



VILNIAUS GEDIMINO
TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTRONINIŲ SISTEMŲ KATEDRA

Andrius KAMARAUSKAS

SUKIMOSI IŠKRYPTIM AIS PASIŽYMINČIŲ METAMEDŽIAGŲ ANALIZĖ
ANALYSIS OF THE METAMATERIALS WITH THE ROTATIONAL
DISORDER

Magistro baigiamasis darbas

Elektronikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H61003

Kompiuterizuotų elektroninių sistemų specializacija

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Elektronikos fakultetas
Elektroninių sistemų katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Elektronikos inžinerijos** programos magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas **Sukimosi iškrypimais pasižyminčių metamedžiagų analizė**

Autorius **Andrius Kamarauskas**

Vadovas **Tatjana Gric**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe yra nagrinėjamos nanostruktūrinė ir nanolaidinės metamedžiagos. Analizė atlikiama naudojant efektyvios terpės aproksimaciją, metalus charakterizuojant Drude modeliu. Pagrindiniai parametrai apskaičiuoti naudojant MATLAB programavimo aplinką.

Tiriama struktūrinių parametrų įtaka pagrindinėms charakteristikoms keičiant nanolaidininko skersmenį bei pasukimo kampą. Tyrimų pagrindu sukurtos kompiuterinės programos, padedančios apskaičiuoti minėtų struktūrų dispersines slopinimo bei sklaidimo charakteristikas.

Darbą sudaro 4 dalys: Įvadas; 1. Optoelektroninių įrenginių kūrimo metamedžiagų pagrindu analitinė apžvalga; 2. Efektyviosios terpės aproksimavimo metodo analizė; 3. Metamedžiagų, pasižyminčių skirtingais geometriniais nukrypimais, lyginamoji analizė; 4. Paviršinių bangų sklaidimo metamedžiagos paviršiumi tyrimo rezultatai; Apibendrinimas; Išvados; Literatūra; Priedai.

Darbo apimtis – 48 p. teksto be priedų, 27 iliustracijos, 6 lentelės, 35 bibliografiniai šaltiniai, 6 priedai.

Prasminiai žodžiai: metamedžiaga, Maksvelo lygtis, paviršiniai plazmonų poliaritonai, Drude modelis, metapaviršius, MATLAB, efektyviosios terpės aproksimacija.

ISBN	ISSN
Copies No.	
Date-.....-.....	

TURINYS

Įvadas	7
1. Optoelektroninių įrenginių kūrimo metamedžiagų pagrindu analitinė apžvalga	8
1.1. Matematinų operacijų apdorojimas naudojant struktūrizuotas medžiagas	8
1.2. Legiruoto metalo oksidai itin greitoms metamedžiagoms	11
1.3. Bangų formavimas naudojant metapaviršius	16
2. Efektyviosios terpės aproksimavimo metodo analizė	20
2.1. Dielektrinė skvarba lygiagrečia kryptimi.....	20
2.2. Dielektrinė skvarba statmena kryptimi	21
3. Metamedžiagų, pasižyminčių skirtingais geometriniais nukrypimais, lyginamoji analizė	22
3.1. Paviršinės bangos sklaidimas metamedžiagoje	22
3.1.1. Scenarijus 1. Tiriama nanolaidinė metamedžiaga didinant nanolaidininko skersmenį esant skirtingam dielektrinių skvarbų santykiui.....	24
3.1.2. Scenarijus 2. Tiriama nanolaidinė metamedžiaga didinant nanolaidininko skersmenį esant skirtingam dielektrinių skvarbų santykiui.....	26
3.2. Paviršinės bangos sklaidimas dviejų metamedžiagų sandūroje.....	28
3.2.1. Scenarijus 1. Tiriama nanolaidinių metamedžiagų sandūra didinant dešiniojo nanolaidininko skersmenį esant skirtingam dielektrinių skvarbų santykiui.....	30
3.2.2. Scenarijus 2. Tiriama nanolaidinių metamedžiagų sandūra didinant dešiniojo nanolaidininko skersmenį esant skirtingam dielektrinių skvarbų santykiui.....	32
3.3. Paviršinės bangos sklaidimas dviejų nanostruktūrinių metamedžiagų sandūroje	34
3.3.1. Scenarijus 1. Tiriama nanolaidinių sluoksniuota metamedžiagų sandūra didinant pasukimo kampą esant skirtingam dielektrinių skvarbų santykiui.....	36
3.3.2. Scenarijus 2. Tiriama nanolaidinių sluoksniuota metamedžiagų sandūra didinant pasukimo kampą esant skirtingam dielektrinių skvarbų santykiui.....	38
4. Paviršinių bangų sklaidimo metamedžiagos paviršiumi tyrimo rezultatai	40
4.1. Paviršinės bangos sklaidimas metamedžiagoje rezultatai	40
4.2. Paviršinės bangos sklaidimas dviejų metamedžiagų sandūroje rezultatai.....	42
4.3. Paviršinės bangos sklaidimas dviejų nanostruktūrinių metamedžiagų sandūroje rezultatai.....	43
Apibendrinimas. Išvados	46
Literatūra	47
PRIEDAI	49
A priedas. USB laikmena su baigiamojo darbo aiškinamuoju raštu.....	49
B priedas. Pranešimo XXI-oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje pažyma.....	50
C priedas. Pranešimo XXI-oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje diplomai	51
D priedas. Programinis kodas, naudotas tiriant paviršinės bangos sklaidimą metamedžiagoje	52
E priedas. Programinis kodas, naudotas tiriant paviršinės bangos sklaidimą dviejų metamedžiagų sandūroje.....	55
F priedas. Programinis kodas, naudotas tiriant paviršinės bangos sklaidimą dviejų nanostruktūrinių metamedžiagų sandūroje	61

ŽYMENYS IR SUTRUMPINIMAI

Žymenys:

$\varepsilon_{ }$	dielektrinės skvarbos komponentė lygiagrečia kryptimi;
$\varepsilon_{\perp}$	dielektrinės skvarbos komponentė statmena kryptimi;
ω_p	plazmos dažnis, Hz;
c	šviesos greitis 299 792 458 m/s ;
d_d	dielektriko sluoksnių storių suma;
d_m	metalo sluoksnių storių suma;
$E_m^{ }$	lygiagreti elektrinio lauko komponentė metalo sluoksnyje;
$E_d^{ }$	lygiagreti elektrinio lauko komponentė dielektriko sluoksnyje;
$E^{ }$	lygiagreti elektrinio lauko komponentė metamedžiagoje;
$E_m^{\perp}$	statmena elektrinio lauko komponentė metale;
$E_d^{\perp}$	statmena elektrinio lauko komponentė dielektrike;
$E^{\perp}$	statmena elektrinio lauko komponentė metamedžiagoje;
$\varepsilon_{\perp}^M(f)$	metamedžiagos dielektrinės skvarbos komponentė statmena kryptimi;
ε_d^M	metamedžiagoje naudotas dielektrikas, const;
ε_m^M	metamedžiagoje naudoto metalo kompleksinė dielektrinė funkcija;
ρ, ρ^L, ρ^R	metalo santykinė dalis (angl. <i>fill fraction</i>);
$\varepsilon_{ }^M(f)$	dielektrinės skvarbos komponentė lygiagrečia kryptimi;
ε_d	dielektrinė skvarba, const;
k	bangos vektorius vakuume;
β	bangos vektoriaus komponentė lygiagreti terpių sandūrai;
$\varepsilon_m^L(f), \varepsilon_m^R(f)$	metamedžiagoje naudoto metalo dielektrinė skvarba pagal Drude modelį;
$\varepsilon_d^L, \varepsilon_d^R$	nanolaidinėje metamedžiagoje naudotas dielektrikas, const;
$\varepsilon_{\perp}^R(f)$	dielektrinės skvarbos priklausomybė nuo dažnio statmena kryptimi;
$\varepsilon_{ }^L(f), \varepsilon_{ }^R(f)$	dielektrinės skvarbos priklausomybė nuo dažnio lygiagrečia kryptimi;

Sutrumpinimai:

EM (angl. <i>Electromagnetic wave</i>)	elektromagnetinė banga;
ENZ (angl. <i>Epsilon-near-zero</i>)	ε artimas nuliui;
FPGA (angl. <i>Field-programmable gate arrays</i>)	programuojama loginė matrica;
IR (angl. <i>Infrared</i>)	infraraudonieji spinduliai;
NSOM (angl. <i>Near-field scanning optical microscopy</i>)	artimo nuotolio skenuojanti mikroskopija;
SPP (angl. <i>Surface plasmon polaritons</i>)	paviršiniai plazmonų poleritonai;
TCO (angl. <i>Transparent conductive oxides</i>)	skaidrūs laidieji oksidai;
TMN (angl. <i>Transition metal nitrides</i>)	pereinamųjų metalų nitridai;
UV (angl. <i>Ultraviolet</i>)	ultravioletiniai spinduliai.

ĮVADAS

Darbo tikslas – ištirti metamedžiagose su geometriniais iškrypimais sklindančių bangų dispersiją ir slopinimo charakteristikas. Kadangi metamedžiagos palyginti nauja mokslo sritis, tai dar daug šių medžiagų savybių variacijų yra neištirta. Šios medžiagos suteikia galimybę sukurti medžiagas su norimomis elektrodinaminėmis savybėmis, kurių kombinacijos natūraliai gamtoje neegzistuoja. Tirtomis sandūromis gali sklisti paviršiniai plazmonų poliaritonai. Tai paviršinė banga, sklindanti dviejų terpių sandūra, iš kurių viena yra metalas.

Išnagrinėjus literatūrą apie metamedžiagos ir dielektriko sandūrą sklindančias paviršines bangas buvo išvestos paviršinės bangos dispersinė lygtys tiriamoms struktūroms. Taip pat sukurtos programos, skirtos apskaičiuoti struktūrų pagrindines charakteristikas įvertinant nuostolius terpėje. Skaičiavimams buvo naudota „MatLab“ programavimo aplinka.

Tyime naudojamas efektyviosios terpės aproksimavimo metodas, aprašant dielektrines skvarbas sandūroje lygiagrečia bei statmena kryptimis. Kompleksine dielektrine lygtimi aprašomi metalai terpėje.

Šis darbas leido susipažinti su metamedžiagomis ir jų tyrimais, nors ši tema anksčiau buvo mažai tirta. Pastebėta, kad kai kurios struktūros dėl charakteristikų formos gali tapti būsimų optoelektroninių prietaisų prototipais. Tačiau tam reikia atlikti išsamensius tyrimus. Taip pat prieduose pateikti programiniai kodai nagrinėtų struktūrų pagrindinėms charakteristikoms gauti.

Darbas pradedamas žymenimis ir santrumpomis naudotomis darbe. Toliau pateikiamas pateikiamas darbo įvadas. 1 skyriuje atliekama literatūros analizė apie optoelektronikos įrenginių pažangą, tyrimuose bei gamyboje išskylančius iššūkius, dėl kurių sunku realizuoti koncepcinius modelius. 2 skyrių sudaro efektyviosios terpės metodo analizė. 3 skyriuje atliekami metamedžiagų tyrimai. 4 skyriuje pateiktas detalus tyrimo rezultatų apibendrinimas nagrinėjant apskaičiuotas charakteristikas iš ankstesnio skyriaus. Prieduose pateikiami programiniai kodai.

1. OPTOELEKTRONINIŲ ĮRENGINIŲ KŪRIMO METAMEDŽIAGŲ PAGRINDU ANALITINĖ APŽVALGA

Šiame skyriuje apžvelgiama optoelektroninių prietaisų kūrimo perspektyvos naudojant metamedžiagas. Apžvelgiami taikymai ir iššūkiai, dėl kurių sunku koncepcinius modelius paversti veikiančiais prototipais.

1.1. Matematinų operacijų apdorojimas naudojant struktūrizuotas medžiagas

Yra žinoma, kad medžiagomis galima valdyti bangas, pakeisti kryptį, manipuluoti ar atspindėti. Metamedžiagos suteikia beprecedentę galimybę sukurti medžiagas su norimais parametrais laikiniais (angl. *temporally*), erdviniais (angl. *spatially*), lokaliais ar nelokaliais parametrais taip suteikiant naujų būdų manipuluoti bangomis. Šios savybės pritaikomos elektromagnetinėms ir optinėms bangoms, kuriant praktiškai pritaikomus prietaisus ar atskirus komponentus [1]. Pavyzdžiai įprastų optinių prietaisų, pagamintų iš įprastų medžiagų, yra ploni lęšiai (angl. *ubiquitous thin lenses*), optinės skaidulos, filtrai, fazinės plokštumos (angl. *phase plates*) ar polerizatoriai. Metamedžiagos gali suteikti naujų perspektyvų naujos kartos nanostruktūroms, kuriomis gali skliti paviršinės bangos. Šiuo atveju, ar galime įsivaizduoti tvarkingą nanostruktūrą, kuri gali keisti bangos formą, norint atlikti matematinės operacijas ir skaičiavimus, tokius kaip diferencijavimas, integravimas ar konvoliucija?

Šiais laikais komunikacija tarp žmonių reikalauja vis didesnio duomenų srauto (angl. *bandwidth*). Vaizdo ir garso apdorojimas, tuo labiau saugojimas, reikalauja mažesnių fizinių matmenų ir didesnių greičių. Norint patenkinti šiuos reikalavimus reikia naujos mąstysenos ir radikalios metodikos taikymo. Metamedžiagos gali pasiūlyti šių problemų sprendimą, jeigu bus pasiekta technologinė pažanga gaminant šias medžiagas. Neseniai tyrėjų komanda [2] pasiūlė koncepciją skaičiuojančiai metamedžiagai (angl. *computational metamaterial*), kuri leistų atlikti matematinės operacijas manipuluojant bangos forma. Tai potencialiai gali sukurti naujas paradigmas¹ matematiniams skaičiavimams ir signalus apdoroti su didele sparta. Tai brendo palaipsniui ir yra ankstesnių darbų tęsinys optinės metatronikos (angl. *metatronics*) srityje [3][4], kurioje susijungia elektronika ir fotonika. Šiame darbe buvo tiriama, kaip bangos ilgio matmenų struktūrose, šviesa sąveikauja su paskirstytų (angl. *lumped*) optinių parametrų elementais.

¹ Paradigma – teorinių ir metodologinių prielaidų, kuriomis remiasi konkretus mokslas tyrimų visuma.

Pavyzdžiui optiniai nanoinduktoriai (angl. *optical nanoinductors*), optiniai nanokondensatoriai (angl. *optical nanocapacitors*) ir optiniai nanorezistoriai (angl. *nanoresistors*).

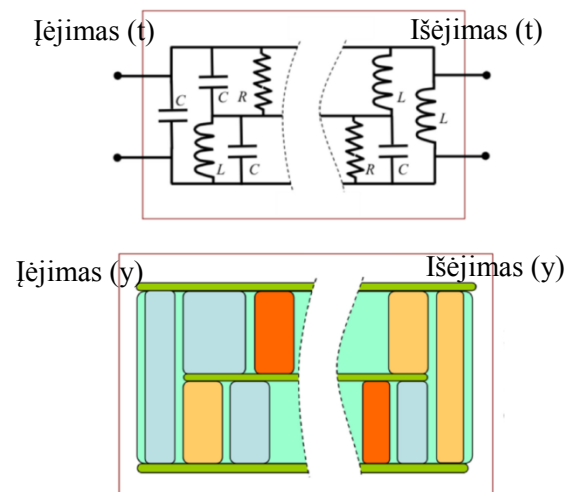
Kadangi elektronikos grandinėse paskirstyti parametrai yra sujungti siekiant sukurti funkcinę grandinę, šiuo atveju optinės metatronikos grandinės – tai rinkinys skirtingų savybių elementų, sujungtų tam tikra tvarka. Kartu jos gali funkcionuoti, kaip optinė nanograndinė su analogiškėmis funkcijomis. Tokių optinių metatronikos grandinių eksperimentinis įgyvendinimas buvo atliktas [5] [6]. Buvo pademonstruota, kad yra įmanoma sukurti šviesai skirtas grandines, kurių matmenys yra nanometrų eilės.

Struktūrizuotų medžiagų kūrimo iššūkiai

Įprasti skaitmeniniai kompiuteriai, kurie jau tapo neatskiriama mūsų gyvenimo dalis, yra suformuoti iš klasterių², kuriuose daugybė elektronikos grandinės elementų funkcionuoja remiantis sudėtingais algoritmais. Nors šie kompiuteriai ir taip neįtikėtinai greiti, tačiau sunku vystyti jų spartą tempu, kuriuo auga duomenų srautai. Tad naujos kartos kompiuterija, kuri paremta naujomis technologijomis, tikėtina pasiūlys skaičiavimų platformą, kuri bus greitesnė, mažesnių matmenų ir turės mažesnę energijos poreikį.

Įdomu stebėti ar optinė metatronika taps kandidatu minėtai platformai. 1 pav. pateikta analogija tarp elektroninio signalo apdorojimo ir optinio metatroninio atitikmens. Elektronikoje grandinių rinkinys procesoriui suteikia norimą perdavimo funkciją, lemiančią laikiną signalo turinį. O optinis metatroninis procesorius būtų pagamintas iš rinkinio struktūrizuotų metamedžiagų elementų, kartu sudarančių norimą erdvinę perdavimo funkciją. Taip veikiant pereinančią bangą galima keisti procesoriaus išėjime bangos formą pagal atliekamą matematinę operaciją.

Tyrėjų komanda pristatė darbą [2] ir pasiūlė kelis būdus optiniui procesoriui įgyvendinti. Pirmasis – suprojektuoti metapaviršius (angl. *metasurfaces*) su norima perdavimo funkcija erdvinėje Furjė srityje. Antrasis – suprojektuoti Gryno³ funkciją (angl. *Green's function*) erdvinėms koordinatėms, taip apeinant būtinybę atlikti erdvinę Furjė



1 pav. Elektroninis procesorius, sukurtas iš elektrinės grandinės elementų (viršuje), ir optinės metatronikos procesorius, sukurtas iš įvairių struktūrinių medžiagų blokų (apačioje) [35]

² Klasteris (angl. *cluster*) – vienetas, sudarytas iš kelių vieno tipo elementų, kuris veikia kaip vieninga sistema, turinti tam tikrų savybių.

³ Matematikoje Gryno funkcija yra impulsinis atsakas į homogenišką linijinę diferencinę lygtį sričiai, apibrėžtai ribinėmis sąlygomis.

transformaciją. Remiantis pirmuoju metodu, reikia panaudoti optines struktūras, kurios atlieka erdvinę Furjė transformaciją. Tokią kaip įprastas išgaubtas lęšis ar laipsninio indekso (angl. *graded-index*) dielektriko sluoksniai ar skaidulos. Taigi detaliau aprašyti metodai gali būti rasti minėtame šaltinyje.

Idėja „analoginio metamedžiagomis paremto skaičiavimo“ ir „bangos forma paremto signalų apdorojimo“ panaudojant bangų sąveiką su kombinacijomis įvairių nanostruktūrų gali radikaliai pakeisti signalo apdorojimą nanometrų eilės matmenų prietaisuose. Šios idėjos taip pat gali būti papildytos skaitmenine metamedžiaga (angl. *digital metamaterial*) [7]. Kur dvi sudedamosios dalys sudaro metamedžiagos bitą (angl. *metamaterial bit*). Jais galima pasiekti norimus metamedžiagos parametrus. Kaip ir kiekvienoje srityje, susiduriama su iššūkiais. Keletas tokių – tai didelio tikslumo nanostruktūrų gamyba, didelio tikslumo metamedžiagos parametrų charakterizacija ir struktūrinių komponentų stabilumas aplinkoje, kuri kinta nuo temperatūros. Be to, bangų sklidimu paremtoms skaičiavimo platformoms būtų nepaprastai naudinga konfigūruojamų (programuojamų) medžiagų architektūra.

Mokslo ir technologijų pažanga sprendžiant iššūkius

Iššūkiai, minėti anksčiau, turėtų būti išspręsti naudojant pažangesnį nanostruktūrų gamybos metodą, geresnius tikslumo charakterizavimo metodus. Naujos kartos NSOM su kelių zondu (angl. *multiprobe*) sistema taip pat elektronų spinduliais paremtomis charakterizacijos technikomis. Dar yra katodų liuminescencijos (angl. *cathodoluminescence*) mikroskopija ir elektrono energijos netekimo spektroskopija (angl. *electron energy-loss spectroscopy*). Visi šie naudingi metodai yra skirti nustatyti ateities metamedžiagų charakteristikoms ir metrologijai⁴.

Kitas svarbus elementas siekiant sukurti bangų pagrindu paremtą analoginį skaičiavimą naudojant metamedžiagas yra galimybė konfigūruoti įtaiso elemento parametrus. Kadangi tikimasi, kad panašūs prietaisai atliks skirtingas operacijas esant vienodai sandarai (tai yra skirtingai konfigūracijai). Tai primena loginę programuojamą matricą (FPGA), jose vartotojas gali programuoti grandines su tikslu perkonfigūruoti kitai užduočiai. Buvo įrodyta šios koncepcijos pranašumai įvairiose elektronikos srityse [8]. Kiltų didžiulis susidomėjimas, jeigu tokia koncepcija, ir jos atmainos galėtų būti pritaikomos metamedžiagoms. Programuojamų metamedžiagų pavyzdys gali būti rastas [9] šaltinyje. Jeigu FPGA principu paremtos metamedžiagos taptų realybe tikėtina, kad tai sukeltų proveržį nanofotonikos srityje. Galima numatyti programuojamą šviesos veikimu paremtą analoginę skaičiavimo mašiną – kompiuterį, kuris galėtų atlikti skirtingas matematinės operacijas tiesiog konfigūruojant struktūrinius blokus. Labai įdomu pažiūrėti, kaip šviesos sklidimu

⁴ Metrologija – tai matavimo mokslas.

paremta analoginė skaičiavimo mašina būtų pritaikyta lygtims spręsti. Jeigu kalbėtume apie metamedžiagų struktūras, kurios atlieka matematinės operacijas, tokias kaip integravimą ar diferencijavimą, tai galima plačiau paskaityti [2] šaltinyje. Tai atliekama pritaikant tinkamą grįžtamąjį ryšį. Gali būti sukurta optinė struktūra, kurios sprendiniai gali būti proporcingi duotam integralui ar diferencialui.

Apibendrinimas

Metamedžiagų srityje pasiektas nemažas proveržis, bet naujos idėjos nukreipia į naujus neištirtus horizontus. Konceptija „Informacinių metamedžiagų“ (angl. *informatic metamaterials*) čia trumpai apibendrinama ir gali tapti perspektyviu keliu metamedžiagų tyrimų srityje, suteikiančiu kitokią platformą matematiniams skaičiavimams ir informacijos apdorojimui.

1.2. Legiruoto metalo oksidai itin greitoms metamedžiagoms

Plazmonika (angl. *plasmonics*) pristatė daug radikaliai naujų prietaisų koncepcijų, kurios pritaikomos optinėse technologijose. Ne vien dėl galimybės apeiti pagrindines limitacijas, susijusias su difrakcine šviesos prigimtimi, bet ir dėl metalo įtraukimo kaip sudedamosios dalies (patiriamo elektrinio rezonanso), į fotonikos pasaulį išleido išskirtines kompozitines medžiagas su efektyviosiomis optinėmis savybėmis, išsidėsčiusiomis platesniame elektrodinaminių parametrų regione [10][11]. Kadangi po pradinio impulso, kurį sukėlė tauriaisiais metalais paremtos optinės metamedžiagos, įskaitant ne vieną sėkmingą eksperimentinę koncepciją (angl. *proof-of-concept*), atsirado didžiulis poreikis alternatyvių, konfigūruojamų parametrų (angl. *tunable*), o dar geriau CMOS⁵ suderinamų medžiagų. Faktiškai didelius iššūkius, iškylančius gaminant ir integruojant, kelia naudojami taurieji metalai, kurie turi ribotas galimybes (angl. *limited tunability*) (kalbant apie galimybę keisti medžiagos optines savybes) ir kenčia dėl nuostolių.

Ne per seniausią didesnio dėmesio susilaukė metalus galintis pakeisti pereinamųjų metalų nitridai TMN ir skaidrūs laidieji oksidai TCO. Jie aplenkia anksčiau minėtas limitacijas tauriesiems metalams. Pavyzdžiui TMN atveju, (titano ir cirkonio nitrido TiN, ZrN) optinės savybės primena auksą su panašiu plazmos dažniu, esančiu regimosios – ultravioletinės šviesos diapazone. TMN yra stipri, atspari medžiaga su ypač dideliu temperatūriniu, cheminiu ir mechaniniu stabilumu. Jie pasižymi plazmonine charakteristika, panašia į aukso, ir jie yra potencialūs kandidatai pritaikant

⁵ CMOS – Jungtinis MOP darinys (angl. *Complementary Metal Oxide Semiconductor*).

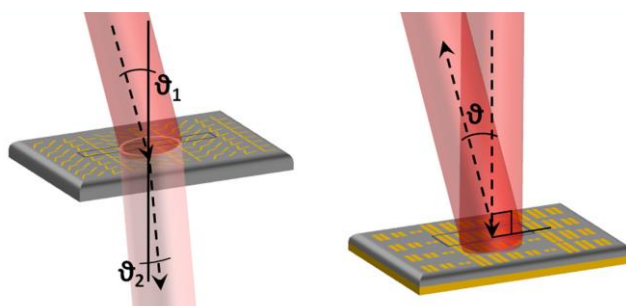
karščiui atspariems plazmoniniams prietaisams. Tokie kaip termofotovoltas⁶ (angl. *thermophotovoltaic*), šiluminis magnetinis įrašymas ar fotokatalizė (angl. *photocatalysis*) dėl didelio atsparumo karščiui (nors tai nėra atliekamos apžvalgos pagrindinis kriterijus) [11]. TCO – tai aliuminiu, galiu, indžiu legiruoti cinko oksidai AZO, GZO, IZO ar indžio oksidai (ITO). Taip pat tai stipriai legiruoti plačiajuosčiai (angl. *wide-band*) puslaidininkiai su plazmos dažniu, esančiu greta IR dažnių [12]. Dažniuose, artimuose IR, TCO patiria mažesnius optinius nuostolius, mažesnę realiosios dielektrinės skvarbos amplitudę (ϵ_{Re}) lyginant su tauriaisiais metalais ir nitridais. Dėl tokios charakteristikos TCO leidžia pasiekti ENZ režimą dažniuose, artimuose IR, abiem kompozitinėms struktūroms, taip pat pavienei medžiagai [13]. Greta šie sudėtingi oksidai demonstruoja puikų dinamišką konfigūruotumą (angl. *tunability*) (kalbant apie galimybę keisti medžiagos dielektrinę skvarbą optiniu ar elektriniu būdu). Visos šios TCO savybės daro jas išskirtinai patraukliomis naujos kartos metamedžiagų ir plazmoniniams įtaisams [14].

Itin greitų metamedžiagų kūrimo iššūkiai

Per pastaruosius 7 metus metamedžiagų tyrimas ir kūrimas buvo koncentruojamas apie metapaviršius (angl. *metasurfaces*). Metapaviršiai yra technologinių tyrimų objektai, kurie gali būti pagaminti įprastu planariu fotolitografijos (angl. *photolithographic*) metodu ir šis koncepcinis paprastumas leidžia taikyti tiesioginę aproksimacinę analizę.

Įrodyta, kad metapaviršiai yra naudingi realizuojant fundamentinius itin plonus optinius komponentus, tokius kaip linzes, poliarizatorius, bangos kreipiklius (angl. *beamsteerers*), holografinės plokštės ir t.t.[15]. Du fundamentiniai metodai buvo naudojami kuriant ir realizuojant optinius metapaviršius (žr. 2 pav.) kairėje nanoantena (pagaminta iš metalo arba integruota metalo sluoksnyje [16], dešinėje tarpinis plazmonas (angl. *gap plasmon*) [17].

Pirmasis metodas remiasi sklindančios bangos fronto (angl. *wavefront*) fazės valdymu naudojant bangos ilgio (angl. *subwavelength*) metalų nanoantenas. Remiantis šiuo metodu, daugybė darbų buvo atlikta po nova-



2 pav. Kairėje nanoantena, dešinėje metapaviršius. Schematiškas piešinys vaizduoja anomalų perdavimą ir atspindį [35]

⁶ Termofotovoltas – šiluminės energijos tiesioginis keitimas į elektros energiją naudojant fotonus.

toriško darbo, kurį atliko „Kapaso“⁷ grupė (angl. *Capasso group*) apibendrinant atspindžio ir lūžio dėsnius. Šis metodas turi privalumų, nes gali būti įgyvendintas naudojant elektronų spindulio litografiją ar jonų spindulio frezavimą (angl. *ion beam milling*). Kitaip tariant, tik maža dalis krintančios šviesos yra paveikiama esančių nanostruktūrinių antenų. Tarpinių plazmonų sprendinys, priešingai, gali padidinti norimą optinį efektyvumą daugiasluoksnės struktūros kaina. Bet čia susiduriama su dideliais perdavimo nuostoliais.

Nors ši technologija yra labai perspektyvi, yra kliūčių, kurios neleidžia realizuoti įspūdingų specifikacijų prietaisų. Pirmiausia turime susidoroti su CMOS nesuderinamumu. Auksas ir sidabras vis dar išlieka plačiai naudojami gaminant optinius metapaviršius. Kita vertus, derėtų atsižvelgti, kaip gerokai sustiprinti šių prietaisų našumą (angl. *performance*), sumažinti galios suvartojimą bei sukurti galimybę realiu laiku valdyti optinius parametrus.

Mokslo ir technologijų pažanga sprendžiant iššūkius

Pirmasis žingsnis realizuojant realaus pasaulio prietaisus yra susijęs su įprastų tauriųjų metalų pakeitimu naudojant CMOS suderinamas medžiagas. Didelis žingsnis į priekį buvo žengtas pristatant TCO plazmonikos srityje. Tokie TCO, kaip AZO ir GZO, gali turėti gerokai mažesnius nuostolius (ϵ_{Im}) negu sidabras, esant telekomunikacijos įrangos veikimo dažniams su papildomais privalumais, esant netiesiogometrinėms⁸ (angl. *nonstoichiometric*) medžiagoms. Suteikiama galimybė valdyti būdingą plazmos dažnį plačiame ruože (nuo regimosios iki artimo IR), pavyzdžiui, ITO 0,6 – 1,6 μm . Kas šias medžiagas daro ypatingas? Tai jų optinis skaidrumas ir gebėjimas išlaikyti didelius legiravimo lygius stipriai nepabloginant jų struktūros. Pasiekama krūvininkų koncentracija $N \sim 10^{21} \text{ cm}^{-3}$. Palyginus tai didelė koncentracija lyginant su puslaidininkiu, įdiegiant metalo pobūdžio savybes artėjant prie IR dažnių. Tai yra vienu laipteliu mažiau negu taurieji metalai $N_{[Au]} \sim 5,9 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$. Taip yra dėl didelės laisvųjų elektronų koncentracijos – absoliuti vertė dielektrinės skvarbos realiosios dalies yra maža, kas suteikia galimybę veikti ENZ režime [13]. Šiame režime dinamiškas optinių savybių konfigūravimas (angl. *tunability*) yra jautriausias [18]. Beje, gamybos technologijos, reikalingos šioms medžiagoms, praktiškai jau yra subrendusios dėl plataus taikymo įvairiose pramonės šakose, tokiose kaip jutiminiai vaizduokliai (angl. *touchscreen*), skaidrūs elektrodai saulės elementuose ir visai neseniai didelės raiškos (angl. *resolution*) lanksčiuose vaizduokliuose. Pavyzdžiui, aukštos kokybės plonos TCO plėvelės gali būti

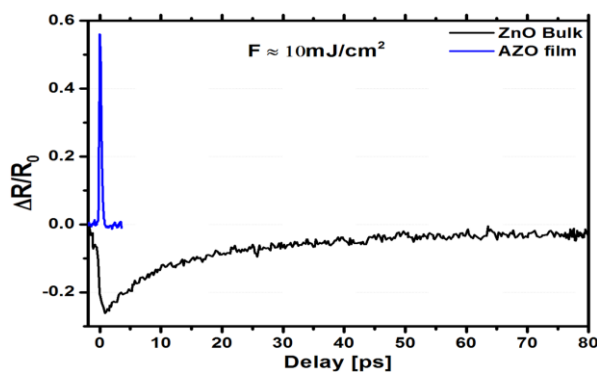
⁷ Capasso group – Federiko Kapaso (angl. Federico Capasso) įkurta tyrėjų grupė, kuri specializuojasi taikomosios fizikos, inžinerijos, puslaidininkų fizikos, optoelektronikos bei mikro-mechanikos srityse.

⁸ Netiesiogometrinis (angl. nonstoichiometric) – cheminis junginys, dažniausiai neorganinės kilmės, kurių elementinės kompozicijos negalima išreikšti sveikaisiais skaičiais.

pagamintos ne vienu metodu, pavyzdžiui, purškiant (angl. *sputtering*), lazerio abliacija⁹ (angl. *laser ablation*) ar taikant vandeninį cheminį nusodinimą (angl. *aqueous chemical deposition*).

Todėl TCO pateikia perspektyvų sprendimą problemoms, kurios būdingos metamedžiagoms su tauriaisiais metalais. Beje, TCO yra suderinamos su CMOS ir yra konfigūruojamos. Tačiau dvi fundamentinės problemos vis tiek išlieka norint atskleisti visą šių medžiagų potencialą. Pirmoji problema iškyla dėl ribotos absoliučios variacijos optiškai sužadintų krūvininkų koncentracijos (dielektrinės skvarbos). Ji siekia ~10 % būdingos koncentracijos optiniams srauto (angl. *fluence*) tankio lygiams, esantiems žemiau žalingos ribos. Antroji problema iškyla dėl lėtos elektronų – skylių rekombinacijos trukmės (iki 100 ps) [19]. Šių problemų sprendimas turėtų būti randamas ne tik medžiagotyros srityje, bet ir atsižvelgiant į jau sukurtų struktūrų optimizavimą ar jų pritaikymą alternatyviems metodams. Atsižvelgiant į pirmąją problemą, ribotos ϵ modifikacijos leidžia didesnę dinaminę koregavimą veikiant ENZ režime. Galėtų būti naudojami tarpiniai plazmonai, kurie yra iš esmės rezonansiniai ir yra jautresni mažiems ϵ pokyčiams. Iš kitos pusės sumažinti rekombinacijos laiką iš esmės neleidžia pati medžiaga.

Tyrėjų grupė, kurią sudaro Marselo Ferera (angl. *Marcello Ferrera*), Natanielis Kinsey (angl. *Nathaniel Kinsey*) ir kiti, sukūrė gamybos metodą, kuris veikia kambario temperatūroje, o rekombinacijos trukmė mažesnė negu 1 ps, ir tai buvo pasiekta AZO plėvele (angl. *film*) neaukojant optinių parametrų (žr. 3 pav.). Pritaikius optimizacijas įrodoma, kad įmanoma pasiekti itin greitą rekombinaciją.



3 pav. Pereinamasis atspindys komerciškai prieinamo ZnO monokristalo junginio ir AlZnO plonos plėvelės, kuri sukurta itin greitai atsakui ENZ režime, kai dažnis artėja prie IR [35]

Apibendrinimas

Apibendrinant galima teigti, kad metamedžiagų laukia perspektyvi ateitis, jei pastangos kurti naujas metamedžiagas išliks intensyvios. Atsižvelgiant į paprasčiausius reikalavimus, naujiems junginiams prioritetą turėtų turėti tos, kurios suderinamos su CMOS technologija ir kurių optinės savybės gali būti keičiamos tiek statiskai, tiek dinamiškai plačiame dažnių ruože. Šiuo aspektu legiruoti puslaidininkinių oksidai atitinka keliamus reikalavimus ir, atrodo, kad tai raktas į konfigūruojamų, metamedžiagomis paremtų, prietaisų kūrimą. TCO plėvelės turi išstobulintą optinio atsako savybę, taip pat pasižymi mažais nuostoliais ENZ režime ir galimybe plačiame dažnių ruože

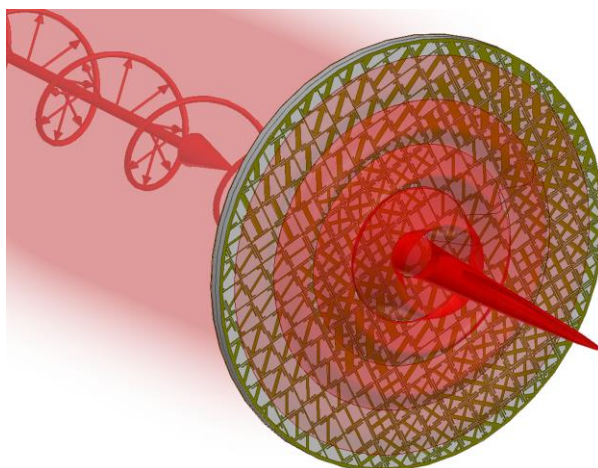
⁹ Lazerinė abliacija – procesas, kurio metu naudojant lazerį pašalinama medžiaga iš kietojo kūno ar skysčio.

valdyti medžiagos parametrus. Pritaikius šias savybes, suklestėtų plokščių metaprietaisų (metalinių, holografinių plokščių) ir konfigūruojamų komponentų (itin plonų moduliatorių) gamyba. Taip pat numatomi maršruto parinktuvai (angl. *router*), tinklo jungikliai (angl. *network switches*). Todėl labai tikėtina, kad tyrimų banga TCO pagrindo prietaisams sukels perversmą.

1.3. Bangų formavimas naudojant metapaviršius

Daugumoje optinių sistemų labai svarbu valdyti poliarizaciją, fazę bei amplitudę. Poliarizacijos valdymas dažniausiai pasiekiamas įvairiomis linijinių poliarizatorių (angl. *linear polarizers*) ir bangos plokštumų (angl. *waveplates*) kombinacijomis. O fazės valdymas yra pasiekiamas dielektrinėmis linzėmis ir erdviu šviesos moduliavimu. Tačiau šios sistemos yra stambios ir sunkiai integruojamos nanofotonikos sistemose. Optinių plonų metapaviršių kūrimas turi perspektyvų ženkliai sumažinti optinių sistemų matmenis. Metapaviršiai yra dviejų dimensijų ekvivalentai metamedžiagoms, pasižymi mažesniais matmenimis, juose mažesni nuostoliai ir juos lengviau pagaminti lyginant su trijų dimensijų alternatyvomis. Galima numatyti artėjantį stambių optinių sistemų perversmą, kuris reikalauja įprastų komponentų kombinacijų, pasižyminčių itin plonu paviršiumi. Šie privalumai leis lengviau realizuoti plokščius (žemo profilio) integruotus optikos įtaisus.

Metapaviršiai pasižymi elektriniu atsaku (angl. *electric response*), kuris suteikia nepaprastų būdų valdyti elektromagnetinės bangos formą. Keletas labiausiai stebinančių yra bangos ilgio eilės fokusavimo ir Snelijaus dėsnų apibendrinimas [20]. Dar visai neseniai buvo pademonstruota, kad metapaviršiui pridedant magnetinį atsaką, galima pašalinti atspindžių nuostolius ir gerokai padidinti jų perdavimo koeficientą [21]. Anizotropija ir magnetoelektrinė sietis (angl. *coupling*) taip pat buvo sistemingai įtraukti į metapaviršiaus struktūrą, ir tai leido visiškai valdyti elektromagnetinės bangos frontą, poliarizaciją bei fazę [22]. Taigi metapaviršiai turi potencialo pakeisti krintančią EM bangą į bet kokią norimą EM bangą. Pavyzdžiui, buvo sukurti metapaviršiai, skirti apskritiminės poliarizacijos (angl. *circularly polarized*) Gauso¹⁰ (angl. *Gaussian*) bangą pakeisti į radialiai poliarizuotą (angl. *radially polarized*) Beselio¹¹ (angl. *Bessel*) bangą [23] (žr. 4 pav.). Taip pat jie turi potencialo pagerinti našumą lyginant su įprastomis dielektrinių linzėmis, kadangi jos gali būti sukurtos eliminuoti sferinius ir chromatinus nukrypimus (angl. *aberrations*) [20].



4 pav. Nehomogeniškas anizotropiškas metapaviršius keičia apskritiminės poliarizacijos Gauso bangą į radialiai poliarizuotą Beselio bangą [35]

¹⁰ Gauso banga – tai monochromatinė elektromagnetinė banga, kurios skersinio magnetinio ir elektrinio lauko amplitudės kinta pagal Gauso funkciją.

¹¹ Beselio banga – tai elektromagnetinė akustinė ar gravitacinė banga, kurios amplitudė kinta pagal Beselio funkciją.

Metapaviršių kūrimo iššūkiai

Metapaviršiai yra puikūs kandidatai drastiškai sumažinant matmenis ir optinių sistemų sudėtingumą, nors metapaviršiai tipiškai neefektyvūs daugeliu taikymo atvejų. Paprastai metapaviršiai turi didesnius atspindžio ir absorbcijos nuostolius, negu tradiciniai optiniai komponentai. Didelė absorbcija riboja jų maksimalią galią [12]. Taip pat metapaviršiai dažniausiai turi stipresnę aberaciją, negu įprasti optiniai komponentai.

Erdvinis šviesos moduliavimas yra pagrindinis metodas konfigūruojamai optinių elementų sistemai, kadangi tai suteiktų visišką fazės ir amplitudės valdymą. Jeigu sukurtume itin plonus metapaviršius, kurie gali pasiekti panašų funkcionalumą, kaip ir erdvinis šviesos modulatorius, tai taptų patrauklia alternatyva. Konfigūruojami (angl. *tunable*) metapaviršiai žada suteikti didesnius greičius, galimybę manipuliuoti poliarizacija ir mažesnius pikselių (angl. *pixel*) matmenis, negu erdviniai polderizatoriai. Ši pažanga kilo dėl stipresnio optinių bangų valdymo. Tačiau didžioji dalis optinių metapaviršių yra nekonfigūruojami, o tie, kurie yra bent kiek konfigūruojami, turi itin mažą diapazoną [24].

Tačiau metapaviršius iš esmės lengviau pagaminti negu pavienes metamedžiagas. Gamybos iššūkis išlieka simuliuotų rezultatų eksperimentinis patvirtinimas (angl. *experimental validation*). Norint pasiekti nanometrų eilės raišką, metapaviršiai dažniausiai apdirbami elektronų spindulio litografija ar sutelkto jonų pluošto ėsdinimu (angl. *focused ion beam etching*), kurie yra brangūs ir reikalauja daug laiko. Be to, sunku tiksliai apdoroti didelius plotus naudojant šias technologijas. Eksperimentiškai patvirtinti metapaviršiaus struktūrą optiniuose dažniuose reikalauja didelės nanotechnologijų darbo patirties. Todėl dauguma tyrėjų gamina ir kuria metapaviršius mikrobangų ir milimetrinių bangų diapazone norėdami pateikti veikiantį prototipą [23]. Tačiau tai suteikia ribotą įžvalgą, koks iš tiesų metapaviršiaus našumas (angl. *performance*).

Mokslo ir technologijų pažanga sprendžiant iššūkius

Būtina tobulinti keletą skirtingų technologijų siekiant įveikti esamas limitacijas gaminant bangas keičiančius metapaviršius. Norint padidinti metapaviršiaus naudingumą, pirmiausia reikia medžiagos su mažesniais nuostoliais. Anksčiau minėti oksidai ir nitridai yra perspektyvios alternatyvos, galinčios pakeisti auksą ir sidabrą. Kadangi šių medžiagų plazmos dažnį galima valdyti, tai lemia mažesnius nuostolius, priklausomai nuo taikymo. Alternatyviai naudojant didelio indekso (angl. *high-index*) dielektrikus, tokius kaip silicis, demonstruoja ryškų potencialą, kadangi šios medžiagos turi neįprastai mažus nuostolius. Tačiau dielektriko pagrindu pagamintas

metapaviršius dar turi pasiekti poliarizacijos valdymo lygmenį, kuriuo pasižymi plazmoniniai metapaviršiai.

Konfiguruojami metapaviršiai yra perspektyvūs palaikyti perdavimo funkcijas priklausomai nuo poreikio. Pavyzdžiui, galime įsivaizduoti ateities išmaniųjų telefonų (angl. *smart-phone*) kamerą, kurią sudaro konfigūruojamas metapaviršius. Šis gali tapti didelio nominalo apertūros (angl. *high-numerical-aperture*) linze skirtingos difrakcijos mikroskopijai. Kaip, kad tolimų objektų fokusavimui (žr. 5 pav.). Pridedant konfigūruojamą metapaviršių galima pagerinti jų kokybę. Spinduliai, krentantys ant metapaviršiaus, gali būti stebimi jutikliu ir remiantis šiais duomenimis grįžtamuju ryšiu koreguoti metapaviršių, kol bus sumažinta aberacija iki minimumo. Naujos metamedžiagos ir struktūros yra reikalingos norint pasiekti šį konfigūravimo lygmenį. Vienas iš ga-

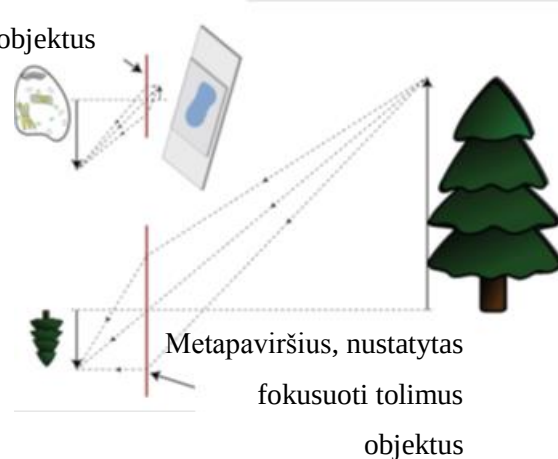
limų variantų apima medžiagų naudojimą, kurios yra elektriškai valdomos. Tai yra skvarba, sluoksnių laidumas kaip ir skystųjų kristalų ar grafeno [25]. Alternatyviai metapaviršių fizikiniai matmenys struktūroje gali būti valdomi nuolatinės srovės ar įtampos [24]. Tolimesni sistemingi struktūros procesai dar turi būti sukurti tam, kad metapaviršių parametrai galėtų būti tiksliai valdomi.

Svarbi kliūtis siekiant metapaviršių technologinės pažangos vis dar išlieka didelė kaina bei laiko sąnaudos kuriant prototipus. Metapaviršių struktūra, kuri paremta įprastomis medžiagomis, yra gerai nuspėjama pilnosios bangos simuliacijos (angl. *full-wave simulations*), tačiau tikslas yra integruoti naujas medžiagas į metapaviršius taip sumažinant nuostolius ir įdiegiant konfigūravimo savybę. Šis darbas reikalauja daugybės tyrimų norint sukurti tikslius modelius, charakterizuojančius naujų medžiagų savybes. Šis procesas bus pagreitintas ne vienos tyrėjų grupės, turinčios prieigą kurti prototipus. Pažanga nanotechnologijų srityje, iš tiesų, galėtų padėti sumažinti kainą bei padidinti tikslumą. Kitu atveju su CMOS technologija suderinama optinė medžiaga leistų kurti optines metamedžiagas greta integrinių grandynų.

Metapaviršius, nustatytas

fokusuoti artimus

objektus



Metapaviršius, nustatytas

fokusuoti tolimus

objektus

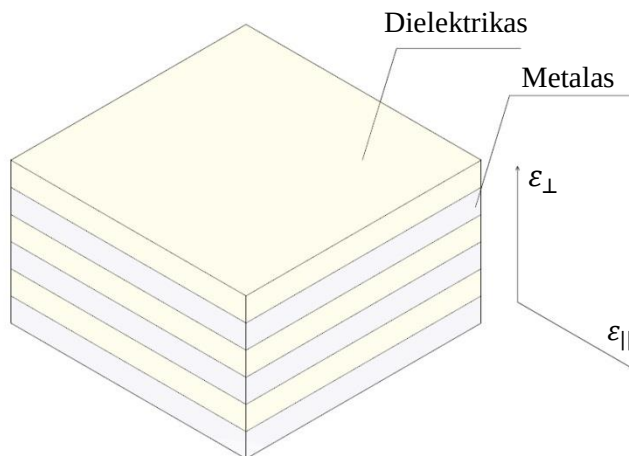
5 pav. Konfigūruojamas metapaviršius galėtų pasiūlyti platų pasirinkimą perdavimo funkcijų. Pavyzdžiui konfigūruojamas metapaviršius gali būti nustatytas fokusuoti objektus, kurie yra arti arba labai toli nuo jutiklio [35]

Apibendrinimas

Optiniai metapaviršiai siūlo naujas galimybes pritaikant optinių bangų formos manipuliacijas. Taip pat siūlo kompaktiškas alternatyvas optiniams komponentams. Nors problemos dėl našumo, konfigūravimo ir kainos vis dar neleidžia jiems būti realizuotiems. Jeigu bent viena iš šių problemų būtų išspręsta, tai per ateinančius metus metapaviršiai galėtų tapti įprastu optinių sistemų komponentu.

2. EFEKTYVIOSIOS TERPĖS APROKSIMAVIMO METODO ANALIZĖ

Šiame skyriuje bus išvesta efektyviosios terpės skvarbos išraiška anizotropiškomis daugiasluoksnėms metamedžiagoms. Šis metodas paremtas apibendrintu Maksvelo (angl. *Maxwell*) metodu [26]. Bus siekiama išvesti efektyvios skvarbos formules, tai yra lygiagrečia ($\epsilon_{||}$) ir statmena ($\epsilon_{\perp}$) kryptimis. Remiantis minėtu metodu galima įvertinti pakankami praskiestos medžiagos mikroskopinius ir makroskopinius laukus. Minima praskiesta medžiaga šiuo atveju yra vadinama sluoksniuota metamedžiaga, sudaryta iš metalo ir dielektriko sluoksnių ir pavaizduota 6 pav. Dielektrinė metalo ir dielektriko skvarba sluoksniuose atitinkamai yra ϵ_m ir ϵ_d . O metalo užimamas santykis metamedžiagoje apskaičiuojamas pagal 1 formulę. Panaši šios formulės išraiška bus naudojama tyrimo dalyje ir priklausys nuo tiriamos struktūros parametrų.



6 pav. Daugiasluoksnė metamedžiaga. Autoriaus pav.

6 pav. Daugiasluoksnė metamedžiaga. Autoriaus pav.

$$\rho = \frac{d_m}{d_m + d_d} \quad (1)$$

2.1. Dielektrinė skvarba lygiagrečia kryptimi

Šiame skyrelyje bus išvesta formulė, charakterizuojanti skvarbos komponentę lygiagrečia kryptimi. 2 formulė susieja srauto tankio vektorių $\vec{D}$, lauko stiprį E ir efektyviąją skvarbą ϵ_{ef} .

$$\vec{D} = \epsilon_{ef} \vec{E} \quad (2)$$

Yra gerai žinoma, kad elektrinio lauko tangentinės komponentės turi būti tolydžios pereinant terpių ribą. Taigi, tai išreiškiama lygtimi:

$$E_{||} = E_m^{||} = E_d^{||} \quad (3)$$

Taigi srauto tankio vektorių ($\vec{D}$) gali būti randamas suvienodinus (angl. *averaging*) metalo ir dielektriko srauto tankius.

$$D_{||} = \rho D_m^{||} + (1 - \rho) D_d^{||} \quad (4)$$

Pertvarkius 4 lygtį gauname 5 lygtį.

$$\varepsilon_{ef}^{\parallel} E^{\parallel} = \rho \varepsilon_m E^{\parallel} + (1 - \rho) \varepsilon_d E^{\parallel} \quad (5)$$

Taigi daugiasluoksnei metamedžiagai galime išvesti formulę, charakterizuojančią dielektrinę skvarbą lygiagrečia kryptimi.

$$\varepsilon_{\parallel} = \rho \varepsilon_m + \varepsilon_d (1 - \rho) \quad (6)$$

2.2. Dielektrinė skvarba statmena kryptimi

Lygiai taip pat ir statmenos lauko komponentės pereinant dviejų terpių ribą turi būti tolydzios srauto tankio vektorius šią sąlygą aprašo 7 formule.

$$E^{\perp} = E_m^{\perp} = E_d^{\perp} \quad (7)$$

Taip pat yra žinoma, kad elektrinių laukų superpozicija esanti dėl metalo ir dielektriko sluoksnių turi didelį poveikį elektrinio lauko dydžiui. Ši savybė aprašoma 8 formule.

$$E^{\perp} = \rho E_m^{\perp} + (1 + \rho) E_d^{\perp} \quad (8)$$

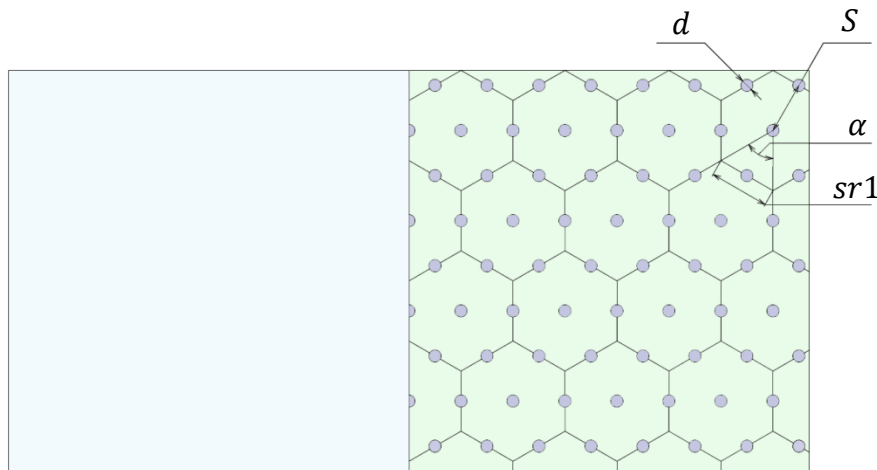
Taip pat reikia atsižvelgti į ribines sąlygas 7 formulė bei Maksvelo lygtis [27]. Taikyti šias ribojančias sąlygas naudinga, jeigu elektrinio lauko komponentės susiprastina ir tuomet išskaičiuojamas $\varepsilon_{\perp}$. Taigi daugiasluoksnei metamedžiagai galime išvesti formulę charakterizuojančią dielektrinę skvarbą statmena kryptimi.

$$\varepsilon_{\perp} = \frac{\varepsilon_m \varepsilon_d}{\rho \varepsilon_d + \varepsilon_m (1 - \rho)} \quad (9)$$

Pastaba, gautos išraiškos aprašančios dielektrinę skvarbą statmena ir lygiagrečia kryptimis šiuo atveju tampa konstantomis. Tačiau įprastai šios lygtys papildomos dažnio komponente. Todėl šios išraiškos tampa dažninėmis funkcijomis. Šią savybę suteikia kompleksinė dielektrinė funkcija, aprašanti metalų laidumo (dielektrinės skvarbos) pokytį nuo dažnio.

3. METAMEDŽIAGŲ, PASIŽYMINČIŲ SKIRTINGAIS GEOMETRINIAIS NUKRYPIMAIS, LYGINAMOJI ANALIZĖ

3.1. Paviršinės bangos sklidimas metamedžiagoje



7 pav. Kairėje – dielektrikas, dešinėje – metamedžiaga, sudaryta iš tvarkingai išdėstytų nanolaidininkų, įterptų į dielektriką. Autoriaus pav.

Tiriama struktūra parinkta tvarkingai išdėstytų nanolaidininkų, kurių skersmuo d , kiti šios struktūros parametrai pateikti 7 paveikslėlyje. Šios struktūros sandūroje gali sklisti paviršiniai plazmonų polaritonai, jeigu tenkinamos ribinės sąlygos. Ši struktūra jau buvo nagrinėta literatūroje [28]. Mano atliekamas tyrimas išsiskiria kitokių medžiagų naudojimu bei kitų struktūrinių parametrų poveikio nustatymu pagrindinėms charakteristikoms. Tyrime bus atsižvelgta į nuostolius metale ir dielektrike, tai yra, įvertinama menamoji charakteristikos dalis. Naudojantis jau išvestomis formulėmis teoriškai bus tiriamos sklidimo charakteristikos. Kad atlikti tyrimai būtų pakartojami, pateikiami naudoti struktūros parametrai, o prieduose – programinis kodas. Skaičiavimai atlikti naudojant „MATLAB R2015b“. (Pastaba. Kai kurios programinio kodo funkcijos gali neveikti tinkamai su kitomis „MATLAB“ versijomis.)

Tyrimo plane numatyti du scenarijai. Tai yra, tirti metamedžiagoje esančio nanolaidininko storio daromą įtaką sklidimo charakteristikoms bei nuostoliams kai:

- 1 Scenarijus. Metamedžiaga apribota skirtingais dielektrikais, nanolaidininkas – sidabras, didinamas nanolaidininko skersmuo.
- 2 Scenarijus. Metamedžiaga apribota skirtingais dielektrikais, nanolaidininkas – aliuminis, didinamas nanolaidininko skersmuo. Abiem atvejais būtina paisyti fizikinių struktūros parametrų. Pavyzdžiui, negalima didinti nanolaidininko storio d tiek, kad gretimi nanolaidininkai susiliestų.

Heterogenišką medžiagą, tokią kaip pateikta 7 pav. (dešinėje), galima laikyti homogeniška terpe, kadangi dėl lokalių rezonansų daromos įtakos įgauna egzotiškas savybes, kurios gamtoje retai sutinkamos [31].

Taigi dešinėje vaizduojama struktūra 7 pav. yra aprašoma d , $sr1$, S ir α parametrais. Tai atitinkamai reiškia nanolaidininko skersmenį, $sr1$ šešiakampės ląstelės kraštinės ilgį, atstumą tarp nanolaidininkų centrų ir kampą α , kuris tyrime bus nekintantis (60°). Kadangi nei viena medžiaga nepasižymi ryškiomis magnetinėmis savybėmis, tai, supaprastinant tolesnę analizę, jų magnetinė skvarba prilyginama vakuumo skvarbai, tai yra $\mu = 1$. Nanolaidininko išorinio lauko daromą įtaką dielektrinei skvarbai aprašo Drude modelis, kuris nebus detalčiau nagrinėjamas, tačiau patikrinta, kad naudojami medžiagų koeficientai atitinka eksperimentiškai nustatytus medžiagų parametrus. Taikant efektyvios terpės aproksimaciją (angl. *effective medium approximation*), įmanoma įvertinti nanolaidininko efektyviasias skvarbas (angl. *effective permittivities*), remiantis 10–11 formulėmis [28].

$$\varepsilon_{\perp}^M(f) = \varepsilon_d^M \left(\frac{\varepsilon_m^M(1 + \rho) + \varepsilon_d^M(1 - \rho)}{\varepsilon_m^M(1 - \rho) + \varepsilon_d^M(1 + \rho)} \right) \quad (10)$$

$$\varepsilon_{\parallel}^M(f) = \varepsilon_m^M \rho + \varepsilon_d^M(1 - \rho) \quad (11)$$

Metalo santykinė dalis (ρ) apskaičiuojama pagal 12 formulę.

$$\rho = \frac{\pi d^2}{2S(ht + sr1)} \quad (12)$$

Kur S , $sr1$ ir d yra metamedžiagos parametrai (žr. 7 pav.), o ht apskaičiuojamas pagal 13 formulę.

$$ht = \sqrt{2S^2 + \frac{sr1^2}{2} - 2 \left(S^2 + \frac{sr1^2}{4} \right) \cos \alpha \cdot \sin \left(\arctan \left(\frac{2S}{sr1} \right) - \frac{\alpha}{2} \right)} \quad (13)$$

Kur α kampas, tačiau šiame tyrime jis nekintantis.

Taigi išvedus šiuos sąryšius galima išvesti dispersinę lygtį terpių sandūrai, iš kurių viena anizotropiška. Įvertinus elektrinio ir magnetinio lauko tangentines komponentes, gauname vieną modą (angl. *mode*) su sklaidimo konstanta k .

$$\beta(f) = k \sqrt{-\frac{\varepsilon_d^M \varepsilon_d a (\varepsilon_d - \varepsilon_m^M \rho + \varepsilon_d^M (\rho - 1))}{b \left(\varepsilon_d^2 + \frac{\varepsilon_d^M (\varepsilon_m^M \rho - \varepsilon_d^M (\rho - 1)) a}{b} \right)}} \quad (14)$$

$$k = \frac{2\pi f}{c} \quad (15)$$

Atitinkamai kitos lygtys išreiškiamos kaip

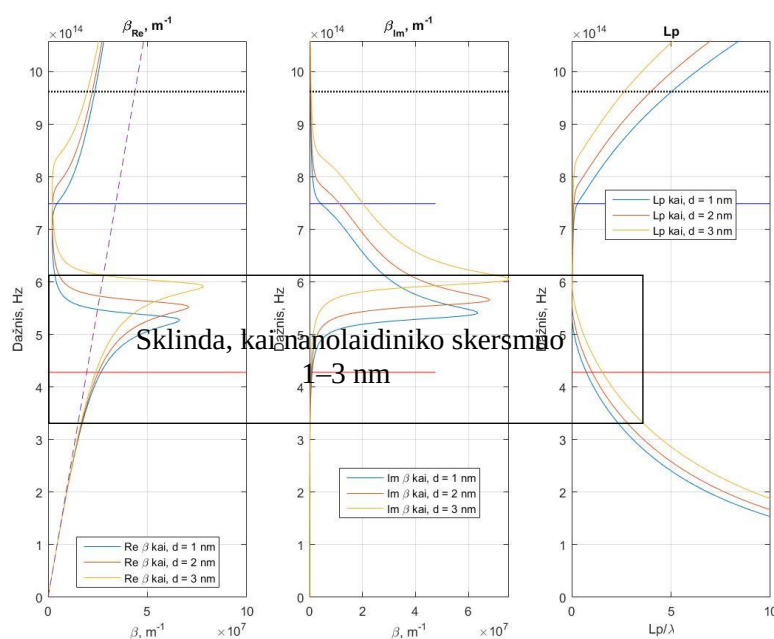
$$a = \varepsilon_d^M (\rho - 1) - \varepsilon_m^M (\rho + 1)$$

$$b = \varepsilon_d^M(\rho - 1) - \varepsilon_m^M(\rho + 1).$$

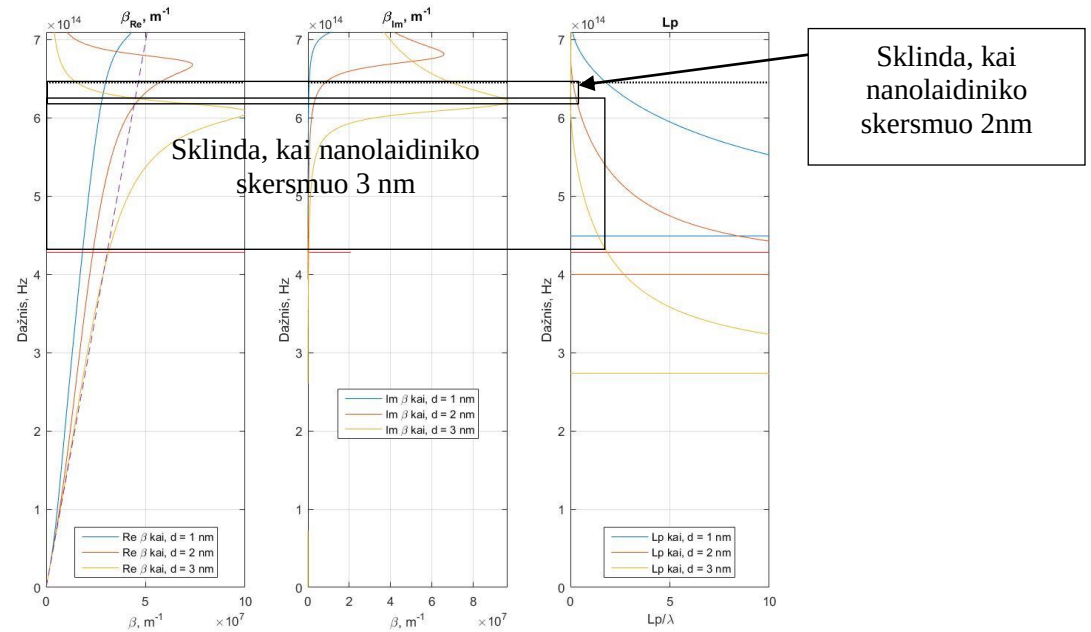
3.1.1. Scenarijus 1. Tiriama nanolaidinė metamedžiaga didinant nanolaidininko skersmenį esant skirtingam dielektrinių skvarbų santykiui

1 lentelė. Struktūros parametrai 1 scenarijui, nanolaidininko medžiaga – sidabras, dielektrinės skvarbos kinta pagal nurodomą santykį

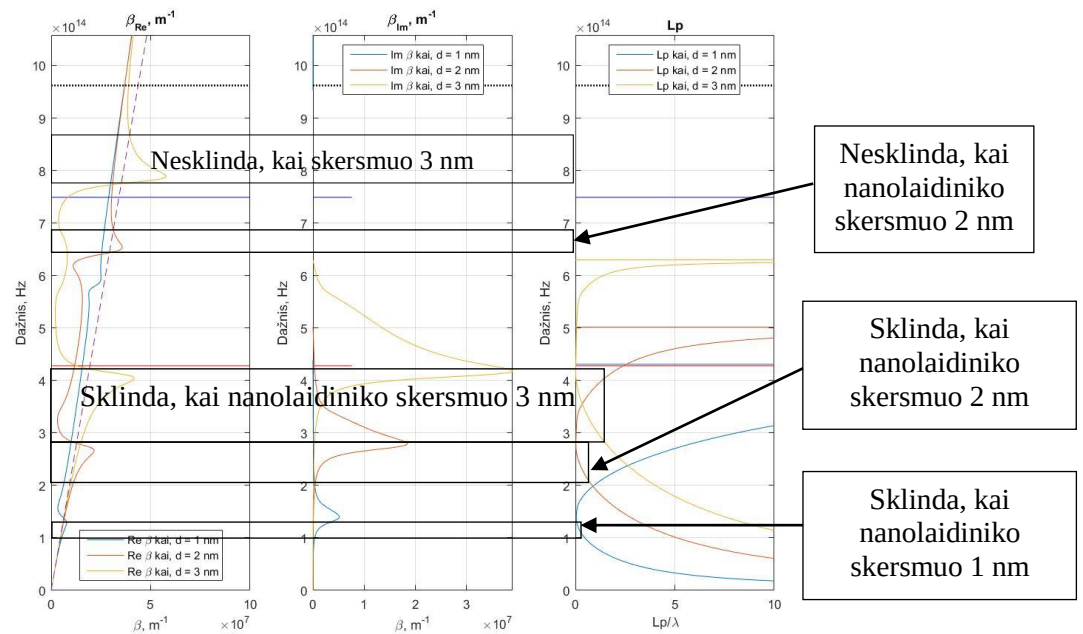
Parametras	Reikšmė
sr1	$6 \cdot 10^{-9} \text{ nm}$
S	$5,1962 \cdot 10^{-9} \text{ nm}$
d	$1 - 3 \cdot 10^{-9} \text{ nm}$
α	60°
Stiklas	4,7
Silicis	11,68
ε_∞	5
ω_p	9,5 eV
δ	0,0987 eV



8 pav. Kairėje nanolaidinės medžiagos bangos vektoriaus $\beta_{[Re]}$ dažninė charakteristika. Vidurinis grafikas bangos vektoriaus $\beta_{[Im]}$ dažninė charakteristika. Dešinėje grafikas vaizduoja sklidimo nuotolio L_p/λ dažninę charakteristiką. Šios priklausomybės gautos, kai abiejose sandūros pusėse dielektrinės skvarbos sutampa ($\varepsilon_d = \varepsilon_d^M = 4,7$) (žr. 1 lent.). Punktyrinė horizontali linija vaizduoja paviršinės plazmos (ω_{sp}) dažnį



9 pav. Kairėje nanolaidinės medžiagos bangos vektoriaus $\beta_{[Re]}$ dažninė charakteristika. Vidurinis grafikas bangos vektoriaus $\beta_{[Im]}$ dažninė charakteristika. Dešinėje grafikas vaizduoja sklaidimo nuotolio L_p/λ dažninę charakteristiką. Šios priklausomybės gautos, kai abiejose sandūrose dielektrinės skvarbos nusakomos santykiu ($\epsilon_d > \epsilon_d^M$, tai yra $11,68 > 4,7$) (žr. 1 lent.). Punktyrinė horizontali linija vaizduoja paviršinės plazmos (ω_{sp}) dažnį



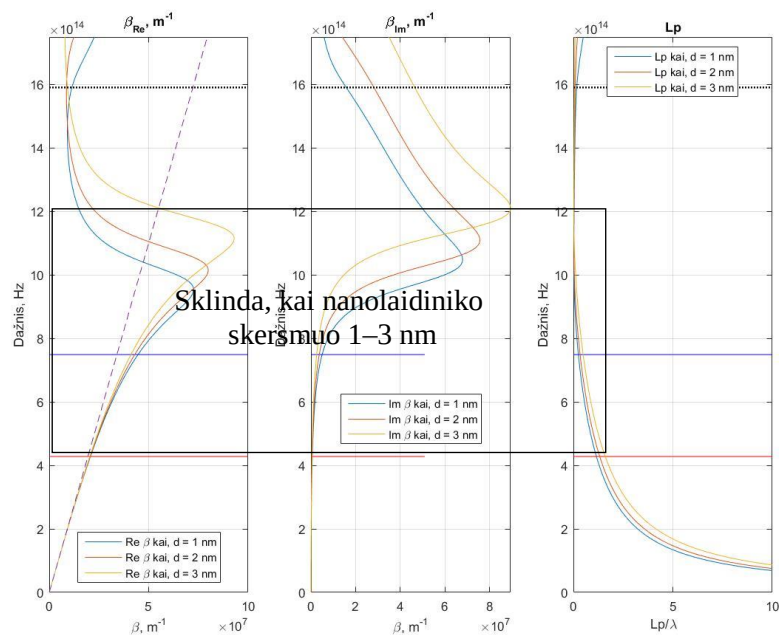
10 pav. Kairėje nanolaidinės medžiagos bangos vektoriaus $\beta_{[Re]}$ dažninė charakteristika. Vidurinis grafikas bangos vektoriaus $\beta_{[Im]}$ dažninė charakteristika. Dešinėje grafikas vaizduoja sklaidimo nuotolio L_p/λ dažninę charakteristiką. Šios priklausomybės gautos, kai abiejose sandūrose dielektrinės skvarbos nusakomos santykiu ($\epsilon_d < \epsilon_d^M$, tai yra $4,7 < 11,68$) (žr. 1 lent.). Punktyrinė horizontali linija vaizduoja paviršinės plazmos (ω_{sp}) dažnį

Pastaba. ($\varepsilon_d < \varepsilon_d^M$): β_{Im} reikšmės tampa neigiamos ir jų nepaisoma. Neigiama β_{Im} yra dispersinės lygties nefizikinių (angl. *non-physical*) sprendinių rezultatas. Tiksliau tariant, šis sprendinys reiškia lauko stiprinimą, o ne energijos absorbciją. Iš fizikinės pusės tai reiškia, kad paviršinės bangos negali būti sužadintos ir sklaidimas dėl to neįmanomas [29]

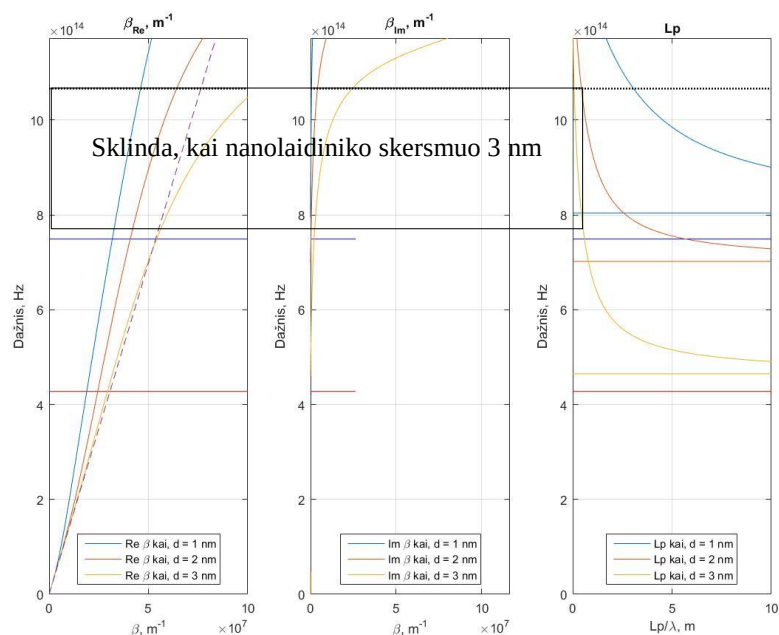
3.1.2. Scenarijus 2. Tiriama nanolaidinė metamedžiaga didinant nanolaidininko skersmenį esant skirtingam dielektrinių skvarbų santykiui

2 lentelė. Struktūros parametrai 2 scenarijui, nanolaidininko medžiaga – aliuminis, dielektrinės skvarbos kinta pagal nurodomą santykį

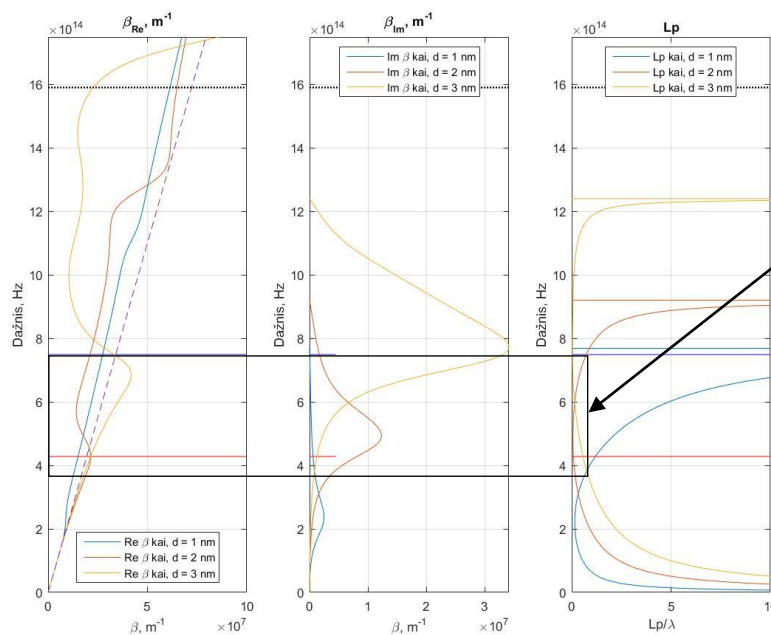
Parametras	Reikšmė
sr1	$6 \cdot 10^{-9} \text{nm}$
S	$5,1962 \cdot 10^{-9} \text{nm}$
d	$1 - 3 \cdot 10^{-9} \text{nm}$
α	60°
Stiklas	4,7
Silicis	11,68
ε_∞	1
ω_p	15,702 eV
δ	0,696 eV



11 pav. Kairėje nanolaidinės medžiagos bangos vektoriaus $\beta_{[Re]}$ dažninė charakteristika. Vidurinis grafikas bangos vektoriaus $\beta_{[Im]}$ dažninė charakteristika. Dešinėje grafikas vaizduoja sklaidimo nuotolio L_p/λ dažninę charakteristiką. Šios priklausomybės gautos, kai abiejose sandūros pusėse dielektrinės skvarbos sutampa ($\varepsilon_d = \varepsilon_d^M = 4,7$) (žr. 2 lent.). Punktyrinė horizontali linija vaizduoja paviršinės plazmos (ω_{sp}) dažnį

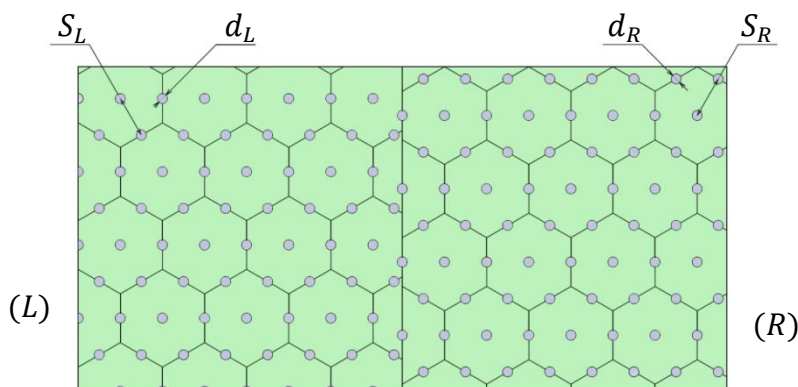


12 pav. Kairėje nanolaidinės medžiagos bangos vektoriaus $\beta_{[Re]}$ dažninė charakteristika. Vidurinis grafikas bangos vektoriaus $\beta_{[Im]}$ dažninė charakteristika. Dešinėje grafikas vaizduoja sklaidimo nuotolio L_p/λ dažninę charakteristiką. Šios priklausomybės gautos, kai abiejose sandūrose dielektrinės skvarbos nusakomos santykiu ($\varepsilon_d > \varepsilon_d^M$, tai yra $11,68 > 4,7$) (žr. 2 lent.). Punktyrinė horizontali linija vaizduoja paviršinės plazmos (ω_{sp}) dažnį



13 pav. Kairėje nanolaidinės medžiagos bangos vektoriaus $\beta_{[Re]}$ dažninė charakteristika. Vidurinis grafikas bangos vektoriaus $\beta_{[Im]}$ dažninė charakteristika. Dešinėje grafikas vaizduoja sklidimo nuotolio L_p/λ dažninę charakteristiką. Šios priklausomybės gautos, kai abiejose sandūrose dielektrinės skvarbos nusakomos santykiu ($\epsilon_d < \epsilon_d^M$, tai yra $4,7 < 11,68$) (žr. 2 lent.). Punktyrinė horizontali linija vaizduoja paviršinės plazmos (ω_{sp}) dažnį

3.2. Paviršinės bangos sklidimas dviejų metamedžiagų sandūroje



14 pav. Dešinioji metamedžiaga sudaryta iš tvarkingai išdėstytų nanolaidininkų, įterptų į dielektriką, kurių struktūra aprašoma d_R ir S_R parametrais, analogiškai kairioji metamedžiaga. Autoriaus pav.

14 pav. vaizduojama struktūra yra dviejų metamedžiagų sandūra. Ji jau buvo nagrinėta literatūroje [30]. Kadangi jos nepasižymi magnetinėmis savybėmis, tai magnetinę skvarbą galima laikyti lygią vakuumo skvarbai, tai yra $\mu = 1$. Nanolaidininkui išorinio elektromagnetinio lauko daromą įtaką dielektrinei skvarbai aprašo Drude modelis. Kaip ir ankstesniame tyrime, remiantis efektyviosios terpės aproksimacija (angl. *effective medium approximation*), galima įvertinti nanolaidinės

metamedžiagos skvarbas (angl. *effective permittivities*), kurių išraiškos lygiagrečia bei statmena kryptimis aprašomos 16,18–20 formulėmis.

$$\varepsilon_{\perp}^L(f) = \varepsilon_d^L \left(\frac{\varepsilon_m^L(1 + \rho^L) + \varepsilon_d^L(1 - \rho^L)}{\varepsilon_m^L(1 - \rho^L) + \varepsilon_d^L(1 + \rho^L)} \right) \quad (16)$$

$$\rho^L = \frac{\pi d_L^2}{2\sqrt{3}S_L^2} \quad (17)$$

$$\varepsilon_{\perp}^R(f) = \varepsilon_d^R \left(\frac{\varepsilon_m^R(1 + \rho^R) + \varepsilon_d^R(1 - \rho^R)}{\varepsilon_m^R(1 - \rho^R) + \varepsilon_d^R(1 + \rho^R)} \right) \quad (18)$$

$$\varepsilon_{\parallel}^L(f) = \varepsilon_m^L \rho^L + \varepsilon_d^L(1 - \rho^L) \quad (19)$$

$$\varepsilon_{\parallel}^R(f) = \varepsilon_m^R \rho^R + \varepsilon_d^R(1 - \rho^R) \quad (20)$$

Taigi, turint šiuos sąryšius, galima išvesti dispersinę lygtį terpių sandūrai (abi terpės anizotropiškos). Įvertinus elektrinio ir magnetinio lauko tangentines komponentes gauname vieną modą (angl. *mode*) su sklaidimo konstanta k .

$$\beta(f) = k \sqrt{\frac{(\varepsilon_{\parallel}^R - \varepsilon_{\parallel}^L)\varepsilon_{\perp}^R\varepsilon_{\perp}^L}{\varepsilon_{\perp}^R\varepsilon_{\parallel}^R - \varepsilon_{\perp}^L\varepsilon_{\parallel}^L}} \quad (21)$$

Tyrimo plane numatyti du scenarijai. Tai yra, tirti metamedžiagoje esančio nanolaidininko storio poveikį sklaidimo charakteristikoms bei nuostoliams kai:

1 Scenarijus. Metamedžiaga, kurios nanolaidininko medžiaga – sidabras, apribota kita panašios struktūros metamedžiaga. Pastarosios nanolaidininkas – aliuminis. Keičiami dielektrikai abiejose pusėse ir dešinėsios metamedžiagos nanolaidininko storis.

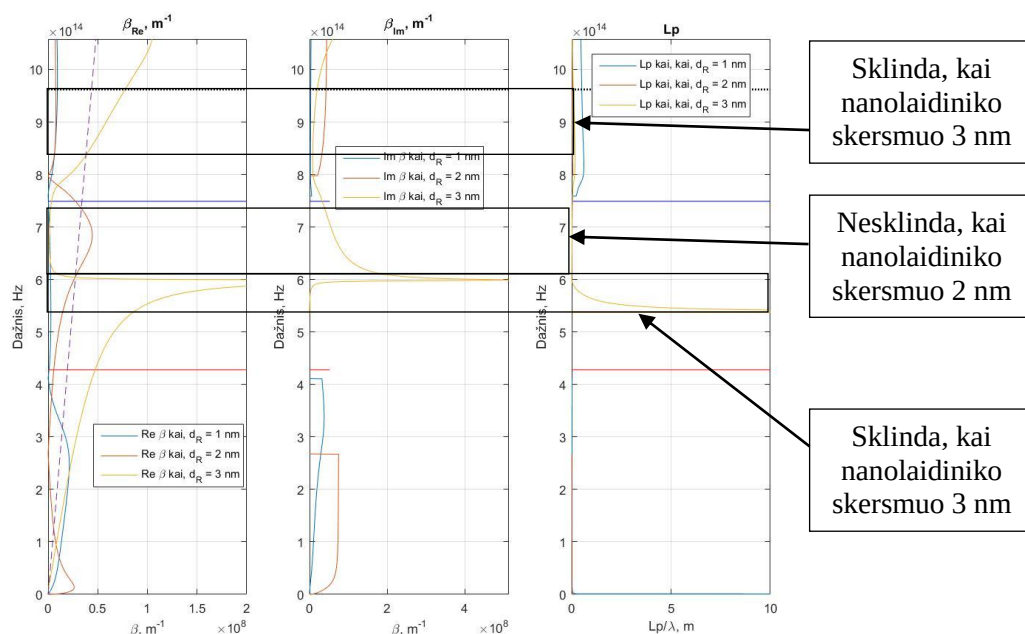
2 Scenarijus. Metamedžiaga, kurios nanolaidininko medžiaga – aliuminis, apribota kita panašios struktūros metamedžiaga. Pastarosios nanolaidininkas – sidabras. Keičiami dielektrikai abiejose pusėse ir dešinėsios metamedžiagos nanolaidininko storis. Abiem atvejais būtina paisyti fizikinių struktūros parametrų.

Taigi vaizduojama struktūra 14 pav. yra aprašoma d_L , d_R , S_L ir S_R parametrais. Jie atitinkamai reiškia kairiojo nanolaidininko skersmenį, kairiosios šešiakampės ląstelės kraštinės ilgį, analogiškai parametrui dešiniajai pusei. Čia magnetinė skvarba prilyginama vakuumo skvarbai, tai yra $\mu = 1$. Nanolaidininko išorinio lauko poveikį dielektrinei skvarbai aprašo Drude modelis.

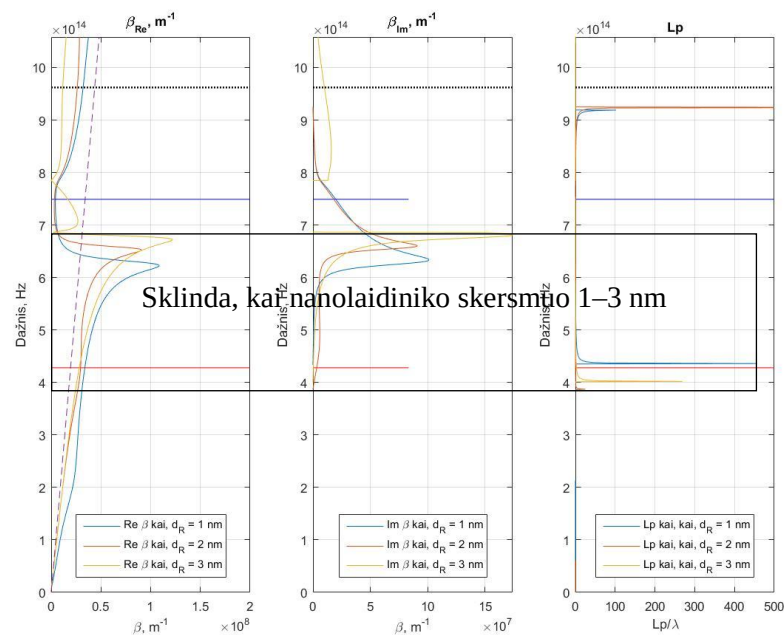
3.2.1. Scenarijus 1. Tiriama nanolaidinių metamedžiagų sandūra didinant dešiniojo nanolaidininko skersmenį esant skirtingam dielektrinių skvarbų santykiui

3 lentelė. Struktūros parametrai 1 scenarijui, nanolaidininko medžiaga – sidabras, dielektrinės skvarbos kinta pagal nurodomą santykį

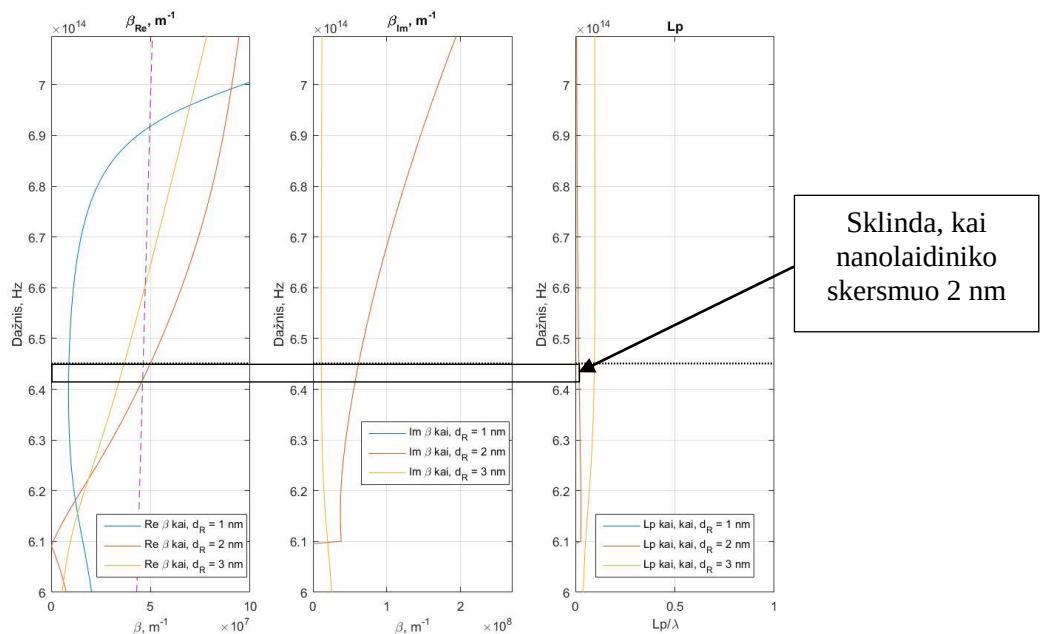
Parametras	Reikšmė
$S_L = S_R$	$5,1962 \cdot 10^{-9} \text{ nm}$
d_L	$2 \cdot 10^{-9} \text{ nm}$
d_R	$1 - 3 \cdot 10^{-9} \text{ nm}$
Stiklas	4,7
Silicis	11,68
Dešiniojo nanolaidininko [Ag] parametrai	
ϵ_∞	5
ω_p	9,5 eV
δ	0,0987 eV
Kairiojo nanolaidininko [Al] parametrai	
ϵ_∞	1
ω_p	15,702 eV
δ	0,696 eV



15 pav. Kairėje nanolaidinės medžiagos bangos vektoriaus $\beta_{[Re]}$ dažninė charakteristika. Vidurinis grafikas bangos vektoriaus $\beta_{[Im]}$ dažninė charakteristika. Dešinėje grafikas vaizduoja sklaidimo nuotolio L_p/λ dažninę charakteristiką. Šios priklausomybės gautos, kai abiejose sandūros pusėse dielektrinės skvarbos sutampa ($\epsilon_d^L = \epsilon_d^R = 4,7$) (žr. 3 lent.). Punktyrinė horizontali linija vaizduoja paviršinės plazmos (ω_{sp}) dažnį



16 pav. Kairėje nanolaidinės medžiagos bangos vektoriaus $\beta_{[Re]}$ dažninė charakteristika. Vidurinis grafikas bangos vektoriaus $\beta_{[Im]}$ dažninė charakteristika. Dešinėje grafikas vaizduoja sklaidimo nuotolio L_p/λ dažninę charakteristiką. Šios priklausomybės gautos, kai abiejose sandūrose dielektrinės skvarbos nusakomos santykiu ($\epsilon_d^L < \epsilon_d^R$, tai yra $4,7 < 11,68$) (žr. 3 lent.). Punktyrinė horizontali linija vaizduoja paviršinės plazmos (ω_{sp}) dažnį

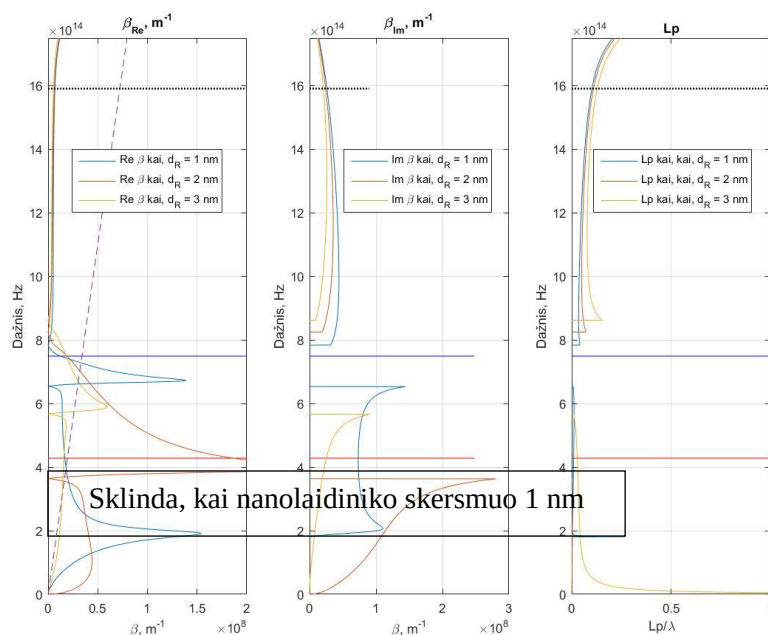


17 pav. Kairėje nanolaidinės medžiagos bangos vektoriaus $\beta_{[Re]}$ dažninė charakteristika. Vidurinis grafikas bangos vektoriaus $\beta_{[Im]}$ dažninė charakteristika. Dešinėje grafikas vaizduoja sklaidimo nuotolio L_p/λ dažninę charakteristiką. Šios priklausomybės gautos, kai abiejose sandūrose dielektrinės skvarbos nusakomos santykiu ($\epsilon_d^L > \epsilon_d^R$, tai yra $11,68 > 4,7$) (žr. 3 lent.). Punktyrinė horizontali linija vaizduoja paviršinės plazmos (ω_{sp}) dažnį

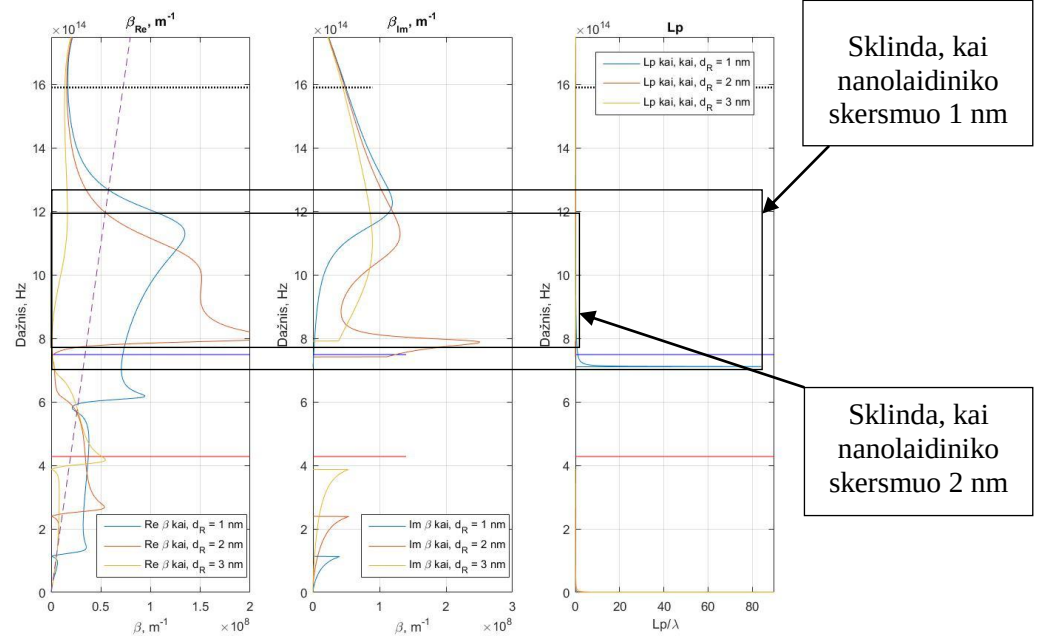
3.2.2. Scenarijus 2. Tiriama nanolaidinių metamedžiagų sandūra didinant dešiniojo nanolaidininko skersmenį esant skirtingam dielektrinių skvarbų santykiui

4 lentelė. Struktūros parametrai 2 scenarijui, nanolaidininko medžiaga – aliuminis, dielektrinės skvarbos kinta pagal nurodomą santykį

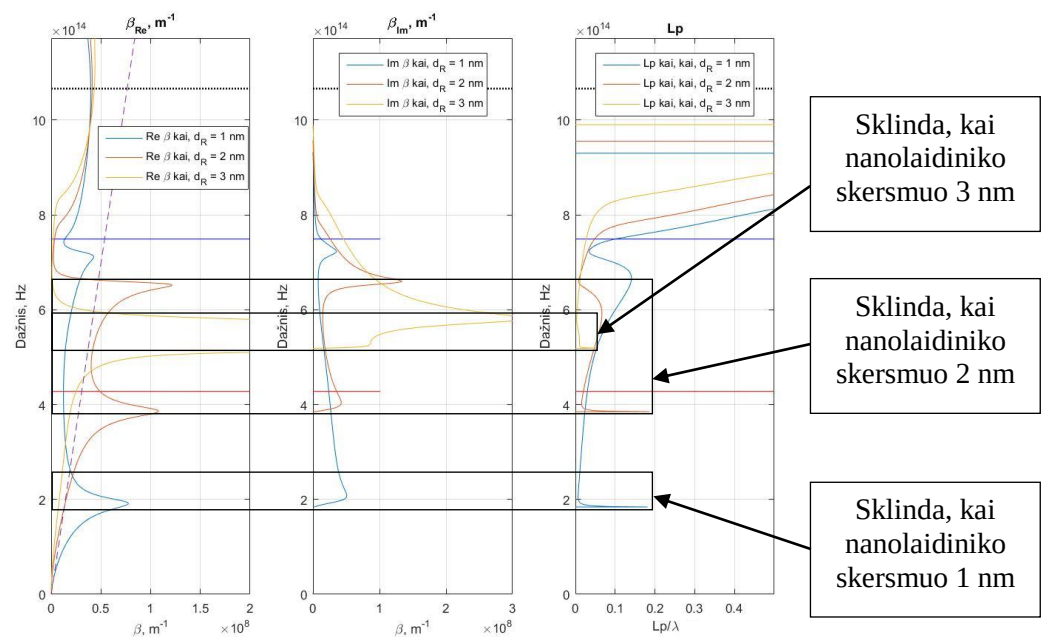
Parametras	Reikšmė
$S_L = S_R$	$5,1962 \cdot 10^{-9} \text{ nm}$
d_L	$2 \cdot 10^{-9} \text{ nm}$
d_R	$1 - 3 \cdot 10^{-9} \text{ nm}$
Stiklas	4,7
Silicis	11,68
Dešiniojo nanolaidininko [Al] parametrai	
ϵ_∞	1
ω_p	15,702 eV
δ	0,696 eV
Kairiojo nanolaidininko [Ag] parametrai	
ϵ_∞	5
ω_p	9,5 eV
δ	0,0987 eV



18 pav. Kairėje nanolaidinės medžiagos bangos vektoriaus $\beta_{[Re]}$ dažninė charakteristika. Vidurinis grafikas bangos vektoriaus $\beta_{[Im]}$ dažninė charakteristika. Dešinėje grafikas vaizduoja sklaidimo nuotolio L_p/λ dažninę charakteristiką. Šios priklausomybės gautos, kai abiejose sandūros pusėse dielektrinės skvarbos sutampa ($\epsilon_d^L = \epsilon_d^R = 4,7$) (žr. 4 lent.). Punktyrinė horizontali linija vaizduoja paviršinės plazmos (ω_{sp}) dažnį

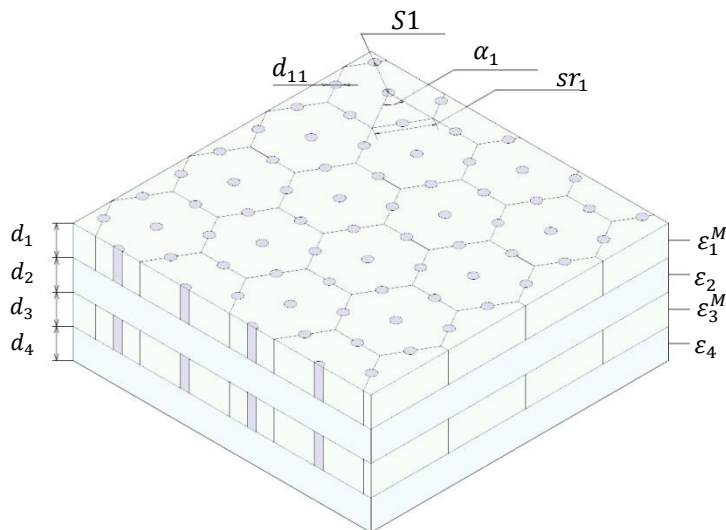


19 pav. Kairėje nanolaidinės medžiagos bangos vektoriaus $\beta_{[Re]}$ dažninė charakteristika. Vidurinis grafikas bangos vektoriaus $\beta_{[Im]}$ dažninė charakteristika. Dešinėje grafikas vaizduoja sklaidimo nuotolio L_p/λ dažninę charakteristiką. Šios priklausomybės gautos, kai abiejose sandūrose dielektrinės skvarbos nusakomos santykiu ($\varepsilon_d^L < \varepsilon_d^R$, tai yra $4,7 < 11,68$) (žr. 4 lent.). Punktyrinė horizontali linija vaizduoja paviršinės plazmos (ω_{sp}) dažnį



20 pav. Kairėje nanolaidinės medžiagos bangos vektoriaus $\beta_{[Re]}$ dažninė charakteristika. Vidurinis grafikas bangos vektoriaus $\beta_{[Im]}$ dažninė charakteristika. Dešinėje grafikas vaizduoja sklaidimo nuotolio L_p/λ dažninę charakteristiką. Šios priklausomybės gautos, kai abiejose sandūrose dielektrinės skvarbos nusakomos santykiu ($\varepsilon_d^L > \varepsilon_d^R$, tai yra $11,68 > 4,7$) (žr. 4 lent.). Punktyrinė horizontali linija vaizduoja paviršinės plazmos (ω_{sp}) dažnį

3.3. Paviršinės bangos sklidimas dviejų nanostruktūrinių metamedžiagų sandūroje



21 pav. Sluoksniuota nanolaidinė metamedžiaga. Autoriaus pav.

Nagrinėjant literatūrą rastas SPP (angl. *surface plasmon polariton*), dar vadinamų paviršinių plazmonų poliaritonu, sklidimo sluoksniuotoje hiperbolinėje struktūroje tyrimas [32]. Šiame straipsnyje struktūrą sudaro periodiniai dielektriko grafeno sluoksniai. Šis tyrimas įkvėpė ištirti sluoksniuotą struktūrą grafeną pakeitus šiame darbe jau tirta nanolaidine metamedžiaga. Struktūrą, pavaizduotą 21 pav., sudaro d_1 storio nanolaidinė metamedžiaga su jai būdinga dielektrine skvarba ϵ_1^M . Šio sluoksnio parametrus charakterizuoja d_{11} – laidininko skersmuo, S_1 – atstumas tarp laidininkų centrų, sr_1 – šešiakampės ląstelės sienelės ilgis, α_1 – kampas, kuris bus keičiamas. Analogiškai struktūros parametrai yra būdingi trečiajam sluoksniui. Tarpiniai dielektriko sluoksniai d_2, d_4 ir jiems būdingos dielektrinės skvarbos ϵ_2, ϵ_4 . Tačiau šiai struktūrai dar nėra išvesta dispersinė lygtis.

Norint išvesti dispersinę lygtį, reikia lygčių, aprašančių dielektrinės skvarbos dažninę priklausomybę statmena ir lygiagrečia kryptimis iš [34], tai 22–23 lygtys.

$$\epsilon_{||}^M(f) = \epsilon_m^M \rho + \epsilon_d^M (1 - \rho) \quad (22)$$

$$\epsilon_{\perp}^M(f) = \epsilon_d^M \left(\frac{\epsilon_m^M (1 + \rho) + \epsilon_d^M (1 - \rho)}{\epsilon_m^M (1 - \rho) + \epsilon_d^M (1 + \rho)} \right) \quad (23)$$

Ir analogiškų lygčių sluoksniuotai struktūrai iš [39].

$$\epsilon_{||}^1(f) = \frac{\epsilon_1 d_1 + \epsilon_2 d_2}{d_1 + d_2} \quad (24)$$

$$\epsilon_{||}^2(f) = \frac{\epsilon_3 d_3 + \epsilon_4 d_4}{d_3 + d_4} \quad (25)$$

$$\epsilon_{\perp}^1(f) = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 (d_1 + d_2)}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1} \quad (26)$$

$$\varepsilon_{\perp}^2(f) = \frac{\varepsilon_3 \varepsilon_4 (d_3 + d_4)}{\varepsilon_3 d_4 + \varepsilon_4 d_3} \quad (27)$$

Taip pat taikoma bangos vektoriaus β išraiška iš [32] 28 formulė.

$$\beta(f) = k \cdot \sqrt{\frac{(\varepsilon_{\parallel}^2 - \varepsilon_{\parallel}^1) \varepsilon_{\perp}^2 \cdot \varepsilon_{\perp}^1}{\varepsilon_{\perp}^2 \cdot \varepsilon_{\parallel}^2 - \varepsilon_{\perp}^1 \cdot \varepsilon_{\parallel}^1}} \quad (28)$$

Taigi įstačius 22, 23 į 24–27 atitinkamiems sluoksniams ir įstačius į 28, gauname 21 pav. struktūrai tinkančią dispersinę lygtį – 29 formulė.

$$\beta(f) = k \sqrt{\frac{\left(\frac{\varepsilon_{\parallel[3]}^M \cdot d_3 + \varepsilon_4 \cdot d_4}{d_3 + d_4} - \frac{\varepsilon_{\parallel[1]}^M \cdot d_1 + \varepsilon_2 \cdot d_2}{d_1 + d_2} \right) \frac{\varepsilon_{\perp[3]}^M \cdot \varepsilon_4 (d_3 + d_4)}{\varepsilon_{\perp[3]}^M \cdot d_4 + \varepsilon_4 \cdot d_3} \cdot \frac{\varepsilon_{\perp[1]}^M \cdot \varepsilon_2 (d_1 + d_2)}{\varepsilon_{\perp[1]}^M \cdot d_2 + \varepsilon_2 \cdot d_1}}{\frac{\varepsilon_{\perp[3]}^M \cdot \varepsilon_4 (d_3 + d_4)}{\varepsilon_{\perp[3]}^M \cdot d_4 + \varepsilon_4 \cdot d_3} \cdot \frac{\varepsilon_{\parallel[3]}^M \cdot d_3 + \varepsilon_4 \cdot d_4}{d_3 + d_4} - \frac{\varepsilon_{\perp[1]}^M \cdot \varepsilon_2 (d_1 + d_2)}{\varepsilon_{\perp[1]}^M \cdot d_2 + \varepsilon_2 \cdot d_1} \cdot \frac{\varepsilon_{\parallel[1]}^M \cdot d_1 + \varepsilon_2 \cdot d_2}{d_1 + d_2}} \quad (29)$$

Kur

$$\varepsilon_{\parallel[1,3]}^M(f) = \varepsilon_{m[1,3]}^M \rho + \varepsilon_{d[1,3]}^M (1 - \rho_{1,3})$$

$$\varepsilon_{\perp[1,3]}^M(f) = \varepsilon_{d[1,3]}^M \left(\frac{\varepsilon_{m[1,3]}^M (1 + \rho_{1,3}) + \varepsilon_{d[1,3]}^M (1 - \rho_{1,3})}{\varepsilon_{m[1,3]}^M (1 - \rho_{1,3}) + \varepsilon_{d[1,3]}^M (1 + \rho_{1,3})} \right)$$

Tyrimo plane numatyti du scenarijai. Tai yra, tirti sluoksniuotos nanolaidinės metamedžiagos pasukimo kampo α_1 poveikį sklaidimo charakteristikoms bei nuostoliams kai:

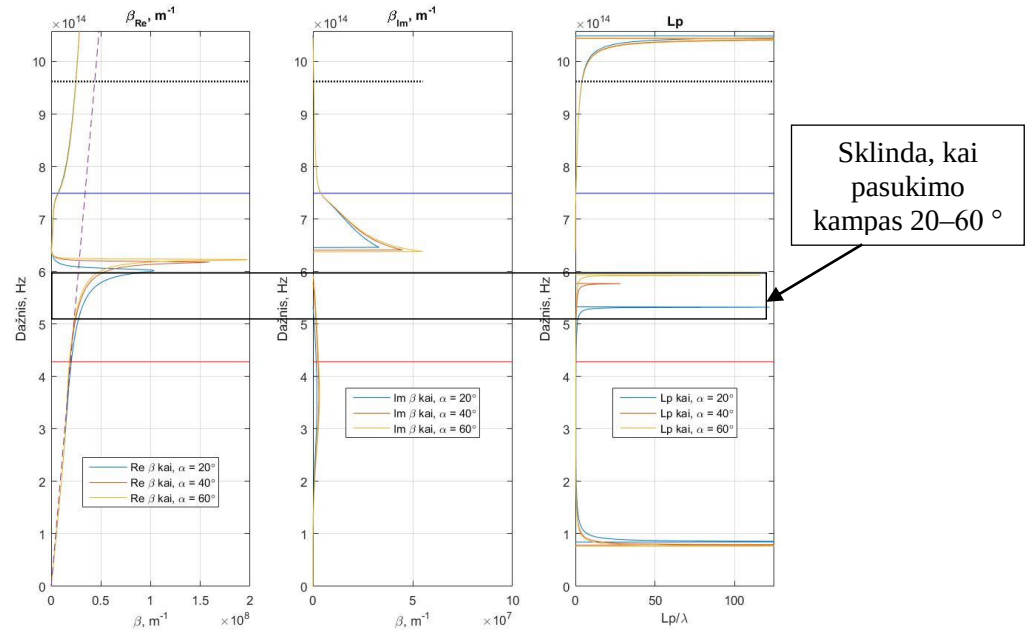
1 Scenarijus. d_1 sluoksnyje nanolaidininko medžiaga – sidabras, d_3 sluoksnyje nanolaidininko medžiaga – aliuminis, o tarpinių sluoksnių dielektrinės skvarbos kinta pagal nurodytą santykį.

2 Scenarijus. d_1 sluoksnyje nanolaidininko medžiaga – aliuminis, d_3 sluoksnyje nanolaidininko medžiaga – sidabras, o tarpinių sluoksnių dielektrinės skvarbos kinta pagal nurodytą santykį. Verta paminėti, kad šviesi linija (angl. *light line*) kiekvienu atveju bus apskaičiuota pagal sluoksnį, labiausiai atitinkantį sklaidimo charakteristiką. Sluoksnis įvardintas po kiekviena charakteristika 22–27 pav.

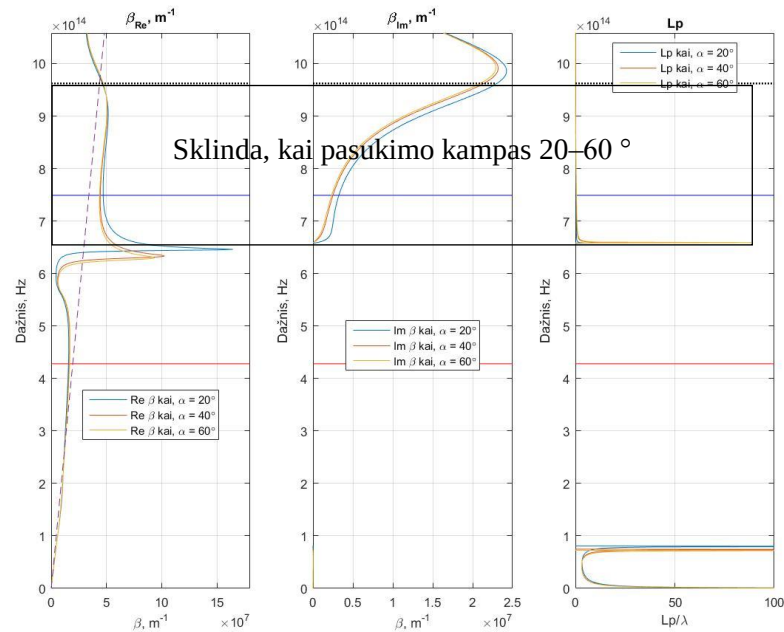
3.3.1. Scenarijus 1. Tiriama nanolaidinių sluoksniuota metamedžiagų sandūra didinant pasukimo kampą esant skirtingam dielektrinių skvarbų santykiui

5 lentelė. Struktūros parametrai 1 scenarijui, d_1 nanolaidininko medžiaga – sidabras, d_3 nanolaidininko medžiaga – aliuminis, dielektrinės skvarbos d_2 , d_4 sluoksniuose kinta pagal nurodomą santykį

Parametras	Reikšmė
S_1	$75 \cdot 10^{-9}$ nm
S_3	$65 \cdot 10^{-9}$ nm
d_{11}	$7 \cdot 10^{-9}$ nm
d_{33}	$5 \cdot 10^{-9}$ nm
$d_1=d_3$	$11 \cdot 10^{-9}$ nm
d_2	$8 \cdot 10^{-9}$ nm
d_4	$9 \cdot 10^{-9}$ nm
Stiklas	4,7
Silicis	11,68
Pirmojo sluoksnio nanolaidininko parametrai [Al]	
ε_∞	1
ω_p	15,702 eV
δ	0,696 eV
Trečiojo sluoksnio nanolaidininko parametrai [Ag]	
ε_∞	5
ω_p	9,5 eV
δ	0,0987 eV



22 pav. Kairėje nanolaidinės medžiagos bangos vektoriaus $\beta_{[Re]}$ dažninė charakteristika. Vidurinis grafikas bangos vektoriaus $\beta_{[Im]}$ dažninė charakteristika. Dešinėje grafikas vaizduoja sklaidimo nuotolio L_p/λ dažninę charakteristiką. Šios priklausomybės gautos, kai dielektrinė skvarba tenkina nurodytą santykį ($\varepsilon_1^M = \varepsilon_3^M = 4,7$ ir $\varepsilon_2 = \varepsilon_4 = 11,68$) (žr. 5 lent.). Punktyrinė horizontali linija vaizduoja paviršinės plazmos (ω_{sp}) dažnį. Šviesios linijos charakteristika apskaičiuota naudojant ε_3^M dielektriko skvarbą

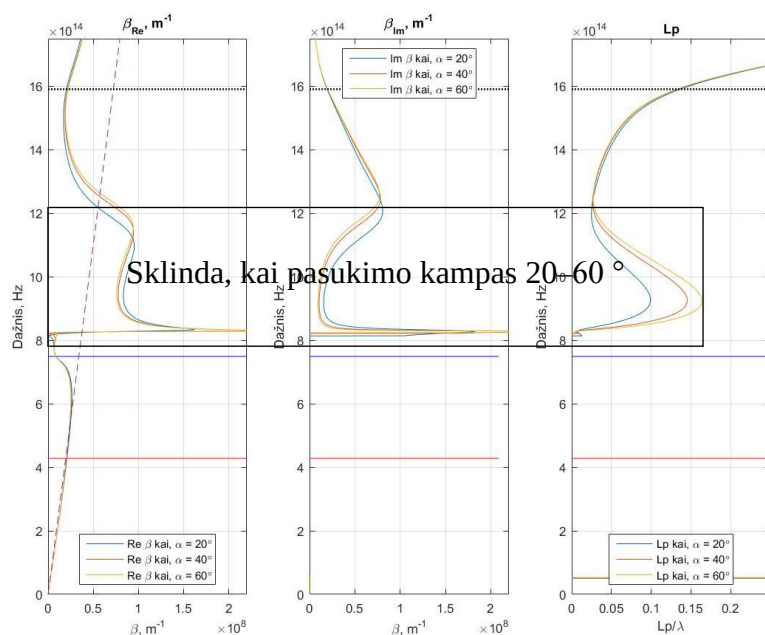


23 pav. Kairėje nanolaidinės medžiagos bangos vektoriaus $\beta_{[Re]}$ dažninė charakteristika. Vidurinis grafikas bangos vektoriaus $\beta_{[Im]}$ dažninė charakteristika. Dešinėje grafikas vaizduoja sklaidimo nuotolio L_p/λ dažninę charakteristiką. Šios priklausomybės gautos, kai dielektrinė skvarba tenkina nurodytą santykį ($\varepsilon_1^M = \varepsilon_3^M = 11,68$ ir $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 4,7$) (žr. 5 lent.). Punktyrinė horizontali linija vaizduoja paviršinės plazmos (ω_{sp}) dažnį. Šviesios linijos charakteristika apskaičiuota naudojant ε_2 dielektriko skvarbą

3.3.2. Scenarijus 2. Tiriama nanolaidinių sluoksniuota metamedžiagų sandūra didinant pasukimo kampą esant skirtingam dielektrinių skvarbų santykiui

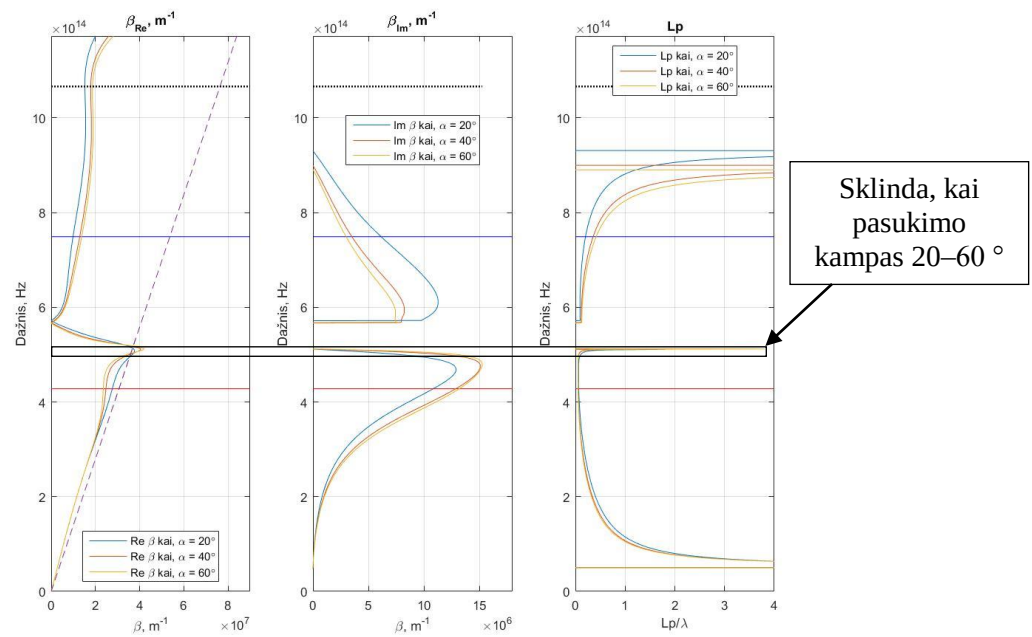
6 lentelė. Struktūros parametrai 2 scenarijui, d_1 nanolaidininko medžiaga – aliuminis, d_3 nanolaidininko medžiaga – sidabras, dielektrinės skvarbos d_2, d_4 sluoksniuose kinta pagal nurodomą santykį

Parametras	Reikšmė
S_1	$75 \cdot 10^{-9}$ nm
S_3	$65 \cdot 10^{-9}$ nm
d_{11}	$7 \cdot 10^{-9}$ nm
d_{33}	$5 \cdot 10^{-9}$ nm
$d_1 = d_3$	$11 \cdot 10^{-9}$ nm
d_2	$8 \cdot 10^{-9}$ nm
d_4	$9 \cdot 10^{-9}$ nm
Stiklas	4,7
Silicis	11,68
Pirmojo sluoksnio nanolaidininko parametrai [Al]	
ϵ_∞	1
ω_p	15,702 eV
δ	0,696 eV
Trečiojo sluoksnio nanolaidininko parametrai [Ag]	
ϵ_∞	5
ω_p	9,5 eV
δ	0,0987 eV

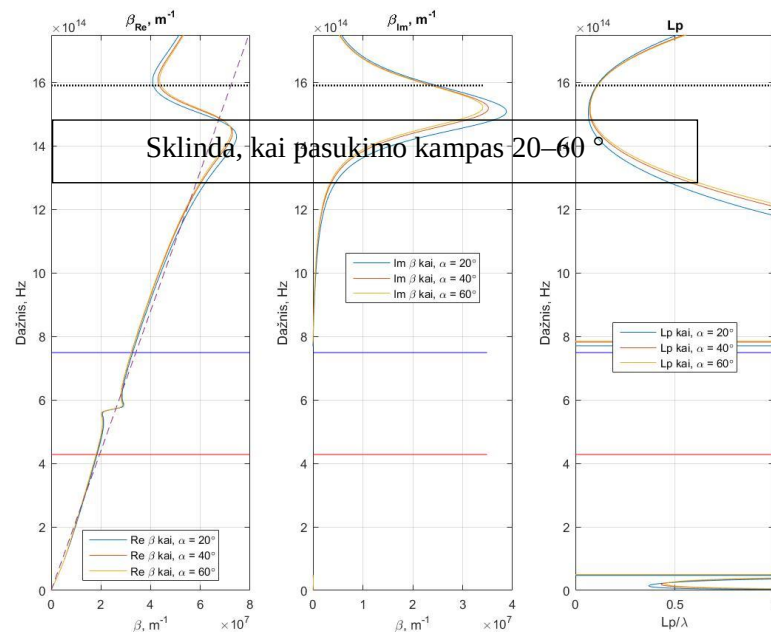


25 pav. Kairėje nanolaidinės medžiagos bangos vektoriaus $\beta_{[Re]}$ dažninė charakteristika. Vidurinis grafikas bangos vektoriaus $\beta_{[Im]}$ dažninė charakteristika. Dešinėje grafikas vaizduoja sklidimo nuotolio L_p/λ dažninę charakteristiką. Šios priklausomybės gautos, kai dielektrinė skvarba tenkina nurodytą santykį ($\epsilon_1^M = \epsilon_3^M = 4,7$ ir

$\varepsilon_1 = \varepsilon_4 = 11,68$) (žr. 6 lent.). Punktyrinė horizontali linija vaizduoja paviršinės plazmos (ω_{sp}) dažnį. Šviesios linijos charakteristika apskaičiuota naudojant ε_3^M dielektriko skvarbą



26 pav. Kairėje nanolaidinės medžiagos bangos vektoriaus $\beta_{[Re]}$ dažninė charakteristika. Vidurinis grafikas bangos vektoriaus $\beta_{[Im]}$ dažninė charakteristika. Dešinėje grafikas vaizduoja sklidimo nuotolio L_p/λ dažninę charakteristiką. Šios priklausomybės gautos, kai dielektrinė skvarba tenkina nurodytą santykį ($\varepsilon_1^M = \varepsilon_3^M = 11,68$ ir $\varepsilon_1 = \varepsilon_4 = 4,7$) (žr. 6 lent.). Punktyrinė horizontali linija vaizduoja paviršinės plazmos (ω_{sp}) dažnį. Šviesios linijos charakteristika ir paviršinės plazmos dažnis apskaičiuotas naudojant ε_1^M dielektriko skvarbą



27 pav. Kairėje nanolaidinės medžiagos bangos vektoriaus $\beta_{[Re]}$ dažninė charakteristika. Vidurinis grafikas bangos vektoriaus $\beta_{[Im]}$ dažninė charakteristika. Dešinėje grafikas vaizduoja sklidimo nuotolio L_p/λ dažninę charakteristiką. Šios priklausomybės gautos, kai dielektrinė skvarba tenkina nurodytą santykį ($\varepsilon_1^M = \varepsilon_4 = 4,7$ ir $\varepsilon_2 = \varepsilon_3^M = 11,68$) (žr. 6 lent.). Punktyrinė horizontali linija vaizduoja paviršinės plazmos (ω_{sp}) dažnį. Šviesios linijos charakteristika ir paviršinės plazmos dažnis apskaičiuotas naudojant ε_1^M dielektriko skvarbą

4. PAVIRŠINIŲ BANGŲ SKLIDIMO METAMEDŽIAGOS PAVIRŠIUMI TYRIMO REZULTATAI

4.1. Paviršinės bangos sklidimas metamedžiagoje rezultatai

1. Nagrinėjama sritį patogiu apriboti pagalbinėmis linijomis. Taigi apribojama šviesia linija, plazmos dažniu (ω_p), paviršinės plazmos dažniu (ω_{sp}). O sritis, kur šviesi linija sutampa su β_{Re} , yra nepaisoma (žr. 8 pav.). Kadangi visa tai, kas vyksta virš ω_{sp} yra neaktualu, šia juoda punktyrine horizontalia linija bus apribotos visos dažninės charakteristikos. Nagrinėjant 3.1.1 scenarijaus dispersines charakteristikas, kai $\varepsilon_d = \varepsilon_d^M$ (8 pav.) pastebima, kad sužadunami SPP gerokai mažesniame dažnyje negu ω_{sp} , todėl keliama prielaida, kad sandūros konstrukciją galima patobulinti didinant metalo kiekį metamedžiagoje. Tai įrodo, kad didesnio skersmens nanolaidininkas metamedžiagoje (3 nm) dažnių ašyje yra arčiau ω_{sp} . Sklidimo charakteristika L_p parodo nykstamai mažą sklidimo nuotolį. Taip yra dėl β_{Im} poveikio, kurį charakterizuoja absorbcija. Ji yra neišvengiama, bet, koreguojant metamedžiagos struktūrą, yra galimybė sumažinti β_{Im} poveikį. Taigi, kai dielektrinė skvarba abiejose sandūros pusėse sutampa, o nanolaidininko medžiaga – sidabras, gaunamas menkas paviršinių plazmonų poleritonų sklidimas.

2. Kai metamedžiagą ribojantis dielektrikas pakeičiamas kitu, turinčiu didesnę dielektrinę skvarbą (9 pav.), pastebima, kad dispersinė charakteristika β_{Re} yra pakeliama link aukštesnių dažnių, tai yra, arčiau ω_{sp} negu anksčiau nagrinėtu atveju. Šiuo atveju virš šviesios linijos iškyla metamedžiagų β_{Re} , kurių nanolaidininko skersmuo 2–3 nm. Kaip kad fiksuojama L_p charakteristikos metamedžiaga, kurios nanolaidininko storis 3 nm, sklinda toliau negu tos, kurios nanolaidininkas 2 nm. β_{Re} dalis, sutampanti su šviesia linija iki pat infraraudonųjų spindulių, įgauna Sommerfildo Zeneko (angl. *Sommerfeld-Zenneck*) bangos pavidalą. Tai yra nespinduliuojama kryptinga EM banga, kuri yra plokščia ar sferinė tarp dviejų homogeniškų terpių su skirtingomis dielektrinėmis konstantomis [33].

3. 10 pav. kai $\varepsilon_d < \varepsilon_d^M$, o nanolaidininko medžiaga – sidabras, pastebimas neįprastas reiškinys, kai SPP gali skliti dažniuose iki IR ir virš UV dažnių, tačiau nesklinda regimosios šviesos dažniuose.

Kaip kad jau minėjau pastaboje, rezultatai, kur β_{Im} yra neigiami, yra dispersinės lygties nefizikinių (angl. *non-physical*) sprendinių rezultatas. Iš fizikinės pusės tai reiškia, kad paviršinės bangos negali būti sužadintos ir sklidimas dėl to neįmanomas [29].

Regimojoje šviesoje SPP nesklinda, nes β_{Re} neiškyla virš šviesios linijos ir, kaip kad matoma iš β_{Im} , pasireiškia stipri absorbcija, kai nanolaidininko skersmuo – 3 nm. Kitais atvejais β_{Im} yra

neigiama. Taigi likusios sklaidimo charakteristikos iki IR, kur β_{Re} pakyla virš šviesios linijos, matome dažnių ruožus, kur SPP sklinda. Pastebima tendencija, kad, esant didesniam nanolaidininko storiui, sklaidimo nuotolis didesnis, kartu ir pralaidžios juostos plotis. Sklidimą šiuose dažnių ruožuose patvirtina teigiama β_{Im} charakteristika pažymėtuose intervaluose.

4. Pakeitus nanolaidininko medžiagą į aliuminį ir kartojant bandymus pastebima, kad, esant vienodiems dielektrikams abiejose sandūros pusėse (žr. 11 pav.), SPP sklinda, kaip ir sidabro atveju, tačiau jų dažnis yra gerokai didesnis ir net viršija UV dažnį. Lyginant sklaidimo charakteristikas (8 ir 11 pav.), pastebima, kad sidabro nanolaidininko atveju sklaidimo nuostoliai didesni, tačiau dažnių juosta, kurioje sklinda, yra žemesnio dažnio ir siauresnė. O aliuminio SPP sklaidimo dažnių juosta yra gerokai platesnė, tai yra, didesnė β_{Re} dalis iškyla virš šviesios linijos. Dėl aliuminio didesnio plazmos dažnio stipri absorbcija pasislenka į diapazoną nuo UV iki paviršinės plazmos dažnio (ω_{sp}). Tai gali būti pritaikyta gerinant antenų charakteristikas [34].

5. Kai nanolaidininko medžiaga – aliuminis, o išorinio dielektriko skvarba didesnė negu sudarančio metamedžiagą ($\epsilon_d > \epsilon_d^M$, tai yra $11,68 > 4,7$), pastebima β_{Re} charakteristikų priartėjimas prie paviršinės plazmos dažnio (ω_{sp}) (žr. 12 pav). Žemiausia sklindanti moda, kurią palaiko sandūra, yra esant didžiausiam nanolaidininko storiui – šiuo atveju 3 nm. Gautas SPP palaikančių dažnių ruožas virš UV dažnių pasižymi mažu sklaidimo nuotoliu lyginant su analogiška sidabro nanolaidininko struktūra (žr. 9 pav.). Šį sklidimą virš UV dažnių patvirtina teigiama β_{Im} tame dažnių ruože.

6. 3.1.2 scenarijaus atveju, kai dielektrinė skvarba didesnė metamedžiagoje ($\epsilon_d < \epsilon_d^M$, tai yra $4,7 < 11,68$), matomas visiškas SPP nebuvimas dažniuose virš UV. Taip yra dėl didelės β_{Im} dalies tame dažnių ruože, kuris ribojamas paviršinės plazmos dažnio (ω_{sp}). Remiantis β_{Re} , virš šviesios linijos regimosios šviesos dažniuose pakyla modos, kurių nanolaidininkų skersmuo – 2–3 nm.

7. Atlikus šią tyrimų seriją, norėtusi kurią nors struktūrą nominuoti kaip geriausią dėl savo savybių. Kadangi SPP pagrindu prietaisų kūrimui svarbus didesnis sklaidimo nuotolis, šią savybę geriausiai atitinka sidabro nanolaidininkas esant vienodomis dielektrinėms skvarboms abiejose sandūros pusėse (žr. 8 pav.). Tikėtina, kad, keičiant kitus metamedžiagos parametrus, galima išgauti geresnes charakteristikas. Šių tyrimų tikslas buvo nustatyti nanolaidininko kiekio (storio) ir dielektrinių skvarbų santykio poveikį pagrindinėms charakteristikoms. Kadangi apie dielektrinių skvarbų poveikį neužsimenama kol kas jokiam iš nagrinėtų dispersinės lygties išvedimų.

4.2. Paviršinės bangos sklidimas dviejų metamedžiagų sandūroje rezultatai

1. 15 paveikslėlyje nagrinėjamos dispersinės charakteristikos, kai dešinėsios metamedžiagos nanolaidininkas – sidabras, o kairiosios metamedžiagos – aliuminis. Daugiau tiriamos struktūros parametrų pateikta 3 lentelėje. Kai dielektrinės skvarbos metamedžiagose vienodos, tai yra ($\varepsilon_d^L = \varepsilon_d^R = 4,7$), pastebima, kad aukščiausio dažnio kanalas, palaikantis SPP yra virš UV dažnio (3 nm). Kadangi β_{Im} dalis tame dažnių ruože teigiama, L_p sklidimas tame ruože yra patvirtintas. Žemesnis kanalas (dažnių ruožas), palaikantis SPP, galėtų būti, kai dešiniojo nanolaidininko skersmuo – 2 nm, tačiau taip nėra dėl neigiamos β_{Im} tame dažnių ruože. Šios struktūros dominuojanti moda žemesniame dažnyje (regimosios šviesos) įgauna didžiausią sklidimo nuotolį $68,9 \frac{L_p}{\lambda}$ santykinio matavimo vieneto dėl slopinimo (β_{Im}) tame dažnių ruože, pasislinkusio į aukštesnio dažnio sritį. Tai yra, tame dažnių ruože β_{Im} turi mažą teigiamą reikšmę.

2. 16 pav. pateikta charakteristika demonstruoja platų kanalą, kuriuo gali sklisti SPP. Sklidimo nuotolis, esant IR dažniams, siekia šimtus $\frac{L_p}{\lambda}$ santykinio matavimo vieneto. Tačiau daugiau kaip du trečdaliai kanalo pasižymi nykstamai mažu sklidimo nuotoliu (artėjant didesnio dažnio link). Keista, bet, lyginant su ankstesniu tyrimu, geresnį rezultatą demonstravo metamedžiaga su didesniu metalo kiekiu (nanolaidininko storiu), tačiau šiuo atveju geriausias rezultatas yra mažiausio storio (žr. 16 pav. L_p dažninę charakteristiką). Kadangi dešinėsios metamedžiagos nanolaidininko storis sutampa su kairiosios, kai storis yra 2 nm, galime pastebėti raudonos linijos dėsningumo neatitikimą. Tai yra, pagal gautas didžiausias vertes β_{Re} ir β_{Im} charakteristikose, pikas yra pastebimai mažesnės vertės negu 1 ir 3 nm, nors tikėtina, kad jie turėtų būti proporcingai didėjantys arba mažėjantys. Manau, kad dėl šios priežasties vidurinysis matavimas išsiskirs vėlesniuose tyrimuose.

3. Kai $\varepsilon_d^L > \varepsilon_d^R$, tai yra $11,68 > 4,7$ gautos dispersinės charakteristikos pavaizduotos 18 pav. Jos patvirtina ankstesnėje išvadoje keltą hipotezę, kad, sutampant nanolaidininkų storiui, pasireiškia ypatingas struktūros atsakas. Šiuo atveju gaunamas nykstamai mažas sklidimas, kurį patvirtina β_{Im} , o kaip matoma iš β_{Re} , sklidimas iš vienos pusės ribojamas paviršinės plazmos dažnio (ω_{sp}).

4. Kartojant tyrimus ir sidabrą pakeitus aliuminiu (3.2.2 skyrelis), galima teigti, kad turime apsuktą pirmąjį scenarijų. Kadangi abiejose pusėse yra nanolaidininkų ir dielektrikų, tai SPP teoriškai sklinda sandūra iš abiejų pusių. Tačiau sklidimą charakterizuoja dešinėje pusėje esantis nanolaidininkas ir kairėje esantis dielektrikas, remiantis sklidimo ribinėmis sąlygomis. 18 pav. pastebima, β_{Im} leidžiamas sklidimo nuotolis L_p yra nykstamai mažas. SPP egzistuoja esant

mažiausiam numatomui nanolaidininko skersmeniui. Šis sklaidimas yra dažniuose iki IR. Tai galima paaiškinti neidealiu aliuminio Drude modeliu, kuris turi didesnes paklaidas dažnių ruože iki IR, todėl šis sklaidimas šiame dažnių intervale yra abejotinas. Tiriama struktūra regimosios šviesos dažniuose veikia kaip absorberis. Įdomu pastebėti, kad, esant mažiausiam nanolaidininko skersmeniui (1 nm), β_{Im} charakteristikos dalis yra šuoliu kintanti, plati, primenanti stačiakampio formą. Ši savybė tiktų kuriant prietaisus, kur reikalinga absorbcija konkrečiame dažnių ruože.

5. Dažnių ruože iki IR yra galimybė skliti SPP, kadangi β_{Re} dalyje pakyla virš šviesos linijos (žr. 19 pav.), o tame intervale β_{Im} yra teigiama. Tačiau L_p charakteristikoje to nematyti dėl to, kad didžiausią reikšmę grafike nulėmė greta UV susidaręs siauras SPP sklaidimo kanalas, siekiantis dešimtis $\frac{L_p}{\lambda}$ santykinio matavimo vieneto. Pastebima, kad, esant mažiausiam nanolaidininko skersmeniui, gaunamas didžiausias sklaidimo nuotolis. Kitas įdomus pastebėjimas, kad didesnio storio nanolaidininko SPP sklaidimo kanalas telpa šiame ruože ir sklaidimo atžvilgiu yra mažesnis.

6. Kai kairiąją metamedžiagą sudarantis dielektrikas turi didesnę dielektrinę skvarbą, gauname 20 pav. vaizduojamas dispersines charakteristikas. Pastebima, kad, esant didesnio skersmens metamedžiagos laidininkui, SPP sklaidimo kanalas tampa siauresnis ir telpa platesniame, kurį sudaro mažesnio skersmens metamedžiagos nanolaidininkas. Ši charakteristika egzistuoja regimosios šviesos IR dažniuose. Tačiau atkreipkime dėmesį į L_p skalę (žr. 20 pav.), tai yra nykstamo ilgio sklaidimo nuotolis. Todėl teigiama, kad šis dielektrinių skvarbų santykis nėra palankus SPP skliti.

7. Tiriant šią struktūrą, buvo įdomu spėlioti, kas nutiktų charakteristikoms, dielektriką pakeitus kita metamedžiaga. Ir kaip pastebima iš atlikto tyrimo, charakteristikų SPP sklaidimas geriausias, kai dielektrinės skvarbos ($\epsilon_d^L < \epsilon_d^R$, tai yra $4,7 < 11,68$), o nanolaidininko medžiaga – sidabras.

4.3. Paviršinės bangos sklaidimas dviejų nanostruktūrinių metamedžiagų sandūroje rezultatai

1. Pirmo scenarijaus atveju (3.3.1 skyrelis), kai ($\epsilon_1^M = \epsilon_3^M = 4,7$ ir $\epsilon_2 = \epsilon_4 = 11,68$) pastebima, kad SPP sklaidimo sąlygos susidaro regimosios šviesos intervale (žr. 22 pav.). Didinant struktūros pasukimo kampą šis intervalas stumiamas aukštesnio dažnio link (arčiau UV). Atkreipdami dėmesį į sklaidimo charakteristiką pastebime, kad dažniuose iki IR, nesusidarius sąlygoms skliti, SPP yra fiksuojamas sklaidimas. Ši sritis paaiškinama remiantis β_{Re} , kadangi tame intervale charakteristika sutampa su šviesia linija, priimta tarti, kad SPP sklaidimas negalimas iki pat IR dažnio. Regimosios šviesos dažniuose fiksuotas sklaidimas sukūrė siaurus kanalus, iš kurių du viršija $100 \frac{L_p}{\lambda}$ santykinio matavimo vienetą esant pasukimo kampui 20° ir 60° .

2. Kai pirmojo sluoksnio nanolaidininkas – sidabras, o dielektrinės skvarbos tenkina santykį $\varepsilon_1^M = \varepsilon_3^M = 11,68$ ir $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 4,7$, pastebimas platus dažnių ruožas, kuris leidžia SPP skliti. Iš vienos pusės, yra ribojamas paviršinės plazmos dažnio (ω_{sp}) (žr. 23 pav. β_{Re} dažninę charakteristiką), iš kitos pusės, ribojamas neigiamos β_{Im} dalies (žr. 23 pav. β_{Im} dažninę charakteristiką). Esant mažiausiam dažniui šiame intervale, pastebimas didžiausias sklidimo nuotolis (žr. 23 pav. L_p dažninę charakteristiką). Šis nuotolis mažesnis, negu prieš tai tirtu atveju.

3. Pirmo scenarijaus atveju (3.3.1), kai dielektrinės skvarbos tenkina sąryšį $\varepsilon_1^M = \varepsilon_4 = 4,7$ ir $\varepsilon_2 = \varepsilon_3^M = 11,68$, gautos charakteristikos pavaizduotos 24 pav. Dažnių ruožas, kuriame sklinda SPP, ribojamas dažnių ašyje linijų, susikertančių su šviesia linija (žr. 24 pav. β_{Re} dažninę charakteristiką). Kadangi β_{Im} charakteristikos dalis šiame dažnių ruože teigiama, L_p charakteristikoje registruojamas sklidimas, tačiau, lyginant su kitais šio scenarijaus bandymais, gaunamas mažiausias sklidimo nuotolis. Pasukimo kampas nedaro reikšmingo poveikio sklidimo charakteristikoms.

4. Antro scenarijaus atveju (4.3.2), kai dielektrinės skvarbos tenkina santykį $\varepsilon_1^M = \varepsilon_3^M = 4,7$ ir $\varepsilon_1 = \varepsilon_4 = 11,68$, susidaro sąlygos SPP skliti plačiame dažnių ruože, esančiame virš UV. Šiuo atveju registruojamas sklidimas, kurio nedraudžia β_{Im} charakteristikos. Tačiau atkreipkite dėmesį į L_p dažninės charakteristikos abscisių ašies mastelį (žr. 25 pav.). Registruotas sklidimas nykstamai mažas.

5. Antro scenarijaus atveju (3.3.2), kai $\varepsilon_1^M = \varepsilon_3^M = 11,68$ ir $\varepsilon_1 = \varepsilon_4 = 4,7$, susidaro palankios sąlygos SPP skliti siaurame dažnių ruože, esančiame regimosios šviesos intervale (žr. 26 pav.). Sklidimo nuotolio dažninė charakteristika rodo didesnę sklidimo nuotolį lyginant su antro scenarijaus atveju, kai dielektrinės skvarbos $\varepsilon_1^M = \varepsilon_3^M = 4,7$ ir $\varepsilon_1 = \varepsilon_4 = 11,68$. β_{Im} charakteristika pasižymi įdomia forma. Centre charakteristikos dalis tampa neigiama, bet, prieš tapdama neigiama, turi staigų (statų) pokytį iš abiejų pusių. Ši charakteristika primena juostinį filtrą su pralaidžia centre dalimi. Tai išnaudojus, atsirastų būdas absorbuoti SPP tik tam tikrose dažnio srityse.

6. Nagrinėjant antro scenarijaus atvejį, kai dielektrinės skvarbos tenkina sąryšius $\varepsilon_1^M = \varepsilon_4 = 4,7$ ir $\varepsilon_2 = \varepsilon_3^M = 11,68$, pastebima, kad didžiąją dalį charakteristikos β_{Re} praktiškai sutampa su šviesia linija. Dėl šios priežasties žemuose dažniuose registruojamo sklidimo nepaisome (žr. 27 pav.). Dažnių intervale, kur SPP sklidimui yra palankios sąlygos ir jo nedraudžia β_{Im} , registruojamas palyginti mažas sklidimo nuotolis.

7. Apibendrinant pirmojo (3.3.1) ir antrojo (3.3.2) scenarijaus rezultatus, galima teigti, kad dažniausiai pasukimo kampo keitimas charakteristikoms reikšmingo poveikio nedaro, išskyrus pirmojo scenarijaus atvejus, kai dielektrinės skvarbos yra $\varepsilon_1^M = \varepsilon_3^M = 4,7$; $\varepsilon_2 = \varepsilon_4 = 11,68$ ir $\varepsilon_1^M = \varepsilon_3^M = 11,68$; $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 4,7$, atitinkamai 22–23 pav. Kadangi šioje struktūroje SPP sklidimui ne

visada tas pats dielektriko sluoksnis daro didžiausią poveikį, tai šviesios linijos charakteristikai buvo ieškoma, kurio sluoksnio skvarba geriausiai atitinka gaunamas dažnines charakteristikas.

APIBENDRINIMAS. IŠVADOS

1. Pirmame skyriuje pateikta literatūros apie optoelektroninių įrenginių kūrimą apžvalga. Buvo išsiaiškina, kokios optoelektroninių prietaisų kūrimo tendencijos ir kokie iššūkiai laukia siekiant juos realizuoti. Didžiausias potencialas įžvelgtas TCO bei TMN medžiagoms. TMN išsiskiria dideliu temperatūriniu ir mechaniniu stabilumu. Todėl šios medžiagos tikėtina gali pakeisti metalus, nes ir plazmos dažnis šių medžiagų yra artimas tauriesiems metalams.
2. Antrame skyriuje aptartas efektyviosios terpės aproksimavimo metodas ir nustatyta nuo ko priklauso efektinė dielektrinė skvarba metamedžiagoje. Tiriant šis metodas taikomas visoms trimis struktūroms. Pastebėta, kad formulės išraiška kinta, priklausomai nuo to, kokiai struktūrai išvesta lygtis.
3. Vėlesniame skyriuje pateiktas tyrimo planas, atlikti dispersinių lygčių išvedimai ir kiekvienai struktūrai gauti rezultatai esant skirtingiems tyrimo scenarijams. Teoriškai galima teigti, kad struktūrinių parametrų variacijų yra begalybė. Tačiau tirta sistemingai keičiant vieną iš parametrų (kalbant apie paviršinės bangos sklidimą metamedžiagoje ir paviršinės bangos sklidimą dviejų metamedžiagų sandūroje) šių tyrimų pirmieji ir antrieji scenarijai gali būti palyginti tarpusavyje. Tačiau geriausi tyrimo rezultatai pasižymi didžiausiu SPP sklidimo nuotoliu (žr. 16 pav. L_p dažninę charakteristiką) ir praktiška absorbcijos juosta (žr. 18 pav. β_{Im} dažninę charakteristiką), kuri stati charakteristikos šonuose.
Unikalūs struktūros modelis sukurtas nagrinėjant literatūrą apie sluoksniuotas metamedžiagas ir taikant sinergiją su jau tirtomis nanolaidinėmis struktūromis. Šiai nanostruktūrinei metamedžiagai buvo išvesta dispersinė lygtis ir tiriama jos pasukamumo savybė (tai yra keičiant kampą, kurį sudaro nanolaidininkų išsidėstymas metamedžiagos gardelėje). Šiuo atveju gauta charakteristika pasižymi praktiška forma, kuri tiktų absorbcijai gretimuose intervaluose (žr. 26 pav. β_{Im} dažninę charakteristiką).
4. Ketvirtame skyriuje pateikta trečiojo skyriaus detali analizė aptariant kiekvienu tyrimo atveju gautą charakteristiką ir įvertinus sąlygas, dėl kurių SPP sklinda ir dėl kokių priežasčių yra ribojamas jų sklidimas.
5. Prieduose pateiktas programinis kodas kiekvienai tirtai struktūrai. Naudojantis pateiktomis tyrimo scenarijų lentelėmis (1–6 lent.) galima atkartoti atliktus tyrimus arba tirti aibę kitų struktūrinių parametrų daromą įtaką pagrindinėms charakteristikoms.

LITERATŪRA

1. SHALAEV, V.; CAI, W. 2010. *Optical Metamaterials: Fundamentals and Applications*. New York: Springer. 71 p.
2. SILVA, A. et al. 2014. *Performing mathematical operations with metamaterials*. Science. 343:160–163 p.
3. ENGHETA, N. 2007. *Circuits with light at nanoscales: optical nanocircuits inspired by metamaterials*. Science 3171: 698–702.
4. ENGHETA, N. et al. 2005. *Circuit elements at optical frequencies: nano-inductor, nano-capacitor, and nano-resistor*. Phys. Rev. Lett. 95: 095504 p.
5. SUN, Y. et al. 2012. *Experimental realization of optical lumped nanocircuit elements at infrared wavelengths*. Nat. Mater. 11: 208–12.
6. SHI, J. et al. 2014. *Modular assembly of optical nanocircuits*. Nat. Commun. 5: 3896 p.
7. GIAVAMPAOLA, D. et al. 2014. *Digital metamaterials*. Nat. Mater. 13: 1115 p.
8. MAXFIELD, C. 2008. *FPGA: Instant Access*. Burlington: Elsevier.
9. CUI, T. J.; QI, M. Q. et al. 2014. *Coding metamaterials, digital metamaterials, and programming metamaterials*. Light: Sci. 3: 218 p.
10. BOLTASSEVA, A.; ATWATER, H. A. 2011. *Low-loss plasmonic metamaterials*. Science 331: 290–291 p.
11. WEGENER, M. 2013. *Metamaterials beyond optics*. Science 22:342 939–40 p.
12. GULER, U.; BOLTASSEVA, A. et al. 2014 *Refractory plasmonics*. Science 344: 263–264 p.
13. ENGHETA, N.; POLMAN A. et al. 2013. *Experimental realization of an epsilon-near-zero metamaterial at visible wavelengths*. Nat. Photon. 7: 907–712 p.
14. SORGER, V. J.; LANZILLOTTI-KIMURA, N. D. et al. 2012. *Ultra-compact silicon nanophotonic modulator with broadband response*. Nanophotonics 1: 17–22 p.
15. YU, N.; CAPASSO F. 2014. *Flat optics with designer metasurfaces*. Nat. Mater. 13: 139–150 p.
16. NI, X. et al. 2013. *Ultra-thin, planar, Babinet-inverted plasmonic metalenses*. Light: Sci. Appl. 2: 72 p.
17. PORS, A.; ALBREKTSEN, O. et al. 2013. *Gap plasmon-based metasurfaces for total control of reflected light*. Sci. Rep. 3: 2155 p.
18. ABB, M.; WANG, Y. et al. 2014. *Hotspot-mediated ultrafast nonlinear control of multifrequency plasmonic nanoantennas*. Nat. Commun. 5: 4869 p.
19. EMILY, A.; W.; ROBERT, P. H. et al. 2014. *Ultra-fast modulation of the plasma frequency of vertically aligned indium tin oxide rods*. Nano Lett. 14: 1120–1126 p.

20. YU, N.; GENEVET, P. *et al.* 2011. *Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction.* Science 334: 333 p.
21. PFEIFFER, C.; GRBIC, A. 2013. *Metamaterial Huygens' surfaces: tailoring wave fronts with reflectionless sheets.* Phys. Rev. Lett. 110: 197401 p.
22. PFEIFFER, C.; ZHANG, C. *et al.* 2014. *High performance bianisotropic metasurfaces: asymmetric transmission of light.* Phys. Rev. Lett. 113: 023902 p.
23. PFEIFFER, C.; GRBIC, A. 2014. *Controlling vector Bessel beams with metasurfaces.* Phys. Rev. Appl. 2: 044012 p.
24. VALENTE, J.; OU, J. Y. *et al.* 2015. *Reconfiguring photonic metamaterials with currents and magnetic fields.* Appl. Phys. Lett. 106: 111905 p.
25. CHEN, H. T.; O'HARA, J. F. *et al.* 2008. *Experimental demonstration of frequency-agile terahertz metamaterials.* Nat. Photon. 2: 295 p.
26. SIHVOLA, A. 1999. *Electromagnetic mixing formulas and applications*, IEEE, London.
27. PRASHANT, S.; JONATHAN, A. *et al.* 2014. *Hyperbolic metamaterials: fundamentals and applications*, Nano Convergence 1: 14 p.
28. GRIC, T.; HESS, O. 2017. *Long-range surface plasmons supported by the disordered nanowire metamaterials.* Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 32(6): 1–8 p.
29. KRETSCHMANN, E.; RAETHER, H. 1968. *Radiative decay of non-radiative surface plasmons excited by light*, Z Naturforsch 23A, 2135–2136 p.
30. GRIC, T.; HESS, O. 2017. *Surface plasmon polaritons at the interface of two nanowire metamaterials.* Journal of optics 19(8).
31. Zhang, X.; Wu, Y. 2015. *Effective medium theory for anisotropic metamaterials* Scientific Reports 5: 7892 p.
32. GRIC, T.; HESS, O. 2017. *Tunable surface waves at the interface separating different graphene-dielectric composite hyperbolic metamaterials.* Opt Express. 15;25(10):11466–11476 p.
33. MAIER, A. S. 2007. *PLASMONICS: FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS*. Springer US: 28 p.
34. PRAMOD, S.; KOROLEV, A. K. *et al.* 2011. *Single and dual band 77/95/110 GHz metamaterial absorbers on flexible polyimide substrate.* Applied Physics Letters 99(26). 1–6 p.
35. URBAS, M. A.; ZUBIN, J. *et al.* 2016. *Roadmap on optical metamaterials* Journal of Optics 2016(18): 9–10, 15–16, 19–20 p.

PRIEDAI

A priedas. USB laikmena su baigiamojo darbo aiškinamuoju raštu.

B priedas. Pranešimo XXI-oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje pažyma



VILNIAUS GEDIMINO
TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

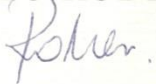
XXI-toji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija
„MOKSLAS – LIETUVOS ATEITIS“
ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA

PAŽYMA

Andrius Kamarauskas

*Sistemų inžinerijos ir kompiuterių technologijų (T120),
Signalų technologijų (T121), Aukštų dažnių technologijų
(T191) jungtinėje sekcijoje perskaitė pranešimą*

**DRUDE MODELIS IR DIELEKTRINĖS
SKVARBOS PRIKLAUSOMYBĖ NUO TERPĖS
LŪŽIŲ RODIKLIO**

Mokslo komiteto pirmininkas  prof. habil. dr. Romanas Martavičius

Sekcijos pirmininkas  doc. dr. Gintautas Tamulevičius

2018 m. kovo 16 d.
Vilnius

C priedas. Pranešimo XXI-oje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje diplomas



XXI-toji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija
„MOKSLAS – LIETUVOS ATEITIS“
ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA

DIPLOMAS

Andrius Kamarauskas

*prof. habil. dr. Z. Vainorio vardo
Sistemų inžinerijos, kompiuterių technologijų (T120),
Signalų technologijų (T121) ir Aukštų dažnių technologijų
(T191) jungtinėje sekcijoje perskaitė pranešimą*

**DRUDE MODELIS IR DIELEKTRINĖS
SKVARBOS PRIKLAUSOMYBĖ NUO TERPĖS
LŪŽIO RODIKLIO**

*ir apdovanotas geriausio jaunojo mokslininko pranešimo
konkurse trečiaja prof. habil. dr. Z. Vainorio vardo premija*

Mokslo komiteto pirmininkas

prof. habil. dr. Romanas Martavičius

Sekcijos pirmininkas

doc. dr. Gintautas Tamulevičius

2018 m. kovo 16 d.
Vilnius

D priedas. Programinis kodas, naudotas tiriant paviršinės bangos sklidimą metamedžiagoje

```

clc
clear all
%Kintamieji start

c = 299792458;% Sviesos greitis m/s

%e_infl = 5;%Sidabras
%Wp1 = 2.2971*10^15;%Hz 9.5 eV Sidabras
%delta1 = 2.3866*10^13;%Hz 0.0987 eV Sidabras

e_infl = 1; %Aluminis
Wp1 = 3.7967*10^15; %15.702 eV Aluminis
delta1 = 1.682*10^14; %0.696 eV Aluminis

ed = 4.7; %Isorinis dielektrikas[const]
emd = 11.68; %Metamedziagos dielektrikas[const]

%Stiklas 4.7
%Silicis 11.68
%Struktūros parametrai
d = 1*10^-9;%metalo/puslaidininkio skersmuo [nm]
d_step = 1*10^-9;
jmax = 3;

sr1 = 6*10^-9;%gardeles sienelės ilgis [nm]
S = 5.1962*10^-9;%atstumas nuo centro link kraštines [nm]
alfal = 60;%kampas laipsniais
alfa2 = alfa1/57.2957795;%kampas Radianais

%Kintamieji end

f_start = 2*10^11;%Hz
f_end = 1.5*10^16;%Hz

spacing = ((f_end)-(f_start))/9999; %Hz
f = f_start:spacing:f_end;

horizontal = Wp1./(1+ed)^0.5;
Light_Line = (2*pi*f)/c*(ed)^0.5;

h = 4.135*10^-15; %eV Planko konstanta
x_bangos_energija_start = h*f_start;
x_bangos_energija_end = h*f_end;
eV = h.*f;%Banga eV
k = (2*pi*f)/c;

ht = sqrt(2*S^2+((sr1^2)/2)-2*(S^2+((sr1^2)/4))*cos(alfa2))*sin(atan((2*S)/sr1)-alfa2/2);
ro = (pi*d^2)/(2*S*(ht+sr1));
%-----[Nanolaidininko Drude modelis start]-----
subplot(2,1,1)

RE1 = e_infl-(Wp1^2)./(f.^2+1i*delta1*f);
IM1 = imag(e_infl-(Wp1^2)./(f.^2+1i*delta1*f));

plot(eV,RE1,'k','LineWidth', 0.8)
hold on
plot(eV,IM1,'g','LineWidth', 0.8)
data = RE1;
Intervalas_ev(data)

grid on
ylim([-10 10]);
xlim([0.15 10]);
legend('\epsilon_{Re}','\epsilon_{Im}')
xlabel('Dažnis, eV');
ylabel('\epsilon', 'Rotation', 0);
%title('Nano laidininko Drude modelis');

subplot(2,1,2)
Ev = [0.64008 0.77009 0.89005 1.1396 1.51 1.7599 2.1299 2.26 2.6301 2.88 3.2499 3.5004 3.62 3.7401 3.8697 3.9905 4.1204 4.2402 4.3595 4.6108 4.8602 5.2292 5.6
5.8511 6.0986 6.4710 6.5984];%Sidabras
n = [0.24 0.15 0.13 0.04 0.04 0.04 0.05 0.06 0.05 0.04 0.05 0.1 0.14 0.17 0.81 1.13 1.34 1.39 1.41 1.38 1.33 1.28 1.25 1.2 1.15 1.1 1.07];%Sidabras

%Ev = [0.005 0.038540 0.12907 0.51069 0.60333 1.7831 1.9381 2.8203 3.6216 4.1039 4.8484 5.7281 6.2260 6.7673];%Aluminis
%n = [473.49 99.098 21.153 2.9346 2.2349 1.6203 1.2952 0.58336 0.32634 0.25107 0.1821 0.13398 0.11461 0.097571];%Aluminis

plot(eV,RE1.^0.5,'k','LineWidth', 0.8)
hold on
plot(Ev,n,'r');%nm
data = RE1;
Intervalas_ev(data)

grid on
ylim([0 6]);
xlim([0.15 10]);
xlabel('Dažnis, eV');
ylabel('n', 'Rotation', 0);
%title('Nano laidininko lūžio rodiklis');
legend('n = \surd\epsilon', 'Eksperimentiškai', 'Location', 'northwest')
%-----[Nanolaidininko Drude modelis End]-----
disp('⟨Enter⟩ pratesimui....');
pause;
close all;
%-----[Re+Im dielektrine skv statmena kryptimi start]-----
subplot(2,1,1)
for j = 1:1:jmax
colorVec = hsv(j/max);%Spalvu vektorius (Skaicius turi sutapti su h)

ht = sqrt(2*S^2+((sr1^2)/2)-2*(S^2+((sr1^2)/4))*cos(alfa2))*sin(atan((2*S)/sr1)-alfa2/2);
ro = (pi*d^2)/(2*S*(ht+sr1));

e_statRE = emd.*((RE1.*(1+ro)+emd.*(1-ro))./(RE1.*(1-ro)+emd.*(1+ro)));

if 1%Atnaujina legenda
plotHandles(j) = plot(f,e_statRE);
hold on
plotLabels(j) = ['Re \epsilon_{\perp} kai, d = ' num2str(d/(10^-9)), ' nm'];
end

if (fix(jmax/2)+1)-j == 0%Išcentruojame grafiką
[ymax,idx] = max(e_statRE,[],2);
f_center = f(idx);
Delta = 45;%Kuo skaicius artimesnis 0 tuo mažiau matosi
f_low = (f_center/100)*(100-Delta);
f_high = (f_center/100)*(100+Delta);
%plot(W(idx),ymax,'or');%Patikrinti grafiko centrui
end

```

```

        if j == 1
            data = e_statRE;
            Intervalas_f(data)
        end
    d = d+d_step;
end
grid on
xlabel('Dažnis, Hz');
xlim([f_low f_high]);
title('\epsilon_{\perp}');
ylabel('\epsilon_{\perp}, Rotation',0);
legend(plotHandles, plotLabels);

subplot(2,1,2)
d = d-(d_step*jmax); % Resetiname d
for j = 1:1:jmax
    colorVec = hsv(jmax); %Spalvu vektorius (Skaicius turi sutapti su hmax)

    ht = sqrt(2*S^2+((srl^2)/2)-2*(S^2+((srl^2)/4))*cos(alfa2))*sin(atan((2*S)/srl)-alfa2/2);
    ro = (pi*d^2)/(2*S*(ht+srl));

    e_statIM = imag(emd.*(REl*(1-ro)+emd.*(1-ro))./(REl.*(1-ro)+emd.*(1-ro)));
    if 1%Atnaujina legenda
        plotHandles(j) = plot(f,e_statIM);
        hold on
        plotLabels{j} = ['Im \epsilon_{\perp} kai, d = ' num2str(d/(10^-9)), ' nm'];
    end
    if (fix(jmax/2)+1)-j == 0%Išcentruojame grafiką
        [ymax,idx] = max(e_statIM,[],2);
        f_center = f(idx);
        Delta = 45;%Kuo skaicius artimesnis 0 tuo mažiau matosi
        f_low = (f_center/100)*(100-Delta);
        f_high = (f_center/100)*(100+Delta);
        %plot(f(idx),ymax,'or');%Patikrinti grafiko centrui
    end
    if j == 1
        data = e_statIM;
        Intervalas_f(data)
    end
end
d = d+d_step;
end
grid on
xlim([f_low f_high]);
xlabel('Dažnis, Hz');
title('\epsilon_{\perp}');
ylim([0, max(real(e_statIM))]);
legend(plotHandles, plotLabels);
ylabel('\epsilon_{\perp}, Rotation',0);
%-----[Re+Im dielektrine skv statmena kryptimi start]-----
disp('<Enter> pratesimui....');
pause;
close all;
%-----[Re+Im dielektrine skv lygiagrečia kryptimi start]-----
subplot(2,1,1)
d = d-(d_step*jmax); % Resetiname d
for j = 1:1:jmax
    colorVec = hsv(jmax); %Spalvu vektorius (Skaicius turi sutapti su hmax)

    ht = sqrt(2*S^2+((srl^2)/2)-2*(S^2+((srl^2)/4))*cos(alfa2))*sin(atan((2*S)/srl)-alfa2/2);
    ro = (pi*d^2)/(2*S*(ht+srl));

    e_lygRE = REl*ro+emd*(1-ro);
    if 1%Atnaujina legenda
        plotHandles(j) = plot(f,e_lygRE);
        hold on
        plotLabels{j} = ['Re \epsilon_{\mid\mid} kai, d = ' num2str(d/(10^-9)), ' nm'];
    end
    if (fix(jmax/2)+1)-j == 0%Išcentruojame grafiką
        x0_pos = find(abs(real(imag(e_lygRE))) > 0.1);
        f_center = f(x0_pos);
        val = numel(x0_pos);%Suskaiciuoja kiek elementu kurie tenkina x0_pos salyga
        if val > 1 %jeigu elementu daugiau negu 1
            [x0_max] = max(x0_pos,[],2);%randame didziausia
            [x0_min] = min(x0_pos,[],2);%randame maziausia
            f_center = (f(x0_max)+f(x0_min))/2;%randame tarpine verte
        end
        Delta =100;%Kuo skaicius artimesnis 0 tuo mažiau matosi
        f_low = (f_center/100)*(100-Delta);
        f_high = (f_center/100)*(100+Delta);
        %plot(f_center,0,'or')%Patikrinti grafiko centrui
    end
    if j == 1
        data = e_lygRE;
        Intervalas_f(data)
    end
end
d = d+d_step;
end
grid on
ylim([-1000 50]);
xlim([f_low f_high]);
xlabel('Dažnis, Hz');
title('\epsilon_{\mid\mid}');
ylabel('\epsilon_{\mid\mid}, Rotation',0);
legend(plotHandles, plotLabels);

subplot(2,1,2)

d = d-(d_step*jmax); % Resetiname d
for j = 1:1:jmax
    colorVec = hsv(jmax); %Spalvu vektorius (Skaicius turi sutapti su hmax)

    ht = sqrt(2*S^2+((srl^2)/2)-2*(S^2+((srl^2)/4))*cos(alfa2))*sin(atan((2*S)/srl)-alfa2/2);
    ro = (pi*d^2)/(2*S*(ht+srl));

    e_lygIM = imag(REl*ro+emd*(1-ro));

    if 1%Atnaujina legenda
        plotHandles(j) = plot(f,e_lygIM);
        hold on
        plotLabels{j} = ['Im \epsilon_{\mid\mid} kai, d = ' num2str(d/(10^-9)), ' nm'];
    end
    if (fix(jmax/2)+1)-j == 0%Išcentruojame grafiką
        x0_pos = find(abs(e_lygIM) > 5);
        f_center = f(x0_pos);
        val = numel(x0_pos);%Suskaiciuoja kiek elementu kurie tenkina x0_pos salyga
        if val > 1 %jeigu elementu daugiau negu 1
            [x0_max] = max(x0_pos,[],2);%randame didziausia
            [x0_min] = min(x0_pos,[],2);%randame maziausia
            f_center = (f(x0_max)+f(x0_min))/2;%randame tarpine verte
        end
        Delta = 70;%Kuo skaicius artimesnis 0 tuo mažiau matosi
        f_low = (f_center/100)*(100-Delta);
        f_high = (f_center/100)*(100+Delta);
        %plot(f_center,0,'or')%Patikrinti grafiko centrui
    end
    if j == 1
        data = e_lygIM;
        Intervalas_f(data)
    end
end

```

```

        end
d = d+d_step;
end

grid on
xlim([f_low f_high]);
xlabel('Dažnis, Hz');
title('\epsilon_{mid}');
ylabel('\epsilon_{Rotation}',0);
legend(plotHandles, plotLabels);
%-----[Re+Im dielektrine skv lygiagrecia kryptimi start]-----
disp('<Enter> pratesimui....');
pause;
close all;
%-----[(Re+Im)Beta+Lp Start]-----
subplot(1,3,1)
d = d-(d_step*jmax);% Resetiname d
for j = 1:1:jmax
ht = sqrt(2*S^2+((sr1^2)/2)-2*(S^2+((sr1^2)/4))*cos(alfa2))*sin(atan((2*S)/sr1)-alfa2/2);
ro = (pi*d^2)/(2*S*(ht+sr1));

a = emd*(ro-1)-REL.*(ro+1);
b = emd*(ro+1)-REL.*(ro-1);

BetaRE = k.*(-1*(emd.*ed.*a.*(ed-REL.*ro+emd.*(ro-1)))/(b.*(ed^2+((emd.*a.*(REL.*ro-emd.*(ro-1)))/(b))))).^0.5;
if l%Atnaujina legenda
plotHandles(j) = plot(BetaRE,f);
hold on
plotLabels(j) = ['Re \beta kai, d = ' num2str(d/(10^9)), ' nm'];
end
if j == 1
data = BetaRE;
Intervalas_fh(data)
end
d = d+d_step;
end

plot(Light_Line,f,'--')
hold on

x1 = [0, max(BetaRE)];
y1 = [horizontal horizontal];
line(x1,y1,'Color','k','LineStyle',':', 'LineWidth', 1.5)

grid on
xlim([0, 10^8]);
ylabel('Dažnis, Hz');
ylim([0 horizontal*1.1]);
title('\beta_{Re}, m^{-1}');
xlabel('\beta_{Re}, m^{-1}','Rotation',0);
legend(plotHandles, plotLabels,'Location', 'Best');

subplot(1,3,2)
d = d-(d_step*jmax);% Resetiname d
for j = 1:1:jmax

ht = sqrt(2*S^2+((sr1^2)/2)-2*(S^2+((sr1^2)/4))*cos(alfa2))*sin(atan((2*S)/sr1)-alfa2/2);
ro = (pi*d^2)/(2*S*(ht+sr1));

a = emd*(ro-1)-REL.*(ro+1);
b = emd*(ro+1)-REL.*(ro-1);

BetaIM = imag(k.*(-1*(emd.*ed.*a.*(ed-REL.*ro+emd.*(ro-1)))/(b.*(ed^2+((emd.*a.*(REL.*ro-emd.*(ro-1)))/(b))))).^0.5);
if l%Atnaujina legenda
plotHandles(j) = plot(BetaIM,f);
hold on
plotLabels(j) = ['Im \beta kai, d = ' num2str(d/(10^9)), ' nm'];
end
if j == 1
data = BetaIM;
Intervalas_fh(data)
end
d = d+d_step;
end

hold on
x1 = [0, max(BetaIM)];
y1 = [horizontal horizontal];
line(x1,y1,'Color','k','LineStyle',':', 'LineWidth', 1.5)

grid on
ylabel('Dažnis, Hz');
ylim([0 horizontal*1.1]);
xlim([0 max(real(BetaIM))]);
title('\beta_{Im}, m^{-1}');
xlabel('\beta_{Im}, m^{-1}','Rotation',0);
legend(plotHandles, plotLabels,'Location', 'Best');

subplot(1,3,3)
d = d-(d_step*jmax);% Resetiname d
for j = 1:1:jmax
ht = sqrt(2*S^2+((sr1^2)/2)-2*(S^2+((sr1^2)/4))*cos(alfa2))*sin(atan((2*S)/sr1)-alfa2/2);
ro = (pi*d^2)/(2*S*(ht+sr1));

a = emd*(ro-1)-REL.*(ro+1);
b = emd*(ro+1)-REL.*(ro-1);

BetaIM = imag(k.*(-1*(emd.*ed.*a.*(ed-REL.*ro+emd.*(ro-1)))/(b.*(ed^2+((emd.*a.*(REL.*ro-emd.*(ro-1)))/(b))))).^0.5);
bil = c./f;%Banga m
Lp = (1./(2*BetaIM))./bil;

if l%Atnaujina legenda
plotHandles(j) = plot(Lp,f);
hold on
plotLabels(j) = ['Lp kai, d = ' num2str(d/(10^9)), ' nm'];
end
if j == 1
data = Lp;
Intervalas_fh(data)
end
d = d+d_step;
end

x1 = [0, max(BetaRE)];
y1 = [horizontal horizontal];
line(x1,y1,'Color','k','LineStyle',':', 'LineWidth', 1.5)

grid on
title('Lp');
xlim([0, 10]);
ylabel('Dažnis, Hz');
ylim([0 horizontal*1.1]);
xlabel('Lp/\lambda','Rotation',0);
legend(plotHandles, plotLabels,'Location', 'Best');
%-----[(Re+Im)Beta+Lp Start]-----
disp('Pabaiga....');

```

```
pause;
close all;
```

E priedas. Programinis kodas, naudotas tiriant paviršinės bangos sklidimą dviejų metamedžiagų sandūroje

```
clc
clear all

%Kintamieji start
c = 299792458;% Sviesos greitis m/s
h = 4.135*10^-15; %eV Planko konstanta

e_inf_L = 5;%Sidabras
Wp_L = 2.2971*10^15;%Hz 9.5 eV Sidabras
delta_L = 2.3866*10^13;%Hz 0.0987 eV Sidabras

e_inf_R = 1; %Aliuminis
Wp_R = 3.7967*10^15; %15.702 eV Aliuminis
delta_R = 1.682*10^14; %0.696 eV Aliuminis

d_L = 2*10^-9;%metalo/puslaidininkio skersmuo kairėje pusėje [nm]
d_R = 1*10^-9;%metalo/puslaidininkio skersmuo dešinėje pusėje [nm]
d_R_step = 1*10^-9;

jmax = 3;

S = 5.1962*10^-9;%atstumas nuo centro link krastines [nm]
e_L_d = 4.7; %Kairiosios medžiagos dielektrikas
e_R_d = 11.68; %Dešiniosios medžiagos dielektrikas

%Stiklas 4.7
%Silicis 11.68

%Kintamieji end
f_start = 10^9;%Hz
f_end = 10^16;%Hz

spacing = ((f_end)-(f_start))/9999; %Hz
f = f_start:spacing:f_end;

horizontal = (Wp_R/(1+e_L_d)^0.5);
Light_Line = (2*pi*f)/c*(e_L_d)^0.5;

k = (2*pi*f)/c;

x_bangos_energija_start = h*f_start;
x_bangos_energija_end = h*f_end;
eV = h.*f;%Banga eV

ro_L = ((pi*d_L^2)/(2*sqrt(3)*S^2));%kairės puses
ro_R = ((pi*d_R^2)/(2*sqrt(3)*S^2));%desinės puses

%-----[Desiniojo nanolaidininko medžiagos Drude modelis start]-----
subplot(2,2,2)

RE_r = e_inf_R-(Wp_R^2)/(f.^2+1i*delta_R*f);
IM_r = imag(e_inf_R-(Wp_R^2)/(f.^2+1i*delta_R*f));

plot(eV,RE_r,'k');
hold on
plot(eV,IM_r,'g');
data = RE_r;
Intervalas_ev(data)

grid on
ylim([-10 10]);
xlim([0.15 10]);
legend('Re','Im')
xlabel('Dažnis, eV');
ylabel('\epsilon', 'Rotation', 0);
title('Dešinioji medžiaga viršus');

subplot(2,2,4)

Ev_r = [0.64008 0.77009 0.89005 1.1396 1.51 1.7599 2.1299 2.26 2.6301 2.88 3.2499 3.5004 3.62 3.7401 3.8697 3.9905 4.1204 4.2402 4.3595 4.6108 4.8602 5.2292
5.6 5.8511 6.0986 6.4710 6.5984];%Sidabras
n_r = [0.24 0.15 0.13 0.10 0.04 0.04 0.05 0.06 0.05 0.04 0.05 0.1 0.14 0.17 0.81 1.13 1.34 1.39 1.41 1.38 1.33 1.28 1.25 1.2 1.15 1.1 1.07];%Sidabras

Ev_r = [0.005 0.038540 0.12907 0.51069 0.60333 1.7831 1.9381 2.8203 3.6216 4.1039 4.4884 5.7281 6.2260 6.7673];%Aliuminis
n_r = [473.49 99.098 21.153 2.9346 2.2349 1.6203 1.2952 0.58336 0.32634 0.25107 0.1821 0.13398 0.11461 0.097571];%Aliuminis

plot(eV,RE_r.^0.5,'k','LineWidth', 0.8)
hold on
plot(Ev_r,n_r,'r');%nm
data = RE_r;
Intervalas_ev(data)

grid on
ylim([0 6]);
xlim([0.15 10]);
xlabel('Dažnis, eV');
ylabel('n','Rotation',0);
title('Dešinioji medžiaga apačia');
legend('n = \surd\epsilon ', 'Eksperimentiškai', 'Location', 'northwest')
%-----[Desiniojo nanolaidininko medžiagos Drude modelis end]-----

%-----[Kairiosios nanolaidininko medžiagos Drude modelis start]-----
subplot(2,2,1)
RE_l = e_inf_L-(Wp_L^2)/(f.^2+1i*delta_L*f);
IM_l = imag(e_inf_L-(Wp_L^2)/(f.^2+1i*delta_L*f));

plot(eV,RE_l,'k');
hold on
plot(eV,IM_l,'g');
data = RE_l;
Intervalas_ev(data)

grid on
ylim([-10 10]);
xlim([0.15 10]);
legend('Re','Im')
xlabel('Dažnis, eV');
ylabel('\epsilon', 'Rotation', 0);
title('Kairioji medžiaga viršus');

subplot(2,2,3)
```

```

Ev_1 = [0.64008 0.77009 0.89005 1.1396 1.51 1.7599 2.1299 2.26 2.6301 2.88 3.2499 3.5004 3.62 3.7401 3.8697 3.9905 4.1204 4.2402 4.3595 4.6108 4.8602 5.2292 5.6
5.8511 6.0986 6.4710 6.5984];%Sidabras
n_1 = [0.24 0.15 0.13 0.04 0.04 0.04 0.05 0.06 0.05 0.04 0.05 0.1 0.14 0.17 0.81 1.13 1.34 1.39 1.41 1.38 1.33 1.28 1.25 1.2 1.15 1.1 1.07];%Sidabras

%Ev_1 = [0.005 0.038540 0.12907 0.51069 0.60333 1.7831 1.9381 2.8203 3.6216 4.1039 4.8484 5.7281 6.2260 6.7673];%Aluminis
%n_1 = [473.49 99.098 21.153 2.9346 2.2349 1.6203 1.2952 0.58336 0.32634 0.25107 0.1821 0.13398 0.11461 0.097571];%Aluminis

plot(eV, RE_1.^0.5, 'k', 'LineWidth', 0.8)
hold on
plot(Ev_1, n_1, 'r');%nm
data = RE_1;
Intervalas_ev(data)

grid on
ylim([0 6]);
xlim([0.15 10]);
xlabel('Dažnis, eV');
ylabel('n', 'Rotation', 0);
title('Kairioji medžiaga apačia');
legend('n = \surd{\epsilon}', 'Eksperimentiškai', 'Location', 'northwest')
%-----[Kairiosios nanolaidiniko medžiagos Drude modelis end]-----

disp('<Enter> pratesimui....');
pause;
close all;

subplot(4,1,1)
%-----[RE dielektrine skv statmena kryptimi L start]-----
for j = 1:1:jmax
colorVec = hsv(jmax);%Spalvu vektorius (Skaicius turi sutapti su h)

ro_L = ((pi*d_L^2)/(2*sqrt(3)*S^2));%kaires puses
ro_R = ((pi*d_R^2)/(2*sqrt(3)*S^2));%desines puses

e_L_statRE = e_L_d*((RE_r*(1+ro_L)+e_L_d*(1-ro_L))./(RE_r*(1-ro_L)+e_L_d*(1+ro_L)));

    if (fix(jmax/2)+1)-j == 0%Išcentruojame grafiką
        [ymax, idx] = max(e_L_statRE, [], 2);
        f_center = f(idx);
        Delta = 30;%Kuo skaicius artimesnis 0 tuo mažiau matosi
        f_low = (f_center/100)*(100-Delta);
        f_high = (f_center/100)*(100+Delta);
        %plot(f(idx), ymax, 'or');%Patikrinti grafiko centrui
    end
    if 1%Atnaujina legenda
        plotHandles(j) = plot(f, e_L_statRE);
        hold on
        plotLabels(j) = ['Re \epsilon_{\perp} kai, d_R = ' num2str(d_R/(10^-9)), ' nm'];
    end
    if j == 1%Braizomas regimosios sviesos intervalas
        data = e_L_statRE;
        Intervalas_f(data)
    end
end
d_R = d_R+d_R_step;
end

grid on
xlim([f_low f_high]);
xlabel('Dažnis, Hz');
ylabel('\epsilon', 'Rotation', 0);
legend(plotHandles, plotLabels);
title('Kairė pusė \epsilon_{\perp}');
%-----[RE dielektrine skv statmena kryptimi L End]-----

subplot(4,1,2)
%-----[Im dielektrine skv statmena kryptimi L start]-----
d_R = d_R+(d_R_step*jmax);% Resetiname d
for j = 1:1:jmax
colorVec = hsv(jmax);%Spalvu vektorius (Skaicius turi sutapti su h)

ro_L = ((pi*d_L^2)/(2*sqrt(3)*S^2));%kaires puses
ro_R = ((pi*d_R^2)/(2*sqrt(3)*S^2));%desines puses

e_L_statRE = e_L_d*((RE_r*(1+ro_L)+e_L_d*(1-ro_L))./(RE_r*(1-ro_L)+e_L_d*(1+ro_L)));
e_L_statIM = imag(e_L_statRE);

    if (fix(jmax/2)+1)-j == 0%Išcentruojame grafiką
        [ymax, idx] = max(e_L_statIM, [], 2);
        f_center = f(idx);
        Delta = 30;%Kuo skaicius artimesnis 0 tuo mažiau matosi
        f_low = (f_center/100)*(100-Delta);
        f_high = (f_center/100)*(100+Delta);
        %plot(f(idx), ymax, 'or');%Patikrinti grafiko centrui
    end
    if 1%Atnaujina legenda
        plotHandles(j) = plot(f, e_L_statIM);
        hold on
        plotLabels(j) = ['Im \epsilon_{\perp} kai, d_R = ' num2str(d_R/(10^-9)), ' nm'];
    end
    if j == 1%Braizomas regimosios sviesos intervalas
        data = e_L_statIM;
        Intervalas_f(data)
    end
end
d_R = d_R+d_R_step;
end

grid on
xlim([f_low f_high]);
xlabel('Dažnis, Hz');
ylim([0 max(e_L_statIM)+1]);
legend(plotHandles, plotLabels);
ylabel('\epsilon', 'Rotation', 0);
title('Kairė pusė \epsilon_{\perp}');
%-----[Im dielektrine skv statmena kryptimi L end]-----

subplot(4,1,3)
%-----[Re dielektrine skv lyg kryptimi L start]-----
d_R = d_R+(d_R_step*jmax);% Resetiname d
for j = 1:1:jmax
colorVec = hsv(jmax);%Spalvu vektorius (Skaicius turi sutapti su h)

ro_L = ((pi*d_L^2)/(2*sqrt(3)*S^2));%kaires puses
ro_R = ((pi*d_R^2)/(2*sqrt(3)*S^2));%desines puses
e_L_lygRE = RE_r*ro_L+e_L_d*(1-ro_L);

    if (fix(jmax/2)+1)-j == 0%Išcentruojame grafiką
        x0_pos = find(abs(real(e_L_lygRE)) < 0.1);
        f_center = f(x0_pos);
        val = numel(x0_pos);%Suskaiciuoja kiek elementu kurie tenkina x0_pos salyga

        if val > 1 %jeigu elementu daugiau negu 1
            [x0_max] = max(x0_pos, [], 2);%randame didziausia
            [x0_min] = min(x0_pos, [], 2);%randame maziausia
            f_center = (f(x0_max)+f(x0_min))/2;%randame tarpine verte
        end
    end
end

```

```

Delta = 120;%Kuo skaicius artimesnis 0 tuo mažiau matosi
f_low = (f_center/100)*(100-Delta);
f_high = (f_center/100)*(100+Delta);
%plot(f_center,0,'or')%Patikrinti grafiko centrui
end

if 1%Atnaujina legenda
    plotHandles(j) = plot(f,e_L_lygRE);
    hold on
    plotLabels{j} = ['Re \epsilon_{\mid\mid} kai, d_R = ' num2str(d_R/(10^~9)), ' nm'];
end
if j == 1%Braizomas regimosios sviesos intervalas
    data = e_L_lygRE;
    Intervalas_f(data)
end
d_R = d_R+d_R_step;
end

grid on
xlim([0 f_high]);
xlabel('Dažnis, Hz');
ylabel('\epsilon', 'Rotation', 0);
legend(plotHandles, plotLabels);
ylim([-200 (max(real(e_L_lygRE))+10)]);
title('Kairė pusė \epsilon_{\mid\mid}');
%-----[Re dielektrine skv lyg kryptimi L end]-----
subplot(4,1,4)
%-----[Im dielektrine skv lyg kryptimi L start]-----

d_R = d_R-(d_R_step*jmax);% Resetiname d
for j = 1:1:jmax
    colorVec = hsv(jmax);%Spalvu vektorius (Skaicius turi sutapti su h)

    ro_L = ((pi*d_L^2)/(2*sqrt(3)*S^2));%kaires puses
    ro_R = ((pi*d_R^2)/(2*sqrt(3)*S^2));%desines puses

    e_L_lygRE = RE_r*ro_L+e_L_d*(1-ro_L);
    e_L_lygIM = imag(e_L_lygRE);

    if (fix(jmax/2)+1)-j == 0%Išcentruojame grafiką
        x0_pos = find(abs(real(imag(e_L_lygIM))) < 1);
        f_center = f(x0_pos);
        val = numel(x0_pos);%Suskaiciuoja kiek elementu kurie tenkina x0_pos salyga

        if val > 1 %jeigu elementu daugiau negu 1
            [x0_max] = max(x0_pos,[],2);%randame didžiausia
            [x0_min] = min(x0_pos,[],2);%randame mažiausia
            f_center = (f(x0_max)+f(x0_min))/2;%randame tarpine verte
        end

        Delta = 90;%Kuo skaicius artimesnis 0 tuo mažiau matosi
        f_low = (f_center/100)*(100-Delta);
        f_high = (f_center/100)*(100+Delta);
        %plot(f_center,0,'or')%Patikrinti grafiko centrui
    end

    if 1%Atnaujina legenda
        plotHandles(j) = plot(f,e_L_lygIM);
        hold on
        plotLabels{j} = ['Im \epsilon_{\mid\mid} kai, d_R = ' num2str(d_R/(10^~9)), ' nm'];
    end

    if j == 1%Braizomas regimosios sviesos intervalas
        data = e_L_lygIM;
        Intervalas_ev(data)
    end
d_R = d_R+d_R_step;
end

grid on
xlabel('Dažnis, Hz');
xlim([f_low f_high]);
legend(plotHandles, plotLabels);
ylabel('\epsilon', 'Rotation', 0);
title('Kairė pusė \epsilon_{\mid\mid}');
%-----[Im dielektrine skv lyg kryptimi L end]-----
subplot(4,1,1)
%-----[Re dielektrine skv statmena kryptimi R start]-----
d_R = d_R-(d_R_step*jmax);% Resetiname d
for j = 1:1:jmax
    colorVec = hsv(jmax);%Spalvu vektorius (Skaicius turi sutapti su h)

    ro_L = ((pi*d_L^2)/(2*sqrt(3)*S^2));%kaires puses
    ro_R = ((pi*d_R^2)/(2*sqrt(3)*S^2));%desines puses
    e_R_statRE = e_R_d*((RE_l*(1+ro_R)+e_R_d*(1-ro_R))./(RE_l*(1-ro_R)+e_R_d*(1+ro_R)));

    if (fix(jmax/2)+1)-j == 0%Išcentruojame grafiką
        [ymax,idx] = max(e_R_statRE,[],2);
        f_center = f(idx);
        Delta = 30;%Kuo skaicius artimesnis 0 tuo mažiau matosi
        f_low = (f_center/100)*(100-Delta);
        f_high = (f_center/100)*(100+Delta);
        %plot(f(idx),ymax,'or')%Patikrinti grafiko centrui
    end

    if 1%Atnaujina legenda
        plotHandles(j) = plot(f,e_R_statRE);
        hold on
        plotLabels{j} = ['Re \epsilon_{\perp} kai, d_R = ' num2str(d_R/(10^~9)), ' nm'];
    end
    if j == 1%Braizomas regimosios sviesos intervalas
        data = e_R_statRE;
        Intervalas_f(data)
    end
d_R = d_R+d_R_step;
end

grid on
xlabel('Dažnis, Hz');
xlim([f_low f_high]);
ylabel('\epsilon', 'Rotation', 0);
legend(plotHandles, plotLabels);
title('Dešinė pusė \epsilon_{\perp}');
%-----[Re dielektrine skv statmena kryptimi R end]-----
subplot(4,1,2)
%-----[Im dielektrine skv statmena kryptimi R start]-----
d_R = d_R-(d_R_step*jmax);% Resetiname d
for j = 1:1:jmax
    colorVec = hsv(jmax);%Spalvu vektorius (Skaicius turi sutapti su h)

    ro_L = ((pi*d_L^2)/(2*sqrt(3)*S^2));%kaires puses
    ro_R = ((pi*d_R^2)/(2*sqrt(3)*S^2));%desines puses

    e_R_statRE = e_R_d*((RE_l*(1+ro_R)+e_R_d*(1-ro_R))./(RE_l*(1-ro_R)+e_R_d*(1+ro_R)));

    if (fix(jmax/2)+1)-j == 0%Išcentruojame grafiką
        [ymax,idx] = max(real(imag(e_R_statRE)), [],2);

```

```

        f_center = f(idx);
        Delta = 30;%Kuo skaicius artimesnis 0 tuo mažiau matosi
        f_low = (f_center/100)*(100-Delta);
        f_high = (f_center/100)*(100+Delta);
        %plot(f(idx),ymax,'or');%Patikrinti grafiko centrui
    end

    if 1%Atnaujina legenda
        plotHandles(j) = plot(f,imag(e_R_statRE));
        hold on
        plotLabels{j} = ['Im \epsilon_{\perp} kai, d_R = ' num2str(d_R/(10^-9)), ' nm'];
    end
    if j == 1%Braizomas regimosios sviesos intervalas
        data = imag(e_R_statRE);
        Intervalas_f(data)
    end
    d_R = d_R+d_R_step;
end

grid on
xlim([f_low f_high]);
xlabel('Dažnis, Hz');
legend(plotHandles, plotLabels);
ylabel('\epsilon_{\perp}', 'Rotation', 0);
ylim([0 max(imag(e_R_statRE))+3]);
title('Kairė pusė \epsilon_{\perp}');
%-----[Im dielektrine skv statmena kryptimi R end]-----
subplot(4,1,3)
%-----[Re dielektrine skv lyg kryptimi R start]-----

d_R = d_R-(d_R_step*jmax);% Resetiname d
for j = 1:1:jmax
    colorVec = hsv(jmax);%Spalvu vektorius (Skaicius turi sutapti su h)

    ro_L = (pi*d_L^2)/(2*sqrt(3)*S^2);%kaires puses
    ro_R = (pi*d_R^2)/(2*sqrt(3)*S^2);%desines puses

    e_R_lygRE = RE_l*ro_R+e_R_d*(1-ro_R);

    if (fix(jmax/2)+1)-j == 0%Išcentruojame grafika
        x0_pos = find(-abs(real(e_R_lygRE)) < -3);
        f_center = f(x0_pos);
        val = numel(x0_pos);%Suskaiciuoja kiek elementu kurie tenkina x0_pos salyga

        if val > 1 %jeigu elementu daugiau negu 1
            [x0_max] = max(x0_pos,[1,2]);%randame didziausia
            [x0_min] = min(x0_pos,[1,2]);%randame maziausia
            f_center = (f(x0_max)+f(x0_min))/2;%randame tarpine verte
        end

        Delta = 120;%Kuo skaicius artimesnis 0 tuo mažiau matosi
        f_low = (f_center/100)*(100-Delta);
        f_high = (f_center/100)*(100+Delta);
        %plot(f_center,0,'or')%Patikrinti grafiko centrui
    end

    if 1%Atnaujina legenda
        plotHandles(j) = plot(f,e_R_lygRE);
        hold on
        plotLabels{j} = ['Re \epsilon_{\mid} kai, d_R = ' num2str(d_R/(10^-9)), ' nm'];
    end

    if j == 1%Braizomas regimosios sviesos intervalas
        data = e_R_lygRE;
        Intervalas_ev(data)
    end
    d_R = d_R+d_R_step;
end

grid on
xlim([0 f_high]);
xlabel('Dažnis, Hz');
legend(plotHandles, plotLabels);
ylabel('\epsilon_{\perp}', 'Rotation', 0);
ylim([-200 (max(real(e_R_lygRE))+10)]);
title('Dešinė pusė \epsilon_{\mid}');
%-----[Re dielektrine skv lyg kryptimi R end]-----
subplot(4,1,4)
%-----[Im dielektrine skv lyg kryptimi R start]-----
d_R = d_R-(d_R_step*jmax);% Resetiname d
for j = 1:1:jmax
    colorVec = hsv(jmax);%Spalvu vektorius (Skaicius turi sutapti su h)

    ro_L = (pi*d_L^2)/(2*sqrt(3)*S^2);%kaires puses
    ro_R = (pi*d_R^2)/(2*sqrt(3)*S^2);%desines puses

    e_R_lygRE = RE_l*ro_R+e_R_d*(1-ro_R);
    e_R_lygIM = imag(e_R_lygRE);

    if (fix(jmax/2)+1)-j == 0%Išcentruojame grafika
        x0_pos = find(abs(real(imag(e_R_lygRE))) > 10);
        f_center = f(x0_pos);
        val = numel(x0_pos);%Suskaiciuoja kiek elementu kurie tenkina x0_pos salyga

        if val > 1 %jeigu elementu daugiau negu 1
            [x0_max] = max(x0_pos,[1,2]);%randame didziausia
            [x0_min] = min(x0_pos,[1,2]);%randame maziausia
            f_center = (f(x0_max)+f(x0_min))/2;%randame tarpine verte
        end

        Delta = 90;%Kuo skaicius artimesnis 0 tuo mažiau matosi
        f_low = (f_center/100)*(100-Delta);
        f_high = (f_center/100)*(100+Delta);
        %plot(f_center,0,'or')%Patikrinti grafiko centrui
    end

    if 1%Atnaujina legenda
        plotHandles(j) = plot(f,e_R_lygIM);
        hold on
        plotLabels{j} = ['Im \epsilon_{\mid} kai, d_R = ' num2str(d_R/(10^-9)), ' nm'];
    end
    if j == 1%Braizomas regimosios sviesos intervalas
        data = e_R_lygIM;
        Intervalas_ev(data)
    end
    d_R = d_R+d_R_step;
end

grid on
xlim([f_low f_high]);
xlabel('Dažnis, Hz');
legend(plotHandles, plotLabels);
ylabel('\epsilon_{\perp}', 'Rotation', 0);
title('Dešinė pusė \epsilon_{\mid}');
%-----[Im dielektrine skv lyg kryptimi R end]-----
disp('<Enter> pratesimui....');
pause;
close all;

```

```

%-----[Re Beta (7) start]----->
subplot(1,3,1)
d_R = d_R-(d_R_step*jmax);% Resetiname d
for j = 1:l:jmax
colorVec = hsv(jmax);%Spalvu vektorius (Skaicius turi sutapti su h)

ro_L = ((pi*d_L^2)/(2*sqrt(3)*S^2));%kaires puses
ro_R = ((pi*d_R^2)/(2*sqrt(3)*S^2));%desines puses

e_R_lygRE = RE_l*ro_R+e_R_d*(1-ro_R);
e_L_lygRE = RE_r*ro_L+e_L_d*(1-ro_L);

e_R_statRE = e_R_d*((RE_l*(1+ro_R)+e_R_d*(1-ro_R))./(RE_l*(1-ro_R)+e_R_d*(1+ro_R)));
e_L_statRE = e_L_d*((RE_r*(1+ro_L)+e_L_d*(1-ro_L))./(RE_r*(1-ro_L)+e_L_d*(1+ro_L)));

BetaRE7 = k.*sqrt(((e_R_lygRE-e_L_lygRE).*e_R_statRE.*e_L_statRE)./(e_R_statRE.*e_R_lygRE-e_L_statRE.*e_L_lygRE));

if 1%Atnaujina legenda
    plotHandles(j) = plot(BetaRE7,f);
    hold on
    plotLabels(j) = ['Re \beta kai, d_R = ' num2str(d_R/(10^9)), ' nm'];
end
if j == 1
    data = BetaRE7;
    Intervalas_fh(data)
end
d_R = d_R+d_R_step;
end
plot(Light_Line,f,'--')
hold on

x1 = [0, max(BetaRE7)];
y1 = [horizontal horizontal];
line(x1,y1,'Color','k','LineStyle',':', 'LineWidth', 1.5)

grid on
xlim([0, 2*10^8]);
ylabel('Dažnis, Hz');
ylim([0 horizontal*1.1]);
title('\beta (Re), m^{-1}');
xlabel('\beta, m^{-1}','Rotation',0);
legend(plotHandles, plotLabels, 'Location', 'Best');
%-----[Re Beta (7) end]----->
subplot(1,3,2)
%-----[Im Beta (7) start]----->
d_R = d_R-(d_R_step*jmax);% Resetiname d
for j = 1:l:jmax
colorVec = hsv(jmax);%Spalvu vektorius (Skaicius turi sutapti su h)

ro_L = ((pi*d_L^2)/(2*sqrt(3)*S^2));%kaires puses
ro_R = ((pi*d_R^2)/(2*sqrt(3)*S^2));%desines puses

e_R_lygRE = RE_l*ro_R+e_R_d*(1-ro_R);
e_L_lygRE = RE_r*ro_L+e_L_d*(1-ro_L);

e_R_statRE = e_R_d*((RE_l*(1+ro_R)+e_R_d*(1-ro_R))./(RE_l*(1-ro_R)+e_R_d*(1+ro_R)));
e_L_statRE = e_L_d*((RE_r*(1+ro_L)+e_L_d*(1-ro_L))./(RE_r*(1-ro_L)+e_L_d*(1+ro_L)));

BetaRE7 = k.*sqrt(((e_R_lygRE-e_L_lygRE).*e_R_statRE.*e_L_statRE)./(e_R_statRE.*e_R_lygRE-e_L_statRE.*e_L_lygRE));
BetaIM7 = imag(BetaRE7);

if (fix(jmax/2)+1)-j == 0%Išcentruojame grafiką
    [ymax,idx] = max(imag(BetaRE7),[],2);
    f_center = f(idx);
    Delta = 100;%Kuo skaicius artimesnis 0 tuo mažiau matosi
    f_low = (f_center/100)*(100-Delta);
    f_high = (f_center/100)*(100+Delta);
    %plot(f(idx),ymax,'or');%Patikrinti grafiko centrui
end
if 1%Atnaujina legenda
    plotHandles(j) = plot(BetaIM7,f);
    hold on
    plotLabels(j) = ['Im \beta kai, d_R = ' num2str(d_R/(10^9)), ' nm'];
end

if j == 1
    data = BetaIM7;
    Intervalas_fh(data)
end
d_R = d_R+d_R_step;
end
hold on
y1 = [horizontal horizontal];
x1 = [0, max(BetaIM7)];
line(x1,y1,'Color','k','LineStyle',':', 'LineWidth', 1.5)

grid on
ylabel('Dažnis, Hz');
ylim([0 horizontal*1.1]);
xlim([0, 3*10^8]);
title('\beta (Im), m^{-1}');
xlabel('\beta, m^{-1}','Rotation',0);
legend(plotHandles, plotLabels, 'Location', 'Best');
%-----[Im Beta (7) end]----->
subplot(1,3,3)
%-----[Vektorius lygiagrečia kryptimi sandurai(?) start]----->
d_R = d_R-(d_R_step*jmax);% Resetiname d
for j = 1:l:jmax
colorVec = hsv(jmax);%Spalvu vektorius (Skaicius turi sutapti su h)

ro_L = ((pi*d_L^2)/(2*sqrt(3)*S^2));%kaires puses
ro_R = ((pi*d_R^2)/(2*sqrt(3)*S^2));%desines puses

e_R_lygRE = RE_l*ro_R+e_R_d*(1-ro_R);
e_L_lygRE = RE_r*ro_L+e_L_d*(1-ro_L);

e_R_statRE = e_R_d*((RE_l*(1+ro_R)+e_R_d*(1-ro_R))./(RE_l*(1-ro_R)+e_R_d*(1+ro_R)));
e_L_statRE = e_L_d*((RE_r*(1+ro_L)+e_L_d*(1-ro_L))./(RE_r*(1-ro_L)+e_L_d*(1+ro_L)));

BetaRE7 = k.*sqrt(((e_R_lygRE-e_L_lygRE).*e_R_statRE.*e_L_statRE)./(e_R_statRE.*e_R_lygRE-e_L_statRE.*e_L_lygRE));
BetaIM7 = imag(BetaRE7);

bil = c./f;%Banga m
lp = (1./(2*BetaIM7))./bil;

if (fix(jmax/2)+1)-j == 0%Išcentruojame grafiką
    x0_pos = find(abs(lp) < 50);
    f_center = f(x0_pos);
    val = numel(x0_pos);%Suskaiciuoja kiek elementu kurie tenkina x0_pos salyga

if val > 1 %jeigu elementu daugiau negu 1
    [x0_max] = max(x0_pos,[],2);%randame didžiausia
    [x0_min] = min(x0_pos,[],2);%randame mažiausia
    f_center = (f(x0_max)+f(x0_min))/2;%randame tarpine verte
end

Delta = 82;%Kuo skaicius artimesnis 0 tuo mažiau matosi
f_low = (f_center/100)*(100-Delta);

```

```

        f_high = (f_center/100)*(100+Delta);
        %plot(f_center,0,'or')%Patikrinti grafiko centrui
    end

    if 1%Atnaujina legenda
        plotHandles(j) = plot(Lp,f);
        hold on
        plotLabels(j) = ['Lp kai, kai, d_R = ' num2str(d_R/(10^-9)), ' nm'];
    end
    if j == 1
        data = Lp;
        Intervalas_fh(data)
    end
    d_R = d_R+d_R_step;
end

x1 = [0, max(BetaRE7)];
y1 = [horizontal horizontal];
line(x1,y1,'Color','k','LineStyle',':', 'LineWidth', 1.5)

grid on
title('Lp');
xlim([0, 5]);
ylabel('Dažnis, Hz');
ylim([0 horizontal*1.1]);
xlabel('Lp/\lambda','Rotation',0);
legend(plotHandles, plotLabels,'Location', 'Best');
%-----[Vektorius lygiagrečia kryptimi sandurai?] end]-----
disp('Pabaiga....');
pause;
close all;

```

F priedas. Programinis kodas, naudotas tiriant paviršinės bangos sklidimą dviejų nanostruktūrinių metamedžiagų sandūroje

```

clc
clear all
%-----[Kintamieji start]-----
c = 299792458;% Sviesos greitis m/s
h = 4.135*10^-15; %eV Planko konstanta

e_inf3 = 5;%Sidabras
Wp3 = 2.2971*10^15;%9.5 eV Sidabras
delta3 = 2.3866*10^13;%0.0987 eV Sidabras

e_inf1 = 1;%Kita medžiaga
Wp1 = 3.7967*10^15;%Kita medžiaga
deltal = 1.682*10^14;%Kita medžiaga

d1 = 11*10^-9;%1sl Šešiakampės struktūros storis[nm]
d2 = 8*10^-9;%Dielektriko 2 sluoksnio storis [nm]
d3 = 11*10^-9;%3sl Šešiakampės struktūros storis[nm]
d4 = 9*10^-9;%Dielektriko 4 sluoksnio storis [nm]

d1l = 7*10^-9;%1sl nanolaidininko skersmuo[nm]
d3l = 5*10^-9;%3sl nanolaidininko skersmuo[nm]

emd1 = 4.7;%dialektrikas 1 metamedžiagos sluoksnyje
e2 = 11.68;%dialektrikas 2 sluoksnyje
emd3 = 11.68;%dialektrikas 3 meamedžiagos sluoksnyje
e4 = 4.7;%dialektrikas 4 sluoksnyje

%Stiklas 4.7
%Silicis 11.68

sr1 = 75*10^-9;%1sl metamedžiagos sienelės ilgis[nm]
sr3 = 65*10^-9;%3sl metamedžiagos sienelės ilgis[nm]

S1 = 64.9525*10^-9;%1sl metamedžiagos lastelės matmenys[nm]
S3 = 56.2922*10^-9;%3sl metamedžiagos lastelės matmenys[nm]

alfa_1 = 20;%kampas laipsniais
alfa1 = alfa_1/57.2957795;%kampas Radianais

alfa_3 = 60;%kampas laipsniais
alfa3 = alfa_3/57.2957795;%kampas Radianais
alfa1_step = 20;%žingsnis kuriuo didinamas 1sl laidininko skersmuo
jmax = 3;

f_start = 10^8;%Hz
f_end = 10^17;%Hz

j = 0;%skaitikliui nunulinti

spacing = ((f_end)-(f_start))/99999; %Hz
f = f_start+spacing*f_end;
k = (2*pi*f)/c;

Light_Line = (2*pi*f)/c*(emd1)^0.5;
horizontal = (Wp1/(1+emd1)^0.5);

eV = h.*f;%Banga eV

%-----[Kintamieji end]-----

%-----[1sl nanolaidinės medžiafos Drude modelis Start]-----
subplot(2,2,1)
RE1 = e_inf1-(Wp1^2)./(f.^2+li*deltal*f);
IM1 = imag(e_inf1-(Wp1^2)./(f.^2+li*deltal*f));

plot(RE1,eV,'k');
hold on
plot(IM1,eV,'g');
data = RE1;
Intervalas_evh(data)

grid on
xlim([-10 10]);
ylim([0.15 10]);
legend('Re','Im')
ylabel('Dažnis, eV');
set(gca,'Xdir','reverse')
title('1sl nanolaidininkas');
xlabel('\epsilon', 'Rotation', 0);

subplot(2,2,2)
Ev_1sl = [0.64008 0.77009 0.89005 1.1396 1.51 1.7599 2.1299 2.26 2.6301 2.88 3.2499 3.5004 3.62 3.7401 3.8697 3.9905 4.1204 4.2402 4.3595 4.6108 4.8602 5.2292
5.6 5.8511 6.0986 6.4710 6.5984];%Sidabras
n_1sl = [0.24 0.15 0.13 0.04 0.04 0.04 0.05 0.06 0.05 0.04 0.05 0.1 0.14 0.17 0.81 1.13 1.34 1.39 1.41 1.38 1.33 1.28 1.25 1.2 1.15 1.1 1.07];%Sidabras

%Ev_1sl = [0.005 0.038540 0.12907 0.51069 0.60333 1.7831 1.9381 2.8203 3.6216 4.1039 4.8484 5.7281 6.2260 6.7673];%Aluminis
%n_1sl = [473.49 99.098 21.153 2.9346 2.2349 1.6203 1.2952 0.58336 0.32634 0.25107 0.1821 0.13398 0.11461 0.097571];%Aluminis

plot(RE1.^0.5,eV,'k','LineWidth', 0.8)
hold on
plot(n_1sl,Ev_1sl,'r');%nm
data = RE1;
Intervalas_evh(data)

grid on
xlim([0 6]);
ylim([0.15 10]);
ylabel('Dažnis, eV');
xlabel('n', 'Rotation', 0);
set(gca,'Xdir','reverse')
title('1sl nanolaidininkas');
legend('n = \surd(epsilon)', 'Eksperimentiškai', 'Location', 'northwest')
%-----[1sl nanolaidinės medžiafos Drude modelis End]-----

%-----[3sl nanolaidinės medžiafos Drude modelis Start]-----
subplot(2,2,3)
RE3 = e_inf3-(Wp3^2)./(f.^2+li*delta3*f);
IM3 = imag(e_inf3-(Wp3^2)./(f.^2+li*delta3*f));

plot(RE3,eV,'k');
hold on
plot(IM3,eV,'g');
data = RE3;
Intervalas_evh(data)

grid on
xlim([-10 10]);
ylim([0.15 10]);

```

```

legend('Re','Im')
ylabel('Dažnis, eV');
set(gca,'Xdir','reverse')
title('3s1 nanolaidininkas');
xlabel('\epsilon','Rotation',0);

subplot(2,2,4)
%Ev_3s1 = [0.64008 0.77009 0.89005 1.1396 1.51 1.7599 2.1299 2.26 2.6301 2.88 3.2499 3.5004 3.62 3.7401 3.8697 3.9905 4.1204 4.2402 4.3595 4.6108 4.8602 5.2292
5.6 5.8511 6.0986 6.4710 6.5984];%Sidabras
%n_3s1 = [0.24 0.15 0.13 0.04 0.04 0.04 0.05 0.06 0.05 0.04 0.05 0.1 0.14 0.17 0.81 1.13 1.34 1.39 1.41 1.38 1.33 1.28 1.25 1.2 1.15 1.1 1.07];%Sidabras

Ev_3s1 = [0.005 0.038540 0.12907 0.51069 0.60333 1.7831 1.9381 2.8203 3.6216 4.1039 4.8484 5.7281 6.2260 6.7673];%Aluminis
n_3s1 = [473.49 99.098 21.153 2.9346 2.2349 1.6203 1.2952 0.58336 0.32634 0.25107 0.1821 0.13398 0.11461 0.097571];%Aluminis

plot(RE3.^0.5,eV,'k','LineWidth', 0.8)
hold on
plot(n_3s1,Ev_3s1,'r');%nm
data = RE3;
Intervalas_evh(data)

grid on
xlim([0 6]);
ylim([0.15 10]);
ylabel('Dažnis, eV');
xlabel('n','Rotation',0);
set(gca,'Xdir','reverse')
title('3s1 nanolaidininkas');
legend('n = \surd\epsilon','Eksperimentiškaiki','Location','northwest')
%-----[3s1 nanolaidines medziafos Drude modelis End]-----

disp('<Enter> pratesimui....');
pause;
close all;

subplot(4,1,1)
%-----[Re e_l_lyg start]-----

for j = 1:1:jmax
colorVec = hsv(jmax);%Spalvu vektorius (Skaicius turi sutapti su j)
alfal = alfa_1/57.2957795;%kampas Radianais

htl = sqrt(2*S1^2+((srl^2)/2)-2*(S1^2+((srl^2)/4))*cos(alfal))*sin(atan((2*S1)/srl)-alfal/2);
rol = (pi*d1l^2)/(2*S1*(htl+srl));
el_lyg = RE1*rol+emd1*(1-rol);
e_l_lyg = (el_lyg*d1+e2*d2)./(d1+d2);

if 1%Atnaujina legenda
plotHandles(j) = plot(f,e_l_lyg);
hold on
plotLabels(j) = {'Re \epsilon_{||}^1 kai, \alpha = ' num2str(alfa_1),'\circ'};
end

if (fix(jmax/2)+1)-j == 0%Išcentruojame grafiką
x0_pos = find(abs(real(e_l_lyg)) > 0.1);
f_center = f(x0_pos);
val = numel(x0_pos);%Suskaiciuoja kiek elementu kurie tenkina x0_pos salyga

if val > 1 %jeigu elementu daugiau negu 1
[x0_max] = max(x0_pos,[],2);%randame didziausia
[x0_min] = min(x0_pos,[],2);%randame maziausia
f_center = (f(x0_max)+f(x0_min))/2;%randame tarpine verte
end

Delta = 90;%Kuo skaicius artimesnis 0 tuo mažiau matosi
f_low = (f_center/100)*(100-Delta);
f_high = (f_center/100)*(100+Delta);
%plot(W_center,0,'or')%Patikrinti grafiko centrui
end

alfa_1 = alfa_1+alfal_step;
end

grid on
xlabel('Dažnis, Hz');
xlim([f_low f_high]);
title('\epsilon_{||}^1');
ylabel('\epsilon','Rotation',0);
legend(plotHandles, plotLabels);
%-----[Re e_l_lyg end]-----

subplot(4,1,2)
%-----[Im e_l_lyg start]-----
alfa_1 = alfa_1-(alfal_step*jmax);% Resetiname alfa 1
for j = 1:1:jmax
colorVec = hsv(jmax);%Spalvu vektorius (Skaicius turi sutapti su j)
alfal = alfa_1/57.2957795;%kampas Radianais

htl = sqrt(2*S1^2+((srl^2)/2)-2*(S1^2+((srl^2)/4))*cos(alfal))*sin(atan((2*S1)/srl)-alfal/2);
rol = (pi*d1l^2)/(2*S1*(htl+srl));
el_lyg = RE1*rol+emd1*(1-rol);

e_l_lyg = (el_lyg*d1+e2*d2)./(d1+d2);

if 1%Atnaujina legenda
plotHandles(j) = plot(f,imag(e_l_lyg));
hold on
plotLabels(j) = {'Im \epsilon_{||}^1 kai, \alpha = ' num2str(alfa_1),'\circ'};
end

if (fix(jmax/2)+1)-j == 0%Išcentruojame grafiką
x0_pos = find(abs(real(e_l_lyg)) > 0.1);
f_center = f(x0_pos);
val = numel(x0_pos);%Suskaiciuoja kiek elementu kurie tenkina x0_pos salyga

if val > 1 %jeigu elementu daugiau negu 1
[x0_max] = max(x0_pos,[],2);%randame didziausia
[x0_min] = min(x0_pos,[],2);%randame maziausia
f_center = (f(x0_max)+f(x0_min))/2;%randame tarpine verte
end

Delta = 80;%Kuo skaicius artimesnis 0 tuo mažiau matosi
f_low = (f_center/100)*(100-Delta);
f_high = (f_center/100)*(100+Delta);
%plot(W_center,0,'or')%Patikrinti grafiko centrui
end

alfa_1 = alfa_1+alfal_step;
end

grid on
xlabel('Dažnis, Hz');
xlim([f_low f_high]);
title('\epsilon_{||}^1');
ylabel('\epsilon','Rotation',0);
legend(plotHandles, plotLabels);
%-----[Im e_l_lyg end]-----
subplot(4,1,3)
%-----[Re e_l_stat start]-----

```

```

alfa_1 = alfa_1-(alfal_step*jmax);% Resetiname alfa 1
for j = 1:1:jmax
    colorVec = hsv(jmax);%Spalvu vektorius (Skaicius turi sutapti su j)
    alfa1 = alfa_1/57.2957795;%kampus Radianais

    ht1 = sqrt(2*S1^2+((sr1^2)/2)-2*(S1^2+((sr1^2)/4))*cos(alfa1))*sin(atan((2*S1)/sr1)-alfa1/2);
    ro1 = (pi*d11^2)/(2*S1*(ht1+sr1));

    e1_Stat = emd1.*((RE1.*(1+ro1)+emd1.*(1-ro1))./(RE1.*(1-ro1)+emd1.*(1+ro1)));
    e_1_stat = (e1_Stat.*e2.*(d1+d2))./(e1_Stat.*d2+e2.*d1);

    if 1%Atnaujina legenda
        plotHandles(j) = plot(f,e_1_stat);
        hold on
        plotLabels{j} = ['Re \epsilon_{\perp}^1 kai, \alpha = ' num2str(alfa_1),'\circ'];
    end

    if (fix(jmax/2)+1)-j == 0%Išcentruojame grafika
        [ymax,idx] = max(e_1_stat,[],2);
        f_center = f(idx);
        Delta = 45;%Kuo skaicius artimesnis 0 tuo mažiau matosi
        f_low = (f_center/100)*(100-Delta);
        f_high = (f_center/100)*(100+Delta);
        %plot(W(idx),ymax,'or');%Patikrinti grafiko centrui
    end

    alfa_1 = alfa_1+alfal_step;
end

grid on
xlim([f_low f_high]);
xlabel('Dažnis, #z');
title('\epsilon_{\perp}^1');
ylabel('\epsilon_{\perp}', 'Rotation',0);
legend(plotHandles, plotLabels);
%-----[Re e_1_stat end]-----
subplot(4,1,4)
%-----[Im e_1_stat start]-----

alfa_1 = alfa_1-(alfal_step*jmax);% Resetiname alfa 1
for j = 1:1:jmax
    colorVec = hsv(jmax);%Spalvu vektorius (Skaicius turi sutapti su j)
    alfa1 = alfa_1/57.2957795;%kampus Radianais

    ht1 = sqrt(2*S1^2+((sr1^2)/2)-2*(S1^2+((sr1^2)/4))*cos(alfa1))*sin(atan((2*S1)/sr1)-alfa1/2);
    ro1 = (pi*d11^2)/(2*S1*(ht1+sr1));

    e1_Stat = emd1.*((RE1.*(1+ro1)+emd1.*(1-ro1))./(RE1.*(1-ro1)+emd1.*(1+ro1)));
    e_1_stat = (e1_Stat.*e2.*(d1+d2))./(e1_Stat.*d2+e2.*d1);

    if 1%Atnaujina legenda
        plotHandles(j) = plot(f,imag(e_1_stat));
        hold on
        plotLabels{j} = ['Re \epsilon_{\perp}^1 kai, \alpha = ' num2str(alfa_1),'\circ'];
    end

    if (fix(jmax/2)+1)-j == 0%Išcentruojame grafika
        [ymax,idx] = max(real(imag(e_1_stat)),[],2);
        f_center = f(idx);
        Delta = 30;%Kuo skaicius artimesnis 0 tuo mažiau matosi
        f_low = (f_center/100)*(100-Delta);
        f_high = (f_center/100)*(100+Delta);
        %plot(W(idx),ymax,'or');%Patikrinti grafiko centrui
    end

    alfa_1 = alfa_1+alfal_step;
end

grid on
xlim([f_low f_high]);
xlabel('Dažnis, #z');
title('\epsilon_{\perp}^1');
ylabel('\epsilon_{\perp}', 'Rotation',0);
legend(plotHandles, plotLabels);
%-----[Im e_1_stat end]-----

disp('<Enter> pratesimui....');
pause;
close all;

subplot(4,1,1)
%-----[Re e_2_lyg start]-----
alfa_1 = alfa_1-(alfal_step*jmax);% Resetiname alfa 1
for j = 1:1:jmax
    colorVec = hsv(jmax);%Spalvu vektorius (Skaicius turi sutapti su j)
    alfa1 = alfa_1/57.2957795;%kampus Radianais

    ht3 = sqrt(2*S3^2+((sr3^2)/2)-2*(S3^2+((sr3^2)/4))*cos(alfa3))*sin(atan((2*S3)/sr3)-alfa3/2);
    ro3 = (pi*d33^2)/(2*S3*(ht3+sr3));
    e3_Lyg = RE3*ro3+emd3*(1-ro3);
    e_3_lyg = (e3_Lyg.*d3+e4.*d4)./(d3+d4);

    if 1%Atnaujina legenda
        plotHandles(j) = plot(f,e_3_lyg);
        hold on
        plotLabels{j} = ['Re \epsilon_{||}^2 kai, \alpha = ' num2str(alfa_1),'\circ'];
    end

    if (fix(jmax/2)+1)-j == 0%Išcentruojame grafika
        x0_pos = find(abs(real(e_3_lyg)) > 0.2);
        f_center = f(x0_pos);
        val = numel(x0_pos);%Suskaiciuoja kiek elementu kurie tenkina x0_pos salyga

        if val > 1 %jeigu elementu daugiau negu 1
            [x0_max] = max(x0_pos,[],2);%randame didziausia
            [x0_min] = min(x0_pos,[],2);%randame maziausia
            f_center = (f(x0_max)+f(x0_min))/2;%randame tarpine verte
        end

        Delta = 90;%Kuo skaicius artimesnis 0 tuo mažiau matosi
        f_low = (f_center/100)*(100-Delta);
        f_high = (f_center/100)*(100+Delta);
        %plot(W_center,0,'or')%Patikrinti grafiko centrui
    end

    alfa_1 = alfa_1+alfal_step;
end

grid on
xlim([f_low f_high]);
xlabel('Dažnis, #z');
title('\epsilon_{||}^2');
ylabel('\epsilon_{||}', 'Rotation',0);
legend(plotHandles, plotLabels);
%-----[Re e_2_lyg end]-----
subplot(4,1,2)
%-----[Im e_2_lyg start]-----

```

```

alfa_1 = alfa_1-(alfa_step*jmax);% Resetiname alfa 1
for j = 1:1:jmax
    colorVec = hsv(jmax);%Spalvu vektorius (Skaicius turi sutapti su j)
    alfa1 = alfa_1/57.2957795;%kampas Radianais

ht3 = sqrt(2*S3^2+((sr3^2)/2)-2*(S3^2+((sr3^2)/4))*cos(alfa3))*sin(atan((2*S3)/sr3)-alfa3/2);
ro3 = (pi*d33^2)/(2*S3*(ht3+sr3));
e3_Lyg = RE3*ro3+emd3*(1-ro3);
e_3_lyg = (e3_Lyg.*d3+e4.*d4)./(d3+d4);

    if 1%Atnaujina legenda
        plotHandles(j) = plot(f,imag(e_3_lyg));
        hold on
        plotLabels(j) = ['Im \epsilon_{||}^2 kai, \alpha = ' num2str(alfa_1),' \circ'];
    end

    if (fix(jmax/2)+1)-j == 0%Išcentruojame grafiką
        x0_pos = find(abs(real(imag(e_3_lyg))) > 0.5);
        f_center = f(x0_pos);
        val = numel(x0_pos);%Suskaičiuoja kiek elementu kurie tenkina x0_pos salyga

        if val > 1 %jeigu elementu daugiau negu 1
            [x0_max] = max(x0_pos,[],2);%randame didžiausia
            [x0_min] = min(x0_pos,[],2);%randame mažiausia
            f_center = (f(x0_max)+f(x0_min))/2;%randame tarpine verte
        end

        Delta =80;%Kuo skaicius artimesnis 0 tuo mažiau matosi
        f_low = (f_center/100)*(100-Delta);
        f_high = (f_center/100)*(100+Delta);
        %plot(W_center,0,'or')%Patikrinti grafiko centrui
    end

alfa_1 = alfa_1+alfa_step;
end

grid on
xlim([f_low f_high]);
xlabel('Dažnis, Hz');
title('\epsilon_{||}^2');
ylabel('\epsilon_{||}', 'Rotation',0);
legend(plotHandles, plotLabels);
%-----[Re e_2_lyg end]-----
subplot(4,1,3)
%-----[Re e_2_stat start]-----
alfa_1 = alfa_1-(alfa_step*jmax);% Resetiname alfa 1
for j = 1:1:jmax
    colorVec = hsv(jmax);%Spalvu vektorius (Skaicius turi sutapti su j)
    alfa1 = alfa_1/57.2957795;%kampas Radianais

ht3 = sqrt(2*S3^2+((sr3^2)/2)-2*(S3^2+((sr3^2)/4))*cos(alfa3))*sin(atan((2*S3)/sr3)-alfa3/2);
ro3 = (pi*d33^2)/(2*S3*(ht3+sr3));

e3_Stat = emd3.*((RE3.*(1+ro3)+emd3.*(1-ro3))./(RE3.*(1-ro3)+emd3.*(1+ro3)));
e_3_stat = (e3_Stat.*e4.*(d3+d4))./(e3_Stat.*d4+e4.*d3);

    if 1%Atnaujina legenda
        plotHandles(j) = plot(f,e_3_stat);
        hold on
        plotLabels(j) = ['Re \epsilon_{\perp}^2 kai, \alpha = ' num2str(alfa_1),' \circ'];
    end

    if (fix(jmax/2)+1)-j == 0%Išcentruojame grafiką
        [ymax,idx] = max(real(e_3_stat),[],2);
        f_center = f(idx);
        Delta = 45;%Kuo skaicius artimesnis 0 tuo mažiau matosi
        f_low = (f_center/100)*(100-Delta);
        f_high = (f_center/100)*(100+Delta);
        %plot(W(idx),ymax,'or')%Patikrinti grafiko centrui
    end

alfa_1 = alfa_1+alfa_step;
end

grid on
xlim([f_low f_high]);
xlabel('Dažnis, Hz');
title('\epsilon_{\perp}^2');
ylabel('\epsilon_{\perp}', 'Rotation',0);
legend(plotHandles, plotLabels);
%-----[Re e_2_stat end]-----
subplot(4,1,4)
%-----[Im e_2_stat start]-----
alfa_1 = alfa_1-(alfa_step*jmax);% Resetiname alfa 1
for j = 1:1:jmax
    colorVec = hsv(jmax);%Spalvu vektorius (Skaicius turi sutapti su j)
    alfa1 = alfa_1/57.2957795;%kampas Radianais

ht3 = sqrt(2*S3^2+((sr3^2)/2)-2*(S3^2+((sr3^2)/4))*cos(alfa3))*sin(atan((2*S3)/sr3)-alfa3/2);
ro3 = (pi*d33^2)/(2*S3*(ht3+sr3));

e3_Stat = emd3.*((RE3.*(1+ro3)+emd3.*(1-ro3))./(RE3.*(1-ro3)+emd3.*(1+ro3)));
e_3_stat = (e3_Stat.*e4.*(d3+d4))./(e3_Stat.*d4+e4.*d3);

    if 1%Atnaujina legenda
        plotHandles(j) = plot(f,imag(e_3_stat));
        hold on
        plotLabels(j) = ['Im \epsilon_{\perp}^2 kai, \alpha = ' num2str(alfa_1),' \circ'];
    end

    if (fix(jmax/2)+1)-j == 0%Išcentruojame grafiką
        [ymax,idx] = max(real(imag(e_3_stat)),[],2);
        f_center = f(idx);
        Delta = 30;%Kuo skaicius artimesnis 0 tuo mažiau matosi
        f_low = (f_center/100)*(100-Delta);
        f_high = (f_center/100)*(100+Delta);
        %plot(W(idx),ymax,'or')%Patikrinti grafiko centrui
    end

alfa_1 = alfa_1+alfa_step;
end

grid on
xlim([f_low f_high]);
xlabel('Dažnis, Hz');
title('\epsilon_{\perp}^2');
ylabel('\epsilon_{\perp}', 'Rotation',0);
legend(plotHandles, plotLabels);
%-----[Im e_2_stat end]-----
disp('<Enter> pratesimui....');
pause;
close all;
%-----[Re Beta start]-----
subplot(1,3,1)
alfa_1 = alfa_1-(alfa_step*jmax);% Resetiname alfa 1
for j = 1:1:jmax
    colorVec = hsv(jmax);%Spalvu vektorius (Skaicius turi sutapti su j)
    alfa1 = alfa_1/57.2957795;%kampas Radianais

```

```

ht3 = sqrt(2*S3^2+((sr3^2)/2)-2*(S3^2+((sr3^2)/4))*cos(alfa3))*sin(atan((2*S3)/sr3)-alfa3/2);
ro3 = (pi*d33^2)/(2*S3*(ht3+sr3));
e3_Lyg = RE3*ro3+emd3*(1-ro3);
e_3_lyg = (e3_Lyg.*d3+e4.*d4)./(d3+d4);

ht1 = sqrt(2*S1^2+((sr1^2)/2)-2*(S1^2+((sr1^2)/4))*cos(alfa1))*sin(atan((2*S1)/sr1)-alfa1/2);
ro1 = (pi*d11^2)/(2*S1*(ht1+sr1));
e1_Lyg = RE1*ro1+emd1*(1-ro1);
e_1_lyg = (e1_Lyg*d1+e2*d2)./(d1+d2);

ht3 = sqrt(2*S3^2+((sr3^2)/2)-2*(S3^2+((sr3^2)/4))*cos(alfa3))*sin(atan((2*S3)/sr3)-alfa3/2);
ro3 = (pi*d33^2)/(2*S3*(ht3+sr3));
e3_Stat = emd3.*((RE3.*(1+ro3)+emd3.*(1-ro3))./(RE3.*(1-ro3)+emd3.*(1+ro3)));
e_3_stat = (e3_Stat.*e4.*(d3+d4))./(e3_Stat.*d4+e4.*d3);

ht1 = sqrt(2*S1^2+((sr1^2)/2)-2*(S1^2+((sr1^2)/4))*cos(alfa1))*sin(atan((2*S1)/sr1)-alfa1/2);
ro1 = (pi*d11^2)/(2*S1*(ht1+sr1));
e1_Stat = emd1.*((RE1.*(1+ro1)+emd1.*(1-ro1))./(RE1.*(1-ro1)+emd1.*(1+ro1)));
e_1_stat = (e1_Stat.*e2.*(d1+d2))./(e1_Stat.*d2+e2.*d1);

Beta = k.*(((e_3_lyg-e_1_lyg).*e_3_stat.*e_1_stat)./(e_3_stat.*e_3_lyg-e_1_stat.*e_1_lyg)).^0.5;

if l%Atnaujina legenda
    plotHandles(j) = plot(Beta,f);
    hold on
    plotLabels{j} = ['Re \beta kai, \alpha = ' num2str(alfa_1),'\circ'];
end

if (fix(jmax/2)+1)-j == 0%Išcentruojame grafiką
    [ymax,idx] = max(real(Beta),[],2);
    f_center = f(idx);
    Delta = 70;%Kuo skaičius artimesnis 0 tuo mažiau matosi
    f_low = (f_center/100)*(100-Delta);
    f_high = (f_center/100)*(100+Delta);
    %plot(W(idx),ymax,'or');%Patikrinti grafiko centrui
end

if j == 1
    data = Beta;
    Intervalas_fh(data)
end

alfa_1 = alfa_1+alfal_step;
end

plot(Light_Line,f,'--')
hold on

x1 = [0, max(Beta)];
y1 = [horizontal horizontal];
line(x1,y1,'Color','k','LineStyle','.', 'LineWidth', 1.5)

grid on
xlim([0, 0.8*10^8]);
ylabel('Dažnis, Hz');
ylim([0 horizontal*1.1]);
title('\beta (Re), m^{-1}');
xlabel('\beta, m^{-1}','Rotation',0);
legend(plotHandles, plotLabels,'Location', 'Best');
%-----[Re Beta end]-----
subplot(1,3,2)
%-----[Im Beta start]-----
alfa_1 = alfa_1-(alfal_step*jmax);% Resetiname alfa 1
for j = 1:1:jmax
    colorVec = hsv(jmax);%Spalvu vektorius (Skaicius turi sutapti su j)
    alfa = alfa_1/57.2957795;%kampas Radianais

ht3 = sqrt(2*S3^2+((sr3^2)/2)-2*(S3^2+((sr3^2)/4))*cos(alfa3))*sin(atan((2*S3)/sr3)-alfa3/2);
ro3 = (pi*d33^2)/(2*S3*(ht3+sr3));
e3_Lyg = RE3*ro3+emd3*(1-ro3);
e_3_lyg = (e3_Lyg.*d3+e4.*d4)./(d3+d4);

ht1 = sqrt(2*S1^2+((sr1^2)/2)-2*(S1^2+((sr1^2)/4))*cos(alfa1))*sin(atan((2*S1)/sr1)-alfa1/2);
ro1 = (pi*d11^2)/(2*S1*(ht1+sr1));
e1_Lyg = RE1*ro1+emd1*(1-ro1);
e_1_lyg = (e1_Lyg*d1+e2*d2)./(d1+d2);

ht3 = sqrt(2*S3^2+((sr3^2)/2)-2*(S3^2+((sr3^2)/4))*cos(alfa3))*sin(atan((2*S3)/sr3)-alfa3/2);
ro3 = (pi*d33^2)/(2*S3*(ht3+sr3));
e3_Stat = emd3.*((RE3.*(1+ro3)+emd3.*(1-ro3))./(RE3.*(1-ro3)+emd3.*(1+ro3)));
e_3_stat = (e3_Stat.*e4.*(d3+d4))./(e3_Stat.*d4+e4.*d3);

ht1 = sqrt(2*S1^2+((sr1^2)/2)-2*(S1^2+((sr1^2)/4))*cos(alfa1))*sin(atan((2*S1)/sr1)-alfa1/2);
ro1 = (pi*d11^2)/(2*S1*(ht1+sr1));
e1_Stat = emd1.*((RE1.*(1+ro1)+emd1.*(1-ro1))./(RE1.*(1-ro1)+emd1.*(1+ro1)));
e_1_stat = (e1_Stat.*e2.*(d1+d2))./(e1_Stat.*d2+e2.*d1);

Beta = k.*(((e_3_lyg-e_1_lyg).*e_3_stat.*e_1_stat)./(e_3_stat.*e_3_lyg-e_1_stat.*e_1_lyg)).^0.5;

if l%Atnaujina legenda
    plotHandles(j) = plot(imag(Beta),f);
    hold on
    plotLabels{j} = ['Im \beta kai, \alpha = ' num2str(alfa_1),'\circ'];
end

if (fix(jmax/2)+1)-j == 0%Išcentruojame grafiką
    [ymax,idx] = max(real(imag(Beta)),[],2);
    f_center = f(idx);
    Delta = 70;%Kuo skaičius artimesnis 0 tuo mažiau matosi
    f_low = (f_center/100)*(100-Delta);
    f_high = (f_center/100)*(100+Delta);
    %plot(W(idx),ymax,'or');%Patikrinti grafiko centrui
end

if j == 1
    data = imag(Beta);
    Intervalas_fh(data)
end

alfa_1 = alfa_1+alfal_step;
end

y1 = [horizontal horizontal];
x1 = [0, max(real(imag(Beta)))];
line(x1,y1,'Color','k','LineStyle','.', 'LineWidth', 1.5)

grid on
ylabel('Dažnis, Hz');
ylim([0 horizontal*1.1]);
xlim([0, 0.4*10^8]);
title('\beta (Im), m^{-1}');
xlabel('\beta, m^{-1}','Rotation',0);
legend(plotHandles, plotLabels,'Location', 'Best');
%-----[Im Beta end]-----
subplot(1,3,3)
%-----[Lp start]-----
alfa_1 = alfa_1-(alfal_step*jmax);% Resetiname alfa 1

```

```

for j = 1:1:jmax
colorVec = hsv(jmax);%Spalvu vektorius (Skaicius turi sutapti su j)
alfa1 = alfa_1/57.2957795;%kampas Radianais

ht3 = sqrt(2*S3^2+((sr3^2)/2)-2*(S3^2+((sr3^2)/4))*cos(alfa3))*sin(atan((2*S3)/sr3)-alfa3/2);
ro3 = (pi*d33^2)/(2*S3*(ht3+sr3));
e3_Lyg = RE3*ro3+emd3*(1-ro3);
e_3_lyg = (e3_Lyg.*d3+e4.*d4)./(d3+d4);

ht1 = sqrt(2*S1^2+((sr1^2)/2)-2*(S1^2+((sr1^2)/4))*cos(alfa1))*sin(atan((2*S1)/sr1)-alfa1/2);
ro1 = (pi*d11^2)/(2*S1*(ht1+sr1));
e1_Lyg = RE1*ro1+emd1*(1-ro1);
e_1_lyg = (e1_Lyg*d1+e2*d2)./(d1+d2);

ht3 = sqrt(2*S3^2+((sr3^2)/2)-2*(S3^2+((sr3^2)/4))*cos(alfa3))*sin(atan((2*S3)/sr3)-alfa3/2);
ro3 = (pi*d33^2)/(2*S3*(ht3+sr3));
e3_Stat = emd3.*((RE3.*(1+ro3)+emd3.*(1-ro3))./(RE3.*(1-ro3)+emd3.*(1+ro3)));
e_3_stat = (e3_Stat.*e4.*(d3+d4))./(e3_Stat.*d4+e4.*d3);

ht1 = sqrt(2*S1^2+((sr1^2)/2)-2*(S1^2+((sr1^2)/4))*cos(alfa1))*sin(atan((2*S1)/sr1)-alfa1/2);
ro1 = (pi*d11^2)/(2*S1*(ht1+sr1));
e1_Stat = emd1.*((RE1.*(1+ro1)+emd1.*(1-ro1))./(RE1.*(1-ro1)+emd1.*(1+ro1)));
e_1_stat = (e1_Stat.*e2.*(d1+d2))./(e1_Stat.*d2+e2.*d1);

Beta = k.*((e_3_lyg-e_1_lyg).*e_3_stat.*e_1_stat)./(e_3_stat.*e_3_lyg-e_1_stat.*e_1_lyg).^0.5;
bil = c./f;%Banga m
Lp = (1./(2*imag(Beta)))./bil;

if 1%Atnaujina legenda
    plotHandles(j) = plot(Lp,f);
    hold on
    plotLabels(j) = ['Lp kai, \alpha = ' num2str(alfa_1),'\circ'];
end

if (fix(jmax/2)+1)-j == 0%Išcentruojame grafiką
    [ymax,idx] = min(Lp,[1,2]);
    f_center = f(idx);
    Delta = 99;%Kuo skaicius artimesnis 0 tuo mažiau matosi
    f_low = (f_center/100)*(100-Delta);
    f_high = (f_center/100)*(100+Delta);
    %plot(f(idx),ymax,'or');%Patikrinti grafiko centrui
end

if j == 1%Braizomas regimosios sviesos intervalas
    data = Lp;
    Intervalas_fh(data)
end

alfa_1 = alfa_1+alfa1_step;
end
x1 = [0, max(Beta)];
y1 = [horizontal horizontal];
line(x1,y1,'Color','k','LineStyle',':', 'LineWidth', 1.5)

grid on
title('Lp');
xlim([0, 1]);
ylabel('Dažnis, Hz');
ylim([0 horizontal*1.1]);
xlabel('Lp/\lambda','Rotation',0);
legend(plotHandles, plotLabels,'Location', 'Best');
%-----[Lp end]-----
disp('Pabaiga....');
pause;
close all;

```