

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
VALSTYBINIS MOKSLINIŲ TYRIMŲ INSTITUTAS FIZINIŲ IR
TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

Tatjana GRIC

ELEKTROMAGNETINIŲ LAUKŲ IR DISPERSINIŲ CHARAKTERISTIKŲ SKAIČIAVIMAI ATVIRUOSIUOSE BANGOLAIDŽIUOSE IŠ SPINDULIUOTĘ SUGERIANČIŲ MEDŽIAGŲ

DAKTARO DISERTACIJA

FIZINIAI MOKSLAI, FIZIKA (02P),
KONDENSUOTOS MEDŽIAGOS: ELEKTRONINĖ STRUKTŪRA,
ELEKTRINĖS, MAGNETINĖS IR OPTINĖS SAVYBĖS,
SUPERLAIDININKAI, MAGNETINIS REZONANSAS,
RELAKSACIJA, SPEKTROSKOPIJA (P260)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2011

Disertacija rengta 2009–2011 metais Valstybiniame mokslinių tyrimų institute Fizinių ir technologijos mokslų centre.

Mokslinis vadovas

prof. habil. dr. Liudmila NICKELSON (Valstybinis mokslo tyrimų institutas Fizinių ir technologijos mokslų centras, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

Konsultantas

prof. dr. Artūras JUKNA (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

VGTV leidyklos TECHNIKA 1910-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-9955-28-973-9

© VGTV leidykla TECHNIKA, 2011
© Tatjana Gric, 2011
tatjana.gric@gmail.com

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY
STATE RESEARCH INSTITUTE
CENTER FOR PHYSICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY

Tatjana GRIC

ELECTROMAGNETIC FIELD AND DISPERSION CHARACTERISTIC CALCULATIONS OF OPEN WAVEGUIDES MADE OF ABSORPTIVE MATERIALS

DOCTORAL DISSERTATION

PHYSICAL SCIENCES, PHYSICS (02P),
CONDENSED MATTER: ELECTRONIC STRUCTURE;
ELECTRICAL, MAGNETIC AND OPTICAL PROPERTIES;
SUPERCONDUCTORS; MAGNETIC RESONANCE;
RELAXATION; SPECTROSCOPY (P260)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2011

Doctoral dissertation has been prepared at State Research Institute Center for Physical Sciences and Technology in 2009–2011.

Scientific Supervisor

Prof Dr Habil Liudmila NICKELSON (State Research Institute Center for Physical Sciences and Technology, Physical Sciences, Physics – 02P).

Consultant

Prof Dr Artūras JUKNA (Vilnius Gediminas Technical University, Physical Sciences, Physics – 02P).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjami atvirieji (neekranuotieji) bangolaidžiai, pagaminti iš elektromagnetinę (EM) spinduliuotę sugeriančių medžiagų. Pagrindiniai tyrimo objektai – įvairios formos skerspjuvio bangolaidžiai, pagaminti iš SiC ir metamedžiagų. Atvirųjų bangolaidžių pagrindu gali būti sukurti mikrobanginiai įrenginiai, pvz. modulatoriai, fazės suktuvai, filtrai ir t. t. Pagrindinis disertacijos tikslas – sukurti algoritmus ir atlikti atvirųjų bangolaidžių, pagamintų iš modernių medžiagų (SiC, metamedžiagų), pasižyminčių anomalią dispersiją, ir ypač dideliais elektromagnetinės bangos nuostoliais, elektrodinaminę analizę, kurios esmė – dispersinių charakteristikų ir EM laukų pasiskirstymų skaičiavimas, kai Maxwello lygtys sprendžiamos patenkinant visas ribines sąlygas.

Darbe sprendžiami pagrindinių ir pirmųjų aukštesniųjų modų, sklindančių tiriamuosiuose bangolaidžiuose, dispersinių charakteristikų ir EM laukų pasiskirstymų analizės, elektrodinaminių charakteristikų ypatumų ir jų taikymo galimybių nagrinėjimo uždaviniai.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, rezultatų apibendrinimas, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų, disertacijos tema, sąrašai.

Įvadiniame skyriuje aptariama tiriamoji problema, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašomas darbo mokslinis naujumas, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomos disertacijos tema autoriaus paskelbtos publikacijos ir pranešimai konferencijose bei disertacijos struktūra.

Pirmasis skyrius skirtas literatūros analizei, apžvalgai metodų, naudojamų bangolaidinių įrenginių analizei. Taip pat jame pateiktas algoritmų, sukurtų aptartųjų metodų pagrindu, apibavimas.

Antrajame skyriuje aptarti apskritųjų bangolaidžių, pagamintų iš SiC ir metamedžiagų, elektrodinaminės analizės rezultatai.

Trečiajame skyriuje pateikti sudėtingos skerspjuvio formos bangolaidžių, pagamintų iš SiC ir metamedžiagų elektrodinaminės analizės rezultatai.

Disertacijos tema paskelbta 14 mokslinių straipsnių ir perskaityta 18 pranešimų nacionalinėse ir tarptautinėse (14) konferencijose. Disertacijos tema paskelbtas Lietuvos Respublikos patentas Nr. 5710 ir publikuotas knygos skyrius.

Abstract

Dissertation reveals research problems of the open waveguides, made of materials absorbing the electromagnetic (EM) radiation. The main objects of the research are SiC and metamaterial open-waveguides of various cross-sections. On the basis of such waveguides we can construct various devices (modulators, phase shifters, filters etc.). The main purpose of this dissertation is to create numerical algorithms and to make electrodynamical research based on calculations of the dispersion characteristics and the EM field distributions of the open waveguides made of modern materials (such as silicon carbide (SiC) or metamaterial) possessing the anomaly dispersion and very high losses. The proposed research is based on Maxwell's equations, which are solved rigorously with all boundary conditions satisfied.

The dissertation studies several major tasks such as analysis of the dispersion characteristics of the main mode and the higher modes propagating in the investigated waveguides as well as the electromagnetic field distributions, explaining fields of applications of the electrodynamical effects.

The dissertation consists of four main parts, including *Introduction, three chapters, Conclusions, list of References, Author's scientific publications*.

The introduction reveals the investigated problem, the importance of the dissertation topic, the object of research and describes the purpose and the main tasks of this work, research methodology, scientific novelty, the practical significance of results presented in this dissertation and also the defending statements. The introduction ends with presentation of the author's publications on subject of the dissertation, offering the material of presentations given at conferences and defining the structure of the dissertation.

Chapter 1 revises literature, methods used for analysis of the waveguide devices. Here the approbation of the created algorithms is presented.

Chapter 2 presents the circular SiC and metamaterial waveguides. Here the results of the electrodynamical investigations are presented.

Chapter 3 presents the SiC and metamaterial waveguides with cross-sections of complicated form. This chapter presents the results of the electrodynamical investigations.

14 articles focusing on subject of the dissertation are published and 18 conference presentations on this subject are given in the national and the international (14) conferences. The Lithuanian patent and the chapter of the textbook on topic of this dissertation are published.

Žymėjimai

Simboliai

Lotynų kalbos abėcėlės žymenys

B_0 – magnetinė indukcija;

c – šviesos greitis vakuume;

E_z – išilginė elektrinio lauko dedamoji;

E_r, E_φ – skersinės elektrinio lauko dedamosios;

e – elektrono krūvis;

f – elektromagnetinės bangos, sklindančios bangolaidžiu, dažnis;

h – išilginė sklidimo pastovioji;

h' – išilginės sklidimo pastoviosios realioji dalis;

h'' – išilginės sklidimo pastoviosios menamoji dalis;

H_m^n – m -os eilės ir n -os rūšies Hankelio funkcija;

H_z – išilginė magnetinio lauko dedamoji;

H_r, H_φ – skersinės magnetinio lauko dedamosios;

$\vec{j}_e$ – elektrinis taškinis šaltinis;

$\vec{j}_h$ – magnetinis taškinis šaltinis;

J_m – m -os eilės Besselio funkcija;

$k_\perp$ – vidinis skersinis bangos skaičius;

k – išilginis bangos skaičius (sklidimo koeficientas) neribotame vakuume;

L – bangolaidžio ilgis;
 $m = 0, 1, 2, 3, \dots$ – bangos tipo pirmasis – azimutinio periodiškumo indeksas, sveikasis skaičius;
 m_e – elektrono masė;
 N – laisvųjų krūvių – elektronų koncentracija;
 r – apskritojo bangolaidžio spindulys;
 R – lenkimo spindulys;
 S^+ – terpė uždaro kontūro viduje;
 S^- – terpė uždaro kontūro išorėje;
 T – temperatūra.

Graikų kalbos abėcėlės žymenys

ϵ_r – santykinė dielektrinė skvarba;
 ϵ_0 – vakuumo absoliutinė dielektrinė skvarba (elektrinė konstanta);
 ϵ_k^{pn} – n -InSb su vienkrūve vienkompente plazma gardelės pastovioji;
 λ_w – tiriamosios modos bangos ilgis;
 μ_r – santykinė magnetinė skvarba;
 μ_0 – vakuumo absoliutinė magnetinė skvarba (magnetinė konstanta);
 μ – judris;
 $\mu_h(\vec{r}_s)$ ir $\mu_e(\vec{r}_s)$ – nežinomos funkcijos, tenkinančios Hoelderio sąlygas ir išplaukančios iš dispersinių lygčių;
 φ – azimutinė koordinatė;
 ω_c – ciklotroninio (giromagnetinio) rezonanso dažnis;
 ω_p – plazmos savųjų virpesių dažnis, rad/s;
 ω – ciklinis dažnis.

Santrumpos

SIL – singularinės integralinės lygtys;
 Q – tikslo funkcija;
 1D – vienmatis;
 2D – dvimatis;
 3D – trimatis;
 EM – elektromagnetinis;
 SiC – silicio karbidas;
 Ge – germanis;

Si – silicis;

TE – Transverse Electric waves (H tipo bangos pagal vadovėlį Z. Vainoris. Bangų elektronikos pagrindai, Vilnius, Technika, 2004, 514 p.);

TM– Transverse Magnetic waves (E tipo bangos pagal vadovėlį Z. Vainoris. Bangų elektronikos pagrindai, Vilnius, Technika, 2004, 514 p.);

SNG – Single Negative (Metamedžiaga, kurios arba santykinė dielektrinė arba santykinė magnetinė skvarba yra neigiama);

DNG – Double Negative (Metamedžiaga, kurios santykinė dielektrinė ir santykinė magnetinė skvarbos yra neigiamos);

SAD – superaukštieji dažniai, 3–30 GHz;

YAD – ypač aukšti dažniai, 30–300 GHz.

Turinys

IVADAS.....	1
Problemos formulavimas	1
Darbo aktualumas	2
Tyrimų objektas	3
Darbo tikslas	3
Darbo uždaviniai.....	3
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	4
Darbo rezultatų praktinė reikšmė.....	4
Ginamieji teiginiai	4
Darbo rezultatų aprobavimas	5
Disertacijos struktūra	7
1. ELEKTRODINAMINIO UŽDAVINIO SPRENDINYS BANGOLAIDŽIUOSE, UŽPILDYTUOSE DIDELĖS EM BANGŲ SUGERTIES MEDŽIAGOMIS. LITERATŪROS ANALIZĖ.....	9
1.1. Literatūros analizė	10
1.2. SIL metodas	11
1.3. Dalinių sričių metodas, skirtas izotropiniam bangolaidžiui	16
1.4. Dalinių sričių metodas, skirtas girotropiniam bangolaidžiui	17
1.5. Algoritmų testavimas	19
1.6. Mullerio metodas	22
1.7. Pirmojo skyriaus išvados	23
2. APSKRITŲJŲ BANGOLAIDŽIŲ ELEKTRODINAMINĖ ANALIZĖ.....	25
2.1. Apskritųjų metamedžiagos bangolaidžių elektrodinaminė analizė	26
2.2. SiC apskritųjų bangolaidžių elektrodinaminė analizė.....	36

2.3. Antrojo skyriaus išvados.....	52
3. STAČIAKAMPIŲ BANGOLAIDŽIŲ ELEKTRODINAMINĖ ANALIZĖ	55
3.1. Stačiakampių bangolaidžių elektrodinaminė analizė	56
3.2. Bangolaidžių su ertmėmis elektrodinaminė analizė	67
3.3. Trečiojo skyriaus išvados	71
BENDROSIOS IŠVADOS.....	73
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI	75
AUTORIAUS PUBLIKACIJOS DISERTACIJOS TEMA	77

Contents

INTRODUCTION.....	1
The formulation of the problem.....	1
The topicality of research	2
The investigated object.....	3
The aim of research	3
The tasks of research	3
The methodology of research	3
Importance of scientific novelty	4
The practical value of results	4
The defended statements.....	4
Approval of the results.....	5
Dissertation structure	7
 1. THE RIGOROUS SOLUTION OF THE ELECTRODINAMICAL BOUNDARY PROBLEM IF THERE ARE WAVEGUIDE REGIONS FILLED WITH THE ABSORBING MATERIALS. THE ANALYSIS OF LITERATURE	 9
1.1. The analysis of literature	10
1.2. The SIE method	11
1.3. The partial area method for isotropic waveguides	16
1.4. The partial area method for gyrotropic waveguides	17
1.5. Tests of the algorithms.....	19
1.6. The Muller's method	22

1.7. The conclusions of the first chapter	23
2. THE ELECTRODYNAMICAL ANALYSIS OF THE CIRCULAR WAVEGUIDES	25
2.1. The electrodynamical analysis of the metamaterial circular waveguides	26
2.2. The electrodynamical analysis of the SiC circular waveguides	36
2.3. The conclusions of the second chapter	52
3. THE ELECTRODYNAMICAL ANALYSIS OF THE RECTANGULAR WAVEGUIDES	55
3.1. The electrodynamical analysis of the rectangular waveguides	56
3.2. The electrodynamical analysis of the photonic crystals	67
3.3. The conclusions of the third chapter	71
GENERAL CONCLUSIONS	73
REFERENCES	75
LIST OF THE AUTHOR'S SCIENTIFIC PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF DISSERTATION	77

Ivadas

Problemos formulavimas

Darbe yra sprendžiamos fizikos mokslo krypties problemos. Modernūs mikrobanginės elektronikos įtaisai kuriami naudojant modernias medžiagas. Šių medžiagų pagrindu kuriami naujos kartos elektroniniai įrenginiai, turintys novatoriškų specifinių charakteristikų. Prie moderniausių ir plačiai taikomų medžiagų galima priskirti dirbtinai sukurtas metamedžiagas (dirbtines konstrukcijas, primenančias „mozaiką“, sudarytą iš įvairių medžiagų: laidininkų ir dielektrikų) ir puslaidininkų medžiagas su plačia draudžiamų energijų juosta, skiriančia laidumo ir valentines juostas, pvz. silicio karbidas (SiC). Intensyvus šių medžiagų taikymas moderniuose elektroniniuose įtaisuose, stimuliuoja naujų teorinių algoritmų, skirtų SiC ir metamedžiagos bangolaidžių elektrodinaminei analizei, kūrimą ir taikymus.

SiC bangolaidžiai, veikiantys mikrobangų dažnių ruože, gali būti taikomi aukštųjų temperatūrų, didelių galių, aukštos radiacijos sąlygomis. SiC turi gerojai daugiau privalumų didelės galios elektronikoje, nei Si (silicio) medžiaga. Šiandieninis metamedžiagų technologinis potencialas – labai didelis. Unikalioms metamedžiagų elektrodinaminės savybės, tokios kaip neigiamos efektinės dielektrinė ir magnetinė skvarbos, gali pakeisti bangolaidžiuose naudojamas šiuolaikines medžiagas, kurių technologija ir sudėtinga ir santykinai brangi SAD ir

YAD diapazonuose. Reikia atkreipti dėmesį į tai, kad metamedžiagų dielektrinė ir magnetinė skvarbos – dažnai kompleksiniai dydžiai, kurių menamosios dalys gali būti labai didelės. Norint atlikti metamedžiagų bangolaidžių elektrodinaminę analizę, reikia sukurti patikimus ir galinčius įvertinti EM bangų bangolaidžiuose patiriamus nuostolius algoritmus, o taip pat atsižvelgti į Helmholtzo lygties sprendimą, kadangi medžiagos gali pasižymėti ir anomaliąja dispersija.

Darbo aktualumas

Skaičius straipsnių, nagrinėjančių EM bangos sklidimą metamedžiagos struktūromis, šiandien dar ribotas.

Daugelyje darbų yra tiriami 1D bangolaidžiai. Šiame disertaciniame darbe yra tiriami 2D bangolaidžiai, o tai yra sudėtingesnis uždavinys.

Skaičius darbų, susijusių su SiC bangolaidžių skaičiavimais (Vonsovici 1999), – dar mažesnis. Pagrindinė eksperimentinių tyrimų problema – intensyvi EM bangų sugertis bangolaidžiuose ir sugerties priklausomybė nuo temperatūros.

Daugelio 2D atvirųjų SiC ir metamedžiagos bangolaidžių dispersinių charakteristikų ir EM laukų pasiskirstymai prof. L. Nickelson ir T. Gric skaičiuojami jau nuo 2006 metų. Skaičiavimų rezultatai labai gerai sutampa su eksperimentiniais rezultatais. Šiame disertaciniame darbe medžiagų kompleksinių santykinų dielektrinės ir magnetinės skvarbų eksperimentinės reikšmės, priklausančios nuo dažnio ir temperatūros, buvo imamos iš kitų autorių publikuotų mokslinių darbų. Bangolaidžių sklindančių modų klasifikavimas nebuvo atliekamas kadangi bangolaidžiai yra pagaminti iš spinduliuotę sugeriančių medžiagų ir modos rūšis gali keistis, keičiantis dažniui. Pagal turimus duomenis atlikti bangolaidžių skaitiniai tyrimai yra unikalūs ir nebuvo atlikti kitų mokslininkų. Šį faktą patvirtina tai, jog Lietuvoje tyrimus atlikusi mokslininkų grupė (prof. L. Nickelson ir T. Gric) buvo pripažinta viena iš pagrindinių specialistų SiC bangolaidžių skaitinių tyrimų srityje. 2010 m. ši grupė buvo pakviesta dalyvauti projekte 978-953-7619-X-X (InTech, 1070 Vienna, Austria, European Union) tikslu paruošti knygą "Properties and applications of Silicon Carbide".

Metamedžiagos bangolaidžių skaičiavimų svarbumas buvo pripažintas pagrindiniais metamedžiagos specialistais. 2010 m. Lietuvos mokslininkų grupė (prof. L. Nickelson, T. Gric) publikavo 19-os puslapių mokslinį straipsnį, kuriame pateikta 2008–2010 m. periodo metamedžiagos bangolaidžių tyrimų apžvalga. Žurnalas Progress In Electromagnetics Research (PIER) ir jo organizuojami simpoziumai PIERS (kuriuose dalyvavo ir Lietuvos mokslininkai (prof. L. Nickelson, T. Gric)), yra prestižiškiausi pasaulyje ir aukščiausio lygio, vertinant pagal bangolaidžių ir bangolaidinių struktūrų EM savybių tyrimus. Šis leidinys –

vienas iš svarbiausių mokslinių leidinių, spausdinančių metamedžiagų ir bangolaidinių struktūrų, sudarytų jų pagrindu, mokslinių tyrimų rezultatus. Pagrindinė organizacija, sukūrusi ir kuruojanti PIER žurnalą, – tai Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA (JAV).

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – bangolaidžiai, pagaminti iš EM spinduliuotę sugeriančių medžiagų.

Darbo tikslas

Nustatyti atvirųjų bangolaidžių elektrodinaminių charakteristikų ypatumus ir nurodyti tų ypatumų pritaikymus naujos kartos mikrobanginės technikos įrenginiuose.

Darbo uždaviniai

1. Sukurti algoritmus ir atlikti atvirųjų (neekranuotų) bangolaidžių, pagamintų iš modernių medžiagų, tokių kaip SiC ar metamedžiaga, ir pasižyminčių anomalią dispersiją ir stiprią EM bangų sugertimi, elektrodinaminę analizę. Suskaičiuotos dispersinės charakteristikos ir EM laukų pasiskirstymai yra tiriami, kai Maxwello lygtys sprendžiamos tenkinant visas kraštines sąlygas.
2. Sukurti algoritmus ir atlikti EM bangų, sklindančių atviraisiais bangolaidžiais, modų 2D ir 3D elektrinių ir magnetinių laukų tyrimus.
3. Išanalizuoti EM bangų pagrindinių modų ir pirmųjų aukštesniųjų modų, sklindančių tiriamaisiais bangolaidžiais, dispersines charakteristikas.

Tyrimų metodika

Siekiant išspręsti elektrodinaminius uždavinius, darbe buvo taikomas *Singuliarųjų integralinių lygčių* metodas, dalinių sričių metodas. Šie metodai leido išspręsti ribines užduotis. Siekiant surasti dispersinių lygčių kompleksines šaknis buvo naudojamas Mullerio metodas. Kompiuteriniai algoritmai buvo kuriami Matlabo aplinkoje.

Darbo mokslinis naujumas

1. Darbe pasiūlyti dispersinių charakteristikų ir elektromagnetinių laukų pasiskirstymų skaičiavimų algoritmai, kuriais ištirti bangolaidžiai, pagaminti iš medžiagų, pasižyminčių įvairaus stiprio spinduliuotės sugertimi ir anomalią dispersiją. Nustatyta, jog dvimačio uždavinio sprendinys dažnių ruože, kuriame pasireiškia anomalioji metamedžiagos dispersija, nesutampa su sprendiniu dažnių ruože, kuriame pasireiškia normalioji metamedžiagos dispersija. Sprendinys buvo surastas, kai tenkinamos elektrodinaminės sąlygos bangolaidžio briaunoje ir begalybėje, t. y., kai elektromagnetinio lauko dedamosios begalybėje artėja prie nulio.
2. Nustatyta, kad lėtosios ir greitosios modos yra lygiavertės atžvilgiu elektrinių laukų variacijų pagal bangolaidžio spindulį, t. y. variacijų pagal bangolaidžio spindulį skaičius nepriklauso nuo to, ar moda yra greitoji, ar lėtoji. Gautasis rezultatas svarbus, klasifikuojant bangolaidžių modas.
3. Gautų SiC bangolaidžių elektrodinaminių charakteristikų pagrindu buvo sukurta modulatoriaus konstrukcija ir paskelbtas Lietuvos Respublikos patentas Nr. 5710.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Darbe gauti rezultatai gali būti naudojami siekiant sukurti bangolaidinius įrenginius, pavyzdžiui, filtrus, modulatorius, fazės suktuvus, sugėriklius. Sukurti algoritmus galima naudoti, norint tirti bet kurios skerspjūvio formos bangolaidžius.

Ginamieji teiginiai

1. Sukurtais skaitmeniniais algoritmais galima suskaičiuoti stačiakampio gretasienio ir apskrito skerspjūvių formų bangolaidžių, pagamintų iš EM bangas sugeriančių puslaidininkių ir metamedžiagų, dispersines charakteristikas ir 2-D bei 3-D EM laukų pasiskirstymus, įskaitant visas uždavinių kraštines sąlygas.
2. Atvirasis apskritasis metamedžiagos bangolaidis ($r = 2,5$ mm) slopina siauros (2,5 GHz) dažnių juostos EM bangų signalus. EM bangų sklaidimo nuostoliai, tokio juostinio filtro praleidžiamų dažnių srityje (75–100, 102,5–115 GHz) per 100 kartų mažesni, nei nuostoliai spinduliuotę sugeriančiame dažnių ruože (100–102,5 GHz).

3. Stačiakampiuose SiC bangolaidžiuose, kurių skerspjūvio kraštinių ilgiai lygūs $2r$, nuostoliai 2,5 karto mažesni nei r -spindulio apskrituosiuose SiC bangolaidžiuose. Pagrindinė mažų nuostolių stačiakampiuose SiC bangolaidžiuose priežastis – padidėjusi sklindančiosios modos EM lauko koncentracija bangolaidžio kampuose (briaunose) ir už bangolaidžio ribų. Dėl to didesnė EM energijos dalis sklinda už bangolaidžių ribų ir nuostoliai mažėja.
4. SiC apskritojo bangolaidžio nuostoliai nekinta dažnių ruože nuo 30 iki 70 GHz. Bangolaidžiu sklindančios EM bangos fazę galima valdyti bangolaidžio temperatūra, jai kintant intervale 500–1500 °C. Toks bangolaidis gali būti pritaikytas kuriant modernius moduliatorius, fazės suktuvus ar kitas mikrobanginės technikos elementus, skirtus EM bangų perdavimui.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema paskelbta 14 straipsnių, 1 patentas ir 1 knygos skyrius. Skaityta 18 mokslinių pranešimų nacionalinėse ir tarptautinėse mokslinėse konferencijose:

1. T. Gric, L. Nickelson, S. Asmontas, Three dimensional magnetic field distributions and dispersion characteristics of rectangular and circular SiC waveguides, 4th Microwave & Radar Week: 18th Int. Conf. on Microwaves, Radar, and Wireless Communications MIKON–2010, Vilnius, Lithuania, June 14–16, 2010, Conference Proceedings 2, p. 722–725 (2010) (pranešimas perskaitytas 2010 m. birželio 16 d.)
2. T. Gric, S. Asmontas, L. Nickelson, 3D vector electric field distributions and dispersion characteristics of open rectangular and circular metamaterial waveguides, 4th Microwave & Radar Week : 18th Int. Conf. on Microwaves, Radar, and Wireless Communications MIKON–2010, Vilnius, Lithuania, June 14–16, 2010, Conference Proceedings 2, p. 578–581 (2010) (pranešimas perskaitytas 2010 m. birželio 15 d.)
3. T. Gric, L. Nickelson, S. Asmontas, Magnetic field investigations of modes propagating in the open lossy SiC waveguides, Elektronika 2010 (pranešimas perskaitytas 2010 m. gegužės 20 d.)
4. T. Gric, L. Nickelson, Electrodynamical analysis of open metamaterial waveguides with novel shape cross-sections, Elektronika 2010 (pranešimas perskaitytas 2010 m. gegužės 20 d.)

5. T. Gric, L. Nickelson, S. Asmontas, Analysis of slow and fast modes of open lossy waveguides, Lietuvos ir Baltarusijos IEEE AP/ED/MTT bendruomenių mokslinis-praktinis seminaras „Naujos kryptys ir pasiekimai aukštųjų dažnių matavimų srityje“ (angl. New trends and achievements in microwave measurement) (pranešimas perskaitytas 2010 m. sausio 15 d.)
6. S. Ašmontas, L. Nickelson, T. Gric, B. A. Galwas, Solution of Maxwell's Equations by the Partial Area Method for the Electrodynamical Analyses of Open Lossy Metamaterial Waveguides, Proceedings of International Conference Differential Equations and their Applications. DETA–2009 Conference, Sept. 10–12, 2009, V. Kleiza et al., Eds., p. 17–20 (2009), ISBN 978-9955-25-747-9, Kaunas University of Technology. (pranešimas perskaitytas 2009 m. rugsėjo mėn. 10 d.).
7. L. Nickelson, S. Asmontas, T. Gric, R. Martavicius, Analysis of Slow and Fast Modes of Lossy Ceramic SiC Waveguides, Progress in Electromagnetics Research Symposium, AUG 12–21, 2009 Moscow, Russia, Conference Proceedings 1&2, PIERS2009, Moscow, p. 573–576 (2009) (ISI Web of Science) (stendinis pranešimas padarytas 2009 m. rugpjūčio mėn. 18–21 d.).
8. L. Nickelson, T. Gric, S. Asmontas, R. Martavicius, Analyses of the Gyroelectric Plasma Rod Waveguide, 17th IEEE International Pulsed Power Conference, JUN 28–JUL 2, 2009 Washington, DC. Conference Proceedings 1&2: 2009 IEEE Pulsed Power conference, p. 724–727 Published: 2009 (ISI Web of Science). (stendinis pranešimas padarytas 2009 m. birželio mėn. 28 d.).
9. S. Asmontas, L. Nickelson, T. Gric, R. Martavicius, Electric field distributions in the cross-sections of the SiC hollow-core waveguides, 17th IEEE International Pulsed Power Conference, JUN 28–JUL 2, 2009 Washington, DC. Conference Proceedings 1&2: 2009 IEEE Pulsed Power conference, p. 507–510 (2009) (ISI Web of Science) (stendinis pranešimas padarytas 2009 m. birželio mėn. 28 d.).
10. L. Nickelson, T. Gric, S. Asmontas, Investigation of complex propagation constants of the open rectangular SiC waveguides by the SIE method, Elektronika 2009 (pranešimas perskaitytas 2009 m. gegužės mėn. 14 d.).
11. L. Nickelson, T. Gric, S. Asmontas, R. Martavicius, Electric field distributions of the fast and slow modes propagated in the open rod SiC waveguide, Elektronika 2009 (pranešimas perskaitytas 2009 m. gegužės mėn. 14 d.).

12. T. Gric, Bangolaidinių įrenginių veikimo tyrimas. Bangolaidžių dispersinių charakteristikų ir elektromagnetinių laukų modeliavimas, XII-toji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija “Mokslas – Lietuvos ateitis” (pranešimas perskaitytas 2009 m. kovo 20 d.).
13. S. Asmontas, L. Nickelson, T. Gric, Electric field distributions in the open cylindrical silicon carbide waveguides, 2nd Euro-Asian Pulsed Power Conference (stendinis pranešimas padarytas 2008 m. rugsėjo mėn. 22–26 d.).
14. L. Nickelson, T. Gric, S. Asmontas, R. Martavicius, Electric field distributions of main and higher modes in open cylindrical dielectric and metamaterial rod waveguides, Elektronika 2008 (pranešimas perskaitytas 2008 m. gegužės mėn. 22 d.).
15. L. Nickelson, T. Gric, S. Asmontas, R. Martavicius, Electrodynamical analyses of dielectric and metamaterial hollow-core cylindrical waveguides, Elektronika 2008 (pranešimas perskaitytas 2008 m. gegužės mėn. 22 d.).
16. T. Gric, Dielektrinių, metamedžiagos, girotropinių bangolaidžių skaičiavimas, XI-toji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija “Mokslas – Lietuvos ateitis” (pranešimas perskaitytas 2008 m. kovo mėn. 14 d.).
17. L. Nickelson, T. Gric, S. Asmontas, Dispersion characteristics of metamaterial hollow-core cylindrical waveguides, 37-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija, Programa ir pranešimų tezės. Vilnius, p. 22 (2007). (kviestinį pranešimą perskaitė prof. L. Nickelson 2007 m. birželio mėn. 11–13 d.).
18. L. Nickelson, T. Gric, S. Asmontas, Computer algorithm for electrodynamic analyses of open dielectric and metamaterial hollow-core cylindrical waveguides, Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Operacijų tyrimas ir taikymai“ (pranešimas perskaitytas 2007 m. gegužės mėn. 18 d.).

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai ir rezultatų apibendrinimas.

Darbo apimtis 94 puslapiai, tekste panaudotos 24 numeruotos formulės, 35 paveikslai ir 5 lentelės. Disertacijoje panaudota 20 literatūros šaltinių.

Elektrodinaminio uždavinio sprendinys bangolaidžiuose, užpildytuose didelės EM bangų sugerties medžiagomis. Literatūros analizė

Skyrius skirtas Maxwello lygčių sprendimui, tenkinant visas kraštines sąlygas, t. y. kai yra išpildomos elektrinio ir magnetinio laukų tangentinių komponentų lygybės bangolaidžio skerspjūvio kontūruose, yra tenkinamos sąlygos begalybėje, briaunoje. Medžiaga, iš kurios bangolaidis yra pagamintas, gali būti charakterizuojama kompleksinėmis dielektrinės ir magnetinės skvarbos reikšmėmis. Tokiai analizei taikomas SIL (*Singuliariųjų integralinių lygčių*) metodas. Apskritųjų bangolaidžių analizei taikomas dalinių sričių metodas. Pagrindinė darbo užduotis – sukurti elektrodinaminių lygčių stabilius algoritmus ir jais ištirti bangolaidžius, pagamintus iš modernių medžiagų, taikomų aukštų dažnių šiuolaikinėje elektronikoje. Medžiagų sugertis gali būti labai didelė (Agarwal, Ryu 2006; Chen *et al.* 2006). Be to jų santykinės dielektrinės ir magnetinės skvarbos gali būti neigiamos arba kartu, arba atskirai, priklausomai nuo dažnio bangolaidžių sklindančios EM bangos. Dėl to, tokiuose bangolaidžiuose gali pakisti EM

bangos ilgis ir jos energijos nuostoliai. Bangolaidyje gali būti stebima pagrindinės ir pirmosios aukštesniosios modų dispersinių charakteristikų anomalijos dažniuose, nesutampančiuose su anomaliosios dispersijos dažniu begalinio pločio medžiagoje. Darbe pasiūlyti uždavinių sprendimų būdai ir sukurti kompiuteriniai algoritmai. Papildomi rezultatai pateikti šio skyriaus 1.4 poskyryje.

1.1. Literatūros analizė

Skaičius straipsnių, nagrinėjančių EM bangos sklidimą metamedžiagos struktūromis, šiandien dar ribotas. (Alu 2004) straipsnyje analizuojamas dviejų sluoksnių 1D bangolaidis, kai medžiagų santykinės dielektrinės ir magnetinės skvarbų verčių kombinacijos skirtingos (santykinė dielektrinė skvarba neigiama, o santykinė magnetinė skvarba teigiama; santykinė magnetinė skvarba neigiama, o santykinė dielektrinė skvarba teigiama; santykinė dielektrinė ir magnetinės skvarbos teigiamos arba abi kartu – neigiamos). Autoriai paskelbė dispersines lygtis ir TE ir TM modų diagramas, gautas, atsižvelgiant į sluoksnio storį ir medžiagos parametrus. Tačiau visi skaičiavimai (Alu 2004) straipsnyje atlikti, kai medžiagoje EM bangų nuostoliai – lygūs nuliui. (Kim 2009) straipsnyje tiriamos dispersinės charakteristikos 1D bangolaidžio, sudaryto iš metamedžiagų, kurių santykinės dielektrinės ir magnetinės skvarbos yra tuo pačiu metu arba neigiamos arba teigiamos. Darbe analizuojamos TM_m modos, kurių $m = 0, 1, 2, \dots, 5$. Darbe gautos modų charakteristikos skirtos simetriniam bangolaidžiui. Tačiau šios charakteristikos gali būti taikomos, analizuojant asimetrinius bangolaidžius. Modų sklindančių 1D bangolaidyje, kai metamedžiagos santykinės dielektrinės ir magnetinės skvarbos abi kartu neigiamos, analizė atlikta (Wang 2006) literatūros šaltinyje. Metamedžiagos bangolaidis apsuptas skirtingomis medžiagomis iš viršaus ir iš apačios. Metamedžiagos santykinės dielektrinės ir magnetinės skvarbos nepriklauso nuo dažnio ir lygios 2 (t. y. nuostoliai lygūs nuliui). Minėtame darbe analizuojamos dispersinių charakteristikų priklausomybės nuo normuoto dažnio, sklidimo pastoviosios, medžiagų, supančių bangolaidį, santykinės dielektrinės skvarbų santykio. Sklidimo pastovioji apibrėžia, kiek pasikeičia bangos fazė ir amplitudė, bangai praeinant 1 m ilgio kelią. Sklidimo pastovioji yra atvirkščiai proporcinga bangos ilgiui bangolaidyje. Ištirtos TE_m modos, kurių indeksai yra $m = 1-4$. (Wang 2006) darbe buvo tirti TE_1 , TE_2 , TE_3 modų elektrinių laukų pasiskirstymai. Darbe nustatyta, kad tiriamose struktūrose egzistuoja ne tik hibridinės modos, bet ir paviršinės. Darbai (Li 2005; Mahmoud 2005) yra skirti metamedžiagos įžemintų bangolaidžių analizei. (Li 2005) straipsnyje pristatomos tokių bangolaidžių dispersinės charakteristikos. Uždaviniai išspręsti priklausomai nuo normuoto dažnio, begalinio darinio storio, medžiagų parametrų. (Mahmoud 2005) moksliniame darbe įvertintos TE_0 , TE_1 , TM_1 , TM_2 modų santykinės

fazinės pastoviosios ir galios vertės. Tam tikruose darbuose sklindančios modos charakterizuojamos tik vienu indeksu. Tai reiškia, kad egzistuoja priklausomybė tik nuo vienos koordinatės ir bangolaidžiai yra vienmačiai. (Lu 2009) straipsnyje analizuojamas bangų sklidimas 2D planariniame dielektriniame bangolaidyje, padengtame metamedžiaga. Straipsnyje taip pat nagrinėjamos TE modos, galinčios sklisti bangolaidžiu. Straipsnyje nustatyta, kad bangolaidžiu gali sklisti modos, kurių grupinis greitis lygus nuliui, esant kritiniam bangolaidžio storiui. (Liu 2007) darbas analizuoja TE modų sklidimą 1D bangolaidžiu, pagamintu iš anizotropinės dispersinės metamedžiagos. Darbe nagrinėjamos tik lyginės modos TE_2 , TE_4 , TM_6 , modų ir paviršinių modų dispersinių charakteristikų priklausomybės nuo dažnio ir metamedžiagos bangolaidžio storio. Darbe atlikti tyrimai labai svarbūs tuo atveju, kai prireikia parinkti tinkamais darbinį dažnį ir metamedžiagos bangolaidžio storį.

Daugelyje išvardintų darbų tiriami 1D bangolaidžiai. Šiame keliamas sudėtingesnis uždavinys – tiriami 2D bangolaidžiai.

Skaičius darbų, susijusių su SiC bangolaidžių skaičiavimais (Vonsovici 1999), – dar mažesnis. (Vonsovici 1999) darbe nagrinėjami SiC bangolaidžiai. Juos siūloma gaminti dviem skirtingais metodais. Darbe pateikiama nuostolių nagrinėjamuose bangolaidžiuose prigimtis. Tiriamuosius bangolaidžius siūloma taikyti fotoniniuose įrenginiuose. Pagrindinė eksperimentinių tyrimų problema – intensyvi EM bangų sugertis bangolaidžiuose ir sugerties priklausomybė nuo temperatūros.

1.2. SIL metodas

Skyriuje apibūdinamas SIL metodas (Nickelson *et al.* 2011; Gric *et al.* 2010), kuriuo sprendžiamos Maxwello lygtys. Taikant SIL metodą, galima suskaičiuoti pagrindinės ir aukštesniųjų modų dispersines tiksliai charakteristikas ir EM laukų pasiskirstymą bangolaidžio viduje bei jo išorėje.

Disertacijoje naudojamo metodo esmė – diferencialinių lygčių sprendinio paieška, kai šaltinis – taškinis. Fundamentalusis diferencialinių lygčių sprendinys naudojamas bendro sprendinio integralinėje išraiškoje. Integralinė išraiška tenkina Maxwello diferencialines lygtis. Į šią išraišką įeina nežinomosios tankio funkcijos μ_e ir μ_h , surandamos pritaikius ribines sąlygas. Tam, kad gauti bangolaidžio dispersinę lygtį, mes naudojame Maxwello lygtis, aprašančias elektrinį $\vec{j}_e$ ir magnetinį $\vec{j}_h$ taškinius šaltinius:

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu_0 \mu_r \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \vec{j}_h, \quad \nabla \times \vec{H} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \vec{j}_e, \quad (1.1)$$

čia $\vec{E}$ – elektrinio lauko stiprio vektorius, o $\vec{H}$ – magnetinio lauko stiprio vektorius, ϵ_r – santykinė dielektrinė skvarba, μ_r – santykinė magnetinė skvarba bei ϵ_0 , μ_0 – dielektrinė ir magnetinė konstantos. EM bangos priklausomybės nuo laiko t ir išilginės koordinatės z yra išreiškiamos $\exp(i(\omega t - hz))$ pavidalu. Čia $h = h' - i h''$ – kompleksinė sklaidimo pastovioji, h' – realioji dalis (fazinė pastovioji), $h' = 2\pi\lambda_w$, λ_w – tiriamosios modos bangos ilgis ir h'' – menamoji dalis (t.y. slopinimo pastovioji arba nuostoliai). Daugiklis $\omega = 2\pi f$ – ciklinis dažnis, o $i^2 = -1$. Tiesinių lygčių bendrasis sprendinys – tai sprendinių suma, kai $\vec{j}_h \neq 0$, $\vec{j}_e = 0$ ir $\vec{j}_h = 0$, $\vec{j}_e \neq 0$. EM lauko skersinės dedamosios E_x , E_y , H_x , H_y išreiškiamos per išilgines dedamąsias E_z , H_z :

$$E_x = \frac{\mu_0 \mu_r i \omega \frac{\partial H_z}{\partial y} + i h \frac{\partial E_z}{\partial x}}{\Delta}, \quad E_y = \frac{-\mu_0 \mu_r i \omega \frac{\partial H_z}{\partial x} + i h \frac{\partial E_z}{\partial y}}{\Delta}, \quad (1.2)$$

$$H_x = \frac{-\epsilon_0 \epsilon_r i \omega \frac{\partial E_z}{\partial y} + i h \frac{\partial H_z}{\partial x}}{\Delta}, \quad H_y = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r i \omega \frac{\partial E_z}{\partial x} + i h \frac{\partial H_z}{\partial y}}{\Delta}, \quad (1.3)$$

čia $\Delta = h^2 - k^2 \epsilon_r \mu_r$.

Išilginės dedamosios E_z , H_z tenkina skaliarines lygtis, vadinamas Helmholtz'o lygtimis:

$$(\Delta_{\perp} + k_{\perp}^2) H_z = 0, \quad (\Delta_{\perp} + k_{\perp}^2) E_z = 0, \quad (1.4)$$

čia $\Delta_{\perp} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ yra dvimatis Laplasianas, daugiklis $k_{\perp}^2 = -\Delta = k^2 \epsilon_r \mu_r - h^2$,

$k = \omega/c$, c – šviesos greitis vakuume, o ω – ciklinis dažnis. Antrosios eilės diferencialinių lygčių (1.4) fundamentalusis sprendinys cilindrinėje koordinatų sistemoje (arba polinėje koordinatų sistemoje, kadangi išilginės koordinatės priklausomybė jau buvo nustatyta) yra nulinės eilės Hankelio funkcija.

1.1 pav. pavaizduoti taškai kontūro L , tenkinančio ribines sąlygas, dalinant tyrimų sritį į SiC (silicio karbido) bangolaidžio vidaus sritį (ϵ_r^{SiC} , μ_r^{SiC}) ir sritį, už bangolaidžio ribų (ϵ_r^a , μ_r^a). Tiek kontūro L viduje, tek ir jo išorėje gali būti parenkamos bet kokios medžiagos.

Tuomet, kontūras L plokštumoje (pav. 1.1) dalina ją į dvi dalis: vidinę S^+ ir išorinę S^- . Šios dalys charakterizuojamos skirtingais elektrofiziniais parametrais. Dalis S^+ – parametrais ϵ_r^{SiC} , μ_r^{SiC} , o sritis S^- – ϵ_r^a , μ_r^a . Dydžiai $\epsilon_r^{\text{SiC}} = \text{Re}(\epsilon_r^{\text{SiC}}) - i \cdot \text{Im}(\epsilon_r^{\text{SiC}})$ ir $\mu_r^{\text{SiC}} = \text{Re}(\mu_r^{\text{SiC}}) - i \cdot \text{Im}(\mu_r^{\text{SiC}})$ yra, atitinkamai, SiC terpės komp-

leksinė dielektrinė ir kompleksinė magnetinė skvarbos. Teigiama kryptimi laikysime judėjimą kontūru prieš laikrodžio rodyklę.

Helmholtzo lygčių (1.4) sprendiniai turi tenkinti elektrinio ir magnetinio laukų tangentinių dedamųjų ribines sąlygas:

$$E_{\tan}^+ \Big|_L = E_{\tan}^- \Big|_L, \quad (1.5)$$

$$H_{\tan}^+ \Big|_L = H_{\tan}^- \Big|_L, \quad (1.6)$$

čia $E_z(\vec{r})$, $H_z(\vec{r})$ – išilginės elektrinio ir magnetinio laukų dedamosios, tenkinančios Helmholtzo lygtis, kontūro taškuose. Jų pavidalas:

$$E_z(\vec{r}) = \int_L \mu_e(\vec{r}_s) H_0^{(2)}(k_{\perp} r') ds, \quad (1.7)$$

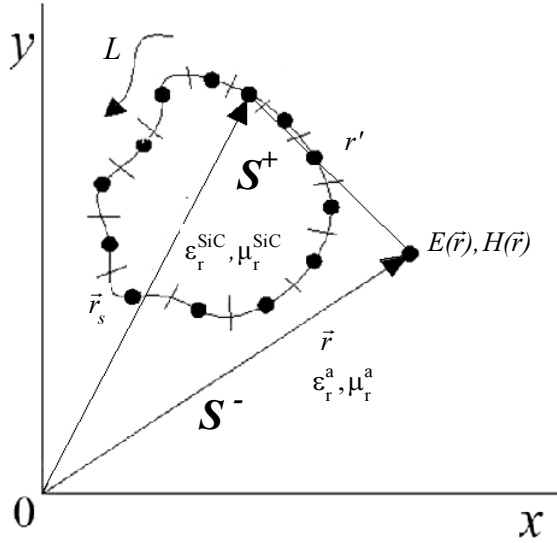
$$H_z(\vec{r}) = \int_L \mu_h(\vec{r}_s) H_0^{(2)}(k_{\perp} r') ds, \quad (1.8)$$

čia $E_z(\vec{r})$, $H_z(\vec{r})$ – išilginės elektrinio ir magnetinio laukų dedamosios, $\vec{r} = \vec{i}x + \vec{j}y$ – taško, kuriame EM laukai yra nustatyti, spindulys-vektorius, $\vec{i}, \vec{j}$ – ortai. Dydžiai $\mu_e(\vec{r}_s)$ ir $\mu_h(\vec{r}_s)$ yra nežinomos funkcijos, kurios tenkina Holderio sąlygas. Holderio sąlyga – yra nelygybė, kurioje funkcijos padidėjimas yra įvertinamas, atsižvelgiant į jos argumento padidėjimą (Nickelson, Shugurov 2005). Čia $H_0^{(2)}(k_{\perp} r')$ – nulinės eilės ir II-osios rūšies Hankelio funkcija, kur $r' = |\vec{r}_s - \vec{r}|$. Dydis $\vec{r}_s = \vec{i}x_s + \vec{j}y_s$ – spindulys-vektorius (1.1 pav.). Čia ds – kontūro L elementas, o dydis s – lanko abscisė.

Visų elektrinių laukų komponentių išraiškos, tenkinančios ribines sąlygas bangolaidžio skerspjūvio kontūruose, begalybėje, briaunoje, parodytos žemiau. Taikant Krylovo-Bogoliubovo metodą, kontūras L dalinamas į N segmentų ir integravimas, išilgai kontūro L , pakeičiamas integralų pagal segmentus $j = 1, \dots, n$ suma.

$$E_z^+ = \sum_{j=1}^n \mu_e^+(s_j) \int_{\Delta L} H_0^{(2)}(k_{\perp}^+ r') ds, \quad (1.9)$$

$$E_z^- = \sum_{j=1}^n \mu_e^-(s_j) \int_{\Delta L} H_0^{(2)}(k_{\perp}^- r') ds. \quad (1.10)$$



1.1 pav. Bangolaidžio skerspjūvis Dekarto koordinatų sistemoje

Fig. 1.1. The cross-section of the waveguide in the Descartes coordinate system

Formules (1.9) ir (1.10) įstačius į formulę (1.2), gaunamos skersinių komponentių išraiškos E_x , E_y :

$$(E_x)^+ = -i\mu_0\mu_r^{\text{SiC}}\omega / (k_{\perp}^+)^2 \left[k_{\perp}^+ \sum_{j=1}^n (\mu_h^+(s_j)) \int_{\Delta L} H_1^{(2)}(k_{\perp}^+ r') \frac{y_s - y_0}{r'} ds \right] \quad (1.11)$$

$$+ ih / (k_{\perp}^+)^2 \left[k_{\perp}^+ \sum_{j=1}^n (\mu_e^+(s_j)) \int_{\Delta L} H_1^{(2)}(k_{\perp}^+ r') \frac{x_s - x_0}{r'} ds \right] - \frac{2\mu_0\mu_r^{\text{SiC}}\omega \cos\theta}{(k_{\perp}^+)^2} \mu_h^+(s_j),$$

$$(E_y)^+ = -ih / (k_{\perp}^+)^2 \left[k_{\perp}^+ \sum_{j=1}^n (\mu_e^+(s_j)) \int_{\Delta L} H_1^{(2)}(k_{\perp}^+ r') \frac{y_s - y_0}{r'} ds \right] \quad (1.12)$$

$$-i\mu_0\mu_r^{\text{SiC}}\omega / (k_{\perp}^+)^2 \left[k_{\perp}^+ \sum_{j=1}^n (\mu_h^+(s_j)) \int_{\Delta L} H_1^{(2)}(k_{\perp}^+ r') \frac{x_s - x_0}{r'} ds \right]$$

$$- \frac{2\mu_0\mu_r^{\text{SiC}}\omega \cos\theta}{(k_{\perp}^+)^2} \mu_h^+(s_j),$$

$$(E_x)^- = -i\mu_0\mu_r^a \omega / (k_\perp^-)^2 \left[k_\perp^- \sum_{j=1}^n (\mu_h^-(s_j)) \int_{\Delta L} H_1^{(2)}(k_\perp^- r') \frac{y_s - y_0}{r'} ds \right] \quad (1.13)$$

$$+ i\hbar / (k_\perp^-)^2 \left[k_\perp^- \sum_{j=1}^n (\mu_e^-(s_j)) \int_{\Delta L} H_1^{(2)}(k_\perp^- r') \frac{x_s - x_0}{r'} ds \right] + \frac{2\mu_0\mu_r^a \omega \cos\theta}{(k_\perp^-)^2} \mu_h^-(s_j),$$

$$(E_y)^- = -i\hbar / (k_\perp^-)^2 \left[k_\perp^- \sum_{j=1}^n (\mu_e^-(s_j)) \int_{\Delta L} H_1^{(2)}(k_\perp^- r') \frac{y_s - y_0}{r'} ds \right] \quad (1.14)$$

$$- i\mu_0\mu_r^a \omega / (k_\perp^-)^2 \left[k_\perp^- \sum_{j=1}^n (\mu_h^-(s_j)) \int_{\Delta L} H_1^{(2)}(k_\perp^- r') \frac{x_s - x_0}{r'} ds \right] + \frac{2\mu_0\mu_r^a \omega \cos\theta}{(k_\perp^-)^2} \mu_h^-(s_j)$$

Funkcijos $\mu_e(s_j)$ ir $\mu_h(s_j)$ skirtingos tame pačiame kontūro taške, kai lauko komponentės yra skirtingose srityse, pvz. $\mu_h^+(s_j) \neq \mu_h^-(s_j)$. Dydis $H_0^{(2)}$ – nulinės eilės ir II-osios rūšies Hankelio funkcija, $H_1^{(2)}$ – pirmosios eilės ir II-osios rūšies Hankelio funkcija. Čia $k_\perp^+ = \sqrt{k^2 \varepsilon_r^{\text{SiC}} \mu_r^{\text{SiC}} - h^2}$ ir $k_\perp^- = \sqrt{h^2 - k^2 \varepsilon_r^a \mu_r^a}$, atitinkamai, – skersinės sklaidimo pastoviosios SiC ir oro terpėse (1.1 pav).

Kontūro L segmentas $\Delta L = L/n$, ir integravimo ribos 1.9–1.14 formulėse – tai segmento kraštai. Kampas θ lygus $g \cdot 90^\circ$, čia g gali kisti nuo 1 iki 4, jei bangolaidžio skerspjuvis – stačiakampio gretasienio formos $\cos \theta = \pm 1$ ir $\sin \theta = \pm 1$ (1.11)–(1.14) formulėse.

Reikia pabrėžti, jog analogiškai gaunamos magnetinio lauko komponentės. Turint visas EM lauko komponentes integralinėje formoje, išrašome jas į ribines sąlygas (1.5) ir (1.6). Gauname homogeninę algebrinių lygčių sistemą su nežinomaisiais $\mu_e^+(s_j)$, $\mu_h^+(s_j)$, $\mu_e^-(s_j)$, $\mu_h^-(s_j)$. Sistema sprendžiama, kai jos determinantas lygus nuliui. Šios lygties sprendiniai leidžia nustatyti pagrindinės ir aukštesniųjų modų kompleksines sklaidimo pastoviasias. Žinant minėtas pastoviasias, galime suskaičiuoti nagrinėjamos modos elektrinius ir magnetinius laukus ir pagrindinės bei aukštesniųjų modų dispersines charakteristikas.

1.3. Dalinių sričių metodas, skirtas izotropiniam bangolaidžiui

Dalinių sričių metodo esmė – elektrinio ir magnetinio lauko dedamųjų skirtingose bangolaidžio srityse, t. y. ore ir medžiagoje, sulyginimas. Taikant šį metodą išpildomos ribinės sąlygos.

Elektrinio E_z^{SiC} ir magnetinio H_z^{SiC} laukų išilginės komponentės, kurios tenkina Maxwello lygtis SiC (čia gali būti naudojama bet kokia izotopinė medžiaga) terpėje, yra tokios:

$$E_z^{\text{SiC}} = A_1 J_m(k_\perp^+ r) \exp(im\varphi), \quad H_z^{\text{SiC}} = B_1 J_m(k_\perp^+ r) \exp(im\varphi), \quad (1.15)$$

čia J_m – m eilės Besselio funkcija, A_1 , B_1 – ieškomosios amplitudės.

Skersinės bangos skaičius bangolaidžio išorėje imamas su „–“ ženklu, kai medžiagos, esančios už bangolaidžio ribų, santykinė dielektrinė skvarba $\epsilon_r > 0$. Elektrinio E_z^a ir magnetinio H_z^a laukų išilginės komponentės, tenkinančios Maxwello lygtis oro terpėje:

$$E_z^a = A_2 H_m^{(2)}(k_\perp^- r) \exp(im\varphi), \quad H_z^a = B_2 H_m^{(2)}(k_\perp^- r) \exp(im\varphi), \quad (1.16)$$

čia A_2 , B_2 – ieškomosios amplitudės, $H_m^{(2)}$ – m eilės ir antrosios rūšies Hankelio funkcija, r – apskritojo bangolaidžio spindulys, m – azimutinis periodiškumo indeksas (arba azimutinis kampas), charakterizuojantis lauko azimutines variacijas. Tolimesnis sprendimas atliekamas pagal 1.1 skyriuje aprašytą schemą. Sprendimo rezultatas – dispersinė lygtis determinanto pavidalu:

$$\begin{aligned} & A_1 J_m(k_\perp^+ r) - A_2 H_m^{(2)}(k_\perp^- r) = 0, \\ & B_1 J_m(k_\perp^+ r) - B_2 H_m^{(2)}(k_\perp^- r) = 0, \\ & \frac{mh}{(k_\perp^+)^2 r} A_1 J_m(k_\perp^+ r) + \frac{i\omega\mu_0\mu_r^{\text{SiC}}}{k_\perp^+} B_1 J_m'(k_\perp^+ r) \\ & - \frac{mh}{(k_\perp^-)^2 r} A_2 H_m^{(2)}(k_\perp^- r) - \frac{i\omega\mu_0\mu_r^a}{k_\perp^-} B_2 \left(H_m^{(2)}(k_\perp^- r) \right)' = 0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{mh}{\left(k_{\perp}^{+}\right)^2 r} B_1 J_m\left(k_{\perp}^{+} r\right) - \frac{i\omega\epsilon_0\epsilon_r^{\text{SiC}}}{k_{\perp}^{+}} A_1 J_m'\left(k_{\perp}^{+} r\right) \\
& - \frac{mh}{\left(k_{\perp}^{-}\right)^2 r} B_2 H_m^{(2)}\left(k_{\perp}^{-} r\right) + \frac{i\omega\epsilon_0\epsilon_r^a}{k_{\perp}^{-}} A_2 \left(H_m^{(2)}\left(k_{\perp}^{-} r\right)\right)' = 0
\end{aligned} \tag{1.17}$$

Naudojant Mullerio metodą galime suskaičiuoti determinanto (1.17) kompleksines šaknis. Dispersinės lygties (1.17) sprendiniai – tai bangolaidžio modų sklaidimo pastoviosios. Suskaičiavus ar eksperimentiškai išmatavus nagrinėjamų modų sklaidimo pastoviąsias, galime suskaičiuoti EM lauko stiprį bangolaidyje ir šalia jo.

1.4. Dalinių sričių metodas, skirtas girotropiniam bangolaidžiui

Girotropija yra dalinis anizotropijos atvejis, viena iš jos rūšių. Anizotropija fizikoje yra nevienalyčių medžiagų, daugiausia kristalų, fizikinių savybių (mechaninių, šiluminių, elektrinių, magnetinių, optinių) nevienodumas skirtingomis kryptimis (Nickelson, Ašmontas 2007).

Tiriamasis bangolaidis yra n -InSb puslaidininkio bangolaidis, esantis išoriniame nuostoviam magnetiniame lauke, kurio magnetinė indukcija B_0 . Elektrodinaminę užduotį galima išspręsti dalinių sričių metodu. Girotropinio bangolaidžio EM lauko išilginės dedamosios buvo skaičiuojamos iš (Nickelson, Ašmontas 2007):

$$E_z^S = \left[a A_1 J_m\left(k_{\perp 1}^S r\right) + B_1 J_m\left(k_{\perp 2}^S r\right) \right] e^{\pm im\varphi}, \tag{1.18}$$

$$H_z^S = \left[A_1 J_m\left(k_{\perp 1}^S r\right) + b B_1 J_m\left(k_{\perp 2}^S r\right) \right] e^{\pm im\varphi}, \tag{1.19}$$

čia A_1 , B_1 EM bangų nežinomieji koeficientai, $J_m\left(k_{\perp 1,2}^S r\right)$ – Besselio funkcija, kurios argumentas yra $k_{\perp 1}^S r$ arba $k_{\perp 2}^S r$, $k_{\perp 1}^S$, $k_{\perp 2}^S$ – pirmas ir antras, atitinkamai, skersiniai bangos skaičiai puslaidininkiniame bangolaidyje, m – azimutinis indeksas. „ $\pm$ “ eksponentės ženklas atitinkantis kairiosios ($e^{+im\varphi}$) ir dešinėsios ($e^{-im\varphi}$) apskritiminės poliarizacijos bangas, sklindančias puslaidininkio bangolaidžiu, a – sąsajos koeficientas, nurodantis, kokiomis proporcijomis susimaišo H ir E rūšies bangų amplitudės kvazi- E hibridinėse bangose, b – sąsajos koefi-

cientas, nurodantis kokiomis proporcijomis susimaišo E ir H tipų bangų amplitudės kvazi- H hibridinėse bangose. Azimutinės dedamosios skaičiuojamos iš:

$$\begin{aligned}
 E_{\varphi}^s = & \frac{I}{\Delta_{\text{PF}}} \left\{ \left[A_1 k_{\perp 1}^s J'_m(k_{\perp 1}^s r) + b B_1 k_{\perp 2}^s J'_m(k_{\perp 2}^s r) \right] f_1 + \right. \\
 & \frac{(\pm i m)}{r} \left[A_1 J_m(k_{\perp 1}^s r) + b B_1 J_m(k_{\perp 2}^s r) \right] f_2 - \\
 & \frac{(\pm i m)}{r} \left[a A_1 J_m(k_{\perp 1}^s r) + B_1 J_m(k_{\perp 2}^s r) \right] f_3 + \\
 & \left. \left[a A_1 k_{\perp 1}^s J'_m(k_{\perp 1}^s r) + B_1 k_{\perp 2}^s J'_m(k_{\perp 2}^s r) \right] f_4 \right\} e^{\pm i m \varphi},
 \end{aligned} \tag{1.20}$$

$$\begin{aligned}
 H_{\varphi}^s = & - \frac{I}{\Delta_{\text{PF}}} \left\{ \frac{(\pm i m)}{r} \left[a A_1 J_m(k_{\perp 1}^s r) + B_1 J_m(k_{\perp 2}^s r) \right] s_1 + \right. \\
 & \left[a A_1 k_{\perp 1}^s J'_m(k_{\perp 1}^s r) + B_1 k_{\perp 2}^s J'_m(k_{\perp 2}^s r) \right] s_2 + \\
 & \frac{(\pm i m)}{r} \left[A_1 J_m(k_{\perp 1}^s r) + b B_1 J_m(k_{\perp 2}^s r) \right] s_3 - \\
 & \left. \left[A_1 k_{\perp 1}^s J'_m(k_{\perp 1}^s r) + b B_1 k_{\perp 2}^s J'_m(k_{\perp 2}^s r) \right] s_4 \right\} e^{\pm i m \varphi},
 \end{aligned} \tag{1.21}$$

čia $J'_m(k_{\perp 1,2}^s r)$ – Besselio pirmosios rūšies m -tosios eilės funkcijų su pirmuoju $k_{\perp 1}^s r$ ir antruoju $k_{\perp 2}^s r$ argumentais išvestinės pagal puslaidininkinio bangolaidžio spindulį r ,

$$\begin{aligned}
 f_1 = & i \omega \mu_0 \left[k^2 \varepsilon_{xx} (\mu_{xx}^2 - \mu_{xy}^2) - h^2 \mu_{xx} \right], \\
 f_2 = & \omega \mu_0 \left[k^2 \varepsilon_{xy} (\mu_{xx}^2 - \mu_{xy}^2) - h^2 \mu_{xy} \right], \\
 f_3 = & i h \left[k^2 (\varepsilon_{xx} \mu_{xx} + \varepsilon_{xy} \mu_{xy}) - h^2 \right], \\
 f_4 = & h k^2 (\varepsilon_{xx} \mu_{xy} + \varepsilon_{xy} \mu_{xx}),
 \end{aligned} \tag{1.22}$$

čia h – išilginė sklaidymo dedamoji,

$$\begin{aligned}
s_1 &= \omega \varepsilon_0 \left[k^2 \mu_{xy} (\varepsilon_{xx}^2 - \varepsilon_{xy}^2) + h^2 \varepsilon_{xy} \right], \\
s_2 &= i \omega \varepsilon_0 \left[k^2 \mu_{xx} (\varepsilon_{xx}^2 - \varepsilon_{xy}^2) - h^2 \varepsilon_{xx} \right], \\
s_3 &= f_3 = i h \left[k^2 (\varepsilon_{xx} \mu_{xx} + \varepsilon_{xy} \mu_{xy}) - h^2 \right], \\
s_4 &= f_4 = h k^2 (\varepsilon_{xx} \mu_{xy} + \varepsilon_{xy} \mu_{xx}),
\end{aligned} \tag{1.23}$$

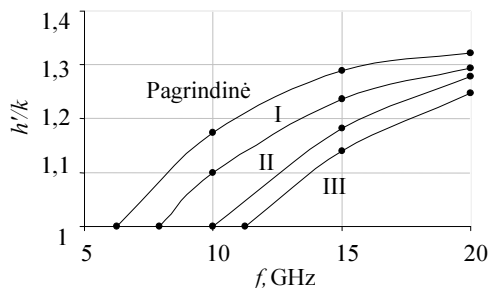
čia ε_{xx} , μ_{xx} , ε_{xy} , μ_{xy} – santykinės dielektrinės ir magnetinės skvarbų tenzorių dedamosios.

1.5. Algoritmų testavimas

Atliktas sukurtų algoritmų testavimas. Testavimo pagrindiniai rezultatai: sukurta kompiuterinė programa SIL metodo pagrindu MATLABo terpėje. Programa galima suskaičiuoti bangolaidžių su sudėtingos formos skerspjūviais dispersines charakteristikas ir 2D ir 3D EM laukų pasiskirstymus. Kompiuterinė įranga buvo testuota, lyginant šio darbo rezultatus su rezultatais publikuotais kituose šaltiniuose, pavyzdžiui kvadratinio dielektrinio bangolaidžio dispersinės charakteristikos buvo paimtos iš (Ikeuchi *et al.* 1981), o mikrojuostelinės linijos dispersinės charakteristikos – iš (Nickelson, Shugurov 2005). Gautas geras rezultatų sutapimas (1.2 ir 1.3 pav.). 1.2 paveiksle parodytos dispersinės charakteristikos, gautos atveju stačiakampio bangolaidžio, kurio matmenys $15 \cdot 10^{-3} \times 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ ir medžiagos santykinė dielektrinė skvarba 2,06. Paveiksle teoriniai šio darbo skaičiavimų rezultatai pavaizduoti ištisinėmis linijomis, o rezultatai gauti (Ikeuchi *et al.* 1981) – taškais.

Mikrojuostelinės linijos (1.3 pav.) matmenys yra tokie: $d = 3,17 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, $w = 3,043 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, $l_1 = l_2 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, $t = 3 \cdot 10^{-6} \text{ m}$. Mikrojuostelinės linijos pagrindo santykinė dielektrinė skvarba $\varepsilon_r = 11,8$.

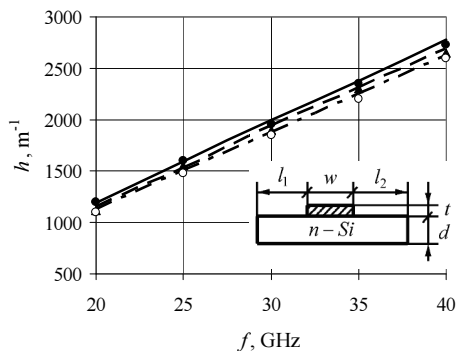
1.3 paveiksle šio darbo skaičiavimų rezultatai parodyti taškais (pagrindinė moda), trikampaiais (pirmoji aukštesnioji moda), apskritimais (antroji aukštesnioji moda). 1.3 paveiksle duomenys iš mokslinio darbo (Nickelson, Shugurov 2005) parodyti ištisine linija (pagrindinė moda), punktyrine linija (pirmoji aukštesnioji moda), punktyrine-taškine linija (antroji aukštesnioji moda).



1.2 pav. Stačiakampio dielektrinio bangolaidžio dispersinių charakteristikų palyginimas su dispersinėmis charakteristikomis, publikuotomis (Ikeuchi *et al.* 1981). Gauti rezultatai pavaizduoti ištisinėmis linijomis, o rezultatai iš šaltinio (Ikeuchi *et al.* 1981) – taškais.

Modos numeris pažymėtas romėniškais skaičiais

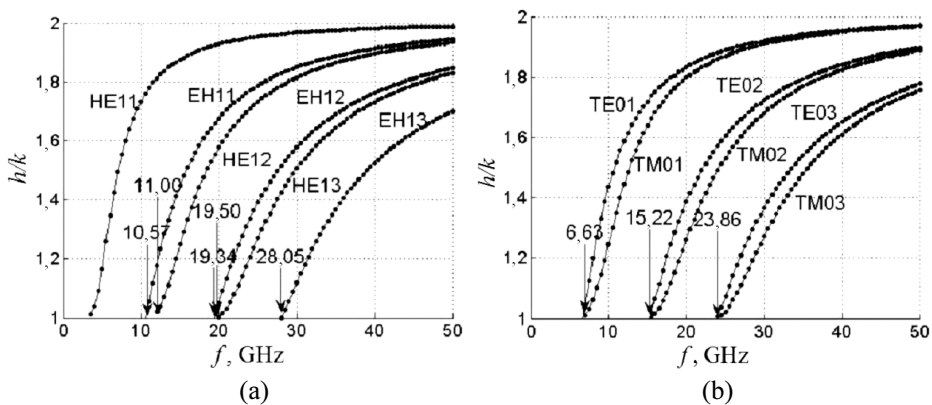
Fig. 1.2. A comparison of the dispersion characteristics of the rectangular dielectric waveguide with the dispersion characteristics taken from Ref. (Ikeuchi *et al.* 1981). The results of current work are presented by means of solid lines and the results taken from (Ikeuchi *et al.* 1981) – by dots. The modes are classified using the roman numerals



1.3 pav. Mikrojuostelinės linijos dispersinių charakteristikų palyginimas su dispersinėmis charakteristikomis publikuotomis darbe (Nickelson, Shugurov 2005). Šio darbo rezultatai parodyti taškais (pagrindinė moda), trikampaiais (pirmoji aukštesnioji moda), apskritimais (antroji aukštesnioji moda). Duomenys iš (Nickelson, Shugurov 2005) parodyti ištisine linija (pagrindinė moda), punktyrine linija (pirmoji aukštesnioji moda), punktyrine-taškine linija (antroji aukštesnioji moda)

Fig. 1.3. The comparison of the dispersion characteristics of the microstrip line with the dispersion characteristics taken from Ref. (Nickelson, Shugurov 2005). Results of current work are presented by dots (the main mode), by triangles (the first higher mode), and by circles (the second higher mode). The results from Ref. (Nickelson, Shugurov 2005) are presented by solid line (the main mode), by dashed line (the first higher mode), and by dash-dot line (the second higher mode)

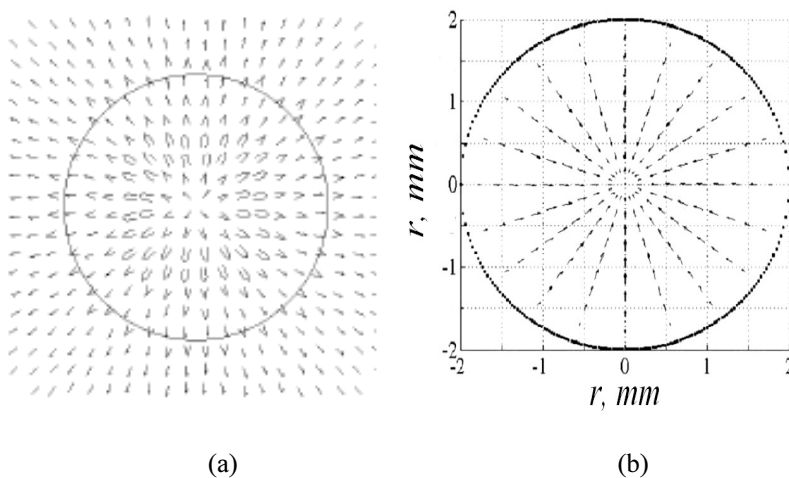
Disertaciniame darbe sukurtos kompiuterio programos, dalinių sričių metodo pagrindu MATLABo terpėje, skirtos dispersinių charakteristikų ir 2D & 3D EM laukų pasiskirstymų apskrituosiuose bangolaidžiuose skaičiavimams. Ši programinė įranga buvo testuota, lyginant rezultatus su duomenimis iš (Kim 2004). 1.4 paveiksle parodytos dispersinės charakteristikos apskritojo dielektrinio bangolaidžio, kurio spindulys $r = 10^{-2}$ m, dielektriko santykinė dielektrinė skvarba $\epsilon_r = 4$. Paveiksle 1.4(a) parodytos šešios modos, kurių azimutinio periodiškumo indeksas $m = 1$, o paveikslo 1.4(b) dalyje – šešios modos, kurių azimutinio periodiškumo indeksas yra $m = 0$. Geras skaičiavimų rezultatų sutapimas su duomenimis iš (Kim 2004) rodo, jog pasirinktas modelis gerai tinka apskritųjų dielektrinių bangolaidžių dispersinių charakteristikų aprašymui.



1.4 pav. Apskritojo dielektrinio bangolaidžio dispersinės charakteristikos: (a) – hibridinės modos ir (b) – TE_{mn} , TM_{mn} rūšies modos. Rezultatai iš (Kim 2004) parodyti ištisinėmis linijomis, o šio darbo rezultatai – taškais

Fig. 1.4. The dispersion characteristics of the dielectric waveguide: (a) – the hybrid modes and (b) – TE_{mn} , TM_{mn} modes. The results from Ref. (Kim 2004) are displayed by solid lines and results of current work – by dots

1.5 paveiksle pavaizduota sukurtosios kompiuterinės programos, skirtos EM laukų skaičiavimams, testavimo rezultatai. Elektrinio lauko pasiskirstyme (Kajfez, Kishk 2002), pavaizduotame 1.5(a) paveiksle, elektrinio lauko jėgų linijų ilgiai proporcingi elektrinio lauko intensyvumams konkrečiame bangolaidžio taške.



1.5 pav. TM_{01} modos, sklindančios dielektriniu bangolaidžiu, elektrinių laukų pasiskirstymai: (a) – rezultatai iš darbo (Kajfez, Kishk 2002) ir (b) – šio darbo gauti elektrinių jėgų linijų pasiskirstymai

Fig. 1.5 The electric field's distribution of the TM_{01} modes, propagating in the dielectric waveguide: (a) – the results from Ref. (Kajfez, Kishk 2002) and (b) – current work

Suskaičiuotame elektrinio lauko pasiskirstyme (1.5 (b) pav.) elektrinio lauko jėgų linijų ilgiai taip pat proporcingi intensyvumui elektrinio lauko konkrečiame bangolaidžio taške. Kadangi moda TE_{01} charakterizuojama azimutinio periodiškumo indeksu $m = 0$, darbe negautos elektrinio lauko kitimo priklausomybės bangolaidžio spindulio kryptimi.

Sukurtos kompiuterio programos testuotos ne tik TE_{01} bangos atžvilgiu. Kitų modų elektrinių laukų pasiskirstymai taip pat taisyklingi. Programose atsižvelgta į nuostolius bangolaidžio medžiagoje. Testuota nuostolius bangolaidyje keičiant palaipsniui nuo $Im(\epsilon_r) = 0$ ir $Im(\mu_r) = 0$ iki užduotų verčių. Tuo tikslu naudotas Mullerio metodas, apie kurį bus kalbama sekančiame poskyryje.

1.6. Mullerio metodas

Mullerio metodas naudojamas ieškant nulinių analitinių funkcijų (dalina gali būti naudingas, ieškant nulinių polinomų). Mullerio metodas yra sekanto metodo variacija. Šis metodas yra taip pat naudojamas, ieškant analitinių funkcijų kompleksinių šaknų. Sekanto metodo pradžia yra du pradiniai spėjimai x_0 ir x_1 . Mullerio gi metode naudojami trys pradiniai spėjimai x_0 , x_1 , x_2 .

Šiame darbe Mullerio metodas panaudotas skaičiuojant kompleksines sklaidimo pastovias bangolaidžiuose, turinčiuose skirtingos formos skerspjūvius. Visi bangolaidžiai, pagaminti iš spinduliuotę sugeriančių medžiagų, disertaciniame darbe yra tiriami, taikant Mullerio metodą. Mullerio metodas yra taikomas, siekiant surasti kompleksines determinanto šaknis

1.7. Pirmojo skyriaus išvados

1. Sukurta kompiuterio programa, *Singuliariųjų integralinių lygčių* metodo pagrindu, leidžia ištirti sudėtingų skerspjūvių formų bangolaidinių struktūrų dispersines charakteristikas ir EM laukų pasiskirstymus. Lyginant suskaičiuotą programą ir gautą iš kitų literatūros šaltinių rezultatus, nesutapimas neviršija 5 %.
2. Sukurta kompiuterio programa, dalinių sričių metodo pagrindu, leidžia ištirti apskritųjų bangolaidinių struktūrų dispersines charakteristikas ir EM laukų pasiskirstymus. Lyginant suskaičiuotą programą ir gautą iš kitų literatūros šaltinių rezultatus, nesutapimas neviršija 0,1%.
3. Sukurta kompiuterio programa Mullerio metodo pagrindu leidžia ištirti EM bangos, sklindančios bangolaidžiu, energijos nuostolius, įskaitant tuos kurių $\operatorname{tg}(Im(\epsilon_r)/Re(\epsilon_r)) > 1$.

Apskritųjų bangolaidžių elektrodinaminė analizė

Šiame skyriuje pateikta metamedžiagos ir SiC bangolaidžių elektrodinaminė analizė. Nagrinėjami SiC bangolaidžių su skirtingais matmenimis dispersinių charakteristikų skaičiavimų rezultatai, esant įvairioms temperatūroms. Analizuojamos dispersinės charakteristikos ir elektrinių laukų stiprių pasiskirstymai dvimatėje ir trimatėje erdvėje bei magnetinių laukų stiprių pasiskirstymai dvimatėje erdvėje. Skyriuje svarstomos ištirtųjų bangolaidinių struktūrų praktinių taikymų galimybės. Nustatytos sąlygos, kurioms esant modų nuostoliai beveik nesikeičia tam tikrame dažnių ruože. Tokiomis sąlygomis bangolaidinė sistema gali veikti kaip elektromagnetinių bangų fazės modulatorius (Lietuvos Respublikos patentas Nr. 5710). Taip pat nustatyta, jog greitosios modos, sklindančios apskrituoju SiC bangolaidžiu, kurio spindulys 3 mm, nuostoliai gali būti per 5000 kartų mažesni už pagrindinės modos nuostolius. Toks reiškinys gali būti panaudotas praktikoje, kuriant fiderines linijas ar signalų mažų nuostolių specifinius įrenginius. Siekiant nustatyti EM bangų, sklindančių bangolaidžiuose rūšis, darbe pateiktos lentelės su EM lauko šešių komponentių vertėmis. Iš lentelių seka, jog sklindančios bangos yra hibridinės.

2.1. Apskritųjų metamedžiagos bangolaidžių elektrodinaminė analizė

Skyriuje nagrinėjami skirtingų spindulių apskritieji bangolaidžiai, pagaminti iš spinduliuotę sugeriančių medžiagų. Atliktų tyrimų tikslas išsiaiškinti EM bangų energijos nuostolių ir kitų charakteristikų priklausomybių nuo dažnio skirtumus, keičiant apskritojo bangolaidžio spindulį.

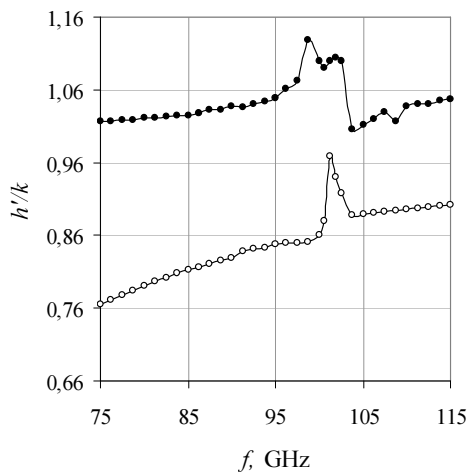
▪ Metamedžiagos apskritojo bangolaidžio, kurio spindulys $r = 2,5$ mm, elektrodinaminė analizė

Apskritasis, 2,5 mm spindulio bangolaidis, užpildytas metamedžiaga, analizuotas darbe (Gric *et al.* 2010). Disertaciniame darbe suskaičiuotos analogiško bangolaidžio dispersinės charakteristikos pavaizduotos 2.1 paveiksle, o EM laukų pasiskirstymai – 2.2–2.5 paveiksluose.

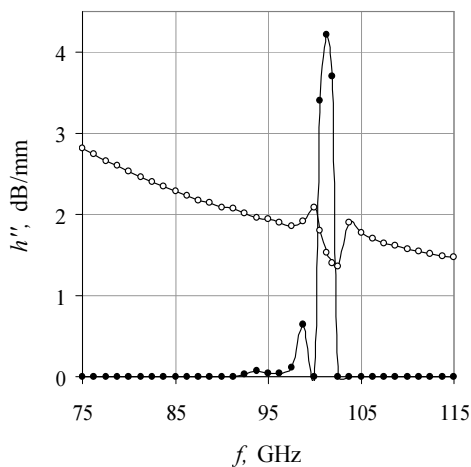
Pagrindinės modos (2.1 pav.) eiga pavaizduota juodais taškais, o pirmosios aukštesniosios modos – apskritimais. Kaip parodyta 2.1(a) paveiksle, pagrindinės ir pirmosios aukštesniosios modų normuotų fazinių pastoviųjų priklausomybių nuo dažnio eigos beveik lygiagrečios. Skirtinga kreivių eiga pastebima tik 97–102 GHz dažnių ruože.

Nustatyta, jog pagrindinės modos nuostolių kreivė pasiekia maksimalią reikšmę EM bangos dažniui 101,25 GHz. Šiame dažnyje metamedžiaga įgyja DNG savybes (t.y. santykinė dielektrinė ir magnetinė skvarbos, atitinkamai, yra $\epsilon_r^m = -9,17 - i0,83$ ir $\mu_r^m = -0,75$) (Penciu *et al.* 2006). Kreivių maksimumai (rezonansai), pavaizduoti 2.1 paveiksle, atsiranda dėl to, kad bangos ilgis yra kartinis bangolaidžio spinduliui. Apskritojo bangolaidžio skersmuo yra EM bangos, sklindančios bangolaidžiu, bangos ilgio eilės.

Dispersinių charakteristikų rezonansų dažniniuose intervaluose μ' ir μ'' ženklas pasikeičia priešingu. Bangolaidžiu sklindančios EM bangos pagrindinės modos nuostolių vertės gautos 425 kartus mažesnės 75–100 GHz ir 102,5–115 GHz dažnių ruožuose nei šios modos nuostolių maksimumo taške. Tačiau pirmos aukštesniosios modos nuostoliai gauti apytikriai 200 kartų didesni minėtuose dažnių ruožuose (2.1(b) pav.).



(a)



(b)

2.1 pav. Metamedžiagos apskritojo bangolaidžio dispersinės charakteristikos: (a) – normuotų fazinių pastoviųjų priklausomybės nuo dažnio; (b) – slopinimo pastoviųjų (nuostolių) priklausomybės nuo dažnio. Pagrindinės modos eiga vaizduojama juodais taškais, o pirmosios aukštesniosios modos – apskritimais

Fig. 2.1. The dispersion characteristics of the circular waveguide made of metamaterial:

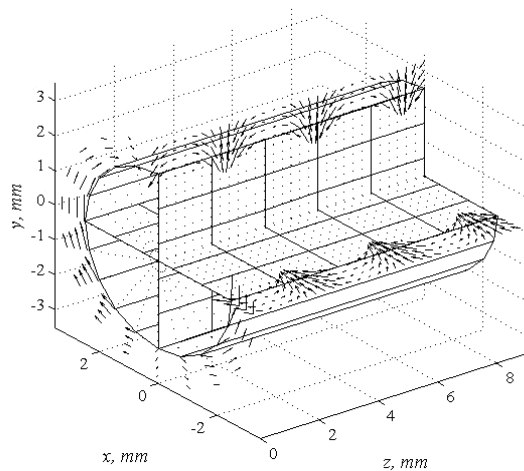
(a) – the dependences of the normalized propagation constants upon frequency; (b) – the dependences of the attenuation constants (losses) upon frequency. The main mode is denoted by points and the first higher mode by circles

Gautieji rezultatai patvirtina, jog apskritasis metamedžiagos bangolaidis gali veikti kaip mikrobangų filtras. Apskritaisiais metamedžiagos bangolaidžiais gali sklisti 75–100 GHz ir 102,5–115 GHz dažnių ruožų EM bangos, patirdamos minimalius nuostolius.

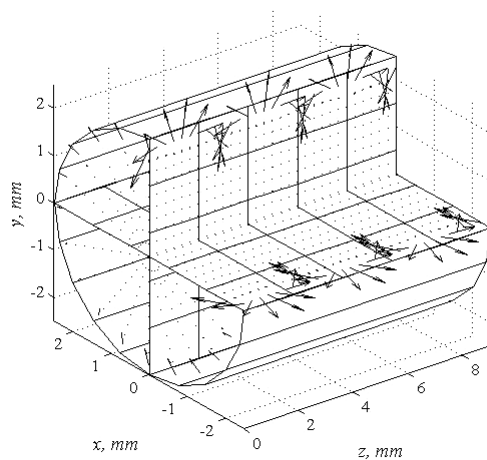
Pagrindinės modos EM bangų elektrinių laukų pasiskirstymai suskaičiuoti 95 GHz ir 110 GHz dažnių EM bangoms ir pavaizduoti 2.2 ir 2.3 paveiksluose, o pirmosios aukštesniosios modos elektrinių laukų stiprių pasiskirstymai – 2.4 ir 2.5 paveiksluose. Nustatyta, jog elektrinis laukas metamedžiagos bangolaidžio viduje apytikriai 100 kartų mažesnis nei bangolaidžio išorėje. Todėl didesnio vaizdumo dėlei, 2.2(b)–2.5(b) paveiksluose elektrinio lauko stiprio vektorių ilgį, bangolaidžio viduje, teko santykinai pailginti. Taip pat nustatyta, jog 95 GHz EM bangos, sklindančios metamedžiaga, patiria 2,2 kartus didesnius nuostolius, nei EM bangos, kurių dažnis 110 GHz. Dėl šios priežasties 95 GHz dažnio EM banga bangolaidyje sukuria silpnesnį elektrinį lauką (lentelės 2.1 ir 2.2), palyginus jį su sukuriamu 110 GHz dažnio EM bangos. EM bangos 95 GHz dažnio atveju gauta santykinė dielektrinė skvarba $\epsilon_r = -23,75 - i18,75$, o 110 GHz dažnio atveju – $\epsilon_r = -10,83$). Todėl, vaizdumo dėlei, elektrinio lauko stiprio vektoriai, bangolaidžio viduje, 143 kartus pailginti 95 GHz dažnio EM bangos atveju (2.4(b) pav.) ir 14 kartų kai EM bangos dažnis 110 GHz (2.3(b) pav.). Skaičiavimai atlikti 10000 taškų, pasirinktų bangolaidžio viduje (t.y. skerspjūvyje) ir jo išorėje.

Nustatyta, jog elektrinio lauko pasiskirstymas nėra tolygus bangolaidžio perimetre (2.2–2.5 pav.). Didžiausias elektrinis laukas lokalizuojasi bangolaidžio išorėje, kai ϕ įgyja reikšmes 0 ar π . Gauti rezultatai rodo, jog esant stipriam elektriniam laukui bangolaidžio išorėje, jis susilpnėja bangolaidžio viduje. Pvz., esant tam pačiam kampui, elektrinis laukas gali būti 143 arba 14 kartų didesnis bangolaidžio viduje. Tai priklauso nuo dažnio, kuriame yra skaičiuojamas elektrinis laukas. Maksimalus elektrinis laukas metamedžiagos bangolaidžio viduje (2.2(b)–2.5(b) pav.) gautas, kai $\phi = \pi/2$ arba $3\pi/2$. Taip pat nustatyta, jog elektrinio lauko stipris išilgai bangolaidžio (2.2–2.5 pav.) kinta periodiškai.

Palyginus 2.2(a) ir 2.3(a) paveikslus matyti, jog 95 GHz dažnio EM bangos pagrindinės modos elektrinis laukas dvigubai stipresnis nei 110 GHz dažnio pagrindinės modos. Abiejų dažnių atvejais, elektrinių laukų stiprių pasiskirstymai skiriasi nedaug. Elektrinio lauko stiprių amplitudės kryptimi išilgai bangolaidžio ašies, nekinta šuoliškai, kadangi 95 GHz dažnio EM bangos pagrindinės modos nuostoliai 425 kartų mažesni už 110 GHz dažnio bangos pagrindinės modos nuostolius. Pirmos aukštesniosios modos elektrinio lauko amplitudė mažėja išilgai koordinatės z .



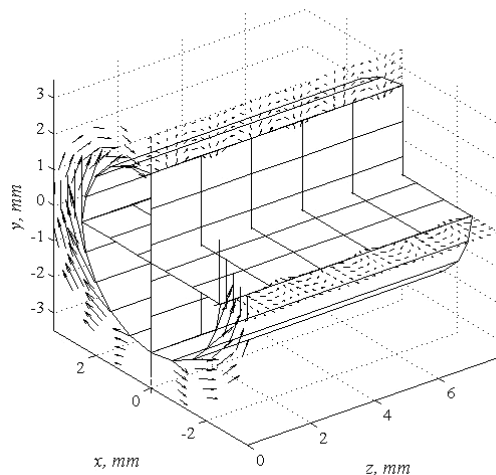
(a)



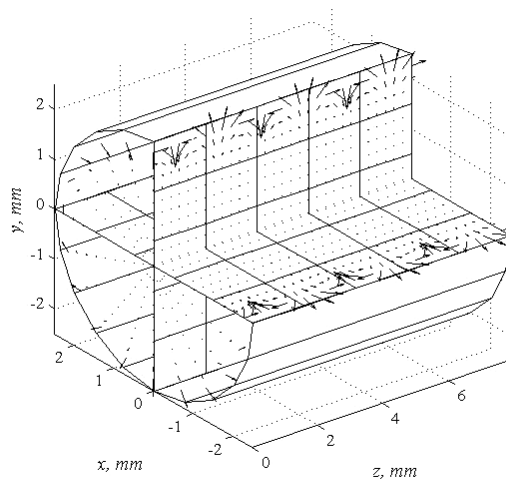
(b)

2.2 pav. Pagrindinės modos elektrinių laukų pasiskirstymas, kai EM bangos dažnis 95 GHz: (a) – elektrinio lauko stiprio vektoriai bangolaidžio išorėje; (b) – 143 kartus padidinti elektrinio lauko stiprio vektoriai bangolaidžio viduje

Fig. 2.2. The electric field distributions of the main mode when the EM wave frequency is 95 GHz: (a) – the electric field strength lines outside the waveguide; (b) the 143 times enlarged the electric field strength lines inside the waveguide



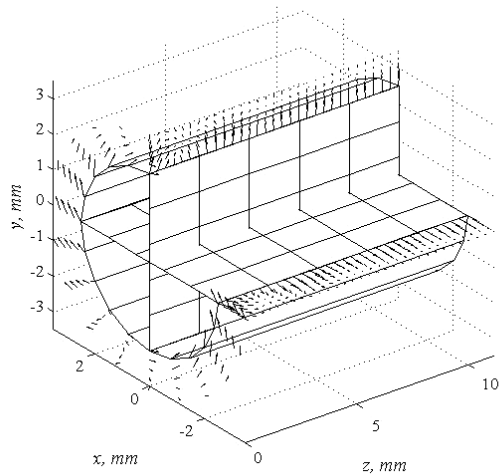
(a)



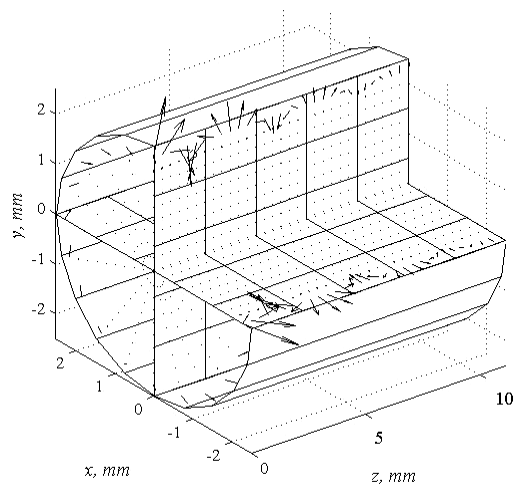
(b)

2.3 pav. 110 GHz dažnio EM bangos pagrindinės modos elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas: (a) bangolaidžio išorėje; (b) 14 kartų padidinti stiprio vektoriai bangolaidžio viduje

Fig. 2.3. The electric field strength distribution of a 110 GHz frequency EM wave (main mode): (a) outside the waveguide and (b) extended for 14 times inside the waveguide



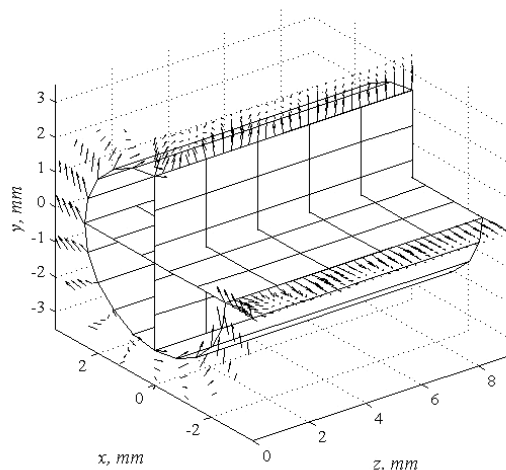
(a)



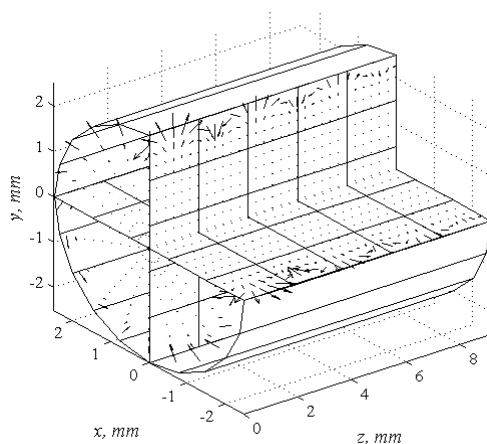
(b)

2.4 pav. 95 GHz dažnio EM bangos pirmos aukštesniosios modos kuriamo elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas: (a) bangolaidžio išorėje; (b) 143 kartų padidinti stiprio vektoriai bangolaidžio viduje

Fig. 2.4. The electric field strength distributions of the first higher mode when the EM wave's frequency is 95 GHz: (a) outside the waveguide; (b) extended for 143 times inside the waveguide



(a)



(b)

2.5 pav. 110 GHz dažnio EM bangos pirmos aukštesniosios modos elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas: (a) bangolaidžio išorėje; (b) 14 kartų padidinti stiprio vektoriai bangolaidžio viduje

Fig. 2.5. The electric field's strength distribution of the first higher mode when the EM wave frequency is 110 GHz: (a) outside the waveguide; (b) 14 times extended lines inside the waveguide

Skaiciavimų rezultatuose (2.4(b) ir 2.5(b) pav.) gautas bangos slopinimas. Slopinimus sąlygoja 2 dB/mm nuostoliai (2.1(b) pav.) 95 GHz EM bangų pirmos aukštesniosios modos atveju ir 1,5 dB/mm, kai EM bangų dažnis yra 110 GHz. Suskaičiuotas elektrinio lauko stipris bangolaidžio viduje mažesnis nei bangolaidžio išorėje, visų nagrinėtų dažnių srityje. Tačiau pagrindinai elektrinis laukas lokalizuotas riboje bangolaidis-oras.

Palyginus 2.2 ir 2.4 paveikslus, matome, jog pagrindinės modos elektrinių laukų pasiskirstymuose nėra variacijų pagal bangolaidžio spindulį, t. y. elektrinio lauko vektorių kryptys nesikeičia pagal bangolaidžio spindulį. Tačiau pirmosios aukštesniosios modos elektrinių laukų pasiskirstymuose egzistuoja viena variacija. Gautas rezultatas neprieštarauja elektrodinamikos dėsniams.

2.1 lentelė. Pagrindinės modos 95 GHz ir 110 GHz dažnių EM bangų elektrinio lauko komponentės taške, kurio koordinatės $r = 2$ mm, $\varphi = 45^\circ$

Table 2.1. The EM field components of the main mode when the frequency is 95 GHz or 110 GHz, $r = 2$ mm, $\varphi = 45^\circ$

$f = 95$ GHz		
E_z [V/m]	E_x [V/m]	E_y [V/m]
$-2,6 \cdot 10^{-5} + i2,7 \cdot 10^{-4}$	$-2,8 \cdot 10^{-5} + i1,9 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-6} - i3,3 \cdot 10^{-5}$
H_z [A/m]	H_x [A/m]	H_y [A/m]
$2,5 \cdot 10^{-7} - i2 \cdot 10^{-7}$	$-2,4 \cdot 10^{-8} - i2,9 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-6} + i1,8 \cdot 10^{-7}$
$f = 110$ GHz		
E_z [V/m]	E_x [V/m]	E_y [V/m]
$6,7 \cdot 10^{-3} + i6,7 \cdot 10^{-3}$	$-2,7 \cdot 10^{-3} + i2,7 \cdot 10^{-3}$	$-7,9 \cdot 10^{-4} - i7,9 \cdot 10^{-4}$
H_z [A/m]	H_x [A/m]	H_y [A/m]
$3,1 \cdot 10^{-12} - i1,1 \cdot 10^{-3}$	$-3,3 \cdot 10^{-6} - i3,3 \cdot 10^{-6}$	$7,2 \cdot 10^{-5} - i7,2 \cdot 10^{-5}$

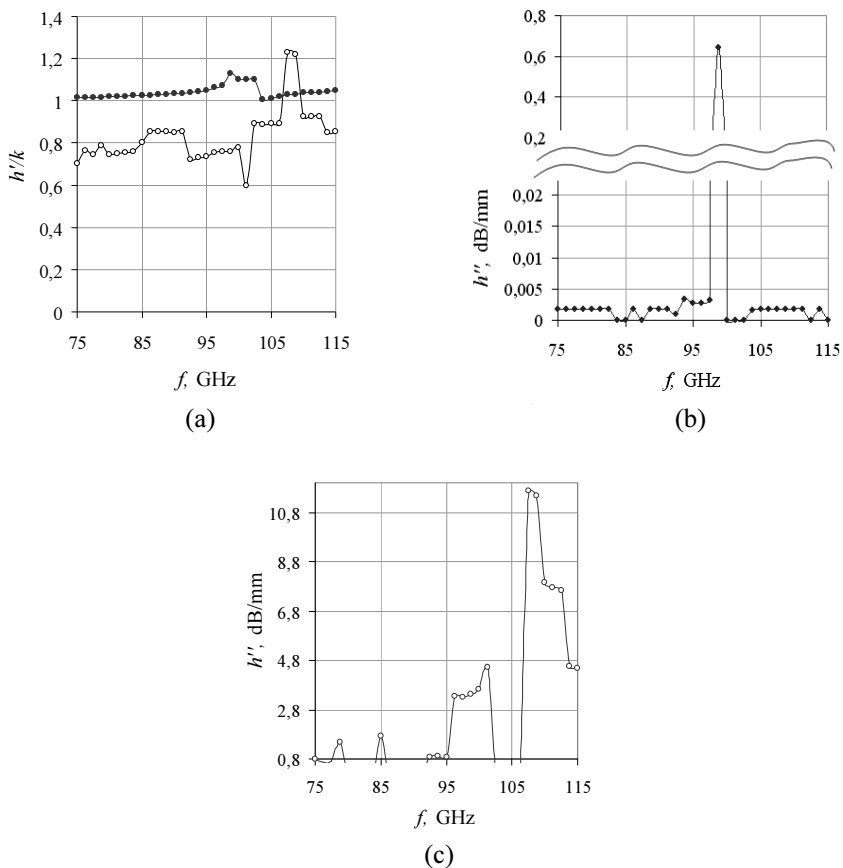
2.2 lentelė. Pirmos aukštesniosios modos 95 GHz ir 110 GHz dažnių EM laukų komponentės taške, kurio koordinatės $r = 2$ mm, $\varphi = 45^\circ$

Table 2.2. The EM field components of the first higher mode when the frequency is 95 GHz or 110 GHz, $r = 2$ mm, $\varphi = 45^\circ$

$f = 95$ GHz		
E_z [V/m]	E_x [V/m]	E_y [V/m]
$1,7 \cdot 10^{-4} - i3,4 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-5} - i1,3 \cdot 10^{-5}$	$-2,7 \cdot 10^{-5} - i1,2 \cdot 10^{-6}$
H_z [A/m]	H_x [A/m]	H_y [A/m]
$-1,9 \cdot 10^{-7} - i1,9 \cdot 10^{-7}$	$4,7 \cdot 10^{-8} + i8,1 \cdot 10^{-8}$	$-3,2 \cdot 10^{-6} - i1,5 \cdot 10^{-6}$
$f = 110$ GHz		
E_z [V/m]	E_x [V/m]	E_y [V/m]
$-5,3 \cdot 10^{-3} - i1,2 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-3} - i2,1 \cdot 10^{-3}$	$-3,2 \cdot 10^{-4} + i9,6 \cdot 10^{-4}$
H_z [A/m]	H_x [A/m]	H_y [A/m]
$-1,1 \cdot 10^{-5} + i9,1 \cdot 10^{-7}$	$7,2 \cdot 10^{-6} + i9,4 \cdot 10^{-6}$	$-1,4 \cdot 10^{-4} + i5,7 \cdot 10^{-5}$

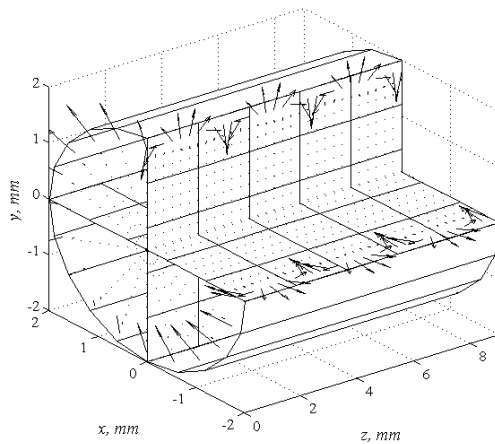
▪ **Metamedžiagos apskritojo bangolaidžio, kurio spindulys $r = 2$ mm, elektrodinaminė analizė**

Metamedžiagos apskritojo bangolaidžio, kurio spindulys 2 mm, dispersinės charakteristikos parodytos 2.6 paveiksle pagrindinės ir pirmos aukštesniosios modų normuotų sklaidimo pastoviųjų h'/k dažninėmis priklausomybėmis.

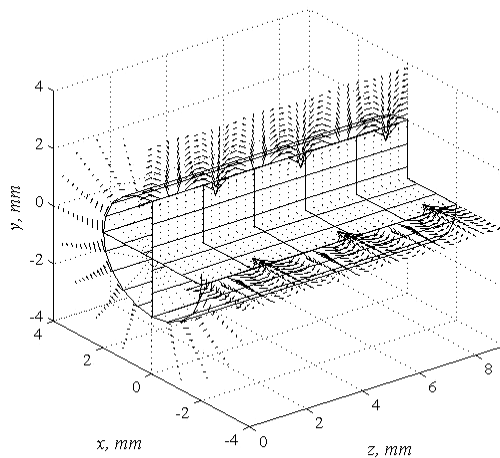


2.6 pav. Apskritojo metamedžiagos bangolaidžio, kurio spindulys 2 mm, dispersinės charakteristikos (a): – fazinės pastoviosios priklausomybė nuo dažnio; (b) ir (c) – slopinimo pastoviosios (nuostolių) priklausomybės nuo dažnio. Pagrindinė moda pavaizduota taškais, o pirmoji aukštesnioji – apskritimais

Fig. 2.6. The dispersion characteristics of the circular waveguide made of metamaterial: (a) – dependences of phase constants upon frequency; (b) and (c) – dependences of attenuation constants (losses) upon frequency. The main mode is presented by dots and the first higher one – by circles



(a)



(b)

2.7 pav. EM bangos, sklindančios metamedžiagos bangolaidžiu, pagrindinės modos 3D elektrinių laukų pasiskirstymai: (a) – bangolaidžio viduje; (b) – bangolaidžio viduje ir išorėje

Fig. 2.7. 3D electric field distribution of the main mode of the EM wave propagating through waveguide made of metamaterial: (a) – inside the waveguide; (b) – inside and outside the waveguide

Pagrindinės modos nuostoliai pavaizduoti 2.6 (b) paveiksle, o pirmos aukštesniosios modos nuostoliai – 2.6 (c) paveiksle. Iš 2.6 (a) paveikslo matome, jog pagrindinė moda yra lėtoji moda, o pirmoji aukštesnioji moda gali būti lėtąja arba greitąja modomis, priklausomai nuo EM bangos dažnio diapazono. Priklausomybių ekstremumai, stebimi 2.6 paveiksle, yra rezonansinės prigimties ir priklauso nuo bangolaidžio matmenų ir jų santykio su EM bangos, sklindančios bangolaidžiu, ilgiu.

Disertaciniame darbe suskaičiuoti pagrindinės modos, sklindančios atviraime apskritajame metamedžiagos bangolaidyje, 3D vektoriniai elektrinių laukų pasiskirstymai. Skaičiavimai buvo atlikti 1500 taškų, laisvai pasirinktų bangolaidžio viduje ir jo išorėje. Elektrinių laukų stiprio pasiskirstymas buvo suskaičiuotas 95 GHz dažnio EM bangai sklindant apskrituoju metamedžiagos bangolaidžiu, kai metamedžiaga yra SNG (t.y. jos santykinė dielektrinė skvarba $\epsilon_r = -23,75 - i18,75$, o santykinė magnetinė skvarba $\mu_r = 1,75 + i1,625$).

Padidintos elektrinio lauko jėgų linijos bangolaidžio viduje parodytos 2.7(a) paveiksle. Maksimalus elektrinio lauko stipris gautas riboje bangolaidis-oras.

2.7(b) paveiksle pavaizduotos elektrinio lauko jėgų linijos bangolaidžio viduje ir jo išorėje, bangolaidžiu sklindant 95 GHz dažnio EM bangai. Suskaičiuotas EM bangos elektrinio lauko stipris kinta periodiškai bangolaidžio išilginiame skerspjūvyje.

2.2. SiC apskritųjų bangolaidžių elektrodinaminė analizė

Šiame skyriuje aptarti atvirųjų apskritųjų bangolaidžių elektrodinaminių charakteristikų tyrimai. Pateikti SiC bangolaidžių su skirtingais matmenimis dispersinių charakteristikų skaičiavimai, esant įvairioms temperatūroms. Demonstruojami dvimačiai elektrinių laukų pasiskirstymai ir trimačiai magnetinių laukų pasiskirstymai SiC apskrituosiuose bangolaidžiuose. Nustatyta, kad fazinis postūmis tiesiogiai proporcingas bangolaidžio medžiagos temperatūrai. Pastebimas signalo fazės postūmis stebimas, kai bangolaidžio medžiagos temperatūra $T > 500$ °C. Skaičiavimuose pasirinktos temperatūros maksimalią vertę ($T = 1800$ °C) apribojo SiC medžiagos lydimosi temperatūra. Tačiau SiC medžiagos lydimosi temperatūra yra didesnė už skaičiavimuose pasirinktos temperatūros maksimalią vertę. Tokia prielaida buvo padaryta siekiant atsižvelgti į tai, kad medžiaga gali turėti aliuminio priemaišas. SiC kompleksinės dielektrinės skvarbos menamoji dalis ϵ'' tiesiškai mažėja, didėjant bangolaidžiu sklindančios EM bangos dažniui. Tačiau dielektrinė skvarba sudėtingu būdu įeina į bangolaidžio dispersinę lygtį ir į Hankelio ir Besselio funkcijų argumentus.

Įrenginiai, pagaminti iš SiC, gali būti naudojami satelitinėje technikoje. Tokie įrenginiai gali išlaikyti didelę temperatūrą, kai pastarieji yra atakuojami EM bangos spinduliu. Taip pat šitie įrenginiai gali būti taikomi lydimosi krosnyse.

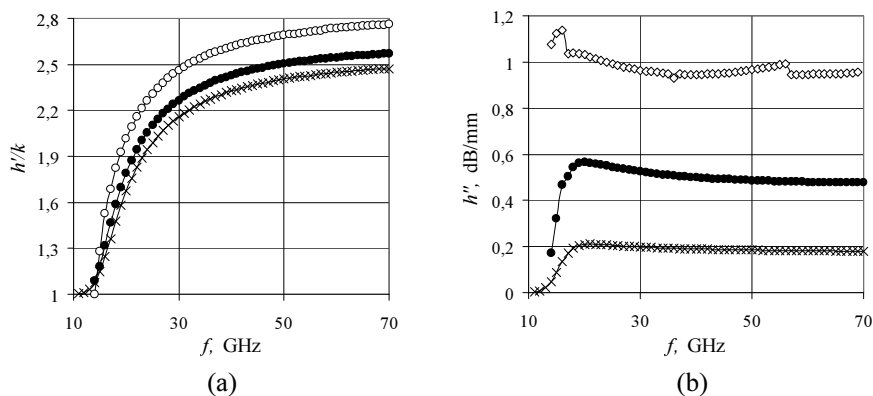
Atliekant bangolaidžių, pagamintų iš SiC tyrimus, iš pradžių buvo įdomu iširti bangolaidį, kai $T=1800\text{ }^{\circ}\text{C}$, $r=2,5\text{ mm}$ (Nickelson *et al.* 2009). Buvo svarbu gauti elektrinių laukų pasiskirstymus, siekiant atlikti pilną elektrodinaminę analizę. Ištyrus bangolaidį su spinduliu $r=2,5\text{ mm}$, buvo gautas Lietuvos respublikos patentas Nr. 5710. Bangolaidžio spindulys buvo padidintas iki 3 mm, siekiant nustatyti pagrindinės modos atkirtos dažnio pasikeitimą (Nickelson *et al.* 2009). Pagal gautus atkirtos dažnių reikšmes buvo nustatyta, kad programinė įranga veikia korektiškai, t. y. išpildomi elektrodinamikos dėsniai (didėjant spinduliui, mažėja modos atkirtos dažnis).

- **Apskritojo SiC bangolaidžio, kurio spindulys 2,5 mm, tyrimai, esant $T=500\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūroms**

EM bangos pagrindinės ir pirmosios aukštesniosios modų, sklindančių atvirojo apskrituoju bangolaidžiu, esant trimis skirtingoms temperatūroms ($500\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ištisinė linija su kryželiais), $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ištisinė linija su juodais taškais), $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ištisinė linija su apskritimais)) dispersinės charakteristikos (Gric *et al.* 2010) parodytos 2.8 ir 2.9 paveiksluose.

SiC medžiagos santykinė dielektrinė skvarba, esant $f=11\text{ GHz}$, yra $\epsilon_r=6,5-i0,5$, kai $T=500\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\epsilon_r=7-i$, kai $T=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir $\epsilon_r=8-i2$, kai $T=1500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sklidimo pastoviosios vertė didėja, didėjant dažniui (2.8(a) pav.). Palyginus sklidimo pastoviosios priklausomybes nuo dažnio, esant aukščiau paminėtoms temperatūroms, nustatyta, jog kuo aukštesnė temperatūra, tuo didesnės sklidimo pastoviosios vertės.

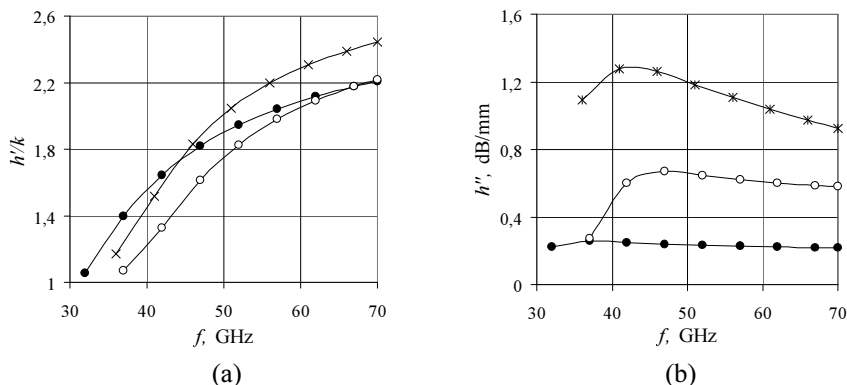
EM bangos energijos nuostolių vertė auga, didėjant temperatūrai. Pasiėkus 20 GHz dažnį, nuostolių vertė nustoja augti ir toliau beveik nebekinta dažniui didėjant. Gauti rezultatai labai svarbūs kuriant modernius superaukštojo dažnio signalų modulatorius ir signalų fazės suktuvus. EM bangos, sklindančios bangolaidžiu, amplitudė, kurios tikslumas yra pakankamas taikymui praktikoje, nepriklauso nuo bangos nuostolių bangolaidyje (2.8(b) pav.).



2.8 pav. EM bangos pagrindinės modos, sklindančios apskrituoju SiC bangolaidžiu, dispersinės charakteristikos: (a) – normuotos fazinės pastoviosios priklausomybė nuo dažnio, kai temperatūra 500 °C (ištininė linija su kryželiais), 1000 °C (ištininė linija su juodais taškais) ir 1500 °C (ištininė linija su apskritimais); (b) – EM bangos slopinimo pastoviosios (nuostolių) priklausomybė nuo dažnio toms pačioms temperatūrų vėrtėms (Gric *et al.* 2010)

Fig. 2.8. The dispersion characteristics of the main mode of EM wave propagating through the circular SiC waveguide: (a) – dependences of the normalized phase constant upon frequency at temperature 500 °C (solid line with crosses), 1000 °C (solid lines with black points) and 1500 °C (solid line with circles); (b) – losses calculated for the same temperatures (Gric *et al.* 2010)

Darbe suskaičiuotos EM bangos pirmos aukštesniosios modos dispersinės charakteristikos trijose skirtingose temperatūrose (2.9 pav.). Dažniuose, žemesniuose už 45 GHz (2.9(a) pav.), suskaičiuotos fazinės pastoviosios h' vėrtės gautos didesnės esant 1000 °C temperatūrai už fazinės pastoviosios vėrtes aukštesnėse (t.y. 1500 °C) ir žemesnėse (500 °C) temperatūrose. Todėl EM bangos pirmosios aukštesniosios modos kompleksinės išilginės sklidimo pastoviosios priklausomybė nuo dažnio pasikeičia. Pirmosios aukštesniosios modos dispersinių charakteristikų seka, esant skirtingoms temperatūroms, skiriasi nuo pagrindinės modos dispersinių charakteristikų sekos, esant tomis pačiomis temperatūroms (2.8 ir 2.9 pav.), kadangi pagrindinės ir pirmosios aukštesniosios modų elektrinių laukų pasiskirstymai yra skirtingi.

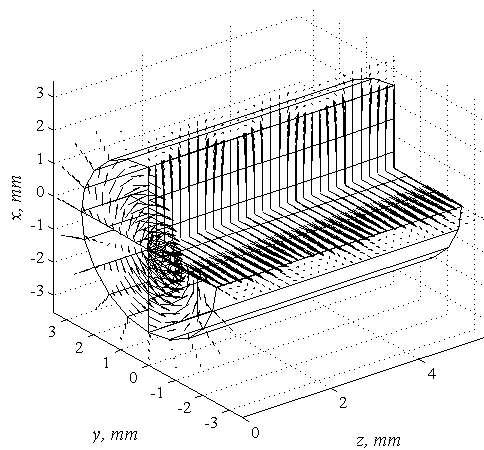


2.9 pav. Pirmos aukštesniosios modos, sklindančios apskritajame SiC bangolaidyje, dispersinės charakteristikos: (a) – normuotos fazinės pastoviosios priklausomybė nuo dažnio, esant 500 °C, 1000 °C ir 1500 °C temperatūroms; (b) – slopinimo pastoviosios (nuostolių) priklausomybė nuo dažnio, toms pačioms temperatūroms. Kai $T = 500$ °C, rezultatai pavaizduoti ištisine linija su kryželiais, kai $T = 1000$ °C – ištisine linija su juodais taškais, kai $T = 1500$ °C – ištisine linija su apskritimais

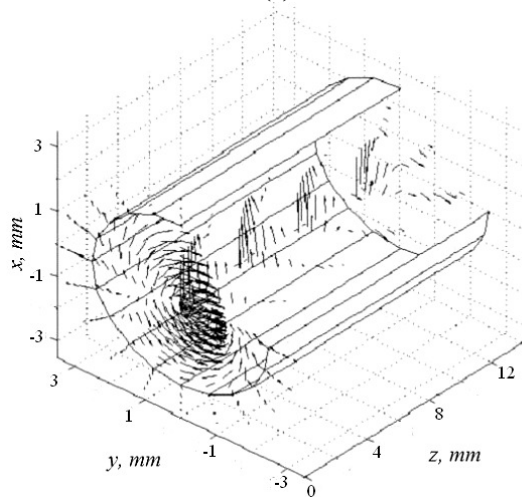
Fig. 2.9. The dispersion characteristics of the first higher modes propagating through a circular SiC waveguide: (a) – dependences of the normalized phase constants at the temperatures 500 °C, 1000 °C, 1500 °C; (b) – dependences of attenuation constants (losses) upon the frequency at the same temperatures. The results are displayed by the solid line with crosses at $T = 500$ °C, by the solid lines with black points at $T = 1000$ °C, by the solid line with circles at $T = 1500$ °C

Disertaciniame darbe apskaičiuotos EM bangos elektrinio lauko komponentės 600 taškų SiC bangolaidžio viduje ir išorėje. Pagrindinės modos 3D magnetinių laukų pasiskirstymai, kai temperatūra yra 500 °C ir 1500 °C, o $f = 30$ GHz parodyti 2.10–2.11 paveiksluose. Magnetinių laukų pasiskirstymas bangolaidžio skerspjūvyje ir magnetinio lauko projekcijos į xOz ir yOz plokštumas pavaizduotos 2.10(a)–2.11(a) paveiksluose, o magnetinio lauko jėgų linijų 3D pasiskirstymas – 2.10(b)–2.11(b) paveiksluose. Magnetinio lauko stiprio skaičiavimai atlikti SiC bangolaidžio viduje ir išorėje laisvai pasirinktuose 300 taškų.

Palyginus magnetinių laukų pasiskirstymus, esant 500 °C ir 1500 °C temperatūroms (2.10 ir 2.11 pav.), nustatyta, jog, esant 1500 °C temperatūrai, magnetinio lauko stipris mažesnis tiek bangolaidžio viduje, tiek ir jo išorėje. Palyginus 2.10(a) ir 2.11(a) paveikslus, matome, jog magnetinio lauko jėgų linijos, esančios horizontalioje plokštumoje, yra tankesnės 2.10(a) paveiksle negu 2.11(a) paveiksle. Gautasis rezultatas gali būti paaiškintas EM bangos nuostolių augimu, didėjant bangolaidžio medžiagos temperatūrai.



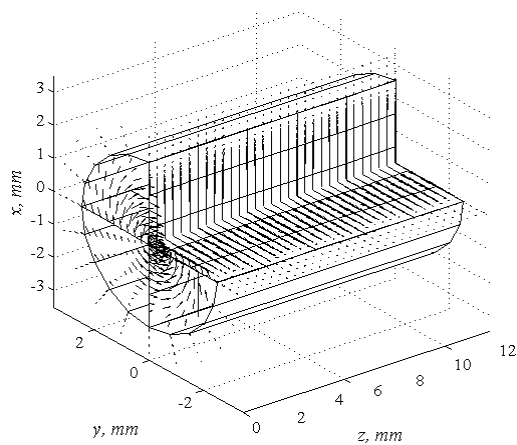
(a)



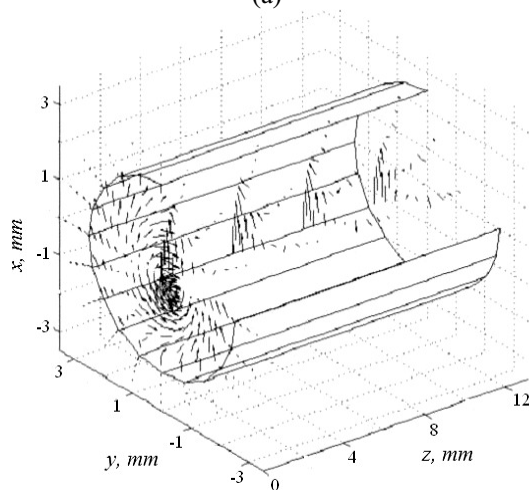
(b)

2.10 pav. EM bangos pagrindinės modos 3D vektoriniai magnetinių laukų pasiskirstymai $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūroje: (a) – bangolaidžio skerspjūvyje ir jo išilginiuose pjūviuose; (b) – 3D vektorinis magnetinio lauko pasiskirstymas bangolaidyje

Fig. 2.10. The 3D distribution of the magnetic field of the main mode at $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$: (a) – the cross-section distribution of magnetic field lines as well as their projections at horizontal and vertical planes; (b) – a front quarter of 3D distribution of the magnetic field in the waveguide



(a)



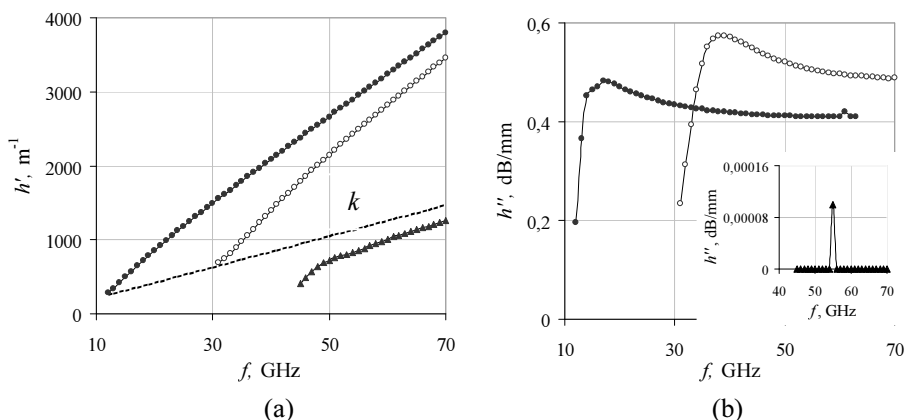
(b)

2.11 pav. EM bangos pagrindinės modos 3D vektoriniai magnetinių laukų pasiskirstymai, esant 1500 °C temperatūrai: (a) – magnetinio lauko pasiskirstymai bangolaidžio skerspjūvyje ir išilginiuose pjūviuose; (b) – 3D vektorinis magnetinio lauko pasiskirstymas

Fig. 2.11. The 3D distribution of magnetic field of the EM wave's main mode at $T = 1500\text{ }^{\circ}\text{C}$: (a) – the cross-section distribution of the magnetic field lines as well as their projections in horizontal and vertical planes; (b) – a front quarter of a 3D distribution of magnetic field in the space

• **Apskritojo SiC bangolaidžio, kurio skerspjūvio spindulys 3 mm, tyrimai, esant $T = 1000$ °C temperatūrai**

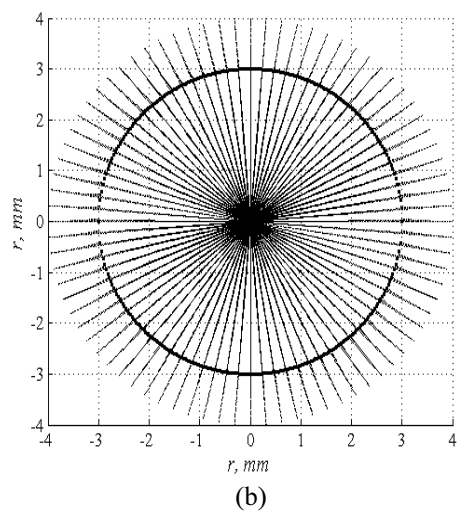
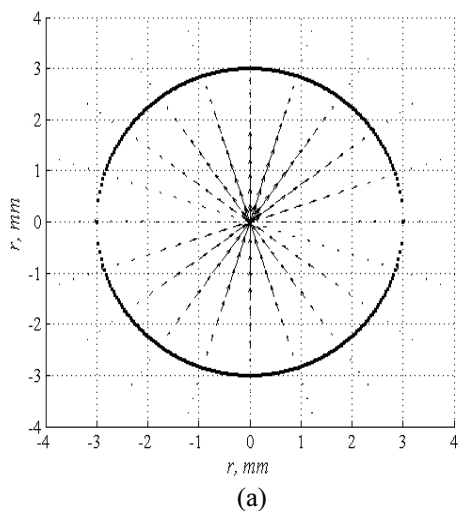
Šis skyrius skirtas apskritojo 3 mm spindulio bangolaidžio, esant $T=1000$ °C, tyrimams (Nickelson *et al.* 2009). SiC medžiagos santykinė dielektrinė skvarba šioje temperatūroje $\epsilon_r = 7 - i$, kai bangolaidžiu sklindančios EM bangos dažnis $f = 11$ GHz (Baeraky 2002). Fazinių pastoviųjų ir nuostolių priklausomybės nuo EM bangos dažnio pavaizduotos 2.12 (a) ir (b) paveiksluose.



2.12 pav. SiC bangolaidžio dispersinės charakteristikos: (a) – fazinės pastoviosios priklausomybė nuo dažnio; (b) – slopinimo pastoviosios (nuostolių) priklausomybė nuo dažnio. Pagrindinė moda yra vaizduojama taškais, pirmoji aukštesnioji – apskritimais, greitoji moda – trikampiiais

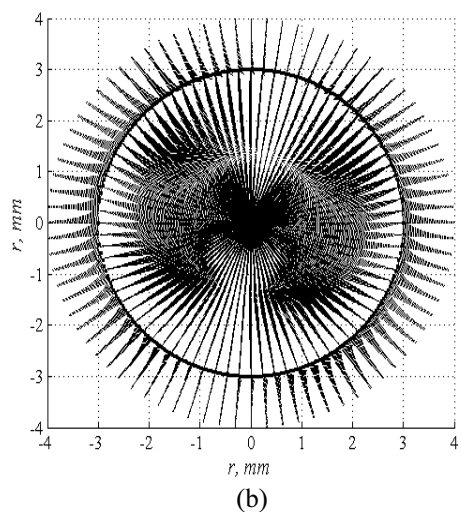
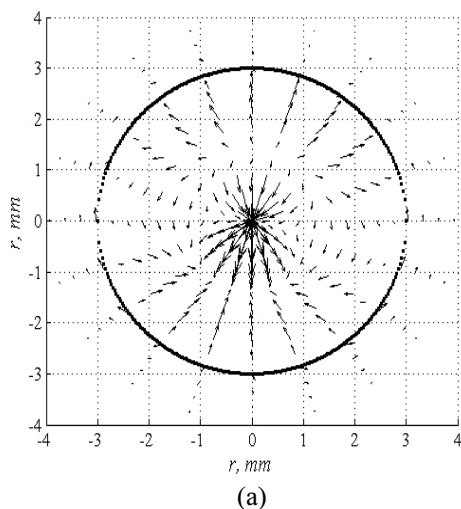
Fig. 2.12. The dispersion characteristics of the propagating wave in the SiC waveguide: (a) – dependences of the phase constants upon frequency; (b) – dependences of the attenuation constants (i.e. losses) upon frequency. The main mode is denoted by the point symbols, the first higher mode – by the circles, the fast mode by the triangles

Visų modų elektrinių laukų pasiskirstymai buvo suskaičiuoti, kai EM bangos, sklindančios bangolaidžiu, dažnis $f = 55$ GHz. Gauti elektrinio lauko jėgų linijų ir intensyvumų rezultatai pavaizduoti 2.13–2.15 paveiksluose. Elektrinio lauko intensyvumas išreikštas skersinių elektrinių dedamųjų modulių. Nustatyta, jog pagrindinės modos elektrinio lauko pasiskirstyme (2.13 pav.) yra viena variacija pagal spindulį. Stipriausias šios modos laukas koncentruojasi bangolaidžio centre. Ištyrus pirmosios aukštesniosios lėtosios modos elektrinių laukų pasiskirstymus (2.14 pav.) nustatyta, jog pirmosios aukštesniosios modos stipriausias elektrinis laukas koncentruojasi bangolaidžio centre dviejų lapelių pavidalu.



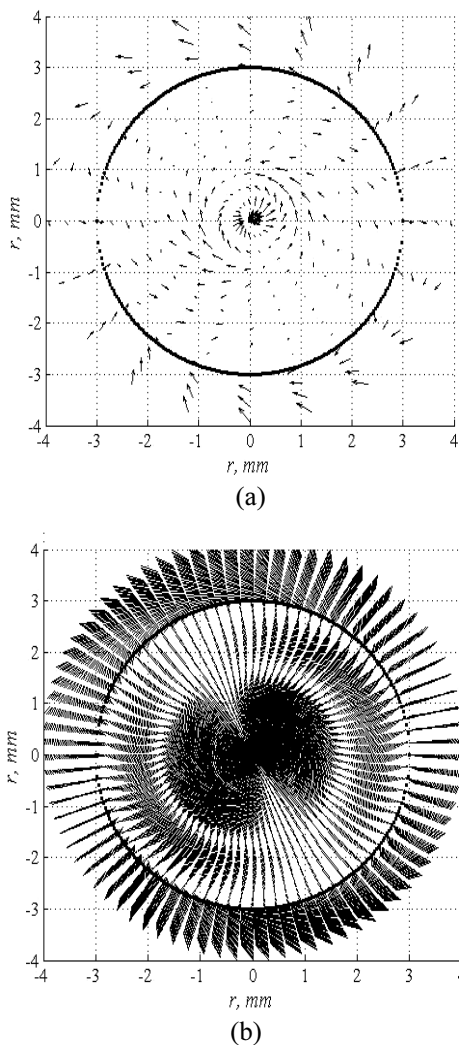
2.13 pav. Pagrindinės modos, sklindančios SiC bangolaidžiu, elektrinių laukų pasiskirstymai, kai EM bangos dažnis $f = 55$ GHz: (a) – elektrinio lauko jėgų linijos; (b) – elektrinio lauko intensyvumas

Fig. 2.13. The electric field distribution of the main mode propagating along the SiC waveguide when the EM wave's frequency is $f = 55$ GHz: (a) – the electric field's strength lines; (b) – the electric field intensities



2.14 pav. Pirmosios aukštesniosios lėtosios modos elektrinių laukų pasiskirstymai, kai bangolaidžiu sklindančios EM bangos dažnis $f = 55$ GHz: (a) – elektrinio lauko jėgų linijos; (b) – elektrinio lauko intensyvumas

Fig. 2.14. The electric field distribution of the first-higher-slow mode propagating through the SiC waveguide when the EM wave's frequency is $f = 55$ GHz: (a) – the electric fields strength lines; (b) – the electric field intensities



2.15 pav. Antrosios aukštesniosios greitosios modos, sklindančios SiC bangolaidžiu, elektrinių laukų pasiskirstymai, kai EM bangos dažnis $f = 55$ GHz: (a) – elektrinio lauko jėgų linijos; (b) – elektrinio lauko intensyvumas

Fig. 2.15. The distribution of the electric field of the second-higher-fast mode propagating in the SiC waveguide when the EM wave's frequency is $f = 55$ GHz: (a) – the electric field's strength lines; (b) – the electric field's intensity

Antrosios aukštesniosios greitosios modos elektrinių laukų pasiskirstymų tyrimai (2.15 pav.) parodė, jog greitosios modos elektrinio lauko pasiskirstymas turi dvi variacijas pagal spindulį. Šios modos stipriausias elektrinis laukas koncentruojasi bangolaidžio centre, dviejų lapelių pavidalu, ir bangolaidžio išorėje. Reikia papildomai pastebėti, jog elektrinis laukas bangolaidžio išorėje yra stipresnis ten, kur jis silpnesnis bangolaidžio viduje.

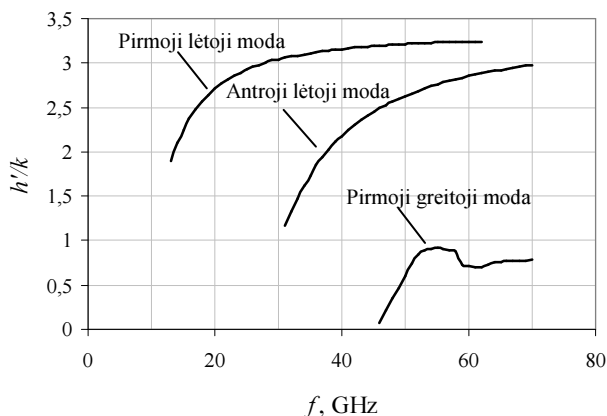
- **Apskritojo SiC bangolaidžio, kurio skerspjūvio ploto spindulys 2,5 mm, tyrimai, esant temperatūrai $T=1800\text{ }^{\circ}\text{C}$**

Modų, sklindančių SiC bangolaidžiu, kurio spindulys $r = 2,5\text{ mm}$, fazinių pastoviųjų ir nuostolių priklausomybės nuo dažnio, esant $T = 1800\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrai, pavaizduotos 2.16 (a) ir (b) paveiksluose (Nickelson *et al.* 2009). Bangolaidžio spinduliui mažėjant, nuostolių ekstremumai slenkasi link didesnių EM bangos dažnių. Modų atkirtos dažniai slenkasi link didesnių dažnių, kai yra mažinamas bangolaidžio spindulys.

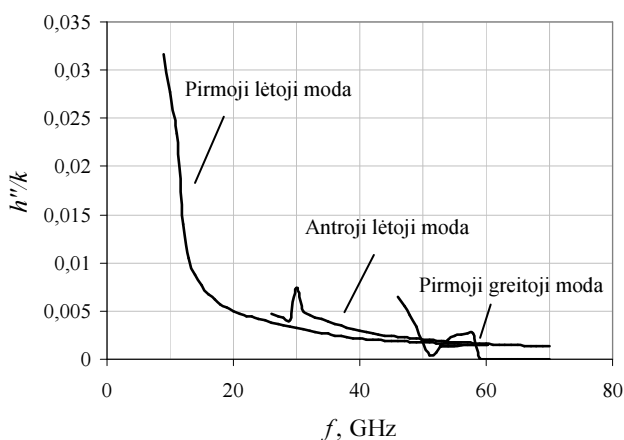
2.16 paveiksle pavaizduotos trijų bangolaidžio modų dispersinės charakteristikos. Pagrindinė ir pirmoji aukštesnioji modos yra lėtosios, kadangi jų $h'/k > 1$. Trečioji moda – greitoji moda, kadangi jos $h'/k < 1$.

Dviejų lėtųjų modų atkirtos dažniai yra, atitinkamai, $f_{\text{cut}} = 12,5\text{ GHz}$ ir 30 GHz . Pirmosios greitosios modos atkirtos dažnis $f_{\text{cut}} = 46\text{ GHz}$. Atkirtos dažnis yra pasiekiamas, kai $h'/k = 1$.

Visų analizuojamų modų sklidimo nuostoliai (2.16(b) pav.) buvo suskaičiuoti, atsižvelgus į tai, kad kompleksinės santykinės dielektrinės skvarbos menamoji dalis $\text{Im}(\epsilon_r^{\text{SiC}}) = 7$, bangolaidžiu sklindant $12,5\text{ GHz}$ dažnio EM bangai. Dydis $\text{Im}(\epsilon_r^{\text{SiC}})$ mažėja, kai dažnis didėja. Analizuojant lėtųjų ir greitųjų modų sklidimo nuostolius nustatyta, kad pirmosios lėtosios modos nuostoliai didžiausi, kai dažnis lygus šios modos atkirtos dažniui. Tuomet antrosios ir trečiosios modų nuostolių kreivės turi minimumus ir maksimumus. Atlikti skaitiniai tyrimai parodė, kad šių ekstremumų koordinatės priklauso nuo bangolaidžio spindulio. Mažinant bangolaidžio spindulį, sklidimo nuostolių ekstremumai pasislinktų į dažnio didėjimo pusę. Slinkimas atsiranda dėl to, kad pasikeičia modos atkirtos dažnis.



(a)



(b)

2.16 pav. SiC bangolaidžio dispersinės charakteristikos: (a) – normuotos fazinės pastoviosios priklausomybė nuo dažnio; (b) – normuotos slopinimo pastoviosios (nuostolių) priklausomybė nuo dažnio

Fig. 2.16. The dispersion characteristics of the EM wave in the SiC waveguide: (a) – dependences of the normalized phase constants upon frequency; (b) – dependences of the normalized attenuation constants (losses) upon frequency

Lėtosios ir greitosios modų elektrinių laukų pasiskirstymai (2.17 – 2.19 pav.) buvo skaičiuojami 10000 taškų, pasirinktų bangolaidžio viduje ir jo išorėje. Elektrinio lauko jėgų linijos pavaizduotos 2.17(a)–2.19(a) paveiksluose, o intensyvumai – 2.17(b)–2.19(b) paveiksluose. Elektrinio E_r , E_φ , E_z ir magnetinio H_r , H_φ , H_z laukų komponentės parodytos lentelėje 2.3.

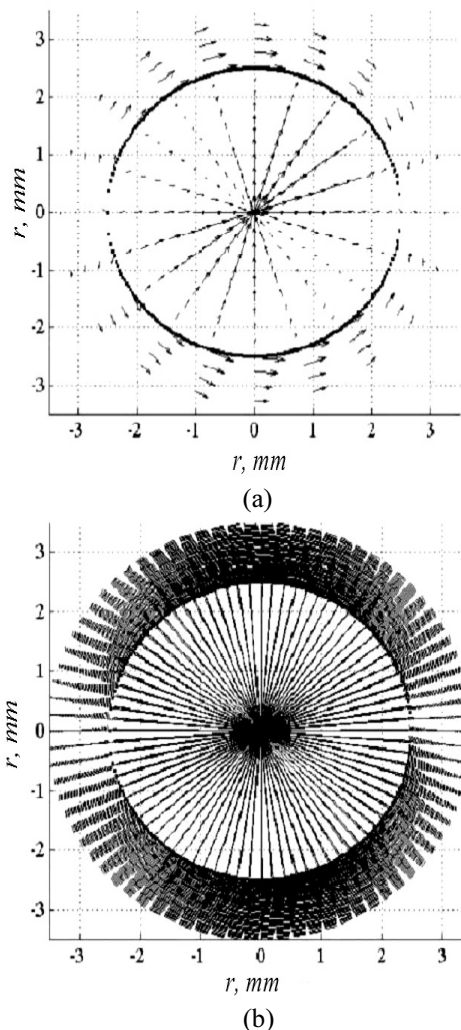
2.3 lentelė. EM lauko komponentės fiksuotame taške ($r = 2,4$ mm, $\varphi = 0$, $z = 0$), kai $T = 1800$ °C

Table 2.3. The components of the EM field at the fixed point ($r = 2,4$ mm, $\varphi = 0$, $z = 0$), when $T = 1800$ °C

<i>Lėtosios modos</i>			
<i>Pagrindinė</i>	$m = 1, f = 15$ GHz		
	E_r , V/m	E_φ , V/m	E_z , V/m
	$2,2 \cdot 10^{-2} - i8 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-2} + i4 \cdot 10^{-2}$	$8,0 \cdot 10^{-2} + i1,5 \cdot 10^{-1}$
	H_r , A/m	H_φ , A/m	H_z , A/m
	$-5,9 \cdot 10^{-4} - i6,5 \cdot 10^{-4}$	$-1,6 \cdot 10^{-3} + i4,3 \cdot 10^{-5}$	$4,1 \cdot 10^{-4} - i4,4 \cdot 10^{-4}$
<i>Pirmoji aukštesniosios</i>	$m = 1, f = 50$ GHz		
	E_r , V/m	E_φ , V/m	E_z , V/m
	$1,3 \cdot 10^{-4} - i1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4} + i1,2 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-4} + i3,6 \cdot 10^{-4}$
	H_r , A/m	H_φ , A/m	H_z , A/m
	$-1,6 \cdot 10^{-6} - i1,1 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-6} - i1,6 \cdot 10^{-6}$	$8,0 \cdot 10^{-7} - i1,1 \cdot 10^{-6}$
<i>Greitoji moda</i>			
<i>Antroji aukštesnioji</i>	$m = 1, f = 51$ GHz		
	E_r , V/m	E_φ , V/m	E_z , V/m
	$2,5 \cdot 10^{-2} - i1,4 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-2} - i1,6 \cdot 10^{-2}$	$3,0 \cdot 10^{-1} - i3,0 \cdot 10^{-2}$
	H_r , A/m	H_φ , A/m	H_z , A/m
	$-3,4 \cdot 10^{-4} + i6,7 \cdot 10^{-5}$	$10^{-3} - i10^{-3}$	$-2,9 \cdot 10^{-4} + i2,0 \cdot 10^{-4}$

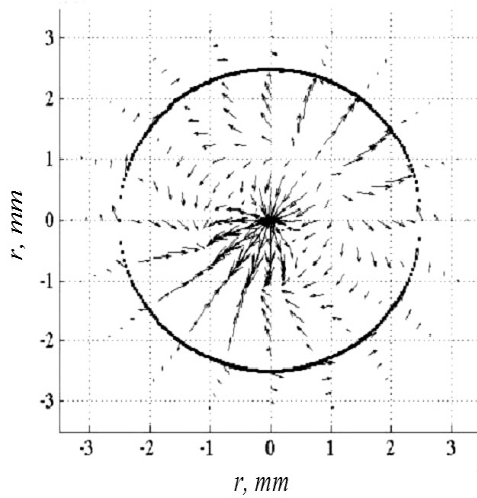
Pirmosios lėtosios modos elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas, pavaizduotas 2.17(a) paveiksle, yra pasuktas 90° kampu pagal laikrodžio rodyklę, atžvilgiu tos pačios modos, sklindančios bangolaidyje be nuostolių ($Im(\epsilon_r^{SiC})=0$), elektrinio lauko pasiskirstymo. 2.17(a) paveiksle matyti, jog elektrinio lauko jėgų linijos nukreiptos pagal laikrodžio rodyklę I ir II sektoriuose ir prieš laikrodžio rodyklę III ir IV sektoriuose. Stipriausias elektrinis laukas koncentruojasi srityse (2.17(b) pav.) arti bangolaidžio centro ir bangolaidžio ribos su aplinka. Nustatyta, jog elektrinis laukas nehomogeniškai pasiskirstęs bangolaidžio perimetre.

Antrosios lėtosios modos (pirmosios aukštesniosios modos) elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas pavaizduotas 2.18 paveiksle SiC bangolaidyje egzistuoja viena elektrinio lauko variacija bangolaidžio spinduliu (2.18(a) pav.), t. y. elektrinio lauko vektorių kryptys keičiasi vieną kartą išilgai bangolaidžio spindulio. Elektrinio lauko stipris pasiskirstęs dviejų lapelių pavidalu. Kuo didesnis atstumas nuo bangolaidžio ribų, tuo elektrinis laukas bangolaidžio išorėje silpnės. Reiktų pastebėti, jog egzistuoja trečioji lėtoji (antroji aukštesnioji) moda 1–100 GHz dažnių ruože. Trečiosios modos atkirtos dažnis $f_{\text{cut}} = 51$ GHz, o jos elektrinis laukas turi dvi variacijas pagal bangolaidžio spindulį.

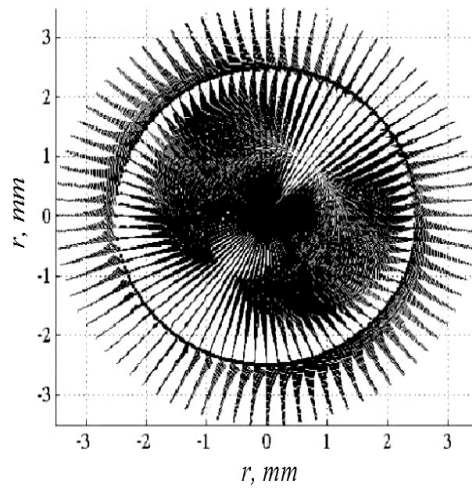


2.17 pav. Pirmosios lėtosios modos, sklindančios SiC bangolaidžiu, elektrinių laukų pasiskirstymai, kai EM bangos dažnis $f = 15$ GHz: (a) – elektrinio lauko jėgų linijos; (b) – elektrinio lauko intensyvumas

Fig. 2.17. The electric field's distribution of the first-slow-mode propagating along the SiC waveguide when the EM wave's frequency is $f = 15$ GHz: (a) – the electric field strength lines; (b) – the electric field intensities



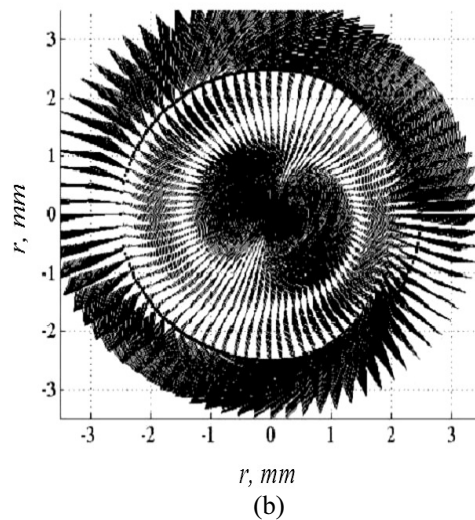
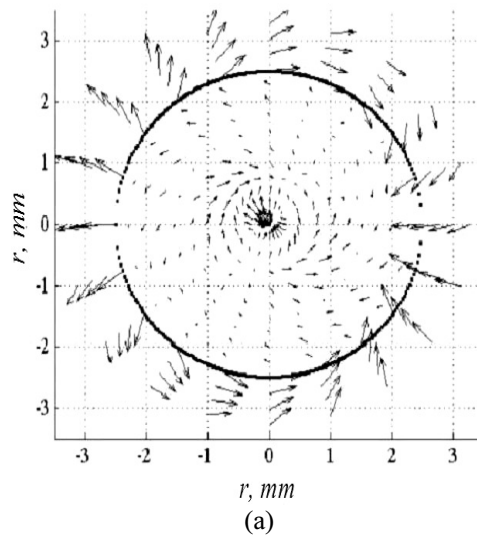
(a)



(b)

2.18 pav. Antrosios lėtosios modos, sklindančios SiC bangolaidžiu, elektrinių laukų pasiskirstymai, kai EM bangos dažnis yra $f = 50$ GHz: (a) – elektrinio lauko jėgų linijos; (b) – elektrinio lauko intensyvumas

Fig. 2.18. The electric field distribution of the second slow mode of a 50 GHz frequency EM wave, propagating in the SiC waveguide: (a) – the electric field strength lines; (b) – the electric field intensities



2.19 pav. Pirmosios greitosios modos, sklindančios SiC bangolaidžiu, elektrinio lauko stiprio pasiskirstymas, kai EM bangos dažnis 51 GHz: (a) – elektrinio lauko jėgų linijos; (b) – elektrinio lauko intensyvumas

Fig. 2.19. The distribution of the electric field strength of the first-fast-mode of 51 GHz frequency EM wave propagating along the SiC waveguide: (a) – the electric field strength's lines; (b) – the electric field intensity

2.19 paveiksle pavaizduoti pirmosios greitosios modos elektrinių laukų pasiskirstymai. Pirmosios greitosios (t.y. trečiosios aukštesniosios) modos elektrinio lauko jėgų linijos turi dvi variacijas pagal spindulį (2.19(a) ir 2.19(b) pav.), o jos elektrinio lauko intensyvumo pasiskirstymas, bangolaidžio viduje, igrja dviejų lapelių pavidalą. Skaičiavimais parodyta, jog stipriausias elektrinis laukas koncentruojasi bangolaidžio išorėje. Visų nagrinėtų modų elektrinių laukų pasiskirstymų variacijų pagal spindulį skaičius atitinka dabartinę elektrodinamikos teorijos sampratą. Tolstant nuo bangolaidžio, laukas mažėja, yra išpildoma elektrodinaminė sąlyga begalybėje.

Palyginus gautus rezultatus 2.17–2.19 paveiksluose lengva įsitikinti, jog skirtingų apskritojo bangolaidžio modų elektrinio lauko stiprio pasiskirstymai skirtingi. Stipriausias pagrindinės modos elektrinis laukas koncentruojasi apskritojo bangolaidžio viduje ir jo išorėje, pirmosios aukštesniosios – bangolaidžio viduje dviejų lapelių pavidalu, antrosios aukštesniosios – bangolaidžio viduje, dviejų lapelių pavidalu, ir kartu – jo išorėje.

2.3. Antrojo skyriaus išvados

1. Metamedžiaga, SiC, iš kurių pagaminti tiriamieji bangolaidžiai, – tai EM bangų energiją sugeriančios medžiagos.
2. Bangolaidžių, pagamintų iš metamedžiagos, dispersinės charakteristikos priklauso nuo jų spindulio. Tai yra sąlygojama to, kad metamedžiaga yra spinduliuotę sugerianti medžiaga.
3. Palyginus skirtingų spindulių metamedžiagos bangolaidžius, matysime, kad bangolaidis, kurio spindulys yra $r = 2,5$ mm, geriau tinka filtro sukūrimui negu apskritasis metamedžiagos bangolaidis su spinduliu $r = 2$ mm. Pirmosios aukštesniosios modos, sklindančios bangolaidyje su mažesniu spinduliu, nuostoliai kinta chaotiškai, keičiantis dažniui. Dėl šitos priežasties bangolaidyje gali būti moduluojama pagrindinė moda.
4. EM bangų pagrindinių modų, sklindančių apskritojo skerspjuvio bangolaidžiu, nuostoliai beveik nekinta EM bangų 20–70 GHz dažnių ruože.
5. Disertacijoje gautas rezultatas ypač svarbus kuriant modernius aukštos kokybės modulatorius ir fazių suktuvus EM bangos, sklindančios bangolaidžiu, amplitudė nėra moduluojama bangos nuostoliais (Lietuvos Respublikos patentas Nr. 5710).
6. Labai mažus (apytikriai 5000 kartus mažesnius) nuostolius patiria EM bangos greitoji moda, palyginus ją su pagrindine EM bangos moda. Reiškiny s gali būti panaudotas praktikoje, kuriant fiderines linijas ir specifinius superaukštųjų dažnių EM bangų perdavimo įrenginius, kuriais sklindančios bangos patiria labai mažus nuostolius.

7. Palyginus metamedžiagos su SiC bangolaidžių dispersinėmis charakteristikomis pastebėsime, jog metamedžiagos bangolaidžių dispersinės charakteristikos turi didesnę skaičių ekstremumų. Pagrindinė priežastis – SiC medžiagos ϵ' yra pastovus visame EM bangų tirtų dažnių intervale, o ϵ'' keičiasi atvirkščiai proporcingai EM bangos dažniui, o tuomet metamedžiagą charakterizuojantys parametrai $\epsilon', \epsilon'', \mu'$ ir μ'' kinta šuoliais. Žinoma, kad metamedžiaga yra medžiaga, kurios parametrai, t. y. santykinės dielektrinė ir magnetinė skvarbos stipriai priklauso nuo dažnio.

Stačiakampių bangolaidžių elektrodinaminė analizė

Sukurti programiniai algoritmai leidžia tirti bet kurios skerspjūvio formos bangolaidžius. Taip pat šiame darbe yra pateikiami bangolaidžių, kurių skerspjūviuose yra keli stačiakampiai kontūrai, tyrimai.

Skyriuje aprašomi stačiakampių bangolaidžių, turinčių sudėtingas skerspjūvio formas, elektrodinaminės analizės rezultatai. Stačiakampio skerspjūvio forma yra laikoma sudėtinga elektrodinaminėje teorijoje, nes tokioje geometrijoje egzistuoja 4 briaunos. Pateikti stačiakampių bangolaidžių, pagamintų iš metamedžiagos ir SiC medžiagos elektrodinaminės analizės rezultatai. Atlikta mikrobanginių bangolaidžių, turinčių oro kanalus ir analogiškų (geometriškai) fotoniniams kristalams optikoje, elektrodinaminė analizė bei aptartos bangolaidžių praktinio taikymo galimybės. Nustatyta, jog EM bangų modų, sklindančių metamedžiagos bangolaidžiuose elektriniai ir magnetiniai laukai beveik neįsiskverbia į bangolaidžius. Metamedžiagos kvadratinio ($5 \times 5 \text{ mm}^2$) skerspjūvio bangolaidžio atveju, bangolaidžiu sklindant 95 GHz EM bangai, elektrinis laukas koncentruojasi bangolaidis-oras riboje ir turi asimetrinį pasiskirstymą. Išnagrinėjus metamedžiagos stačiakampio formos skerspjūvio bangolaidžius, buvo nustatyti EM bangų dažnių ruožai, kuriuose modų, joms sklindant bangolaidžiais, nuostoliai, yra labai maži. Nustatyta, kad pagrindinės modos 60 GHz dažnio EM bangos, sklindančios kvadratinio ($5 \times 5 \text{ mm}^2$) SiC bangolaidžiu, nuostoliai be-

veik 17 kartų mažesni už pirmosios aukštesniosios modos nuostolius, esant 500 °C temperatūrai. Siekiant nustatyti EM bangų sklindančių bangolaidžiuose rūšis, darbe pateiktos lentelės su EM lauko šešių komponentių vertėmis. Iš lentelių seka, jog sklindančios bangos yra hibridinės, t. y. išilginės elektrinio ir magnetinio lauko dedamosios nėra lygios nuliui. Modų klasifikavimas šiame skyriuje nebuvo atliekamas, kadangi modų sklindančių tiriamuose metamedžiagos bangolaidžiuose, rūšis gali keistis, keičiantis dažniui (Nickelson *et al.* 2011). Hibridinės magnetinės rūšies bangos HE_{mn} gali transformuotis į elektrinės rūšies bangas. Be to indeksas n , nurodantis EM lauko variacijų pagal y koordinatę skaičių, gali būti kitoks. Tai atsitinka dėl to, kad metamedžiaga, iš kurios pagamintas bangolaidis, spinduliuotę sugerianti medžiaga.

3.1. Stačiakampių bangolaidžių elektrodinaminė analizė

Stačiakampių bangolaidžių, pagamintų iš EM bangos energiją sugeriančių (disipatyviųjų) medžiagų, o taip pat iš medžiagų, apibūdinamų neigiamomis santykinės dielektrinės ir magnetinės skvarbų vertėmis, elektrodinaminė analizė atlikta pirmą kartą Lietuvos mokslininkų, tarp kurių yra šio darbo autorė. Elektrodinaminių charakteristikų, pateiktų šiame skyriuje, skaičiavimai atlikti tenkinant visas kraštines sąlygas, t. y. tenkinamos tangentinių elektromagnetinių laukų dedamųjų lygybės, begalybėje ir briaunoje (Gric *et al.* 2010). Skaičiavimams reikalingi medžiagų parametrai buvo paimti iš eksperimentinių duomenų šaltinių, pvz. (Penciu *et al.* 2006).

Šiame skyriuje tiriami tokie stačiakapiai bangolaidžiai, kurių charakteristikos gali būti palygintos su apskritųjų bangolaidžių charakteristikomis, pateiktomis antrame skyriuje.

- **Metamedžiagos kvadrato ($5 \times 5 \text{ mm}^2$) formos bangolaidžio elektrodinaminė analizė**

EM bangų dispersinės charakteristikos ir 3D elektrinių laukų stiprių pasiskirstymai parodyti 3.1–3.3 paveiksluose (Gric *et al.* 2010). EM bangų dispersinių charakteristikų (3.1 pav.) pagrindinė moda pavaizduota taškais, o pirmoji aukštesnioji – apskritimais. Santykinės dielektrinės ir magnetinės skvarbų ϵ_r^m ir μ_r^m reikšmės skirtingos kiekvienam EM bangos dažniui. Santykinės dielektrinės skvarbos realioji dalis neigiama visame 75–115 GHz dažnių ruože, o menamoji dalis neigiama 90–100 GHz dažnių ruože. Disertaciniame darbe nustatyta, kad santykinės magnetinės skvarbos realioji dalis neigiama 100–105 GHz dažnių

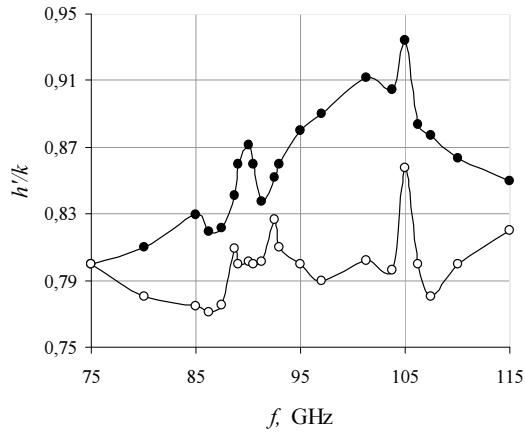
ruože, o menamoji dalis šiame dažnių ruože – teigiama. EM bangos fazinės ir slopinimo pastoviųjų priklausomybės nuo dažnio pavaizduotos 3.1 paveiksle.

Visi stačiakampiai bangolaidžiai buvo tiriami SIL metodu. Siekiant surasti kompleksines sklaidimo pastoviasias buvo pasinaudota Mullerio metodu.

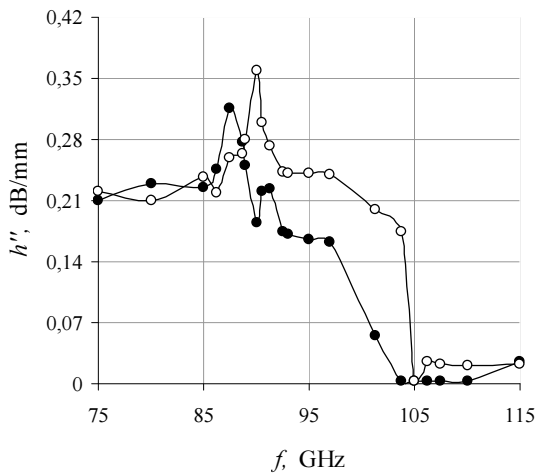
Normuotos sklaidimo pastoviosios h'/k priklausomybė nuo EM bangos dažnio parodyta 3.1(a) paveiksle. $h' = 2\pi/\lambda$, čia λ – EM bangos, sklindančios metamedžiagos bangolaidžiu, ilgis. Pagrindinės ir pirmos aukštesniosios modų kreivės nėra vienodos pagal bangos rūšį ir pagal EM lauko komponentių pasiskirstymą bangolaidžio skerspjūvyje ir už jo ribų, tačiau sąlyga $h'/k < 1$ galioja abiem modoms (3.1(a) pav.). Tai reiškia, kad tiek pagrindinė, tiek ir pirmoji aukštesnioji modos yra greitosios. Nuostolių h'' priklausomybės nuo EM bangos dažnio parodytos 3.1(b) paveiksle. 90 GHz dažnių aplinkoje pavaizduotoje priklausomybėje atsirandantys ekstremumai sąlygojami didelėmis parametru ϵ_r , μ_r reikšmėmis, o taip pat bangolaidžio matmenimis. Metamedžiagos kvadrato formos skerspjūvio ploto bangolaidyje EM bangų nuostoliai pastebimai sumažėja 105–115 GHz dažnių ruože. Minėtame EM bangų dažnių ruože EM bangų energijos nuostoliai apytikriai 8 kartus mažesni už nuostolius 75–105 GHz ruože (3.1 (b) pav.). Pagrindinė nuostolių sumažėjimo priežastis ta, kad 105–115 GHz dažnių ruože ϵ'' , $\mu'' = 0$, o ϵ' vertė net 3 kartus bei μ' vertė – 2 kartus mažesnės, lyginat šių parametru vertes 75–105 GHz dažnių ruože (Penciu *et. al.* 2006).

Pagrindinės ir pirmosios aukštesniosios modų nuostolių maksimumai yra neįymiai pastumti dažnių skalėje vienas kito atžvilgiu. Pagrindinės modos nuostolių maksimumas lygus 0,32 dB/mm ir stebimas, kai $f = 87,5$ GHz. Modos bangos ilgis lygus $4,2 \cdot 10^{-3}$ m. Pirmosios aukštesniosios modos nuostolių maksimumas lygus 0,36 dB/mm ir stebimas kai $f = 90$ GHz. Šios modos bangos ilgis lygus $4 \cdot 10^{-3}$ m (3.1 pav.). Svarbu išskirti 105–115 GHz dažnių ruožą tuo, kad jame gauti labai maži pagrindinės modos nuostoliai. Šis ypatumas gali būti panaudotas kuriant fiderines linijas ir specifinius superaukštųjų dažnių EM bangų perdavimo įrenginius, kuriuose perduodamų signalų iškraipymai – ypatingai maži.

EM bangų pagrindinės modos elektrinių laukų stiprio pasiskirstymai, kai $f = 95$ GHz ir $f = 110$ GHz parodyti 3.2 paveiksle. Kai EM bangos dažnis $f = 95$ GHz, metamedžiagos parametrai tokie: $\epsilon_r^m = -23,75 - i18,75$ ir $\mu_r^m = 1,75 + i1,625$. Kai EM bangos dažnis $f = 110$ GHz, metamedžiagos parametrai: $\epsilon_r^m = -10,83 - i0,02$ ir $\mu_r^m = 0,5 - i0,01$. EM bangos energijos nuostoliai bangolaidyje išauga, kai EM bangos dažnis $f = 95$ GHz ir sumažėja, kai dažnis $f = 110$ GHz (3.1 (b) pav.). Minėtame dažnių ruože metamedžiagos santykinė dielektrinė skvarba yra neigiama.



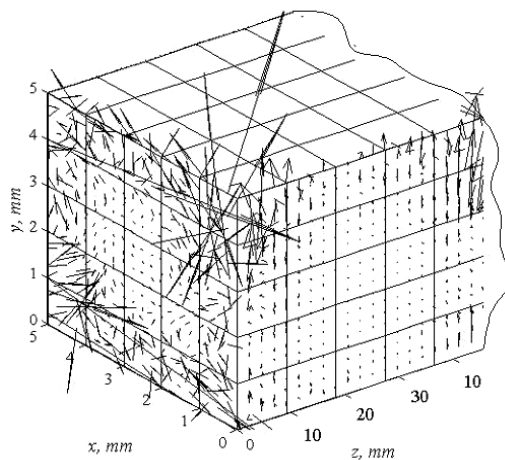
(a)



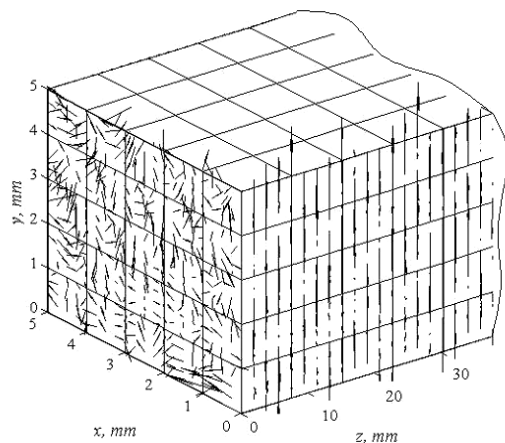
(b)

3.1 pav. Metamedžiagos kvadrato formos skerspjūvio bangolaidžio dispersinės charakteristikos: (a) – normuotos fazinės pastoviosios priklausomybė nuo bangolaidžių sklindančios EM bangos dažnio; (b) – slopinimo pastoviosios (nuostolių) priklausomybė nuo dažnio. Pagrindinė moda pavaizduota ištisine linija su juodais taškais, pirmoji aukštesnioji – ištisine linija su apskritimais

Fig. 3.1. The dispersion characteristics of a rectangular-shaped cross-section waveguide made of metamaterial: (a) – the dependence of phase constants upon frequency and (b) – the dependences of attenuation constants (losses) upon frequency of the propagating EM wave. The main mode is displayed by the solid line with black points and the first-higher-mode by the solid line with circles



(a)



(b)

3.2 pav. EM bangos pagrindinės modos, sklindančios kvadratinio metamedžiagos bangolaidžiu, 3D elektrinių laukų pasiskirstymai, kai EM bangos dažnis:

- (a) – $f = 95$ GHz ($\epsilon_r^m = -23,75 - i18,75$ ir $\mu_r^m = 1,75 + i1,625$) ir (b) – $f = 110$ GHz ($\epsilon_r^m = -10,83 - i0,02$ ir $\mu_r^m = 0,5 - i0,01$)

Fig. 3.2. The 3D electric field distribution of the main mode of the EM wave propagation along the rectangular waveguide made of metamaterial when the EM wave's frequency is: (a) – $f = 95$ GHz ($\epsilon_r^m = -23,75 - i18,75$ and $\mu_r^m = 1,75 + i1,625$); (b) – $f = 110$ GHz ($\epsilon_r^m = -10,83 - i0,02$ and $\mu_r^m = 0,5 - i0,01$)

3.1 lentelė. Pagrindinės modos EM bangų laukų komponentės taške, kurio koordinatės: $x = 4$ mm ir $y = 4$ mm, kai $f = 95$ ir $f = 110$ GHz

Table 3.1. The EM field components of the main mode at the point ($x = 4$ mm and $y = 4$ mm), when $f = 95$ and $f = 110$ GHz

$f = 95$ GHz		
E_z [V/m]	E_x [V/m]	E_y [V/m]
$3,8 \cdot 10^{-1} - i6,4 \cdot 10^{-1}$	$1,5 - i2,2$	$-1,0 + i2,0$
H_z [A/m]	H_x [A/m]	H_y [A/m]
$-3,4 \cdot 10^{-2} + i7,5 \cdot 10^{-2}$	$-7,0 \cdot 10^{-4} + i1,1 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3} - i3,9 \cdot 10^{-3}$
$f = 110$ GHz		
E_z [V/m]	E_x [V/m]	E_y [V/m]
$-1,3 \cdot 10^{-5} - i1,7 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-2} + i2,1 \cdot 10^{-2}$	$-2,9 \cdot 10^{-2} + i7,0 \cdot 10^{-2}$
H_z [A/m]	H_x [A/m]	H_y [A/m]
$-3,0 \cdot 10^{-3} - i2,9 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-4} - i3,1 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-5} + i1,1 \cdot 10^{-4}$

3.2 lentelė. Pirmos aukštesniosios modos EM lauko komponentės taške, kurio koordinatės yra $x = 4$ mm and $y = 4$ mm, kai $f = 95$ ir $f = 110$ GHz

Table 3.2. The EM field components of the first higher mode at the point ($x = 4$ mm and $y = 4$ mm), when $f = 95$ and $f = 110$ GHz

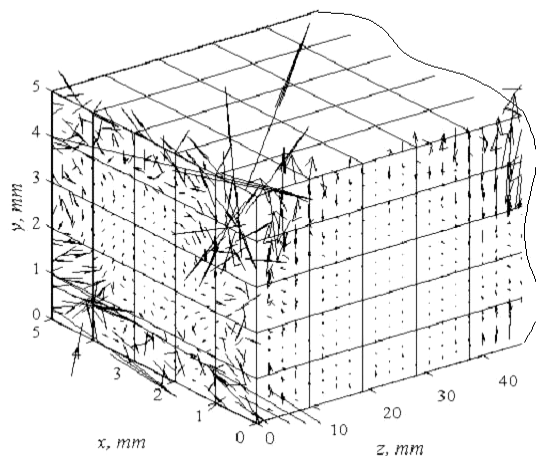
$f = 95$ GHz		
E_z [V/m]	E_x [V/m]	E_y [V/m]
$3,9 \cdot 10^{-1} - i6,2 \cdot 10^{-1}$	$1,4 - i1,9$	$-9,5 \cdot 10^{-1} + i1,7$
H_z [A/m]	H_x [A/m]	H_y [A/m]
$-3,2 \cdot 10^{-2} + i6,4 \cdot 10^{-2}$	$-8,0 \cdot 10^{-4} + i1,4 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3} - i3,4 \cdot 10^{-3}$
$f = 110$ GHz		
E_z [V/m]	E_x [V/m]	E_y [V/m]
$1,3 \cdot 10^{-6} - i1,3 \cdot 10^{-5}$	$-4,6 \cdot 10^{-3} + i2,3 \cdot 10^{-2}$	$-2,6 \cdot 10^{-2} + i4,3 \cdot 10^{-2}$
H_z [A/m]	H_x [A/m]	H_y [A/m]
$-1,9 \cdot 10^{-3} - i2,4 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-4} - i1,8 \cdot 10^{-4}$	$-2,8 \cdot 10^{-5} + i1,1 \cdot 10^{-4}$

Elektrinis laukas labai silpnas bangolaidžio centre (3.2 (a) pav.), bet stiprus bangolaidis-oras riboje. Toks stiprio pasiskirstymas 95 GHz EM bangos atveju disertacijoje paaiškintas dideliais bangos nuostoliais. Tokio didelio dažnio EM banga sklinda pačiu metamedžiagos paviršiumi („skin“ gylyje).

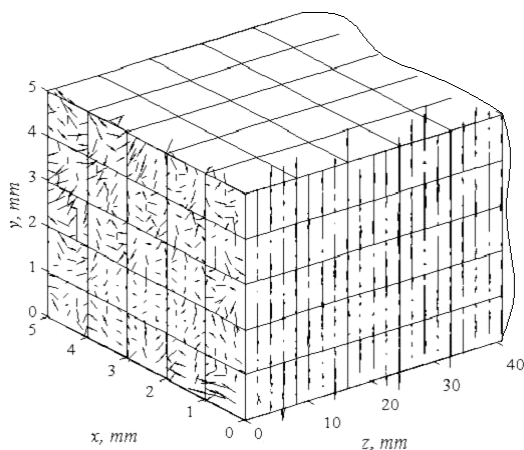
Lentelėse 3.1 ir 3.2 parodytos pagrindinės ir pirmosios aukštesniosios modų EM laukų kompleksinės dedamosios dviejuose skirtinguose dažniuose. Iš lentelėse pateiktų duomenų galima padaryti išvadą, jog nagrinėjamos EM bangų modos šiuose dažniuose – hibridinės.

Pagrindinės ir pirmosios aukštesniosios modų elektrinis laukas, kai $f = 95$ GHz (3.2(a) ir 3.3(a) pav.), koncentruojasi bangolaidis-oras riboje ir bangolaidžio skerspjūvio dviejuose priešingose kampuose. Stebima elektrinio lauko

pasiskirstymo asimetrija bangolaidis-oras riboje. Pagrindinė priežastis – santykinės dielektrinės skvarbos didelės, neigiamos realioji ir menamoji dalys.



(a)



(b)

3.3 pav. Pirmosios aukštesniosios modos, sklindančios kvadratiniam metamedžiagos bangolaidyje, 3D elektrinių laukų pasiskirstymai, kai EM bangos dažnis (a) – $f = 95$ GHz ir (b) – $f = 110$ GHz

Fig. 3.3. The 3D electric field distributions of the first-higher-mode of the EM wave propagating along the rectangular waveguide made of metamaterial, when the EM wave frequency is: (a) – $f = 95$ GHz and (b) – $f = 110$ GHz

Palyginus tarpusavyje 3.2(b) ir 3.3(b) paveikslus nustatyta, kad EM bangos pagrindinės ir pirmos aukštesniosios modų elektrinių laukų stiprių pasiskirstymas tolygesnis, kai bangos dažnis $f = 110$ GHz. Kai $f = 110$ GHz, banga nesikoncentruoja bangolaidžio briaunose. Pagrindinė priežastis – EM bangos elektrinio lauko gilesnis išsiskverbimas į metamedžiagą, nes 110 GHz dažnio EM bangos nuostoliai – santykinai maži (3.1(b) pav.). Elektrinio lauko stiprio įvertinimui, lauko jėgų linijų projekcijos į bangolaidžio sienelės (3.2 ir 3.3 pav.) suskaičiuotos kiekvieno skerspjūvio 10^4 000 taškų.

- **Metamedžiagos kvadrato (4×4 mm²) formos bangolaidžio elektrodinaminė analizė**

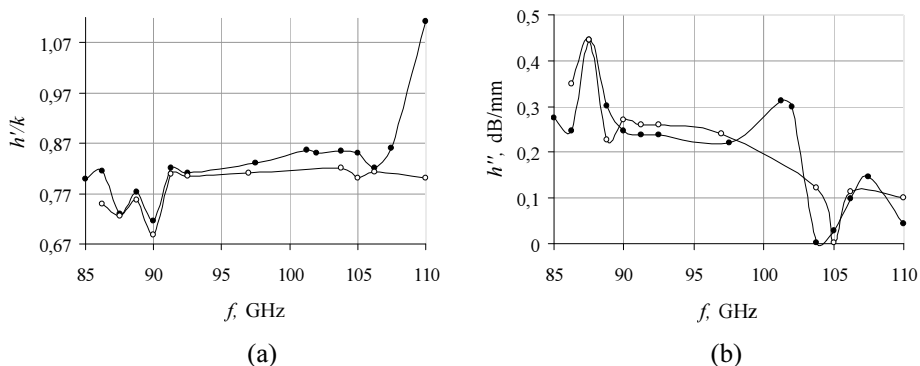
Metamedžiagos bangolaidis (Gric *et al.* 2010) ištirtas, taikant SIL metodą. Atkreipus dėmesį į tai, kad metamedžiaga sugeria EM bangų energiją (Gric *et al.* 2010), dispersinės lygties kompleksinės šaknys buvo surastos Mullerio metodu (Gric *et al.* 2010).

Gauti skaičiavimų rezultatai parodyti 3.4 paveiksle. Čia pagrindinės modos dispersinės charakteristikos parodytos taškais, o pirmosios aukštesniosios – apskritimais. Paveiksle $h = h' - ih''$ yra kompleksinė sklidimo pastovioji. Čia $h' = \text{Re}(h)$, $h' = 2\pi/\lambda$, su λ – modos bangos ilgiu. Kiekvienos modos nuostoliai charakterizuojami dydžiu $h'' = \text{Im}(h)$.

Normuotos sklidimo pastoviosios h'/k priklausomybė nuo EM bangos dažnio parodyta 3.4 (a) paveiksle. Nustatyta, jog h' mažesnė už bangos skaičių k , kai EM bangų dažnis intervale nuo 85 iki 108 GHz (3.4 (a) pav.). Tai reiškia, kad šiuose dažniuose pagrindinė ir pirmoji aukštesnioji modos yra greitosios. Abiejų modų bangų ilgiai skiriasi nežymiai, o nuostoliai sudėtingai priklauso nuo dažnio. Nuostolių kreivės turi kelis maksimumus ir minimumus. Pagrindinės modos nuostoliai sumažėja, kai EM bangos dažnis pasiekia 103,75 GHz.

EM bangos pagrindinės modos 3D elektrinio lauko pasiskirstymas, kai bangos dažnis 92,5 GHz, pavaizduotas 3.5 paveiksle. Šiuo atveju metamedžiagos santykinė dielektrinė skvarba $\epsilon_r = -35 - i2,5$, o santykinė magnetinė skvarba $\mu_r = 2,25 + i0,25$.

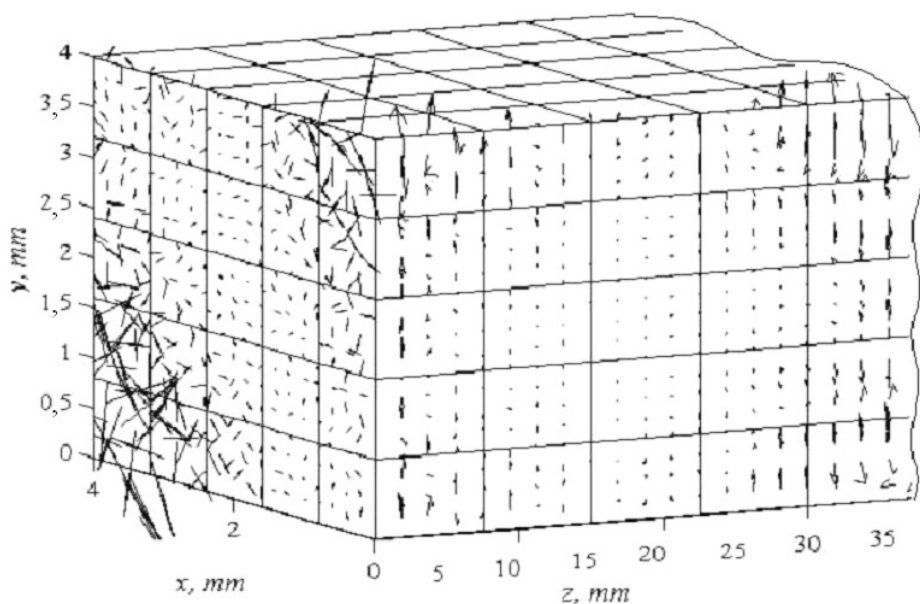
Dispersinių charakteristikų ekstremumai (3.4 pav.) sąlygojami santykinės dielektrinės ir magnetinės skvarbų ženklų pokyčiais. Metamedžiagos kvadrato formos (4×4 mm²) skerspjūvio ploto bangolaidžio nuostoliai beveik 45 kartus mažesni, jei EM bangos dažnis 103,75GHz, už nuostolius, kai bangos dažnis 87,5 GHz (3.4 (b) pav.). Pagrindinė priežastis – santykinės magnetinės skvarbos kitimas, kintant dažniui. 103,75 GHz dažnio EM bangos atveju $\mu'' = 0$, o 87,5 GHz dažnio atveju – 1,5.



3.4 pav. EM bangos pagrindinės modos, sklindančios metamedžiagos kvadrato (4×4 mm²) formos skerspjuvio poto bangolaidžiu, dispersinės charakteristikos:

(a) – normuotos fazinės pastoviosios priklausomybė nuo dažnio; (b) – slopinimo pastoviosios (nuostolių) priklausomybė nuo dažnio. Pagrindinė moda pavaizduota linija sujungtais juodais taškais, o pirmoji aukštesnioji – linija sujungtais apskritimais

Fig. 3.4. The dispersion characteristics of the main mode of EM wave propagating along the rectangular waveguide made of metamaterial: (a) – phase constants vs. frequency dependences; (b) – the attenuation constants (losses) vs. frequency dependences. The main mode is denoted by the solid line connecting closed circles and the first-higher-mode – by the solid line connected open circles



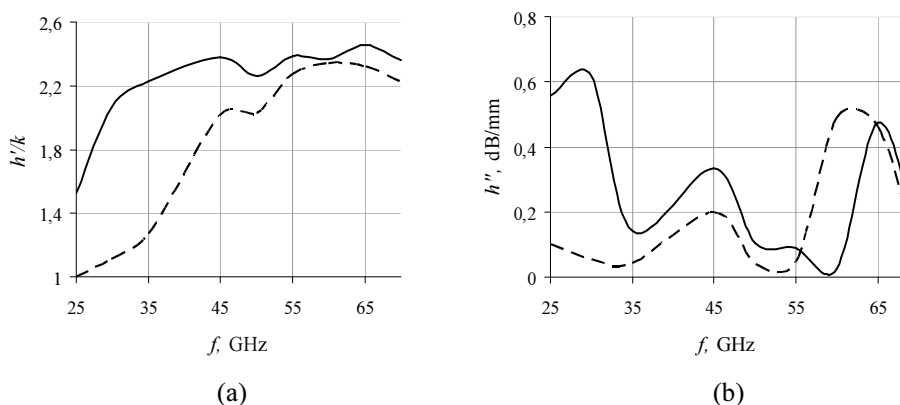
3.5 pav. Pagrindinės modos 3D vektorinis elektrinių laukų pasiskirstymas

Fig. 3.5. The 3D electric field strength lines of the main mode

Suskaičiuotas elektrinio lauko stipris bangolaidyje (3.5 pav.) pasiskirsto netolygiai. Elektrinis laukas gautas silpnas bangolaidžio viduryje, bet stiprus bangolaidžio priešpriešiniuose kampuose.

- **Kvadrato ($5 \times 5 \text{ mm}^2$) formos skerspjūvio ploto SiC bangolaidžio elektrodinaminė analizė**

Kvadrato formos skerspjūvio ploto SiC bangolaidžių analizė (Gric *et al* 2009) atlikta išsprendus Maxwello lygtys ir taikant SIL metodą. Žinant, jog SiC medžiaga sugeria EM bangų energiją (Gric *et al* 2009), dispersinės lygties kompleksinės šaknys buvo suskaičiuotos pritaikius Mullerio metodą (Gric *et al* 2009).



3.6 pav. Kvadrato formos skerspjūvio ploto SiC bangolaidžio dispersinės charakteristikos, kai $T=500 \text{ }^{\circ}\text{C}$: (a) – normuotos fazinės pastoviosios ir (b) – slopinimo pastoviosios (nuostolių) priklausomybės nuo dažnio. Pagrindinė moda pavaizduota ištisine, o pirmoji aukštesnioji – punktyrine linijomis

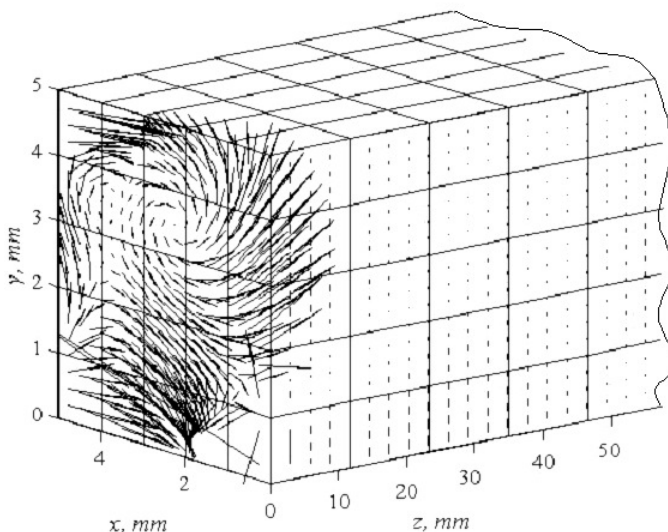
Fig. 3.6. The EM wave's dispersion characteristics in the SiC waveguide having square-shaped cross-section, when $T=500 \text{ }^{\circ}\text{C}$: (a) – the phase constants and (b) – the attenuation constants (losses) vs. frequency dependences. The main mode is denoted by the solid line and the first-higher-mode by the dashed line

Kvadrato ($5 \times 5 \text{ mm}^2$) formos skerspjūvio ploto SiC bangolaidžio dispersinės charakteristikos, esant $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrai, parodytos 3.6 paveiksle. Pagrindinės modos dispersinės kreivės parodytos ištisine linija, o pirmos aukštesniosios modos dispersinė kreivė – punktyrine linija. Esant $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrai, SiC medžiagos santykinė dielektrinė skvarba $\epsilon_r = 6,5 - i0,5$ (Baeraky 2002).

EM bangos pagrindinė ir pirmoji aukštesnioji modos (3.6(a) pav.) yra lėtosios modos, tirtame dažnių ruože. Abiejų minėtų modų, sklindančių kvadrato formos skerspjūvio bangolaidžiu, nuostolių priklausomybės nuo EM bangos

dažnio yra sudėtingos funkcijos (3.6(b) pav.). Pagrindinės modos nuostolių kreivė turi tris maksimumus. Pagrindinės modos nuostolių minimumas gaunamas 60 GHz dažnio EM bangai. Šio dažnio EM bangoms pirmosios aukštesniosios modos nuostoliai yra didesni už pagrindinės modos nuostolius. Gauti rezultatai, pateikti 3.6(b) paveiksle, demonstruoja SiC bangolaidžio privalumus kuriant 60 GHz dažnio EM bangų perdavimo techniką. Šios rūšies bangolaidžiai taip pat gali būti pritaikyti moderniuose plačiajuosčiuose EM bangų perdavimo įrenginiuose. 60 GHz dažnyje pagrindinės modos nuostoliai yra minimalūs.

EM bangos pagrindinės modos 3D magnetinio lauko pasiskirstymas SiC bangolaidyje pavaizduotas 3.7 paveiksle. Matome, kad magnetinio lauko pasiskirstymas yra pakankamai sudėtingas, magnetinio lauko jėgų linijos yra spiralinės.



3.7 pav. 30 GHz EM bangos pagrindinės modos 3D magnetinio lauko pasiskirstymas kvadrato formos skerspjūvio ploto bangolaidyje, esant $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrai

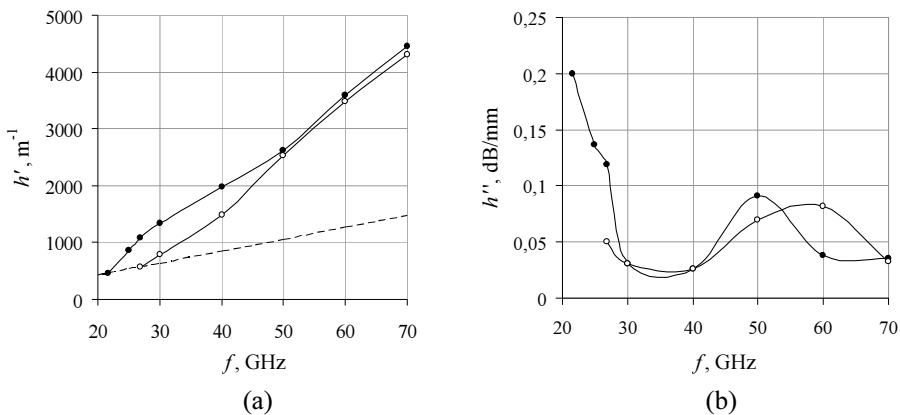
Fig. 3.7. The 3D distribution of the main mode of magnetic field of the 30-GHz-frequency EM wave propagating at temperature $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ along the SiC open-waveguide, which has a square-shaped cross-section

EM bangos pagrindinės modos magnetinio lauko pasiskirstymą kvadrato formos skerspjūvio ploto SiC bangolaidyje sudaro uždaros linijos (3.7 pav.). Paveiksle matyti magnetinio lauko jėgų linijos išilginiame xOz bangolaidžio pjūvyje. Magnetinio lauko jėgų linijų matmenys yra parenkami taip, kad galima būtų išvelgti magnetinio lauko pasiskirstymą. Pagal šią magnetinio lauko projekciją į išilginę bangolaidžio sienelę mes galime matyti vietas, kur magnetinis laukas

stipresnis arba silpnesnis. Tai yra svarbu, jeigu šalia nagrinėjamo bangolaidžio išsidėstę kiti bangolaidinio trakto elementai, jautrūs magnetiniam laukui.

- **Kvadrato ($6 \times 6 \text{ mm}^2$) formos skerspjūvio ploto SiC bangolaidžio elektrodinaminė analizė**

Superaukštojo dažnio EM bangų sklaidimo ypatumai kvadrato ($6 \times 6 \text{ mm}^2$) formos skerspjūvio ploto SiC bangolaidžiu ištirti esant $T = 1000^\circ\text{C}$ temperatūrai (Nickelson *et al.* 2009). SiC bangolaidžio dispersinės charakteristikos parodytos 3.8 paveiksle.



3.8 pav. Kvadrato ($6 \times 6 \text{ mm}^2$) formos skerspjūvio ploto SiC bangolaidžio dispersinės charakteristikos: (a) fazinės pastoviosios ir (b) slopinimo pastoviosios (nuostolių) priklausomybės nuo dažnio, esant 1000°C temperatūrai. Pagrindinė moda pavaizduota linijomis sujungtais taškais, o pirmoji aukštesnioji – linijomis sujungtais apskritimais

Fig. 3.8. Dispersion characteristics of the main and the first-higher modes of the EM wave propagation through a square ($6 \times 6 \text{ mm}^2$) cross-section SiC waveguide:

(a) – the phase constants and (b) – the attenuation constants (losses) vs. frequency dependences at the 1000°C temperature. The main mode is denoted by line connected points and the first-higher-mode is denoted by line-connected-circles

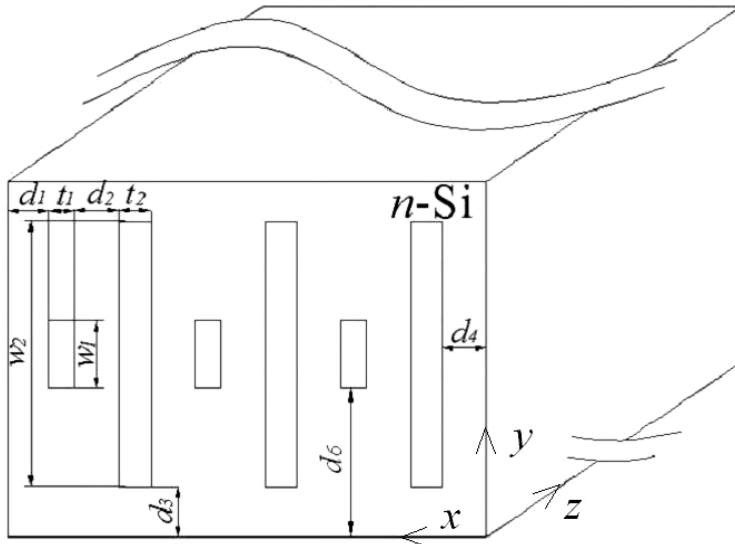
EM bangų pagrindinės ir pirmosios aukštesniosios modos dispersijos kreivės pavaizduotos 3.8(a) paveiksle. Pagrindinės ir pirmosios aukštesniosios modų nuostolių priklausomybės nuo EM bangos dažnio (3.8 (b) pav.) nėra monotoniškai kintančios funkcijos. Kai EM bangos dažnis $f < 30 \text{ GHz}$, pagrindinės modos nuostoliai didesni už pirmosios aukštesniosios modos nuostolius. Kai $30 \text{ GHz} < f < 40 \text{ GHz}$, abiejų EM bangos modų nuostoliai tarpusavyje beveik nesiskiria ir kinta vienodu dėsniumu. Aukštesnių gi dažnių atveju, t.y. kai $f > 40 \text{ GHz}$, abiejų modų nuostoliai kinta skirtingai. Nustatyta, jog EM bangos, sklindančios bangolaidžiu, pagrindinė moda yra hibridinė HE_{11} moda, o pirmoji

aukštesnioji – EH_{11} moda (Nickelson, Asmontas 2007). Daugelio mikrobanginių įrenginių veikimui svarbiausia yra pagrindinė moda, t. y. ta, kurios kritinis dažnis mažiausias. Mūsų atveju ši moda yra HE_{11} moda. Kitų sklindančių modų, kurios yra aukštesniosios, kritiniai dažniai yra didesni. Aukštesniosios modos yra parazitinės, t. y. jos trukdo normaliam prietaiso veikimui. Todėl pageidautina, kad pirmosios aukštesniosios modos kritinis dažnis būtų kuo didesnis už pagrindinės modos kritinį dažnį. Įrenginio plačiajuostiškumas apskaičiuojamas kaip santykis tarp absoliutinės darbo dažnių juostos ir jos centrinio dažnio (Nickelson *et al.* 2007). Įrenginys aukštos kokybės, jei jo plačiajuostiškumas didelis. Bangolaidžių santykinė praleidžiamų dažnių juosta, t. y. plačiajuostiškumas procentais apskaičiuojamas kaip santykis tarp absoliutinės praleidžiamų dažnių juostos ir jos centrinio dažnio (Nickelson, Asmontas 2007). Plačiajuostiškumas gali būti padidintas, jeigu aukštesniosios parazitinės modos stipriai gęsta, palyginus su pagrindine moda ir jų EM laukų pasiskirstymai stipriai skiriasi nuo pagrindinės modos EM lauko pasiskirstymo. Šiuo atveju aukštesniosios modos arba nesusižadins, arba greitai gęs, netrukdydamos pagrindinės modos sklidimui.

3.2. Bangolaidžių su ertmėmis elektrodinaminė analizė

Poskyryje nagrinėjamos dvi skirtingos dvimatės periodinės n -Si bangolaidinės struktūros, kurių skerspjūvio plotas vienodas ir lygus $5 \times 5 \text{ mm}^2$ (3.9 pav.). Sukurta programinė įranga leidžia tirti laisvai pasirinktos geometrijos bangolaidinės struktūras (3.9 pav.). Disertaciniame darbe sukurtoje kompiuterio programoje visi dydžiai, parodyti 3.9 paveiksle, gali būti keičiami nepriklausomai. EM banga sklinda z ašies kryptimi. Ta pačia kryptimi išdėstyti tuščiaviduriai kanalai, kurie gali būti sukurti, taikant lazerinį spinduliavimą. Mes padarėme prielaidą, jog atstumas $d_3 = d_6$. Tam, kad atlikti bangolaidinės struktūros elektrodinaminį tyrimą, reikia išspręsti elektrodinaminę ribinę užduotį. Keičiant šios struktūros matmenis, keičiasi ribinės sąlygos, o dėl to ir išilginė sklidimo pastovioji. Ši ribinių užduočių savybė leidžia optimizuoti bangolaidinių struktūrų elektrodinaminius parametrus, keičiant atskirų struktūros elementų matmenis, pvz. keičiant skylių matmenis, atstumus tarp jų arba jų išsidėstymus bangolaidžių sienelių atžvilgiu.

Atliktuose skaičiavimuose keletas dydžių palikta nekintančiais: $t_1 = t_2 = 0,2 \text{ mm}$, $w_1 = w_2 = 1 \text{ mm}$, $d_2 = 0,2 \text{ mm}$. Visų bangolaidžio tuščiavidurių ertmių matmenys yra sekantys $w_n \times t_n = 1 \times 0,2 \text{ mm}^2$, čia n – sveikasis skaičius, galintis įgyti reikšmes nuo 1 iki 7, imtinai. Didžiausias bangolaidžio tuščiavidurių ertmių kiekis šiame darbe yra 7.



3.9 pav. Periodinė n -Si bangolaidinė struktūra, su periodiškai pasikartojančiomis tuščiavidurėmis ertmėmis (išilginiais kanalais). EM banga sklinda z -kryptimi
Fig. 3.9. The periodical n -Si waveguide structure with air holes (longitudinal channels). The EM wave propagates in the z -axis direction

Tačiau mūsų sukurtas algoritmas leidžia parinkti bet kokią ertmių kiekį. Kaip žinoma, šiuo metu perspektyvi tyrimų sritis fotoniniai kristalai, siekiant nukreipti EM (šviesos) bangą (Joannopoulos *et al.* 2008). Pavyzdžiui, galima valdyti medžiagos, iš kurios pagamintas bangolaidis, charakteristikas šviesos spinduliui, kuris koncentruojasi tuščiavidurės ertmės. Be to tuščiaviduriai kanalai leidžia sumažinti medžiagos santykinę dielektrinę skvarbą. Taip pat santykinė dielektrinė skvarba įtakojama kanalų matmenimis, jų išsidėstymu ir kiekiu.

Nekreipiant dėmesio į tai, jog fotoniniai kristalai ir bangolaidinės struktūros, pristatomos šiame darbe, turi panašius matmenis ir vienodas funkcijas (t. y. EM bangos sklidimas), yra reikšmingi skirtumai. Puslaidininkiniai bangolaidžiai su periodiškai pasikartojančiomis ertmėmis, esančiomis bangolaidžio viduje, yra labai populiarūs dabartiniu metu. Dažnai tuščiavidurės ertmės yra išdėstytos tolygiai fotoninio kristalo paviršiuje ir statmenai EM bangos (šviesos) sklidimo kryptimi. Mūsų atveju bangolaidis yra tolygus z ašies kryptimi ir tuščiavidurės ertmės yra išdėstytos mikrobangos sklidimo kryptimi. Todėl tuščiaviduriai kanalai gali būti išdėstyti netolygiai bangolaidinėje struktūroje. Keičiant jų padėtis, galima keisti elektrodinamines charakteristikas ir pasiekti, kad EM laukas koncentruotųsi reikiamose bangolaidžio vietose. Pavyzdžiui, tam, kad padidinti

pramušimo įtampą, galima sukoncentruoti EM lauką bangolaidžio centre, keičiant tuščiavidurių ertmių padėtį ir jų formą.

Šiame darbe suskaičiuota puslaidininkinės n -Si medžiagos bangolaidžio santykinės kompleksinės dielektrinės skvarbos realiosios dalies reikšmė $Re(\epsilon_r^{Si}) = 11,8$. Menamoji gi skvarbos dalis gauta iš sąryšio (Nickelson, Asmontas 2009):

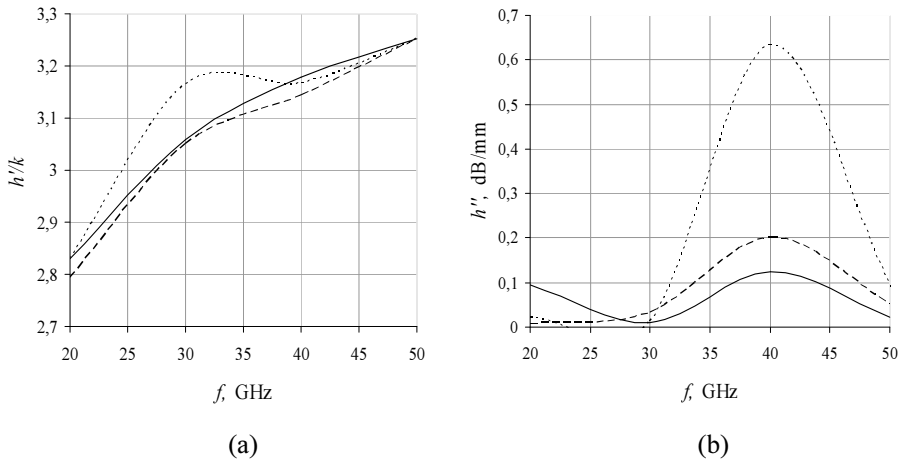
$$Im(\epsilon_r^{Si}) = 1/(\rho \cdot 2 \cdot \pi \cdot f), \quad (3.1)$$

čia $\rho = 100 \, \Omega \cdot m$ yra savitoji elektrinė puslaidininkio varža.

EM bangų dispersinės charakteristikos tiriamuojuje n -Si bangolaidinėje struktūroje, su ertmėmis, parodytos 3.10 ir 3.11 paveiksluose. Dispersinės charakteristikos suskaičiuotos skirtingam langų skaičiui, t.y. bangolaidyje esant 3, 5, ir 7 tuščiavidurėms ertmėms. Buvo padaryta prielaida, jog visos ertmės išdėstytos bangolaidžio centre. Kadangi bangolaidinės struktūros matmenys yra milimetro eilės, buvo nuspręsta tuščiavidurės ertmės išdėstyti bangolaidžio centre, kad būtų galima išlaikyti bangolaidžio mechaninį atsparumą. Buvo išrinkta struktūra, kurioje $d_1 = d_4$ visais skaičiuotų bangolaidžių atvejais.

Bangolaidyje „suformavus“ 7-ių ertmės, jo charakteristikų dažninės priklausomybės pavaizduotos punktyrinėmis linijomis (3.10(a) ir 3.10(b) pav.). Šiuo atveju $d_1 = 1,2 \, mm$. Atveju, kai bangolaidyje suformuotos 5-ios ertmės, grafikai pavaizduoti taškais. Tuomet $d_1 = 1,6 \, mm$. 3-jų gi ertmių atveju gauti skaičiavimų rezultatai pateikti ištisinėmis linijomis, o $d_1 = 2 \, mm$.

n -Si bangolaidžio dispersinės charakteristikos, įvairių skaičių ertmių lokalizavus bangolaidžio centre, parodytos 3.10(a) paveiksle. Šiuo atveju $d_3 = 2 \, mm$. EM bangos, kurios dažnis 40 GHz, nuostolių maksimumai parodyti 3.10(b) paveiksle. Didžiausi EM bangos pagrindinės modos nuostoliai stebimi, kai ertmių skaičius lygus 5. Atsižvelgiant į mūsų stačiakampių bangolaidinių struktūrų elektrodinaminių charakteristikų ir EM laukų skaičiavimo patirtį, mes galime teigti, kad bangolaidinėje struktūroje su 5 tuščiavidurėmis ertmėmis EM laukas yra stipriausias bangolaidžio medžiagoje lyginant su analogiškėmis bangolaidinėmis struktūromis, kai ertmių skaičius yra 3 arba 7. Keičiant ertmių skaičių, galima optimizuoti kuriamo mikrobanginio įrenginio elektrodinamines charakteristikas.



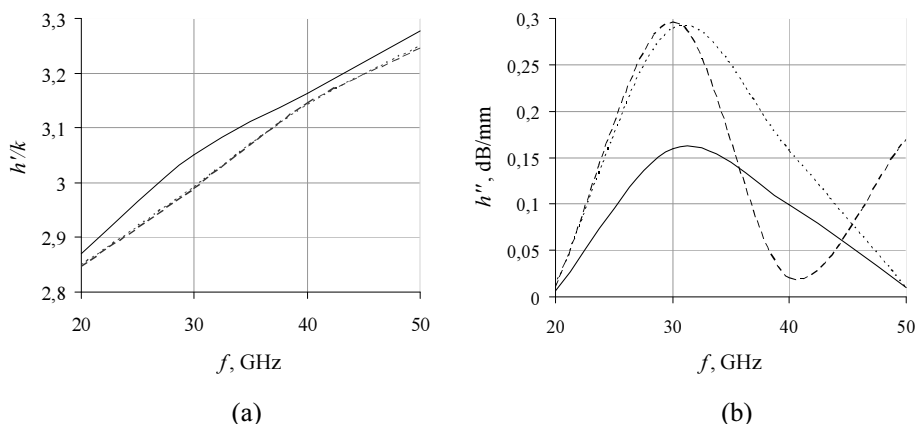
3.10 pav. EM bangų periodinėje bangolaidinėje struktūroje dispersinės charakteristikos ($d_3 = 2$ mm): (a) – fazinės pastoviosios ir (b) – slopinimo pastoviosios (nuostolių) priklausomybės nuo EM bangos dažnio, esant 7 ertmėms (EM bangos pagrindinė moda pavaizduota punktyrine linija), 5 ertmėms (taškine linija) ir 3 ertmėms (ištisine linija)

Fig. 3.10. The dispersion characteristics of the periodic waveguide structure ($d_3 = 2$ mm) dependences of: (a) – the phase constants (b) – the attenuation constants (losses) upon frequency. The main mode of EM wave is displayed by the dashed line when number of rectangular-shaped holes in the waveguide equals to 7, by the dotted line, when number of holes equals to 5, and by the solid line when number of holes equals to 3

EM bangos, kurios dažnis kinta $20 \text{ GHz} < f < 30 \text{ GHz}$ ribose, mažiausi nuostoliai gaunami bangolaidžiuose, turinčiuose 5-ias periodiškai išdėstytas ertmes. Pagrindinė nuostolių priežastis – medžiagos dipolių persiorientavimas (Baeraky 2002).

Bangolaidinės struktūros, turinčias periodiškai išdėstytas tuščiavidures ertmes, galima panaudoti EM bangų modernių filtrų, moduliatorių ir kt. sukūrimui. Naudojant tokias struktūras galima optimizuoti reikalingas bangolaidžių charakteristikas.

EM bangų dispersijos bangolaidinėse struktūrose, kuriose ertmės vertikaliaja kryptimi pastumtos link bangolaidžio krašto, tyrimų rezultatai parodyti 3.11 paveiksle. Šio atveju $d_3 = 3,5$ mm.



3.11 pav. Periodinės bangolaidinės struktūros su tuščiavidurėmis ertmėmis, pastumtomis link bangolaidžio krašto, kai $d_3=3,5$ mm, dispersinės charakteristikos: (a) – fazinės pastoviosios; (b) – slopinimo pastoviosios (nuostolių) priklausomybės nuo dažnio. Kai langų skaičius yra 7, pagrindinė moda pavaizduota punktyrine linija, kai langų skaičius yra 5 – taškine linija, 3 langų atveju – ištisine linija

Fig. 3.11. The dispersion characteristics of the periodic waveguide structure with the displaced holes ($d_3 = 3,5$ mm): (a) – the phase constants versus frequency; (b) – attenuation constants (losses) versus frequency dependences. The main mode is displayed by the dashed line when the number of air holes equal to 5, by the dotted line when the number of air holes equal to 7, by the solid line when the number of air holes equal to 3

Lyginant rezultatus pateiktus 3.10(b) ir 3.11(b) paveiksluose nustatyta, jog abiejų bangolaidinių struktūrų normuotos sklaidimo pastoviosios yra intervale nuo 2,8 iki 3,3. Kai dydžio $d_5 = 5 - d_3 - w_2$ vertę keičiame nuo 2 mm iki 0,5 mm, tai bangolaidinėje struktūroje, turinčioje ertmes, nuostolių maksimumai pasilenka dažnių skalėje nuo $f=40$ GHz iki $f=30$ GHz.

3.3. Trečiojo skyriaus išvados

1. Stačiakampių metamedžiagos bangolaidžiu sklinda superaukštųjų dažnių EM bangos hibridinės modos, todėl elektrinio ir magnetinio laukų stiprių pasiskirstymai apibrėžiami šešiomis dedamosiomis.
2. EM bangai sklindant SNG metamedžiagos stačiakampio formos skerspjuvio ploto bangolaidžiu, stipriausias bangos elektrinis laukas susikuria bangolaidis-oras riboje ir pasiskirsto nesimetriškai bangolaidžio skerspjuvyje.

3. Keičiant metamedžiagos bangolaidžio matmenis, kinta EM bangų, sklindančių juo, dispersinių charakteristikų pobūdis.
4. Lyginant apskritojo bangolaidžio ($r = 3$ mm), pagaminto iš SiC, nuostolius su stačiakampio bangolaidžio, į kurį galima įbrėžti apskritąjį, nuostoliais, matome, jog modų sklindančių stačiakampiame bangolaidyje nuostoliai yra mažesni.
5. Palyginus EM bangų dispersines charakteristikas SiC ir metamedžiagos identiškų matmenų bangolaidžiuose, SiC bangolaidžiuose gaunamose charakteristikose stebimi mažiau ryškūs ekstremumai. Tai paaiškinama tuo, kad SiC parametrai ε'' nuo dažnio kinta tiesiškai, o metamedžiagos atveju – šuoliais.
6. Lyginant bangolaidines struktūras, turinčias simetriškai ir nesimetriškai išdėstytas tuščiavidures ertmes bangolaidžio centro atžvilgiu, matome, jog EM bangų, sklindančių bangolaidžiu, dispersines charakteristikas reikiamų dažnių ruože galima valdyti parenkant ertmių bangolaidyje skaičių bei jų padėtį. Keičiant ertmių skaičių ir jų išsidėstymą bangolaidyje galima valdyti EM bangos bangolaidyje patiriamus nuostolius.

Bendrosios išvados

1. Sukurta programine įranga gali būti tiriami bet kurios skerspjūvio formos bangolaidžiai, pagaminti iš spinduliuotę sugeriančių medžiagų. Taip pat galima skaičiuoti bangolaidžių dispersines charakteristikas ir 2D ir 3D elektromagnetinių laukų pasiskirstymus. Gauti tyrimų rezultatai svarbūs, kadangi jie yra pagrindinės bangolaidžių charakteristikos, praktiškai konstruojant bangolaidinį prietaisą.
2. Sukurti programiniai algoritmai buvo pritaikyti, tiriant bangolaidžius, pagamintus iš naujų medžiagų, tokių kaip metamedžiagos, SiC. Nustatyta, kad tyrimų rezultatai neprieštarauja bendriems elektrodinamikos dėsniams. Tai reiškia, kad sukurtos programos gali būti taikomos, siekiant atlikti bangolaidžių, pagamintų iš įvairių medžiagų, tyrimus.
3. Apskritieji metamedžiagos bangolaidžiai ($r = 2$ mm, $r = 2,5$ mm) gali būti naudojami kaip filtrai. Tačiau mažesniojo spindulio apskrituoju metamedžiagos bangolaidžiu sklindančios pirmosios aukštesniosios modos nuostoliai kinta chaotiškai, keičiantis dažniui. Dėl šitos priežasties siauresniuose bangolaidžiuose gali būti moduluojama pagrindinė moda.
4. Apskritasis bangolaidis, pagamintas iš SiC ($r = 2,5$ mm), gali būti naudojamas kaip moduliatorius. Bangos fazė gali būti moduluojama, keičiant bangolaidžio temperatūrą.

5. Keičiant periodinio bangolaidžio geometriją, t. y. keičiant ertmių padėtis bei jų matmenis, galima valdyti bangolaidžio elektrodinamines charakteristikas, t. y. dispersines charakteristikas ir elektromagnetinių laukų pasiskirstymus.

Literatūra ir šaltiniai

Agarwal, A.; Ryu, S.-H. 2006. Status of SiC power devices and manufacturing issues, in *CS MANTECH Conference*, 215–218.

Alù, A.; Engheta, N. 2004. Guided modes in a waveguide filled with a pair of single-negative (SNG), double-negative (DNG), and/or double-positive (DPS) layers, *IEEE Trans. MTT* 52(1): 199–210.

Asmontas, S.; Nickelson, L.; Plonis, D. 2009. Dependences of propagation constants of cylindrical n-Si rod on the material specific resistivity, *Electronics and Electrical Engineering*, 94(6): 57–60.

Baeraky, T. A. 2002. Microwave measurements of the dielectric properties of silicon carbide at high temperature, *Egyptian Journal of Solids*, 25(5): 263–273.

Chen, H.; Wu, B.-I.; Kong, A. J. 2006. Review of electromagnetic theory in left-handed materials, *J. of Electromagn. Waves and Appl.* 20(15): 2137–2151.

Ikeuchi, M.; Sawami, M.; Niki, H. 1981. Analysis of open-type dielectric waveguides by the finite-element iterative method, *IEEE Trans.* 29(3): 234–239.

Joannopoulos, J. D.; Johnson, S. G.; Winn, J. N.; Meade, R. D. 2008. *Photonic crystals. Molding the flow of light*. Princeton University Press, 286 p.

Kajfez, D.; Kishk, A. A. 2002. Dielectric resonator antenna – possible candidate for adaptive antenna arrays, in *Telecommunications, Next Generation Networks and Beyond*

International Symposium [žiūrėta 2011 m. rugsėjo 25 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.ee.olemiss.edu/darko/dra-pcfaaa.pdf>>.

Kim, K. Y. 2009. Comparative analysis of guided modal properties of double-positive and double-negative metamaterial slab waveguides, *Radioengineering*, 18(2): 117–123.

Kim, K. Y. 2004. Guided and Leaky Modes of circular open electromagnetic waveguides: dielectric, plasma, and SiC columns: *Thesis for the Degree of Ph.D.* Kyungpook National University. Daegu, Korea, 201 p.

Li, C.; Sui, Q.; Li, F. 2005. Complex guided wave solutions of grounded dielectric slab made of metamaterials, *Progress In Electromagnetics Research*, PIER 51: 187–195.

Liu, S.-H., Liang, C.-H.; Ding, W.; Chen, L.; Pan, W.-T. 2007. Electromagnetic wave propagation through a slab waveguide of uniaxially anisotropic dispersive metamaterial, *Progress In Electromagnetics Research*, PIER 76: 467–475.

Lu, W. T.; Savo, S.; Casse, B. D. F.; Sridhar, S. 2009. Slow microwave waveguide made of negative permeability metamaterials, *Microwave and optical technology letters*, 51(11): 2705–2709.

Mahmoud, S. F.; Viitanen, A. J. 2005. Surface wave character on a slab of metamaterial with negative permittivity and permeability, *Progress In Electromagnetics Research*, PIER 51: 127–137.

Nickelson, L.; Bubnelis, A.; Baskys, A.; Navickas, R. 2011. The magnetoactive *p*-Ge rod waveguide loss analysis on the concentration of two component hole charge carriers, *Electronics and Electrical Engineering* 110(4): 53–56.

Nickelson, L.; Ašmontas, S. ir kt. 2007. *Atvirieji cilindriniai girotropiniai bangolaidžiai*. Vilnius: Technika, 245 p.

Nickelson, L.; Shugurov, V. 2005. *Singular integral equations' method for the analysis of microwave structures*. VSP Brill Academic Publishers, Leiden-Boston, The Netherlands, 348 p.

Penciu, R.S.; Kafesaki, M.; Gundogdu, T.F.; Economou, E.N.; Soukoulis, C.M. 2006. Theoretical study of left-handed behavior of composite metamaterials, *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications* 4: 12–16.

Vonsovici, A.; Reed, G. T.; Evans, A. G. R.; Namavar, F. 1999. Loss measurements for 3-SiC-on insulator waveguides for high-speed silicon-based photonic devices, in *SPIE Conference on Silicon-based Optoelectronics*, 115–124.

Wang, Z. J.; Dong, J. F. 2006. Analysis of guided modes in asymmetric left-handed slab waveguides, *Progress In Electromagnetics Research*, PIER 62: 203–215.

Autoriaus publikacijos disertacijos tema

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose (ISI Web of Science)

Gric, T.; Nickelson, L. 2011. Electrodynamical investigation of the photonic waveguide structure, *Electronics and Electrical Engineering* 111(5): 1–4. ISSN 1392-1215.

Gric, T.; Nickelson, L.; Asmontas, S. 2010. Electrodynamical characteristic particularity of open metamaterial square and circular waveguides, *Progress In Electromagnetics Research* PIER109: 361–379. ISSN: 1070-4698 (print), E-ISSN: 1559-8985 (online), doi: 10.2528/PIER10082505.

Asmontas, S.; Nickelson, L.; Gric, T. 2009. Electric field distributions in the open cylindrical silicon carbide waveguides, *Acta Physica Polonica A* 115(6): 1160–1161. ISSN 0587-4254.

Nickelson, L.; Gric, T.; Asmontas, S. 2009. Electric field distributions of the fast and slow modes propagated in the open rod SiC waveguide, *Electronics and Electrical Engineering* 93(5): 87–90. ISSN 1392-1215.

Nickelson, L.; Gric, T.; Asmontas, S.; Martavicius, R. 2008. Electrodynamical analyses of dielectric and metamaterial hollow-core cylindrical waveguides, *Electronics and Electrical Engineering* 82(2): 3–8. ISSN 1392-1215.

Nickelson, L.; Gric, T.; Asmontas, S. 2007. Dispersion characteristics of metamaterial hollow-core cylindrical waveguide, *Lithuanian Journal of Physics* 47(3): 273–278. ISSN 1392-1932.

Straipsniai kituose leidiniuose

Gric, T.; Nickelson, L.; Asmontas, S. 2010. Three dimensional magnetic field distributions and dispersion characteristics of rectangular and circular SiC waveguides, in *The 4th Microwave & Radar Week: 18th Int. Conf. on Microwaves, Radar, and Wireless Communications MIKON–2010: Selected Papers*, vol. 2. June 14–16, 2010, Vilnius, Lithuania, 722–725. ISBN 978-9955-690-20-7, IEEE Catalog Number CFP10784-PRT.

Gric, T.; Asmontas, S.; Nickelson, L. 2010. 3D vector electric field distributions and dispersion characteristics of open rectangular and circular metamaterial waveguides, in *The 4th Microwave & Radar Week: 18th Int. Conf. on Microwaves, Radar, and Wireless Communications MIKON–2010: Selected Papers*, vol. 2. June 14–16, 2010, Vilnius, Lithuania, 578–581. ISBN 978-9955-690-20-7, IEEE Catalog Number CFP10784-PRT.

Ašmontas, S.; Nickelson, L.; Gric, T.; Galwas, B. A. 2009. Solution of Maxwell's Equations by the Partial Area Method for the Electrodynamical Analyses of Open Lossy Metamaterial Waveguides, in *The International Conference „Differential Equations and their Applications. DETA 2009“: Selected Papers*, September 10–12, 2009, Kaunas, Lithuania, 17–20. ISBN 978-9955-25-747-9 (Thomson ISI Proceedings).

Nickelson, L.; Asmontas, S.; Gric, T.; Martavicius, R. 2009. Analysis of Slow and Fast Modes of Lossy Ceramic SiC Waveguides, in *The Progress in Electromagnetics Research Symposium: “PIERS2009”*: Selected Papers, vol. 1&2. August 12–21, 2009, Moscow, Russia, 573–576. ISSN 1159-9450 (Thomson ISI Proceedings).

Asmontas, S.; Nickelson, L.; Gric, T.; Martavicius, R. 2009. Electric field distributions in the cross-sections of the SiC hollow-core waveguides, in *The 17th IEEE International Pulsed Power Conference: Selected Papers*, vol. 1&2. June 28–July 2, 2009, Washington, USA, 507–510. IEEE/IEE, ISBN 9781424440658. Library of Congress: 2009901215 (Thomson ISI Proceedings).

Nickelson, L.; Gric, T.; Asmontas, S.; Martavicius, R. 2009. Analyses of the Gyroelectric Plasma Rod Waveguide, in *The 17th IEEE International Pulsed Power Conference: Selected Papers*, vol. 1&2. June 28–July 2, 2009, Washington, USA, 724–727. IEEE/IEE, ISBN 978-1-4244-40658. Library of Congress: 2009901215 (Thomson ISI Proceedings).

Nickelson, L.; Gric, T. 2008. Dispersion characteristics and electric field distributions of modes propagating in the open electrically gyrotropic semiconductor rod waveguide, in *The 17th Int. Conf. on Microwaves, Radar, and Wireless Communications MIKON–2008: Selected Papers*, vol. 2. May 19–21, 2008, Wroclaw, Poland, 501–504. IEEE Catalog Number: CFP08784-PRT, ISBN 13: 978-1-4244-3122-9 (Thomson ISI Proceedings).

Nickelson, L.; Galwas, B. A.; Gric, T.; Ašmontas, S. 2008. Electric field distributions in the cross-sections of the metamaterial hollow-core and rod waveguides, in *The 17th Int.*

Conf. on Microwaves, Radar, and Wireless Communications MIKON–2008: Selected Papers, vol. 2. May 19–21, 2008, Wroclaw, Poland, 497–500 (Thomson ISI Proceedings).

Patentas

Gric, T.; Nickelson, L. & Asmontas, S. 2010-11-25, *Waveguide Modulator*. Lietuvos Respublikos patentas Nr. LT 5710. Application of Invention 2010-040 is given in *Official bulletin of the state patent bureau of the republic of Lithuania* 2010/11, ISSN 1648-9985.

Recenzuotos mokslinės monografijos skyrius

Nickelson, L.; Gric, T.; Asmontas, S. 2011. Chapter 6. pages 115–141: Electrodynamical modelling of open cylindrical and rectangular carbide waveguides of book "Properties and applications of Silicon Carbide", ISBN 978-953-307-201-2, Edited by: Rosario Gerhardt, Hard cover, 535 pages, Publisher: InTech, Publication date: April 2011.

Tatjana GRIC

ELEKTROMAGNETINIŲ LAUKŲ IR DISPERSINIŲ
CHARAKTERISTIKŲ SKAIČIAVIMAI ATVIRUOSIUOSE
BANGOLAIDŽIUOSE IŠ SPINDULIUOTĘ
SUGERIANČIŲ MEDŽIAGŲ

Daktaro disertacija

Fiziniai mokslai,
kondensuotos medžiagos (P260)

ELECTROMAGNETIC FIELD AND DISPERSION
CHARACTERISTIC CALCULATIONS OF OPEN WAVEGUIDES
MADE OF ABSORPTIVE MATERIALS

Doctoral Dissertation

Physical Sciences,
Condensed Matter (P260)

2011 10 12. 8,0 sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius