai nustatyti "darbinę kreivę" tiriamai dervai ir rasti optimalią ekspozicijos dozės vertę.
3. Atspausdinti savo pasirinktą trimatę detalę.

3 Kontroliniai klausimai

1. DLP stereolitografijos spausdintuvo veikimo principas.
2. DLP stereolitografijos spausdinimo įpatybės lyginant su kitomis stereolitografijos technologijomis.
3. Erdvinę skyrą ribojantys veiksniai.

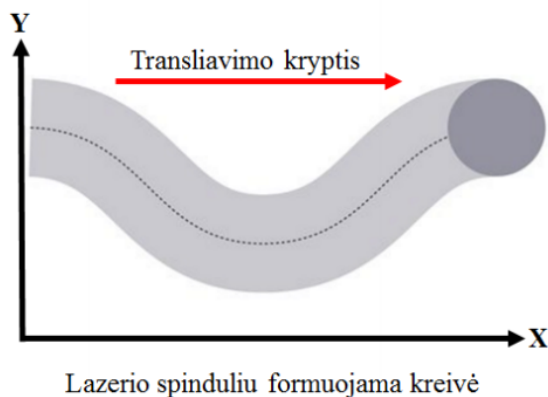
4 Darbo priemonės ir įranga

Laboratorinio darbo metu bus naudojamas DLP litografijos spausdintuvas Asiga PICO2 UV ir darbui su šiuo spausdintuvu reikalingi priedai bei įrankiai. Kaip naudotis prietaisu, bus pristatyta laboratorinio darbo pradžioje.

5 Teorinė medžiaga

5.1 Stereolitografija ir jos rūšys

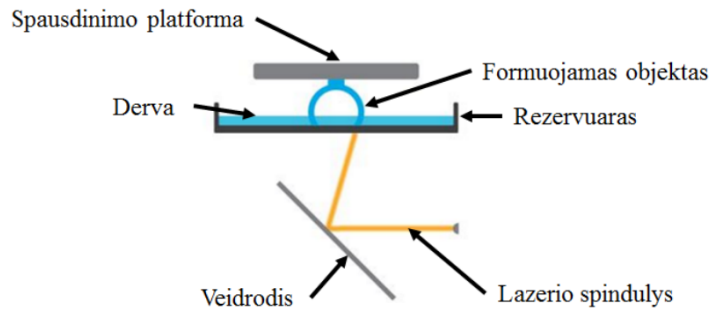
Stereolitografija (SLA) yra fotopolimerizacijos pagrindu paremta optinė 3D spausdinimo (O3DS) technologija, kai UV spinduliuote šviesai jautrios dervos paverčiamos į kietus polimerinius darinius. Išskiriami du šios technologijos tipai: lazerinio rašymo stereolitografija ir skaitmeninio šviesos apdorojimo (angl. digital light processing, DLP) stereolitografija. Pirmiausia, kompiuterinėmis programomis (angl. computer aided design, CAD) sukuriama norimas 3D modelis. Tada modelis programiškai apdorojamas, t. y. suskaidomas į tam tikro aukščio sluoksnius toje koordinatėje, kurioje vyksta formuojamo objekto transliavimas. Po to duomenys perduodami į 3D spausdintuvą ir pradedamas gamybos etapas [1]. Gamyba aliekama kartojant tokį žingsnių ciklą: 1) — formavimo platformos panardinimas į rezervuare esančią dervą fiksuotoje padėtyje virš langelio, pro kurį patenka spinduliuotė, 2) — selektyvi ekspozicija apšviečiant formavimo platformą, 3) — suformuoto sluoksnio atskyrimas nuo formavimo langelio, 4) — mechaninis dervos užliejimas naujam sluoksniui formuoti ir 5) — platformos pozicionavimas į naują padėtį. Lyginant lazerinio rašymo SLA ir DLP technologijas, skirtingai atliekamas žingsnis Nr. 2. Lazerinio rašymo SLA atveju, kaip šviesos šaltinis yra naudojami lazeriniai diodai. Generuojamas lazerinis pluoštas yra fokusuojamas į dervą taip, kad būtų



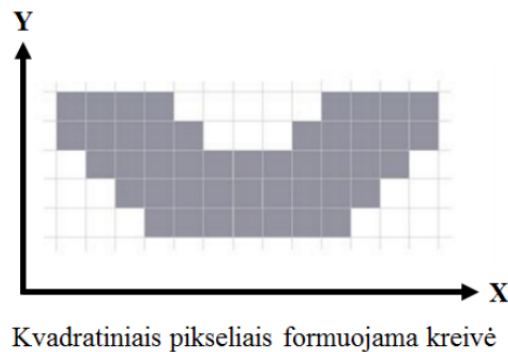
1 pav. Lazerio dėme kuriamas sluoksnis [3].

sukietintas norimo aukščio sluoksnis. Tai reiškia, kad spinduliuotė turi praeiti konkretų medžia-

gos storį ir būti jame tiesiškai sugerta. Pluoštas yra rastriškai skenuojamas per visą sluoksnio skerspjūvį. Tai atliekama dviem galvanometriniams veidrodžiams – vienas reguliuoja pluošto atlenkimą X ašyje, o kitas Y ašyje. Dėl židinyje vykstančios polimerizacijos reakcijos medžiaga tampa kieta. Taip suformuojamas pirmasis sluoksnis (1 pav.). Tada objektas pakeliamas per vieno sluoksnio aukštį ir pradeda naujojo skerspjūvio ekspozicija. Jis prikimba prie prieš tai suformuoto. Taip sukuriama antrasis sluoksnis, trečiasis ir t.t. Procesas kartojamas, kol padaromas visas objektas [2]. Principinė lazerinio rašymo SLA schema vaizduojama 2 pav.



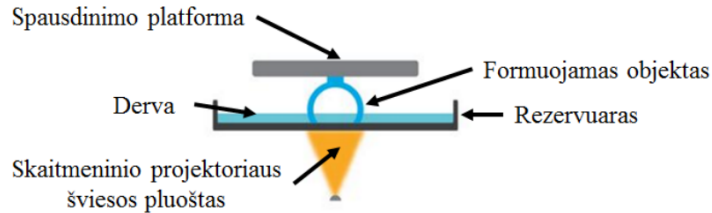
2 pav. Lazerinio rašymo SLA principinė schema. Sluoksnis formuojamas pluošto dėme [3].



3 pav. Selektyvusis eksponavimas skaitmeniniu projektoriumi. Sluoksnis kuriamas iš kvadratinų pikselių [3].

DLP SLA atveju šviesos šaltinis yra šviesos diodas LED. LED spinduliuotės moduliavimas yra pagrįstas optine mikroelektromechanine technologija, naudojant skaitmeninius mikroveidrodinius prietaisus (angl. digital micromirror device, DMD). Ekspozicijos metu fokusuojamas ne vienas pluoštas, bet projektuojamas visas vieno sluoksnio atvaizdas. Vaizdo projekciją formuoja mikrometrinių matmenų veidrodėliai, išdėlioti matrica ant puslaidininkinio lusto. Sluoksnis kuriamas iš kvadratinų pikselių (3 pav.). Veidrodėliai gali būti dviejose būsenose: įjungimo ir išjungimo. Įjungimo padėtyje jie nukreipia šviesą į eksponuojamą paviršių, kur turime šviesą sritį. Išjungimo – nukreipia į šalį ir gaunama tamsi sritis. Veidrodėlių matmenys gali siekti vos

5,4 μm [4] ir būti atvaizduoti kelių dešimčių μm dydžio vaizdo pikseliais. DLP SLA veikimo



4 pav. DLP SLA principinė veikimo schema. Sluoksnio vaizdas projektuojamas į fotojautrią dervą pro rezervuare įtaisytą skaidrų langelį [3].

principas schematiškai pavaizduotas 4 pav. Plotas, kurį galima apšviesti, ir spausdinimo skyra priklauso nuo mikroveidrodėlių dydžio, atstumo tarp jų ir naudojamos atvaizdavimo optikos, kas yra nekintami parametrai.

Keletas įmonių, gaminančių komercinius lazerinio rašymo SLA 3D spausdintuvus: „Formlabs“, „3D Systems“, „DWS Lab“, „XYZ Printing“ ir kt. Jų sukurtų prietaisų fokusuojamo lazerio pluošto dėmės dydis varijuoja nuo 140 μm iki 300 μm . Kitos įmonės („MoonRay“, „Autodesk“, „B9Creator“, „UNCIA 3D“, „Morpheus“, „Kudo 3D“, „CoLiDo“ ir kt.) gamina DLP SLA principu veikiančius prietaisus. Jų kuriamas vaizdo pikselis dažnai neviršija 100x100 μm^2 . Šie dydžiai nusako pasiekiamą prietaisų skyrą XY plokštumoje. Tačiau svarbus parametras yra ir vieno sluoksnio aukštis, kas apibūdina skyrą Z ašyje. Įprastai pasiekiamas sluoksnio aukštis kinta nuo 10 μm iki 200 μm ir priklauso nuo to, kaip yra sugerama spinduliuotė medžiagoje. Modelis, pagal kurį galima ištirti šį svarbų parametą, detaliau aptartas skyriuje „Medžiagų tiesinė optinė sugertis“.

Tiek lazerinis rašymo, tiek DLP SLA technologijos pagerino 3D spausdinimo tikslumą. Dėl aukšto preciziškumo SLA technologijos yra efektyvios ir pasižymi mažomis medžiagos sąnaudomis. Tuo jos patrauklios naudoti tokiose srityse kaip juvelyrika ir dizainas, mikrofluidika ir jutiklių gamyba [5, 6], medicininis modeliavimas, chirurginių kreipiklių gamyba ar odontologija [7, 8].

5.2 Medžiagų tiesinė optinė sugertis

Praeitame skyriuje buvo užsiminta apie Z skyros svarbą SLA technologijoje. Ji nusako, kokio aukščio sluoksnius įmanoma suformuoti konkrečioje dervoje. Kitaip tariant, Z skyra lemia, kokį ploniausią darinį arba žemiausią kanalą galima suformuoti. Tai svarbu žinoti tokiuose taikymuose, kaip membranų gamyba arba mikrofluidika [9]. Šiame skyriuje aptarsime mechanizmą, lemiantį skyrą Z ašyje [10].

Kokio aukščio sluoksnį įmanoma polimerizuoti priklausys nuo to, kaip giliai šviesa gali prasiskverbti į dervą. Tai lemia jos sugerties koeficientas α . α apibūdina šviesos nukeliamą

atstumą medžiagoje, po kurio spinduliuotės intensyvumas I sumažėja e^{-1} kartų. Matavimo vienetai yra μm^{-1} . Jam atvirkščias dydis nusakys gyli, į kurį šviesa gali prasiskverbti:

$$h_a = 1/\alpha. \quad (1)$$

Jeigu pradinis šviesos intensyvumas ties dervos paviršiumi yra I_0 , tai iš Beer-Lambert dėsnio galime žinoti intensyvumą gylyje z , matuojamą W/cm^2 :

$$I(z) = I_0 e^{-z/h_a} \quad (2)$$

Padauginę šią formulę iš laiko, apskaičiuojame energijos dozę, matuojamą J/cm^2 vienetais. Polimerizacijos procesui reikia apibrėžti kritinę energijos dozę D_k , kurios pakanka įvykdyti polimerizaciją tiek, kad derva taptų kieta. Konkrečiame gylyje z_p , vadinamu polimerizacijos gyliu, D_k pasiekama per tam tikrą ekspozicijos trukmę t_p . Išraiška:

$$D_k = t_p I_0 e^{-z_p/h_a}. \quad (3)$$

Toliau reikia apibrėžti kritinę trukmę T_k , per kurią pasiekama D_k , kai turimas intensyvumas yra I_0 :

$$T_k = D_k/I_0. \quad (4)$$

Turint šias išraiškas, galima užrašyti lygtį polimerizacijos gyliui z_p :

$$z_p = h_a \ln\left(\frac{t_p}{T_k}\right). \quad (5)$$

Šios lygtys galioja monochromatinei šviesai ir kai α yra pastovus visame šaltinio spektre. Tačiau α priklauso nuo bangos ilgio $\alpha(\lambda)$, o šaltiniai spinduliuoja polichromatinę spinduliuotę, kurios intensyvumas taip pat priklauso nuo λ : $I_0(\lambda)$. Tada energijos dozės išraiška bus tokia:

$$D(z, t) = t \int_0^\infty I_0(\lambda) e^{-\alpha(\lambda)z} d\lambda. \quad (6)$$

Šią išraišką galime sunormuoti į dozę ties medžiagos paviršiumi, kur dar nepasireiškia sugertis. Taip apskaičiuojame normuotą energijos dozę $D_n(z)$, kuri apibūdina, kaip greit energija mažėja medžiagoje priklausomai nuo koordinatės z , ir turi funkcijos $e^{-\alpha(\lambda)z}$ pavidalą, padaugintą iš $I_0(\lambda)$.

$$D_n(z) = \frac{D(z, t)}{D(0, t)} = \frac{\int_0^\infty I_0(\lambda) e^{-\alpha(\lambda)z} dz}{\int_0^\infty I_0(\lambda) dz}. \quad (7)$$

Ši išraiška gali būti aproksimuojama tokia funkcija [11]:

$$D_n(z) = a e^{-z/h_a} + c = 1 - a(1 - e^{-z/h_a}). \quad (8)$$

$c = 1-a$, randamas iš sąlygos $D_n(0) = 1$. Parametras a nusako sugėriklio (mūsų atveju fotoiniciatoriaus) sugerties ir šaltinio emisijos spektrų persiklojimą. Jeigu persiklojimas didelis, tai $a = 1$, ir išraiška supaprastėja:

$$D_n(z) = e^{-z/h_a}. \quad (9)$$

Remiantis [11] šaltiniu, polimerizacijos gylį z_p būtų tiksliau skaičiuoti pagal išraišką:

$$z_p = h_a \ln\left(\frac{t_p a}{a(T_k + t_p) - t_p}\right). \quad (10)$$

Kai $a = 1$, gauname (5) išraišką.

Matome, kad norint įvertinti, kokio aukščio sluoksnis bus sukietintas po tam tikros ekspozicijos trukmės, būtina žinoti šviesos įsiskverbimo į medžiagą gylį h_a ir kritinę trukmę T_k . Pavyzdžiui, komercinėse dervose šios vertės gali būti: „PR48“ – $h_a = 80 \mu\text{m}$, $T_k = 0,7 \text{ s}$, „PlasClear“ – $h_a = 120 \mu\text{m}$, $T_k = 0,4 \text{ s}$, „FSL Clear“ – $h_a = 320 \mu\text{m}$, $T_k = 0,5 \text{ s}$ [10].

5.3 Specializuotos 3DS medžiagos

Ne vien prietaiso techniniai duomenys apibrėžia technologijos galimybes ir jos pritaikymą. Labai svarbų indėlį turi ir naudojamos medžiagos. Kaip jau minėta anksčiau, DLP SLA technologija kaip žaliavą naudoja šviesai jautrias dervas. Daugelis optinius 3D spausdintuvus gaminančių įmonių siūlo savo komerciškai prieinamas specializuotas medžiagas. Specializuotos reiškia, kad jos jau yra paruoštos galutiniam vartojimui, t.y. O3DS. Skirtingų gamintojų prietaisai vienas nuo kito gali skirtis šiais techniniais principais ir parametrais: veikimo būdas (lazerinė arba DLP SLA), naudojamas bangos ilgis, šviesos šaltinio galia ir gaunamas intensyvumas eksponuojamoje srityje, skenavimo greitis, darbinis plotas, temperatūra, sluoksnio užliejimo būdas ir kt. Naturalu tai, kad kiekvienas O3DS gamintojas kartu ruošia jo prietaisui tinkamas dervas. Nepaisant to, su daugeliu O3DS galima naudoti ir kitų gamintojų dervas, tačiau gali tekti parinkti kitokius spausdinimo parametrus, nei yra nurodęs vienas arba kitas gamintojas. Parinkus neteisingai, prarandama spausdinimo skyra ir tikslumas. Ne visas dervas galima naudoti su bet kuriuo O3DS ne vien dėl to, kad gali nesutapti medžiagos sugerties spektras ir prietaiso skleidžiama spinduliuotė, bet ir dėl dervos klampos. Jų klampos gali skirtis keliomis eilėmis, o prietaisai kokybiškai gali veikti tik su tokio klampumo dervomis, kurios nevaržytų jo mechaninių judesių užliejant naują sluoksnį. Pavyzdžiui, kompanija „Autodesk“ taiko atvirą kodą gaminamiems fotopolimerams ir savo tinklalapyje yra patalpinusi duomenų lapus su jų cheminėmis sudėtimis [12]. Taip pat įmonė tiekia sudedamąsias dalis, reikiamas dervų gaminimui. Tai suteikia galimybę vartotojui pačiam susimaišyti spausdinimui skirtą medžiagą. Galima keisti sudedamųjų komponentų procentines dalis mišinyje ir gauti norimų savybių dervą. „Autodesk“ teigimu, jie skatina vartotojus naudoti jų 3D spausdintuvą „Ember“ su trečiųjų šalių tiekiamomis medžiagomis. Tai padėtų naujų medžiagų vystymui šios

kompanijos platformoje, kas yra svarbu toliau plėtojant O3DS.

5.4 Spausdintuvo darbinės kreivės nustatymas ir optimalios ekspozicijos dozės nustatymas

Kaip jau buvo minėta, daug O3DS gamintojų kuria atvirojo kodo (open source) produktus, skatinant burtis O3DS naudotojų ir vystytojų bendruomenę. Todėl internete prieinama nemažai informacijos ir metodų, pateikiamų pačių vartotojų. Vienas iš pavyzdžių: Autodesk Ember vartotojo pasiūlytas metodas nustatyti optimalią ekspozicijos dozę duotajai dervai.

Detalus metodo aprašymas gali būti randamas [13] adresu arba laboratorinio darbo 2 priede.

Literatūros sąrašas

[1] E. Skliutas, Gamtinės kilmės dervų fotostruktūrinimas dinaminės projekcinės litografijos būdu, Pagrindinių studijų baigiamasis darbas, Vilniaus universitetas (2017).

[2] C. W. Hull, Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography, US Patent 4,575,330 1–16 (1986).

[3] <https://formlabs.com/blog/3d-printing-technology-comparison-sla-dlp/> (2016-11-20).

[4] B. Lee, DMD 101: Introduction to Digital Micromirror Device (DMD) Technology 11 (2013).

[5] H. Gong, A. T. Woolley, G. P. Nordin, High density 3D printed microfluidic valves, pumps, and multiplexers, *Lab Chip* 16(13), 2450–2458 (2016).

[6] C. Credi, A. Fiorese, M. Tironi, R. Bernasconi, L. Magagnin, M. Levi, S. Turri, 3D Printing of cantilever-type microstructures by stereolithography of ferromagnetic photopolymers, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 8(39), 26332–26342 (2016).

[7] G. A. Di Giacomo, P. R. Cury, N. S. de Araujo, Clinical application of stereolithographic surgical guides for implant placement: preliminary results, *J. Periodontol.* 76(4), 503–507 (2005).

[8] A. E. Ersoy, I. Turkyilmaz, O. Ozan, E. A. McGlumphy, Reliability of implant placement with stereolithographic surgical guides generated from computed tomography: clinical data from 94 implants, *J. Periodontol.* 79(8), 1339–1345 (2008).

[9] N. Bhattacharjee, A. Urrios, S. Kang, A. Folch, The upcoming 3D-printing revolution in microfluidics, *Lab Chip* 16(10), 1720–1742 (2016).

[10] H. Gong, M. Beauchamp, S. Perry, A. T. Woolley, G. P. Nordin, Optical approach to resin formulation for 3D printed microfluidics, *RSC Adv.* 5(129), 106621–106632 (2015).

[11] H. Gong, B. P. Bickham, A. T. Woolley, G. P. Nordin, Custom 3D printer and resin for 18 μm x 20 μm microfluidic flow channels, *Lab Chip* 17(17), 2899–2909 (2017).

[12] <http://learn.ember.autodesk.com/blog/open-source-resin> (2016-11-28).

[11] <https://www.instructables.com/id/How-to-Take-a-Working-Curve-Measurement-and-Create> (2017-10-25)