Vilniaus universiteto

Fizikos fakulteto

Fotonikos ir nanotechnologijų institutas

Augustinas Karvelis

TERAHERCINIŲ DIFRAKCINIŲ ELEMENTŲ IR JŲ KOMBINACIJŲ SU METAMEDŽIAGOMIS SAVYBIŲ MODELIAVIMAS

Bakalauro studijų baigiamasis darbas

Energetikos fizikos

studijų programa

Studentas Augustinas Karvelis

Leista ginti 2019-05-23

Darbo vadovas Dr. Linas Minkevičius

Instituto atstovas doc. Tadas Malinauskas

Vilnius 2019

Turinys

Įvadas....4
Tikslas ir uždaviniai....6
1. Literatūros apžvalga....7
1.1 Šviesos difrakcija....7
1.1.1 Frenelio difrakcija....7
1.1.2 Fraunhoferio difrakcija....7
1.1.3 Difrakcinė gardelė....8
1.2 Difrakciniai elementai THz spinduliuotės fokusavimui....8
1.2.1 Metalinė zoninė plokštelė....8
1.2.2 Fazinės zoninės plokštelės....9
1.2.3 Bifokalinės fazinės plokštelės....9
1.3 Paviršinių metamedžiagų naudojimas difrakcinių elementų gamyboje....10
1.3.1 Metamedžiagų naudojimas absorbuojant THz spinduliuotę....11
1.3.2 Metamedžiagų naudojimas filtruojant THz spinduliuotę....12
2. Modeliavimo metodika....13
2.1 Programinės įrangos pasirinkimas....13
2.2 Baigtinių integracijų laiko skalėje metodas – FIT (angl. *Finite Integration Technique*)....13
2.3 Baigtinių integracijų dažnių juostoje metodas – FDS (angl. *Frequency domain solver*)....14
3. Modeliavimų rezultatai....15
3.1 Žiedo formos metamedžiagų difrakcinis elementas, fokusuojantis 0.6 THz spinduliuotę....15
3.2 Fokusavimo efektyvumo priklausomybė nuo padėklo storio *h* ties 0.6 THz....16
3.3 Fokusavimo efektyvumo priklausomybė nuo metamedžiagų išdėstymo periodo *T*....17
3.4 Fokusavimo efektyvumo priklausomybė nuo žiedo formos metamedžiagos storio, t.y. vidinio spindulio *r*....17
3.5 Fokusavimo efektyvumo priklausomybė nuo difrakcinių zonų skaičiaus *N* ir fazės kvantavimo skaičiaus *k* bei rezultatų palyginimas su metaline zonine plokštele....19
4. Bandinių gamyba....21
4.1 Fotolitografinės kaukės kūrimas ir ruošinių pasiruošimas gamybos technologijai....21
4.2 Difrakcinių elementų gamyba fotolitografijos metodu....21
5. Matavimų rezultatai....26
Išvados....31
1 Priedas. Metalinės zoninės plokštelės ir difrakcinio elemento su metamedžiagomis fokusavimo efektyvumo palyginimas, esant vienodam difrakcinių zonų skaičiui, bet skirtingam fazės kvantavimui....32

2 Priedas. Metalinės zoninės plokštelės ir difrakcinio elemento su metamedžiagomis fokusavimo efektyvumo palyginimas, esant vienodam difrakcinių zonų ir fazės kvantavimo skaičiui 33
3 Priedas. Difrakcinio elemento su metamedžiagomis elektrinio lauko pasiskirstymas *xy* ir *xz* plokštumose.....34
4 Priedas. Fotolitografinė kaukė.....34
5 Priedas. Pagamintos metalinės zoninės plokštelės vaizdas 36
6 Priedas. Konferencijos „Open Readings 2019“ pranešimo tezės.....37
Literatūros sąrašas 38
Summary 40

Įvadas

Terahercinę spinduliuotę galima išskirti iš viso spinduliuotės spektro, kadangi ji beveik nesąveikauja su tiriamąja medžiaga. Daugelyje taikymo sričių labai svarbu, kad medžiagos fizinės ir cheminės savybės po apšvitinimo liktų nepakitusios [1], taigi terahercinės spinduliuotės panaudojimo sritys labai įvairios. Ji naudojama apsaugos srityje, tiriant uždarus paketus, biomedicinoje, analizuojant audinių pokyčius, meno kūrinių autentiškumo nustatyme [2], maisto bei farmacijos pramonėje [3]. Taikant terahercinę spinduliuotę praktinėje veikloje susiduriama su iššūkiais, kuriuos reikia įveikti, siekiant plataus naudojimo visuomenėje. Didelis dėmesys skiriamas kompaktiškų THz spinduliuotės šaltinių ir detektorių kūrimui. Siekiama, kad detektoriai pasižymėtų greitaveika, plataus dažnio veikimo diapazonu, kas suteiktų potencialą THz spinduliuotės vaizdinimui realiu laiku (angl. *real-time imaging*), o taip pat kokybišku veikimu kambario temperatūroje [4]. Kitų optinės sistemos komponentų, t.y. fokusuojančių lęšių, veidrodžių, spindulio daliklių kompaktiškumas taip pat labai svarbus, bandant sumažinti visos sistemos dydį. Siekiant tai įgyvendinti naudojami nebrangūs ir santykinai paprasti technologiniai sprendimai, pavyzdžiui vietoje didžiulių parabolinių veidrodžių naudojamos fazinės zoninės plokštelės [5], tai kompaktiški fokusuojantys elementai tinkantys THz spinduliuotės valdymui [6].

Kitas būdas valdyti terahercinę spinduliuotę – panaudoti metamedžiagas, tai natūraliai gamtoje neegzistuojančios, dirbtinai sukurtos medžiagos, pasižyminčios išskirtinėmis elektromagnetinėmis savybėmis, kurios yra pritaikomos lazerių, bangolaidžių, ryšio sistemų kūrime [7], o taip pat ir teraherciniame vaizdinime, siekiant padidinti fokusavimo ir detektoriaus efektyvumą. Esminė metamedžiagų savybė – plokščiosios bangos fazinio ir grupinio greičių vektoriai gali būti skirtingų krypčių, todėl magnetinė ir elektrinė skvarba gali įgyti neigiamas reikšmes. Tokios medžiagos kuriamos iš smulkių metalinių komponentų, juos formuojant ant dielektrinių paviršių. Suformuoti dariniai gali pasižymėti išskirtinėmis fizikinėmis savybėmis: visiška sugertimi, neigiamu bei dideliu teigiamu lūžio rodikliu, netiesinei optikai būdingomis savybėmis [8,9]. Šias ypatybes galima išnaudoti visame elektromagnetinių bangų spektre, tačiau dėl terahercinės spinduliuotės skvarbos dielektrinėse medžiagose, atspindžio nuo metalų bei žemos fotonų energijos, kas užtikrina nejonizuojantį spinduliuotės poveikį, šiuo metu koncentruojamasi į šių dažnių juostą [10].

Dažniausiai spektriniame vaizdinime mus domina tik specifinės spektro linijos, todėl optiniai komponentai kuriami atsižvelgiant į specifinius taikymo poreikius. Norint užtikrinti fokusavimą su aukšta skiriamąja geba, naudojamiems optiniams elementams reikalingas didelis lūžio rodiklis bei maža absorbcija [11]. THz vaizdinime šias sąlygas sukuria specifiniai difrakciniai elementai, t.y. metalinės zoninės plokštelės, fazinės zoninės plokštelės, multifazinės zoninės plokštelės. Jų savybių skaitmeniniams modeliavimams yra taikomas baigtinių skirtumų laiko skalėje metodas. Difrakcinių

komponentų gamybos technologijoje dažniausiai naudojamos dielektrinės medžiagos, pavyzdžiui silicis, kuris pasižymi tinkamu pralaidumu ir lūžio rodikliu, kas leidžia sumažinti kuriamo elemento storį [12]. Optinės sistemos dalys gaminamos pasitelkiant pažangią tiesioginės lazerinės abliacijos technologiją [13] arba litografijos metodą [14], tai leidžia difrakcinius elementus patobulinti papildomais paviršiniais metamedžiagų dariniais. Litografijos proceso metu paviršiniai dariniai yra tiesiogiai formuojami ant fotorezisto, jį veikiant elektronų pluoštu arba pasitelkiant fotorezisto apšvitinimą ultravioletine spinduliuote, naudojant litografinę kaukę, kurią sudaro ultravioletinei spinduliuotei laidžios ir nelaidžios sritys.

Tikslas ir uždaviniai

Tikslas:

- Sukurti difrakcinių elementų dizainus, fokusuojančius 0.6 THz dažnio spinduliuotę, juos pagaminti ir eksperimentiškai ištirti jų fokusavimo charakteristikas.

Uždaviniai:

- Atlikti literatūros apžvalgą apie fokusuojančius difrakcinius elementus bei jų kombinacijas su metamedžiagomis.
- Sukurti difrakcinių elementų su metamedžiagomis bei metalinės zoninės plokštelės dizainus.
- Teoriškai ištirti sukurtų difrakcinių elementų su metamedžiagomis dizainų fokusavimo efektyvumo priklausomybę nuo:
  a) Fazės kvantavimo skaičiaus;
  b) Fokusuojančių zonų skaičiaus;
  c) Metamedžiagų dydžio;
  d) Metamedžiagų išdėstymo periodo;
  e) Padėklo storio.
- Atsižvelgiant į teorinius rezultatus fotolitografijos būdų pagaminti fokusuojančius difrakcinius elementus ir išmatuoti šių elementų fokusavimo savybes.

1. Literatūros apžvalga

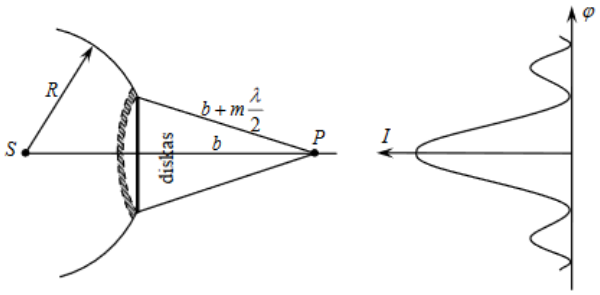
1.1 Šviesos difrakcija

Šviesa – tai elektromagnetinės bangos, kurios laisvai sklisdamos vienalytėje terpėje nekeičia geometrinės bangos fronto formos, t.y. paviršiaus, skiriančio virpesių paliestą erdvės dalį nuo erdvės, kurioje virpesiai dar neprasidėjo. Jeigu šviesos kelyje atsiranda neskaidrių kliūčių ar šviesa pereina į terpę su skirtingu lūžio rodikliu, tai bangos fronto forma pasikeičia, vyksta difrakcija – bangos užlinkimas sutikus kliūtį. Šį reiškinį paaiškina Huigenso principas, kuris teigia, kad kiekvienas aplinkos taškas, kurį pasiekia banga, yra antrinių sferinių bangų centras. Difrakcija stebima tik tada, kai kliūties matmenys yra artimi bangos ilgiui.

Optikoje išskiriami du šviesos difrakcijos atvejai – Frenelio (sferinių bangų) ir Fraunhoferio (plokščių bangų) difrakcija.

1.1.1 Frenelio difrakcija

Frenelio difrakcija yra bendresnė palyginus su Fraunhoferio difrakcija, nes difrakcinis vaizdas yra suformuojamas baigtiniu atstumu nuo kliūties, kai bangos frontas išlaiko sferinį paviršių.



1 pav. Frenelio difrakcijos pavyzdys. [15]

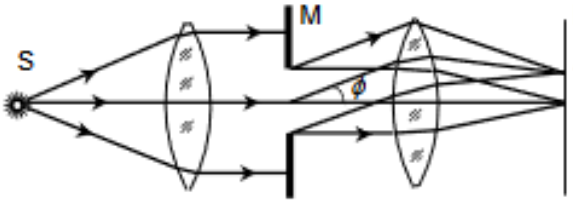
Tarkime, kad sferinė banga sutinka neskaidrią kliūtį – diską (1 pav.). Ekrane gaunamas difrakcinis vaizdas – šviesių ir tamsių koncentriškų žiedų sistema [15].

1.1.2 Fraunhoferio difrakcija

Jei atstumas tarp kliūties ir bandinio yra daug didesnis už bandinio matmenis, tai bandinį pasiekusios bangos yra artimos plokščiosioms – stebime Franhoferio difrakciją. Jos metu difrakcinis vaizdas stebimas lęšio židinio plokštumoje. Joje surenkamos plokščiosios šviesos bangos, kurias dalinai užtveria neskaidri kliūtis.

Fraunhoferio difrakcija stebima (2 pav.), kai šviesos šaltinis yra pirminio lęšio, kuris formuoja lygiagrečių spindulių pluoštą, židinio plokštumoje. Naudojamas antrasis lęšis surenka visus spindulius, kurie nukrypo nuo tiesios sklidimo krypties.

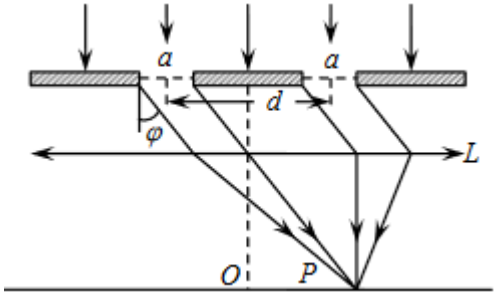
Esminis skirtumas nuo Frenelio difrakcijos, kad Fraunhoferio difrakcijos atveju stebime lygiagrečių šviesos spindulių sukeltą difrakcinį vaizdą. Ši difrakcijos rūšis ir yra dažniausiai taikoma optinėse sistemose su difrakciniais elementais.



2 pav. Fraunhoferio difrakcijos pavyzdys. [16]

1.1.3 Difrakcinė gardelė

Difrakcinę gardelę sudaro daug vienodų, vienodai nutolusių vienas nuo kito, rėžių (griovelių, plyšių, iškilimų), kurie yra išdėstyti plokščiame arba įgaubtame optiniame paviršiuje (3 pav.). Jeigu statmenai į difrakcinę gardelę krinta lygiagrečių monochromatinės šviesos spindulių pluoštas, tai pagal Huigenso principą iš gardelės visomis kryptimis išeina antrinės bangos. Tos bangos interferuos ir tam tikromis kryptimis viena kitą stiprins arba silpnins – gausime intensyvumo pasiskirstymą. Pagal atsaką į spinduliuotės poveikį difrakcinės gardelės yra skirstomos į atspindžio ir skaidriąsias. Pagal difragavusios spinduliuotės pokytį skirstomos į amplitudines, kai kintantis pralaidumo ir atspindžio koeficientas lemia bangų eigos skirtumą, bei fazines gardeles, kurios keičia spinduliuotės pluošto fazę.

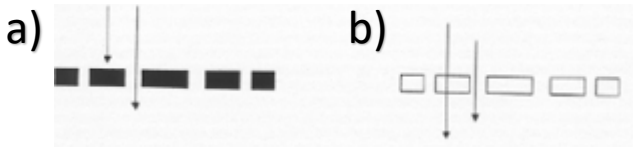


3 pav. Difrakcinė gardelė, sudaryta iš periodiškai nutolusių vienas nuo kito plyšių. [15]

1.2 Difrakciniai elementai THz spinduliuotės fokusavimui

1.2.1 Metalinė zoninė plokštelė

Difrakcinėse sistemose, kurios skirtos THz spinduliuotės fokusavimui, difrakcinis vaizdas gali būti formuojamas dviem būdais: bangų eigos skirtumu (4 a pav.) arba fazės pokyčiu difrakciniame elemente (4 b pav.) .



4 pav. Difrakcinio vaizdo formavimą lemia a) bangų eigos skirtumas, b) bangos fazės pokytis. [17]

Difrakciniai elementai gaminami iš koncentrinių laidžių bei nelaidžių žiedo formos zonų, vadinami metalinėmis zoninėmis plokštelėmis (5 pav.) [6]. Šių zoninių plokštelių kas antras žiedas yra neskaidrus krintančiai spinduliuotei, o skaidriosios zonos suformuotos taip, kad praėjusios spinduliuotės bangų eigos ilgio skirtumas būtų lygus sveikajam skaičiui. Taigi skaidriųjų zonų trikdis

tiriamajame taške dėl interferencijos yra stiprinamas. Kadangi šie difrakciniai elementai atspindi dalį krintančios spinduliuotės, tai lemia amplitudės nuostolius. Lęšio, kuris fokusuoja 250 kHz dažnio spinduliuotę 10 cm atstumu, difrakcinis efektyvumas siekia 9.46 % [18]. Šis dydis parodo, kiek optinės galios difraguoja nurodyta kryptimi lyginant su pradine optine galia.

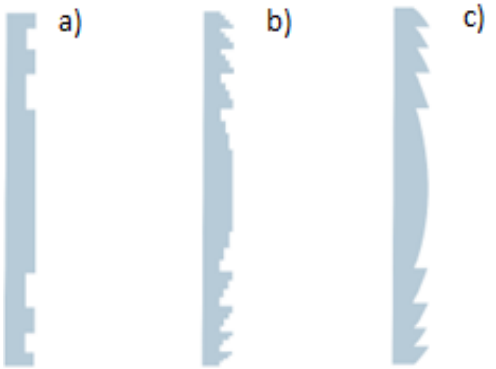


5 pav. Metalinė zoninė plokštelė. [6]

1.2.2 Fazinės zoninės plokštelės

Norint padidinti difrakcinį efektyvumą, yra gaminami difrakciniai elementai, kurie yra dalinai skaidrūs krintančiai spinduliuotei (4 b pav.), o jų veikimas pagrįstas spinduliuotės fazės pokyčiu, kuris atsiranda vėlinant vieną elektrinio lauko komponentę jai statmenos komponentės atžvilgiu.

Didesnį fazinių zoninių plokštelių difrakcinį efektyvumą, lyginant su metalinėmis zoninėmis plokštelėmis, lemia kiekvieną lyginę (arba nelyginę) zoną pereinančių spindulių fazės pokytis per pusę periodo. Tai užtikrina amplitudės padidėjimą 4l kartų, kur l – lyginių arba nelyginių zonų skaičius. Norimą fazės pokytį padeda išgauti laiptuotos struktūros kūrimas silicio paviršiuje (6 a pav. ir 6 b pav.) Teoriniais skaičiavimais apskaičiuota, kad turint pusės periodo fazinę plokštelę galima pasiekti 40.4% efektyvumą ir šis skaičius vis didėja didinant fazės pokyčio laiptelių skaičių [19]. Nustatyta, kad fazės kvantavimo skaičiui esant k = 8 yra pasiekiami geriausi rezultatai, atsižvelgiant į difrakcinio elemento gamybos laiką ir kompleksinę fazinę struktūrą. Dar didesnis fazės kvantavimo skaičius rezultatą gerina labai nežymiai [11]. Aukščiausią difrakcinį efektyvumą galima pasiekti suformavus difrakcinį elementą su idealiai tolydžiu fazės pokyčiu (angl. *Kinoform lens*). Esant tokiai struktūrai pasiekiama, kad visi difrakciniai taškai yra nukreipti į tą patį fokusuojamą tašką plokštumoje [20]. Fazinės plokštelės gaminamos apdirbant silicį tiesioginės lazerinės abliacijos būdu, naudojant sauso arba šlapio ėsdinimo metodiką bei mikrofrezavimą. Teoriniais skaičiavimais gautus rezultatus pasiekti trukdo skirtingas išabeliuotų griovelių gylis, išabeliuotos medžiagos darinių formavimasis ant elemento paviršiaus bei gamybos technologija, kuri riboja vieno fazinio laiptelio dydį [3].



6 pav. Fazinės zoninės plokštelės su skirtingais fazės keitimo lygmenimis. [12]

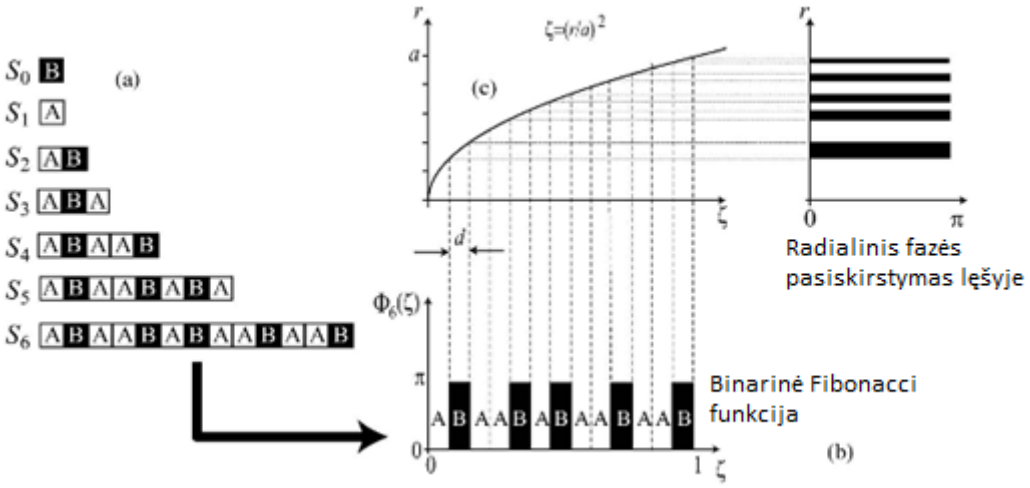
1.2.3 Bifokalinės fazinės plokštelės

Iki šios aptarti THz spinduliuotės difrakciniai elementai fokusavimą vykdo tik viename židinio nuotolyje, tačiau yra galimybė fazinę plokštelę suprojektuoti taip, kad fokusavimas vyktų dviejose židiniuose, tai vadinamieji bifokaliniai – Fibonnaci lęšiai.

Bifokalinė fazinė plokštelė yra gaminama atsižvelgiant į Fibonacci sekos taisyklę, t.y. kai *n*-tasis sekos narys yra lygus dviejų prieš jį einančių narių sumai.

Fibonacci seka apibrėžiama lygybe: $F_{n+2} = F_{n+1} + F_n$ (1) [21].

Formuojant radialinę fazinę plokštelę (7 pav.), kuri turėtų du židinius yra vadovaujamasi šia taisykle, tik *A* ir *B* yra ne skaičiai, o skirtingos fazės. Pagal tai yra sudaroma binarinė Fibonnaci funkcija.

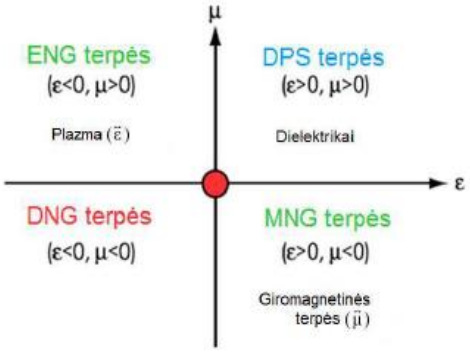


7 pav. Bifokalinio lęšio radialinės funkcijos sudarymas, remiantis Fibonnaci sekos taisykle. [22]

Kai reikalingas fokusavimas dviejose vietose optinėje ašyse, bifokalinis lęšis yra naudingesnis, lyginant su įprasta zonine plokštele, nes padeda sumažinti aberaciją regimajame diapazone, leidžia valdyti THz spinduliuotę nuolatinės veiklos režime bei išplečia sistemų naudojimą, kuriose židinio nuotolis nėra apibrėžtas, pvz.: brūkšninio kodo nuskaitymas [23].

1.3 Paviršinių metamedžiagų naudojimas difrakcinių elementų gamyboje

Kaip minėta anksčiau, metalinės zoninės bei fazinės plokštelės veikimas pagrįstas spinduliuotės bangų eigos skirtumu arba fazės pokyčiu. Kadangi THz spinduliuotė nesąveikauja su medžiaga, t.y. sklisdama per ją nepakeičia jos fizikinių bei cheminių savybių [8], o ją tik praleidžia arba atspindi, tai teisingas metamedžiagų pritaikymas padeda dar efektyviau valdyti spinduliuotės parametrus bei leidžia pasiekti didesnį detektoriaus ar fokusavimo efektyvumą. Metamedžiagos yra skirstomos į keturias grupes pagal elektrinės ir magnetinės skvarbos ženklą (8 pav.).



8 pav. Metamedžiagų skirstymas. [24]

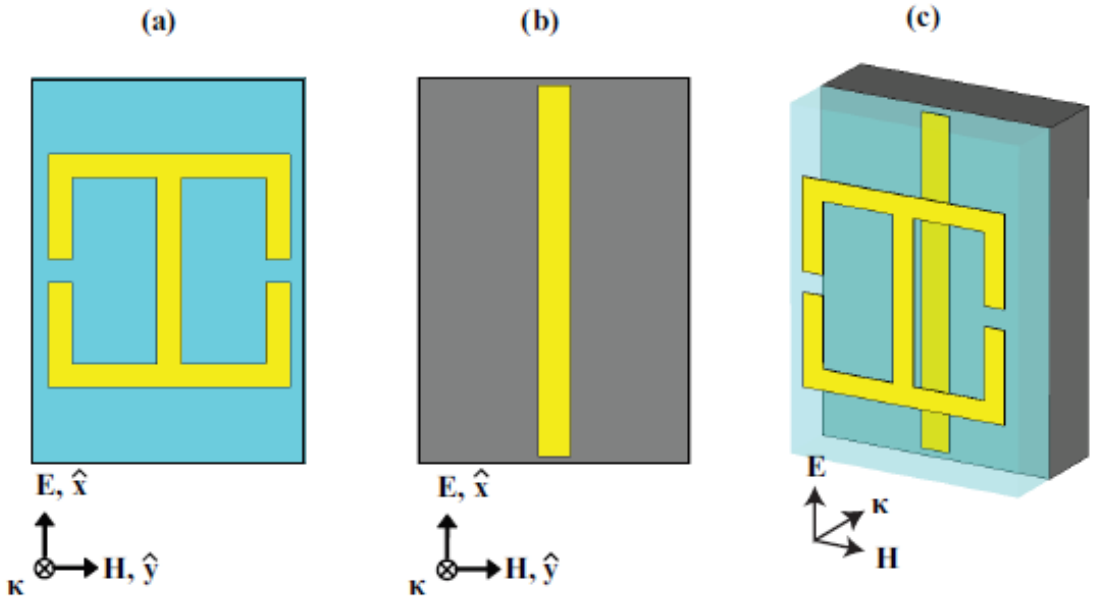
Tobulinant THz sistemas yra naudojamos skirtingos metamedžiagų klasės, kurių konfigūracijos leidžia naudoti jas kaip filtrus, sugėriklius, rezonatorius ar fazės bei amplitudės moduliatorius. Girotropinės terpės su teigiama dielektrine ir neigiama

magnetine skvarba, kurios sukasi joje sklindančios tiesiškai poliarizuotos elektromagnetinės bangos poliarizacijos plokštuma, naudojamos gaminant rezonuojančias metamedžiagas [24]. Terpių su neigiama magnetine ir elektrine skvarba savybės pritaikomos kuriant tobulus lęšius, kurie neiškraipo pro juos praeinančios spinduliuotės [25].

1.3.1 Metamedžiagų naudojimas absorbuojant THz spinduliuotę

Detektoriai, kurie naudojami vaizdinime turi atitikti šiuos pagrindinius kriterijus: didelis jautrumas spinduliuotei, greitaveika bei žemas triukšmų registravimo lygis [26]. Taikant THz spinduliuotę medicininiuose tyrimuose reikalingas ypatingas tikslumas, siekiant įvertinti ląstelių pokyčius [27], taigi labai svarbi detektoriaus skiriamoji geba. Plačiai vaizdinime paplitę mikrobolometrai sugeba gerai vaizdinti IR spinduliuotę, tačiau yra kur kas mažiau efektyvūs THz spinduliuotės vaizdinime dėl mažesnio jautrio šiame diapazone bei didelio registruojamo vieno pikselio dydžio (~30 μm), lyginant su THz spinduliuotės bangos ilgiu [26]. Šiuo atveju metamedžiagų naudojimas užtikrina aukštą sugertį bei vaizdinimą artimą difrakcijos limitui, taip pat tokiems detektoriams nėra reikalingas šaldymas, taigi jie gali būti plačiai naudojami kambario temperatūros diapazone [28]. Siekiant ypatingo tikslumo, kuriami metamedžiagų dizainai, kurie absorbuoja tik konkrečios dažnių juostos spinduliuotę.

Metamedžiagos dizainas, kuris sugeria krintančią THz spinduliuotę sudarytas iš dviejų rezonansinių dalių. Pirmoji dalis, tai sujungti du perkirpti metaliniai stačiakampiai, o antrąją sudaro atviras tiesus laidas (9 pav.).

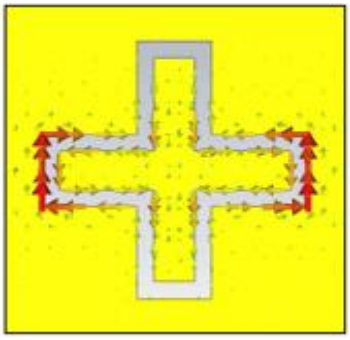


9 pav. Absorberio sandara. a) Sujungti du perkirpti metaliniai stačiakampiai, b) atviras tiesus laidas, c) sujungtos a) ir b) rezonatorių dalys, kurios perskirtos dielektriku. [8]

Rezonatorius, kuris sudarytas iš dviejų perkirptų metalinių stačiakampių, yra stipriai susietas elektriniu lauku, kuris indukuojasi priešingose kilpose. Sąveikai su magnetinio lauko dedamąja pasiekti naudojama antra rezonatoriaus dalis – atviras tiesus laidas. Magnetinė komponentė indukuojasi tiek centrinėje sujungtų stačiakampių rezonatoriaus dalyje, tiek tiesaus atviro laido srityje, taip sukurdama priešingų krypčių elektros srovę ir magnetinės skvarbos rezonansinį atsaką. Keičiant atstumą tarp rezonatoriaus dalių, t.y. koreguojant dielektrinio sluoksnio storį arba atviro laido geometriją, galima keisti magnetinės skvarbos rezonansinio atsako dažnį. Suderinus rezonansinį atsako dažnį pasiekiama, kad magnetinė ir elektrinė skvarbos yra lygios, tuomet tenkinamos suderinto impedanso sąlygos, tai ir užtikrina optimalią specifinio dažnio spinduliuotės sugertį [8].

1.3.2 Metamedžiagų naudojimas filtruojant THz spinduliuotę

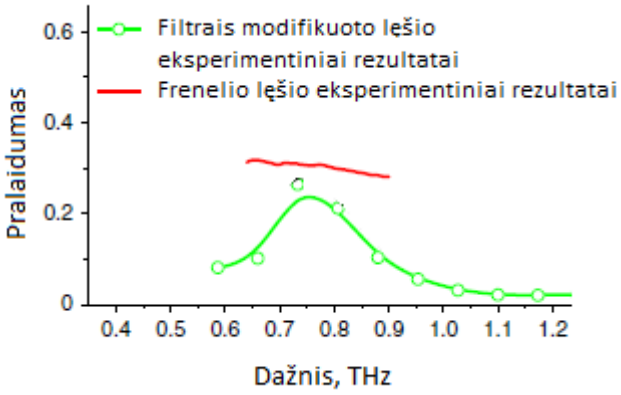
Plataus dažnio diapazono THz spinduliuotės filtravimas yra vienas esminių iššūkių, kurį gali padėti išspręsti metamedžiagos, taikant THz spinduliuotę telekomunikacijų sistemose [29]. Išorinei spinduliuotei veikiant dažniu, artimu metamedžiagos rezonansiniam dažniui, stipriai keičiasi metamedžiagos optinis pralaidumas ir atspindys, tai galime išnaudoti gaminant selektyvius metamedžiagų filtrus THz spinduliuotei.



10 pav. THz spinduliuotės metamedžiagų filtras. [30]

Vienas iš efektyvių būdų išskirti norimo dažnio THz spinduliuotę – naudoti kryžiuko formos metamedžiagas (10 pav.). Šio tipo filtrų veikimas pagrįstas apribotų modų (angl. *trapped modes*) rezonansiniu sužadinimu. Įprastai tokia metamedžiaga visą spinduliuotę atspindi, tačiau pasiekus rezonansinį šių modų sužadinimo dažnį, visa spinduliuotė yra praleidžiama [30].

Lyginant įprastą metalinę zoninę plokštelę ir zoninę plokštelę su kryžiuko formos filtrais, išryškėja pastarosios efektyvumas (11 pav.). Įprastos zoninės plokštelės pralaidumas nepriklauso nuo THz spinduliuotės dažnio (11 pav. raudona kreivė), skirtingai nei modifikuotos metamedžiagomis, kai stebime ryškią rezonansinę pralaidumo smailę (11 pav. žalia kreivė), kas užtikrina norimo dažnio spinduliuotės selektyvumą [6].



11 pav. Difrakcinių elementų pralaidumo priklausomybė nuo spinduliuotės dažnio. [6]

2. Modeliavimo metodika

2.1 Programinės įrangos pasirinkimas

Šiame darbe modeliavimams atlikti buvo naudojama CST Microwave Studio programinė įranga, kurios veikimas yra pagrįstas Maksvelo lygčių sprendimu. Skaičiavimai vyksta skaičiuojant Maksvelo lygtimis susietus ir laike kintančius elektrinius ir magnetinius laukus. Rezultatams gauti buvo panaudoti du skirtingi metodai, kurie remiasi baigtinių integracijų laiko skalėje – FIT (angl. *Finite Integration Technique*) bei dažnių juostoje *(*angl. *Frequency Domain Solver*) principais.

2.2 Baigtinių integracijų laiko skalėje metodas – FIT (angl. *Finite Integration Technique*)

Modeliuojant struktūrą laiko skalės metodu rezultatai gaunami apskaičiuojant elektromagnetinio lauko kitimą nagrinėjamame elemente atskirose vietose diskrečiais laiko momentais. Tai leidžia įvertinti energijos srautą skirtingose žadinimo vietose ar visose struktūroje. Skaičiavimai atliekami, diskretizuojant Maksvelo lygtis integralinėje formoje:

$$\oint_{\partial A} \boldsymbol{E} \cdot d\boldsymbol{s} = -\int_A \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \cdot d\boldsymbol{A} \quad (2)$$

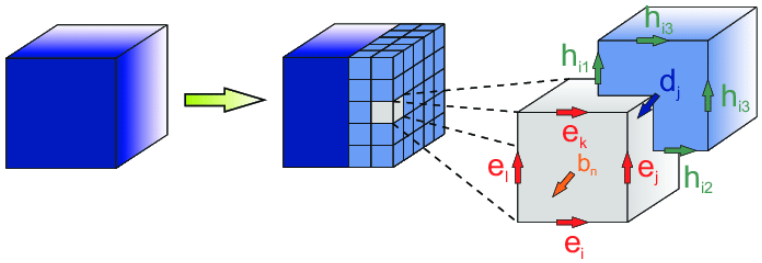
$$\oint_{\partial V} \boldsymbol{D} \cdot d\boldsymbol{A} = -\int_V \rho \cdot dV \quad (3)$$

$$\oint_{\partial A} \boldsymbol{H} \cdot d\boldsymbol{s} = -\int_A \left(\frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} + \boldsymbol{J}\right) \cdot d\boldsymbol{A} \quad (4)$$

$$\oint_{\partial V} \boldsymbol{B} \cdot d\boldsymbol{A} = 0 \quad (5)$$

čia **E** – elektrinio lauko stiprio vektorius, **s** – sritį ribojančio kontūro vektorius, **B** – magnetinio srauto vektorius, **A** – sritį ribojančio ploto vektorius, **D** – slinkties srovės vektorius, ρ – laisvųjų krūvininkų tankis, V – sritį ribojantis tūris, **H** – magnetinio lauko stiprio vektorius, **J** – laidumo srovės vektorius.

Šios lygtys yra sprendžiamos nagrinėjamą erdvę padalinant į norimą skaičių baigtinio dydžio elementų – stačiakampių ar šešiakampių (12 pav.).



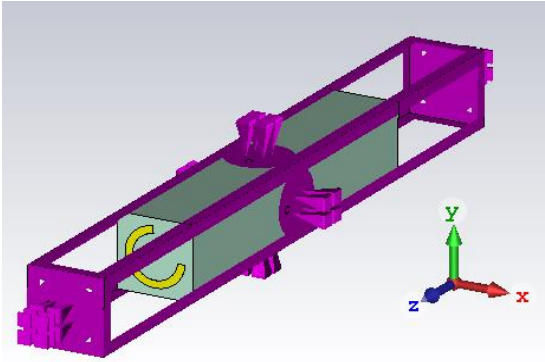
12 pav. Nagrinėjamos erdvės skirstymas į tinklelį. [31]

Baigtinių integracijų laiko skalėje metodas leidžia aprašyti elektromagnetinės bangos sąveiką su medžiaga trimačiam uždaviniui. Šio metodo privalumas, jog sprendiniai apima plačia dažnių juostą

bei gali įvertinti medžiagos netiesines savybes atlikus vos vieną skaičiavimą. Rezultatai gaunami, skaičiuojant elektrinio bei magnetinio lauko vektoriaus komponentes toje pačioje padalintoje erdvės dalyje duotuoju laiko momentu. Skaičiavimai tęsiami, kol gaunamas stabilus elektromagnetinio lauko sprendinys [32].

Taikant šį metodą, plokščia banga buvo leidžiama *z* kryptimi, kai elektrinio lauko vektorius nukreiptas *x* ašies kryptimi. Modeliuojant buvo naudojamos dviejų tipų kraštinės sąlygos (13 pav.):

a) Atviros (angl. *open*). Apibrėžia modeliavimo erdvės pabaigą ties struktūros kraštine pozicija.
b) Atviros, pridedant erdvės (angl. *open- add space*). Apibrėžia modeliavimo erdvės pabaigą ties norimu atstumu už struktūros.

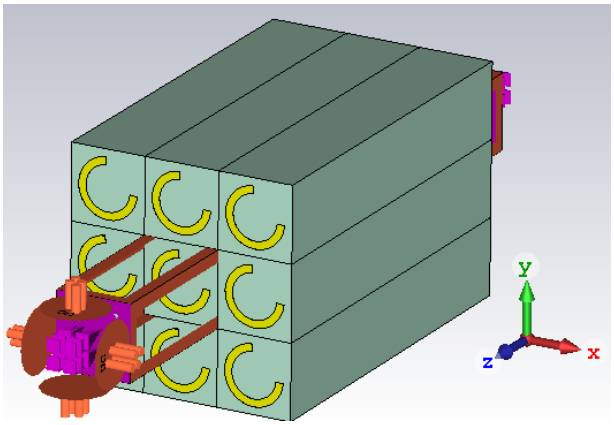


13 pav. Modeliuojamos erdvės pavyzdys. X kryptimi – atviros kraštinės sąlygos, y kryptimi – atviros kraštinės sąlygos, z kryptimi – atviros kraštinės sąlygos, pridedant erdvės.

Modeliuojant pilną difrakcinio elemento dizainą buvo apibrėžtos simetrijos ašys *x* ir *y* kryptimis. Įvertinant plokščiosios bangos kryptį, *yz* plokštumoje nustatėme magnetinio lauko vektorių **H** = 0, o *xz* kryptimi nustatėme elektrinio lauko vektorių **E** = 0. Simetrijos ašių apibrėžimas padėjo modeliuojamą uždavinį sumažinti 4 kartus.

2.3 Baigtinių integracijų dažnių juostoje metodas – FDS (angl. *Frequency domain solver*)

Naudojant baigtinių integracijų dažnių juostoje metodą, skaičiavimai yra atliekami transformavus Maksvelo lygtis į dažnių sritį. Elektromagnetinis laukas yra apibūdinamas harmonine laiko funkcija, kai lauko priklausomybė yra apibrėžiama fazoriaus, kuris apibūdina lauko kryptį, amplitudę bei fazę, ir laiko faktoriaus sandauga, ir įskaitoma tik realioji sprendinio dalis.



14 pav. Modeliuojamos erdvės pavyzdys. X ir y kryptimi – vienetinio narvelio, z kryptimi – atviros kraštinės sąlygos, pridedant erdvės.

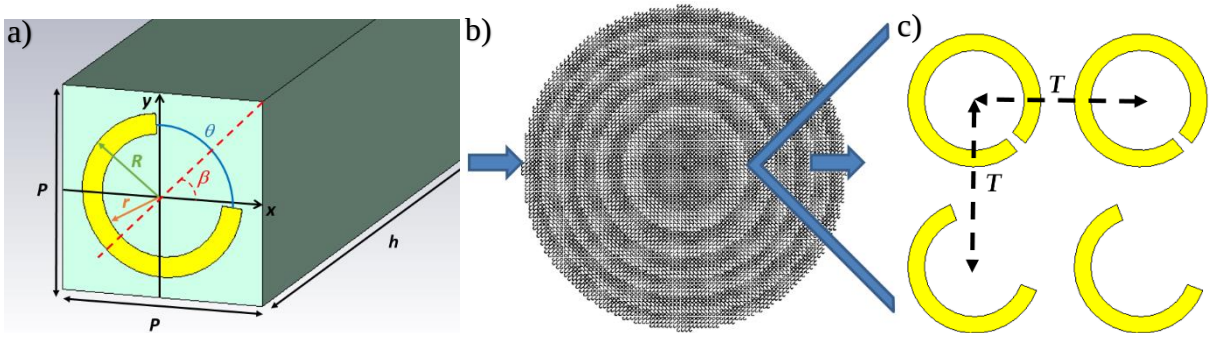
Siekiant nustatyti sukurtų elementų pralaidumo ir atspindžio koeficientus, naudojant baigtinių integracijų dažnių juostoje metodą, buvo naudojamos dviejų tipų kraštinės sąlygos (14 pav.):

a) Vienetinio narvelio (angl. *unit cell*). Jos virtualiai atkartoja modeliuojamą struktūrą dvejomis kryptimis iki begalybės.
b) Atviros, pridedant erdvės.

3. Modeliavimų rezultatai

3.1 Žiedo formos metamedžiagų difrakcinis elementas, fokusuojantis 0.6 THz spinduliuotę

Pasinaudojant metamedžiagų savybėmis, galima sukurti tokius elementus, kurie krintančios spinduliuotės fazę keistų tolygiai. Spinduliuotės fokusavimo dažnis pasirinktas atsižvelgiant į laboratorijoje turimus šaltinius. Kuriant difrakcinį elementą, panaudotas žiedo formos metamedžiagos dizainas [33]. Elemento sandara pavaizduota 15 a pav. Kiekvienas elementas sudarytas iš h storio silicio padėklo bei 0.1 μm storio žiedo formos aukso dangos su išpjova. Elemento ilgis ir plotis P, žiedo vidinės dalies spindulys r, o išorinės dalies spindulys R = 40 μm, išpjovos kampas θ kinta priklausomai nuo reikiamo fazės pokyčio ir šį kampą įstrižainė dalina pusiau, taigi β = 45°. Iš šių stačiakampių, kurie yra padengti metamedžiagomis buvo sukurtas visas difrakcinio elemento dizainas (žr. 15 b pav.), kurį sudaro periodu T (žr. 15 c pav.) išdėstytos žiedo formos su išpjova metamedžiagos. Išdėstymo periodas T (žr. 15 c pav.) yra lygus elemento pločiui ir ilgiui P.

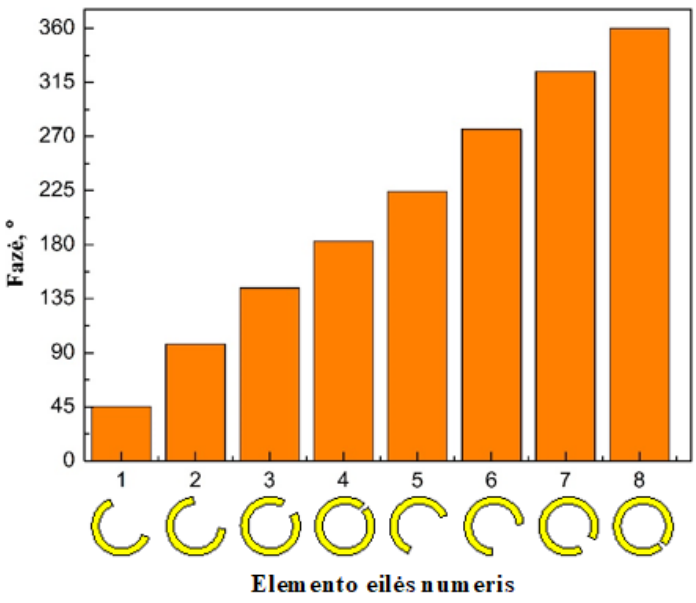


15 pav. a) Vieno elemento struktūrinė schema, b) difrakcinis elementas su metamedžiagomis, c) metamedžiagų išdėstymas lęšio paviršiuje.

Dizainui buvo sukurti aštuoni elementai, kurie keičia spinduliuotės fazę intervale 0° – 360° (16 pav.). Modeliavimai atlikti, kai silicio padėklo storis h = 500 μm, žiedo formos metamedžiagos vidinis spindulys r = 30 μm, o išdėstymo periodas T = 100 μm. Difrakcinis elementas buvo kuriamas pasinaudojant cilindrinio lęšio formule (6).

$$\varphi(x) = 2n\pi + \frac{2\pi}{\lambda}\left(f - \sqrt{f^2 + x^2}\right) \quad (6)$$

n – sveikas skaičius, λ – bangos ilgis, f– židinio nuotolis, x – pozicija koordinačių ašyje.



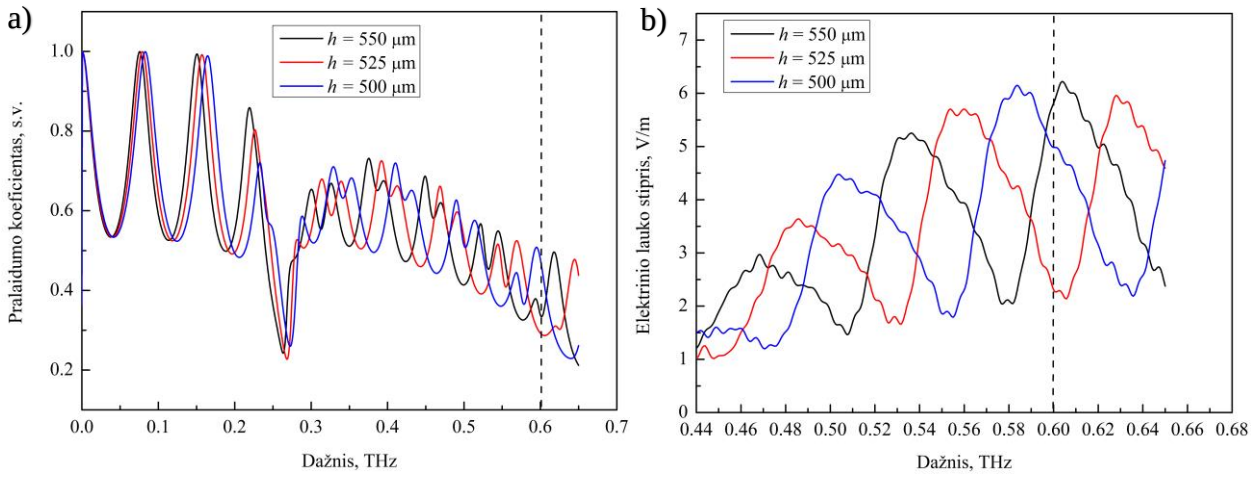
16 pav. Fazės pokytis pagal atitinkamą elementą. Pirmų keturių elementų išpjovos kampas θ atitinkamai yra lygus 132°, 100°, 35°, 10°. Likę keturi elementai, tai pirmųjų elementų veidrodiniai atspindžiai. Geltona spalva žymi aukso dangą.

Atskirų elementų išdėstymas erdvėje pagal cilindrio lęšio formulę buvo automatizuotas pasinaudojant programine galimybe aprašyti šį procesą VBA (angl. *Visual Basic for Application*) aplinkoje. Specialiai šiam uždaviniui spręsti sukurta programa išdėlioja fazinius elementus erdvėje pagal cilindrinio lęšio formulę (6), įvertindama kiekvieno elemento padėtį plokštumoje ir apskaičiuodama atstumą nuo koordinačių pradžios taško, t.y. struktūros centro, pagal kurį yra apibrėžiamas reikiamas fazės pokytis nagrinėjame taške.

Norėdami gaminti efektyviausiai 0.6 THz spinduliuotę fokusuojantį difrakcinį elementą, ištyrėme padėklo storio *h*, vidinio spindulio *r* ir metamedžiagų išdėstymo periodo *T* įtaką fokusavimo efektyvumui.

3.2 Fokusavimo efektyvumo priklausomybė nuo padėklo storio *h* ties 0.6 THz

Norėdami įvertinti silicio padėklo storio *h* įtaką fokusavimo efektyvumui atlikome modeliavimus su 500 μm, 525 μm, 550 μm storio padėklais, nustatydami pralaidumo koeficientus (žr. 17 a pav.) ir dažnines charakteristikas (žr. 17 b pav.). Difrakcinės struktūros sukurtos naudojant šiuos metamedžiagų parametrus: r = 30 μm, T = 100 μm.



17 pav. Difrakcinių elementų a) pralaidumo koeficientas, b) dažninė charakteristika, kai keičiamas padėklo storis h.

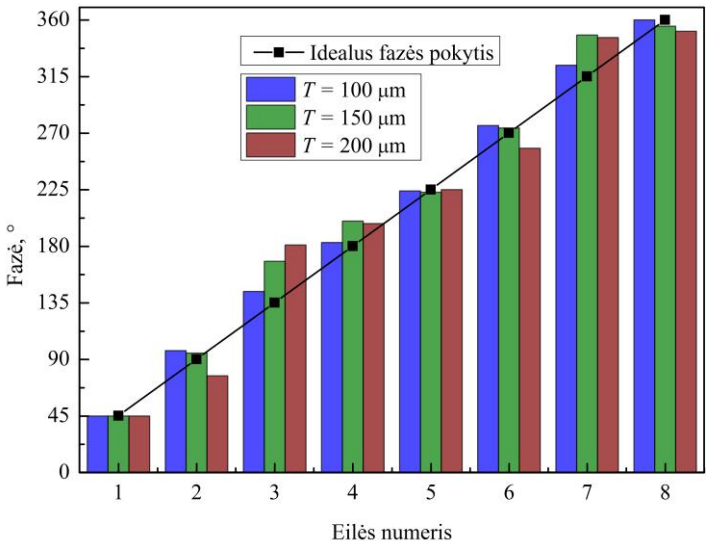
Iš 17 a pav. matome, kad naudojant 500 μm storio padėklą turime rezonansinį pralaidumo piką ties 0.595 THz, taip pat spektro pradžioje matomi Fabry Perrot rezonansai, susidarantys dėl vidinių atspindžių tarp difrakcinio elemento paviršių.

Iš 17 b pav. matome, kad nepaisant geresnio pralaidumo, kai naudojamas 500 μm silicio padėklas, geresni fokusavimo rezultatai gaunami, esant 550 μm storio padėklui. Spinduliuotei praėjus pro skirtingo storio padėklą atsiranda fazės vėlinimas, kuris lemia tašką erdvėje, kuriame susidarys interferavusių bangų maksimumas. Iš rezultatų matome, kad naudojant 550 μm storio padėklą, interferencijos maksimumas susidaro arčiau židinio nuotolio.

3.3 Fokusavimo efektyvumo priklausomybė nuo metamedžiagų išdėstymo periodo *T*

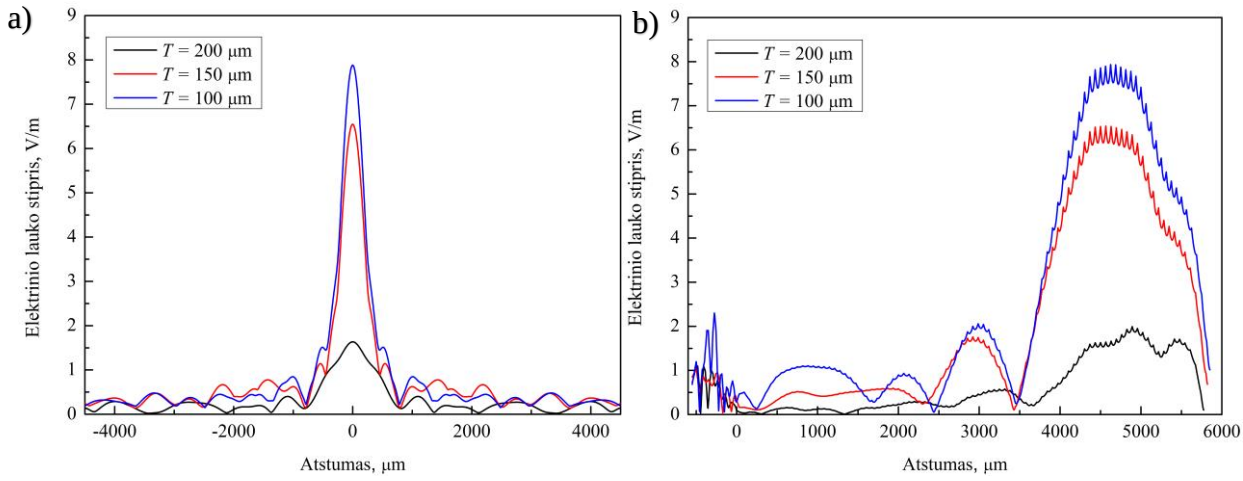
Norėdami įvertinti kokią įtaką fokusavimo efektyvumui turi metamedžiagų išdėstymo tankumas difrakciniame elemente, patikrinome ar visi elementų dizainai keičia fazę vienodai tolygiai (žr. 19 pav.).

Iš 19 pav. matome, kad didėjant metamedžiagų išdėstymo periodui fazės pokytis už elemento tolsta nuo idealaus atvejo. Taigi toks elementų išdėstymas difrakciniame elemente neužtikrina reikiamo fazės pokyčio erdvėje, kurį nustato cilindrinio lęšio formulė (6).



18 pav. Fazės pokytis pagal atitinkamą elementą, esant skirtingam metamedžiagų išdėstymo periodui. Pirmų keturių elementų išpjovos kampas θ atitinkamai yra lygus 132°, 100°, 35°, 10°. Likę keturi elementai, tai pirmųjų elementų veidrodiniai atspindžiai.

Netolygus fazės pokytis tiesiogiai lemia prastesnį difrakcinio elemento fokusavimą (žr. 19 pav.)



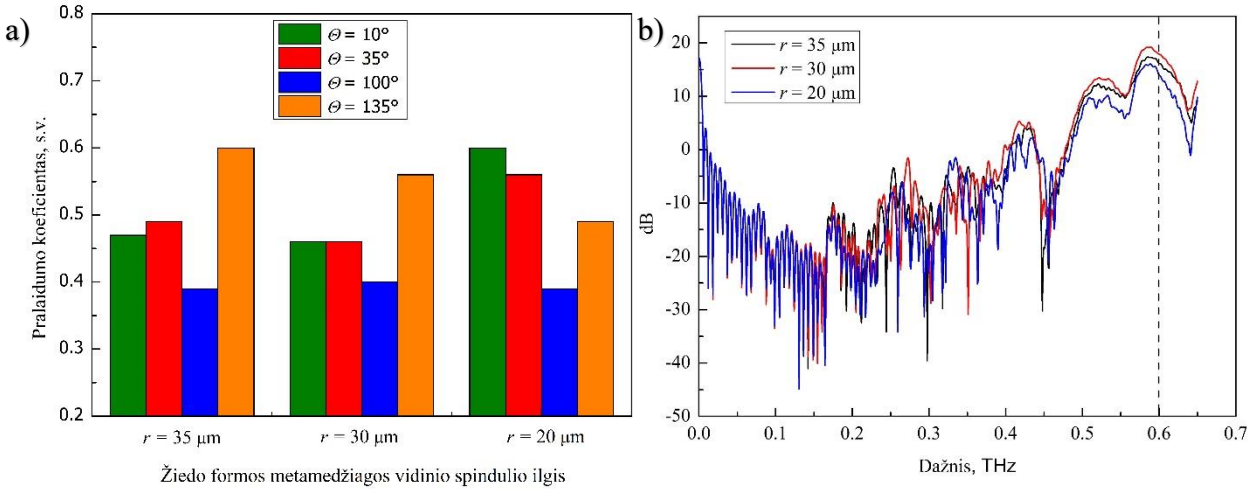
19 pav. Elektrinio lauko stiprio priklausomybė nuo atstumo a) x, b) ašimi.

3.4 Fokusavimo efektyvumo priklausomybė nuo žiedo formos metamedžiagos storio, t.y. vidinio spindulio *r*

Norėdami įvertinti fokusavimo efektyvumą nuo žiedo formos metamedžiagos vidinio spindulio, t.y. žiedo storio, pirmiausia nustatėme visų elementų pralaidumo koeficientus ties 0.6 THz. Iš 20 a pav. matome, kad besikeičiant žiedo formos metamedžiagos storiui, pralaidumo koeficientas kinta nuo išpjovos kampo *θ*, tačiau įvertinus visų elementų su skirtingais išpjovos kampais pralaidumo koeficientus, kai kinta žiedo formos metamedžiagos storis, rezultatais yra labai panašūs, kai *r* = 35

μm, r = 30 μm ir r = 20 μm, fazės keitimo elementų pralaidumo vidurkis atitinkamai lygus 0.49, 0.47 ir 0.51.

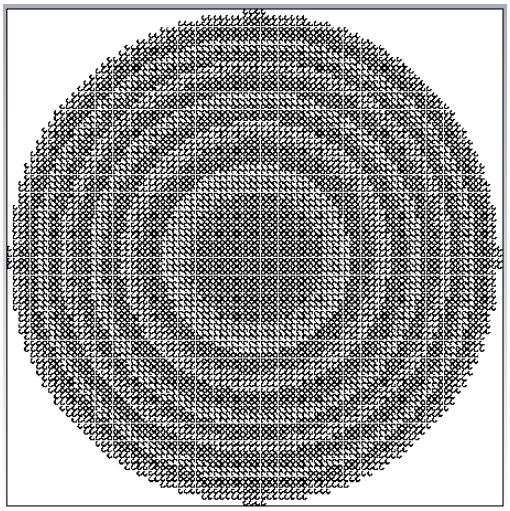
20 b pav. vaizduoja difrakcinių elementų, kurie yra sudaryti iš žiedo formos metamedžiagų su skirtingais storiais, dažnines charakteristikas. Matome, kad visi dizainai turi rezonansinę smailę artimą 0.6 THz, kai laukas stebimas tame pačiame erdvės taške – židinio nuotolyje. Taigi galime teigti, kad fokusavimo efektyvumas mažai priklauso nuo pasirinkto žiedo formos metamedžiagos storio. Rezultatų pasiskirstymą galima paaiškinti modeliavimo metodikos paklaidomis, kadangi visais atvejais, dėl skirtingo žiedo storio yra naudojamas skirtingas erdvės suskirstymas į tinklelį (angl. *mesh*).



20 pav. a) Pralaidumo koeficiento priklausomybė nuo žiedo formos metamedžiagos vidinio spindulio ilgio, b) difrakcinių elementų su skirtingais metamedžiagų vidiniais spinduliais dažninės charakteristikos.

3.5 Fokusavimo efektyvumo priklausomybė nuo difrakcinių zonų skaičiaus *N* ir fazės kvantavimo skaičiaus *k* bei rezultatų palyginimas su metaline zonine plokštele

Atsižvelgiant į ankstesnių modeliavimų rezultatus, buvo nuspręsta tolimesnius tyrimus atlikti su tokiais elemento parametrais: žiedo formos metamedžiagos vidinis spindulys r = 30 μm, padėklo storis h = 500 μm ir metamedžiagų išdėstymo periodas T = 100 μm. Šis dizainas (žr. 21 pav.) naudotas fokusavimo dėsningumams nustatyti, kai kinta kvantavimo skaičius k (k = 2, 4, 8) ir difrakcinių zonų skaičius N (N = 3, 5, 7, 9). Priklausomybė nuo kvantavimo skaičiaus modeliuota, kai N = 5, o priklausomybė nuo difrakcinių zonų skaičiaus, kai k = 8.

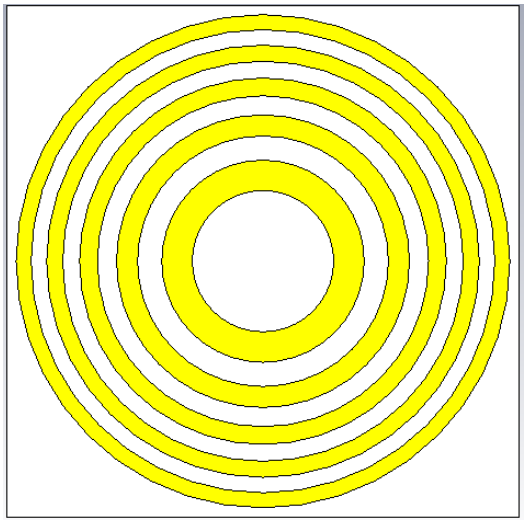


21 pav. Difrakcinio elemento su žiedo formos metamedžiagomis dizainas.

Norėdami įvertinti sukurto difrakcinio elemento su metamedžiagomis efektyvumą lyginant su kitais difrakciniai elementais, buvo sukurta metalinė zoninė plokštelė (žr. 22 pav.). Tai padaryta remiantis formule (7), kuri apibrėžia reikiamą žiedo plotį, norint židinio nuotolyje stebėti interferencijos maksimumą, kuris susidaro dėl bangų eigos skirtumo. Metalinės zoninės plokštelės silicio padėklo storis 500 μm.

$$r_n = \sqrt{n\lambda f + \frac{1}{4}n^2\lambda^2} \quad (7)$$

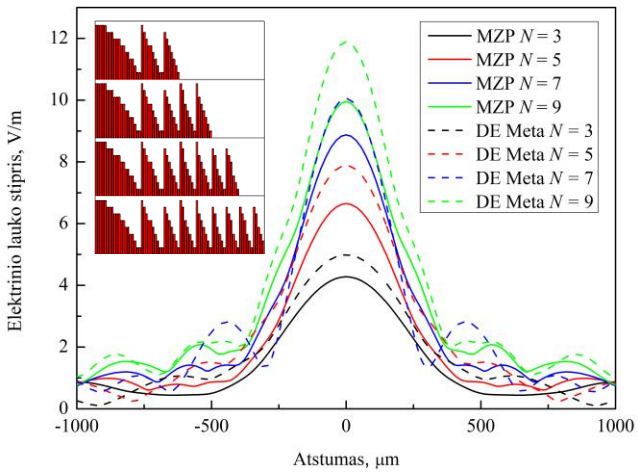
n – sveikas skaičius, λ – bangos ilgis, f – židinio nuotolis, r – žiedo plotis.



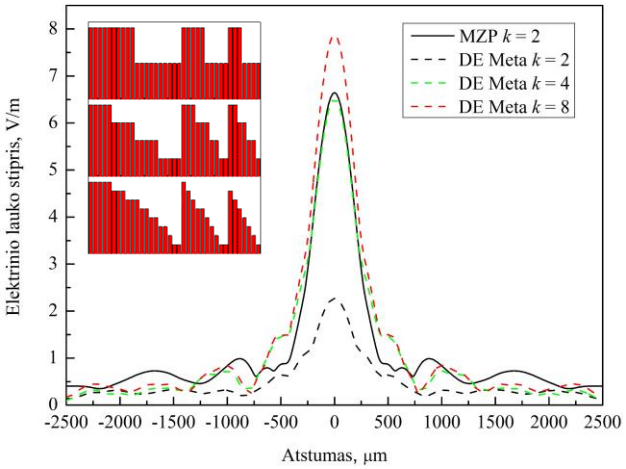
22 pav. Metalinės zoninės plokštelės dizainas.

Rezultatai palyginti dviem aspektais, kai difrakcinio elemento su metamedžiagomis ir zoninės metalinės plokštelės difrakcinių zonų skaičius N yra lygus, tačiau skiriasi fazės kvantavimo skaičius k bei šiems parametrams esant lygiems. Rezultatus vaizduoja 23 ir 24 pav. Difrakcinio elemento su metamedžiagomis fokusavimo efektyvumo priklausomybę nuo fazės kvantavimo skaičiaus k taip pat vaizduoja 24 pav., o elektrinio lauko pasiskirstymai z ašies kryptimi pavaizduoti 1 ir 2 priede. Šio dizaino elektrinio lauko pasiskirstymą 2D plokštumose, t.y. xy plokštumoje, kai ši padėtis fiksuota

židinio nuotolyje bei elektrinio lauko pasiskirstymą *xz* plokštumoje, kai fiksuota *y* koordinatė vaizduoja 3 priedas.



23 pav. Skirtingų tipų difrakcinių elementų centrinio maksimumo elektrinio lauko stiprio vertė x ašies kryptimi, esant skirtingam difrakcinių zonų skaičiui. MZP – metalinė zoninė plokštelė, kai k = 2, DE Meta – difrakcinis elementas su metamedžiagomis, kai k = 8.



24 pav. Skirtingų tipų difrakcinių elementų centrinio maksimumo elektrinio lauko stiprio vertė x ašies kryptimi, esant skirtingam fazės kvantavimui. MZP – metalinė zoninė plokštelė, DE Meta – difrakcinis elementas su metamedžiagomis. Abiejų elementų N = 5.

Nagrinėdami 23 pav. modeliavimo rezultatus matome, kad didėjantis difrakcinių zonų skaičius lemia geresnį difrakcinio elemento fokusavimą, taip pat didėjant difrakcinių zonų skaičiui stebime elektrinio lauko amplitudės įsisotinimą. Lyginant elementus, kai $N = 9$, tai difrakcinis elementas su žiedo formos metamedžiagomis 0.6 THz spinduliuotę fokusuoja apie 20 % procentų geriau negu metalinė zoninė plokštelė. Geresnį fokusavimą lemia didesnis fazės kvantavimo skaičius, kurį galime pasiekti su metamedžiagų dizainu.

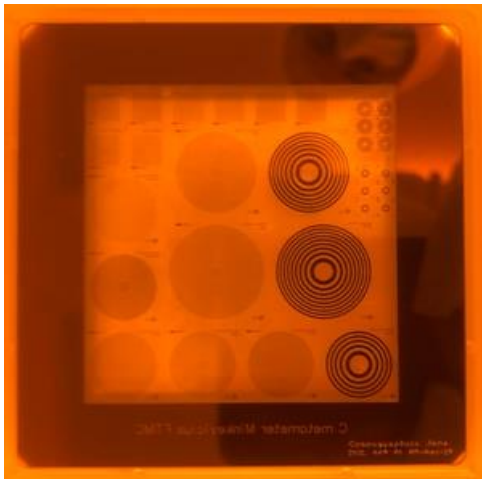
Iš 24 pav. matome, kad didėjantis fazės kvantavimo skaičius lemia geresnį difrakcinio elemento fokusavimą, be to, didėjantis fazės kvantavimas turi didesnę įtaką fokusavimo efektyvumui nei didėjantis difrakcinių zonų skaičius. Esant vienodam difrakcinių zonų ir fazės kvantavimo skaičiui metalinės zoninė plokštelė 0.6 THz spinduliuotę fokusuoja apie 2.8 karto geriau nei difrakcinis elementas su žiedo formos metamedžiagomis.

4. Bandinių gamyba

4.1 Fotolitografinės kaukės kūrimas ir ruošinių pasiruošimas gamybos technologijai

Įvertinus modeliavimo rezultatus, gamybos technologiją ir laboratorijoje turimas medžiagas buvo nuspręsta gaminti difrakcinį elementą su žiedo formos metamedžiagomis ant h = 525 μm storio silicio padėklo, kai metastruktūros vidinis spindulys r = 30 μm , o išdėstymo periodas T = 100 μm.

Fotolitografinės kaukės kūrimui buvo naudojama nemokama „KLayout“ programa. Sukurtą programinį variantą vaizduoja 4 priedas, o jau pagamintą kaukės dizainą vaizduoja 25 pav. Kaukę pagamino vokiečių kompanija „Compugraphics“. Kaukės matmenys 75 x 75 mm. Ją sudarė fazės keitimo elementai, difrakciniai elementai su žiedo formos metamedžiagomis bei metalinės zoninės plokštelės. Kaukė sudaryta iš skaidraus kvarcinio stiklo padėklo, kai ant padėklo esantys poligonai yra dengti ultravioletinei spinduliuotei nelaidžiu chromu.



25 pav. „Compugraphics“ kompanijos pagaminta fotolitografinė kaukė.

Pirmasis žingsnis bandinių gamybos procese – bandinio padėklo paruošimas. Įvertindami kuriamų struktūrų dydžius, 525 μm storio silicio padėklas buvo supjaustytas į apibrėžto dydžio kubelius, naudojant lazerinės abliacijos metodą [13]. Lazerinė abliacija – tai universalus paviršių apdirbimo būdas. Šiuo metodu galime pasiekti kelių mikrometrų tikslumą. Metodo skyrą lemia naudojamo lazerio parametrai: bangos ilgis, galia, pasikartojimo dažnis, abliacijos greitis [13]. Bandinių gamyboje naudojome silicio padėklą, kuris supjaustytas į 14.3 x 14.3 mm dydžio ruošinius. Lazerinės abliacijos metu pjaustomų ruošinių paviršius stipriai užteršiamas išabeliuota medžiaga ir kitais junginiais, kurie lieka po medžiagos šalinimo, taigi visi ruošiniai prieš gamybos technologiją buvo valomi ultragarso vonelėje, ruošinius mirkant acetone, palaikant 40 °C temperatūrą.

Difrakciniai elementai buvo gaminami fotolitografijos metodu 5 – tos švarumo klasės kambaryje (angl. *cleanroom*), Fizinių ir technologinių mokslų centre, Vilniuje.

4.2 Difrakcinių elementų gamyba fotolitografijos metodu

Fotolitografijos gamybos metodą sudaro eilė atskirų procesų, tai fotorezisto užnešimas ant padėklo, pozityvo kaitinimas, pozityvo apšvita, antrinis kaitinimas, negatyvo apšvita, ryškinimas, metalų garinimas, fotorezisto atkėlimas. Metalų garinimui buvo naudota elektronų pluošto garinimo technologija. Siekiant kokybiško rezultato buvo parametrizuojamas kiekvienas gamybos procesas.

Toliau pateikiamas detalus gamybos proceso aprašymas:

1.1 Padėklas valomas acetone, di-propanolyje, distiliuotame vandenyje, sausinamas nupučiant suslėgtu oru.

1.2 Ant silicio padėklo užnešamas fotorezistas (AZ521E) ir ruošinys sukamas 4000 aps/min greičiu 60 s.

1.3 Ruošinys kaitinamas 110 °C temperatūroje 50 s.

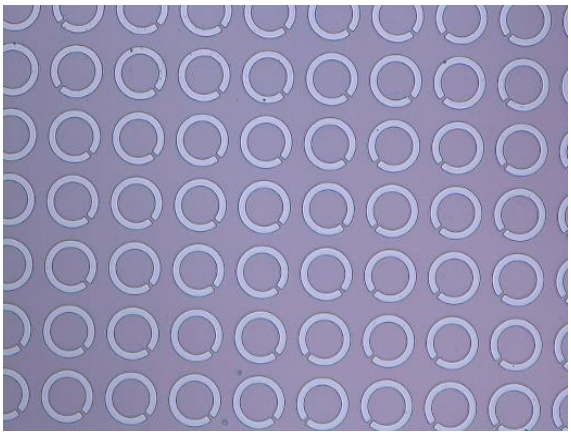
1.4 Norima struktūra iš fotolitografinės kaukės sutapatinama su silicio padėklu ir ruošinys apšviečiamas gyvsidabrio lempa 2s.

1.5 Ruošinys kaitinamas 115 °C temperatūroje 120 s.

1.6 Apšviečiamas visas ruošinys gyvsidabrio lempa 40 s.

1.7 Ryškiname, lėtai judinant ruošinį ryškalo (AZ351B), sumaišyto su distiliuotu vandeniu santykiu 1:4 tirpale 14 s.

2. Atsižvelgiant į laboratorijoje garinimui naudojamus metalus, garinimui buvo pasirinktas Ni. Bandiniai buvo užgarinti 150 nm storio Ni sluoksniu.
3. Fotorezisto atkėlimui ruošinys buvo įmerktas į fotorezisto atkėliklį (DMSO), kuris kelių sekundžių laikotarpyje sureagavo su fotorezistu ir atkėlė fotorezistu dengtas sritis.



26 pav. Suformuotų struktūrų vaizdai po ryškinimo etapo.



27 pav. Difrakcinis elementas po fotorezisto atkėlimo.

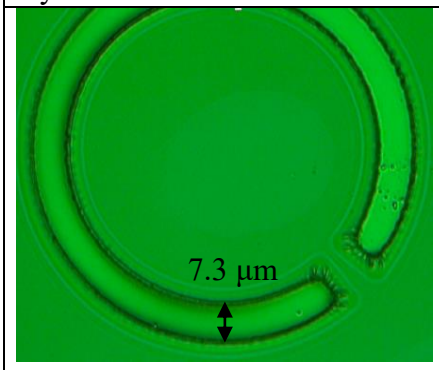
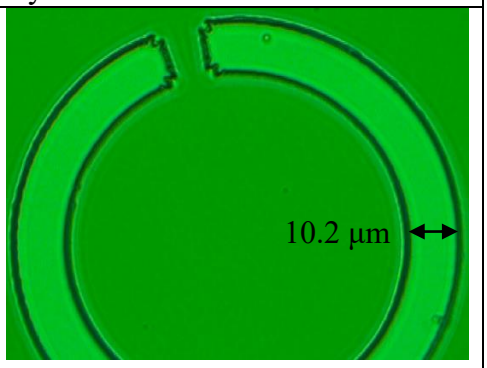
Iš 27 – ojo paveikslėlio matome, kad po fotorezisto atkėlimas buvo nesėkmingas ir suformuotos struktūros išsibarstė per visą bandinio paviršių. Atsižvelgdami į matomus rezultatus, suformulavome dvi galimas priežastis, lėmusias prastus fotolitografijos rezultatus:

a) Fotorezisto likučiai po ryškinimo metastruktūrų vietose, kas lėmė staigų DMSO poveikį ir užgarinto metalo atkėlimą.
b) Silpna užgarinto Ni ir Si adhezija.

Kartodami visą fotolitografijos procesą, atlikome pakeitimus, kurie galėjo lemti prastus pirmuoju gamybos etapu gautus rezultatus. Keitėme pozityvo apšvitos trukmę, antrinio sukaitinimo

temperatūrą ir ryškinimo trukmę, kitų procesų parametrai liko nepakitę. Rezultatus vaizduoja 1 – oji ir 2 – oji lentelė.

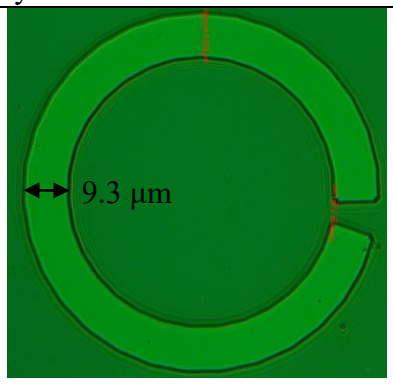
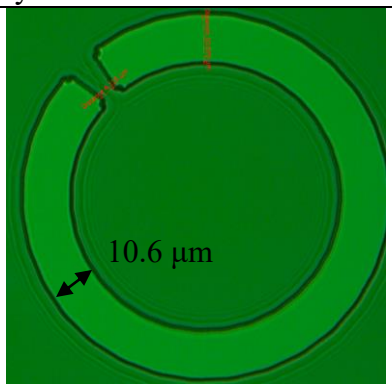
1 lentelė. Skirtingos antrinės kaitinimo temperatūros įtaka.

I bandinys	II bandinys
Pozityvo apšvita 13s; Antrinio kaitinimo T = 120 °C; Ryškinimo laikas 30s.	Pozityvo apšvita 13s; Antrinio kaitinimo T = 110 °C; Ryškinimo laikas 30s.
	

Iš 1 – oje lentelėje pateiktų duomenų matome, kad I – ojo bandinio per aukšta antrinio kaitinimo temperatūra turi kritinę reikšmę galutiniam rezultatui. Sukepintas fotorezistas pradeda prastai ryškintis, nepadeda net didinama ryškinimo trukmė. Sumažinus antrinio kaitinimo temperatūra ir esant tam pačiam ryškinimo laikui fotorezistas išsiryškina kokybiškai, tačiau lieka kampų užapvalėjimai, kuriuos bandėme panaikinti mažindami pozityvo apšvitą.

Iš 2 – oje lentelėje pateiktų duomenų matome, kad sumažinta pozityvo apšvita lemia mažesnį kampų užapvalėjimą. III – ojo bandinio struktūrų matmenys yra maždaug 1 µm mažesni už kaukės struktūrų parametrus, taigi dar labiau sumažinome pozityvo apšvitą, siekdami tinkamai išryškinti struktūrą. IV – ojo bandinio struktūrų matmenys jau atitinka kaukės parametrus.

2 lentelė. Pozityvo UV apšvitos įtaka.

III bandinys	IV bandinys
Pozityvo apšvita 7s; Antrinio kaitinimo T = 115 °C; Ryškinimo laikas 17s.	Pozityvo apšvita 5s; Antrinio kaitinimo T = 115 °C; Ryškinimo laikas 17s.
	

Taigi toliau visi bandiniai gaminti naudojant IV bandinio fotolitografijos procesų parametrizavimą:

1.1 Ant silicio padėklo užnešamas fotorezistas (AZ521E) ir ruošinys sukamas 4000 aps/min greičiu 60s.

1.2 Ruošinys kaitinamas 110 °C temperatūroje 50s.

1.3 Norima struktūra iš fotolitografinės kaukės sutapatinama su silicio padėklu ir ruošinys apšviečiamas gyvsidabrio lempa 5 s.

1.4 Ruošinys kaitinamas 115 °C temperatūroje 120 s.

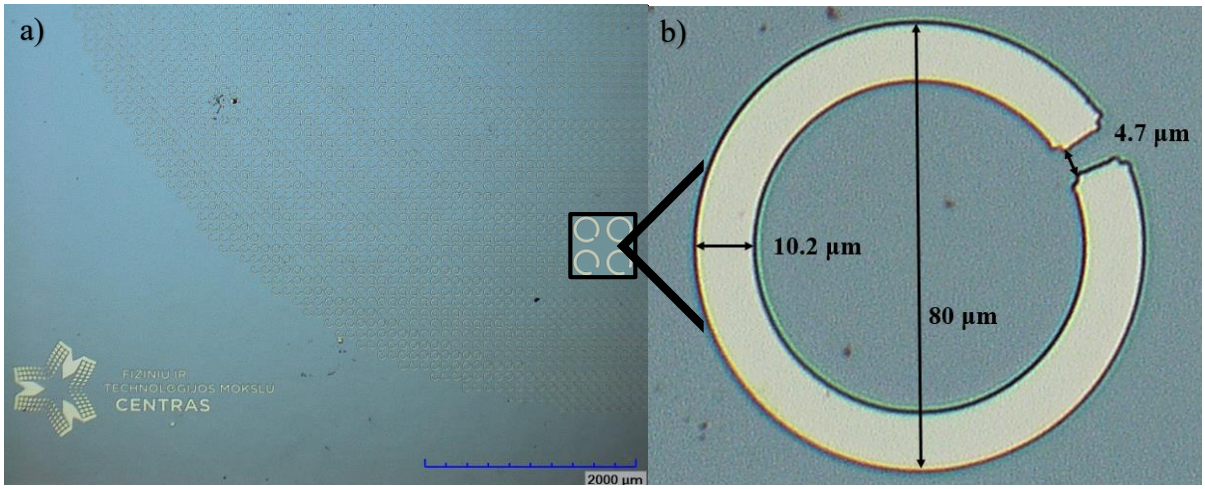
1.5 Apšviečiamas visas ruošinys gyvsidabrio lempa 40 s.

1.6 Ryškiname, lėtai judinant ruošinį ryškalo (AZ351B), sumaišyto su distiliuotu vandeniu santykiu 1:4 tirpale 17 s.

Pozityvo apšvitos trukmė ir ryškinimo laikas buvo padidintas siekiant pašalinti didesnį fotorezisto kiekį nuo bandinio ir prailginti fotorezisto atkėlimo trukmę.

Siekdami pašalinti pirmojo bandinių gamybos etapu atsiradusią prielaidą, kad nesėkmingas fotorezisto atkėlimas galėjo įvykti dėl nepakankamos Ni ir Si adhezijos, antrojo gamybos etapo metu garinimui buvo pasirinkti kiti metalai: Ti, Al, Ni. Garinimas vyko tokia tvarka: 30 nm Ti, 100 nm Al, 30 nm Ni. Ti pasirinktas, kaip pirmasis sluoksnis dėl gero cheminio suderinamumo su SiO_2. Oksido sluoksnis susidaro Si paviršiuje dėl reakcijos su deguonimi. Norėdami pašalinti SiO_2 reikalingas valymas HF rūgštimi, tačiau dėl darbo su šia rūgštimi ypatumų (tai ganėtinai laki, puikiai prasiskverbianti per odą ir žudanti audinių ląsteles rūgštis) SiO_2 nebuvo valomas prieš garinimą. Ši procedūra būtina formuojant elektrinius kontaktus, siekiant sumažinti ominius nuostolius, tačiau šio darbo metu elektriniai kontaktai nebuvo formuojami.

Fotorezisto atkėlimo etape buvo naudotas tas pats DMSO tirpiklis. Bandiniai buvo pamerkti į tirpiklį ir palikti 60 min. Metalas yra pašalinamas nuo tų vietų, kurios padengtos fotorezistu. Šių bandinių



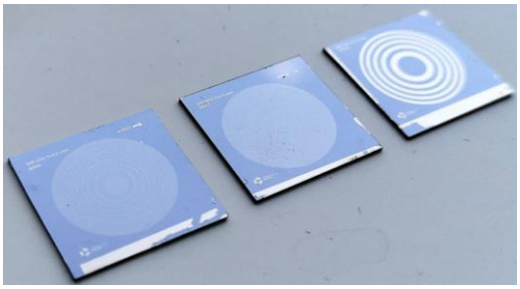
28 pav. a) Ketvirtadalis difrakcinio elemento po fotorezisto atkėlimo, b) išdidinta žiedo formos metamedžiagos struktūra.

gamybos atveju fotorezistas dengė visą bandinio plotą išskyrus metamedžiagų struktūrų vietas, taigi po atkėlimo šios vietos liko padengtos metalu (žr. 28 pav.). Kai kuriose vietoje ant bandinio galime pastebėti šiukšlių, kurias sudaro fotorezisto likučiai bei atsiradę nešvarumai nuo fotolitografinės kaukės. Pagaminta metalinė zoninė plokštelė pavaizduota 5 priede.

Fotolitografijos metu buvo pagaminti trys difrakciniai elementai: metalinė zoninė plokštelė, kai N = 5 bei difrakciniai elementai su žiedo formos metamedžiagomis, kai N = 5, o k = 8 bei N = 5, o k = 2.

5. Matavimų rezultatai

Fotolitografijos metodu buvo pagaminti trys bandiniai (žr. 29 pav.), kurių fokusavimo savybės ištirtos eksperimentiškai. Šiam tikslui buvo surinktas matavimo stendas, kurio principinę schemą vaizduoja 30 a pav. Eksperimento metu detektorius buvo rastriškai judinamas atžvilgiu tiriamojo bandinio *xy* arba *xz* ašimis. Bandinio padėtis detektoriaus atžvilgiu pavaizduota 30 b pav.



29 pav. Pagaminti difrakciniai elementai. Žr. iš kairės – DE Meta N = 5, k = 8, DE Meta N = 5, k = 2, MZP.

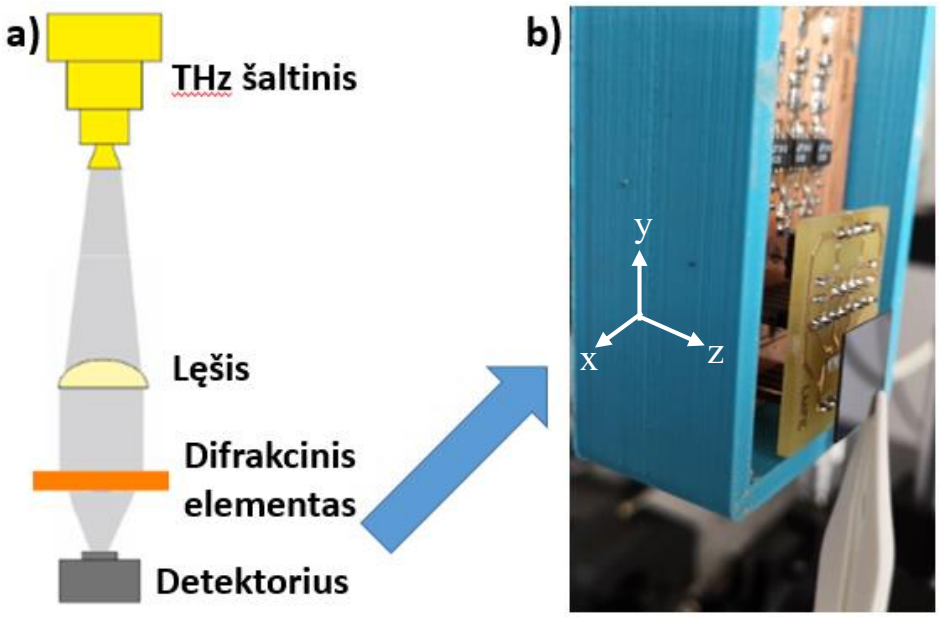
Matavimo stendo pagrindinės dalys:

a) THz šaltinis – jį sudaro impulsų sintezatorius ir „Virginia Diodes Inc.“ daugintuvo grandinė, kuri leidžia generuoti 0.1, 0.3 ir 0.6 THz spinduliuotę , naudojant 8, 24 arba 48 pakopų dauginimo grandinę.

b) HDPE lęšis (f = 8 cm), kuris kolimuoja spinduliuotę. Atstumas tarp lęšio ir bandinio apie 1 metras. Esant tokiam atstumui, į bandinį ateina taisyklingas Gauso pluoštas.

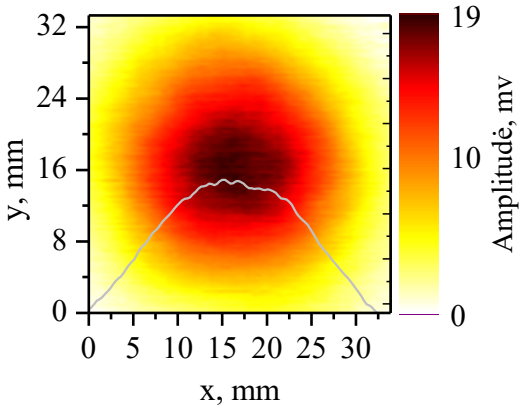
c) Bandinys – metalinė zoninė plokštelė arba difrakcinis elementas su žiedo formos metamedžiagomis.

d) Detektorius – titano mikrobolometras [34]. Šio jutiklio veikimo principas paremtas varžos pokyčiais, kuriuos lemia besikeičianti sensoriaus temperatūra, kai detektorių veikia THz spinduliuotė. Eksperimento metu detektorius buvo judinamas *x*, *y* ir *z* ašimis.



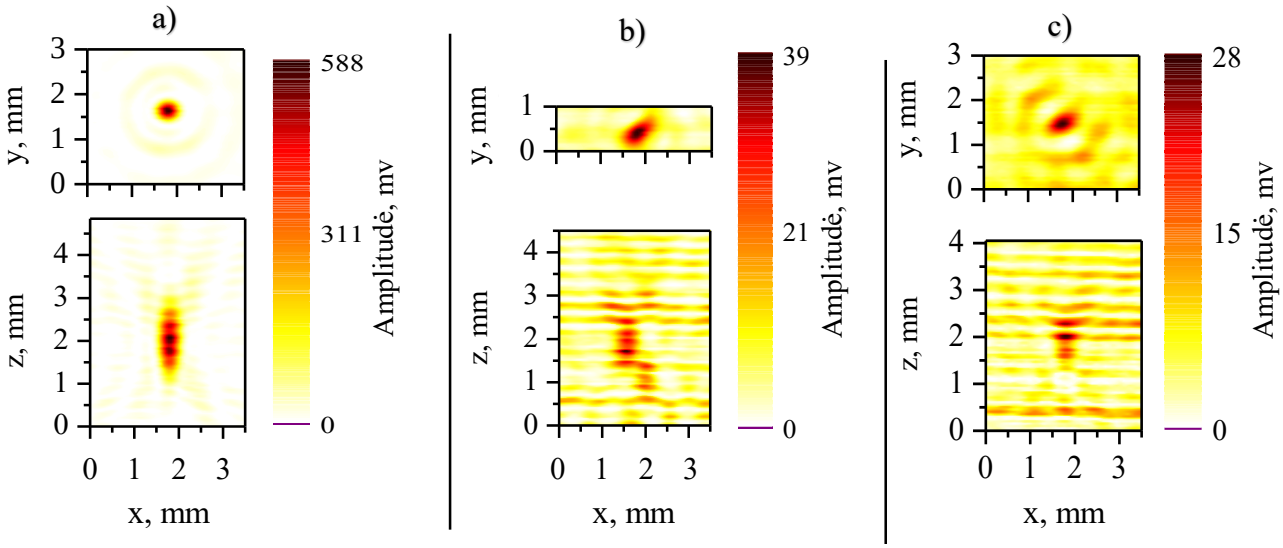
30 pav. a) Principinė eksperimento schema, b) detektoriaus ir bandinio padėtis matavimo stende.

Atsižvelgdami į modeliavimo metu gautą fokusavimo efektyvumo priklausomybę nuo padėklo storio (17 b pav.), vietoj 0.6 THz šaltinio, matavimų metu dažnis buvo paderintas iki 0.577 THz. Šio pluošto intensyvumo pasiskirstymas pavaizduotas 31 pav. Išplėsto pluošto plotis pusiniame aukštyje (*angl.* FWHM) 19.56 mm. Šis pluošto diametras yra platesnis nei bandinio išoriniai matmenys.



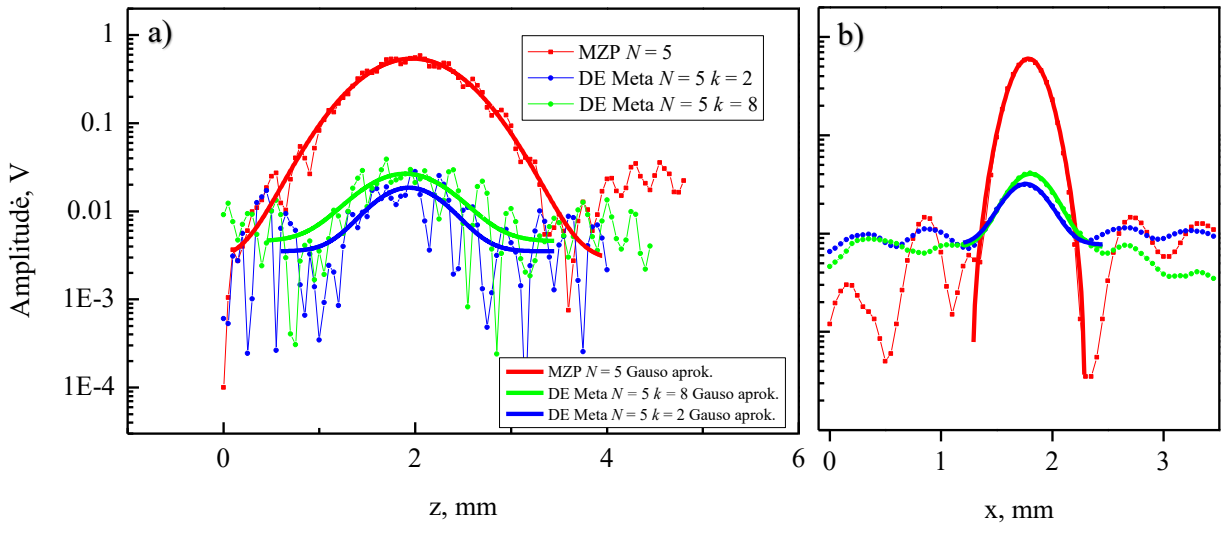
31 pav. 0.577 THz pluošto intensyvumo pasiskirstymas.

Metalinės zoninės plokštelės ir difrakcinių elementų su žiedo tipo metamedžiagomis pluoštų pasiskirstymas *xy* ir *xz* koordinatėse pavaizduotas 32 pav. Šių elementų židinio pjūvis *z* kryptimi pavaizduotas 33 a pav., o pjūvis *x* kryptimi 33 b pav.



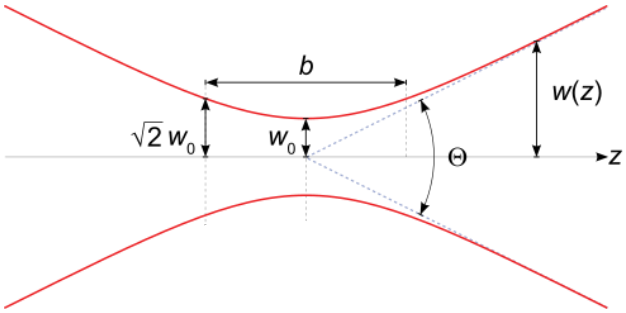
32 pav. Difrakcinių elementų pluošto pasiskirstymas xy ir xz plokštumose. a) MZP, b) DE Meta N = 5, k = 8, c) DE Meta N = 5, k =2.

Maksimali metalinės zoninės plokštelės sufokusuoto spindulio amplitudės vertė siekia 0.588 V, o difrakcinių elementų su metamedžiagomis, kai $k = 8$ ir $k = 2$ atitinkamai 39 mV ir 28 mV.



33 pav. Difrakcinių elementų signalo amplitudės pasiskirstymas a) z, b) x ašimi.

Aproksimavus eksperimentinius duomenis (žr. 33 pav.) bei atsižvelgiant į modeliavimo rezultatus (žr. 24 pav.) – įvertinome pagrindinius Gauso pluošto parametrus, kurie pavaizduoti 34 pav. Apskaičiuoti parametrai pateikti 3 ir 4 lentelėje.



34 pav. Gauso pluošto parametrai w(z) – pluošto sąsmaukos priklausomybė nuo koordinatės, w_0 – pluošto sąsmauka, b – židinio gylis, θ – kampinė sklaida. [35]

3 lentelė. Modeliavimo rezultatų Gauso pluošto parametrai.

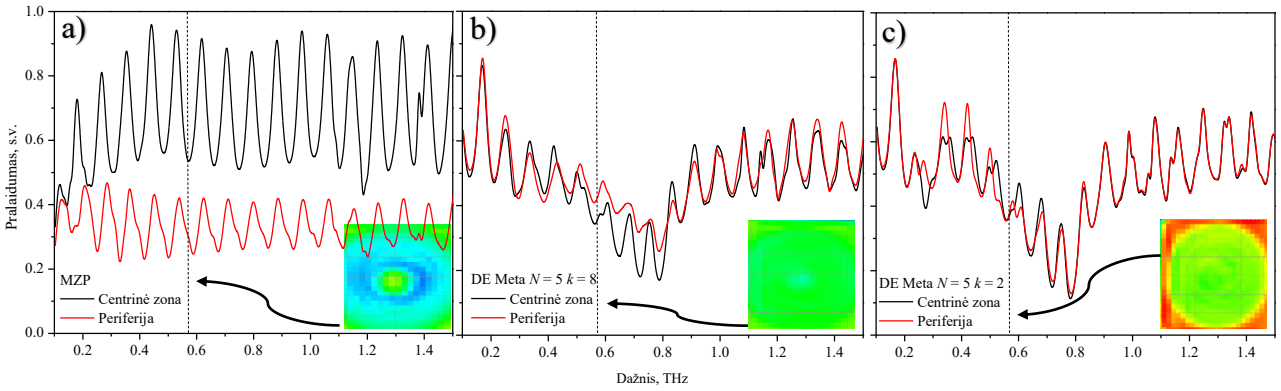
	FWHM modeliavimas	Pluošto sąsmauka	Židinio gylis	Kampinė sklaida	Apertūra
Bandinys	mm	w_0 (mm)	b (mm)	Q (rad)	NA
MZP	0.46	0.20	0.5	1.68	0.74
DE Meta N5K8	0.46	0.20	0.5	1.69	0.75
DE Meta N5K2	0.5	0.21	0.6	1.55	0.70

4 lentelė. Eksperimento rezultatų Gauso pluošto parametrai.

	FWHM eksperimentas	Pluošto sąsmauka	Židinio gylis	Kampinė sklaida	Apertūra
Bandinys	mm	w_0 (mm)	b (mm)	Q (rad)	NA
MZP	0.36	0.15	0.3	2.16	0.88
DE Meta N5K8	0.47	0.20	0.5	1.68	0.74
DE Meta N5K2	0.42	0.18	0.4	1.86	0.80

Iš 3 ir 4 lentelės duomenų matome, kad modeliavimo metu spindulio plotis pusiniame aukštyje kinta 0.46 – 0.5 mm intervale, kai eksperimento metu nuo 0.36 mm iki 0.47mm. Taip pat eksperimento metu pluošto sąsmauka yra mažesnė arba lygi lyginant atitinkamų difrakcinių elementų pluošto sąsmaukai iš modeliavimo rezultatų. Taigi modeliavimo metu turime platesnį sufokusuotą spindulį, kurio pluoštas lėčiau plinta erdvėje, o eksperimento metu stebime ryškesnį centrinį maksimumą.

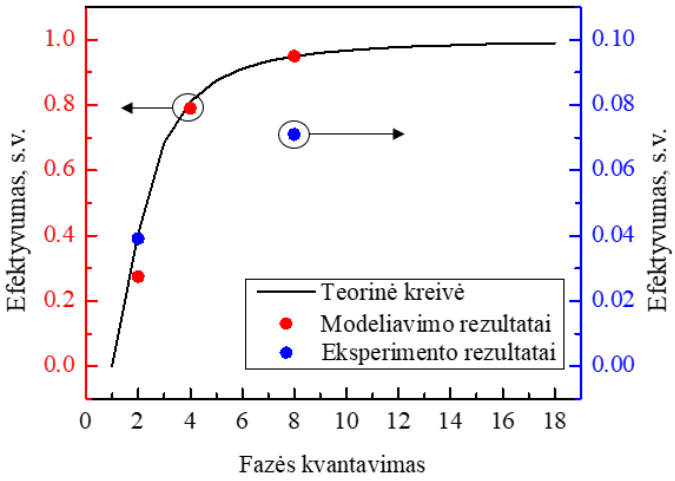
Norėdami įvertinti sukurtų difrakcinių elementų pralaidumą išmatavome kiekvieno elemento pralaidumą naudojant laiko skyros spektroskopijos sistemą (angl. *Time domain spectroscopy*) [36]. Pralaidumas matuotas kiekviename bandinio plokštumos taške, kai skanavimas vykdomas 0.5 mm žingsniu. Gauti rezultatai pavaizduoti 35 pav.



35 pav. Difrakcinių elementų pralaidumo spektras. a) MZP, b) DE Meta N = 5, k = 8, c) DE Meta N = 5, k = 2. Intarpe struktūros pralaidumas ties 0.577 THz. Mėlyna spalva žymi intensyvumo minimumą, o raudona maksimumą.

Iš 35 a pav. matome, kad metalinės zoninės plokštelės pralaidumas siekia 0.53, aiškiai matomos susidariusios stovinčios bangos, taigi stebime Fabry Perrot stovinčių bangų rezonansus visoje tiriamo dažnio srityje. Iš pralaidumo pasiskirstymo plokštumoje ties 0.577 THz matome, kad pralaidumas didesnis ties struktūros viduriu dėl difrakcinių elemento savybių. 35 b ir c pav. išryškėja metamedžiagų įtaka pralaidumo spektre. Šių elementų pralaidumą lemia metamedžiagų rezonansinės savybės. Stebimas aiškus pralaidumo minimumas ties 0.79 THz. Įvertinę difrakcinių elementų pralaidumą apskaičiavome jų efektyvumą – metalinės zoninės plokštelės efektyvumas 24%, o difrakcinio elemento su žiedo formos metamedžiagomis, kai $N = 5$ bei $k = 8$ arba $k = 2$, atitinkamai lygus 7 % ir 4 %.

Žinodami sumodeliuotų bei pagamintų difrakcinių elementų su metamedžiagomis pralaidumą, nustatėme elementų efektyvumą. Kiekvieno elemento efektyvumas rastas skaičiuojant pralaidumo vertės santykį su nefokusuoto spindulio signalo stiprumu bei įvertinant bandinio pralaidumą. Rezultatus įvertinome pagal literatūroje pateiktą [37] difrakcinio elemento efektyvumo priklausomybės nuo fazės kvantavimo skaičiaus formulę (8) (žr. 36 pav.).



36 pav. Difrakcinio elemento efektyvumo priklausomybė nuo fazės kvantavimo skaičiaus.

$$\eta_k = sinc^2\left(\frac{1}{k}\right) \quad (8)$$

η – efektyvumas, k – fazės kvantavimo skaičius.

Iš 36 pav. matome, kad modeliavimo metu gauti rezultatai atitinka teorinį modelį, o pagaminti difrakciniai elementai veikia ne taip kokybiškai, kaip buvo tikėtasi. Tai gali lemti netolygus fazės

frontas, kuris pasiekia bandinį, kadangi modeliavimo metu buvo modeliuojama naudojant idealiai plokščią bangą. Taip pat šio darbo metu metalinės žiedo formos metamedžiagos buvo suformuotos ant silicio paviršiaus, taigi dalis spinduliuotės sąveikauja su metamedžiagomis, o dalis praeina tik pro silicio padėklą. Taigi už elemento turime spinduliuotę su reikiamu fazės pokyčiu fokusavimui, kuris susidarė metamedžiagose bei spinduliuotę, kurios fazė pakito tik dėl sklidimo per silicio padėklą. Šios spinduliuotės sąveikauja tarpusavyje ir tai gali lemti prastesnę bangų interferenciją. Norint įvertinti šią prielaidą reikia papildomų invertuoto dizaino (žiedo formos išpjovos metalo dangoje ant silicio paviršiaus) bei atskirų fazės keitimo elementų tyrimų. Šiuo metu atliekami tyrimai leis įvertinti pro silicio padėklą praėjusios spinduliuotės įtaką fokusavimo efektyvumui bei leis įsitikinti modeliavimo rezultatais, kad fazės keitimo elementai fazę keičia tinkamai.

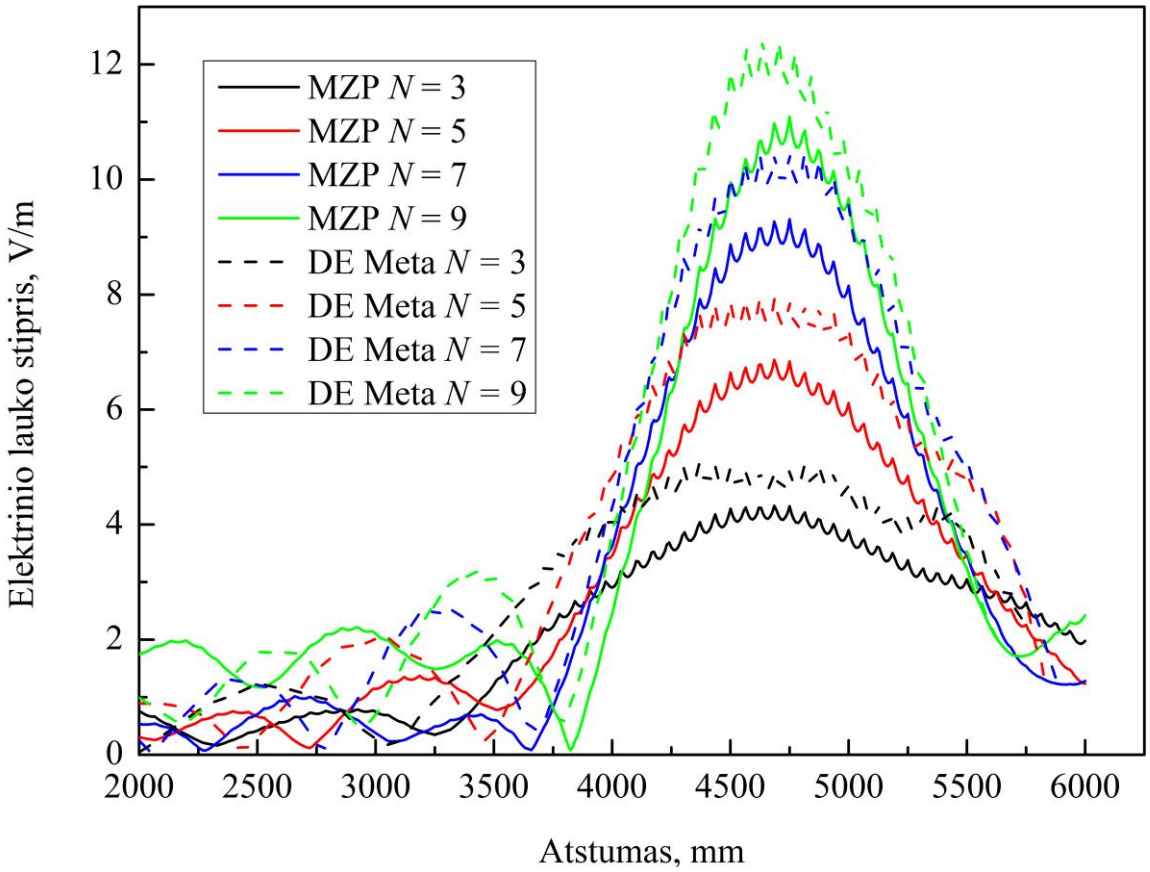
Išvados

Baigiamojo darbo metu buvo įgyvendinti visi užsibrėžti uždaviniai, t.y. atlikta literatūros apžvalga ir sumodeliuoti bei pagaminti difrakciniai elementai. Fotolitografijos metodu buvo pagaminti trys difrakciniai elementai – metalinė zoninė plokštelė bei difrakciniai elementai su metamedžiagomis, esant skirtingam fazės kvantavimui. Iš teorinių bei eksperimentinių rezultatų nustatyta, kad:

1) Iš modeliavimo rezultatų galime prognozuoti, kad efektyviausiai 0.6 THz spinduliuotę fokusuoja difrakcinis elementas su žiedo formos metamedžiagomis, kai difrakcinių zonų skaičius $N = 9$, fazės kvantavimas $k = 8$, žiedo formos metamedžiagos ir silicio padėklo storis atitinkamai lygus 10 μm ir 500 μm, o metamedžiagų išdėstymo periodas $T = 100$ μm .
2) Įsisavinti optinės litografijos gamybos procesai difrakcinių elementų gamyboje leidžia užtikrinti1 - 2 μm rezoliuciją.
3) Metalinės zoninės plokštelės pralaidumas nepriklauso nuo spinduliuotės dažnio matuotame dažnių intervale, o difrakcinių elementų su metamedžiagomis dizainas turi aiškiai išreikštą pralaidumo minimumą ties 0.79 THz.
4) Pagamintos metalinės zoninės plokštelės efektyvumas, kai $N = 5$ siekia 24 %, o sufokusuoto spindulio plotis pusiniame aukštyje 0.36 mm bei pluošto sąsmauka $w_0 = 0.15$ mm. Pluošto parametrai artimi modeliavimo metu gautiems rezultatams.
5) Pagamintų difrakcinių elementų su žiedo formos metamedžiagomis, kai $N = 5$, o $k = 8$ bei $k = 2$ efektyvumas atitinkamai siekia 7 % ir 4 %, o šių elementų sufokusuoto spindulio plotis pusiniame aukštyje atitinkamai 0.47 mm ir 0.42 mm bei pluošto sąsmauka $w_0 = 0.20$ mm ir $w_0 = 0.18$ mm. Naudojant šiuos difrakcinius elementus vaizdinimo sistemoje būtų galima pasiekti $< \lambda$ vaizdinimo rezoliuciją.

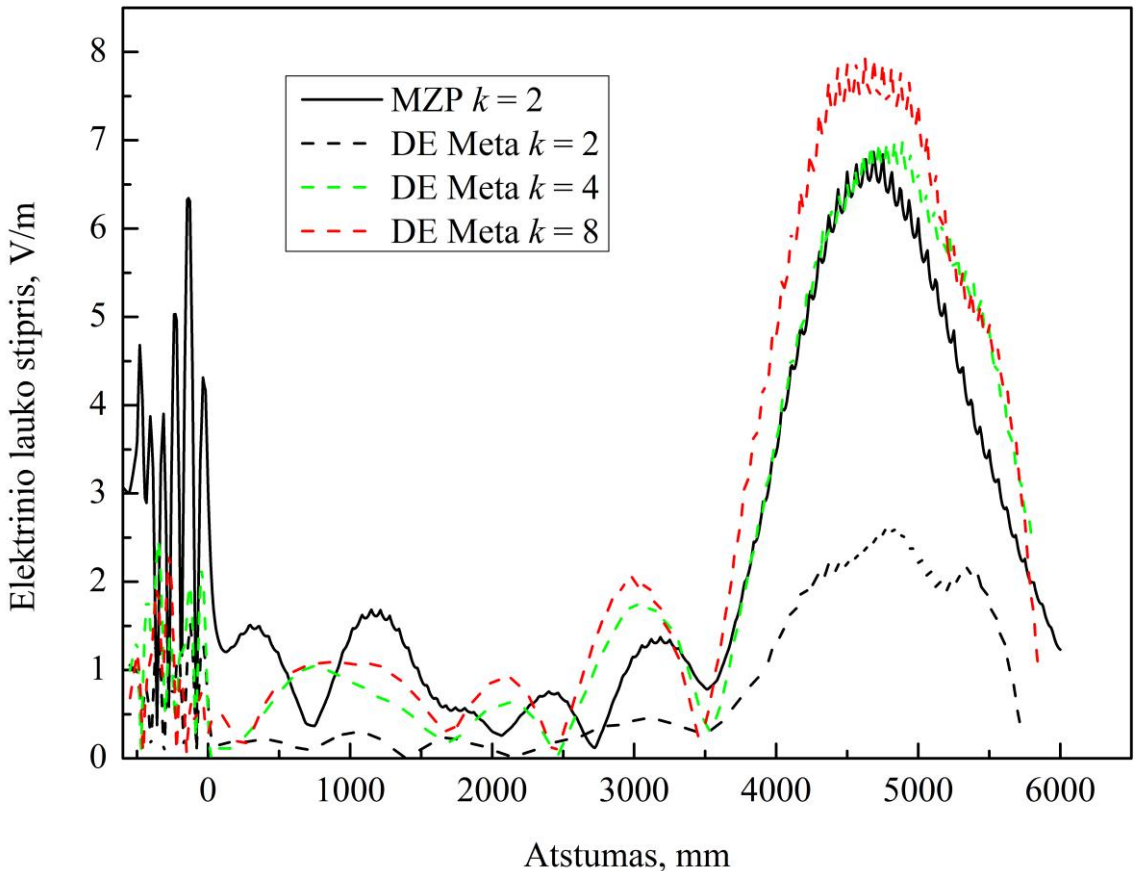
Dalis darbe pateiktų rezultatų buvo pristatyti konferencijoje „Open Readings 2019 – 62nd International Conference for Students of Physics and Natural Sciences“. Pranešimo „FOCUSING PROPERTIES SIMULATION OF COMPACT DIFFRACTIVE ELEMENT COMBINED WITH META-MATERIALS“ tezės pateiktos 6 priede.

1 Priedas. Metalinės zoninės plokštelės ir difrakcinio elemento su metamedžiagomis fokusavimo efektyvumo palyginimas, esant vienodam difrakcinių zonų skaičiui, bet skirtingam fazės kvantavimui



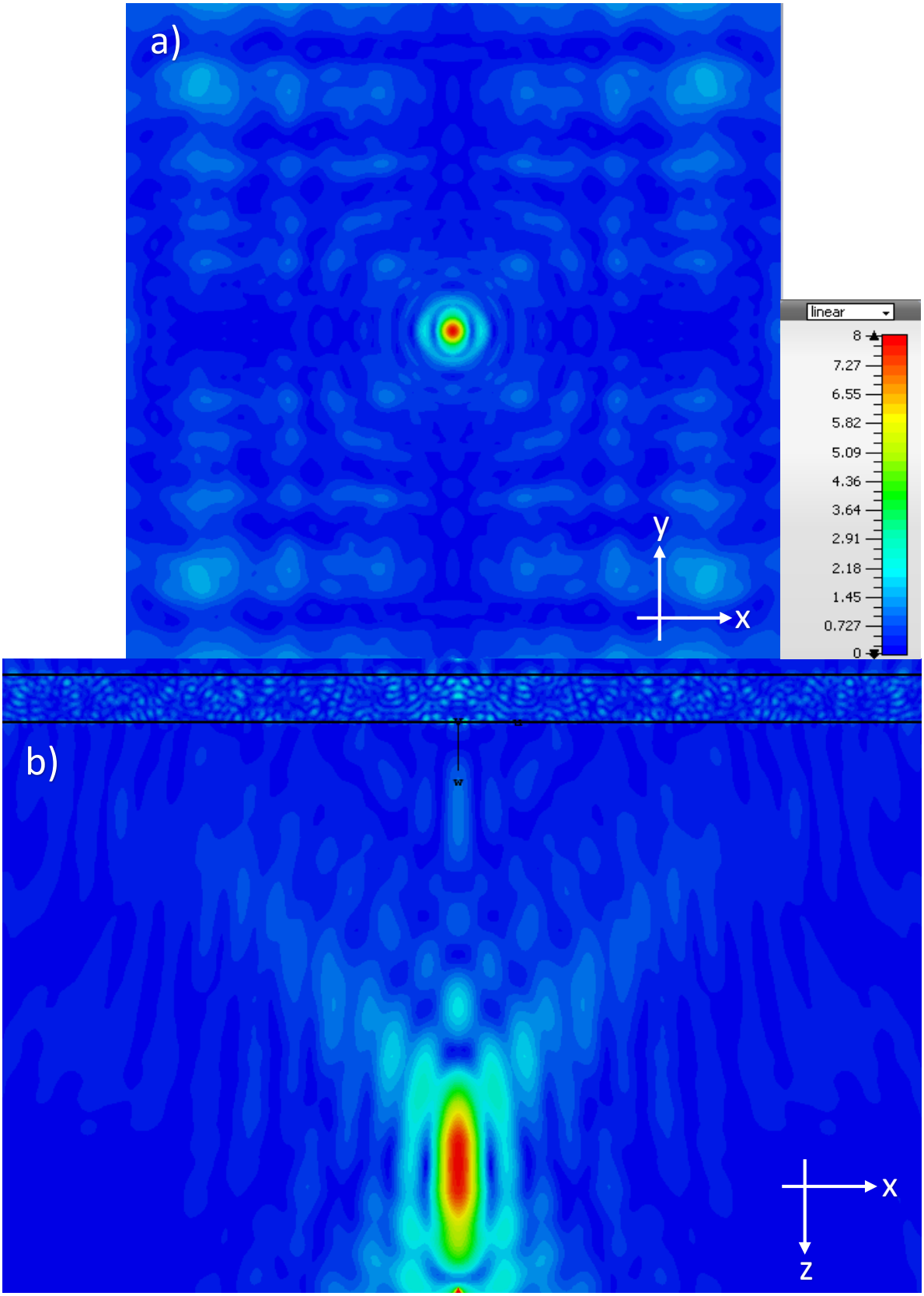
Skirtingų tipų difrakcinių elementų centrinio maksimumo elektrinio lauko stiprio vertė z ašies kryptimi, esant skirtingam difrakcinių zonų skaičiui. MZP – metalinė zoninė plokštelė, kai k = 2, DE Meta – difrakcinis elementas su metamedžiagomis, kai k = 8.

2 Priedas. Metalinės zoninės plokštelės ir difrakcinio elemento su metamedžiagomis fokusavimo efektyvumo palyginimas, esant vienodam difrakcinių zonų ir fazės kvantavimo skaičiui



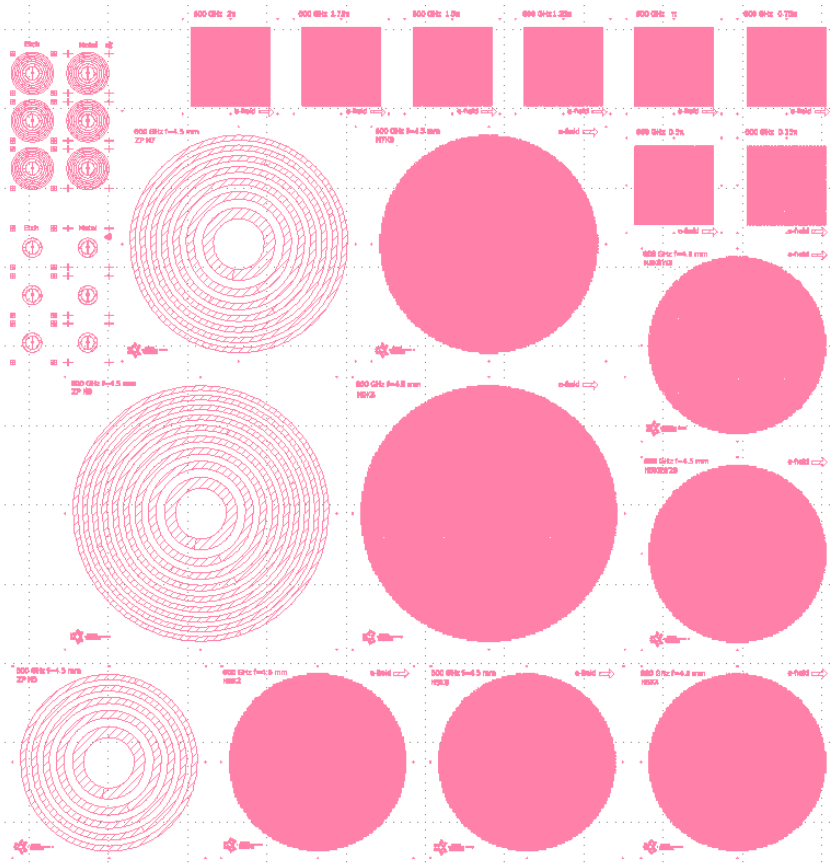
Skirtingų tipų difrakcinių elementų centrinio maksimumo elektrinio lauko stiprio vertė x ašies kryptimi, esant skirtingam fazės kvantavimui. MZP – metalinė zoninė plokštelė, DE Meta – difrakcinis elementas su metamedžiagomis. Abiejų elementų N = 5.

3 Priedas. Difrakcinio elemento su metamedžiagomis elektrinio lauko pasiskirstymas *xy* ir *xz* plokštumose



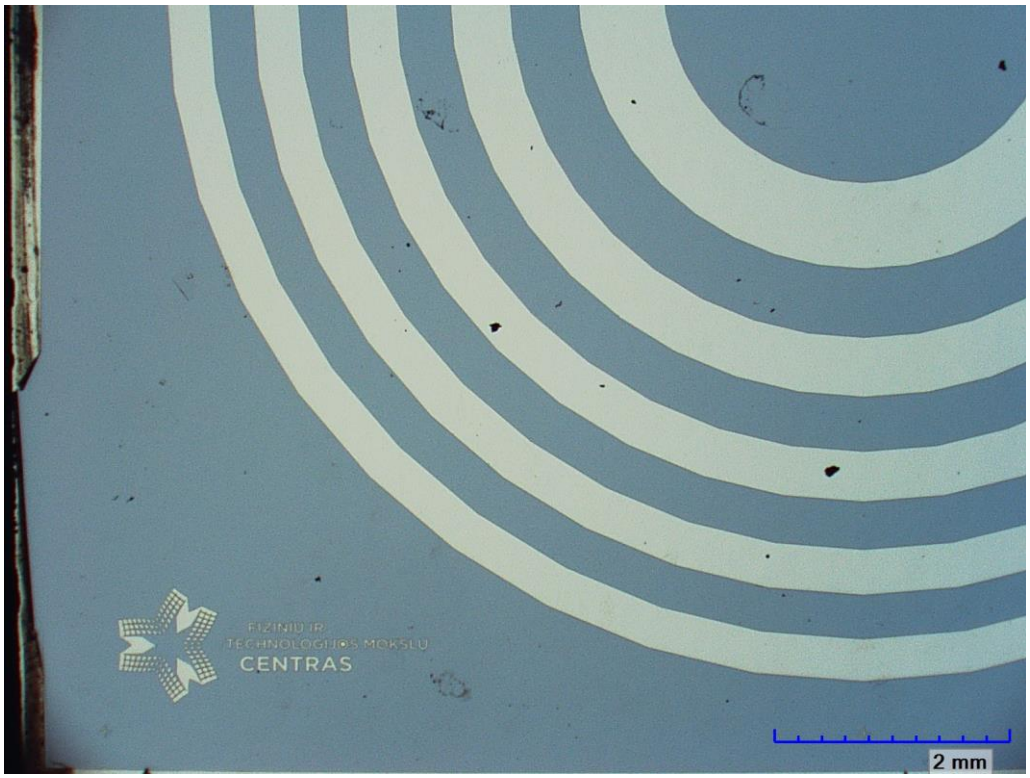
Elektrinio lauko pasiskirstymas a) xy, b) xz plokštumose už difrakcinio elemento.

4 Priedas. Fotolitografinė kaukė



„KLayout“ programa sukurta fotolitografinė kaukė.

5 Priedas. Pagamintos metalinės zoninės plokštelės vaizdas



Dalis pagamintos metalinės zoninės plokštelės dizaino.

6 Priedas. Konferencijos „Open Readings 2019“ pranešimo tezės

FOCUSING PROPERTIES SIMULATION OF COMPACT DIFFRACTIVE ELEMENT COMBINED WITH META-MATERIALS

Augustinas Karvelis[1], Linas Minkevičius[2]
[1] Faculty of Physics, Vilnius University, Lithuania
[2] Department of Optoelectronics, Center for Physical Sciences and Technology, Lithuania
augustinas.karvelis@ff.stud.vu.lt

Nowadays Terahertz (THz) radiation is actively used for imaging applications medical diagnostics, security inspection [1] or food and pharmaceutical industry [2]. Components of optical system should be compact and high efficiency. Diffractive components such as a metal zone plates and phase zone plates reduce the size of the optical systems [3] while meta-materials increase the efficiency of individual components and allow to control the parameters of the radiation.

The main goal of this work was to define the best meta-material design for focusing the 0.6 THz radiation. Dependency of focus efficiency and phase quantization level was also determined. Simulations were done using CST microwave studio program.

To achieve the focusing functionality, the split ring metasurface with various opening angles θ ware used. We have created two different designs (see Fig. 1) to identify the maximum transmission coefficient at 0.6 THz.

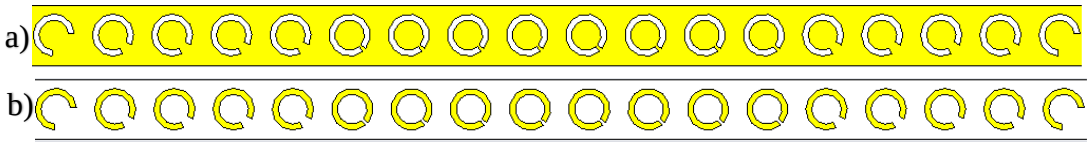


Fig. 1. 100 – nm thick gold film on a silicon wafer with cutouts (a) and 100 – nm split ring gold film metasurface on a silicon wafer (b).

Different opening angles θ were used in order to achieve the phase shift covering 2π range and nearly constant transmission amplitude simultaneously. The required phase distribution at the appropriate place in diffractive elements was obtained by cylindrical lens formula. Both designs of the diffractive element let to focus 0.6 THz radiation in the focal point of 4 mm is shown in Fig. 2.

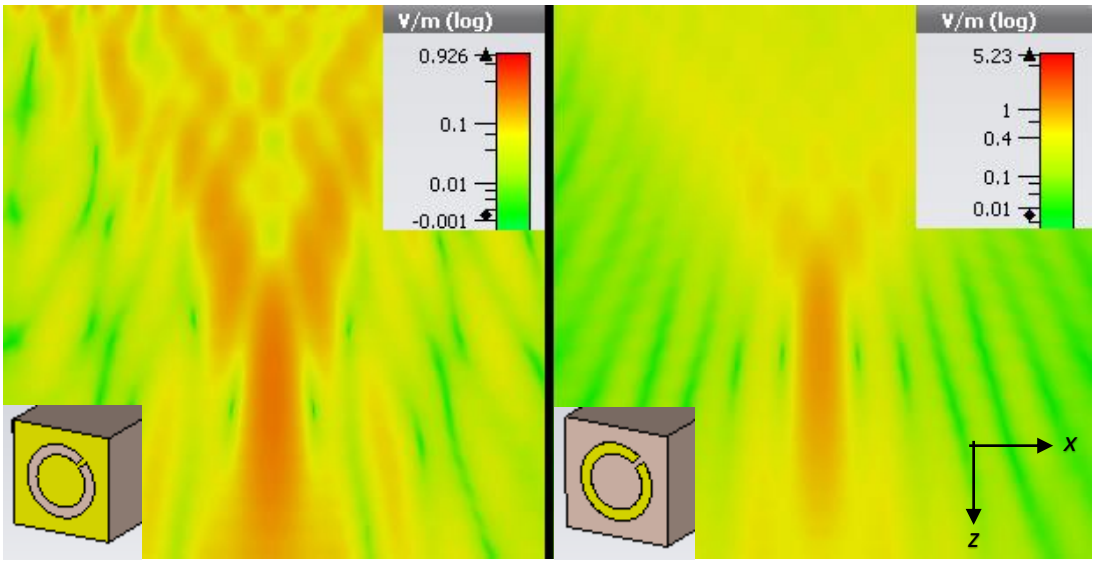


Fig.2. Simulation result of different diffractive elements combined with split ring meta – metrials.

To conclude, the focusing characteristics of the diffractive element consisting of ring-shaped metamaterials were theoretically evaluated and optimized design was estimated.

[1] V. Tamošiūnas, S. Indrišiūnas, M.Tamošiūnaitė ir kt., Focusing of Terahertz Radiation with Laser-Ablated Antireflective Structures, IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology **8**(5), 541-548 (2018)
[2] L. Minkevičius, S. Indrišiūnas, R. Šniaukas ir kt., Compact diffractive optics for THz imaging, Lithuanian Journal of Physics **58**(1), 99-107 (2018).
[3] L. Minkevičius, K. Madeikis, B, Voisiat ir kt., Focusing Performance of Terahertz Zone Plates with Plates with Integrated Cross-Shape Apertures, Journal of infrared, millimeter and terahertz waves **35**(9), 699-702 (2014).

Literatūros sąrašas

1. V. Tamošiūnas, S. Indrišiūnas, M.Tamošiūnaitė ir kt., Focusing of Terahertz Radiation with Laser-Ablated Antireflective Structures, IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology **8**(5), 541-548 (2018).
2. I. Dapšys, *Methods for spectral feature detection in Fourier transform spectroscopy of organic molecules*, Institutional Repository of Vilnius Gediminas Technical University, 2018.
3. L. Minkevičius, S. Indrišiūnas, R. Šniaukas ir kt., Compact diffractive optics for THz imaging, Lithuanian Journal of Physics **58**(1), 99-107 (2018).
4. L. Minkevičius, V. Tamošiūnas, I. Kašalynas, Terahertz heterodyne imaging with InGaAs-based bow-tie diodes, Appl. Phys. Lett. **99**(13), 131101 (2011).
5. L. Minkevičius, K. Madeikis, B, Voisiat ir kt., Focusing Performance of Terahertz Zone Plates with Plates with Integrated Cross-Shape Apertures, Journal of infrared, millimeter and terahertz waves **35**(9), 699-702 (2014).
6. L. Minkevičius, B. Voisiat, A. Mekys ir kt., Terahertz Zone Plates with Integrated Laser-Ablated Bandpass Filter, Electronics Letters **49**(1), 49-50 (2013).
7. W. Withayachumnankul, D. Abbott, Metamaterials in the Terahertz Regime, IEEE Photonics Journal **1**(2), 99-118 (2009).
8. H. Tao, N. I. Landy, C. M. Bingham ir kt., A metamaterial absorber for the terahertz regime: Design, fabrication and characterization, Optics Express **16**(10), 7181-7188 (2008).
9. A. Vaitkūnas, *Control of the resonant modes in 2D array of split-ring resonators in the microwave and terahertz regime*, Institutional Repository of Vilnius University, 2017.
10. P. Garbacz, *Terahertz imaging – principles, techniques, benefits, and limitations*, Institute for Sustainable Technologies – National Research Institute ,2016.
11. L. Minkevičius, S. Indrišiūnas, R. Šniaukas ir kt., Terahertz multilevel phase Fresnel lenses fabricated by laser patterning of silicon, Opt Lett. **42** (10), 1875-1878 (2017).
12. R. Šniaukas, *THz difrakcinių optinių elementų gamyba pasitelkiant tiesioginę lazerinę abliaciją*, Institutional Repository of Vilnius University, 2017.
13. B. Voisiat, S. Indrišiūnas, R. Šniaukas ir kt., Laser processing for precise fabrication of the THz optics, In Proc. of SPIE, **10091**, 100910F (2017).
14. T.Xu, C.Wang, X.Luo, Interference photolithography with metamaterials, 2008 IEEE Photonics Global@Singapore, 10460635 (2008).
15. I. Požėla, Č. Radvilavičius, *Optika ir atomo fizika* **(**KTU leidykla Technologija, Kaunas, 2003**).**
16. Šviesios difrakcija, <http://www.olimpas.lt/konspektai/optika_5sk.pdf> (žiūrėta 2019-01-07).
17. J. Sasian, Diffractive Optical Elements - Lens Design OPTI 51, <https://wp.optics.arizona.edu/jsasian/wp-content/uploads/sites/33/2016/03/L15_OPTI517_DOE.pdf> (žiūrėta 2019-01-07).
18. J. M. Fuster, P. Candelas, S. C. Ibanez ir kt., Analysis of Fresnel Zone Plates Focusing Dependence on Operating Frequency, Sensors (Basel) **17**(12), 2809 (2017).
19. B. Morgan, C. M. Waits, J. Krizmanic ir kt., Development of a Deep Silicon Phase Fresnel Lens Using Gray-Scale Lithography and Deep Reactive Ion Etching, Journal of Microelectromechanical Systems **13**(1), 113-120 (2004).
20. K. Gerrard, A. Sohn, T. Dow, *Design, fabrication and testing of kinoform lenses*, North Carolina State University Raleigh, NC USA, 2008.
21. Rekurenčios sekos, <https://www.mif.vu.lt/ljmm/kursa/antr/metodn2.htm> (žiūrėta 2019-01-07).
22. J. A. Monsoriu, A. Calatayud, L. Remon ir kt., Bifocal Fibonacci Diffractive Lenses, IEEE Photonics Journal **5**(3), 3400106 (2013).

23. D. Jokubauskis, L. Minkevičius, M. Karaliūnas ir kt., Fibonacci terahertz imaging by silicon diffractive optics, Optics Letters Vol. **43**(12), 2795-2798 (2018).
24. A. Bubnelis, *Analysis of cilindrical metamaterial waveguides*, Institutional Repository of Vilnius Gediminas Technical University, 2011.
25. J. P. Pendry, Negative refraction makes a perfect lens, Phys Rev Lett. **85**(18), 3966-9 (2000).
26. F. Alves, D. Grbovic, B. Kearney, Bi-material terahertz sensors using metamaterial structures, Optics Express **21**(11), 13256-13271 (2013).
27. H. Bilgin, S. Zahertar, S. Sadeghzadeh ir kt., A MEMS-based terahertz detector with metamaterial-based absorberand optical interferometric readout, Sensors and Actuators A: Physical **244**(15), 292-298 (2016).
28. A. C. Strikwerda, H. Tao, E. A. Kadlec ir kt., CLEO: 2011- Laser Science to Photonic Applications, 12135343, (IEEE 2011).
29. N. Jin, J. Li, Terahertz wave bandpass filter based on metamaterials, Microwave and optical technology letters, **53**(8), 1858-1860 (2011).
30. O. Paul, R. Beigang, M. Rahm, Highly Selective Terahertz Bandpass Filters Based on Trapped Mode Excitation, Optics Express **17**(21), 18590-18595 (2009).
31. M. Ulbrich, P. Paluchowski, J. Muehlsteff ir kt., *High temporal resolution finite element simulations of the aorta for thoracic impedance cardiography*, RWTH Aachen University, 2011.
32. L. Minkevičius, *Terahercinių vaizdų užrašymo matricos, veikiančios kambario temperatūroje*, Institutional Repository of Vilnius University, 2016.
33. J. He, J. Ye, X. Wang ir kt., A broadband terahertz ultrathinmulti-focus lens, Scientific Reports **6**, 28800 (2016).
34. A. Sašek, D. Berčan, M. Gradišek ir kt., A THz Receiver with Novel Features and Functionality, Sensors **18**(11), 3793 (2018).
35. Gaussian beam, <https://en.wikipedia.org/wiki/Gaussian_beam#/media/File:GaussianBeamWaist.svg> (žiūrėta 2019-05-15).
36. T-SPEC Real-Time Terahertz Spectrometer, <http://www.teravil.lt/t-spec.php> (žiūrėta 2019-05-18)
37. K. Yamada, W.Watanabe, Y. Li ir kt., Multilevel phase-type diffractive lenses in silica glass induced by filamentation of femtosecond laser pulses, Optics Letters **29**(16), 1846-1848 (2004).

Augustinas Karvelis

Focusing Properties Simulation of Compact Diffractive Optics Element Combined with Meta-materials

Summary

In this work, several compact diffractive optics elements were designed for focusing THz radiation. By using finite integration and frequency domain simulation techniques the best parameters for diffractive element with meta-materials and metal zone plate were defined. According to the simulation results different diffractive element designs were fabricated using photolithography method. These elements focusing properties were defined theoretically and measured experimentally.

Firstly, simulations demonstrated that the highest focusing efficiency for 0.6 THz radiation could be reached with diffractive optics element with split ring meta-materials when number of diffractive zones equals to $N = 8$, number of phase quantization level is $k = 8$, inner and outer radius of meta-materials is $r = 30$ μm and $R = 40$ μm, wafer thickness is $h = 500$ μm and the distance between meta-materials centres is $T = 100$ μm.

In the second part of this research diffractive optics elements with different designs were fabricated by using image reversal photolithography technology. Well-understood process allowed to reached 1 – 2 μm samples resolution.

Fabricated elements diffraction efficiency was determined experimentally and compared with simulated results. Efficiency of metal zone plate when $N = 5$ is 24 %, beam waist $w_0 = 0.15$ mm and full width at half maximum 0.36 mm. The focusing parameters for diffractive elements with meta-materials when $N = 5$ and $k = 8$ or $k = 2$ diffractive efficiency equals to 7 % and 4 % accordingly, while $w_0 = 0.20$ mm and $w_0 = 0.18$ mm and full width at half maximum equals to 0.47 mm and 0.42 mm.

Padėka

Noriu išreikšti išskirtinę padėką darbo vadovui dr. Linui Minkevičiui už pagalbą, pasitikėjimą, kantrybę, nuolatinį skatinimą siekti svarių rezultatų, ruošiant šį baigiamąjį darbą. Nuoširdžiai dėkoju inžinieriui Domui Jokubauskiui už žinias kuriant programinį modeliavimo kodą bei atliekant eksperimentinius bandinių matavimus.

Taip pat noriu padėkoti visam Terahercų fotonikos laboratorijos kolektyvui už patarimus bandinių gamybos metu bei suteiktas galimybes neatlygintinai naudotis visais skyriaus resursais.