

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZIKOS FAKULTETAS
KVANTINĖS ELEKTRONIKOS KATEDRA

Eglė Krištopavičiūtė

DIFRAKCINIŲ OPTINIŲ ELEMENTŲ FORMAVIMAS STIKLO PAVIRŠIUJE

Magistro studijų baigiamasis darbas
(studijų programa – LAZERINĖ TECHNOLOGIJA)

Studentė

Eglė Krištopavičiūtė

Darbo vadovas

dr. Vytautas Purlys

Recenzentas

prof. Valerijus Smilgevičius

Katedros vedėjas

prof. Valdas Sirutkaitis

Vilnius 2016

TURINYS

ĮVADAS.....	2
1. DIFRAKGINIAI OPTINIAI ELEMENTAI.....	3
1.1 ŠVIOSOS DIFRAKCIJA	3
1.1.1 FRAUNHOFERIO DIFRAKCIJA	3
1.1.2 DIFRAKGINĖ GARDELĖ	4
1.2 DIFRAKGINIAI OPTINIAI ELEMENTAI	5
1.3 VEIKIMO PRINCIPAS	6
1.4 PLUOŠTO DALIKLIO PROFILIO SKAIČIAVIMAS IR FORMAVIMAS	8
1.4.1 DIFRAKČINIŲ ELEMENTŲ FORMAVIMAS ANT PAVIRŠIAUS	10
1.5 DIFRAKGINIAI OPTINIAI ELEMENTAI PRAKTIKOJE	11
2. STIKLŲ ĖSDINIMAS	13
3. MATAVIMO PRIETAISAI, ĮRANGA IR EKSPERIMENTINĖS MEDŽIAGOS.....	16
3.1 EKSPERIMENTO SCHEMA	16
3.2 NAUDOJAMOS MEDŽIAGOS.....	17
4. DOE FORMAVIMAS SKAIDRIŲ TERPIŲ PAVIRŠIUJE	19
4.1 TEORINIAI SKAIČIAVIMAI	19
4.2 PASIRUOŠIMAS EKSPERIMENTUI.....	22
4.3 OPTIMALIŲ DOE FORMAVIMO PARAMETRŲ IEŠKOJIMAS.....	24
4.4 PLUOŠTO DALIKLIŲ FORMAVIMAS.....	28
5. PAGRINDINIAI REZULTATAI IR IŠVADOS.....	36
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	37
SANTRAUKA.....	39
SUMMARY	40

Įvadas

Nagrinėjant šiuo metu naudojamus optinius elementus galime remtis geometrinės optikos principais. Čia bangos sklidimas aprašomas šviesos pluoštų pagalba. Pluoštai gali lūžti patekę į skirtingų lūžio rodiklių ribą, ar atsispindėti nuo šios ribos. Tai yra klasikiniai reiškiniai, taikomi beveik visose lazerinio apdirbimo srityse. Tačiau šiuo metu vis daugiau dėmesio yra skiriama elementams, kurie gali būti aprašyti naudojantis bangų optika, kuri aprašo tokius reiškinius kaip interferencija, poliarizacija ir difrakcija. Ypatingai daug tyrimų sulaukia šviesos difrakcija, kurios dėka galima sukurti daug įvairių optinių elementų [1], kuriuos sunku realizuoti naudojant geometrinę optiką. Taip sukurti elementai vadinami difrakciniais optiniais elementais. Pirmieji tokie elementai buvo pagaminti 1970m., naudojantis binarinę litografijos kaukę [2, 3].

Difrakcija (nuo lot. "diffringere", "skaidyti į dalis", "sklaidyti"), tai bet koks nuokrypis nuo bangų tiesaus sklidimo, nepaaiškinamas bangos atspindžiu arba lūžiu. Šis reiškinys vyksta tuomet, kai sukuriamas amplitudės ir/arba fazės pokytis bangos fronto paviršiuje, tad difrakciniai optiniai elementai (DOE) aiškinami paprastai - tai tokie optiniai elementai, kurie pakeičia šviesos bangos amplitudę arba fazę. Tam, kad sukurti šį pokytį, ant elemento paviršiaus yra formuojamas tam tikras reljefas, kuris dažniausiai apskaičiuojamas naudojantis kompiuterinėmis modeliavimo programomis. Tobulėjant kompiuteriniams skaičiavimo metodams, mes galime gauti vis kitokios paskirties DOE, pavyzdžiui, difrakcinį lęšį, pluošto formotuvą, aberacijų mažintuvą ir kt. DOE yra labai vertinami, nes jų dėka galima lengviau kompensuoti optinės sistemos aberacijas, iš daug elementų sudarytą sistemą pakeisti į vieno elemento sistemą. Vienas iš dažnai naudojamų DOE yra difrakcinis pluošto daliklis, kurio paskirtis – lazerio pluoštą padalinti į mums norimą skaičių lazerio pluoštelių.

Šiame darbe bus aptariama, kaip yra formuojami difrakciniai optiniai elementai, kaip skaičiuojamas tokio elemento profilis. Pagrindinis tikslas – suformuoti aukšto efektyvumo difrakcinius optinius elementus:

Pluošto daliklį, kuris dalintų pluoštą į tris vienodus pluoštus;

Pluošto daliklį, kuris dalintų pluoštą į du vienodus pluoštus;

Pluošto bandiklį (angl. *beam sampler*), kurio ± 1 eilės pluoštai būtų mažos energijos (3 % – 4 %).

1. Difrakciniai optiniai elementai

1.1 Šviesos difrakcija

Elektromagnetinei bangai sklindant vienalytėje terpėje paprastai bangos fronto forma nekinta. Jei banga sklinda nevienalytėje terpėje, kurioje yra neskaidrių kliūčių arba sričių su lūžio rodiklio pokyčiu, bangos frontas ir jo intensyvumo pasiskirstymas erdvėje pakinta. Vyksta reiškinys, vadinamas difrakcija. Ryškiausi difrakcijos reiškiniai matomi šviesai sklindat arti neskaidrių kliūčių, nors ji gali vykti ir už skaidrių objektų. Difrakcija vyksta visuomet, kai amplitudės ir/arba fazės pokytis nevienodas visame bangos fronto paviršiuje, t.y. kai sutrikdytas vietinis bangos frontas.

Optikoje skiriamos dvi difrakcijos rūšys: Frenelio difrakcija ir Fraunhoferio difrakcija. Frenelio difrakcija (sferinių bangų difrakcija) yra bendresnė, palyginti su Fraunhoferio (plokščiųjų bangų difrakcija). Dėl matematinių sunkumų naudojami šių reiškinų artutiniai metodai, grindžiami Hiuigenso principu [4].

1.1.1 Fraunhoferio difrakcija

Frenelio difracija aprašo sferinių bangų nuokrypį, kuris suformuoja difrakcinį vaizdą taške, esančiame baigtiniu atstumu nuo kliūties. Tačiau jei atstumas nuo kliūties iki tiriamojo taško, palyginus su jo matmenimis, yra labai didelis, tai tiriamajame taške antrinės bangos yra artimos plokščiosioms. Fraunhoferio metodu difrakcinis vaizdas stebimas lėšio židinio plokštumoje. Joje surenkamos plokščiosios šviesos bangos, kurias iš dalies užtveria neskaidri (arba skaidri) kliūtis. Fraunhoferio difrakcija yra lygiagrečių šviesos pluoštų sukelta difrakcija.

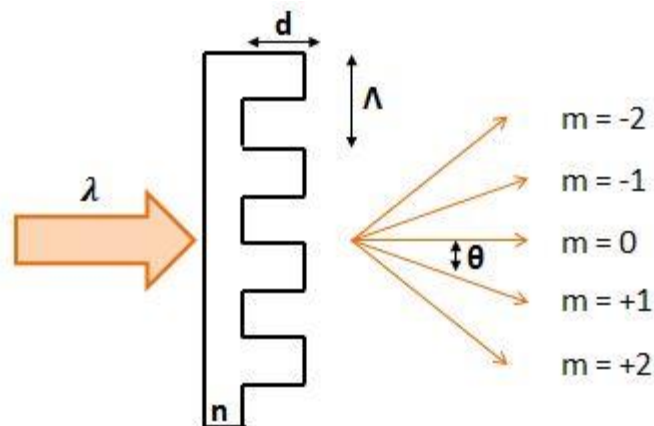
Kaip minėta anksčiau, Frenelio difrakcija yra bendresnė, palyginus su Fraunhoferio difrakcija, todėl optiniuose difrakcijos taikymuose dažniau yra naudojama Fraunhoferio difrakcija. Ji taikoma nagrinėjant daugelį klausimų, susijusių su optinių prietaisų veikimu. Tai pat, naudojantis Fraunhoferio difrakcijos dėsniais, buvo suprojektuoti binariniai difrakciniai optiniai elementai [5]. Frenelio difrakcijos stebėjimui yra reikalingos ganėtinai paprastos sąlygos. Užtenka šviesos šaltinio ir kliūties, kurios matmenys būtų artimi šviesos bangos ilgiui. Norint stebėti Fraunhoferio difrakciją, reikia sukurti tam tikras sąlygas. Būtina sąlyga – šviesos pluoštai, einantys pro kliūtį, turi būti lygiagretūs vienas kitam.

Fraunhoferio difrakcijos sąlygoms artimos sąlygos susidaro tada, kai taškinis spinduolis yra lėšio židinyje, o antrasis lėšis surenka šviesą židinio plokštumoje. Pastarasis lėšis įvairiose židinio

plokštumos vietose surenka visus pluoštus, perėjusius angą, taip pat ir nukrypusius nuo tiesios sklidimo krypties. Priklausomai nuo angos matmenų ir formos dalis šviesos nukrypsta įvairiomis kryptimis. Norint pilnai išspręsti difrakcijos uždavinį, reikia rasti šviesos pluošto pasiskirstymą, kuris priklauso nuo difrakciją sukeliančių kliūčių matmenų ir formos. Fraunhoferio difrakcijos taikymuose svarbiausi atvejai yra tokie, kaip pavyzdžiui anga, kuri sukelia difrakciją, yra stačiakampio ir apskritimo formos [4].

1.1.2 Difrakcinė gardelė

Gaminant DOE beveik visada yra stengiamasi ant jo paviršiaus išgauti tam tikrą periodinę struktūrą. Kitaip tariant, šią periodinę struktūrą galime apibūdinti kaip difrakcinę gardelę, t.y. įtaisą, sudarytą iš didelio skaičiaus periodiškai išdėstytų rėžių (griovelių, plyšių, iškilimų) plokščiam arba įgaubtame optiniame paviršiuje. Difrakcinės gardelės rėžiai krintančią šviesą išskaido į atskirus koherentinius pluoštus, kurie difragavę rėžiuose interferuoja ir sukuria atstojamąjį erdvinį šviesos intensyvumo pasiskirstymą, t.y. spinduliuotės spektrą. Difrakcinės gardelės skirstomos į atspindžio ir skaidriąsias. Atspindžio gardelės rėžiai padaryti veidrodžio paviršiuje, kai tuo tarpu skaidriosios gardelės rėžiai suformuoti skaidriame (pavyzdžiui, stiklo) paviršiuje. Pagal savo veikimą gardelės taip pat skirstomos į amplitudines ir fazines gardeles. Amplitudinėse gardelėse periodiškai kinta atspindžio arba pralaidumo koeficientas, tai sukelia krintančios šviesos bangos amplitudės kaitą. Fazinės gardelės keičia šviesos pluošto fazę ir todėl šviesa difraguoja efektyviau, nei nuo amplitudinės gardelės [6].



1 pav. Šviesos pluošto eiga pro difrakcinę gardelę (d – periodinės struktūros gylis, Λ – periodas, n – lūžio rodiklis, θ – difrakcijos kampas, m - difrakcijos eilė)

Pluoštas, praėjęs tokią gardelę, interferuoja ir pasikeičia erdvinis šviesos intensyvumas, susidaro intensyvumo minimumai ir maksimumai. Visą šį pokytį aprašo gardelės lygtis:

$$\Lambda \sin \theta = m\lambda. \quad (1)$$

Nors ši lygtis aprašo difragavusios šviesos kryptį, tačiau ji nenusako kiek pluošto galios yra nukreipta į kiekvieną difrakcijos eilę. Tai nusako difrakcinės gardelės profilis, todėl tam reikia detalesnio nagrinėjimo.

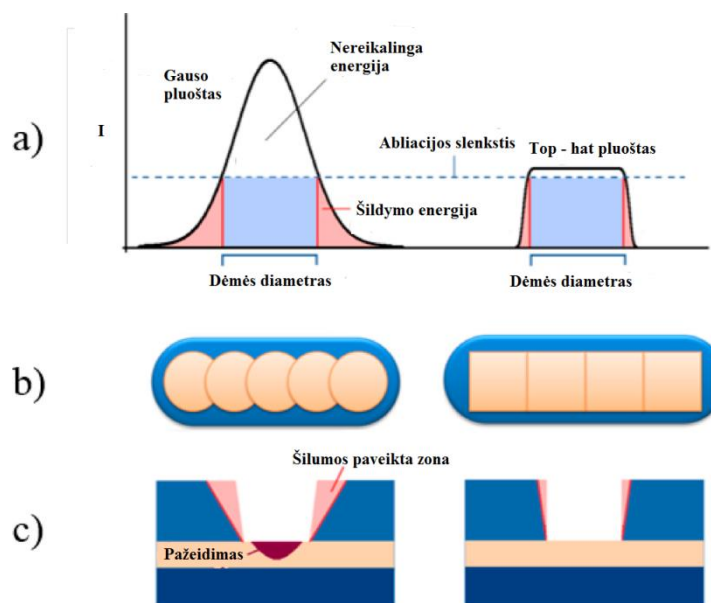
1.2 Difrakciniai optiniai elementai

Vis labiau tobulėjant kompiuteriniams skaičiavimo metodams, mes galime išspręsti vis sudėtingesnius difrakcijos uždavinius, sumodeliuoti ir pagaminti vis geresnius šviesos difrakcijos principais paremtus optinius prietaisus, kurių dėka galima supaprastinti optinę sistemą nuo kelių elementų iki vieno.

Vienas iš tokių prietaisų yra optinis pincetas, kuris formuojamas stipriai fokusuojant lazerio pluoštą su didelės skaitinės apertūros lęšiu į difrakciškai ribotą dėmę [7]. Patalpinus nano dydžio dalelę į sufokusuotos spinduliuotės centrą, dėl stūmos ir traukos jėgų ši dalelė išsilaiko ties sufokusuoto lazerio Gauso pluošto centru, taip suformuojama dalelių trimatė gaudyklė. Kad gaudyklėje susiformuotų dalelei išlaikyti reikalinga jėga, didelės lazerio spinduliuotės galios nereikia (paprastai užtenka vos kelių milivatų). Kita vertus pluošto intensyvumas statmenai sklidimo krypties turi būti gradientinis, kad kompensuotų stūmos ir traukos jėgas. Pasitelkiant difrakcinius optinius elementus, galima padalinti pluoštą ir taip sukurti kelis atskirus optinius pincetus. Turint tokį pincetų masyvą ir keisdami lazerio pluošto sklidimo kampą mes galime judinti ne vieną dalelę, bet kelias. Tokie DOE optiniai pincetai dažnai naudojami fotonikos, optoelektronikos bei jutiklių taikymuose, norint išrikiuoti koloidines daleles į trimatę struktūrą [8].

Kitas šiek tiek sudėtingesnis DOE pavyzdys yra difrakcinis pluošto keitiklis, kuris tradicinį Gauso pluoštą (šviesos intensyvumas pluošto centre yra didžiausias, o slenkant į kraštus intensyvumas mažėja) gali transformuoti į plokščios viršūnės (angl. *top-hat*) pluoštą (2 pav). Toks pluoštas dažnai naudojamas abliacijos metu, kuomet norima išvengti šilumos paveiktų zonų ir apdirbamos medžiagos pažeidimo [9].

Paprasčiausia tokio pluošto keitimo schema susideda iš difrakcinio keitiklio ir lęšio. Difrakcinis pluošto keitiklis yra fazinis elementas, kuris transformuoja Gauso pluoštą į stačių briaunų pluoštą. Žinant pradinio lazerio pluošto fazės profilį, galima apskaičiuoti tokį keitiklio fazinį profilį, kad išeigoje gautume plokščios viršūnės pluoštą. Keitiklis formuojamas litografijos metodu, kuomet yra išsodinamas reikalingo gylio profilis. Šviesos pluoštas praėjęs pro tokį profilį dėl difrakcijos yra pakeičiamas į norimos formos pluoštą.



2 pav. Abliacijos skirtumai naudojant skirtingus pluoštus. a) Pluoštų profiliai; b) Išabliuota linija naudojant skirtingus pluoštus; c) lazerinės spinduliuotės paveiktos zonos [9]

Kai kurie difrakciniai optiniai elementai veikimo principu yra panašūs tarpusavyje. Vienas iš tokių pavyzdžių yra pluošto bandiklis, kurio veikimo principas yra toks pat kaip ir vėliau darbe aptariamo pluošto daliklio, tačiau paskirtis visai kitokia. Toks elementas išskaido pluoštą į tris pluoštus. Nulinės eilės difrakcinis maksimumas, turi didžiausią energiją ir netrukdomai keliauja po turimą optinę sistemą, kai tuo tarpu pirmos eilės pluoštai (kitai vadinami „pavyzdiniai“), yra mažos energijos ir yra nukreipiami į detektorius, kurių dėka realiu laiku galima stebėti lazerio pluošto energiją bei profilį [10].

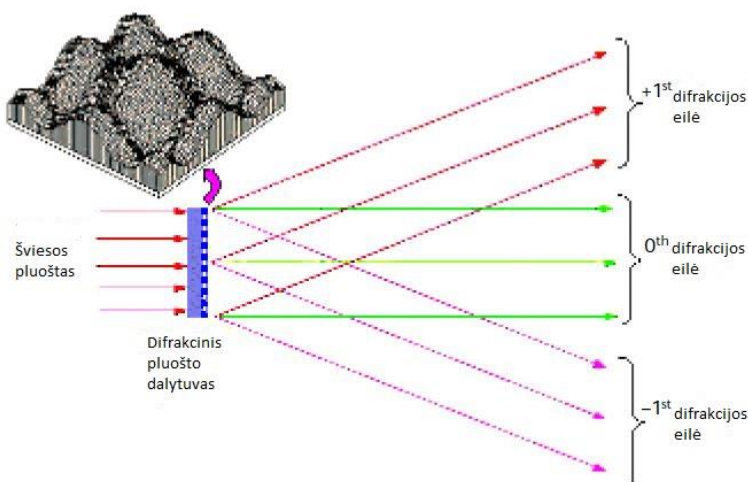
Šie du paminėti pavyzdžiai yra tik keli iš daugelio difrakcinių optinių elementų. Dar praktikoje naudojami yra difrakciniai difuzoriai, skirti suteikti kontroliuojamas litografijos apšvietimo sistemas [11], difrakcinės korekcinės plokštelės, skirtos pakeisti bangos frontą [12], difrakciniai lęšiai, kurie naudojami sumažinti kelių lęšių sistemas [13] ir difrakcinis pluošto daliklis, kuris bus aptartas detalčiau šiame darbe.

1.3 Veikimo principas

Prieš tai aptarti difrakciniai optiniai elementai keitė pluošto bangos frontą, ar sklidimo trajektoriją. Panaudojant difrakcinius darinius mes galime pasiekti ir kitokių rezultatų t.y. parinkus tinkamą paviršiaus reljefą mes vieną pluoštą galime padalinti į kelis pluoštelius. Tokiu principu veikia difrakcinis pluošto daliklis.

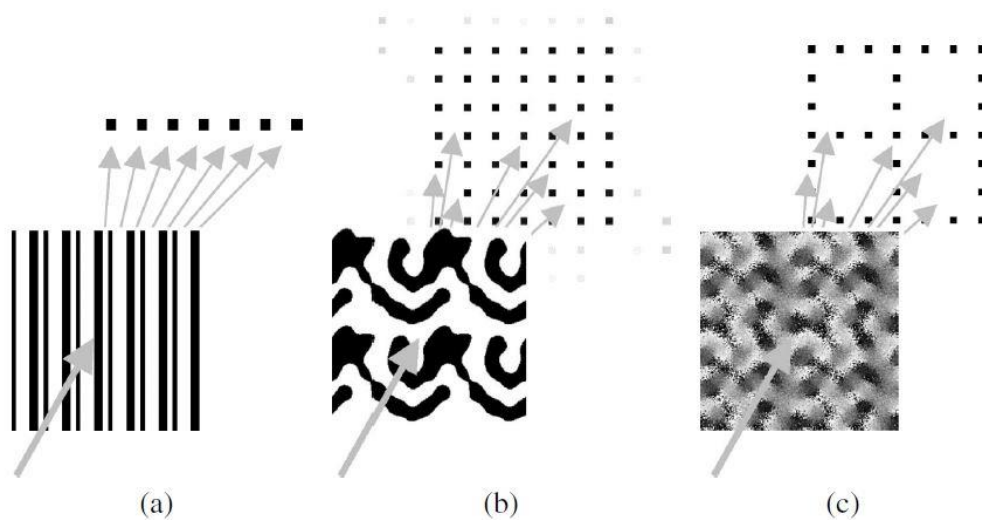
Toks pluošto daliklis vieną pluoštą gali padalinti į kelis, tokių pačių charakteristikų, kaip ir pirmasis (išskyrus galią ir sklidimo kampą) pluoštus. Naudojant tokį daliklį gali būti sukurta viendimensinė ($1 \times N$) ar dvidimensinė ($M \times N$) pluoštų matrica. Pluoštų efektyvumas priklauso

nuo to, koks yra paviršius. Kuo jis sudėtingesnis ir kuo daugiau turi lygmenų, tuo didesnę efektyvumą galima pasiekti. Tačiau kol kas nėra įmanoma pasiekti 100 % naudingumo, nes nėra galimybių padaryti tokį idealų paviršių, kurio dėka šviesa sklįstų be nuostolių.



3 pav. Difrakcinio pluošto daliklio pagrindinis veikimo principas [14]. Šviesos pluoštas, praėjęs pro difrakcinį pluošto daliklį suskaidomas į kelis pluoštus

Kokią pluošto matricą gausime po difrakcinio elemento nulemia paviršiaus profilis. Todėl pagal tai pluošto dalikliai yra skirstomi į binarinius ir analoginius. Binarinis paviršius yra dažniausiai naudojamas tipas dėl savo paprastumo. Jei norima gauti šiek tiek sudėtingesnę pluoštų matricą, dažniausiai naudojamas analoginis paviršius (4 pav.). Nors toks paviršius gali pasiekti 90% efektyvumą, tačiau jo pagaminimas yra daug sudėtingesnis. Todėl šiame darbe toliau bus aptariamas vien tik binarinis pluošto daliklis.



4 pav. Binarinis pluošto daliklis a) ir analoginio pluošto daliklio b) ir c) profilių pavyzdžiai ir gaunamos pluoštų matricos [15]

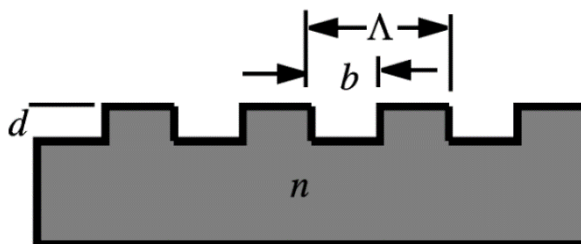
1.4 Pluošto daliklio profilio skaičiavimas ir formavimas

Kadangi difrakcinio pluošto daliklio veikimo principas panašus į fazinės difrakcinės gardelės, norint daugiau suprasti kaip viskas veikia, reikia viską nagrinėti remiantis Furjė optikos konvoliucijos teorema. Šiuo atveju fizikinis gardelės paaiškinimas gali būti lengvai perverstas į matematinės išraiškas naudojantis konvoliucijos operatoriumi ir delta funkcija. Vienetinio elemento (angl. *unit cell*) matematinis aprašymas yra dvi tarpusavyje paslinktos stačiakampės funkcijos (rect)(antros funkcijos pastovi fazė). Šių funkcijų stabilumas pasiekiamas naudojant delta funkciją [12]:

$$\text{unit cell} = f(x) = [\text{rect}\left(\frac{b}{2}\right) \otimes \delta\left(x + \frac{b}{2}\right)] + \{\text{rect}\left[\frac{x}{\Lambda - b}\right] \otimes \delta\left[x - \frac{\Lambda - b}{2}\right]\} e^{i\phi}, \quad (3)$$

čia Λ – gardelės periodas, d – gardelės gylis, b – periodo dydis, ϕ – fazės pokytis, kurį galima apskaičiuoti iš formulės (n – lūžio rodiklis, λ – bangos ilgis):

$$\phi = \frac{2\pi d(n-1)}{\lambda}, \quad (4)$$



5 pav. Difrakcinės gardelės skersinis pjūvis. d – rėžių gylis, b – rėžio plotis, Λ – gardelės periodas, n – gardelės medžiagos lūžio rodiklis

Apsibrėžus vienetinį elementą, galime sukurti begalinę gardelę (angl. *grating*) naudojant konvoliucijos ir comb funkcijomis (comb funkcija – begalinė Dirako deltas funkcijų suma):

$$\text{grating} = f(x) \otimes \text{comb}\left(\frac{x}{\Lambda}\right), \quad (5)$$

Kaip jau buvo kalbėta anksčiau, konkrečios difrakcijos eilės sklinda tam tikru kampu θ (1 lygtis). Todėl gardelės Furjė transformacija apibrėžiama tik tam tikruose konkrečiuose intervaluose, difrakcijos eilėse. Tokios transformacijos rezultatas yra taip pat comb funkcija ($\text{comb}(\Lambda q)$), kuri turi vienetinę reikštmę taške $q = m/\Lambda$.

Vienetinio elemento Furje transformacija suformuoja gaubtinės funkciją, kuri gali būti padauginta su comb funkcija. Ši sandauga aprašo amplitudę ir fazę konkrečiose difrakcijos eilėse. Yra žinoma, jog $\text{rect}(x)$ funkcijos Furje transformacija yra lygi $\text{sinc}(q)$, o $f(x)$ funkcijos, kuri aprašo vienetinį elementą Furje transformacija susideda iš dviejų sinc funkcijų su pastoviomis fazėmis. Apsirašius naudojantis šiais elementais visą Furje transformacijos funkciją $F(q)$ ir perskaičiuojant visas vertės naudojantis sąlyga, jog visos comb vertės nėra lygios nuliui, galime gauti gardelės išėjimo funkciją, kuri nusako difragavusios spinduliuotės amplitudę ir santykinę fazę visoms difrakcinėms eilėms:

$$F(q) = \frac{b \sin(\pi b q)}{\Lambda \pi b q} \exp\left(\frac{i 2 \pi b q}{2}\right) + \frac{\Lambda - b \sin(\pi(\Lambda - b)q)}{\Lambda \pi(\Lambda - b)q} \exp\left(\frac{-i 2 \pi(\Lambda - b)q}{2}\right) \exp(i\varphi), \quad (6)$$

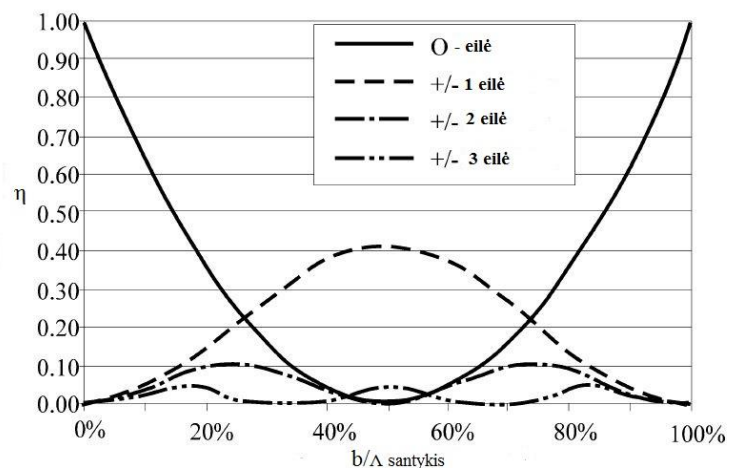
čia $q = m/\Lambda$.

Kadangi difragavusi spinduliuotė sklinda diskrečiais kampais θ_m , gardelės periodo funkcijos transformacija turi prasmę tik sveikoms m vertėms.

Atskirų difrakcinių eilių intensyvumas užrašomas tokia išraiška:

$$\eta = |F(q)|^2. \quad (7)$$

Jei keistume gardelės periodą ar jos gylį, vis tiek galėtume ją aprašyti ta pačia Furje transformacijos gaubtinės lygtimi. Pavyzdžiui keičiant b ir Λ santykį galime pamatyti, kaip kinta skirtingų difrakcijų efektyvumas (6 pav). Tolstant nuo 50 % matome, jog visa energija pereina į nulinę difrakcijos eilę. Ties 26,5 % santykiu nulinė ir pirmoji eilė susikerta, tai reiškia, jog visos šios eilės turės vienodą efektyvumą.



6 pav. Binarinio pluošto daliklio efektyvumas priklausomai nuo b ir Λ santykio esant skirtingoms difrakcijos eilėms [12]

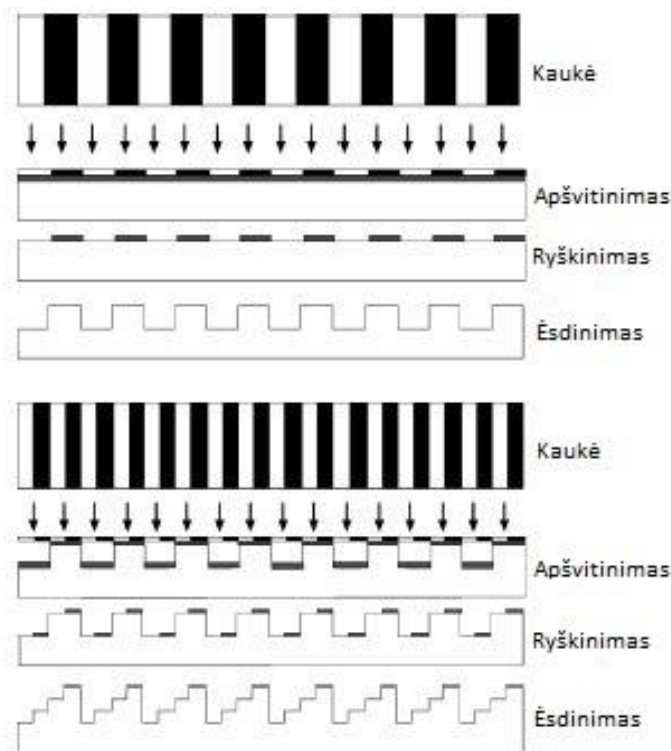
Šiuo atveju tai atitinka 22 %. Taigi binarinė gardelė su tokiu b ir Λ santykiu atitinka 1×3 pluošto daliklį. Tokio daliklio bendras efektyvumas būtų 66 %. Keičiant gardelės fazę (nuo to priklausančią gylį), galime matyti panašų efektyvumo pasiskirstymą, kaip 5 pav atveju. Esant π fazės gyliui, visas efektyvumas pasiskirsto į pirmą difrakcijos eilę. Esant $0,64\pi$ fazės gyliui, efektyvumas pasiskirsto per nulinę ir pirmąją difrakcijos eilę. Pastebėta, jog keičiant fazę,

galime pasiekti didesnę efektyvumą. Šiuo atveju 1×3 pluošto daliklio atskiro pluošto efektyvumas yra 28,85 %, o bendras – 86 % [12].

1.4.1 Difrakcinių elementų formavimas ant paviršiaus

Aptarus, kaip teoriškai veikia difrakciniai pluošto dalikliai, reikia aptarti ir tokių elementų formavimo metodą. Tradicinis gamybos metodas yra mechaniškas paviršiaus pašalinimas naudojant aštrią adatos viršunę. Tokiu būdu galima pagaminti geros kokybės difrakcines gardeles, tačiau dėl adatos riboto dydžio, neįmanoma pagaminti tolygaus paviršiaus [16]. Taip pat prie tradicinių metodų priskiriamas ir besisukančio paviršiaus apdirbimas naudojant deimantinę adatą [17]. Tokiu metodu daug metų buvo gaminami refrakciniai optiniai elementai bei DOE. Tokiais metodais pagaminti elementai brangu ir užima daug laiko, todėl dažnai daromos replikos, kuomet iš pagrindinio elemento padaromos jo kopijos-formelės ir naudojant tam skirtus polimerus ar termoplastikus iš jų pagaminamos elemento replikos [18].

Norint gauti daug tikslesnius paviršiaus profilius yra naudojamas litografijos metodas. Yra keletas skirtingų litografijos metodo technikų tokių kaip interferometrinė (angl. *interferometric exposure*) [19], pustonų (angl. *gray – scale*) [20, 21] ir artimo lauko (angl. *near-field*) [22, 23], tačiau dažniausia naudojama yra tiesioginio rašymo (angl. *direct writing*) bei naudojant kaukes litografija. Naudojant šį metodą išdėdinti skirti stiklo paviršius padengiamas teigiamu fotorezistu. Virš tokio bandinio yra patalpinama kaukė ir fotorezistas apšviečiamas UV šviesa (arba naudojant tiesioginį įrašymą, fotorezisto sluoksnis tiesiogiai apšviečiamas lazerio šviesa). Kadangi naudojamas teigiamas fotorezistas, tai patalpinus apšviestą bandinį į ryškinimo skystį, pasinaikins apšviestos vietos, o neapšviestos liks gerai prikibusios prie stiklo paviršiaus. Tuomet naudojama rūgštis tam, kad būtų iššedintas stiklas, ant kurio nebėra polimero sluoksnio. Atlikus šią visą seką veiksnių, gaunamas pats paprasčiausias dviejų lygmenų difrakcinis paviršius. Bet kaip minėta anksčiau, kuo daugiau lygmenų turi paviršius, tuo galima gauti didesnę efektyvumą.



7 pav. 4 lygmenų difrakcinio paviršiaus gaminimas[12]

Todėl visi etapai kartojami kelis kartus (7 pav), ir gaunama 4, 8, 16 ir daugiau lygmenų paviršiai. Žinoma, kuo daugiau lygmenų, tuo brangesnis ir sunkesnis formavimo metodas. Nes tam, kad gautume tolygiai išsidėsčiusius lygmenis, reikia itin tikslaus naudojamų kaukių sulygiavimo. Tokį lygiavimą gali atlikti specialūs lygiavimo įrenginiai, tačiau jie yra labai brangūs, todėl daug kas apsiriboja dviejų ar keturių lygmenų paviršiais [12].

1.5 Difrakciniai optiniai elementai praktikoje

Aptarus difrakcinius optinius elementus, jų profilių skaičiavimus, gaminimo būdus bei stiklų ėsdinimą galime šiek apžvelgti kur yra naudojami DOE. Kadangi DOE pralenkia tradicinius optinius elementus savo paprastumu ir kaina, todėl jie naudojami gan dažnai ir įvairiose srityse nuo fizikinių eksperimentų [24] iki pritaikymo gamyboje kuriant paviršiaus mikroreljefus.

Vienas iš tokių pritaikymų yra medicina – odos gydymas. Frakcinė fototermolizė yra palyginti naujas odos atnaujinimo metodas, kuomet odos mikroskopiniai plotai yra paveikiami lazerio spinduliuote. Lazerio pluoštas sunaikina senas odos ląsteles ir taip yra paskatinamas naujų ląstelių susidarymas. Didelis lazerio privalumas – šalia esantys odos sluoksniai yra nepažeidžiami, todėl tai dar labiau paspartina gijimą. Tokiam metodui naudojamos kelios skirtingos lazerio sistemos: optinio skaitytuvo, lęšių masyvo ir difrakcinio pluošto daliklio. Optinius skaitytuvus sudaro judantys veidrodžiai ir galvanometriniai veidrodžiai. Procesas valdomas kompiuteriu. Vieni didžiausių šio metodo minusų yra tai, jog turėsime pakankamai lėtą skenavimo greitį, sistema gali greitai susidėvėti (pažeidžiami veidrodžiai) ir didelė kaina. Lęšių masyvas, sudarytas iš difrakcinių lęšių, pasižymi nevienodu odos paviršiaus gydymu, nekeičiamu darbo atstumu ir taip pat didele kaina. Pluošto daliklis pralenkia prieš tai paminėtus metodus, nes dėl savo galimybės išsklaidyti pluoštą, galime gauti tam tikrą pluoštų konfiguraciją, su vienodu energijos pasiskirstymu kiekviename pluošte. Todėl tik su vienu pluošto dalikliu galime tolygiai paveikti apdirbamą paviršių. Dėl šios priežasties šis metodas gan sparčiai populiarėja medicinoje [25].

Kitas DOE panaudojimas yra paviršiaus perforacija. Pragręžtus plonus medžiagos lapus galime labai daug kur pritaikyti: metalo ir plastiko lakštai pakavimo industrijoje, kartono ir metalo folijos, kurias galima lengvai nuplėšti, cigarečių filtrai ir t.t. Pagrindinę lazerio perforacijos sistemą sudaro impulsinis lazeris, lęšis, judantis veidrodis ir judantis pozicionavimo staliukas. Lazeris impulso metu išgręžia skylę medžiagoje, veidrodėlio ar stalo pagalba yra pastumiamas pluoštas ar bandinys ir gręžiama nauja skylė. Toks gaminimo būdas gali būti ilgas, todėl kuo toliau, tuo dažniau į sistemą įtraukiamas ir difrakcinis pluošto daliklis. Jo dėka, galime pasirinkti mums reikalingą

skylių išsidėstymą ir dėl pastovaus energijos pasiskirstymo gauti aukštos kokybės paviršių. Taip sumažinamos darbo ir kainos sąnaudos ir padidinama darbo kokybė [26].

Taip pat difrakciniai pluošto dalikliai naudojami ir sensoriams. Vienas iš tokių pavyzdžių yra lazerinis Doplerio dujų/skysčių srauto matavimas, kurį 1992m. aprašė mokslininkų komanda iš Vokietijos [27]. Tai yra nekontaktinis matavimo metodas, kurio metu lazerio pluoštas, pasitelkiant pluošto daliklį, yra suskaidomas į du vienodo intensyvumo pluoštus. Šie, praėję pro pluošto deflektorių, interferuoja vienas su kitu ir sukuria interferencinį minimumų maksimumų vaizdą. Dalelė, praeidama pro tokią gautą struktūrą, išsklaido šviesos daleles, išsklaidyto pluošto intensyvumas fiksuojamas detektoriumi ir gaunamas dujų/skysčių tekėjimo greitis. DOE šiam metodui ypatingai tinka, nes įmanoma ant vieno stiklo paviršiaus suformuoti kelis skirtingus elementus (pluošto daliklį, kreiptuvą, lęšį). Tai leidžia pagaminti mažesnius ir pigesnius jutiklius [27].

Pluošto dalikliai naudojami ir mikroperiodinių struktūrų formavimui. Japonijos mokslininkai (T. Kondo ir kt.) 2001m. panaudojo DOE paprastam interferenciniam metodui, kurio metu formuojamas fotoninis kristalas (FK) [28]. Femtosekundinis lazerio pluoštas padalinamas naudojant pluošto daliklį. Gauti pluoštai, praėję pro du lęšius, persidengia ir persidengimo vietoje suformuojama interferencinė struktūra. Patalpinus medžiagą, kuri reaguoja į šviesą (šiuo atveju neigiamas fotorezistas SU-8), ant jos galima suformuoti mikroperiodines struktūras. Keičiant padalintų pluoštų kiekį, ant fotorezisto galima formuoti viendimensines, dvidimensines ir tridimensines struktūras. Pluošto daliklis šiam metodui tinka todėl, kad galima gauti vienodo intensyvumo pluoštus, bei keičiant DOE paviršiaus reljefą (pakeitus reljefą gauname vis kitokią padalintų pluoštų skaičių) įmanoma gauti vis kitokią fotoninio kristalo sandarą.

Difrakciniai pluošto dalikliai gali pagerinti ir pagreitinti paviršiaus mikroapdirbimo procesus [29]. Padalinus vieną didelės galios pluoštą į kelis mažesnės galios pluoštus įmanoma padidinti paviršiaus ženklavimo greitį lyginant su kitais naudojamais būdais. Tokiu metodu paliktos žymės yra aukštos kokybės, nesimato šilumos paveiktų zonų. Svarbu, jog dėl šios priežasties galima efektyviau išnaudoti naudojamo lazerio energiją, dėl šios priežasties visas mikroapdirbimo procesas tampa daug naudingesnis. Tokie apdirbimo pranašumai pastebėti naudojant diodais kaupinimo kieto kūno lazerio sistemas.

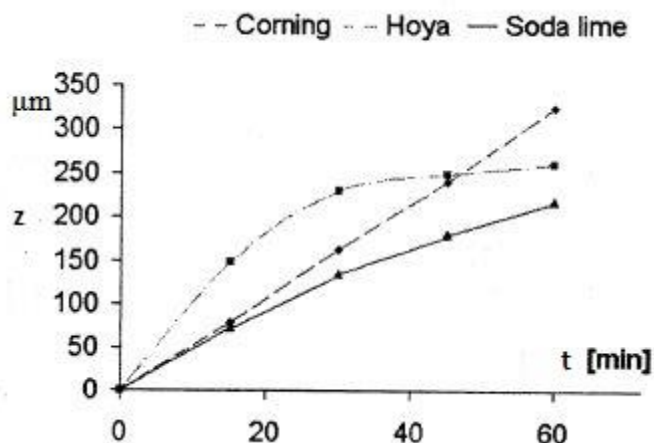
Nors paminėti keli DOE pritaikymo pavyzdžiai, tačiau galime suprasti, jog šie elementai gali būti naudojami labai įvairiose srityse. Dėl galimybės gauti vienodo intensyvumo vienmačius ar dvimačius lazerio pluošto masyvus bei nedidelės kainos jie vis labiau įsitvirtina praktikoje. Todėl tikėtina, jog ateityje šių elementų paklausa vis augs.

2. Stiklų ėsdinimas

Aptarus difrakcinių optinių elementų profilių skaičiavimą ir tokių elementų formavimą, labai svarbu žinoti, kokį stiklą pasirinkti, kad pasiektume aukštą ėsdinimo kokybę ir gautume tinkamą reljefo profilį. Todėl šiame skyriuje trumpai apžvelgsime kokie stiklai dažniausiai yra naudojami ėsdinimui.

Stiklo ėsdinimas labai priklauso nuo naudojamos rūgšties koncentracijos, stiklo sudėties, fotorezisto sluoksnio, esančio ant stiklo, kokybės ir patvarumo. Dažnai naudojami stiklai yra borosilikatinis stiklas, kitaip žinomas kaip *Pyrex*, natrio-kalcio silikatinis (Soda Lime) stiklas, bei lydytas kvarcas. Pats ėsdinimas yra skirstomas į tris rūšis: mechaninis, sausasis ir šlapiasis. Mechaninio metodo metu yra naudojami deimantiniai grąžtai, ultragarsinis grėžimas [30], miltelių srautas [31]. Nors toks metodas naudojamas dažnai, tačiau negalima gauti geros kokybės tolygaus paviršiaus. Sausasis ėsdinimas aprašomas lazerio plazmos susidarymu paviršiuje. Pagrindinis tokio metodo privalumas yra tai, jog galima sukurti detalias struktūras ant paviršiaus, ar išėsdinti mikrokanalus su statmenomis sienomis [32]. Vienas trūkumų yra maža ėsdinimo sparta ($0,5 - 0,6 \mu\text{m}/\text{min}$). Taip pat dėl didelės energijos kartais yra sukuriamas šiurkštus paviršius, o tai yra nepageidautinas reiškinys ėsdinant stiklus. Šlapiasis ėsdinimas, kuris paremtas ėsdinimu HF rūgštyje yra vienas pigiausių ir paprasčiausių ėsdinimo metodų. Ant stiklo yra dedamos fotorezisto, metalo ar silicio kaukės ir bandinys yra dedamas į HF tirpalą. Dažniausiai kaukėms yra naudojamas fotorezistas, tačiau dažnai norint padidinti ėsdinimo kokybę yra naudojamos dvigubos kaukės (metalas ir Cr/Au, fotorezistas ir Cr/Au (Cr sluoksnis pagerina aukso sukibimą su stiklu)).

Šiuo metu yra labai daug stiklo rūšių su labai skirtingomis sudėtimis. Stiklas – tai oksidų mišinys, kurio koncentracija ir nulemia ėsdinimo parametrus. Pavyzdžiui ėsdinimo sparta priklauso nuo skirtingų rūšių stiklų. Galime pastebėti, jog tik Corning Pyrex stiklas pasižymi pastovia ėsdinimo sparta (8 pav). Kai kurie oksidai kaip pvz CaO, MgO, Al₂O₃ palieka netirpias liekanas HF rūgštyje. Šios liekanos nusileidžia ant stiklo paviršiaus ir pradeda veikti kaip naujos kaukės, todėl gaunamas šiurkštus paviršius, atsiranda defektų ir sumažėja ėsdinimo sparta. Hoya stiklas savyje turi daug Al₂O₃ (apie 20%),

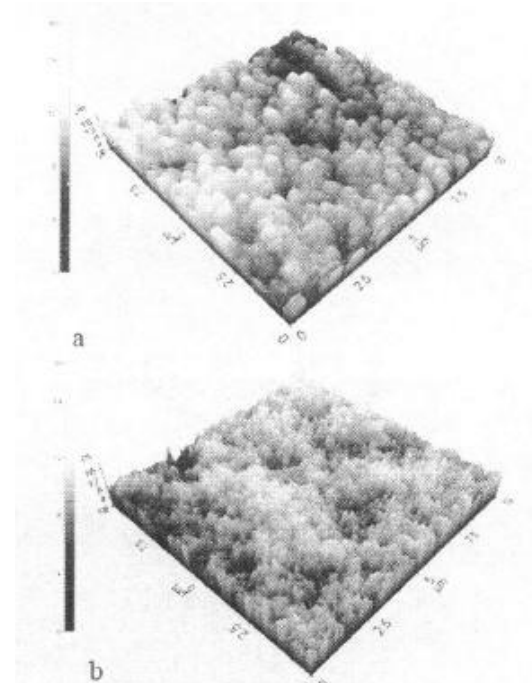


8 pav. Ėsdinimo sparta esant skirtingiems stiklams. Tik Corning Pyrex stiklas pasižymi pastovia ėsdinimo sparta [21]

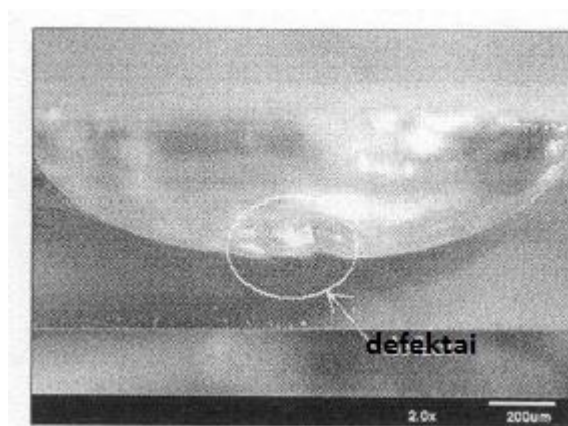
natrio – kalcio silikatinio stiklo sudėtyje yra CaO (8%), MgO (4%), kai tuo tarpu Pyrex stiklo yra tik 2 % oksidų. Dėl šių priežasčių skiriasi ęsdinimo spartos, todėl dažniausiai yra rekomenduojama naudoti tokius stiklus, kuriuose yra kuo mažesnė oksidų koncentracija [33].

Norint gauti kuo aukštesnę ęsdinimo spartą, patariama naudoti didesnės koncentracijos HF rūgštį. Geriausi rezultatai pasiekti naudojant 49 % rūgštį. Yra pastebėta, jog padidinus HF koncentraciją nuo 40 % iki 49 % ęsdinant Pyrex stiklą, galime pasiekti spartų ęsdinimo spartos padidėjimą 50 - 60 %. Nors tokios koncentracijos HF rūgštis pastartina visą procesą,

tačiau tai yra labai pavojingas chemikalas, todėl su tokia rūgštimi reikia elgtis atsargiai. Naudojant fotorezisto kaukės, HF koncentracijos yra sumažinamos, nes kitaip yra stebimas polimero sluoksnio atkibimas nuo stiklo paviršiaus.



9 pav. Pyrex stiklo paviršius po HF a) ir HF:HCl 10:1 b) ęsdinimo. b) atveju paviršius daug lygesnis nei a) atveju [22]



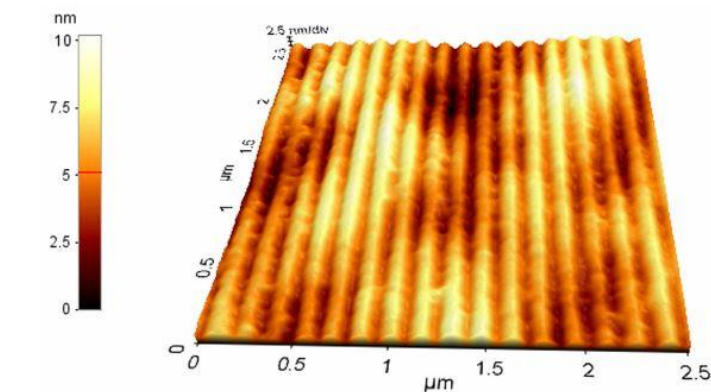
10 pav. Išęsdintas 49 % HF rūgštyje natrio – kalcio silikatinis stiklas. Objekte galime stebėti defektus, atsiradusius dėl ęsdinimo [22]

Norint pagerinti stiklo ęsdinimo kokybę, dažnai HF rūgštis yra maišoma su HCl (9 pav). Nors padarius tokį tirpalą ęsdinimo sparta (Pyrex stiklui) sumažėja, 7 – 8 % palyginus su gryna HF, tačiau gautas paviršius yra daug lygesnis. Toks tirpalas taip pat labai pagerina ir Soda Lime stiklo paviršiaus kokybę. Išmatuota, jog po HF:HCl ęsdinimo natrio – kalcio silikatinio stiklo šiurkštumas sumažėja net apie 5 kartus, nors vis tiek lieka didesnis nei Pyrex stiklo [34].

Kitas būdas modifikuoti stiklo paviršiaus reljefą yra selektyvus ęsdinimas. Šis būdas realizuojamas ultratrumpųjų impulsų lazerio spinduliuotę fokusuojant į lydytą kvarcą, kur dėl daugiafotonės sugerties vyksta medžiagos struktūriniai pokyčiai. Pakinta medžiagos optinės ir

cheminės savybės. Dėl to atsiranda ęsdinimo selektyvumas, t.y. lazeriu eksponuotos lydyto kvarco sritys pasiūžymi 50 – 200 kartų didesniu ęsdinimo greičiu nei nepaveiktos sritys. Trumpai tariant, ęsdinimo selektyvumą lemia tiek struktūriniai, tiek morfologiniai medžiagos pokyčiai. Dėl lazerio apšvitos pakinta SiO_2 cheminiai ryšiai, taip pat susidaro statmenai lazerio elektrinio lauko poliarizacijai išsidęstę nano įtrūkimai [35], padidinantys ęsdinimo srities paviršiaus plotą. Paprastai modifikuotoms sritims pašalinti naudojama HF rūgštis arba KOH [36]. Selektyvaus ęsdinimo metodas yra perspektyvus, tačiau formuojant nanostruktūras paviršiuje, sudėtinga kontroliuoti paveiktos srities gylį.

Periodinių paviršiaus struktūrų stikluose formavimui naudojamas ir kitas metodas – galinės pusės ęsdinimas (angl. *back – side etching*). Šiuo atveju lazerio pluoštas yra išskaidomas į du pluoštus, kurie interferuoja tarpusavyje ant galinės bandinio pusės, kuri yra patalpinta į sugeriantį skystį (šis skystis turi didelę sugerties koeficientą naudojamam lazerio spinduliuotės bangos ilgiui). Dėl sugertos spinduliuotės stipriai padidėja skysčio temperatūra, dėl kurios bandinio paviršius suminkštėja ar ištirpsta, todėl jo pašalinimas tampa daug paprastesnis. Dėl temperatūros pokyčių susidarius mikročiurkšlės ir didelio slėgio garų burbuliukai atsitrenkdami pašalina suminkštėjusį paviršių ir taip gaunama norimo periodo struktūra. Mažiausias šiuo metodu pasiektas gardelės periodas – 154 nm (11 pav) [37].

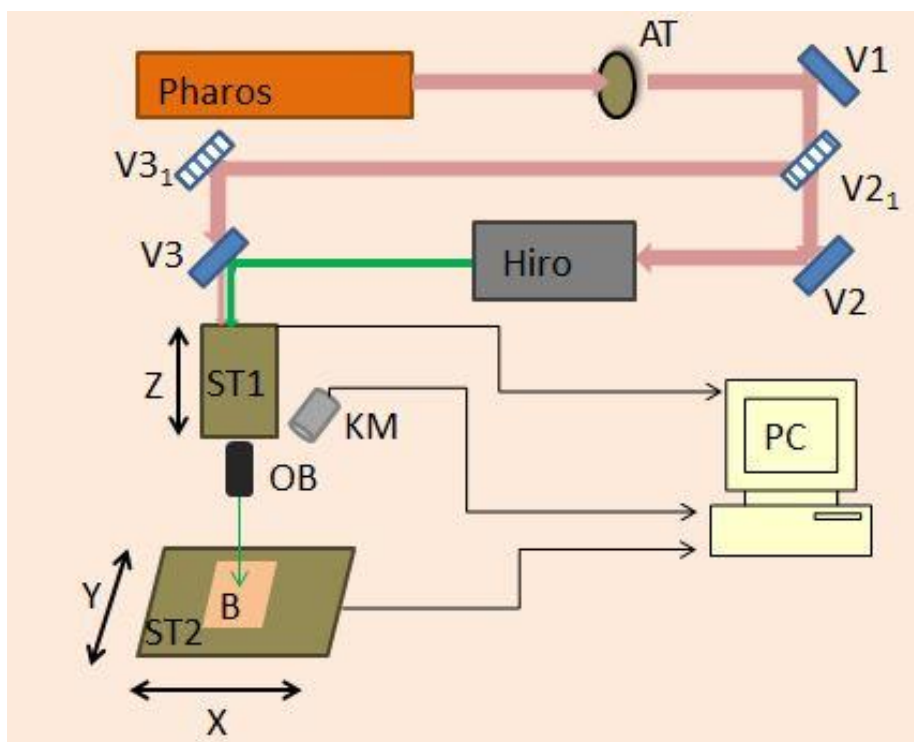


11 pav. Atominės jėgos mikroskopu užfiksuota 154 nm periodinė struktūra [37]

3. Matavimo prietaisai, įranga ir eksperimentinės medžiagos

3.1 Eksperimento schema

Eksperimento metu buvo naudojamas femtosekundinis Yb:KGW Pharos („Light Conversion“, Lietuva) lazeris, generuojantis 1030 nm bangos ilgio spinduliuotę (I harmonika). Norint naudoti kitus bangos ilgius, naudojamas harmonikų generatorius HIRO („Light Conversion“, Lietuva), kuris suteikia galimybę gauti 515 nm (II harmonika), 343 nm (III harmonika) ir 258 nm (IV harmonika) bangos ilgius. Supaprastinta eksperimento schema pateikta 12 pav.



12 pav. Supaprastinta eksperimento schema

Lazerio pluoštas, išėjęs iš Pharos lazerio praeina pro galios silpnintuvą AT, atsispindi nuo dielektrinių veidrodžių V1 ir V2. Eksperimento metu buvo dirbama su I ir II harmonikomis. Schema yra pritaikoma kiekvienai spinduliuotei:

I harmonika – lazerio pluoštas, atsispindėjęs nuo V1 ir V2₁ veidrodėlių, sklinda tiesiai iki V3₁ veidrodėlio, atsispindi nuo jo ir patenka į objektyvą OB.

II harmonika – lazerio pluoštas, atsispindėjęs nuo V1 ir V2 veidrodėlių patenka į harmonikų generatorių HIRO. Išėjusi 515 nm bangos ilgio spinduliuotė atsispindi nuo veidrodėlio V3 ir patenka į objektyvą OB.

Naudotas planapochromatinis objektyvas (20X, NA=0,5), kuris yra pritvirtintas prie z ašimi judančio kryptimi staliuko ST1 („Aerotech“, JAV). Bandinys B eksponuojamas ant X ir Y kryptimis judančio staliuko ST2 („Aerotech“, JAV). Vaizdas stebimas CMOS USB vaizdo kamera. Judantys pozicionavimo staliukai valdomi „3DPoli“ programa. Gauti bandiniai analizuojami naudojantis optiniu profilometru („SensoFar“, Ispanija).

3.2 Naudojamos medžiagos

Eksperimento metu naudojamas borosilikatinis stiklas. Naudoti 24 × 24 mm ploto ir 160 μm storio ROTH H875 stiklo padėkliukai. Šis stiklas pasižymi itin gera optine kokybe, yra be dėmių, įtrūkimų ir susidariusių viduje burbuliukų. Lūžio rodiklis – 1,523 [38]. Taip pat naudojama BK7 (diametras – 12,7 mm, storis – 3 mm, lūžio rodiklis 1,506), stiklo padėkliukai, kurie yra taip pat borosilikatiniai stiklai, tačiau pasižymintis šiek tiek prastesnėmis savybėmis nei ROTH stiklas. Eksperimente naudojami ir UVFS stiklai (lydyto kvarco, lūžio rodiklis – 1,449), kurie pasižymi aukšta kokybe ir yra dažnai naudojami gaminant optinius elementus.

Ėsdinimo kaukei naudojamas teigiamas fotorezistas I (teigiamas – apšviesta dalis įmerkus į ryškinimo skystį pasišalina; neigiamas – vyksta atvirkščias procesas). Šios serijos fotorezistai pasižymi itin geru kontrastu, puikiu sukibimu su paviršiumi, terminiu stabilumu bei ėsdinimosi kokybe. Jautrūs g-, h- ir i- linijų (maždaug 320 – 440 μm) apšvietimui. Priklausomai nuo gamavimo metu naudojamo sukimo greičio, fotorezisto storis gali kisti nuo 2,41 μm iki 5 μm. Tam, kad geriau fotorezistas prikibtų prie stiklo paviršiaus naudojamas TI PRIME skystis, kuris gerina fotorezisto sukibimą su paviršiumi. Apšviesto I fotorezisto ryškinimui naudojamas 0,7 % NaOH tirpalas. Taip pat buvo išbandytas teigiamas fotorezistas II, kuris pasižymi geru sukibimu su paviršiumi ir yra pritaikytas darbui su HF rūgštimi. Tam, kad fotorezisto sukibimas su stiklo paviršiumi būtų dar geresnis, naudojamas sukibimo skatinimo skystis II. Fotorezisto ryškinimui naudojamas specialiai šiam fotorezistui pritaikytas ryškinimo skystis II.

Padarytos fotorezisto kaukės ėsdinimui naudota HF rūgštis. Tai vienintelė rūgštis, kuri gali ėsdinti amorfinį SiO₂, kvarcą ir stiklą esant aukštai ėsdinimo spartai (šiuo metu stiklo ėsdinimui bandoma pritaikyti ir KOH šarmą, tačiau kol kas nėra pasiektų gerų rezultatų lyginant su HF ėsdinimu [39, 40]). Tokia rūgštis taip pat labai naudinga tuo, jog nepaveikia fotorezisto. Todėl galima gauti gerą ėsdinimo kokybę. Svarbu atkreipti dėmesį į tai, jog nors HF yra efektyvi stiklo ėsdinimo priemonė, tačiau tai itin pavojingas chemikalas (didesnės rūgšties koncentracijos patekimas ant kūno gali baigtis mirtimi), todėl dirbant su medžiaga reikia imtis visų būtinų

saugumo priemonių. Eksperimento metu naudojamos HF koncentracijos – 6 %, 4 %, 2 % ir 0,5 %. Yra žinoma, jog HF pasižymi didele ėsdinimo sparta, todėl buvo naudojama ir buferinė HF rūgštis (BOF) [41]. Tai yra 49% grynumo HF rūgštis, sumaišyta su kitomis medžiagomis, dažniausiai amonio fluoridu NH_4F . Visiškai fotorezisto pašalinimui nuo stiklo paviršiaus naudojamas dimetilsulfoksido (DMSO) tirpalas. Stiprus nuėmiklis gerai ištirpina fotorezistą ir viskas ištirpusiais liekanas išlaiko tirpale.

4. DOE formavimas skaidrių terpių paviršiuje

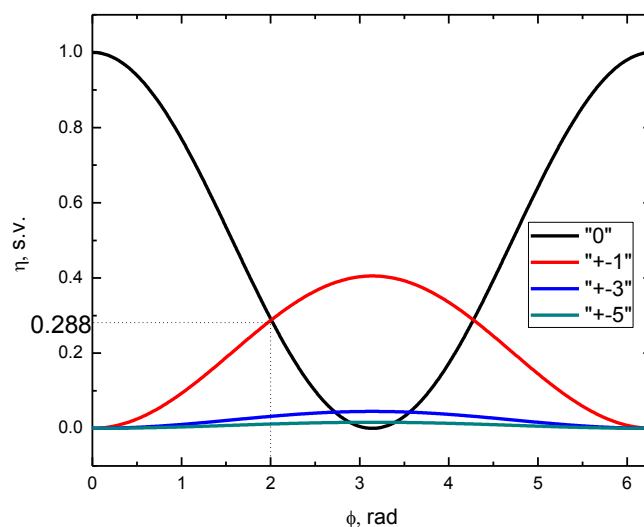
4.1 Teoriniai skaičiavimai

Atskirų difrakcinių eilių intensyvumą galima valdyti keičiant santykį b/Λ arba gardelės fazinį gylį φ (7 lygtis)

Gardelės dizainui pasirinktas santykis $b/\Lambda = 0,5$, kadangi tokiu atveju lyginių difrakcinių eilių intensyvumas yra lygus 0 (6pav).

Sprendžiant 6 lygtį surandamas gardelės fazinis gylis φ , kuomet 0 ir ± 1 eilės difrakcinių maksimumų intensyvumai yra lygūs (13 pav). Atsilenkimo kampas parenkamas keičiant gardelės periodą (1 lygtis).

Parinktas gardelės periodas $\Lambda = 1030 \mu\text{m}$. Tai atitinka 1 mrad atsilenkimo kampą tarp 0 ir 1 eilės difrakcinių maksimumų. Pagal 6 lygtį suskaičiuotas fazinis gardelės gylis yra $\varphi = 0,64\pi$ radianų. Borosilikatiniame stikle ($n = 1,523$) tai atitinka $d = 0,63 \mu\text{m}$ atstumą tarp gardelės rėžių viršaus ir apačios.

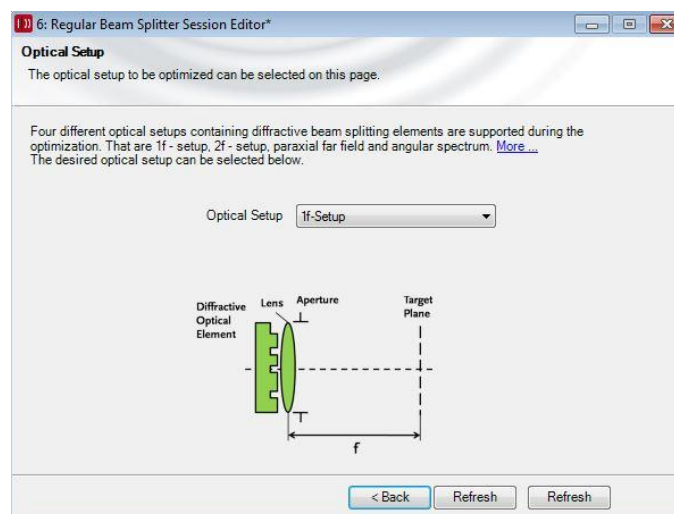


13 pav. Difrakcijos spinduliuotės efektyvumo skirtingose difrakcinėse eilėse priklausomybė nuo gardelės fazinio gylio, esant santykiui $b/\Lambda = 0,5$

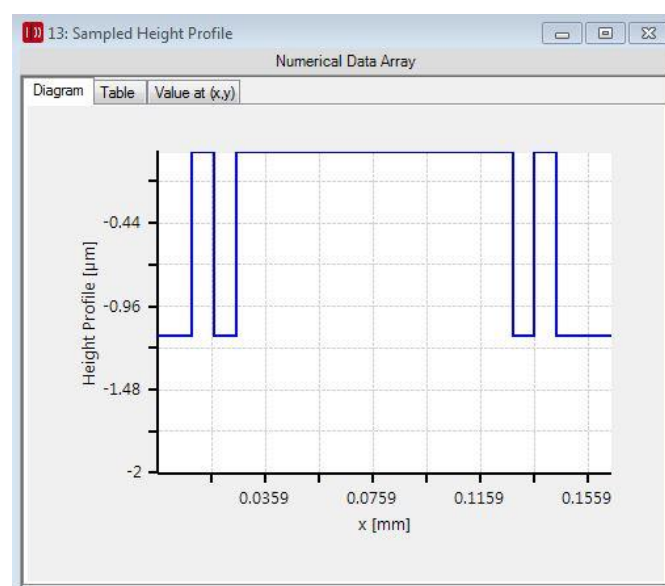
Esant santykiui $b/\Lambda = 0,5$ ir faziniam gyliui $\varphi = 0,64\pi$ apskaičiuotas 1 ir 0 eilių efektyvumas yra po 28,8%. Iš viso į šiuos difrakcinius maksimumus patenka 86,4% energijos. 3 ir 5 eilių efektyvumai atitinkamai 3,2% ir 1,2%.

Mūsų norimo pluošto daliklio profilio parametrus taip pat galima apskaičiuoti naudojant ir kompiuterines skaičiavimo programas. Viena iš tokių yra „VirtualLab“. Ši „Light Trans“ įmonės sukurta programa skirta optiniam modeliavimui ir inžinerijai. Viena iš galimybių: kurti pluošto keitiklio, difuzoriaus ar daliklio reljefą. Tereikia suvesti pradinis parametrus ir tuomet galima apskaičiuoti norimą paviršių ir jį optimizuoti. Apskaičiuoti rezultatai gali būti iškart naudojami tokių elementų formavime. Pabandžius sumodeliuoti su tokia programa paviršiaus reljefą, galime apskaičiuoti bet kokį paviršiaus reljefą.

Skaičiavimo pavyzdys: pradiniai parametrai: bangos ilgis 1030 nm, pluoštų matrica 1×3 , kampas tarp pluoštų – 1 mrad, lęšio efektyvusis židinio nuotolis (jei sistemoje bus naudojamas) – 4 mm, fazės lygmenų skaičius – 2.



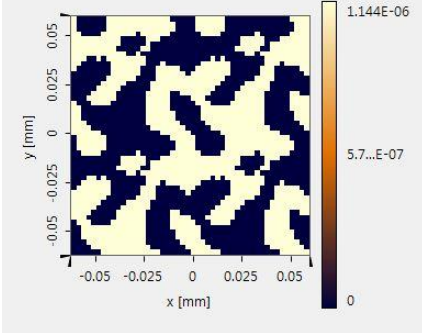
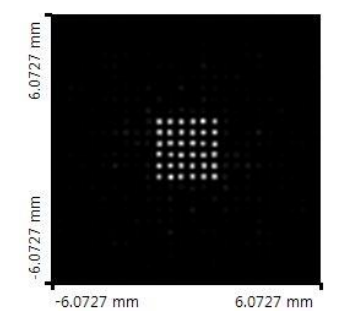
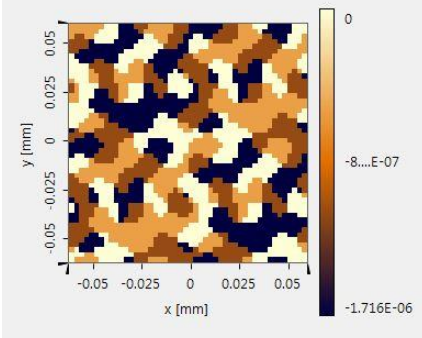
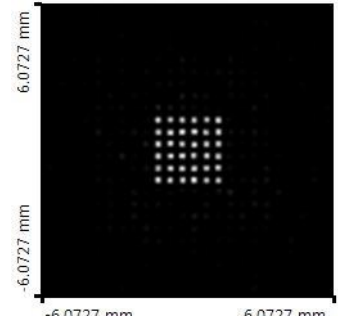
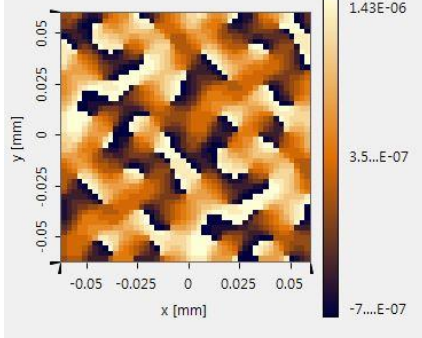
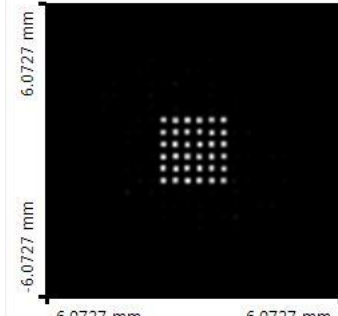
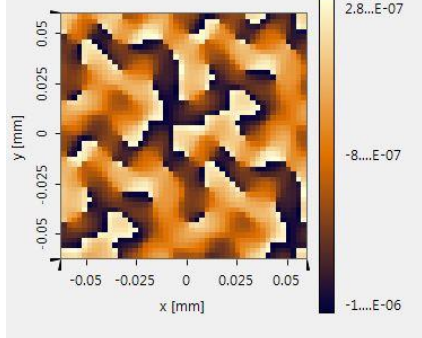
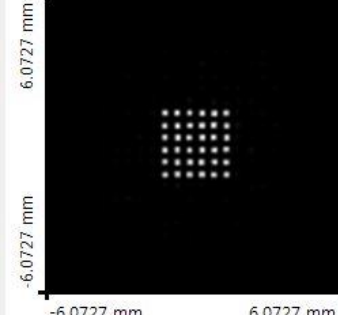
14 pav. VirtualLab programos pagrindinių parametų įvedimo langas



15 pav. Pavyzdinis VirtualLab programa apskaičiuotas binarinis paviršiaus reljefas

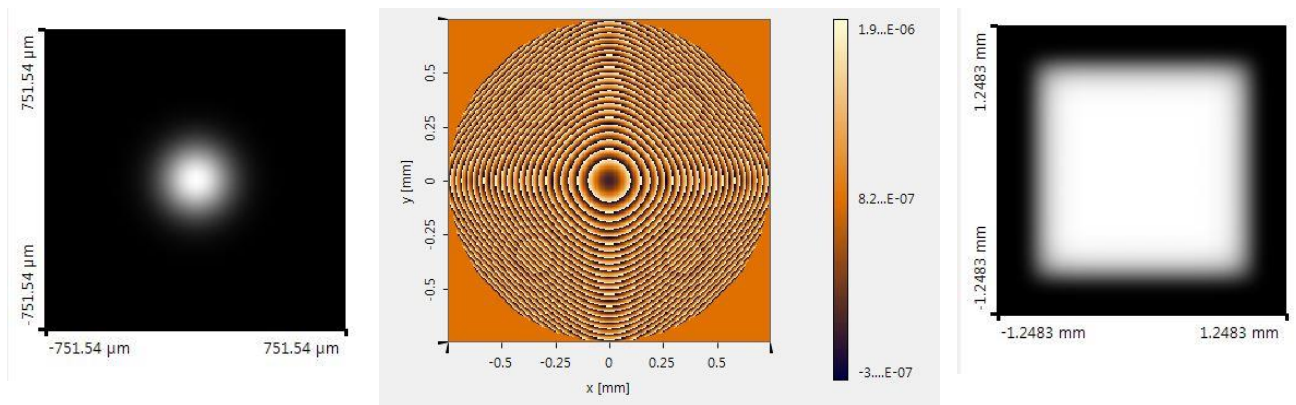
Kaip minėta anksčiau, kuo DOE profilis yra sudėtingesnis, tuo didesnis jo efektyvumas. Naudojantis šia programa buvo apskaičiuoti pavyzdiniai profiliai taip norint parodyti, kaip priklauso elemento efektyvumas nuo fazinio lygmenų skaičiaus.

1 lentelė „VirtualLab“ programa suformuotų daliklio profilių palyginimai

<p>a) 2 lygmenys Efektyvumas – 72,07%</p>		
<p>b) 4 lygmenys Efektyvumas – 74,16%</p>		
<p>c) 16 lygmenų Efektyvumas – 88,71</p>		
<p>d) 64 lygmenų Efektyvumas – 89,09</p>		

Skaičiavimui pasirinktas 1030 nm bangos ilgio spinduliuotė, kampas tarp 0 ir ± 1 eilės maksimumų – $0,95^\circ$. Profilis modeliuojamas norint gauti 6×6 pluoštų matricą (1 lentelė). Iš apskaičiuotų pavyzdžių galime matyti, jog esant mažam lygmenų skaičiui, šalia pagrindinės pluoštų matricos yra daug pašalinių pluoštų, dėl kurių tokio elemento efektyvumas krenta. Didinant lygmenų skaičių visa pluošto energija pereina tik į pageidaujamus pluoštus ir efektyvumas padidėja. Su lygmenų skaičiaus didėju atsiranda ir problema, tokį reljefą yra labai sunku ir brangu pagaminti.

Naudojant šią programą galima apskaičiuoti ir įvairesnių padalintų pluoštų kombinacijų, kaip kad pvz.: 2×3 ir t.t, bei kitokių difrakcinių elementų, kaip kad pluošto keitiklio ir formuotuvo. Taip buvo suformuotas pavyzdinis reljefas pluošto keitikliui, kuris Gauso pluošto transformuoja į plokščios viršūnės pluoštą (16 pav.).

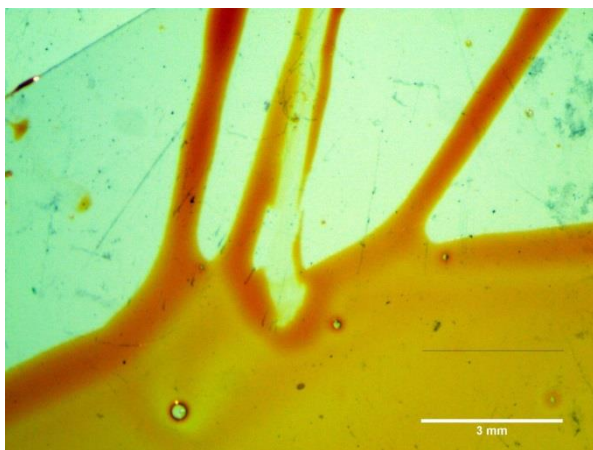


16 pav. „VirtualLab“ programa apskaičiuotas pluošto keitiklio profilis. Kairėje pavaizduotas įėjimo 1030 nm spinduliuotės Gauso pluoštas, kuris praėjęs viduryje esantį profilį transformuojamas į plokščios viršūnės pluoštą

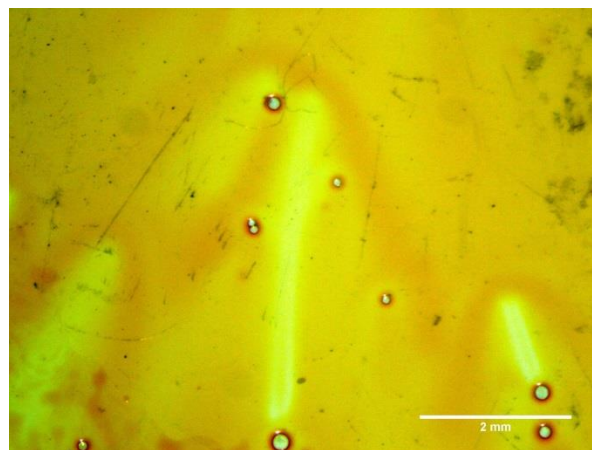
4.2 Pasiruošimas eksperimentui

Tam, kad galėtume išbandyti įvairius parametrus pluoštų daliklio formavimui, reikėjo tinkamai paruošti stiklo paviršius. Viskas pradedama nuo stiklo padėkliukų kruopštaus nuvalymo acetonu ir ir izopropanoliu tam, kad būtų pašalinti visi nešvarumai nuo paviršiaus ir gautume kuo geresnį sukibimą. Tolimesnį bandinių paruošimą galima išskirstyti į atskirus žingsnius:

1. Stiklo padėkliukai nuvalomi acetonu ir izopropilu tam, kad būtų pašalinti visi nešvarumai nuo paviršiaus, mažinantys fotorezisto ir stiklo sukibimą. Šis etapas yra labai svarbus, todėl padėklų nuvalymas turi būti ypač kruopštus, nes pasilikus nešvarumams, bus blogai padengta fotorezisto danga, o tai nulems netolygų stiklo ėsdinimąsi (17 – 18 pav.).



17 pav. Dėl blogai nuvalyto stiklo paviršiaus fotorezistas pilnai nepadengia paviršiaus



18 pav. Dėl blogai nuvalyto paviršiaus ir pačiame fotoreziste susidariusių oro burbuliukų fotorezisto sluoksnyje matosi susidariusios „kometos“, kur polimero sluoksnis yra plonesnis nei kitose vietose

2. Nuvalytas stikliukas kaitinamas apie 20 min krosnelėje, įkaitintoje iki 120°C. Taip pašalinamas stiklo paviršiuje esantis vanduo.
3. Ant nuvalyto ir iškaitinto stiklo dedama 40 μ l sukibimo aktyvatoriaus TI PRIME, padengtas bandinys išsukamas 3930 rpm greičiu, apie 20 s dangų formavimo (angl. „spin coating“) įrenginyje. Po šios procedūros stiklo paviršius turi išlikti švarus t.y. jei nesimato jokio TI PRIME sluoksnio, tuomet sukibimo skatintojas tinkamai padengė stiklo paviršių.
4. Tik išsukus bandinį jis vėl dedamas 2 min į kaitinimo krosnelę, įkaitintą iki 120°C. Po to stiklas ištraukiamas atvėsti.
5. Ant atvėsinto ruošinio, dedama 120 μ l fotorezisto I, bandinys dedamas į dangų formavimo įrenginį ir sukamas 2040 rpm greičiu 15s.
6. Gautas sluoksnis sukietinamas kaitinimo krosnelėje, įkaitintoje iki 90°C, kaitinant \approx 4 min (1 minutė – 1 μ m storio fotorezisto sluoksniui). Toks kaitinamas kitaip vadinamas „softbake“.
7. Gautas fotorezisto sluoksnis ant stiklo \approx 4 μ m.

Išvardinti gamybos žingsniai tinka fotorezistui I. Naudojant fotorezistą II visi etapai išlieka tokie patys, tačiau skiriasi kai kurie parametrai: ant padėkliuko dedama 60 μ l sukibimo aktyvatoriaus II, sukama dangų formavimo įrenginyje 40s 4000RPM greičiu ir kaitinama 2 min 180°C kaitinimo krosnelėje; ant atvėsinto bandinio dedama 300 μ l fotorezisto II ir sukama 60s 4000 RPM dangų formavimo įrenginyje, kaitinama 2 min 90°C kaitinimo krosnelėje.

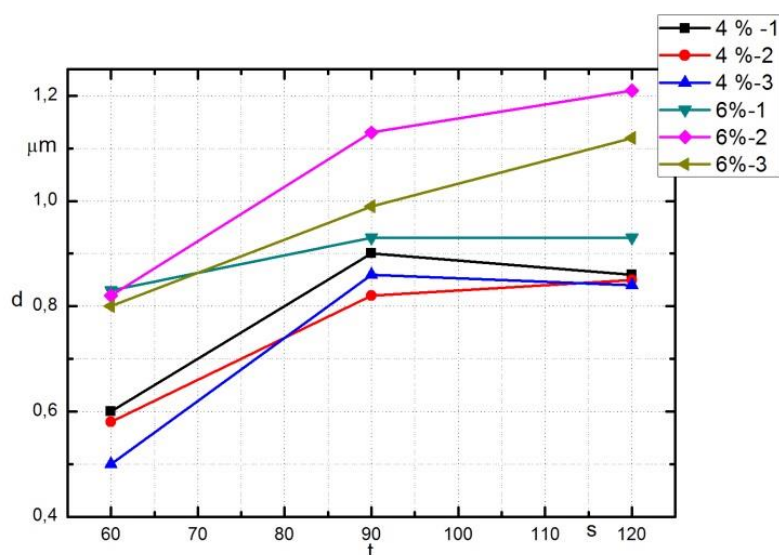
Taip pat fotorezisto ryškinimui bei stiklo ėsdinimui paruošiami NaOH ir HF tirpalai. Naudojamo fotorezisto I ryškinimui užtenka 0,6 – 0,8 % NaOH tirpalo (NaOH skiedžiamas su distiliuotu vandeniu). Pasiruošta koncentracija – 0,7%. Kadangi gryna HF koncentracija netinka

naudojant fotorezistą, buvo pasiruoštos trys skirtingos mažesnės HF koncentracijos – 6 %, 4 %, 2 % ir 0,5% (HF skiedžiama su distiliuotu vandeniu).

Nustatytas optimalus ryškinimo laikas naudojant NaOH tirpalą – 15s. Naudojant ryškinimo skystį II ryškinimo laikas – 60s.

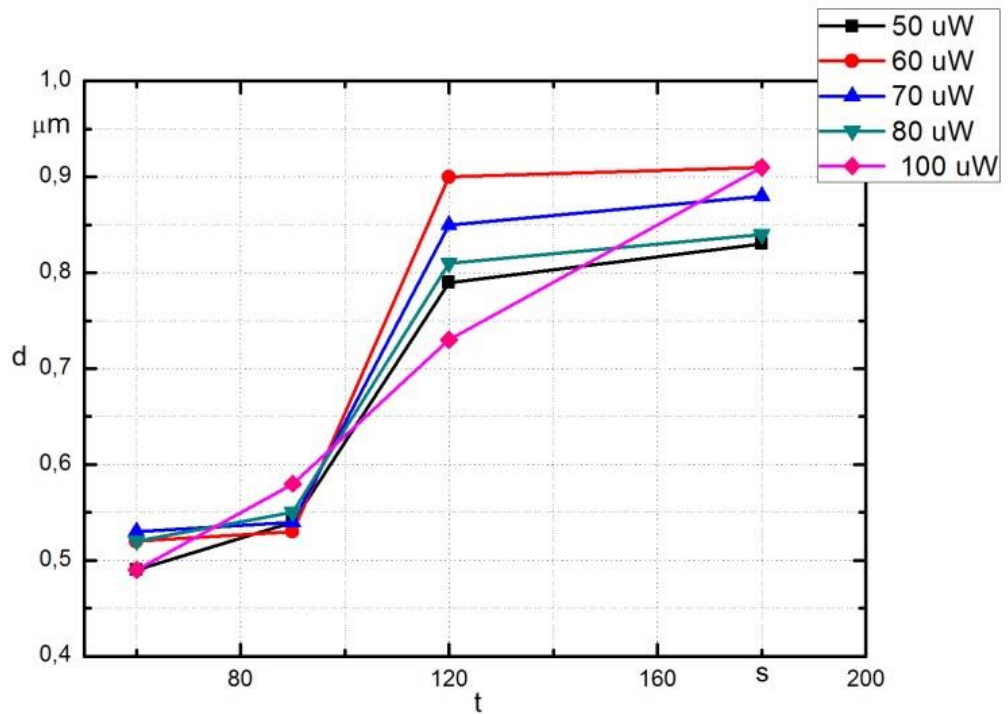
4.3 Optimalių DOE formavimo parametrų ieškojimas

Tęsiant optimalių formavimo parametrų ieškojimo eksperimentus, buvo nagrinėjami įvairūs apdirbimo parametrai ir jų įtaka stiklo ėsdinimui. Keičiant spinduliuotės bangos ilgį, vidutinę pluošto galią, ėsdinimo laiką buvo stebimas išėsdintas paviršius. 19 paveikslėlyje pavaizduota stiklo ROTH ėsdinimo gylis, priklausantis nuo ėsdinimo laiko esant skirtingoms ėsdinimo koncentracijoms ir vidutinėms spinduliuotės galioms (16pav. grafike 1 = 117 μ W, 2 = 193 μ W, 3 = 281 μ W, lazerio dažnis – 1 kHz, bandinio skenavimo greitis 0,2 mm/s, impulso trukmė – 200 fs). Šios galios buvo pasirinktos apibendrinus anksčiau atliktų eksperimentų duomenimis (optimalus galios intervalas 1030 nm bangos ilgiui 100 – 250 μ W). Galime pastebėti, jog ėsdinant 6 % rūgštyje ėsdinimo gylis yra didesnis nei ėsdinant 4 %. Esant didesnei koncentracijai tampa sunku valdyti ėsdinimo spartą ir gylį, o kadangi naudojant 4 % HF ėsdinimo gylis yra panašus į apskaičiuotą gylį dalikliui, todėl sekantis eksperimentas buvo atliktas naudojant tik 4 % rūgštį.



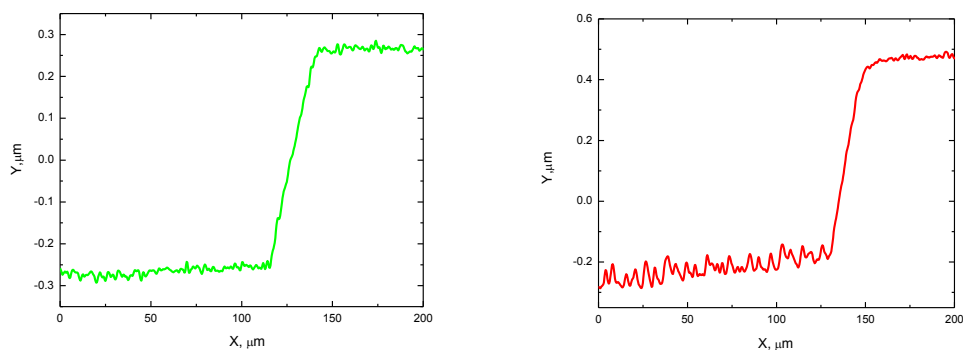
19 pav. Ėsdinimo gylio priklausomybė nuo ėsdinimo laiko esant skirtingoms vidutinėms apšvitinimo galioms ir HF rūgšties koncentracijoms (apšvitinta su 1030 nm bangos ilgiu)

Apšvietus bandinį 515 nm spinduliuote išėsdinto stiklo gylio priklausomybę nuo ėsdinimo laiko galime matyti 20 pav. Mažiausias gylis yra naudojant 50 μW galią, didžiausias – kai galia yra 60-70 μW . Tokia galia atitinką optimalią apšvitinimo galią, kuomet fotorezisto sluoksnis yra tik apšvitinimas ir nevyksta sluoksnio abliacijos, ar fotorezisto „sproginėjimo“ dėl per didelės galios (tai dažnai pasireiškėdavo naudojant 1030 nm bangos spinduliuotę).



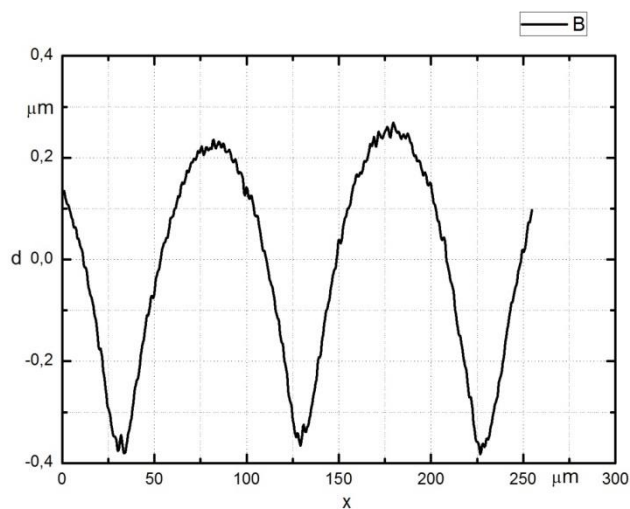
20 pav. ėsdinimo gylio priklausomybė nuo ėsdinimo laiko esant skirtingoms apšvitinimo galioms (apšvitinta su 515 nm bangos ilgiu, HF koncentracija – 4%)

Tolimesniems eksperimentams pasirinktas 515 nm bangos ilgis. Antroji harmonika pasirinkta todėl, kad šio bangos ilgio spinduliuote eksponuojant bandinį, apdirbamo paviršiaus kokybė yra žymiai geresnė nei apšviečiant fundamentine harmonika. 21 paveiksle pavaizduota optiniu profilometru užfiksuoti gardelės rėžių profiliai, apšviečiant pirmąją ir antrąją Yb:KGW lazerio harmonikomis. Eksponuojant 515 nm bangos ilgio šviesa, išėsdintos srities paviršiaus šiurkštumas yra panašus, kaip ir neėsdintos srities, tuo tarpu esant 1030 nm bangos ilgio apšvitai, išėsdintos srities šiurkštumas gerokai didesnis.

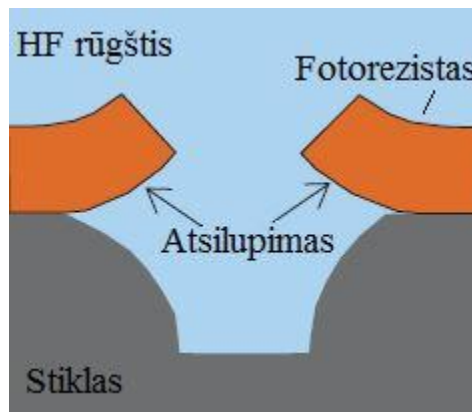


21 pav. Gardelės rėžių skerspjūviai. Žalia kreivė žymi gardelę kurios fotorezisto apšvitai naudota 515 nm bangos ilgio spinduliuotė, raudona 1030 nm

Išėsdintos srities profilis labai priklauso nuo naudojamos rūgšties koncentracijos, todėl eksperimentiškai nustatyta, kuri HF tirpalo koncentracija geriausiai tinka stiklų ėsdinimui. Pasirinktos – 6%, 4%, 2% ir 0,5 % HF tūrinės koncentracijos distiliuotame vandenyje. Esant mažoms rūgšties koncentracijoms, norint pasiekti reikiamą išėsdintos srities gylį, reikalinga ilga ėsdinimo trukmė. Pastebėta, kad tokiu atveju išėsdintų sričių kraštai nuožulnėja, ties paviršiumi kraštai užlinksta (22 pav). Tai aiškinama tuo, kad rūgštis skverbiasi tarp padėklo ir fotorezisto sluoksnio, pasireiškia fotorezisto lupimosi reiškinys (23 pav).

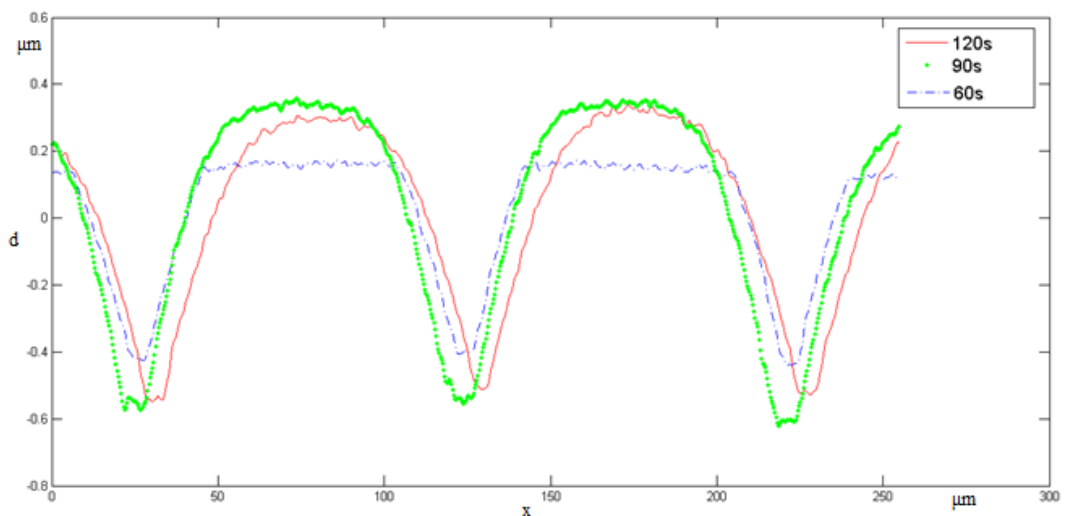


22 pav. Išėsdintos ROTH stiklo plokštelės skerspjūvis. Plokštelė ėsdinta 0,5% HF tirpale, 17min. Dėl ilgo ėsdinimo laiko matosi užapvalėję kraštai



23 pav. Fotorezisto „lupimosi“ nuo padėklo HF tirpale schema

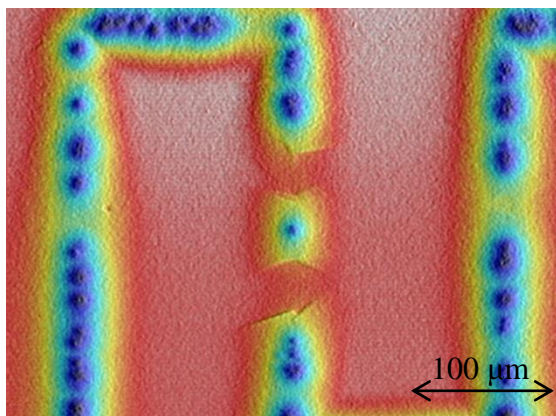
Ėsdinamo griovelio formos kitimo dinamika laike pateikta 24 paveiksle. Esant mažoms ėsdinimo trukmėms, ėsdinamo griovelio profilis artimas stačiakampiui, didinant ėsdinimo trukmę, vis labiau pasireiškia fotorezisto lupimasis. Iš kitos pusės, didinant HF tirpalo koncentraciją, ėsdinimo procesas darosi vis sunkiau kontroliuojamas. Daliklio gamybai pasirinkta 4 % HF tirpalo koncentracija.



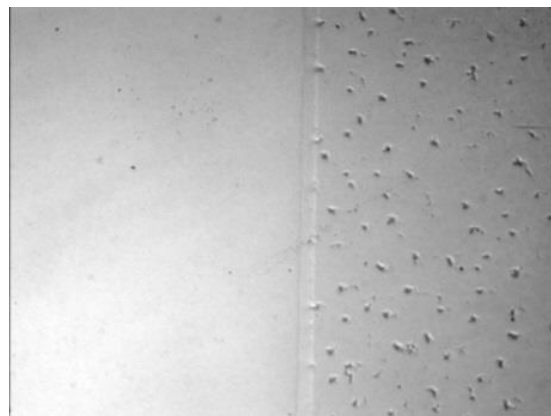
24 pav. Ėsdinamo griovelio formos kitimas, didinant ėsdinimo trukmę. HF tirpalo koncentracija 4%

Atliekant eksperimentus pastebėta, jog naudojant mažas energijas (1 harmonikai $< 150 \mu\text{W}$, 2 harmonikai $< 40 \mu\text{W}$), apšvitinimo kokybė suprastėja. Fotorezisto sluoksnis apšvitinamas nevisiškai arba išvis nebūna paveiktas šviesos. Išėsdinus stiklą aiškiai matosi prasta bandinio išėsdintos linijos kokybė. Linija yra nevienalytė, matosi atskirų impulsų palikti „taškai“ (25 pav). Tuo tarpu naudojant dideles galias, vyksta fotorezisto abliacija. Pastebėta, jog dėl abliacijos, nuo lazerio

apšviečiamų zonų yra „užnešamos“ dulkės ant dar neapšviestų vietų (26 pav). O tai turi neigiamos įtakos tolimesniam bandinio apšvietimui ir išdinimui.



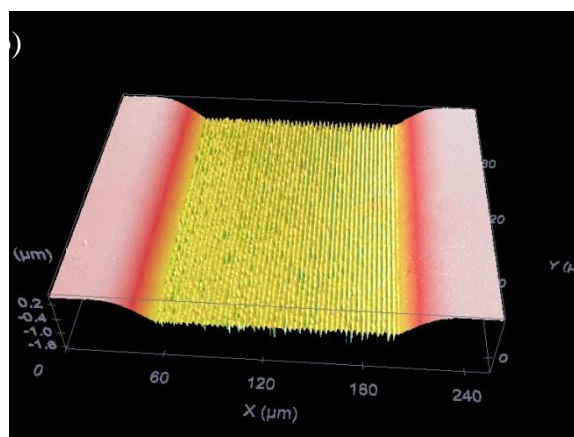
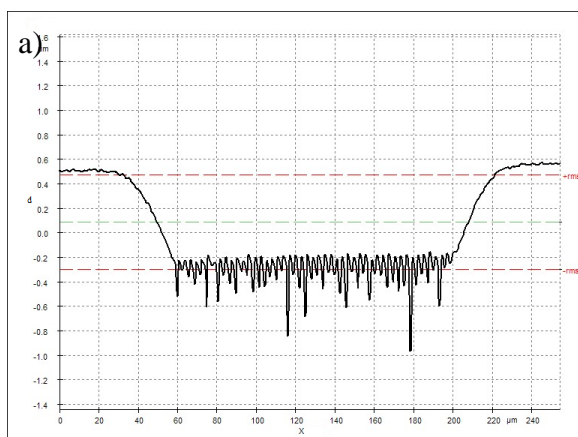
25 pav. Išėsdintas griovelis esant mažai 1030 nm spinduliuotės galiai ($P = 151 \mu\text{W}$)



26 pav. Išėsdinto stiklo paviršius esant švaram fotorezisto sluoksniui (kairė pusė) ir apneštam dulkėmis (dešinė pusė)

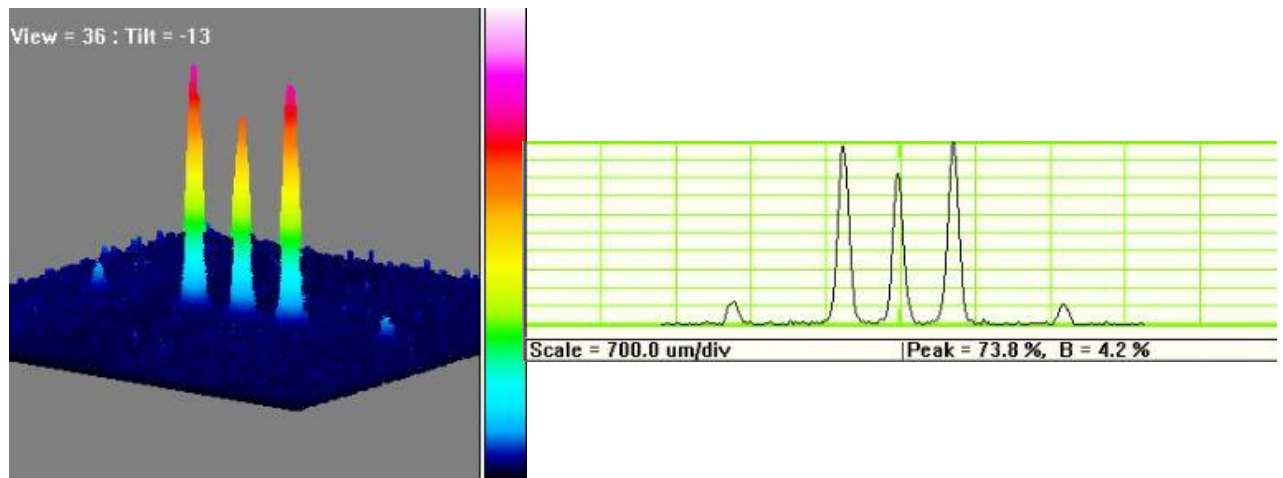
4.4 Pluošto daliklių formavimas

Norint įvertinti, ar rasti parametrai tikrai yra geriausi, buvo gaminamas pluošto daliklio prototipas, kuris He-Ne lazerio šviesą ($\lambda = 633 \text{ nm}$) dalintų į tris lygius pluoštus. Tokiam dalikliui paskaičiuoti parametrai: $\Lambda - 605 \mu\text{m}$, $b - 165 \mu\text{m}$, $d - 605 \mu\text{m}$, $\alpha - 0,06^\circ$). Naudojantis anksčiau rastais parametrais (apšvitinimo galia – $80 \mu\text{W}$, 515 nm bangos ilgis, 4% HF rūgštis) buvo pagamintas pluošto daliklis (27 pav.). Vietoj suprojektuoto $0,06^\circ$ atsilenkimo kampo pirmosios eilės maksimumai atsilenkia $\sim 12^\circ$. Tai atitinka $3 \mu\text{m}$ periodą, t.y. lazerio skenavimo žingsnį, kuriuo buvo eksponuojamas bandinys. Dėl per didelės lazerio energijos gautas stiklo abliavimas, dėl to pakito gautos gardelės parametrai. Todėl eksperimentas kartojamas naudojant mažesnes energijas.



27 pav. Išėsdinto daliklio profilio nuotrauka (515 nm, $80 \mu\text{W}$, 4 % HF rūgštis)

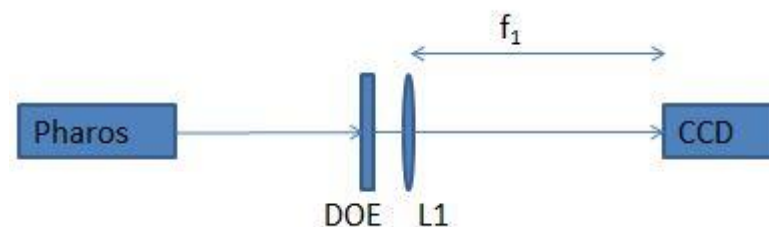
Sumažinus apšvitinimo galią iki $60 \mu\text{m}$, eksperimentas pakartotas ir gautas pluošto daliklis, kurio efektyvumas $\approx 86\%$. Trečiosios eilės maksimumai lygūs $1/10$ pirmosios eilės energijos (28 pav).



28 pav. 633 nm spinduliuotės pluošto daliklio formuojamų pluoštų skirstinys ir erdvinis pjūvis (ROTHstiklas)

Kadangi daliklio prototipas 633 nm bangos ilgiui pluoštą dalino taip, kaip norėta, pradėtas formuoti pluošto daliklis 1030 nm bangos ilgiui. Atliekant skaičiavimus susidurta su problema, jog su turimais optimaliais parametrais bandinio apšvitinimo laikas tampa labai ilgas ($> 1\text{val.}$). Norint išspręsti šią problemą buvo padidintas lazerio dažnis iki 50 kHz bei bandinio skenavimo greitis – 10 mm/s. Eksperimentiškai nustatytas vidutinės galios darbinis langas nuo 1,3 mW iki 2 mW. Darbinė galia pasirinkta ties lango viduriu $\sim 1,7\text{ mW}$. Naudojantis šiomis sąlygomis buvo suformuotas pluošto daliklis, dalinantis 1030 nm spinduliuotę į trys vienodus pluošteličius.

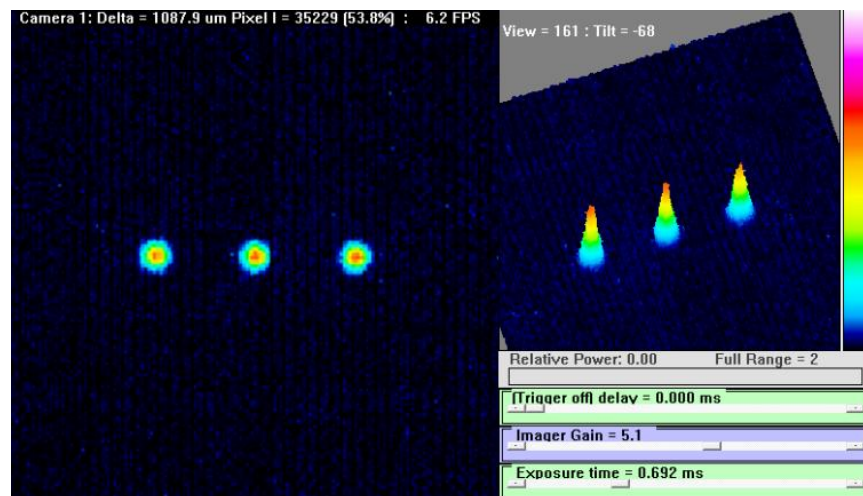
Pagamintas pluošto daliklis testuotas apšviečiant jį PHAROS lazerio spinduliuote ($\lambda = 1030\text{ nm}$). Difrakcinis vaizdas formuotas tiesiai už difrakcinio optinio elemento patalpinus fokusuojantį lęšį. Matavimo blokinė schema pavaizduota 29 paveiksle.



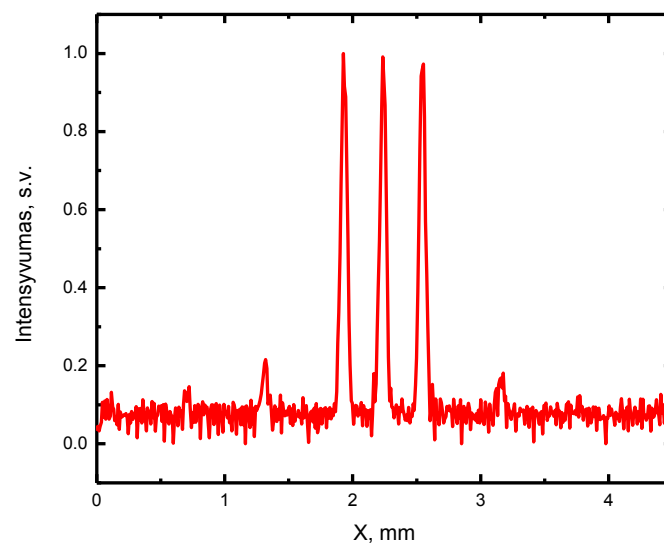
29 pav. Eksperimento blokinė schema. DOE – difrakcinis optinis elementas, L1 lęšis ($f = 300\text{ mm}$), $f_1 = 300\text{ mm}$

Erdviniai skirstiniai registruoti WinCamD pluošto profilometru. Į daliklį nukreipiamo pluošto diametras apie 4 mm. Dalikliu suformuotas ir lęšiu sufokusuotas skirstinys užregistruotas 30 pav.

Skirstinys sudarytas iš trijų vienodo intensyvumo difrakcinių maksimumų $(-1,0,1)$. Taip pat periferijoje matyti mažo intensyvumo 3 ir -3 eilės maksimumai, tuo tarpu 2 ir -2 eilės smailės nestebimos.



30 pav. Pluošto dalikliu formuojamas intensyvumo skirstinys lęšio L1 židinio plokštumoje

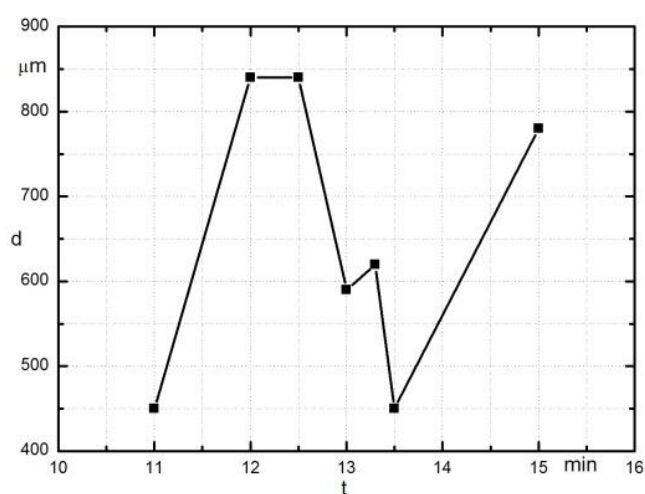


31 pav. Pluošto dalikliu formuojamas intensyvumo skirstinys lęšio L1 židinio plokštumoje, erdvinis pjūvis

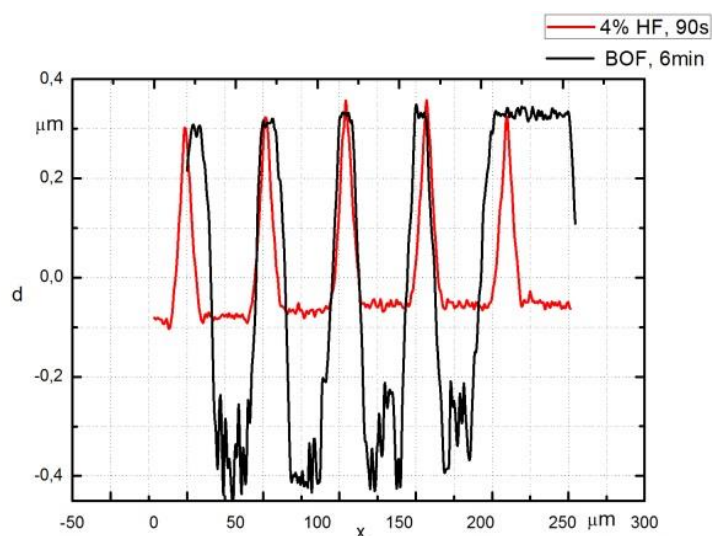
Išmatuotas atstumas tarp gretimų difrakcinių maksimumų židinio plokštumoje naudojant 300 mm židinio nuotolio lęšį yra $\sim 308 \mu\text{m}$. Tai atitinka 1 mrad kampą. Pluošto diametras apie 4 mm. Išmatuotas daliklio efektyvumas apie 76 %. Efektyvumas apskaičiuotas palyginus impulso prieš difrakcinį optinį elementą ir trijų difrakcinių maksimumų $(-1,0,1)$ energijas. Difrakcinių

maksimumų energija išmatuota iristine diafragma nufiltruojant aukštesnių eilių difracinius maksimumus.

Kadangi naudojami ROTH stiklo padėklai ploni, jie nėra patvariausias variantas difracinių optinių elementų gamybai. Todėl buvo atlikti eksperimentai naudojant storesnius borosilikatinio stiklo BK7 padėklus. Pastebėta, jog BK7 stiklo išdinimasis nėra tolygus (32 pav), esant tam pačiam išdinimosi laikui gauti skirtingi išėsdinti gyliai, todėl panaudota BOF, kad suvaldytume išdinimo spartą. Rezultatai buvo geresni, profilio kokybė pagerėjo, tačiau gyliai vis tiek neatsikartojo (33 pav).

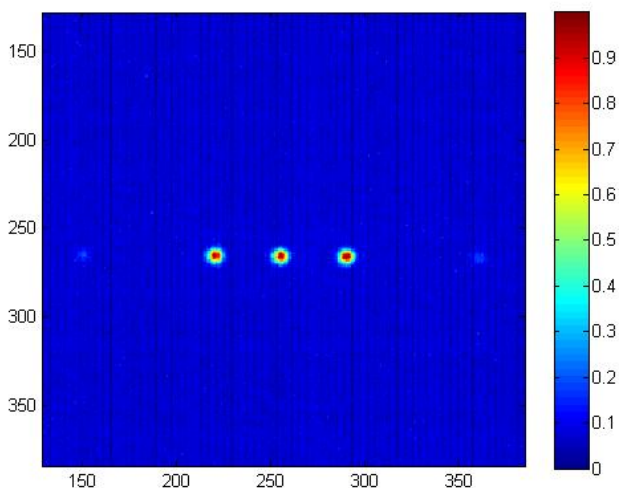


32 pav. BK7 stiklo išėsdinto gylio priklausomybė nuo laiko



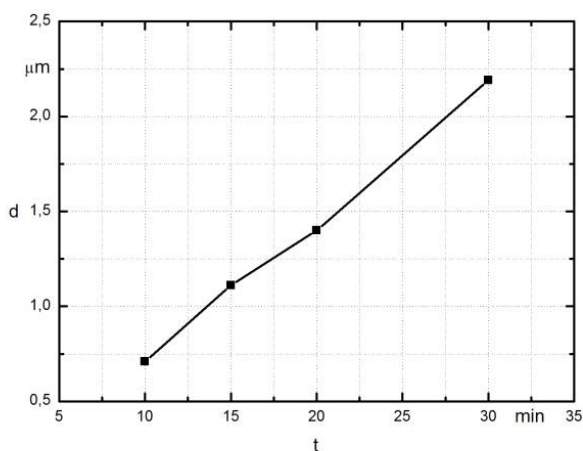
33 pav. Išėsdintų skirtingose rūgštyse profilių palyginimas. Raudona spalva - 4% HF, išėsdinta 90s; juoda spalva – BOF, išėsdinta 6 min

Geresnei kokybei buvo naudotas fotorezistas II. Išsėdinto profilio griovelio kraštai tapo statesni, tačiau ėsdinimo gylis vis tiek neatsikartojo. Nors naudojant BK7 stiklą suformuoti pluošto daliklį yra įmanoma (bet padalinto pluošto intensyvumai nebus vienodi) (34 pav), tačiau sunku nustatyti ėsdinimo laiką, per kurį bus pasiektas tinkamo gylio reljefas. Todėl nuspręsta, jog BK7 netinka mikroreljefų formavimui ir pereita prie UVFS stiklų.

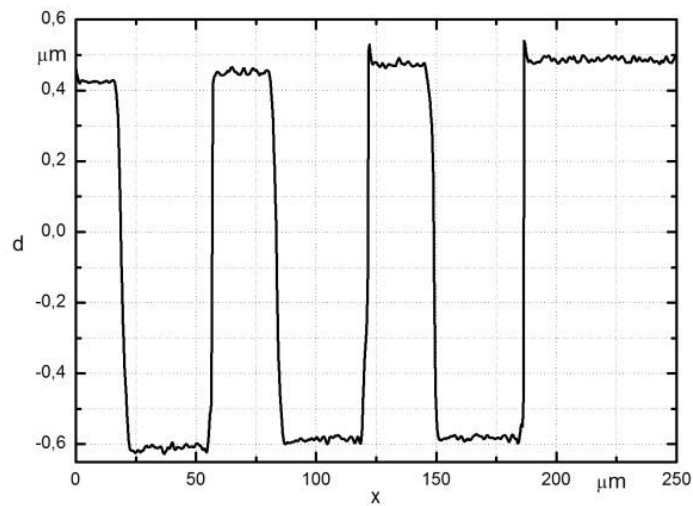


34 pav. BK7 stikle suformuoto 1×3 pluošto daliklio pluošto skirstinys

Atlikus eksperimentus su UVFS stiklais, nustatyta tiesinė išsėdinto gylio priklausomybė nuo ėsdinimo laiko (35 pav). Taip pat nebuvo pastebėta fotorezisto atsilupimo nuo stiklo padėklo požymių. Gautas status išsėdintos srities profilis (36 pav).

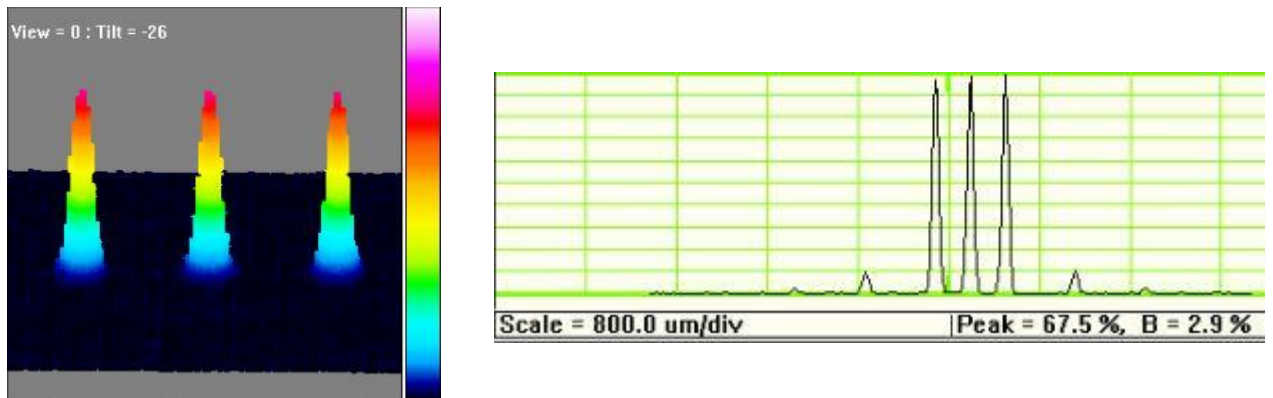


35 pav. Tiesioginė UVFS stiklo ėsdinimo gylio priklausomybė nuo ėsdinimo laiko



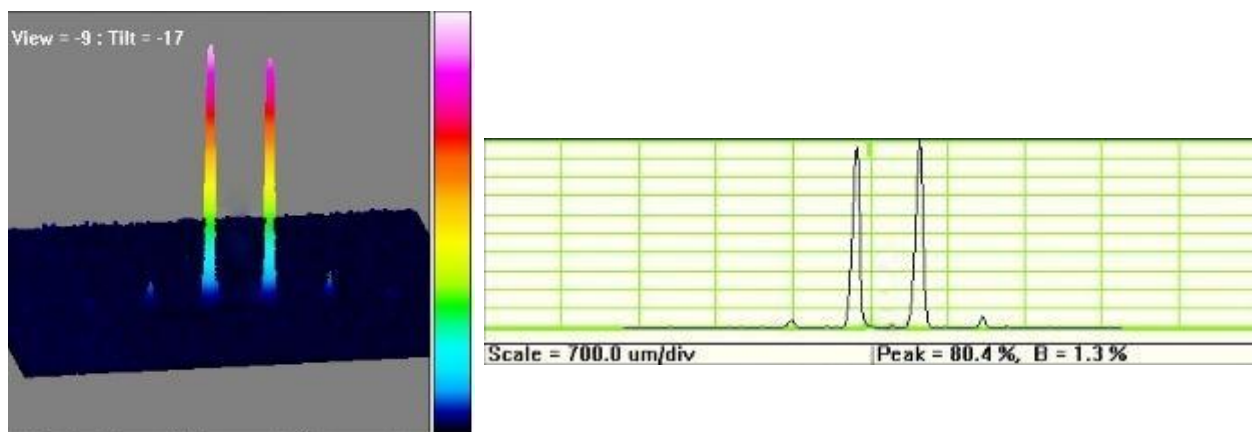
36 pav. Išėsdinto UVFS stiklo profilis. Naudojant BOF ir fotorezistą II gaunami statūs profilio kraštai

Dėl geros ėsdinimo kokybės ir atsikartojamumo galima suformuoti pluošto daliklį, kuris pluoštą dalintų į tris vienodo intensyvumo pluoštelius (37 pav). Tam, kad būtų sumažinti nereikalingi atspindžiai, pluošto daliklis buvo padengtas skaidrinančia danga.



37 pav. UVFS stikle suformuoto pluošto daliklio skirstinys ir erdvinis pjūvis

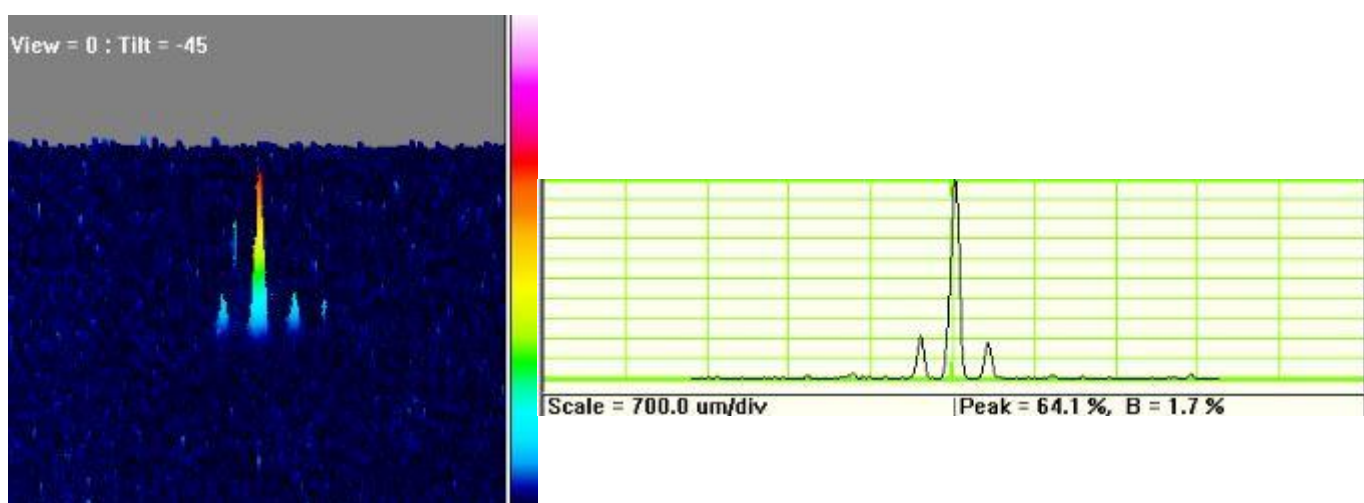
Naudojantis rastais parametrais buvo suformuotas dar vienas bandomasis pluošto daliklis (bandomiems elementams naudojamas borosilikatinis ROTH stiklas), kuris pluoštą dalintų į dvi dalis t.y. nulinės eilės maksimumas būtų lygus nuliui, o ± 1 eilės maksimumai turėtų didžiausią vertę. Daliklis formuojamas 1030 nm spinduliuotei, pirmos eilės atsilenkimo kampas – $0,06^\circ$. Naudotas II fotorezistas, BOF rūgštis. Ėsdinimo laikas – 14 min 35s.



38 pav. Borosilikatiniame (ROTH) stikle suformuoto 1×2 pluošto daliklio skirstinys ir erdvinis pjūvis

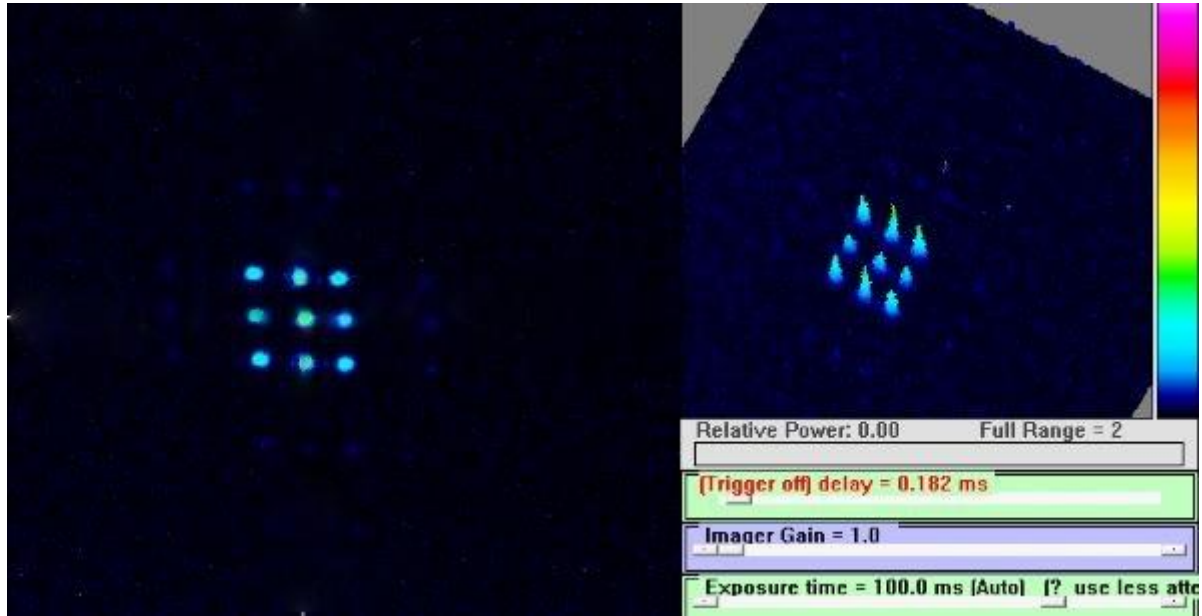
Tokio daliklio bendras efektyvumas $\approx 78\%$. Matosi aiškūs ± 1 eilės maksimumai, ± 2 eilės maksimumai lygūs nuliui, o ± 3 ir ± 5 eilės maksimumų efektyvumai atitinkamai $\approx 10\%$ ir $\approx 4\%$.

Naudojantis įgytomis žiniomis buvo suformuotas dar vienas difrakcinis elementas – pluošto bandiklis. Šio elemento 0 eilės maksimumo efektyvumas $\approx 95\%$, o ± 1 eilės maksimumų $\approx 4\%$. Atsilenkimo kampas tarp 0 ir 1 eilės maksimumų – $0,06^\circ$.



39 pav. Pluošto bandiklio, suformuoto borosilikatiniame (ROTH) stikle pluoštų skirstinys ir erdvinis pjūvis

Su naudojama technologija ant stiklo paviršiaus yra sudėtinga suformuoti $M \times N$ pluoštų daliklį. Tačiau įmanoma tokį išsidėstymą pasiekti sudėjus du difrakcinius daliklius vienas kitam statmena kryptimi. Tokio „sukryžiuomo“ trūkumai: didelis jautrumas elementų išdėstymui vienas kito atžvilgiu (jei vienas elementas nebus statmenas kitam, pluoštai pasislinks vienas kito atžvilgiu ir pan.), didelė priklausomybė nuo išėdintų profilių (jei pluoštas dėl profilio padalinamas netolygiai, tai atsikartos praėjus kitą daliklį, atsiras pašalinių maksimumų).



40 pav. 6×6 pluošto daliklis suformuotas sukryžiuvus du 1×3 pluošto daliklius

5. Pagrindiniai rezultatai ir išvados

1. Naudojant tiesioginę fotorezisto I apšvietimą lazerio spinduliuote ir naudojant HF rūgštį ant borosilikatinio (ROTH) stiklo galima suformuoti 1×3 pluošto daliklį, kurio efektyvumas viršija 70%.
2. Lazerio spinduliuote eksponuojant fotorezisto I sluoksnį, esantį ant BK7 stiklo, ir paveikus stiklą fluoro rūgštimi, galima suformuoti 1×3 pluošto daliklį, kurio efektyvumas siekia 70%. Tačiau, bandinius paruošus identiškomis sąlygomis, išsėdinti dariniai skiriasi, dėl to šis stiklas nėra tinkamas mikroreljefų formavimui.
3. Fotorezistu I padengtą bandinį kambario temperatūroje laikant ilgiau nei 15 min fluoro rūgštyje, kurios koncentracija 4%, stebimas fotorezisto sluoksnio kokybės pablogėjimas, pasireiškiantis daliniu sluoksnio atkibimu nuo borosilikatinio (ROTH) stiklo paviršiaus.
4. Nustatyta, jog pakeitus fluoro rūgštį buferine fluoro rūgštimi (BOF), galima pasiekti geresnę išsėdinimo kokybę bei tiksliau valdyti išsėdinimo spartą borosilikatiniame (ROTH) bei lydyto kvarco stikle.
5. Naudojant buferinę fluoro rūgštį ir fotorezistą II galima suformuoti daliklį ant lydyto kvarco stiklo, kurio efektyvumas viršija 70%, taip pat pluošto bandiklį ant borosilikatinio (ROTH) stiklo, kurio efektyvumas didesnis nei 95%. Paruošus bandinius identiškomis sąlygomis, išsėdinti dariniai atsikartoja, todėl šie stiklai yra tinkami mikroreljefų formavimui.

Literatūros sąrašas

1. F. Wyrowski, *Diffractive optical elements: iterative calculation of quantized, blazed phase structures*. Journal of the Optical Society of America A. **7**(6): p. 961-969, 1990.
2. J.J. Clair and C.I. Abitbol, *II Recent Advances in Phase Profiles Generation*, in *Progress in Optics*, E. Wolf, Editor. 1978, Elsevier. p. 71-117.
3. L. d'Auria, J.P. Huignard, A.M. Roy, and E. Spitz, *Photolithographic fabrication of thin film lenses*. Optics Communications. **5**(4): p. 232-235, 1972.
4. V.A. Šalna, *Optika*. 2004, Vilnius: Enciklopedija. 272.
5. S.N. Toma, A. Alexandrescu, D. Cristea, R. Muller, M. Kusko, N. Dumbravescu, V. Nascov, and D. Cojoc. *Binary phase reflective diffractive optical elements. Design and fabrication. in Semiconductor Conference, 2004. CAS 2004 Proceedings. 2004 International*. 2004.
6. G.J. Swanson and L. Laboratory, *Binary optics technology: the theory and design of multi-level diffractive optical elements*. 1989: Massachusetts Institute of Technology, Lincoln Laboratory.
7. E.R. Dufresne and D.G. Grier, *Optical tweezer arrays and optical substrates created with diffractive optics*. Review of Scientific Instruments. **69**(5): p. 1974-1977, 1998.
8. M.J. Padgett, J. Molloy, and D. McGloin, *Optical Tweezers: Methods and Applications*. 2010: CRC Press.
9. S. Rung, J. Barth, and R. Hellmann, *Characterization of Laser Beam Shaping Optics Based on Their Ablation Geometry of Thin Films*. Micromachines. **5**(4): p. 943, 2014.
10. M. Ciofini, A. Lapucci, and S. Lolli, *Diffractive optical components for high power laser beam sampling*. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. **5**(3): p. 186, 2003.
11. M.D. Himel, R.E. Hutchins, J.C. Colvin, M.K. Poutous, A.D. Kathman, and A.S. Fedor. *Design and fabrication of customized illumination patterns for low-kl lithography: a diffractive approach*. 2001.
12. T.S. D. O'Shea, A. Kathman, D. Prather, *Diffracting Light*, in *Spie Newsroom*. 2001.
13. D. Faklis and G.M. Morris, *Spectral properties of multiorder diffractive lenses*. Applied Optics. **34**(14): p. 2462-2468, 1995.
14. M.A. Golub, *Laser Beam Splitting by Diffractive Optics*. Optics and Photonics News. **15**(2): p. 36-41, 2004.
15. D.C. O'Shea and S.o.P.-o.I. Engineers, *Diffractive Optics: Design, Fabrication, and Test*. 2004: Society of Photo Optical.
16. C. Palmer, *Diffraction Grating Handbook*. 2002, NY: Richardson Grating Laboratory Rochester.
17. T.T. Saito, *Diamond Turning of Optics: The Past, the Present, and the Exciting Future*. Optical Engineering. **17**(6): p. 176570-176570-, 1978.
18. F.P. Shvartsman, *Replication of diffractive optics*. Diffractive and Miniaturized Optics, SPIE Press. **CR49**: p. 117-137, 1993.
19. R.C. Enger and S.K. Case, *Optical elements with ultrahigh spatial-frequency surface corrugations*. Applied Optics. **22**(20): p. 3220-3228, 1983.
20. W. Däschner, P. Long, M. Larsson, and S.H. Lee, *Fabrication of diffractive optical elements using a single optical exposure with a gray level mask*. Journal of Vacuum Science & Technology B. **13**(6): p. 2729-2731, 1995.
21. T.J. Suleski and D.C. O'Shea, *Gray-scale masks for diffractive-optics fabrication: I. Commercial slide imagers*. Applied Optics. **34**(32): p. 7507-7517, 1995.
22. M. Okai, S. Tsuji, N. Chinone, and T. Harada, *Novel method to fabricate corrugation for a $\lambda/4$ -shifted distributed feedback laser using a grating photomask*. Applied Physics Letters. **55**(5): p. 415-417, 1989.

23. D.M. Tennant, K.F. Dreyer, K. Feder, R.P. Gnall, T.L. Koch, U. Koren, B.I. Miller, C. Vartuli, and M.G. Young, *Advances in near field holographic grating mask technology*. Journal of Vacuum Science & Technology B. **12**(6): p. 3689-3694, 1994.
24. J.E. Jureller, H.Y. Kim, and N.F. Scherer, *Stochastic scanning multiphoton multifocal microscopy*. Optics Express. **14**(8): p. 3406-3414, 2006.
25. M. Bril, *Fractional Laser Skin Treatment Using Diffractive Optics*. Biophotonics. **3**, 2010.
26. M. Bril, *Laser perforation. The Diffractive Beamsplitter Advantage*, in *Photonics handbook*.
27. J. Schmidt, F. Durst, R. Völkel, W. Stork, J.T. Sheridan, J. Schwider, and N. Streibl, *Diffractive beam splitter for laser Doppler velocimetry*. Optics Letters. **17**(17): p. 1240-1242, 1992.
28. T. Kondo, S. Matsuo, S. Juodkazis, and H. Misawa, *Femtosecond laser interference technique with diffractive beam splitter for fabrication of three-dimensional photonic crystals*. Applied Physics Letters. **79**(6): p. 725-727, 2001.
29. A.T. J. Bovatsek, R. Patel, *High-quality, high-speed micromachining with short pulse lasers*. Industrial laser solutions. **27**(5), 2012.
30. T. Diepold and E. Obermeier, *Smoothing of ultrasonically drilled holes in borosilicate glass by wet chemical etching*. Journal of Micromechanics and Microengineering. **6**(1): p. 29, 1996.
31. P.J. Slikkerveer, P.C.P. Bouten, and F.C.M. de Haas, *High quality mechanical etching of brittle materials by powder blasting*. Sensors and Actuators A: Physical. **85**(1-3): p. 296-303, 2000.
32. J. Bhardwaj, H. Ashraf, and A. McQuarrie. *Dry silicon etching for MEMS*. in *Proc. Symp. Microstructures and Microfabricated Systems, ECS*. 1997.
33. C. Iliescu, *Wet etching of glass*. Semiconductor conference. **1**: p. 34-44, 2005.
34. J.J. C. Iliescu, E.H, Tay, *Characterization of masking layers for deep wet etching of glass in an improved HF/HCl solution*. Surface and Coatings Technology. **198**: p. 314-318, 2005.
35. Y. Shimotsuma, P.G. Kazansky, J. Qiu, and K. Hirao, *Self-Organized Nanogratings in Glass Irradiated by Ultrashort Light Pulses*. Physical Review Letters. **91**(24): p. 247405, 2003.
36. R. Drevinskas, M. Gecevicius, M. Beresna, Y. Bellouard, and P.G. Kazansky, *Tailored surface birefringence by femtosecond laser assisted wet etching*. Opt Express. **23**(2): p. 1428-37, 2015.
37. C. Vass, K. Osvay, and B. Hopp, *Fabrication of 150 nm period grating in fusedsilica by two-beam interferometric laser induced backside wet etching method*. Optics Express. **14**(18): p. 8354-8359, 2006.
38. ROTH, *Labware.Life science.Chemicals*. 2015.
39. S. Matsuo, H. Sumi, S. Kiyama, T. Tomita, and S. Hashimoto, *Femtosecond laser-assisted etching of Pyrex glass with aqueous solution of KOH*. Applied Surface Science. **255**(24): p. 9758-9760, 2009.
40. M. Shikida, K. Sato, K. Tokoro, and D. Uchikawa, *Differences in anisotropic etching properties of KOH and TMAH solutions*. Sensors and Actuators A: Physical. **80**(2): p. 179-188, 2000.
41. S. Wolf and R.N. Tauber, *Silicon Processing for the VLSI Era: Process technology*. 2000: Lattice Press.

Eglė Krištopavičiūtė

DIFRAKCINIŲ OPTINIŲ ELEMENTŲ FORMAVIMAS STIKLO PAVIRŠIUJE

Santrauka

Difrakciniai optiniai elementai (DOE) – tai faziniai elementai, kurie dėl difrakcijos ir interferencijos gali keisti šviesos pluošto pasiskirstymą. Tam, kad sukurti šį pokytį, ant elemento paviršiaus yra formuojamas tam tikras reljefas, dėl kurio galima efektyviai padalinti ar kitaip formuoti pluoštą.

Šiame darbe yra aptariama kaip yra apskaičiuojami tokie elementų reljefai bei parodoma, kaip pagaminti tokius difrakcinius optinius elementus naudojant tiesioginio įrašymo fotolitografijos metodą. Naudojant fotorezistą I ir fluoro rūgštį ant borosilikatinio (ROTH) stiklo buvo pagamintas 1×3 pluošto daliklis, kurio efektyvumas - daugiau nei 70%. Pakeitus borosilikatinį stiklą kitu BK7 stiklu pastebėta, jog naudojant tas pačias gamybos sąlygas, tokio stiklo ėsdinimasis yra netolygus. Norint pagerinti ėsdinimo spartą, buvo panaudotas fotorezistas II ir buferinė fluoro rūgštis (BOF). Nors naudojant šias medžiagas išėsdinti reljefo profiliai pasižymėjo geresne kokybe, tačiau išėsdintų struktūrų gylyai vis dar neatsikartojo, todėl pereita prie lydyto kvarco (UVFS) stiklo. Paruošus tomis pačiomis sąlygomis bandinius ant lydyto kvarco stiklo, ėsdinimo gylyai atsikartoja, todėl buvo įmanoma ant šio stiklo suformuoti 1×3 pluošto daliklį (efektyvumas – daugiau nei 70%). Naudojant fotorezistą II, BOF rūgštį bei borosilikatinį (ROTH) stiklą, pastebėtas tolygus stiklo ėsdinimasis, todėl buvo suformuotas 1×2 pluošto daliklis (efektyvumas – viršija 78%) bei pluošto bandiklis (efektyvumas – daugiau nei 95%).

Egle Kristopaviciute

FABRICATION OF DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENTS ON A GLASS SURFACE

Summary

Diffractive optical elements (DOE) are phase elements that operate by means of interference and diffraction to produce arbitrary distributions of light or to aid in the design of optical systems. Due to the special element profile design, DOE effectively shape and split laser beams.

In this work it is discussed how to calculate such elements profiles and is shown how to fabricate diffractive optical elements by the direct laser writing photolithographical method. Using photoresist I and HF acid a beam splitter (1×3) was made on borosilicate (ROTH) glass. The efficiency of such element was more than 70%. This fabrication method was used on BK7 glass, but glass etching rate was irregular, so another photoresist II and BOF acid was chosen. Although the etched glass profile had better quality than using HF and photoresist I, results were still not suitable for high efficiency DOE fabrication, therefore, BK7 glass was replaced with UVFS glass. Under the same conditions UVFS samples exhibited were much more repeatable. In this way, it was possible to produce high efficiency (more than 70%) 1×3 beam splitter. Also, photoresist II and BOF were tried on borosilicate (ROTH) glass, which also exhibited repeatable results, and enabled the fabrication of 1×2 beam splitter (efficiency - more than 78%) and beam sampler (efficiency - more than 95%) .

Padėka

Norėčiau nuoširdžiai padėkoti Andriui N., Titui T. ir Vytautui P. už pagalbą, atsakymus į klausimus ir palaikymą!