

Vilniaus universiteto
Fizikos fakulteto
Fotonikos ir nanotechnologijų institutas

Rytis Šalaševičius
TERAHERCINĖS SPINDULIUOTĖS FOKUSAVIMAS NAUDOJANT
INOVATYVIUS DIFRAKCINIUS ELEMENTUS

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Fotonikos ir nanotechnologijų studijų programa

Studentas

Rytis Šalaševičius

Leista ginti

2022-05-25

Darbo vadovas

dr. Linas Minkevičius

Instituto atstovas

prof. dr. Ramūnas Aleksiejūnas

Vilnius 2022

Turinys

Įvadas	2
1 Literatūros apžvalga	3
1.1 Šviesos sąveika su aplinka	3
1.2 Bangų difrakcija ir interferencija	4
1.3 Difrakciniai optiniai elementai	6
1.4 Daugialapsnės zoninės plokštelės	7
1.5 Metapaviršiai	8
1.6 Metamedžiagų gamyba	9
1.7 Metalėšių savybės	10
2 Modeliavimo ir gamybos metodika	14
2.1 Programinė įranga	14
2.2 Baigtinių integracijų laiko skalėje metodas - FIT	14
2.3 Fazinio elemento modelis	16
2.4 Metalėšio modelio programa	17
2.5 Metalėšių dizainai	20
2.6 Lėšių gamybos technologijos	25
2.7 Matavimo metodika	30
3 Eksperimentiniai rezultatai	31
3.1 THz bangų fokusavimas	31
3.2 Rezultatų apibendrinimas	39
4 Išvados	44
Literatūra	45
Summary	48

Įvadas

Šiuolaikinėje visuomenėje optiniai įtaisai tapo neatsiejama kasdienybės dalis. Įvairių optinių sistemų naudojimas aktualus tiek pramoniniams taikymams tiek ir fizinių asmenų poreikiams. Viena sparčiai besivystančių šviesos manipuliavimo sričių – terahercinė spinduliuotė. Šis dažnių ruožas yra ypač aktualus dėl kelių priežasčių – šviesa beveik nesąveikauja su tiriamąja medžiaga, bei pasižymi medžiagų spektroskopiniais pėdsakais [1]. Dėl minėtų terahercų spinduliuotės charakteristikų, šios dažnių srities praktinis pritaikymas taip pat labai platus: pradedant nuo *in vivo* ląstelių ir organizmų vaizdinimo [2], spektroskopinis medžiagų atpažinimas apsaugos sistemose [3], taip pat ryšio tinklų technologijoms [4], bei maisto ir farmacijos pramonėje [5]. Įprastai terahercines optines sistemas sudaro įvairūs komponentai kaip: plataus dažnio šaltiniai ir detektoriai, fokusuojantys lęšiai, veidrodžiai, spindulio dalikliai ar poliarizatoriai. Didelis dėmesys skiriamas kurti kompaktiškus elementus, siekiant integruoti į prietaisus aktualius naudoti pramonėje ir kasdieniniam naudojimui.

Alternatyvus būdas manipuluoti terahercinę spinduliuotę – panaudoti metamedžiagas – tai naujos rūšies medžiaga, tipiškai nesutinkama gamtoje, pasižyminti išskirtinėmis elektromagnetinių bangų valdymo savybėmis [6]. Viena pagrindinių metamedžiagų savybių – jos veikimo dažnių sritis, optinio pralaidumo arba atspindžio parametrai, kuriuos apsprendžia medžiagos mikrostruktūra. Tokios medžiagos yra sudarytos iš smulkių periodiškai išdėstytų įvairios formos metalinių darinių, kurie yra suformuojami ant plono sluoksnio dielektriko paviršiaus. Mikrobangų dažnių ruože naudojami metapaviršiai – kompaktiški planariniai optiniai komponentai, kurie pakeičia tipiškai naudojamą didelių gabaritų optiką.

Šiame darbe modeliuojami ir eksperimentiškai tiriami metalėšiai, kuriuose ertmės metalinėje plokštelėje sudarytos iš perpjautų C formos žiedų, skirti THz spinduliuotei fokusuoti. Taip pat šie elementai palyginami su panašiais parametrais pasižyminčiomis zoninėmis plokštelėmis. Šio darbo tikslas yra sumodeliuoti, pagaminti ir išmatuoti 0.3 THz spinduliuotę fokusuojančius metalėšius, realizuoti optinių elementų gamybą bei palyginti teorinius ir eksperimentinius rezultatus.

1 Literatūros apžvalga

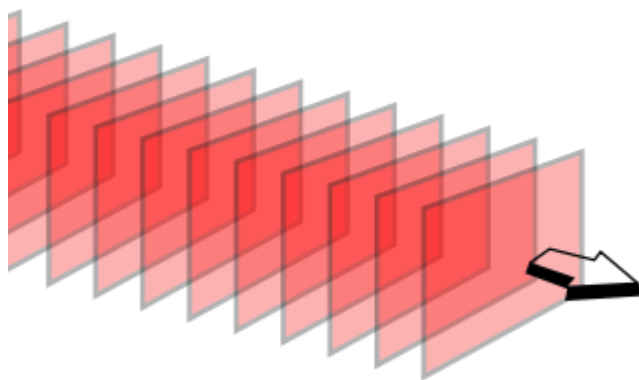
Šiame skyriuje bus pristatomi fizikiniai reiškiniai, kurių pagalba galima suprasti ir analizuoti modernius optikos elementus ir jų parametrus. Taip pat bus trumpai pristatyti galimi pramoniniai taikymai, bei gamybos ypatumai.

1.1 Šviesos sąveika su aplinka

Šviesa - tai elektromagnetinės bangos sklindančios vienalytėje terpėje. Bendrai šviesą ir jos sklidimą skirtingose aplinkose galima aprašyti keliais parametrais: amplitude, faze, dažniu bei sklidimo krypties vektoriumi. Bangos sklidimo lygtis aprašoma sudėtinga diferencialine išraiška, kuri priklauso nuo pasirinktos koordinatinių sistemos. Paprasčiau aprašyti galima plokščią bangą matomą 1.1 pav., kurios bangos frontas yra plokščias parinktos koordinatės atžvilgiu:

$$u(\vec{x}, t) = \alpha e^{i(\vec{k}\vec{x} - \omega t)}, \quad (1.1.1)$$

kur α aprašo bangos kompleksinę amplitudę, i – kompleksinis skaičius, \vec{k} – bangos sklidimo vektorius, \vec{x} – sklidimo kryptis, ω – bangos dažnis, o t – laikas. Taip aprašomą bangą galima įsivaizduoti kaip toli nuo sferinio bangų šaltinio matuojamą bangos frontą.

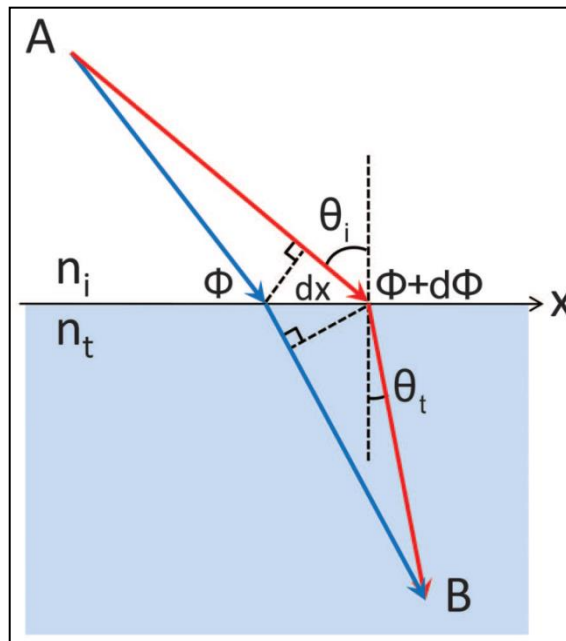


1.1 pav. Plokščios bangos sklidimas k vektoriaus kryptimi. [7]

Erdvėje sklindantis bangos frontas sklinda tiesiai ir tolygiai iki susidūrimo su kitokio lūžio rodiklio terpe. Sandūroje dviejų skirtingomis optinėmis savybėmis pasižyminčių terpių gali pakisti bangos vektoriaus k kryptis, dažnis arba fazė. Šviesos lūžio principus pavaizduotas 1.2 pav. ir aprašomas apibendrintu Snelijaus dėsnium [8] :

$$\sin(\theta_t) n_t - \sin(\theta_i) n_i = \frac{1}{k_0} \frac{d\varphi}{dx}, \quad (1.1.2)$$

kur $\sin\theta_{t,i}$ nurodo kritusios ir lūžusios bangos kampo sinusą, $n_{t,i}$ – abiejų terpių lūžio rodiklius, $\frac{1}{k_0}$ – krintančios spinduliuotės bangos vektorių, o narys už lygybės ženklo aprašo sistemoje atsiradusius netolygius fazės pokyčius.

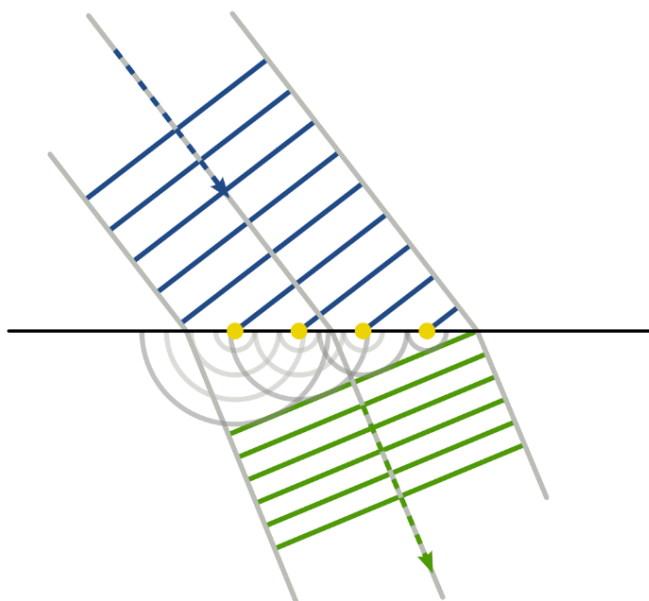


1.2 pav. Šviesos sklidimas dviejų terpių sandūroje. [8]

Toks sistemos aprašymas atsiranda iš Ferma principo – šviesa sklinda trumpiausiu optiniu keliu.

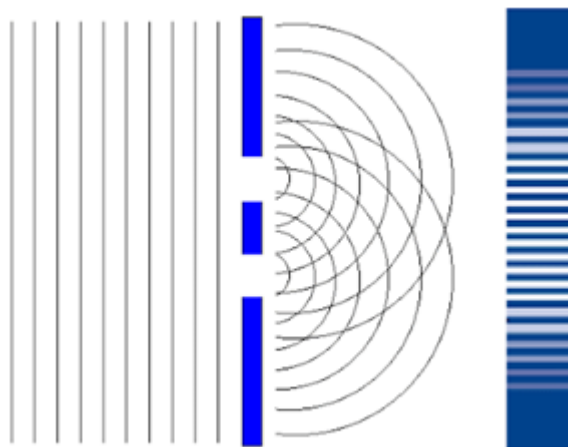
1.2 Bangų difrakcija ir interferencija

Sklindančių bangų kelyje atsiradus kliūčiai, kuri pasižymi skirtingu lūžio rodikliu n nei aplinka, įvyksta difrakcija ir šviesos spinduliai nukrypsta nuo pradinės trajektorijos. Difrakcijos reiškinį galima pagrįsti Hiugenso ir Frenelio principu [9] – kiekvienas sklindančios bangos paviršiaus taškas yra antrinių koherentinių bangų šaltinis. Šis efektas pavaizduotas 1.3 pav.



1.3 pav. Krintančios bangos lūžis ir antrinių sferinių bangų šaltinis. [9]

Susidariusios antrinės sferinės bangos tarpusavyje gali sąveikauti – interferuoti. Tam tikrame taške dvi koherentinės sferinės bangos, priklausomai nuo kelių eigos skirtumo ir jų fazės sutapimo gali interferuoti konstruktyviai arba destruktoriai, kaip nurodyta 1.4 pav. Esant vienodai bangų fazei vaizde bus matomas ryškus taškas, o destruktivos interferencijos atveju – vaizdo nebus matoma.

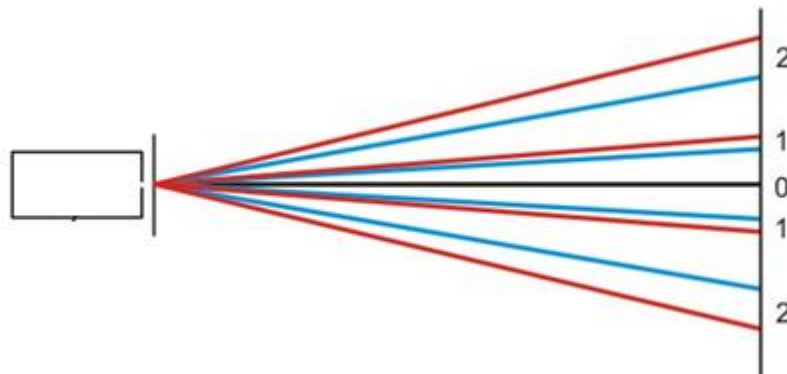


1.4 pav. Dviejų antrinių sferinių šaltinių formuojamas interferencinis vaizdas. [10]

Difrakcijos reiškinys labai dažnai taikomas, kuriant optinius elementus pvz.: apertūra, difrakcinė gardelė. Šviesos fokusavimas lęšiu yra paremtas baigtiniu optinių kelių skirtumu, kur tam tikrame taške bangų fronto fazės sutampa ir interferuoja. Regimosios srities dažnių intervale tai tipiškai daroma su stikliniais lęšiais, kurie padengti dielektrinėmis struktūromis.

1.3 Difrakciniai optiniai elementai

Difrakciniais optiniais elementais vadinamos sistemos, kurios pasitelkia šviesos difrakcijos reiškinį, kad paveiktų bangos sklaidimą. Viena tokių sistemų – 1.5 pav. matoma difrakcinė gardelė.

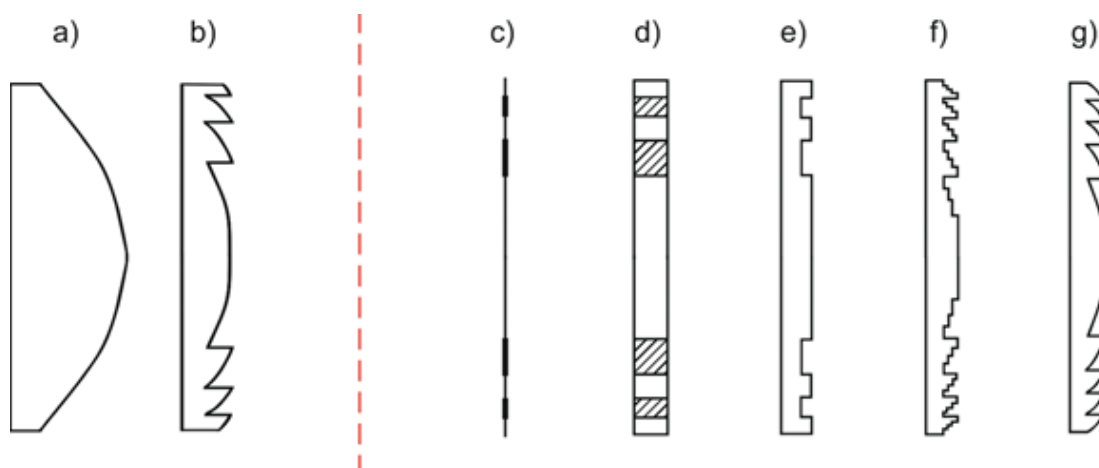


1.5 pav. Difrakcinės gardelės sklaidos schema ir formuojamas vaizdas. [11]

Difrakcinių gardelių formuojamas vaizdas atsiranda dėl interferencijos reiškinio – pro gardelę praėję spinduliai konstruktyviai interferuoja centre, kur matomas didžiausias spinduliuotės intensyvumas, ir vis mažėjančio intensyvumo šoninius maksimumus:

$$n\lambda = d\sin(\theta), \quad (1.3.1)$$

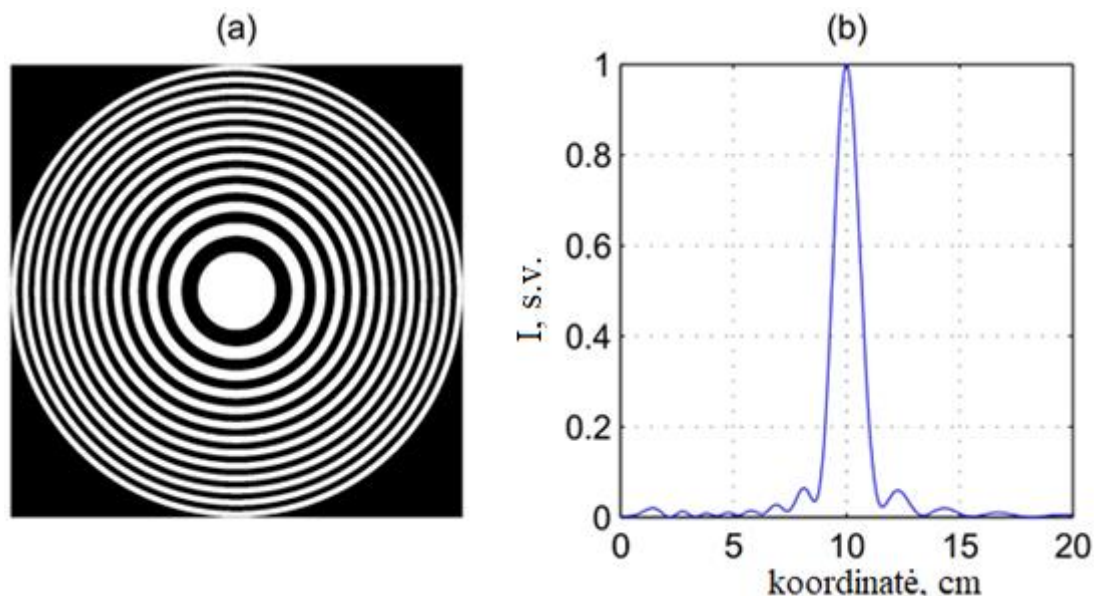
kur n – lūžio rodiklis, λ – bangos ilgis, d – difrakcinės gardelės periodas, o $\sin(\theta)$ – nuokrypis nuo nedifraguojančios spinduliuotės. Tokiomis gardelėmis patogų erdvėje išskleisti arba suspausti spinduliuotės spektrą.



1.6 pav. Atspindžio (a,b) ir difrakciniu (c,d,e,f,g) režimu veikiantys optiniai elementai. [12]

Difrakcijos reiškinį taip pat panaudoja ir zoninės plokštelės matomos 1.6 pav. Elementai nurodyti 1.6 pav. laužia šviesos spindulius tolygiai (a, b) arba kvantuotai keičiant paviršiaus kreivumą – tuo pačiu ir bangos fazę. Ribinis begalinio kvantavimo atvejis 1.6 pav. f) sutampa su tolygaus fazės keitimo lęšiu b). Šie optiniai elementai

naudojami fokusuoti šviesą pasitelkiant difrakcijos reiškinį. Paprasčiausia zoninė plokštelė yra sudaryta iš skaidrių ir neskaidrių koncentrinų žiedų [13], kurie sudėti tokia tvarka, kad centre už tam tikro atstumo būtų matoma fokusuota spinduliuotė.



1.7 pav. Binarinės zoninės plokštelės vaizdas (a) ir intensyvumo pjūvis židinio taške. [14]

1.7 pav. matomos binarinės zoninės plokštelės fokusavimo efektyvumą lemia keli pagrindiniai parametrai – λ – bangos ilgis, f – židinio nuotolis bei N – zonų skaičius. Atstumą tarp skaidrių ir neskaidrių zonų galima apskaičiuoti pagal formulę:

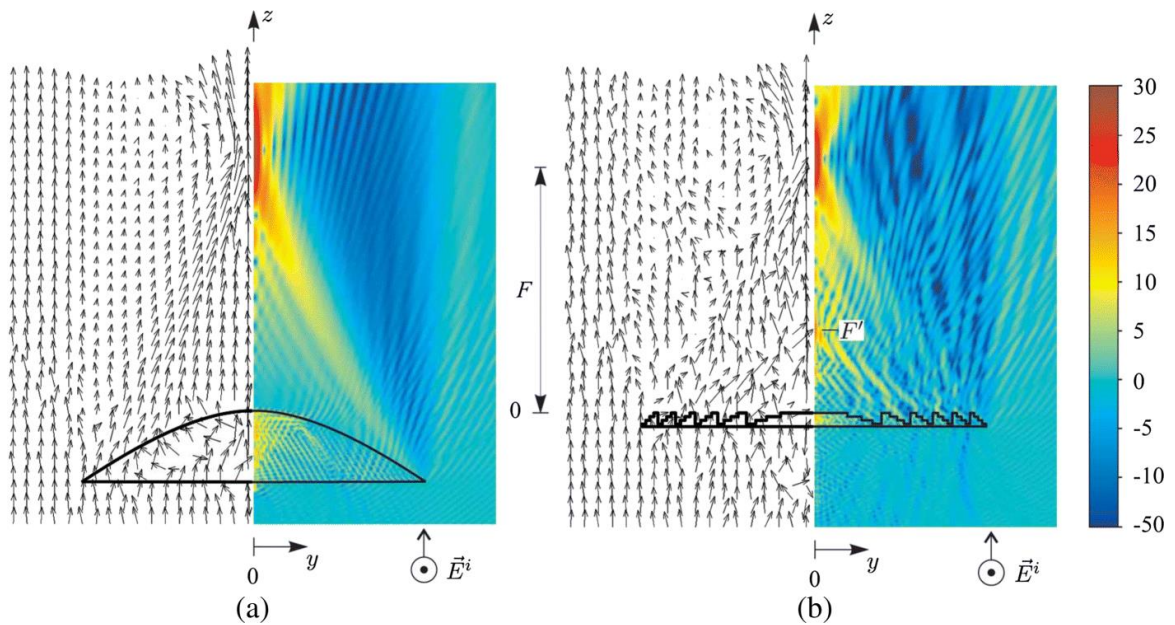
$$r_n = \sqrt{n\lambda f + \frac{1}{4}n^2\lambda^2}, \quad (1.3.2)$$

kur n – skaičius nurodantis zonos numerį [15].

Tokiu principu veikiantis lęšis turi pagrindinį trūkumą – tik spinduliuotei skaidrūs žiedai difraguoja pluoštą, o neskaidrūs atspindi. Tai apriboja zoninės plokštelės praktinį panaudojimą dėl didelio spinduliuotės atspindžio. ,

1.4 Daugialaipnės zoninės plokštelės

Siekiant sukurti lengvesnius, plonesnius bei geriau fokusuojančius lęšius, yra gaminamos daugialaipnės zoninės plokštelės, kurios remiasi fazės postūmio principu. Šie plonasluoksniai lęšiai formuojami diskretiškai keičiant elemento, pro kurį keliauja šviesa, storį. 1.8 pav. Pavaizduotas didelio storo lęšio fokusuojamas vaizdas (a), bei alternatyvios – daugialaipnės zoninės plokštelės spinduliuotės manipuliavimo pjūvis išilgai sklidimo krypties.



1.8 pav. Spinduliuotės fokusavimas hiperboliniu (a) ir daugialaipsne zonavine plokštele (b).

[12]

Tokių daugialaipsnių plokštelių fokusavimo efektyvumas priklauso nuo fazės kvantavimo skaičiaus k , kurių tipinės vertės būna 2, 4, ar 8 [16]. Ši k vertė nurodo į kiek diskretinių fazės keitimo šuolių yra sudalintas vienas plokštelės sluoksnis.

1.5 Metapaviršiai

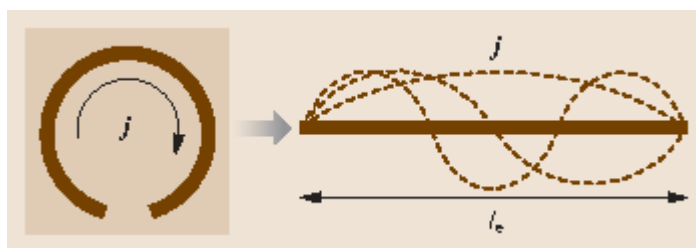
Metapaviršiai – tai dirbtinai gaminami struktūrizuoti paviršiai, atliekantys tam tikras fizikines operacijas. Tipiškai šie paviršiai būna labai ploni – kelis kartus mažesni, nei naudojamas bangos ilgis. Šiuose paviršiuose vyksta sąveika su šviesa labai ploname sluoksnyje, todėl galima išgauti netipinių medžiagai savybių.

Nors tokio struktūrinio dizaino medžiagų gamtoje nesusidaro, jų mikroskopinės savybės panašios į atomo sąveikos su šviesa. Metapaviršiai, kaip ir elektronai atomuose, pasižymi rezonansinėmis sugerties ir spinduliuotės charakteristikomis [17]:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{2\varepsilon l}{m}}, \quad (1.5.1)$$

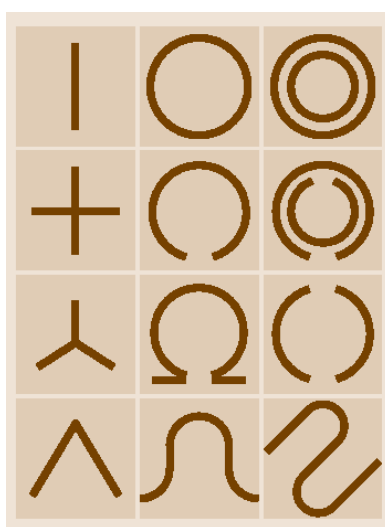
kur ε – sklaidimo terpės dielektrinė skvarba, l – metaatomo kontūro ilgis, m – bangos eilės numeris, o λ_0 – rezonansinis bangos ilgis.

Metapaviršių sudarantys smulkūs elementai gali sugerti, atspindėti šviesą, pakeisti jos fazę ar poliarizaciją. Šios savybės priklauso nuo naudojamo bangos ilgio, bei medžiagos dydžio. Pavienio metaatomo ir jam aktualių parametru pavyzdys pateikiamas 1.9 pav.



1.9 pav. Metaatomo dydžio ryšys su indukuojama srove ir elemento ilgiu. [17]

Taip pat, šių medžiagų savybės sąveikaujant su šviesa priklauso ir nuo medžiagos dizaino. Kuriant poliarizacinius, fazės keitimo ar fokusavimo elementus naudojama nepilni kontūrai pvz.: SRR (angl. *split-ring resonators*), V ar + formos dizainai, kurie matomi 1.10 pav. Norint sukurti dizainą, kuris filtruotų spinduliuotę arba ją praleistų konkrečiame ruože naudojami uždari kontūrų elementai – apvalūs elementai 1.10 pav. viršuje.

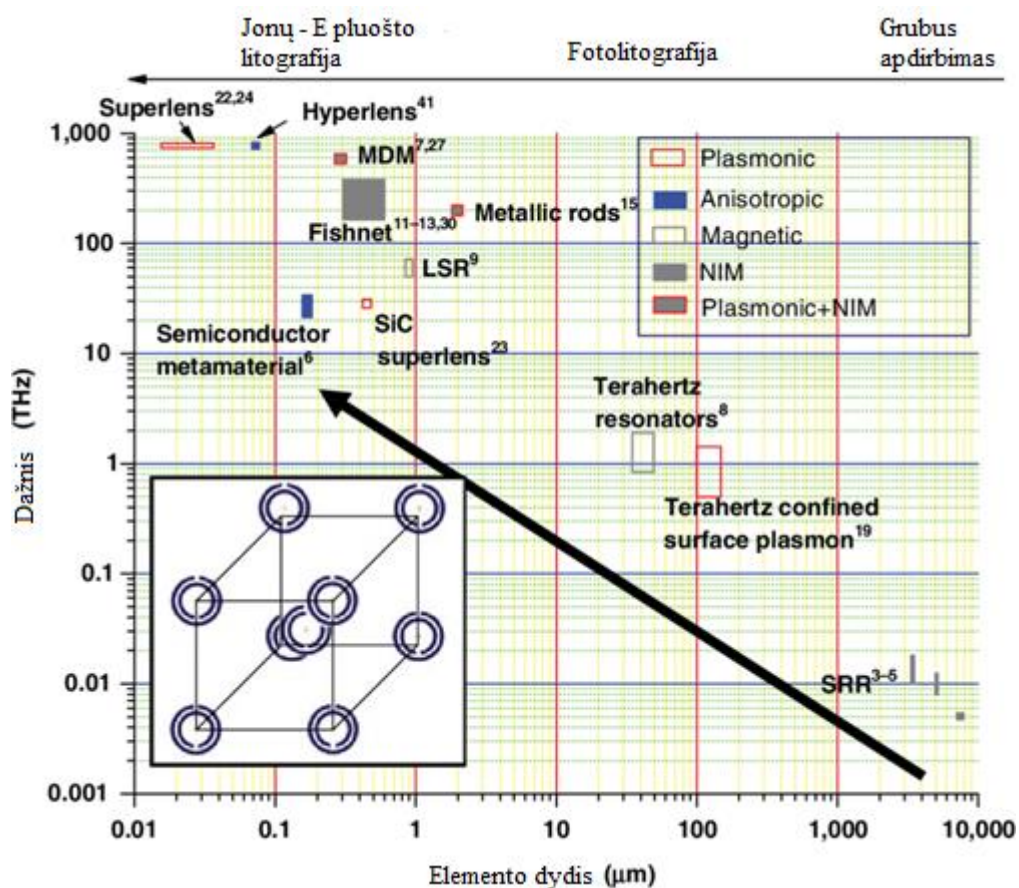


1.10 pav. Metaatomų dizainų įvairovė. [17]

1.6 Metamedžiagų gamyba

Metamedžiagų taikymas priklauso nuo jų veikiamo bangos ilgių ruožo: norint sukurti efektyvų difrakcinį elementą, veikiantį maždaug 0.3 THz, mažiausios struktūros dydis neturėtų viršyti $250 \mu\text{m}$ [18]. Tokį tikslumą pasiekti nebeužtenka naudoti mechaninių staklių ar įprastus 3D spausdintuvus. Vietoje to, aktualu tampa naudoti kitus metodus, kuriant kaukes tinkamos formos metapaviršiams gauti. Vienas iš metodų – fotolitografija [19], kuriuo ant metu yra apšviečiamas kauke uždengtas fotorezisto sluoksnis. Apšvietus šis sluoksnis sukietėja, o neapšviesta substrato dalis yra chemiškai išvaloma. Taip suformuojama struktūra, ant kurios yra garinamas metalas arba įsodinamas paviršius. Nuvalius rezistą, gaunama paruoštas metamedžiagos paviršius. Alternatyvus metodas,

kuriuo galima apdirbti medžiagą – elektronų pluošto litografija [20]. Šiuo metodu magnetais valdomas elektronų pluoštelis nukreipiamas į substratą, kuris naudojamas vietoje UV spinduliuotės [21]. Tolimesnė gamybos eiga, tokia pati, kaip ir fotolitografijoje. Šiuo metodu galima gauti tikslesnes struktūras, tačiau gamybos procesas užtrunka žymiai ilgiau. Įvairių dydžių elementų gamybos technologijas matomas 1.11 pav. iš esmės apibrėžia taikomo dažnio diapazonas ir tuo pat metu metaelemento dydis.



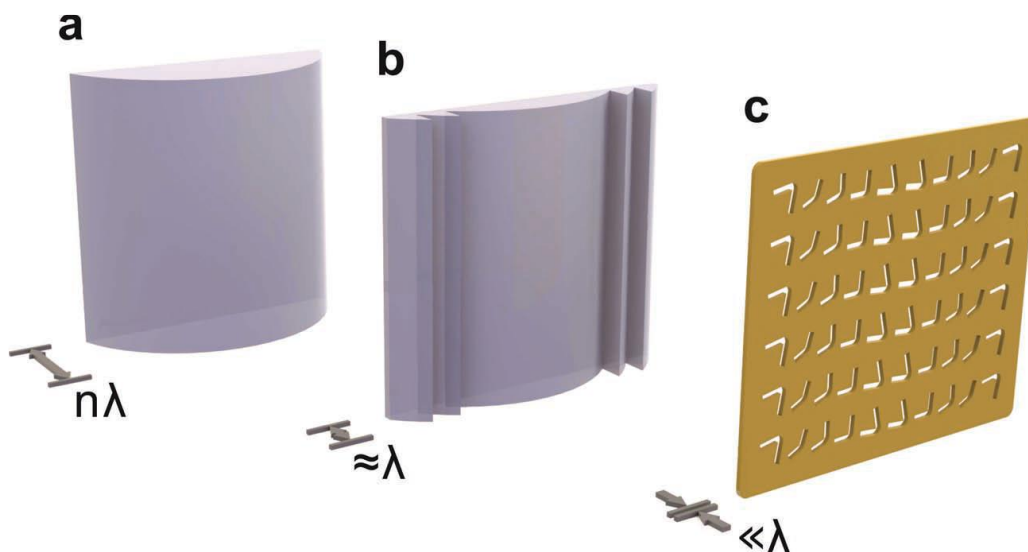
1.11 pav. Metamedžiagos detalių dydžio priklausomybė nuo taikomo dažnių diapazono, bei jų gaminimo technologijos. [18]

Taip pat metamedžiagų skirtingų savybių panaudojimas lemia įtaisus, kurie įprastomis sąlygomis ir gamtoje nematomi pvz.: neigiamo lūžio rodiklio medžiagos, THz filtrai ir t.t.

1.7 Metalėšių savybės

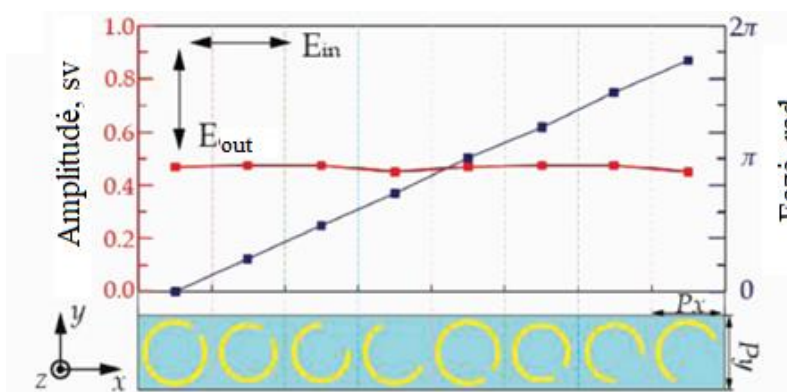
Iš metamedžiagos padaryti optiniai elementai funkciškai veikia taip pat, kaip įprastai naudojama optika. Esminį pranašumą metalėšiai įgyja dėl savo kompaktiškumo – vietoje tipiška naudojamų elementų kurių dydis kelis kartus didesnis nei bangos ilgis, metapaviršiumi padengta optika yra žymiai plonesnė ir dėl to galima optimizuoti optines

sistemas į nedidelius prietaisus. Tai galima pamatyti ir 1.12 pav. kuriame vaizduojami skirtingo storio lęšiai, atliekantys tokią pačią funkciją, tačiau naudojantys skirtingą technologiją.



1.12 pav. Trijų dizainų lęšiai: tipinis storas lęšis (a), Frenelio lęšis (b) ir metalėšis (c) [22]

Metalešiai yra ypač patrauklūs terahercinei spinduliutei – ji gali pakeisti didelių apimčių optiką ir pakeisti viską į plonas, kompaktiškas struktūras. Vienas iš optinio elemento dizaino yra nepilno kontūro žiedas (angl. SSR – split ring resonator), kuris pasuka šviesos poliarizaciją ir bangos fazę ir priklausomai nuo elemento struktūros.

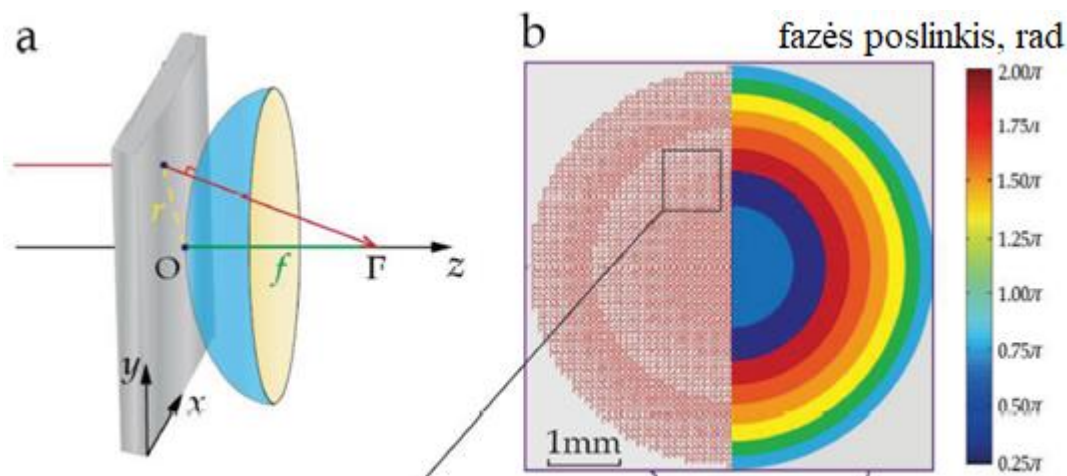


1.13 pav. SSR elemento dizainas ir elementų pralaidumo charakteristikos (b). [15]

1.13 pav. elementus galima panaudoti zoninėje plokštelėje – vietoje skaidrių ir neskaidrių zonų, sudėti elementus pagal kvantavimo lygį keičiančius fazę metapaviršiaus plokštumoje. Šie elementai turi būti išdėstyti tokiais pat atstumais, kaip metalinei zoninei plokštei. Tokia sistema gali turėti kelis fazės kvantavimo lygmenis – pazones, kuriose yra sudėti vienodų parametrų elementai. Metalėšio, matomo 1.14 pav., pasižyminčio keliais kvantavimo lygmenimis zonų pločius galima apskaičiuoti pagal [23]:

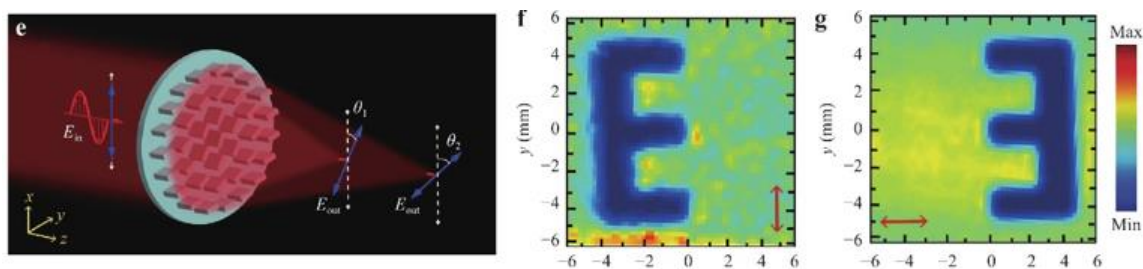
$$r_n = \sqrt{\frac{2n\lambda_0 f}{p} + \left(\frac{n\lambda_0}{p}\right)^2}, \quad (1.7.1)$$

kur n – zonos skaičius, λ_0 – bangos ilgis, f – lęšio židinio nuotolis, o p – pazonių skaičius. Žinoma, tokios sistemos fokusavimo efektyvumą nusako fazės pokyčio tikslumas ir tolydumas.



1.14 pav. Metalėšis sudarytas iš SSR, kurio kvantavimo laipsnis $k = 8$. [15]

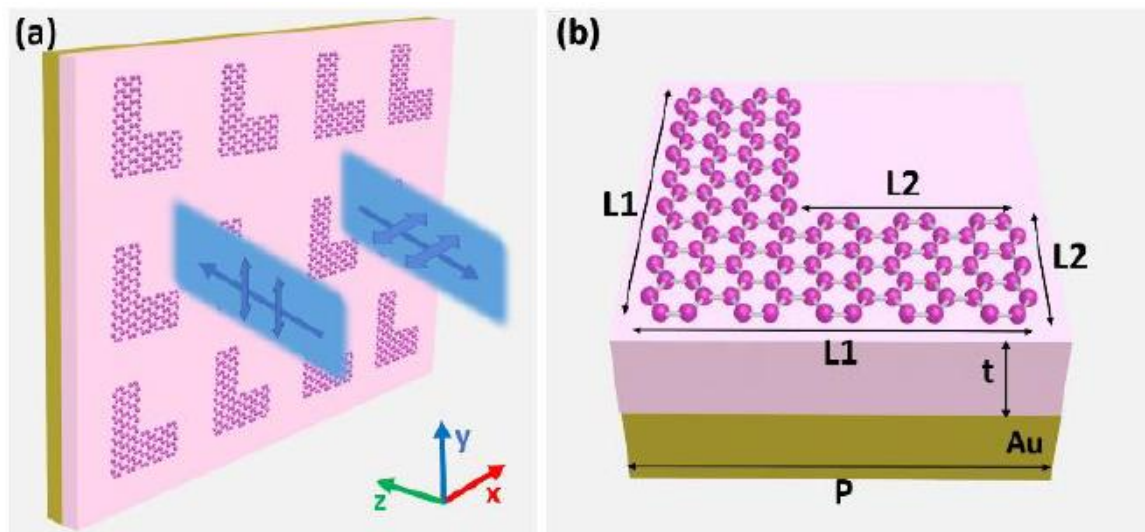
Metapaviršiaus struktūrizavimu galima gauti ir kitokius optinius elementus. Pakeitus zoninės plokštelės dizainą į kitokį pvz.: fibonači seką, galima gauti skirtingų optinių savybių elementus [24], [25]. Terahercinė spinduliuotė ypač aktuali vaizdinimui, todėl vaizdo perdavimo sistemų tikslumas yra ypač svarbus. Metalėšių konstrukciją galima sudaryt taip, kad jų vaizdinimo savybės priklausytų nuo krintančios spinduliuotės poliarizacijos t.y. atėjus skirtingai spinduliuotės poliarizacijai gaunamas skirtingas vaizdas matomas 1.15 pav.[26].



1.15 pav. Metalėšis pernešantis vaizdą, jautrus krintančios šviesos poliarizacijai.

Daugumos gaminamų metapaviršių savybės yra statinės ir jas valdyti yra sudėtinga arba neįmanoma. Šiuo metu yra tiriami ir grafeno pagrindu pagamintos metamedžiagos, kuriose

galima aktyviai keisti savybes [27]. Vienas iš naujai pagamintų, įtampa kontroliuojamas polarizaciją galintis keisti elementas, sudarytas iš grafeno lakštų 1.16 pav.



1.16 pav. Polarizaciją sukantis elementas, $\frac{\lambda}{2}$ plokštelė [27].

1.16 pav. pavaizduoto elemento veikiantis dažnių diapazonas gali būti varijuojamas keičiant grafeno Fermi lygmenį, keičiant įtampą medžiagoje.

2 Modeliavimo ir gamybos metodika

Šiame skyriuje bus aptarta pasirinkta modeliavimo metodika, programinė įranga, jos veikimo principas, modeliuotų ir pagamintų metalėšių maketai bei pristatytos gamybos technologijos.

2.1 Programinė įranga

Modeliavimams atlikti buvo pasitelkta CST Studio Suite programinę įrangą ir jos programiniu paketu CST Microwave Studio. Programoje vykdomi skaičiavimai pagrįsti Maksvelo lygčių sprendimu kiekviename suskirstytame erdvės taške skaičiuojant elektrinius bei magnetinius lauko vektorius įvairiomis kryptimis. Pagrindis naudojamas modelio skaičiavimo principas gauti rezultatus – baigtinių integracijų laiko skalėje metodas - FIT (angl. *Finite Integration Technique*).

2.2 Baigtinių integracijų laiko skalėje metodas - FIT

FIT metodu tiriama įvairių struktūrinių komponentų sąveika su elektriniu ir magnetiniu lauku pasirinktuose erdvės taškuose bei skirtingais laiko momentais. Tokia metodika leidžia norimu tikslumu ištirti didelių modelių, kuriuos gali sudaryti maži komponentai, įtaką krintančiai spinduliuotei. Skaičiavimai atliekami, pasitelkiant Maksvelo lygtis integralinėje formoje:

$$\oint_{\delta A} E dS = - \int_A \frac{\delta B}{\delta t} dA \quad (2.2.1)$$

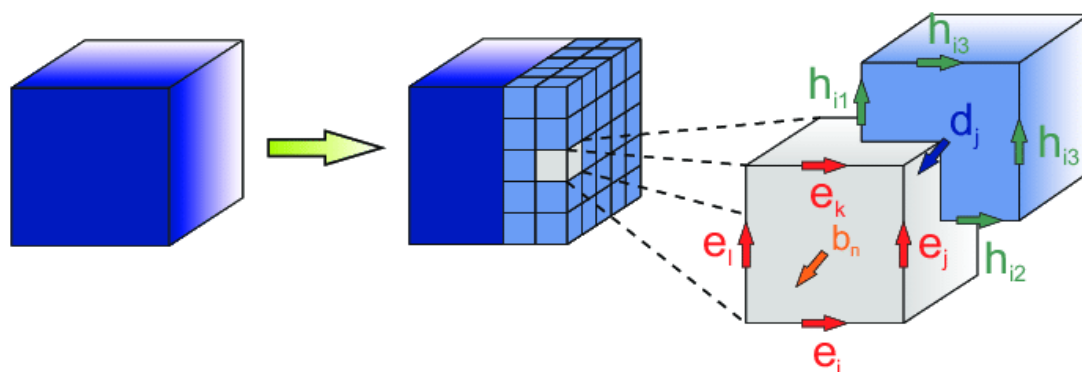
$$\oint_{\delta V} D dA = - \int_V \rho dV \quad (2.2.2)$$

$$\oint_{\delta A} H dS = - \int_A \left(\frac{\delta B}{\delta t} + J \right) dA \quad (2.2.3)$$

$$\oint_{\delta V} B dA = 0 \quad , \quad (2.2.4)$$

kur E – elektrinio lauko stiprio vektorius, S – sritį ribojančios 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, o J – laidumo srovės vektorius.

Pasitelkus Maksvelo lygtis elektrinio bei magnetinio lauko vektoriai yra skaičiuojami vienetinėse celėse, kurios yra sudalintos visuose erdvės taškuose, kaip nurodyta 1.17 pav. Modeliavimo tikslumas užduodamas parenkant parametraž – celių skaičius tenkantis vienam bangos ilgiui.

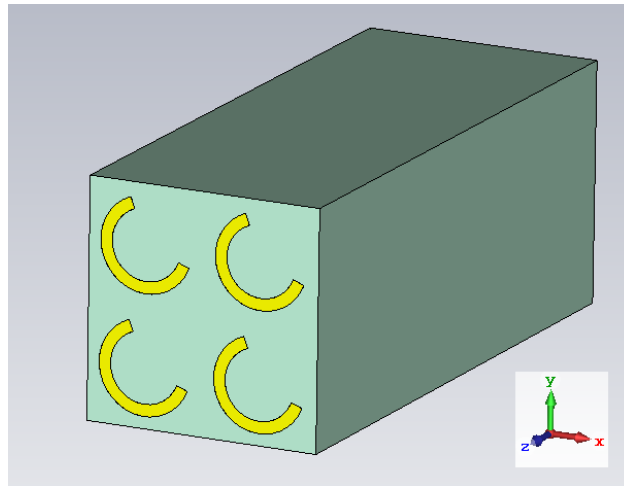


1.17 pav. Erdvės suskirstymas į vienetines celes ir vienoje celėje esantys elektrinis bei magnetiniai laukai. [28]

Tiriant kompleksinių struktūrų sąveikas su elektromagnetiniu lauku svarbu nustatyti tinkamas kraštines sąlygas. Įprastai anksčiau minėtų Maksvelo lygčių integralai skaičiuojami apibrėžus erdvės taškus. Šiuo atveju buvo naudoti du tipai kraštinių sąlygų:

- Atviros (angl. *open*) – modeliuojama erdvė baigiasi ties užduotos struktūros ilgiu,
- Atviros su pridėta erdve (angl. *open – add space*) – modeliavimo erdvė yra pratęsiama užduotu atstumu arba, kad tilptų sveikas bangos ilgių skaičius.

Pavienių metaelementų struktūrinis modelis pavaizduotas 1.18 pav., kuriame matome erdvėje nukreipti vektoriai.



1.18 pav. Modelio pavyzdys, su erdvėje nukreiptais vektoriais.

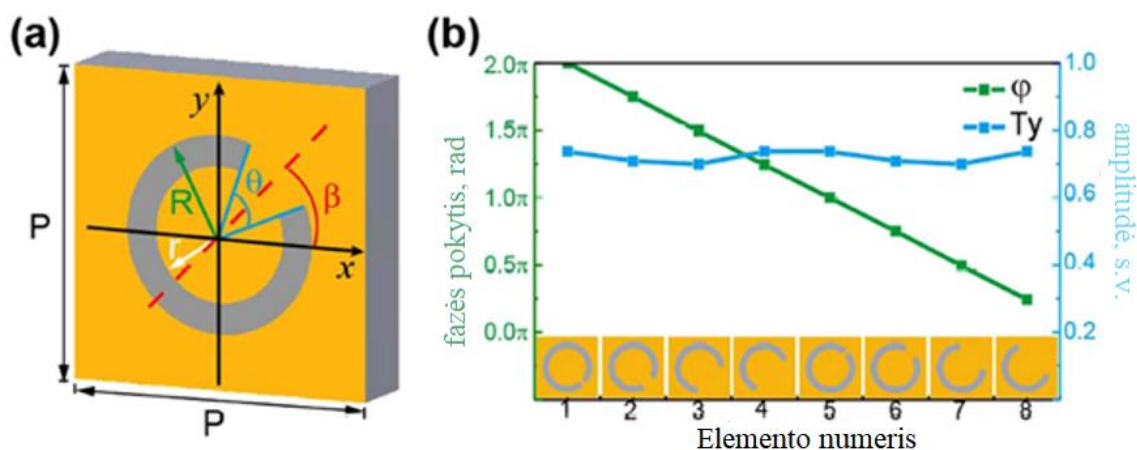
Siekiant sumažinti modelio dydį bei skaičiavimo trukmę prie kraštinių sąlygų buvo apibrėžtos ir simetrijos plokštumos: dėl modelio savybės keisti krintančios bangos poliarizaciją buvo pasirinkta nustatyti elektrinio lauko vektorių $E = 0$ xz plokštumoje, o magnetinio lauko vektorių $H = 0$ yz plokštumoje. Simetrijos įvedimas modelyje sumažina uždavinio skaičiuojamus taškus 4 kartus.

2.3 Fazinio elemento modelis

Naudojantis CST Microwave Studio programoje esančiomis funkcijomis buvo sumodeliuoti keli fazinių elementų variantai. Pagal anksčiau padarytus modelius [15], [29], [30] buvo sukurti pavienių fazę keičiančių elementų dizainai. C raidės formos elementų dizainą galima parinkti dviem būdais:

- 1) Ant padėklo medžiagos garinamas plonas sluoksnis C raidžių elementų
- 2) Ant padėklo yra užgarinamas plonas sluoksnis metalo, kurio paviršius yra išsėdinamas pagal C formą – invertuotas dizainas.

Šie elementai priklausomai nuo pasukimo kampo keičia fazės dydį ir yra jautrūs spinduliuotės poliarizacijai – krintančią poliarizaciją suka 90° kampu.



1.19 pav. Difrakcinis elementas ir jį aprašantys parametrai (a) ir elementai, kurie tolygiai keičia fazę nuo 0 iki 2π (b). [29]

C raidės formos elementus aprašo keli pagrindiniai parametrai: r – vidinis spindulys, R – išorinis spindulys, θ – skėsties kampas, β – kampas su x ašimi ir P – narvelio periodas. Tipiškai šie elementai yra naudojami 0.6 THz spinduliuotei fokusuoti [15], [31] pasitelkiant parametrų vertes: $r = 30 \mu m$, $R = 40 \mu m$, $P = 100 \mu m$, antenoms, kurių numeriai 1-4 $\beta = -45^\circ$, o skėsties kampai $\theta = 10^\circ, 35^\circ, 100^\circ, 132^\circ$ atitinkamai. Antenos, sužymėtos numeriais 5-8 skiriasi kampu $\beta = 45^\circ$, o parametras $\theta = 10^\circ, 35^\circ, 100^\circ, 132^\circ$ išlieka toks pat, kaip ir prieš tai minėtiems elementams. Siekiant pagaminti elementus optimaliai veikiančius 0.3 THz dažnio diapazone buvo modifikuoti antenų parametrai: $r = 70 \mu m$, $R = 86 \mu m$, $P = 200 \mu m$. Šie modeliai buvo apskaičiuoti plokščiai bangai krintant į bandinį Z kryptimi, kurios elektrinio lauko poliarizacijos vektorius nukreiptas X kryptimi, o magnetinio lauko vektorius H nukreiptas Y kryptimi. Už bandinio matuojamas elektrinio lauko vektoriaus Y kryptimi fazės pokytis, lyginant su struktūra, kurioje nėra difrakcinių elementų. Galų gale gaunami 4 elementai keičiantys bangos fazę nuo 0 iki 2π 0.3 THz spinduliuotei.

2.4 Metalėšio modelio programa

Metalėšio konstrukcija buvo automatizuota pasitelkiant CST Studio Suite programos „macro“ funkcija, kuri veikia VBA (angl. *Visual Basic for Application*) aplinkoje. Kuriant kodą yra svarbu aprašyti pradinius parametrus, funkcijas bei šiuo atveju medžiagas, metalėšio gamybai. Šios programos pradžioje apibrėžiami visi kintamieji, kurie bus reikalingi norint parinkti ir sudėti elementus į tinkamas pozicijas, bei apskaičiuoti zonų spindulius. Kode naudojami kintamieji yra skelbiami dviem būdais: vieši (angl. *public*),

kuriuos galima pasiekti bet kurioje programos funkcijoje ir lokalūs (angl. *local*), kurių vertės prieinamos tik tai funkcijai, kurioje buvo deklaruota. Tipiškai šiame kode naudojami kintamieji yra aprašomi „double“ ir „string“ tipais, kuriais galima aprašyti įvairius skaičiavimams aktualius matricos elementus ir tekstinių failų pavadinimus. Skaičiuojami parametrai deklaruojami kaip „double“ tipo, kurie šio kodo taikymams tiksliai apibrėžia skaičiuojamus dydžius. Programoje yra automatizuotas zonų skaičiavimo uždavinys, kuriame pagal formulę (1.7.1) apskaičiuojamos tikslios zonų pozicijos.

```
size=zonuN*pozoniun
  For ss=1 To size-1
      zonosSk(ss) = Sqr(2*(ss)*lambda0*Focall/pozoniun +
((ss)*lambda0/(pozoniun))^2)
  Next
```

1.20 pav. Ciklas, kuriame apskaičiuojami zonų pločiai.

1.20 pav. pateiktas ciklas, kuriame suskaičiuojami zonų pločiai, priklausantys nuo įvairių parametrų: size – aprašo zonų ir pozonių skaičių sandaugą, o kiti kintamieji atitinka formulėje (1.7.1) esančius dydžius. Atlikus skaičiavimą gaunama vienos dimensijos matrica, kurios kiekvienas elementas atitinka naujos zonos spindulį.

Modeliuojant metalęšį svarbu naudoti kelias funkcijas, kad optimizuotume kodo greitį. Modelyje naudojami difrakciniai elementai pradžioje yra sukuriami kaip atskiri objektai, t.y. kiekvienas fazę keičiantis elementas yra padėtas į struktūros centrą. Kode pradinis objektų išdėstymas aprašomas per funkciją „BuildC“, kuri priklauso nuo dviejų kintamųjų:

- a) „Ctheta“ – nurodo C raidės skėsties kampą.
- b) „Cbeta“ – parametras aprašantis C raidės posūkį X ašies atžvilgiu.

Susikūrus visus reikalingus objektus bei žinant zonų ribas ir tinkamus fazinius elementus, juos galima dėti į metalęšį. Antenų parinkimas ir jų išdėstymas ant padėklo vykdomas pasinaudojant dviem funkcijomis: „KoksC“, kuri parenka tinkamą elementą bei „PlaceC“, kuri atitinkamą komponentą kopijuoja į nurodytą koordinatę.

```

Function KoksC (skaiciu As Integer)
    Dim kampai(1) As Integer
    Dim Ckampai(3) As Integer
    Ckampai(0) = 10
    Ckampai(1) = 132
    Ckampai(2) = 100
    Ckampai(3) = 30
    Dim Crotac (1) As Integer
    Crotac(0) = 45
    Crotac(1) = -45
    skaiciu=skaiciu+1
    If skaiciu Mod 2 = 0 Then
        kampai(0)=Ckampai(2)
        kampai(1)=Crotac(1)
    ElseIf skaiciu Mod 2 = 1 Then
        kampai(0)=Ckampai(2)
        kampai(1)=Crotac(0)
    End If
    KoksC = kampai
End Function

```

1.21 pav. Funkcija „KoksC“, kuri parenka difrakcinį elementą ir grąžina parametrus.

Funkcija „KoksC“ yra skirta parinkti tinkamą C elementą ir grąžinti parametrus θ ir β . Elementas išrenkamas panaudojant „Mod“ operatorių, kuris skaičiuoja liekaną nuo pasirinkto skaičiaus. 1.21 pav. rodoma lęšio, kur kvantavimo laipsnis $k = 2$ elementų parinkimą nuo zonos skaičiaus. Kadangi šiuose lęšiuose parametrai kinta periodiškai, galima paprastai išskirti tinkamą elementą ir grąžinti vertes.

```

Function PlaceC (x, y, ctheta, cbeta As Integer)
    Dim b, a As String
    vardas="C" & CStr(ctheta)
    komponentas="component_tht" & CStr(ctheta) & "_beta" & CStr(cbeta)
    With Transform
        .Reset
        .Name komponentas & ":" & vardas
        .Vector "P*" & CStr(x), "P*" & CStr(y) , "0"
        .UsePickedPoints "False"
        .InvertPickedPoints "False"
        .MultipleObjects "True"
        .GroupObjects "False"
        .Repetitions "1"
        .MultipleSelection "False"
        .Destination ""
        .Material ""
        .Transform "Shape", "Translate"
    End With

```

1.22 pav. Funkcija „PlaceC“, kuri kopijuoja komponentą į nurodytas koordinates x, y.

Kita funkcija – „PlaceC“, kuriai reikalingi keturi parametrai: x ir y koordinatės elementui, kurio kampai ctheta ir cbeta. Apačioje objektas „With Transform“ yra pakartojamas dar tris kartus, kad kopijuotų elementą koordinačių ašies ketvirčiuose.

Galiausiai, norint sudėti visus elementus į zonas, naudojami du ciklai, kurie skenuoja koordinatę x ir y kryptimis ir dėlioja pavienius elementus pagal kintamojo koordinatę.

```
numbr1=0
For i=0 To r/P
  numbr2=0
  If i>zonosSk(numbr1)/P Then
    numbr1=numbr1+1
  End If
  For j=0 To r/P
    rvid= Sqr(i^2 + j^2)
    If rvid<zonosSk(9)/P Then
      If rvid>zonosSk(numbr1+numbr2)/P Then
        numbr2=numbr2+1
      End If
      Ckamp=KoksC(numbr1+numbr2)
      PlaceC(i, j, Ckamp(0), Ckamp(1))
    End If
  Next
Next
```

1.23 pav. Ciklas, skenuojantis kiekvieno elemento poziciją x ir y kryptimis.

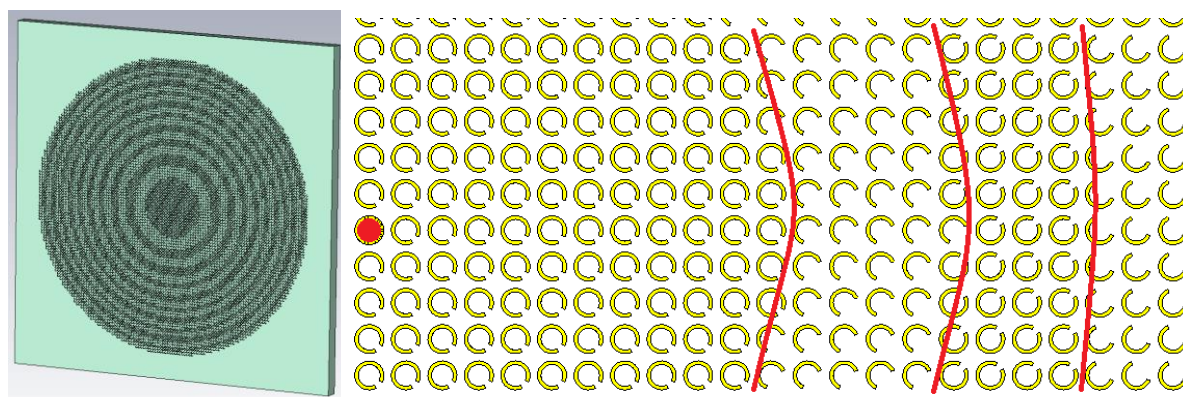
1.23 pav. „For“ cikle skenuojamos visos koordinatės, patenkančios į lęšio spindulį. Zonos numeris parenkamas lyginant prieš tai suskaičiuotos zonos spindulį su skenuojančios koordinatės verte. Jeigu kintama koordinatė didesnė už matricoje esantį zonos radialinę vertę, tuomet skaitiklis „numbr1“ arba „numbr2“ padidėja. Taip keliaujama per visas apskaičiuotas zonas, kol gaunamas pilnai sudėtas lęšis.

Siekiant optimizuoti difrakcinio elemento modelio C raidžių išdėliojimo trukmę pasinaudojama papildoma funkcija – ScreenUpdating „False“ – kuri išjungia elementų vaizdavimą kol sudedami visi elementai lęšyje. Taip pat, norint modeliuoti kelis lęšius keičiant vieną ar kelis parametrus buvo kurtas ciklas, kuriame modeliuojami pavieniai lęšiai ir jų gautos elektrinio lauko stiprio priklausomybės eksportuojamos į kodo pradžioje apibrėžtą aplanką. Sėkmingai sumodeliavus difrakcinį optinį elementą programa parenka kitus eilėje esančius parametrus ir pradeda parametrų skaičiavimo bei metaelementų išdėliojimą. Tokiu būdu naudojantis programa galima modeliuoti metalęšius, pasižyminčius skirtingais parametrais.

2.5 Metalęšių dizainai

Pasinaudojus 2.4 skyriuje aptartu kodu, galima sukurti įvairių rūšių metalęšių dizainus. Paleidus programą svarbu surašyti reikalingus parametrus, kad gautume teisingas C raidžių formas ir kampus. Šio darbo tikslams pasirinkti modeliuoti lęšiai pasižymintys

parametrais: zonų skaičius $N=3$, kvantavimo skaičius $k=4$. Zonų skaičius pasirinktas siekiant neviršyti spinduliuotės skersmens – 1.5 cm, taip pat dėl lęšio kompaktiškumo, o kvantavimo skaičius $k=4$, kad eliminuoti daugiau kintamųjų dėl tikslių fazės skirtumų naudojant elementus netipiniame dažnyje. Kadangi literatūroje nėra optimizuotų metalelemento parametrų naudojant 0.3 THz spinduliuotę, modeliavimo būdu, ieškant didžiausio elektrinio lauko intensyvumo židinyje, rastos parametrų vertės: $r_1=70 \mu\text{m}$, $r_2=86 \mu\text{m}$ ir $P=200 \mu\text{m}$. Tikslūs fazinių elementų skėsties ir nuokrypio kampai buvo įvedami programoje. Židinio plokštumos 0.3 THz tyrimams pasirinktos $F=2;4;8 \text{ mm}$, kad pagaminti ypač arti fokusuojančius optinius elementus. Vienas pavyzdinis lęšis, gaunamas paleidus kodą pavaizduotas 1.24 pav. Metalėšis sudarytas iš auksinių elementų, kurie sudėti į koncentrinį žiedų sistemą pagal jų fazės posūkio dydį. 1.24 pav. lęšis, kurio kvantavimas $k = 4$, sudaro žiedai, kurių kampai $\beta = -45^\circ, 45^\circ$, o parametras $\theta = 35^\circ, 132^\circ$. Taip pat, difrakciniai elementai yra sudėti ant silicio padėklo, kuris matomas žalia spalva nuotraukoje.

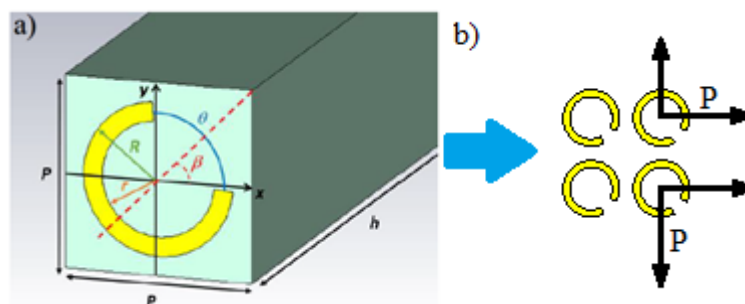


1.24 pav. Programos suformuotas metalėšis, kurio kvantavimo skaičius $k = 4$ (kairėje) ir metalėšio vidinė struktūra, kurioje raudonu apskritimu pažymėtas lęšio centras, o raudonomis linijomis pazonių ribos (dešinėje).

Parinkus tinkamus parametrus modeliavimui:

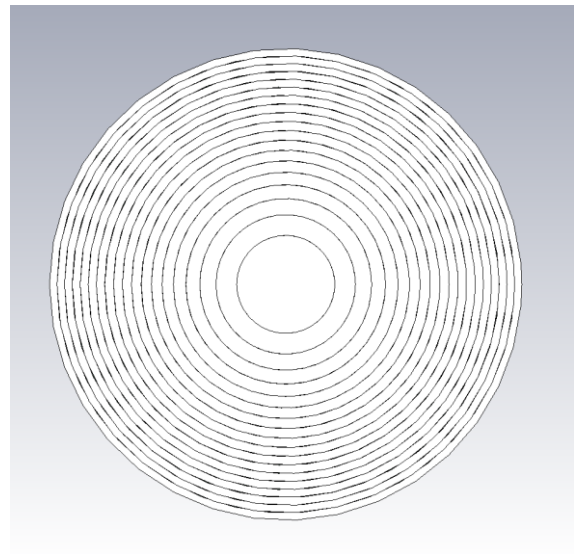
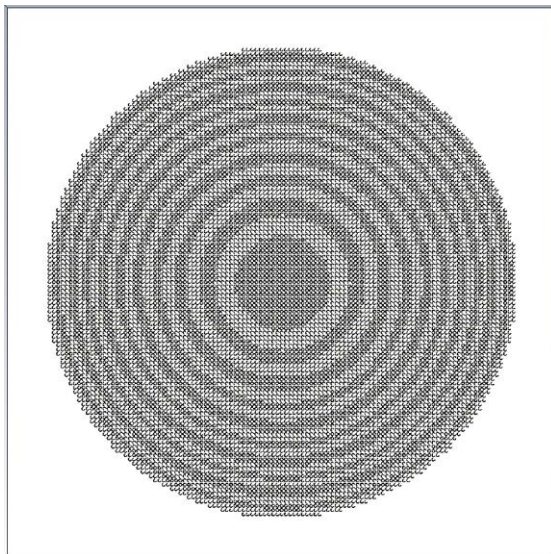
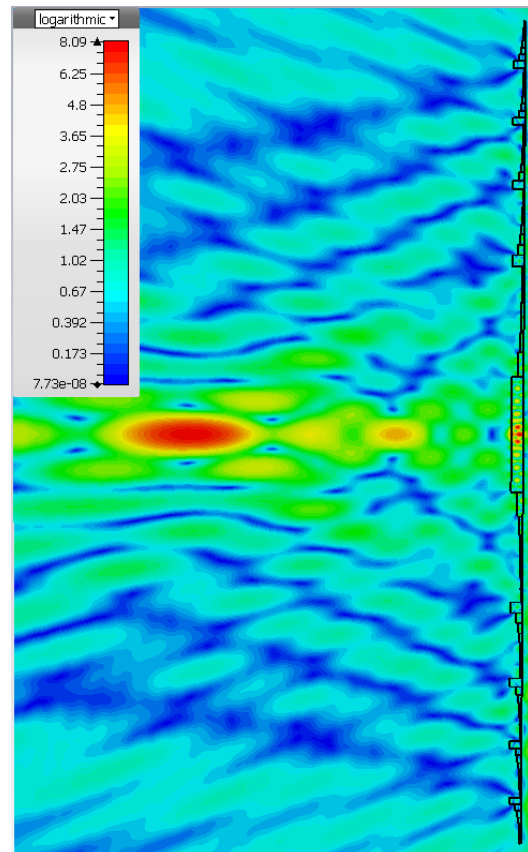
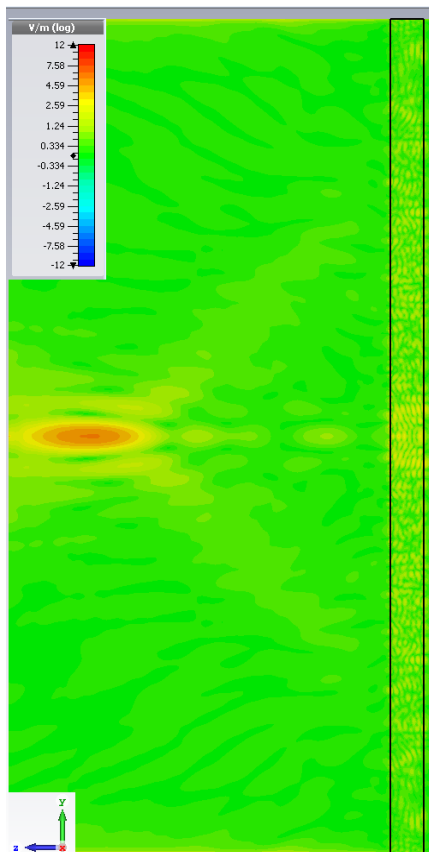
- a) Modeliavimo dažnis – 0.3 THz
- b) Modeliuojama erdvė – padėklo plokštuma 9 mm gylyje
- c) Kraštinės sąlygas – atviro galo su pridėta erdve, bei simetrijos sąlygos elektriniam laukui XZ plokštumoje $E=0$, bei magnetiniam laukui YZ plokštumoje $H=0$.
- d) Skaičiavimo įrenginių skaičių – priklausomai nuo procesoriaus branduolių ir gijų skaičiaus, šiuo atveju – 16,

galima paleisti programos skaičiavimą elektriniams laukams. Šiame darbe iš viso buvo sumodeliuoti 6 metalėšiai ir 3 Frenelio lęšiai. Principinė lęšio sudėjimo schema pavaizduota 1.25 pav.



1.25 pav. Vieno elemento modelis ir jį aprašantys parametrai (a) ir elementų išdėliojimas lęšyje (b).

Programai baigus elektrinio ir magnetinio laukų vektorių skaičiavimui galima nagrinėti gautus rezultatus. Vienas iš būdų greitai patikrinti, ar gaunamas fokusavimas lęšiu – pasinaudoti VBA aplinkoje esančia funkcija „3D fields on a 2D plane“. Sumodeliuoto metalėšio ir zoninės plokštelės elektrinio lauko logaritminiame mastelyje pjūvio nuotraukos ZY plokštumoje parodytos 1.26 pav.



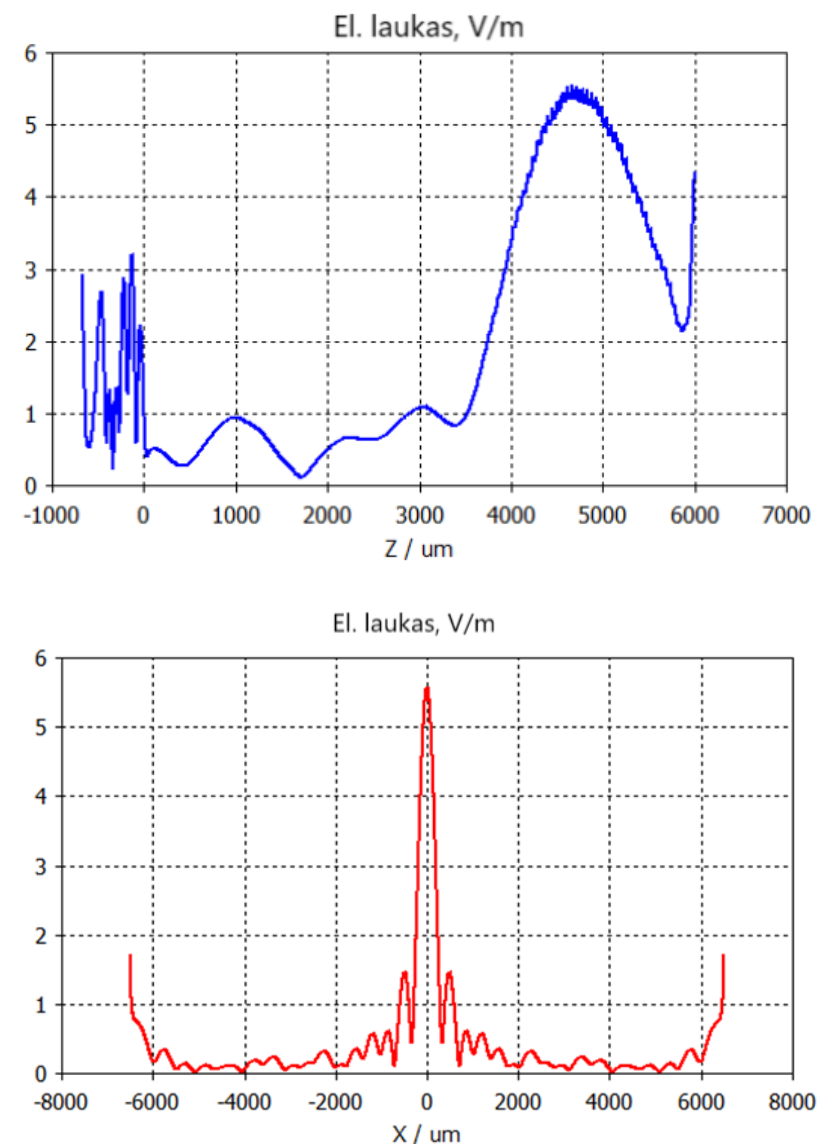
1.26 pav. Metalėšio (kairėje) ir Frenelio lėšio (dešinėje), sudaryto iš $N = 3$ zonų ir $k = 4$ elektrinio lauko pjūvio vaizdas logaritminiame mastelyje ZY plokštumoje (dešinėje) bei atitinkamų lėšių realios nuotraukos apačioje.

Metalešiu modeliuose tiriama elektrinio lauko vektorius pasuktas 90° lyginant su kritusios bangos: plokščiai bangai vektorius nukreiptas X kryptimi, o matuojamas laukas Y kryptimi. Gilesnė metalėšiu analizė atliekama pasinaudojus CST Studio „Template Based Post

Processing“, kurioje vaizduojamas elektrinio lauko intensyvumo priklausomybė nuo koordinatės. Intensyvumo skirstiniai matuojami dviem koordinatėmis:

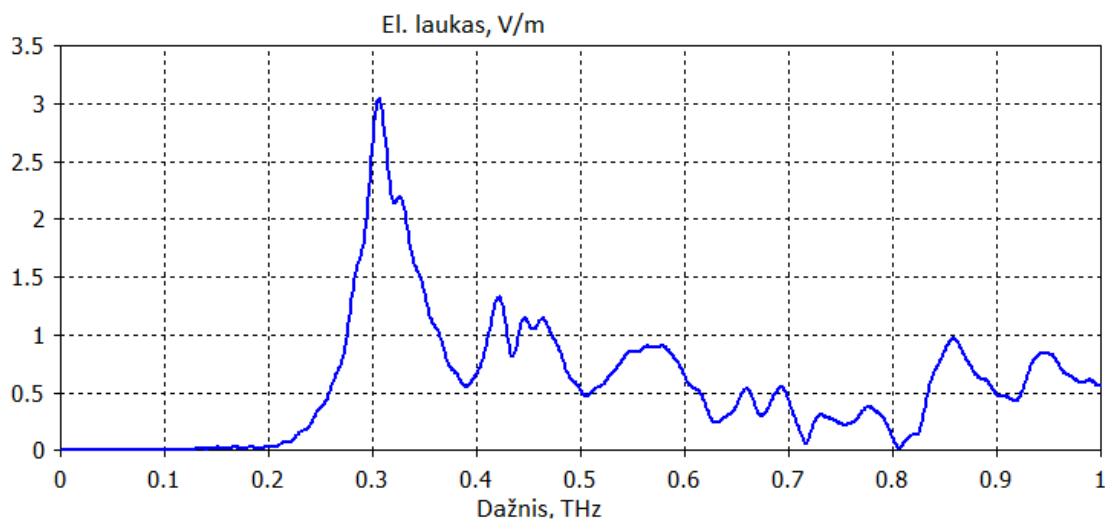
- 1) Išilgai bangos sklidimo krypties – Z kryptimi
- 2) Fokusavimo plokštumoje, kur matomas didžiausias intensyvumas – X kryptimi.

Programoje matomi matavimų rezultatai parodyti 1.27 pav., kuriame matomi metalėšio, kurio kvantavimo laipsnis $k = 4$, elektrinio lauko intensyvumo skirstiniai esant 0.3 THz žadinančiai spinduliuotei.



1.27 pav. Metalėšio, kurio kvantavimo skaičius $k = 4$ intensyvumo skirstinys išilgai bangos sklidimo krypties (viršuje) ir pjūvis fokusavimo plokštumoje, kai $Z = 4666 \mu\text{m}$, matuojant X kryptimi (apačioje).

Modelyje papildomai įvedamas elektrinio lauko intensyvumo priklausomybės nuo bangos dažnio matuoklis. Iš šių matavimų galima patikrinti, ar modeliuojamas lęšis veikia optimaliai t.y. ar gaunamas didžiausias elektrinio lauko intensyvumas prie taikomo dažnio – šiuo atveju 0.3 THz. Šis matavimas matomas 1.28 pav., kur X ašyje pavaizduota žadinamos bangos dažnis, o Y ašyje elektrinio lauko vertė židinio taške $Z = 4666 \mu\text{m}$ pavaizduota V/m.



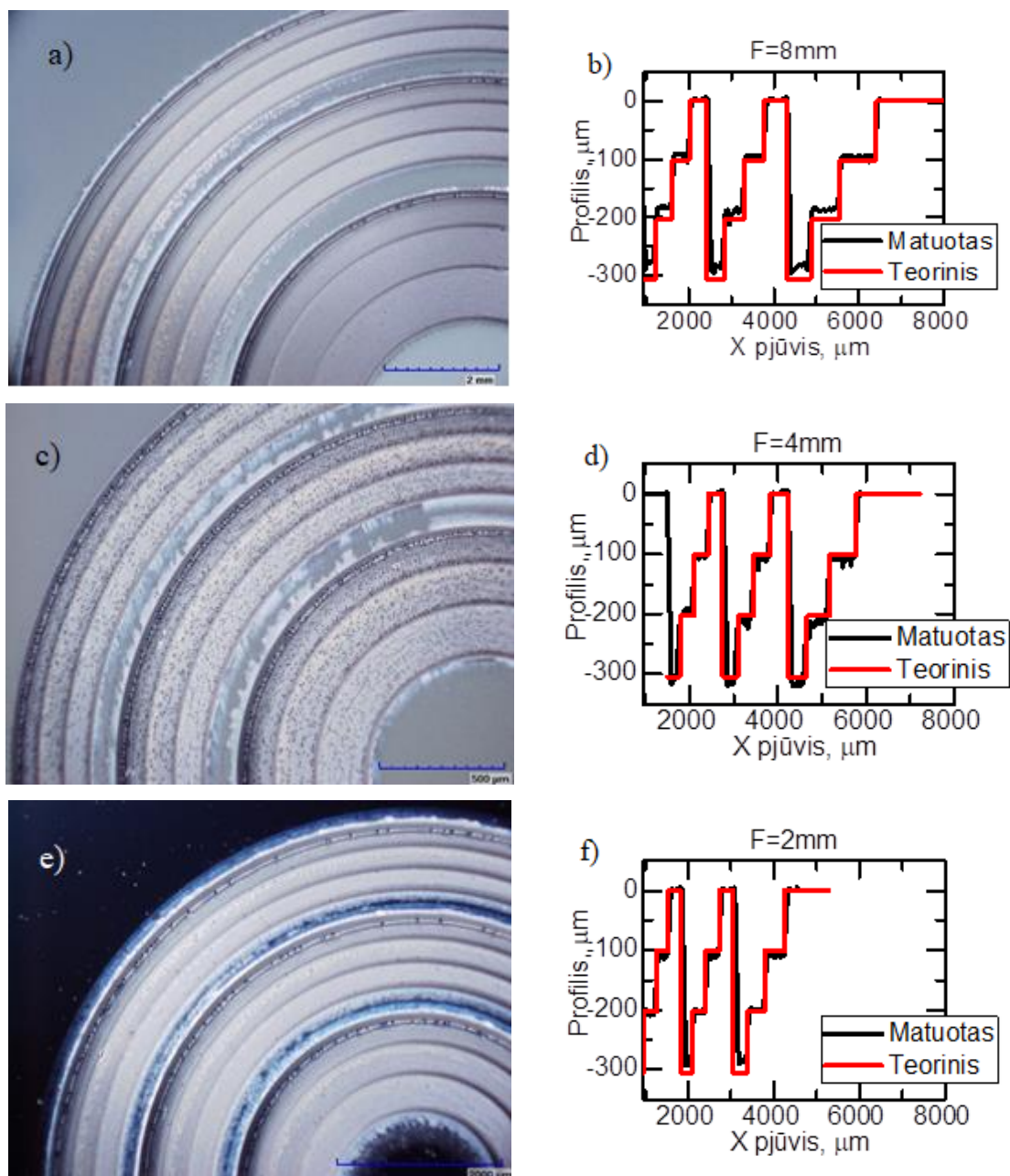
1.28 pav. Elektrinio lauko intensyvumo priklausomybė nuo žadinančios bangos dažnio taške $Z = 4666 \mu\text{m}$, $X = 0 \mu\text{m}$ ir $Y = 0 \mu\text{m}$.

Verta paminėti, jog naudojantis šia programine įranga galima matuoti ir daugiau elektrinio lauko parametrų, tačiau šio tyrimo tikslams bus lyginami pagrindiniai fokusavimo parametrai, keičiant lęšio židinio nuotolį F , bei kuriant skirtingo dizaino elementus.

2.6 Lęšių gamybos technologijos

Šiame darbe tiriami 3 dizainų lęšiai sudaryti iš skirtingų padėklų medžiagų ir paviršiaus apdirbimo technologijų. Frenelio zonines plokšteles sudaro $d = 500 \mu\text{m}$ storio ir $n = 3.46$ lūžio rodiklio silicio padėklas, kuriame išabliuojami grioveliai tolygiai keičiantys THz bangos fazę. Lazerinės abliacijos metodu femtosekundine spinduliuotė krinta į bandinio paviršių, kuri sąveikauja tik su pažeidžiamąja zona. Frenelio lęšio gamybai realizuoti buvo naudojamas Pharos SP (Light Conversion) femtosekundinis lazeris pasižymintis maksimalia galia $P = 6 \text{ W}$, $\lambda = 1030 \text{ nm}$ bangos ilgiu ir $f = 4 - 200 \text{ kHz}$ veikimo dažniu. Siekiant tiksliai apdirbti silicio paviršių naudojama trumpiausia impulso trukmė $\tau = 156 \text{ fs}$, $P = 5 \text{ W}$ vidutinė galia ties 50 kHz , tad į bandinį krintančių

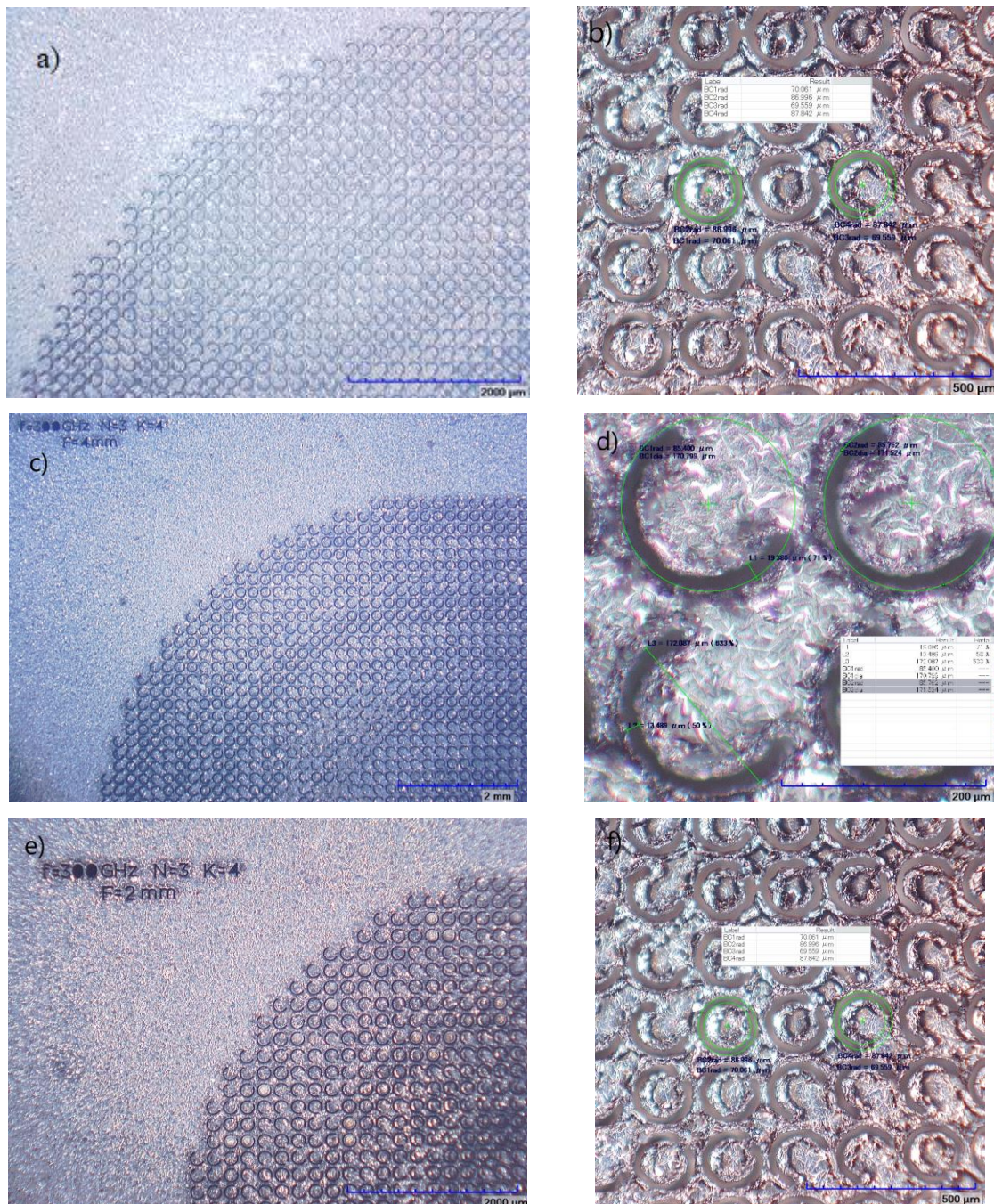
lazerio impulsų energija $E = 100 \mu J$, o fokusuoto pluošto dydis $d = 20 \mu m$ ir impulsų tankis – 100 impulsų/mm. Frenelio lęšiai pasižymintys skirtingais židiniiais - $F = 8mm, F = 4mm, F = 2mm$ ir jų teoriniai ir išmatuoti profiliai pavaizduoti 1.29 pav. Pagal profilių matavimus galima pastebėti, jog gamybos metu buvo parinkti teisingi lazerio parametrai ir gauti lęšių profiliai tiksliai sutampa su teoriniais modeliais.



1.29 pav. Frenelio zoninių plokštelių mikroskopo nuotraukos esant skirtingiems židiniams a) $F = 8mm$ c) $F = 4mm$ e) $F = 2mm$, bei atominio jėgų mikroskopo lęšių geometriniai profilių matavimai bei modeliavimo vertės atitinkamai.

Apertūrinių C raidžių metalėšių padėklus sudaro dviejų sluoksnių struktūra – 10 μm storio grafito sluoksnis užgarintas ant 75 μm poliesterio plastiko. Plokščio optinio

elemento gamybai taip pat naudojama lazerinė litografija, tačiau skiriasi keli esminiai lazerio parametrai: $P = 2\text{ W}$ vidutinė galia ties 50 kHz , impulso energija $E = 40\ \mu\text{J}$, tačiau naudojamas didesnis impulsų tankis – 666 impulsų/mm , ties bangos ilgiu $\lambda = 1030\text{ nm}$. Kiaurymėms išgauti reikalinga apie 7 krantinčios spinduliuotės ciklą taikančių į padėklą. Šiuo metodu gauti bandiniai pavaizduoti 1.30 pav. kuriame matomi lęšiai pasižymintys skirtinga fokusavimo židinio plokštuma – $F = 8\text{ mm}$, $F = 4\text{ mm}$, $F = 2\text{ mm}$.



1.30 pav. Apertūriniai metalėšiai pagaminti ant grafito ir poliesterio plastiko plėvės ir pamatuotų C metalelementų fiziniai parametrai, kurie pasižymi skirtingais židiniiais: a), b) $F = 8\text{ mm}$, c), d) $F = 4\text{ mm}$, e), f) $F = 2\text{ mm}$.

Metalešiu pavienių elementų dydžių atitikimas su teorija buvo pamatuotas mikroskopu ir palygintas su teorinėmis vertėmis lentelėje 1. Svarbu paminėti, kad teorijoje visi šie elementai yra lygūs pagal vidinį R1 ir išorinį R2 spindulius, taip pat sutampa storiai d. Atlikus mikroskopinę analizę pastebėta, jog metalėšiu F=8 mm ir F=4 mm metaelementų vidutinės R1 ir R2 vertės tiksliai sutampa su naudotais modeliuose, tačiau F=2 mm lėšio vidutinė d vertė neatitinka teorinės, tad galimi matavimų iškrypimai. Šios neatitikties įtaka bus aptarta rezultatų analizėje.

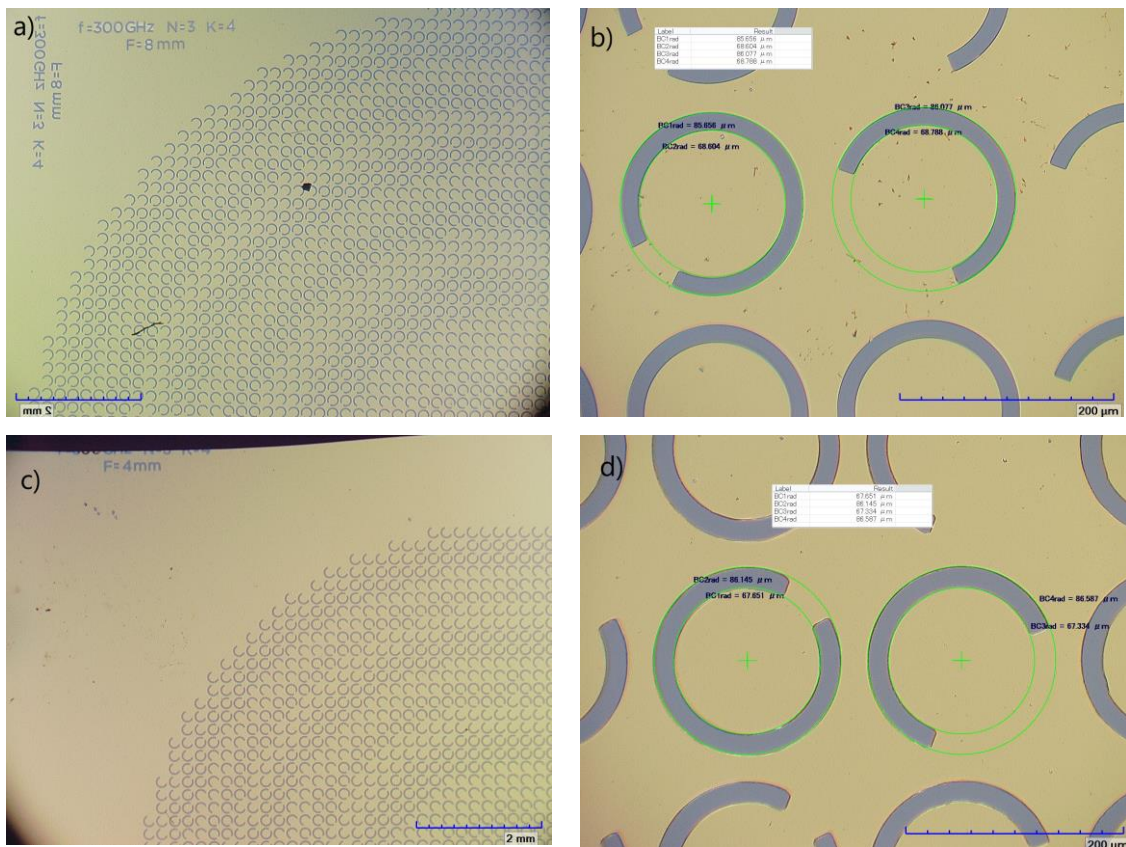
Lentelė 1 Gaminto metalėšio geometrinių parametrų teorinės ir išmatuotos vertės

Metalešis	Išmatuotos vertės	Teorinės vertės
Grafito apertūrinis F=8mm	R1=70 μm, R2=86 μm, d=16μm	R1=70 μm, R2=86μm, d=16μm
Grafito apertūrinis F=4mm	R1=71 μm, R2=86 μm, d=15μm	
Grafito apertūrinis F=2mm	R1=66 μm, R2=87 μm, d=21μm	

Galiausiai šiame darbe gaminti ir tirti aukso sluoksniu užgarintame silicio padėkle, kuriame lazerinės litografijos metodu apšviečiami C raidžių elementai. Netipinių optinių elementų gamyba atliekama pasitelkiant lazerinės fotolitografijos sistemą DWL 66⁺ (Heidelberg Instruments), kur $\lambda = 405 \text{ nm}$ bangos ilgio spinduliuote apšviečiamas fotopolimeras sugeriantis krintančią šviesą ir nuplaunamas paliekant C raidžių formos apertūras ant aukso sluoksniu. Naudojantis litografijos įrankių galima pasiekti iki 0.3 μm dydžio struktūras. Pagaminti aukso sluoksniu paviršiuje C formos apertūriniai elementai pavaizduoti 1.31 pav. Plokščių optinių elementų C raidžių formos elementų dydžių palyginimas matomas lentelėje 2.

Lentelė 2 Aukso metalėžio geometrinų parametų išmatuotos ir teorinės vertės

Metaležis	Išmatuotos vertės	Teorinės vertės
Aukso apertūrinis F=8mm	R1=68 μm, R2=86 μm, d=18μm	R1=70 μm, R2=86μm, d=16μm
Aukso apertūrinis F=4mm	R1=68 μm, R2=86 μm, d=18μm	
Aukso apertūrinis F=2mm	R1=70 μm, R2=87 μm, d=17μm	

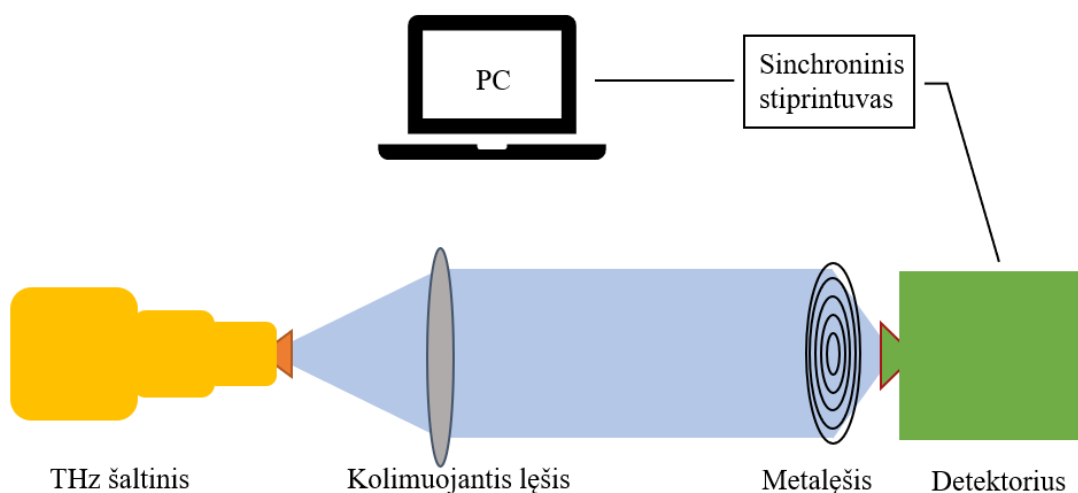


1.31 pav. Fotolitografijos metodu pagaminti metalėžiai, bei pavienių metalementų parametų skaičiavimai esant skirtingoms židinio nuotolio vertėms a), b) F=8 mm ir c), d) F=4 mm.

Litografijos metodu gamintų lęšių parametrai atitinka modeliuose naudotų. Be to, 1.31 pav, matomi elementai pasižymi mažesniu paviršiaus šiurkštumu ir tolygesnėmis C raidžių formomis.

2.7 Matavimo metodika

Plokščių optinių elementų fokusavimo savybės matuojamos įprastame THz vaizdinimo eksperimente. Principinė metalėšių tyrimo schema pavaizduota 1.32 pav., kuriame matoma THz VDI šaltinis spinduliuojantis 0.307 THz spinduliuotę, kur moduluojama 2 kHz dažniu. Generuotas spindulys kolimuojamas $F=12$ cm židinio nuotolio teflono lęšiu, kurio diametras $d=5$ cm. Lygiagretaus pluošto centre 1 m atstumu statomas tiriamas optinis elementas, fokusuojantys šviesą į mažo ploto bolometrinių detektorių. THz spinduliuotei pataikius į matuoklį gaunamas varžos pokytis, kuris matuojamas kaip įtampos signalas ir stiprinamas sinchroniniu stiprintuvu. Detektorius pritvirtintas prie motorizuotos ašies, judinamas metalėšio židinio plokštumoje XY arba išilgai židinio ašies XZ kryptimis. Eksperimentas atliekamas keičiant detektoriaus pozicija atžvilgiu tiriamo optinio elemento. Šie duomenys eksportuojami ir gaunami židinio plokštumos bei bangos sklidimo plokštumos pjūvių vaizdai.



1.32 pav. Principinė fokusuojančio elemento matavimo schema.

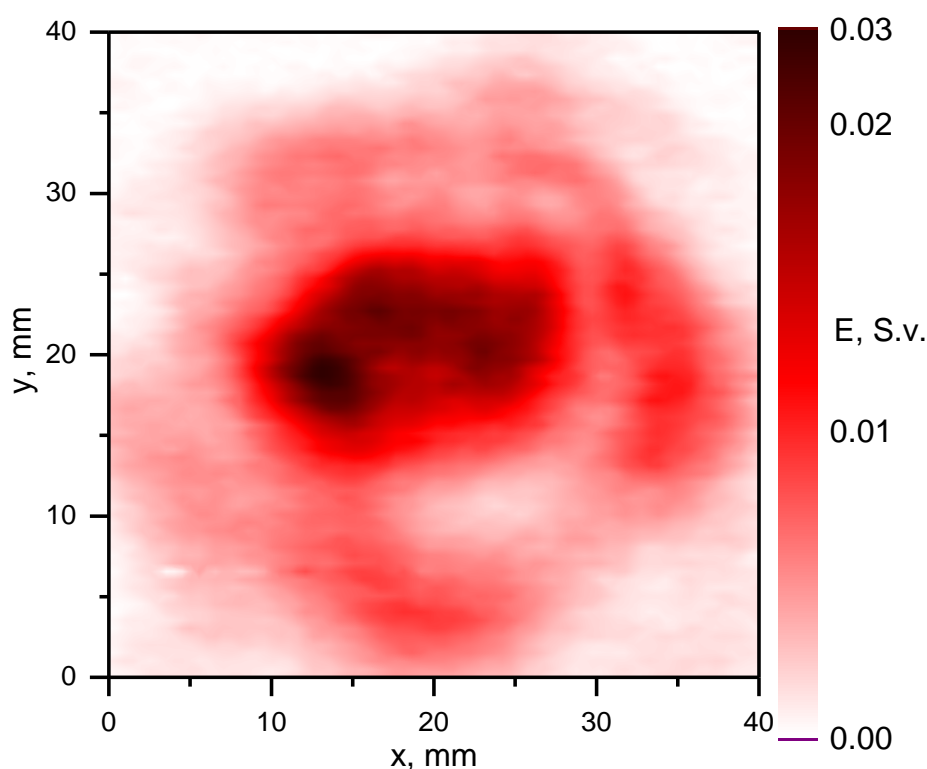
Taip pat verta paminėti, jog eksperimente naudojamas bolometrinis detektorius yra jautrus elektrinio lauko poliarizacijos vektoriui, tad ši savybė yra ypač aktuali tiriant poliarizacijai jautrius metalėšius.

3 Eksperimentiniai rezultatai

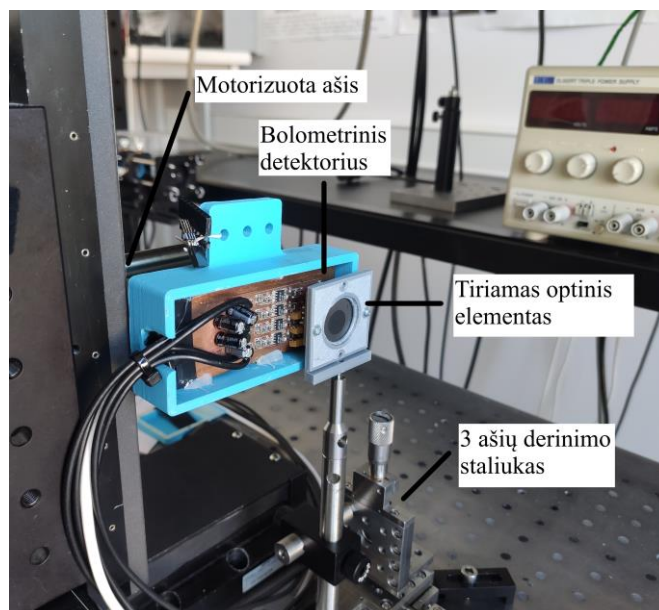
Šiame skyriuje bus aptariamos eksperimentinės Frenelio ir metalėšių optinių elementų fokusavimo savybės ir pateikti pagrindinių parametru palyginimai.

3.1 THz bangų fokusavimas

Metalėšių ir Frenelio zoninių plokštelių optinių savybių tyrimas atliekamas pagal 1.32 pav. principinę schemą. Iš šaltinio ateinančios kolimuotos spinduliuotės centre suderinamas tiriamasis optinis objektas. Šaltinio spinduliuotės profilis matomas 1.33 pav.

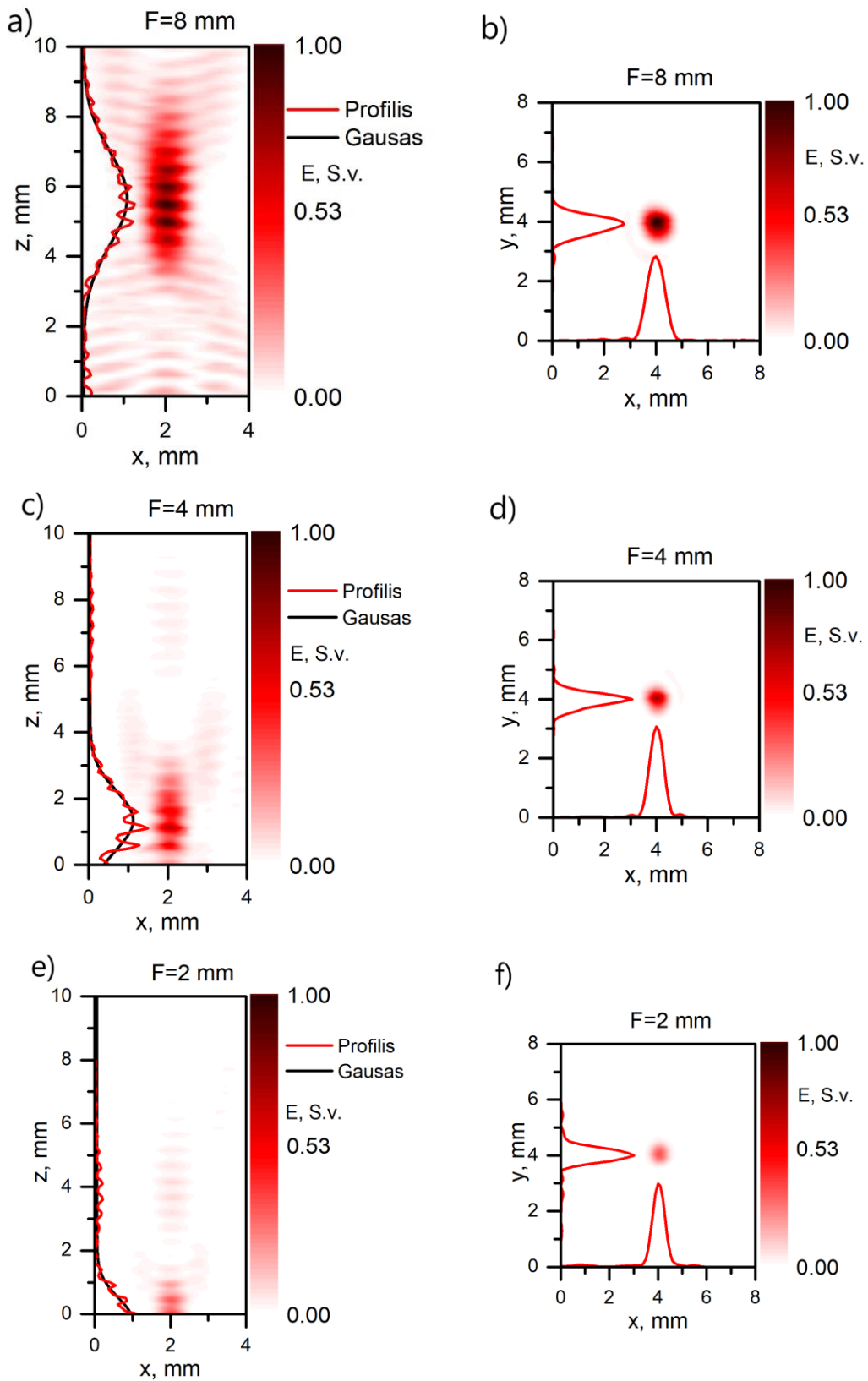


1.33 pav. Kolimuotos šaltinio spinduliuotės pjūvis tiriamo optinio elemento plokštumoje. THz spinduliuotės centre įstatomas tiriamas optinis elementas, kurio tiksli pozicija detektoriaus atžvilgiu justiruojama 3 ašių derinimo staliuku matomu 1.34 pav. Esant pilnai suderintai sistemai galima atlikti matavimus, judant detektoriumi su motorizuota ašimi XY židinio plokštumoje ir XZ bangos sklidimo kryptimi. Šie signalo galios pasiskirstymo rezultatai bei jų pjūviai yra pagrindiniai šio tyrimo rezultatai ir toliau lyginami esant skirtingiems židiniams $F = 8\text{mm}$, $F = 4\text{mm}$, $F = 2\text{mm}$ ir naudojant skirtingų rūšių lęšius.



1.34 pav. Eksperimento derinimo ir matavimo schema.

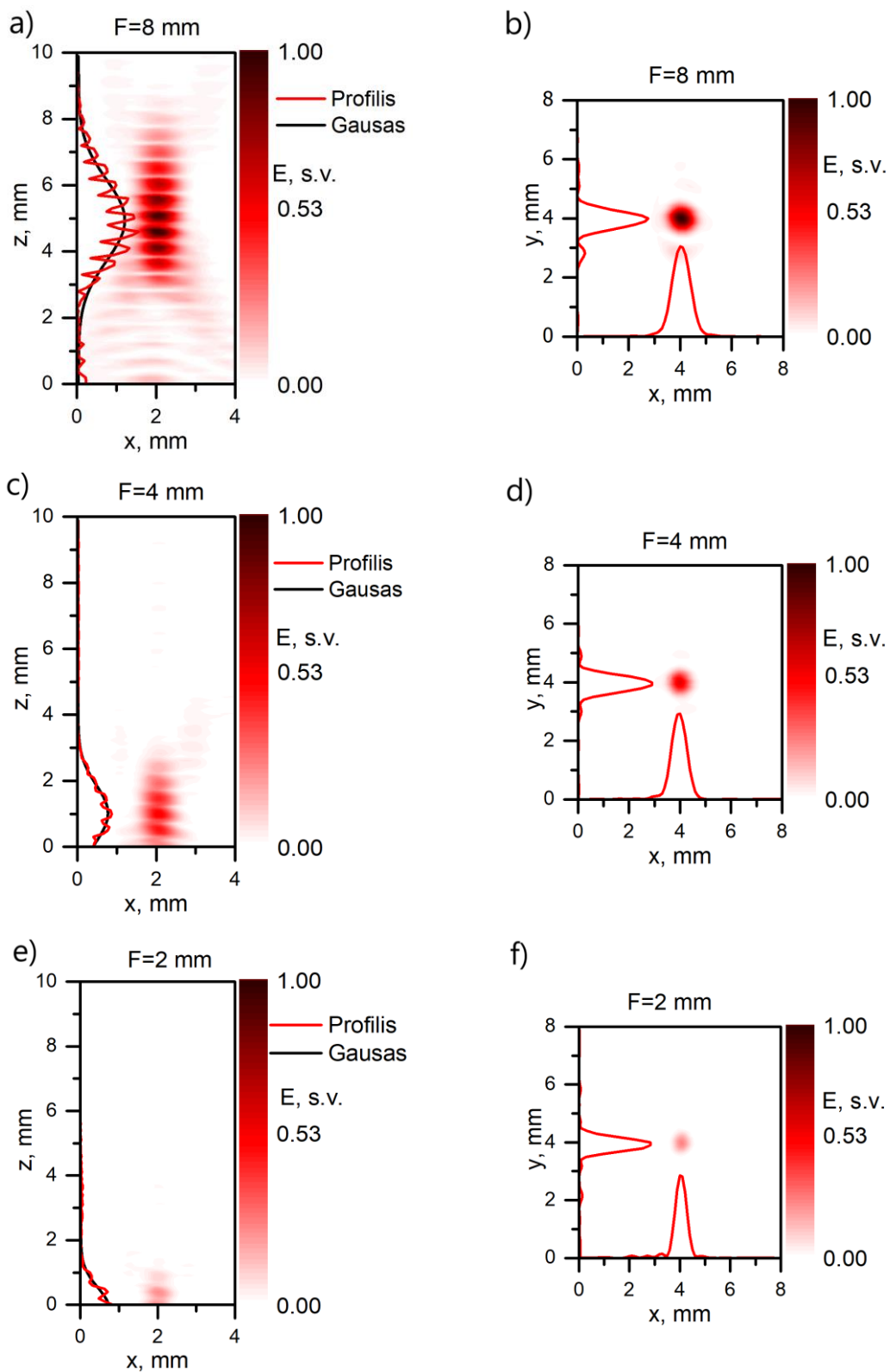
Atlikus Frenelio lęšių matavimus buvo gauta 3 lęšių THz lauko pasiskirstymo židinio bei sklaidimo krypties plokštumose vaizdai, kurie matomi 1.35 pav. Šio tyrimo tikslams detektoriaus galios skalėje pasirinkta naudoti santykinus vienetus dėl skirtingų lęšių optinių savybių – jautrumo poliarizacijai ir metalėšių atsparumo signalo fonui. 1.35 pav. matoma, kad modeliuotų lęšių savybės fokusuoti šviesą pasirinktu atstumu atitinka eksperimente matomus rezultatus – 8 mm židinio nuotoliu fokusuojantys Frenelio lęšiai pasižymi didžiausiu židinio atstumu nuo detektoriaus nulinės pozicijos a), 4 mm ir 2 mm taip pat sutelkia THz dažnio bangas jų atitinkamose pozicijose c), e). Y ašyje papildomai nubrėžti galios pasiskirstymo kreivė ir aproksimuota gauso funkcija išilgai sklaidimo krypties pažymėtos raudona ir juoda spalva atitinkamai. Šiuose matavimuose taip pat galima pastebėti, kad esant itin mažiems židiniams $F=2$ mm eksperimentiškai sudėtinga pamatuoti pilną sklaidimo krypties profilį dėl fizinių apribojimų naudojant lęšio laikiklį, bei siekiant nepažeisti detektoriaus. 1.34 pav. b) d) f) skiltyse matomi galios intensyvumo profiliai ir el. lauko vertės kreivės židinio plokštumoje savo atitinkamuose židiniuose. Iš šių kreivių galima pastebėti, jog santykinės galios vertės krenta mažėjant lęšio židinio F parametrui. Frenelio lęšių THz bangų fokusavimo eksperimente galios yra nepoliarizuotai šviesai, t.y. elektrinio lauko poliarizacijos vektoriaus kryptis nėra apibrėžta, tad matuojamo lauko intensyvumą sudaro fonas ir fokusuotas signalas.



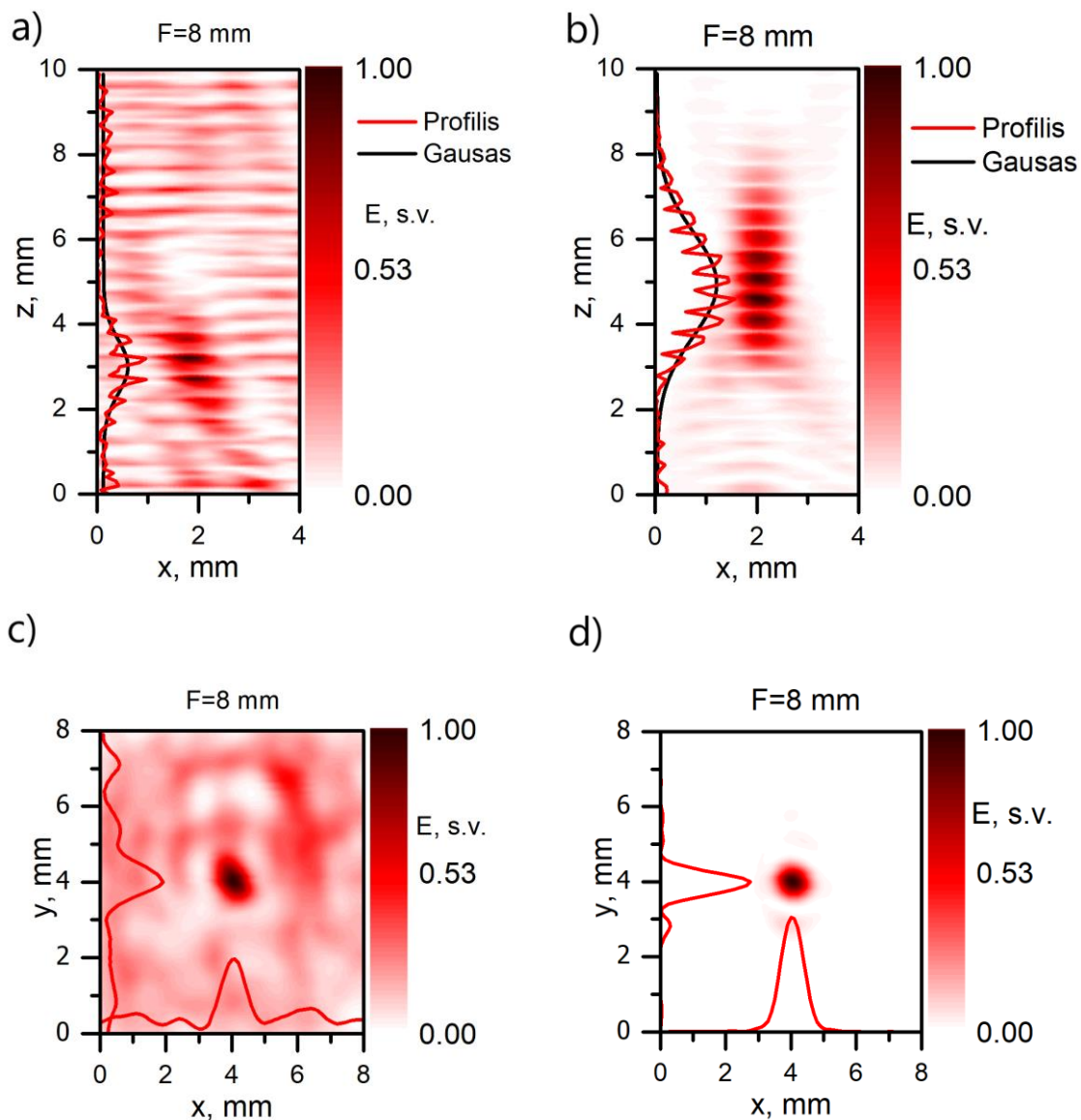
1.35 pav. Frenelio lęšių galios pasiskirstymas bangos sklidimo kryptimis a), c), e) ir židinio plokštumoje b), d), f).

Apertūrinių metalėšių eksperimentas atliekamas tokiu pat metodu, kaip ir Frenelio lėšiams - kolimuoto šaltinio spindulio centre statomas bolometriniu detektorius ir tarpe jų – sujusruojamas metalėšis. Tokioje sistemoje atliekami THz spinduliuotės fokusavimo matavimai bangos sklidimo kryptimi ir židinio plokštumose visų židinių lėšiams. Matavimų rezultatai vaizduojami 1.36 pav. Galios priklausomybės bangos sklidimo kryptimis esant skirtingoms židinio vertėms matomos a) c) e), kuriuose galima įžvelgti metalėšių savybę fokusuoti THz bangas skirtingose erdvės vietose. Taip pat, grafikuose matomos galios pasiskirstymo koordinatėse ir aproksimuotos gauso funkcijos kreivės. Verta paminėti, kad šie matavimai yra jautrūs šaltinio ir detektoriaus poliarizacijai – tarp šaltinio ir detektoriaus bangų matomas per 90 laipsnių pasuktas elektrinio lauko vektorius. THz dažnio bangų fokusavimo eksperimente naudojant $F=2$ mm židinio metalėšį nėra matomas pilnas galios pasiskirstymas. Šį matavimo netobulumą apriboja fiziniai lėšio laikiklio bei detektoriaus parametrai – neįmanoma priartinti lėšio pakankamai arti detektoriaus jo nepažeidžiant. 1.36 pav. taip pat matomi fokusuotos galios vaizdai židinio plokštumoje ir kreivės X ir Y koordinatėse. Galima pastebėti, jog mažėjant židiniui krenta intensyvumas centriniuose pjūvio taškuose b) d) ir f) grafikuose.

Plokščiems optiniams elementams atlikti papildomi matavimai esant nepasuktam detektoriumi – šaltinio ir detektoriaus elektrinio lauko poliarizacijos vertės sutampa 1.37 pav. Matuojant fokusavimą be fono pašalinimo, t.y. esant detektoriaus ir šaltinio vienodai poliarizacijai matomas ryškūs detektoriaus signalo triukšmai a), c) taip pat sunku išskirti pagrindinį fokusuotą pluoštą. Anksčiau minėti židinio $F=8$ mm pjūviai b), d) esant 90 laipsnių poliarizacijos skirtumui ties $z=5$ mm galima išskirti signalą sufokusuotą metalėšio.

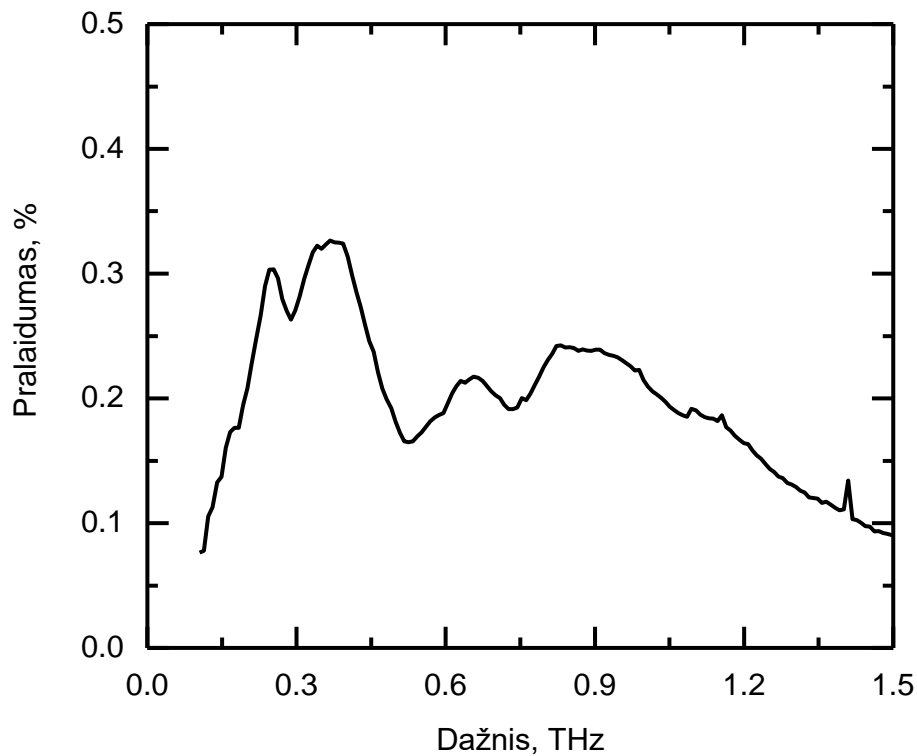


1.36 pav. Apertūrinių metalėšių pasuktos polarizacijos šaltinio atžvilgiu elektrinio lauko galios pjūviai spinduliuotės kryptimi a), c), e) ir židinio plokštumos pjūvis b), d), f).



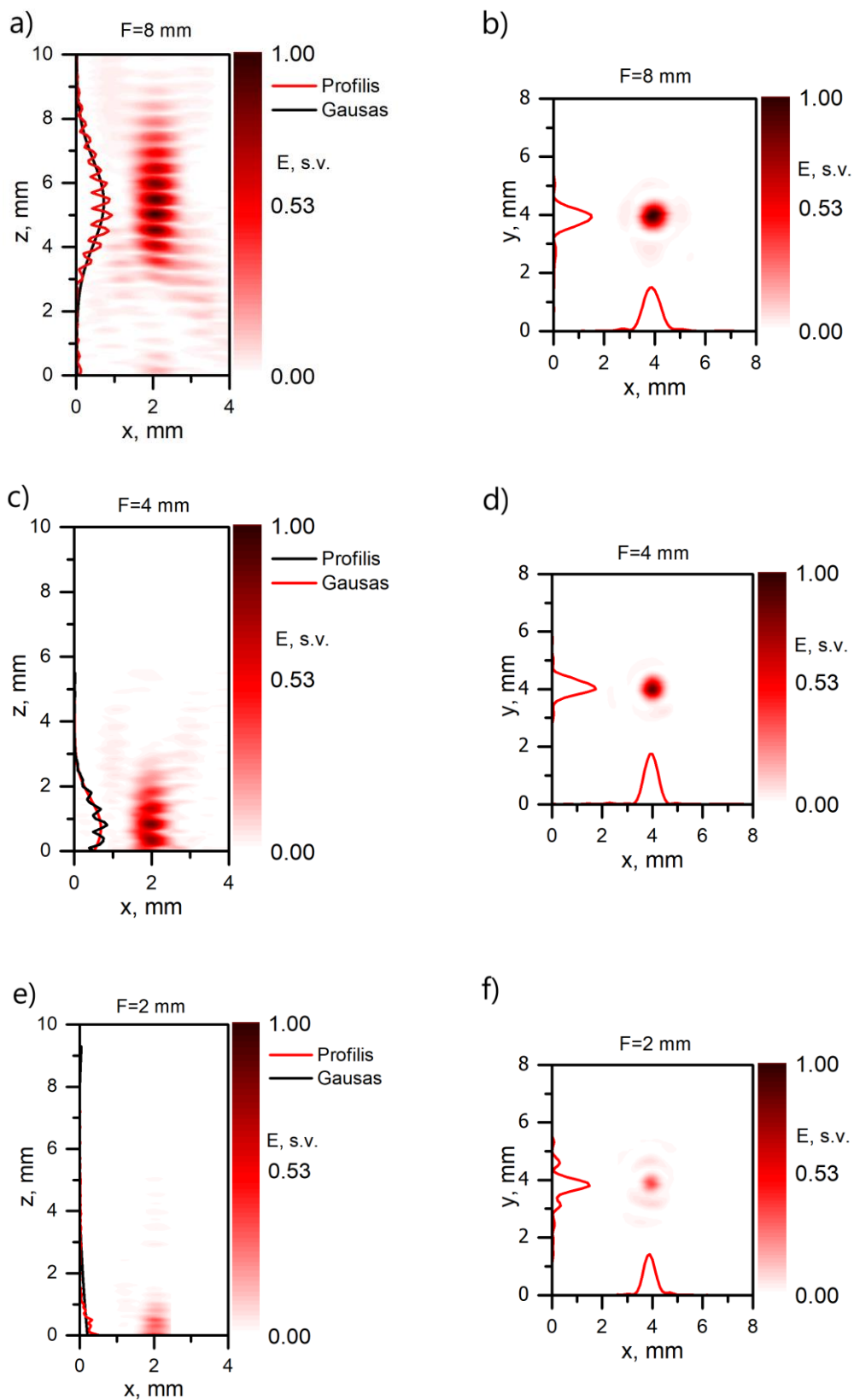
1.37 pav. Apertūrinių metalėšių elektrinio lauko galios intensyvumo vaizdų pjūviai, kai elektrinio lauko poliarizacijos vektorių skirtumas tarp šaltinio ir detektoriaus $P=0$ a), c) ir $P=90$ b), d).

Plonam optiniam elementui, kurio židinio nuotolis $F=2$ mm atliktas pralaidumo spektroskopijos matavimas 1.38 pav. Pagal šią priklausomybę galima teigti, kad lazerinės abliacijos metodu gaminto elemento pralaidumo didžiausia vertė yra netoli tiriamojo 0.307 THz dažnio, tačiau nevisiškai sutampa su modeliavime 1.28 pav. gautomis vertėmis. Apertūrinių metalėšių dažninis pralaidumas tiesiogiai priklauso nuo metaelemento verčių $R1, R2$, tad šis neatitikimas galimai susijęs su gamybos proceso netobulumais.



1.38 pav. F=2 mm metalėšio pralaidumo priklausomybė esant skirtingiems dažniams.

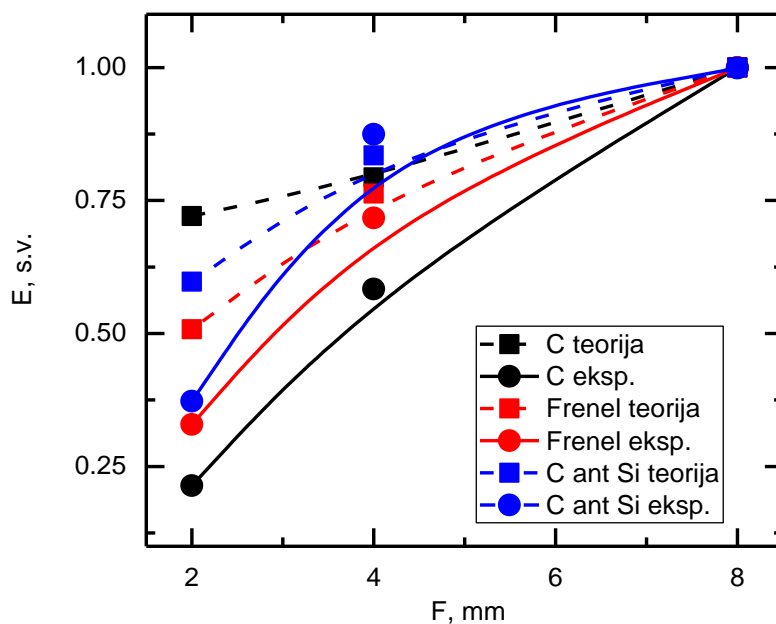
Litografijos metodu silicio padėkle užgarintu plonu aukso sluoksniu su C raidžių apertūriniais elementais THz bangų fokusavimo eksperimento rezultatai pateikti 1.38 pav. Pateiktuose grafikuose matomos panašios priklausomybės, kaip ir anksčiau pateiktų optinių elementų – kintama židinio plokštuma stebima a), c) ir e) grafikuose. Y ašyje pateikti profiliai bangos sklidimo kryptimi, bei gauso funkcija aproksimuota kreivė. Dešinėje pateiktuose grafikuose matomi fokusuotos spinduliuotės vaizdai židinio plokštumoje bei kreivėmis vaizduojami profiliai X ir Y kryptimis. Kaip ir ankstesniuose matavimuose tikslūs F=2 mm metalėšio elektrinio lauko galios pasiskirstymai nebuvo užfiksuoti dėl eksperimento netobulumų. Vis dėlto, galima pastebėti, jog F=8 mm bei F=4 mm profilių intensyvumai židinio plokštumoje 1.39 pav. b) ir d) atitinkamai yra panašūs.



1.39 pav. Metalėsių gamintų ant Si padėklo elektrinio lauko galios pjūviai bangos sklidimo kryptimi Z a), c), e) ir židinio plokštumoje b), d), f) skirtingiems židinio F parametrams.

3.2 Rezultatų apibendrinimas

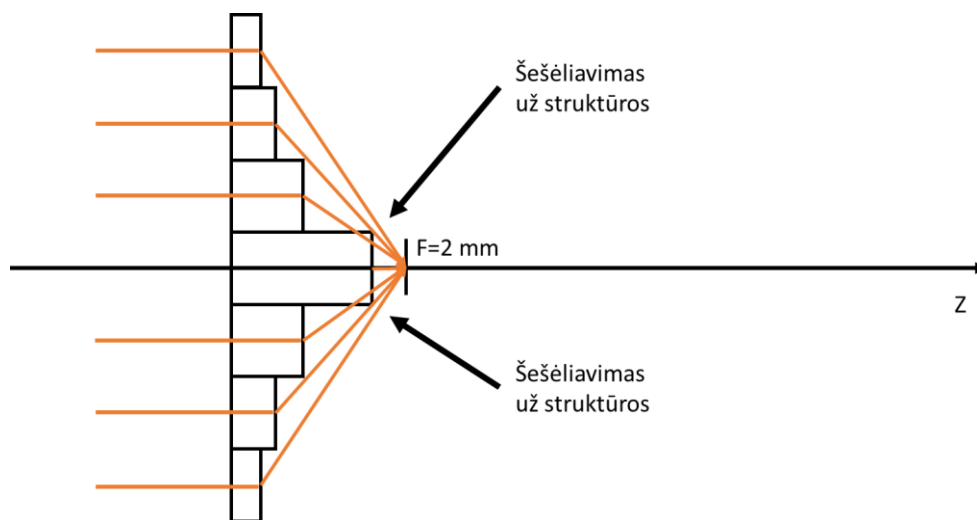
Skirtingo dizaino difrakcinių optinių elementų savybės aprašomos dviem parametrais – santykinu intensyvumu, t.y. elektrinio lauko galios intensyvumas taške yra padalintas iš didžiausio savo rūšies elemento intensyvumo, bei standartiniu parametru FWHM (angl. *Full width half maxima*). Santykinis fokusuojamo el. lauko stipris yra naudojamas, nes metalėšiai yra jautrūs poliarizacijai – krintant plokščiai X kryptimi poliarizuotai bangai į tokį optinį elementą fokusuotas spinduliuotė bus gaunama Y krypties. Šiuos elementus naudojant THz optinėse sistemose, galima sudaryti tokią matavimo schemą, kurioje detektoriuje eliminuojamas signalo fonas, kuris yra priešingos poliarizacijos, nei sufokusuotas signalas. Tai leidžia gauti mažesnę triukšmą, todėl šio darbo tikslams aktualu lyginti santykinus intensyvumus.



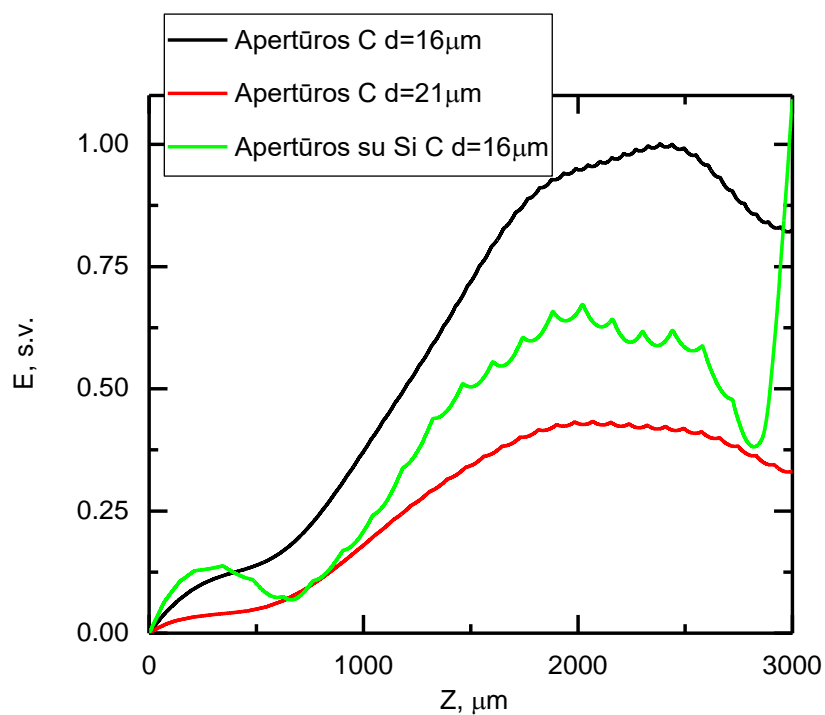
1.40 pav. Metalėšių ir Frenelio lėšių modeliuotų ir eksperimento metodu nustayto santykinio intensyvumo priklausomybė nuo židinio nuotolio.

1.40 pav. matoma skirtingų dizainų optinių elementų santykinės galios priklausomybės nuo židinio nuotolio modeliams ir eksperimentams. Galima pastebėti, jog visų lėšių atveju teorinis intensyvumas pažymėtas punktyrine linija grafike mažėjant židiniui matomas didesnis, nei gautas eksperimente. Visų optinių elementų santykinis intensyvumas, esant $F=8 mm$ lyginimas vienetui, o kitų židinių intensyvumai pagal didžiausio židinio santykį atitinkamai. Verta paminėti, kad teoriniame modelyje mažėjant

židiniui geresniu santykinu intensyvumu pasižymėjo metalėšiai, dėl galimai atsirandančio šešėliavimo efekto Frenelio lęšiuose. Šio teorizuojamo efekto principinė schema pavaizduota 1.41 pav., kur matomas aštriu kampu laužiamų bangų kliuvinimas už centrinės lęšio dalies. Galima pastebėti, jog mažėjant židiniui visų elementų efektyvumas mažėja – tai galima susieti su vis mažesniais naudojamais elementais ir dideliu bangų lūžio kampu. Taip pat 1.40 pav. matomas juoda tolygia linija pažymėtas ypač sumažėjęs metalėšio santykinis intensyvumas mažiausiame židinyje lyginant su pradine verte. Šis pokytis galimai susijęs su anksčiau minėtais gamybos netikslumais – modeliuotų metaelementų storis neatitiko pagamintų. Šis neatitikimas pagal teorinius skaičiavimus 1.42 pav. galėjo lemti intensyvumo skirtumą per 2 kartus. Taip pat dėl sudėtingų eksperimento realizavimo esant ypač mažiems židiniams galimi netikslumai ir dėl lęšio pozicionavimo detektoriaus atžvilgiu Z ašimi, siekiant nesugadinti matavimo įrangos. Kita vertus, atlikus matavimus ant silicio užgarintu plonu aukso sluoksnio metalėšiais gaunami didesni santykiniai intensyvumai esant visiems židiniams – 1.40 pav. mėlynai pažymėtoje eksperimentinių rezultatų kreivėje galima pastebėti, jog fotolitografijos metodu pagaminti elementai nepasižymi šešėliavimu efektu artimuose židiniuose.

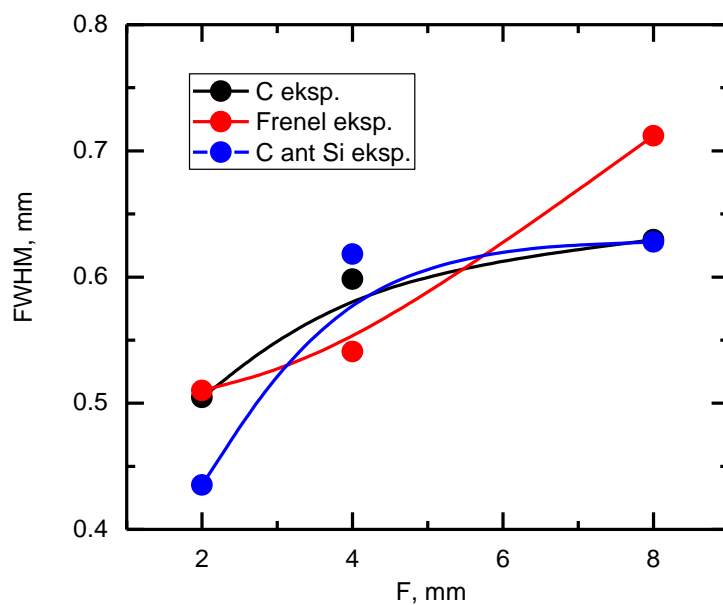


1.41 pav. Galimai atsirandantis šešėliavimo efektas Frenelio lęšiuose su mažais židiniams.



1.42 pav. Modeliuotos struktūros intensyvumo pasiskirstymas Z ašyje esant apertūrų storiams $d=16\ \mu\text{m}$ ir $d=21\ \mu\text{m}$.

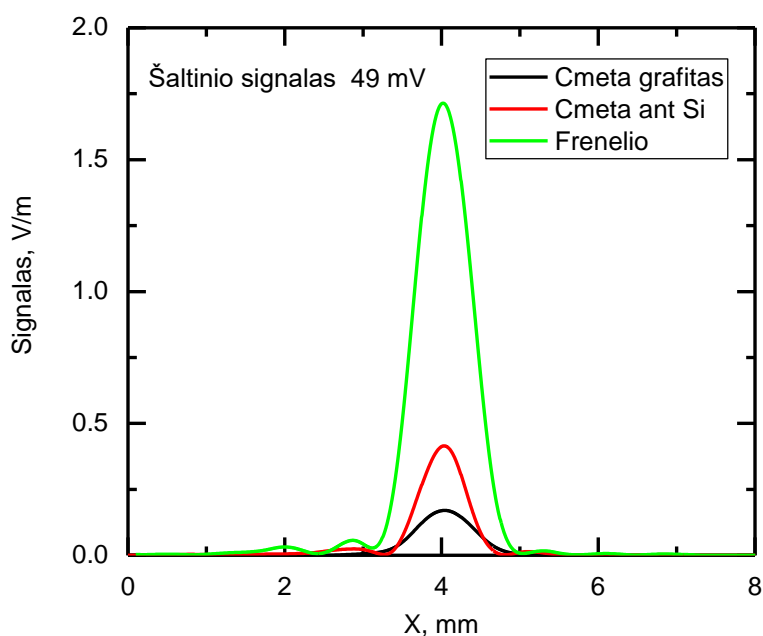
Kitas parametras nusakantis fokusavimo savybes - optinių difrakcinių elementų FWHM parametro priklausomybė nuo židinio nuotolio 1.43 pav.



1.43 pav. Frenelio lęšių ir metalėšių eksperimento FWHM parametro verčių priklausomybė nuo židinio.

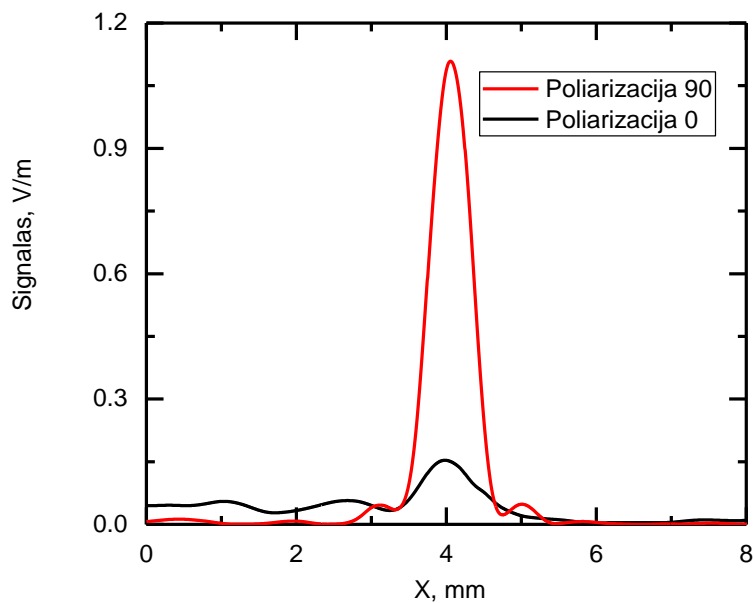
1.43 pav. vaizduojama FWHM parametro priklausomybė nuo židinio plokštumos. Optinius elementus aprašantis parametras gautas naudojantis Gauso funkcija aproksimuojant santykinės galios vertes padalintas iš lęšio ploto. Panašios tendencijos matomos Frenelio ir metalėšiams – mažinant lęšių židinį FWHM parametras irgi mažėja. Visų rūšių lėšiams šis parametras kinta nedaug, didžiausias skirtumas matomas C elementų ant silicio padėklo, kur esant židiniu $F=2$ mm matoma mažiausia vertė. Vis dėlto, galima teigti, kad šis parametras nedaug priklauso nuo gamybos technologijos, tačiau priklauso nuo židinio.

Galiausiai, siekiant tarpusavyje palyginti elementų pralaidumą 1.44 pav. vaizduojamas skirtingų technologijų lęšių pralaidumas ir THz bangų fokusavimas esant vienodam šaltinio signalui. 1.44 pav. vaizduojame grafike galima pastebėti, jog didžiausiu fokusuotu signalu 1.7 V pasižymi Frenelio lęšiai, pažymėti žalia spalva, apie 4 kartus mažiau signalo gaunama iš metalėšių gamintų ant silicio padėklo – 0.4 V, bei mažiausiai gaunama iš grafito sluoksnyje apertūrinių C formos elementų – 0.17 V. Šių elementų pralaidumas įvertintas pagal uždaro ir atviro ploto santykį metalėšiams, kuris gaunamas apie 0.1%, o Frenelio lęšių pralaidumas tirtas kituose darbuose [32] ir siekia 30%. Galima teigti, kad didžiausiu pralaidumu pasižymi Frenelio zoninės plokštelės. Kita vertus, metalėšiai pasižymi unikalia savybe pasukti poliarizaciją šaltinio atžvilgiu, tad eliminuojamas fonas.



1.44 pav. Skirtingų gamybos technologijų $F=8$ mm židinio lęšių gaunamas signalas židinio plokštumoje esant normuotam šaltinio signalui.

Galiausiai, 1.45 pav. pristatomi metalėšių nenormuotų signalų pjūvių židinio plokštumoje priklausomybės šaltinio atžvilgiu pasuktai ir tiesiai poliarizacijai.



1.45 pav. Galios pjūviai židinio plokštumoje tiesiai ir pasuktai poliarizacijai.

Aukščiau pateiktame grafike galima pastebėti metalėšių ypatingą savybę pasukti krintančios bangos poliarizaciją ir ją fokusuoti pasirinktoje židinio plokštumoje. Ši savybė leidžia kurti optines schemas, kuriose eliminuojamas šaltinio fonas ir detektoriuje matuojama tik sutelktas signalas.

4 Išvados

Magistrantūros studijų baigiamajame darbe programinėje aplinkoje maketuoti ir modeliuoti, bei pagaminti ir eksperimentiškai realizuoti 9 faziniai elementai - 6 metalėšiai ir 3 Frenelio lėšiai. Tyrimo metu nustatyta:

- 1) Naudojantis metalėšių formavimo programa, galima pagaminti įvairių tipų optinius elementus, programiškai keisti šių elementų parametrus, automatizuoti modeliavimo procesą bei eksportuoti duomenis į laikmenas.
- 2) Sumodeliuotas optimizuotas metalėšio dizainas ties 300 GHz ir eksperimentiškai išmatuotas jų fokusavimas.
- 3) Šiuo metodu sumodeliuoti metalėšiai turi privalumą keisti krintančios šviesos poliarizaciją. Tai yra žymus praktinis privalumas atliekant poliariazacijai jautrių bandinių vaizdinimą dėl foninio signalo įtakos sumažinimo THz vaizdinimo sistemoje.
- 4) Visų technologijų difrakciniai optiniai elementai pasižymi santykinio intensyvumo sumažėjimu prie mažų židinių, eksperimentiškai patvirtintas Frenelio lėšių šešėliavimas, kuris nematomas metalėšiuose.
- 5) Normavus šaltinio signalą Frenelio lėšio židinyje $F=8$ mm fokusuojamo pluošto intensyvumas yra 4 kartus didesnis nei atitinkamo metalėšio formuoto ant silicio padėklo esant 30% pralaidumui Frenelio lėšiams ir 0.1% pralaidumui metalėšiams.
- 6) FWHM parametras siekia 0.7 mm (0.7λ) esant $F=8$ mm ir mažėja trumpinant židinio nuotolį, tačiau nepriklauso nuo lėšio gamybos technologijos.

Literatūra

- [1] M. Tamosiunaite *et al.*, “Focusing of Terahertz Radiation With Laser-Ablated Antireflective Structures,” *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, vol. 8, pp. 1–1, Jul. 2018, doi: 10.1109/TTHZ.2018.2859619.
- [2] M. Mukherjee and S. Chatterjee, “Chapter 6 - THz Medical Imaging: Current Status and Future Outlook,” in *Terahertz Biomedical and Healthcare Technologies*, A. Banerjee, B. Chakraborty, H. Inokawa, and J. Nath Roy, Eds. Elsevier, 2020, pp. 113–125. doi: 10.1016/B978-0-12-818556-8.00006-9.
- [3] N. Palka *et al.*, “THz Spectroscopy and Imaging in Security Applications,” May 2012, vol. 1. doi: 10.1109/MIKON.2012.6233513.
- [4] H. Elayan, O. Amin, R. M. Shubair, and M.-S. Alouini, “Terahertz communication: The opportunities of wireless technology beyond 5G,” in *2018 International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet)*, Apr. 2018, pp. 1–5. doi: 10.1109/COMMNET.2018.8360286.
- [5] J. Zeitler, P. Taday, D. Newnham, M. Pepper, K. Gordon, and T. Rades, “Terahertz-Pulsed Spectroscopy and Imaging in Pharmaceutical Setting,” *J. Pharm. Pharmacol.*, vol. 59, pp. 209–23, Mar. 2007, doi: 10.1211/jpp.59.2.0008.
- [6] H. Tao, N. I. Landy, C. M. Bingham, X. Zhang, R. D. Averitt, and W. J. Padilla, “A metamaterial absorber for the terahertz regime: Design, fabrication and characterization,” *Opt. Express*, vol. 16, no. 10, pp. 7181–7188, May 2008, doi: 10.1364/OE.16.007181.
- [7] “Plane wave,” *Wikipedia*. Dec. 05, 2020. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Plane_wave&oldid=992517267
- [8] L. Vandergriff, “Nature and Properties of Light,” Jun. 2021.
- [9] “Huygens–Fresnel principle,” *Wikipedia*. Jun. 10, 2021. [Online].
- [10] “Two-Slit Experiments.” http://abyss.uoregon.edu/~js/21st_century_science/lectures/lec13.html (accessed Jun. 14, 2021).
- [11] “The Open Door Web Site: IB Physics: WAVES: THE DIFFRACTION GRATING.” <https://www.saburchill.com/physics/chapters2/00151.html> (accessed Jun. 14, 2021).

- [12] A. Siemion, “Terahertz Diffractive Optics—Smart Control over Radiation,” *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*, vol. 40, no. 5, pp. 477–499, May 2019, doi: 10.1007/s10762-019-00581-5.
- [13] A. Siemion, “The Magic of Optics—An Overview of Recent Advanced Terahertz Diffractive Optical Elements,” *Sensors*, vol. 21, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2021, doi: 10.3390/s21010100.
- [14] J. M. Fuster, P. Candelas, S. Castiñeira-Ibáñez, S. Pérez-López, and C. Rubio, “Analysis of Fresnel Zone Plates Focusing Dependence on Operating Frequency,” *Sensors*, vol. 17, no. 12, Art. no. 12, Dec. 2017, doi: 10.3390/s17122809.
- [15] Q. Wang *et al.*, “A Broadband Metasurface-Based Terahertz Flat-Lens Array,” *Adv. Opt. Mater.*, vol. 3, no. 6, pp. 779–785, Jun. 2015, doi: 10.1002/adom.201400557.
- [16] L. Minkevičius *et al.*, “Terahertz multilevel phase Fresnel lenses fabricated by laser patterning of silicon,” *Opt. Lett.*, vol. 42, no. 10, p. 1875, May 2017, doi: 10.1364/OL.42.001875.
- [17] S. J. Sweeney and J. Mukherjee, “Optoelectronic Devices and Materials,” in *Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials*, S. Kasap and P. Capper, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 1–1. doi: 10.1007/978-3-319-48933-9_35.
- [18] P. Chaturvedi, K. Hsu, S. Zhang, and N. Fang, “New Frontiers of Metamaterials: Design and Fabrication,” *MRS Bull.*, vol. 33, Oct. 2008, doi: 10.1557/mrs2008.199.
- [19] C. G. Willson, R. R. Dammel, and A. Reiser, “Photoresist materials: a historical perspective,” in *Advances in Resist Technology and Processing XIV*, Jul. 1997, vol. 3049, pp. 28–41. doi: 10.1117/12.275826.
- [20] N. W. Parker, A. D. Brodie, and J. H. McCoy, “High-throughput NGL electron-beam direct-write lithography system,” in *Emerging Lithographic Technologies IV*, Jul. 2000, vol. 3997, pp. 713–720. doi: 10.1117/12.390042.
- [21] “Handbook of Microlithography, Micromachining, and Microfabrication. Volume 1: Microlithography | (1997) | Rai-Choudhury | Publications | Spie.” <https://spie.org/Publications/Book/251695?SSO=1>.
- [22] D. Hu *et al.*, “Ultrathin Terahertz Planar Elements,” *Adv. Opt. Mater.*, vol. 1, no. 2, pp. 186–191, Feb. 2013, doi: 10.1002/adom.201200044.

- [23] H. D. Hristov, J. M. Rodriguez, and W. Grote, “The grooved-dielectric Fresnel zone plate: An effective terahertz lens and antenna,” *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 54, no. 6, pp. 1343–1348, Jun. 2012, doi: 10.1002/mop.26812.
- [24] D. Jokubauskis *et al.*, “Fibonacci terahertz imaging by silicon diffractive optics,” *Opt. Lett.*, vol. 43, no. 12, pp. 2795–2798, Jun. 2018, doi: 10.1364/OL.43.002795.
- [25] L. Minkevičius *et al.*, “Bessel terahertz imaging with enhanced contrast realized by silicon multi-phase diffractive optics,” *Opt. Express*, vol. 27, no. 25, pp. 36358–36367, Dec. 2019, doi: 10.1364/OE.27.036358.
- [26] Y. Zhang, J. Gao, and X. Yang, “Spatial variation of vector vortex beams with plasmonic metasurfaces,” *Sci. Rep.*, vol. 9, Jul. 2019, doi: 10.1038/s41598-019-46433-z.
- [27] T. Guo and C. Argyropoulos, “Broadband polarizers based on graphene metasurfaces,” *Opt. Lett.*, vol. 41, no. 23, p. 5592, Dec. 2016, doi: 10.1364/OL.41.005592.
- [28] M. Ulbrich, P. Paluchowski, J. Mühlsteff, and S. Leonhardt, “High temporal resolution finite element simulations of the aorta for thoracic impedance cardiography,” in *2011 Computing in Cardiology*, Sep. 2011, pp. 149–152.
- [29] J. He, J. Ye, X. Wang, Q. Kan, and Y. Zhang, “A broadband terahertz ultrathin multifocus lens,” *Sci. Rep.*, vol. 6, no. 1, Art. no. 1, Jun. 2016, doi: 10.1038/srep28800.
- [30] A. K. Azad, A. V. Efimov, S. Ghosh, J. Singleton, A. J. Taylor, and H.-T. Chen, “Ultra-thin metasurface microwave flat lens for broadband applications,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 110, no. 22, p. 224101, May 2017, doi: 10.1063/1.4984219.
- [31] R. Ji, K. Chen, Y. Ni, Y. Hua, K. Long, and S. Zhuang, “Dual-Focuses Metalens for Copolarized and Cross-Polarized Transmission Waves,” *Adv. Condens. Matter Phys.*, vol. 2018, pp. 1–7, May 2018, doi: 10.1155/2018/2312694.
- [32] L. Minkevičius *et al.*, “Compact diffractive optics for THz imaging,” *ISSTT 2017 - 28th Int. Symp. Sp. Terahertz Technol.*, vol. 2017-March, no. 1, pp. 99–107, 2017, doi: 10.3952/physics.v58i1.3655.

Summary

For the last few years there has been a growing interest in THz radiation control. A new and rapidly developing technology of metamaterials introduces a unique way to manipulate light. As most commercially viable optical components for THz radiation are not suited for compact systems the aim of this research is to improve optical properties for flat optics.

Profound research has been done to improve devices that manipulate THz radiation, especially focusing lenses based on metasurfaces. Such an optical component rotates the phase of light depending on the metamaterial component. By altering the phase shifting components on a metasurfaces one can create such a wave front that converges to a point.

The purpose of this research is to optimize properties of metaelements for 0.3 THz radiation as well as evaluating different design and manufacturing impact on metalenses and focusing properties of different design structures.

Padėka

Dalį tyrimų finansavo Lietuvos mokslo taryba (sutarties Nr. S-MIP-22-76).