

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Fotonikos ir nanotechnologijų institutas

Gediminas Kyburys

ANIZOTROPIŠKAI IŠĖSDINTŲ FOTONINIŲ KRISTALŲ SAVYBIŲ
MODELIAVIMAS TERAHERCŲ DAŽNIŲ RUOŽUI

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Optoelektronikos medžiagų ir technologijų
studijų programa

Studentas:

Gediminas Kyburys

Leista ginti

2018-05-25

Darbo vadovas:

prof. dr. Vincas Tamošiūnas

Instituto atstovas:

prof. habil. dr. Eugenijus Gaubas

Vilnius 2018

Turinys

Įvadas.....	3
1. Literatūros apžvalga	4
1.1 Fotoniniai kristalai	4
1.2 Fotoniniai kristalai iš strypelių ir padėklų su skylių masyvais	6
1.3 Poliarizacijos ir padėklo storio įtaka.....	7
1.4 Skylių padėklų linijiniai defektai	8
1.5 Terahercų dažnių ruožui skirti bangolaidžiai fotoniniuose kristaluose	10
1.6 Pilnai dielektrinė rezonansinė antena ir fotoninio kristalo bangolaidis.....	14
1.7 Anizotropinis silicio ėsdinimas.....	16
1.8 Programa MEEP	17
1.8.1 MEEP	17
1.8.2 Ctl failas	18
1.8.3 Laukai bangolaidyje	18
2. Modeliavimo metodikos	20
3. Anizotropiškai išėsdintų fotoninių kristalų savybių modeliavimas terahercų dažnių ruože	22
3.1 Išėsdinto silicio fotoninio kristalo modelis	22
3.2 Bangolaidžių savybių tyrimas.....	23
3.2.1 Modos.....	23
3.2.2 Bangos sklidimas bangolaidyje.....	24
4. Išvados	26
Literatūros sąrašas	27
Santrauka	29
Summary.....	30

Įvadas

Fotoniniai kristalai buvo sugalvoti ir yra plačiai tyrinėjami optikos mokslo visuomenės dėl galimybės šiuos kristalus panaudoti efektyviai kontroliuojant šviesą [1–7]. Šie kristalai tipiška yra sudaryti iš periodiškai besikeičiančių dviejų mažo nuostolio dielektrinių medžiagų su pakankamai dideliu dielektrinės skvarbos kontrastu. Šis dielektrikų išdėstymas sukuria taip vadinamus fotoninius draustinės juostos tarpus, kurie bangoms neleidžia skliti tokiam kristale. Analogiškai kieto kūno fizikai, taškinis defektas, atsiradęs fotoninio kristalo periodiškume, gali sukurti diskrečias lokalizuotas fotonines modas draustinėje juostoje. Tuo pačiu principu viendimensinis defektas fotoniniame kristale gali sukurti bangolaidį bangų sklidimui be energijos nuostolių. Ši koncepcija privedė iki dvidimensių fotoninių kristalų bangolaidžių, kurie yra suderinami su standartinėmis gamybos technologijomis, skirtų efektyviam ir kompaktiškam optinių signalų nukreipimui ir valdymui.

Viena iš svarbesnių fotoninių kristalų bangolaidžių funkcionalumo savybių, tai spinduliuotės sklidimo tarp bangolaidžio ir laisvos erdvės užtikrinimas, reikalingas komunikacijai fotoninėse grandinėse. Kol kas tai buvo pasiekama naudojant taip vadinamas nuotėkio modas (angl. leaky modes) pačiuose fotoniniuose kristaluose [8, 9] arba pasitelkiant difrakcines gardeles, suformuotas bangolaidyje [10, 11]. Žiūrint iš kitos pusės, per pastarąjį amžių buvo sukurta ir pagaminta daug ir įvairių mikrobangų antenų, o kai kurios iš jų gali būti suderintos su fotoninių kristalų bangolaidžių technologija. Vienas tokių pavyzdžių galėtų būti nerezonansinės smailios dielektrinės antenos, pasižyminčios pasižymi dideliu pralaidumu ir jautriu, bei kurios yra gana kompaktiškos [12]. Daugelis šių koncepcijų galėtų būti taikomos ir THz dažnių ruože, ypač jei pavyktų pačių fotoninių kristalų gamybai pritaikyti santykinai pigius gamybos būdus, tokius kaip, pavyzdžiui, anizotropinis cheminis išdėstymas.

Šio darbo tikslas yra suskaičiuoti, kokiomis savybėmis pasižymėtų terahercų dažniams skirti bangolaidžiai fotoniniuose kristaluose, anizotropiniu išdėstymu suformuotuose didžiavaržio silicio monokristalinėse plokštelėse.

1. Literatūros apžvalga

1.1 Fotoniniai kristalai [13]

Kokio tipo medžiagos gali pasiūlyti absoliutų šviesos sklidimo kontroliavimą? Siekiant atsakyti šį klausimą, reikia nagrinėti sėkmingas elektronines medžiagas. Viena pagrindinių kristalų savybių yra periodinis atomų ar molekulių išdėstymas. Modelis, pagal kurį atomai ar molekulės pasikartoja erdvėje, yra vadinamas kristaline gardele. Judančius kristalu elektronus veikia periodinis potencialas, o kristalo sudedamosios dalys ir gardelės geometrija nulemia kristalo laidumo savybes.

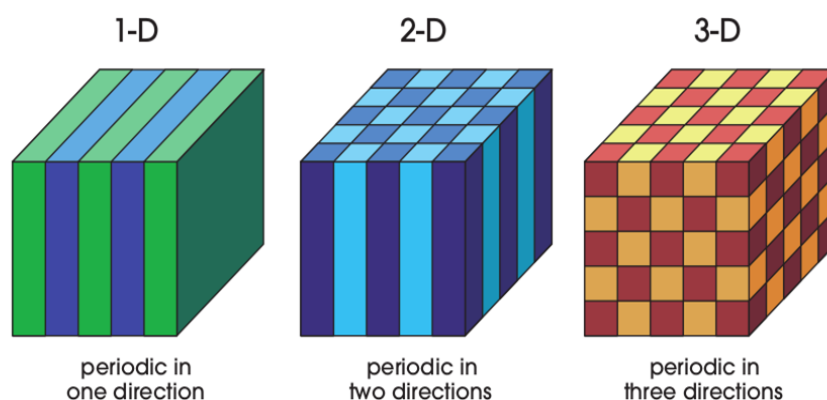
Kvantinės mechanikos teorija periodiniuose kristaluose paaiškina tai, kas kadaise buvo fizikos paslaptis: kodėl elektronai sklinda kaip bangos, o bangos, kurios atitinka tam tikrus kriterijus, periodiniuose potenciniuose laukuose gali keliauti be išsisklaidymo (tačiau jos vis tiek bus išsklaidytos defektų ar priemaišų). Vienas svarbiausių faktų yra tas, kad gardelėje gali būti draudžiamas tam tikrų bangų sklidimas - kristalo energinių juostų struktūroje gali būti tarpų.

Optinis įprastų kristalų analogas yra fotoninis kristalas, kuriame atomai ar molekulės yra pakeisti makroskopine terpe su kintančiomis dielektrinėmis konstantomis, o periodinis potencialas yra pakeistas periodine dielektrine funkcija. Jei medžiagos dielektrinės konstantos kristale yra pakankamai skirtingos, ir jei medžiagos šviesos sugertis yra pakankamai silpna, tada šviesos lūžis ir atspindys iš visų skirtingų sluoksnių gali sukurti daug reiškinį fotonams (šviesos modų), panašių į atominio potencialo sukurtiems elektronams. Vienas iš optinės kontrolės ir manipuliacijų problemos sprendimų yra fotoninis kristalas, mažo nuostolio periodinė dielektrinė terpė, pavaizduota 1 pav.

Norint plėtoti šią idėją toliau, reikia apsvarstyti kaip metaliniai bangolaidžiai ir rezonatoriai galėtų būti keičiami dariniais su fotoniniais kristalais. Metaliniai bangolaidžiai ir rezonatoriai yra plačiai naudojami mikrobangų sklidimo kontrolei. Metalinio rezonatoriaus sienelės neleidžia skliti elektromagnetinėms bangoms, kurių dažniai yra žemiau ribinio dažnio. Metalinis bangolaidis taip pat leidžia bangoms skliti tik išilgai jo ašies. Būtų labai naudinga, jeigu turėtume šias galimybes elektromagnetinėms bangoms, kurių dažniai yra už mikrobangų dažnių ribų, kaip pavyzdžiui regimoji šviesa. Vis dėlto regimosios šviesos energija yra greitai išsklaidoma per metalinius komponentus, kas padaro šį optinės kontrolės metodą neįmanomu apibendrinti. Fotoniniai kristalai leidžia apibendrinti ir sumažinti naudingas rezonatorių ir bangolaidžių savybes, kad būtų galima apimti platesnį dažnių ruožą. Taigi įmanoma milimetrų tikslumu sukonstruoti norimos geometrijos fotoninį kristalą mikrobangų kontroliavimui, arba mikronų tikslumu, jei norima kontroliuoti infraraudonąsias bangas.

Vienas iš plačiai naudojamų optinių komponentų yra daugiasluoksnis dielektrinis veidrodis, sudarytas iš besikeičiančių medžiagų sluoksnių su skirtinga dielektrine skvarba. Tinkamo bangos ilgio šviesa, susidurdama su tokia sluoksniuota medžiaga, yra visiškai atspindima. To priežastis yra tai, kad šviesos banga yra dalinai atspindima kiekvieno sluoksnio sankirtoje ir, jeigu tarpai yra periodiniai, atspindžiai gali interferuoti eliminuodami toliau plintančią bangą. Šį gerai žinomą reiškinį pirmą kartą paaiškino Lordas Reilis 1887 metais ir tai yra daugelio prietaisų bazė, tokių kaip dielektriniai veidrodžiai, dielektriniai Fabri-Pero filtrai ir paskirstyto grįžtamojo ryšio (angl. distributed feed-back) lazeriai. Visi šie prietaisai savyje turi mažo nuostolio dielektrikus, kurie yra periodiniai viena kryptimi, jie yra viendimensiniai fotoniniai kristalai. Netgi šie paprasčiausi fotoniniai kristalai gali turėti ypatingų savybių.

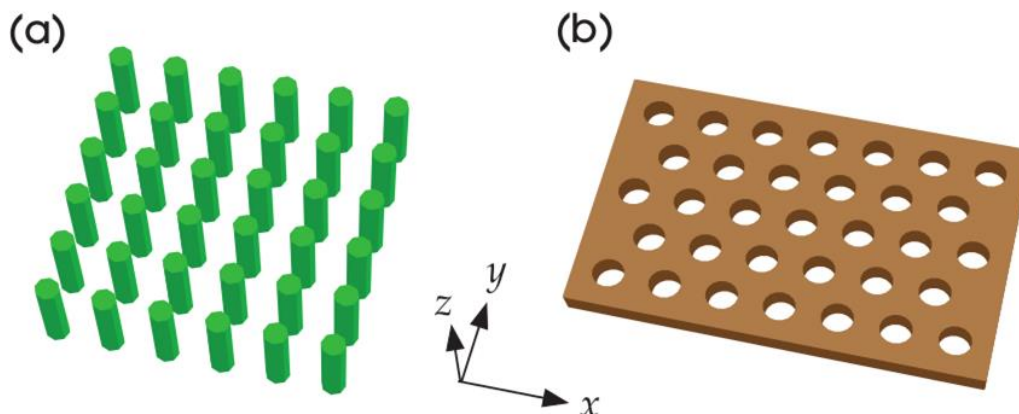
Jei tam tikrame dažnių ruože fotoninis kristalas draudžia bet kokios poliarizacijos krypties ir iš bet kokio šaltinio elektromagnetinių bangų sklidimą, sakoma, kad fotoninis kristalas turi visiškai užbaigtą fotoninį draustinės juostos tarpą. Kristalas su pilnu draustinės juostos tarpu tikrai bus įvairiakryptis reflektorius. Anksčiau minėta sluoksniuota dielektrinė medžiaga, kuri negali turėti visiškai užbaigto draustinės juostos tarpo, vistiek gali būti panaudota įvairiakrypčiai refleksijai gauti, bet tik tada, kai šviesos šaltinis yra toli nuo kristalo. Dažniausiai norint sukurti visišką fotoninį draustinės juostos tarpą dielektrinė gardelė privalo būti periodinė išilgai visomis trimis kryptimis, taip sudarydama tridimensinį fotoninį kristalą. Tačiau yra ir išimčių. Nedidelis sutrikimų kiekis priešingai periodinėje medžiagoje nesunaikins draustinės juostos tarpo ir netgi stipriai netvarkinga medžiaga gali užkirsti kelią sklaidai naudinga linkme per Andersono lokalizacijos mechanizmą.



1 pav. Paprasti viendimensio, dvidimensio ir tridimensio fotoninių kristalų pavyzdžiai. Skirtingos spalvos iliustruoja medžiagas su skirtingomis dielektrinėmis konstantomis. Fotoninį kristalą charakterizuojantis parametras yra dielektriko periodiškumas išilgai vienos ar kelių ašių. [13]

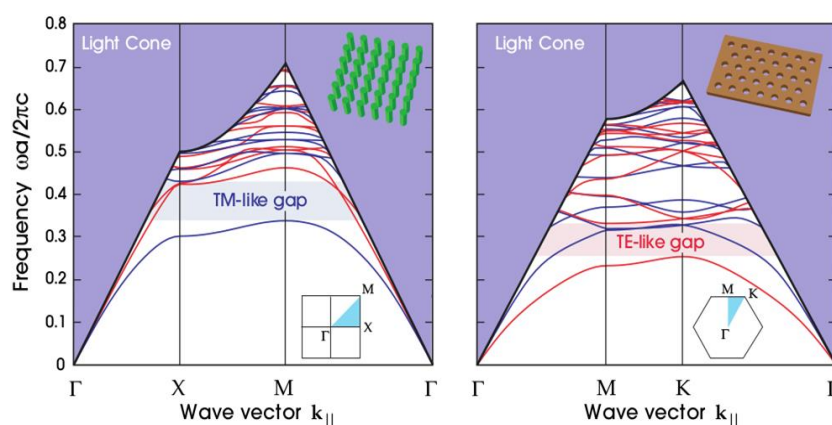
1.2 Fotoniniai kristalai iš strypelių ir padėklų su skylių masyvais [13]

2 pav. pateikti du fotoninių kristalų padėklų pavyzdžiai.



2 pav. Fotoninių kristalų padėklų pavyzdžiai. (a) Strypų padėklas, kvadratinė dielektrinių strypų gardelė ore. (b) Skylių padėklas, trikampė oro skylių gardelė dielektriniame padėkle. [13]

Panagrinsime dvi pagrindines topologijas: kvadratinę gardelę sudarytą iš dielektrinių strypų ore, pavaizduota 2 pav(a), ir trikampę gardelę su skylėmis iš oro dielektrike, pavaizduota 2 pav(b). Šias gardeles atitinkamai vadinsime strypų ir skylių padėklais. Mūsų strypų padėklo pavyzdyje strypų spindulys yra $0.2a$ ilgio, o jų aukštis – $2a$ (a yra kristalinės gardelės periodas). Tuo tarpu skylių padėklo pavyzdyje skylių spindulys yra $0.3a$, o jų storis - $0.6a$. Esant diskrečiai translaciniai simetrijai dvejomis kryptimis, plokščios bangos vektorius $k = (k_x, k_y)$ yra išlaikytas, tačiau vertikalios bangos vektorius k_z nėra išlaikytas. Strypų padėklo ir skylių padėklo juostų struktūros diagramas matome 3 pav.



3 pav. Fotoninių kristalų padėklų juostų diagramos. Strypų padėklas kairėje ir skylių padėklas dešinėje. Melsva sritis tai šviesos kūgis, visos išplėstinės modos sklindančios ore. Po šia sritimi yra juostos lokalizuotos padėkle: mėlyna/raudona juostos žymi TM/TE tipo modas atitinkamai. Strypų/skylių padėklai turi tarpus TM/TE tipo modose, kurie yra pažymėti šviesiai mėlyna/raudona atitinkamai. [13]

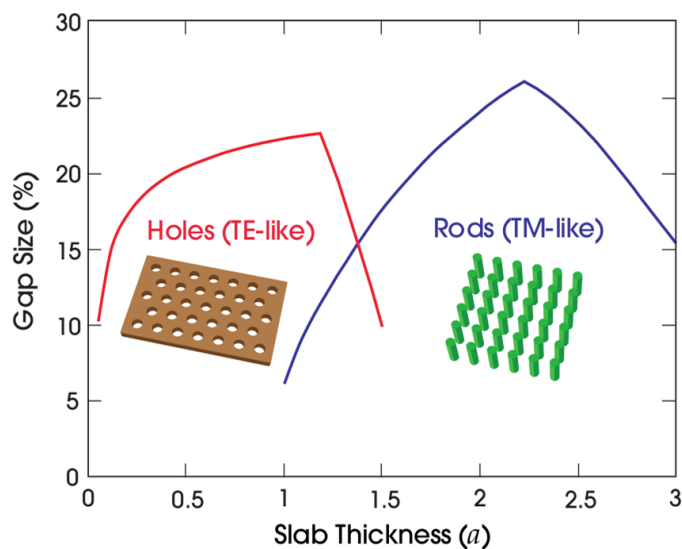
Ši sistema yra invariantinė per $z = 0$ plokštumos refleksijas, tai leidžia klasifikuoti modas kaip skersines elektrines (TE tipo, lygines) ir skersines magnetines (TM tipo, nelygines). 3 pav. matome, kad TE tipo modas žymi raudonos linijos, o TM tipo modas – mėlynos. Strypų padėklas yra palankus TM tipo tarpui, o skylių padėklas – TE tipo tarpui.

1.3 Poliarizacijos ir padėklo storio įtaka [13]

Optimalus padėklo storis labai stipriai priklauso nuo poliarizacijos. 4 pav. parodyta kaip strypo ar skylės padėklo draustinio tarpo dydis priklauso nuo padėklo storio.

Iš tiesų, jei padėklas yra per storas, draustinis tarpas gali ir išnykti. Tai galima paprastai suprasti lyginant labai storą ir labai ploną padėklus. Jei padėklas yra per plonas, tai juostos yra silpnai valdomos arba išvis nevaldomos. Dažnių skirtumas tarp žemiausios juostos ir šviesos linijos pasidaro per mažas tarpui, modos tampa tokios delokaliziuotos, kad periodiškumas pasidaro nebesvarbus. Labai storo padėklo atveju tarpas fundamentinėje modoje artėja link dvidimensės sistemos. Taigi idealus padėklo storis apytiksliai turėtų būti lygus pusei bangos ilgio.

Matome, kad 3 pav. nebuvo pasirinktas tas padėklo storis, kuris sukurtų maksimalų draustinį tarpą. Pagrindinė to priežastis yra ta, kad padėklų struktūrose limituojantis faktorius ne visada yra draustinio tarpo dydis. Pasirinkus mažesnę storį palengvėja gamyba ir vis tiek išlaikomas didelis draustinis tarpas.

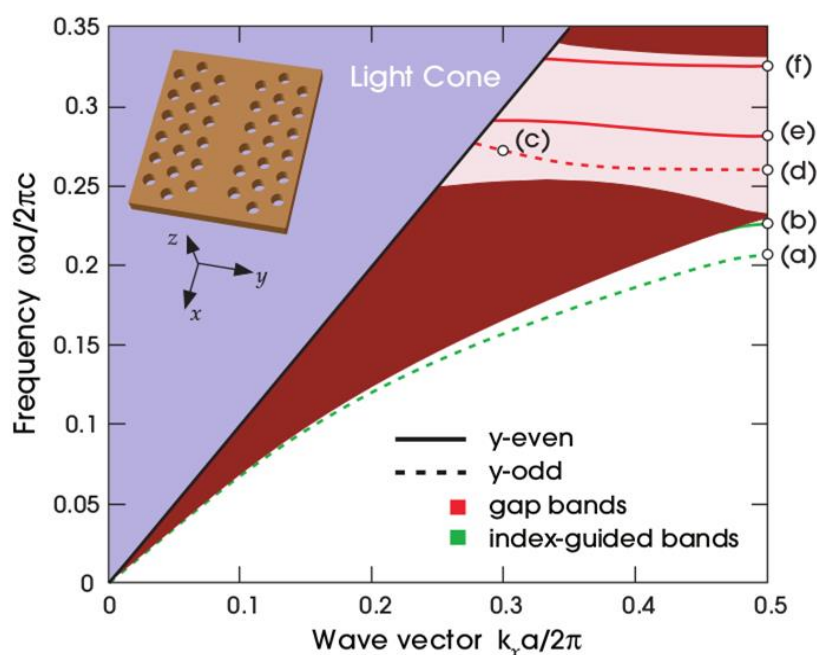


4 pav. Strypų ir skylių padėklų tarpų dydis nukreiptų bangų modose kaip padėklo storio funkcija periodiniais vienetais. Skylių padėklas turi tarpus TE tipo modose (raudona, kairė), o strypų padėklas – TM tipo modose (mėlyna, dešinė). Kai padėklo storis didėja, iš pradžių tarpas didėja, vėliau artėja link dvidimensio TE/TM tarpo, tačiau tam tikram taške aukštesnės eilės modos yra įstumiamos į tarpą ir jis po truputį pradeda mažėti. [13]

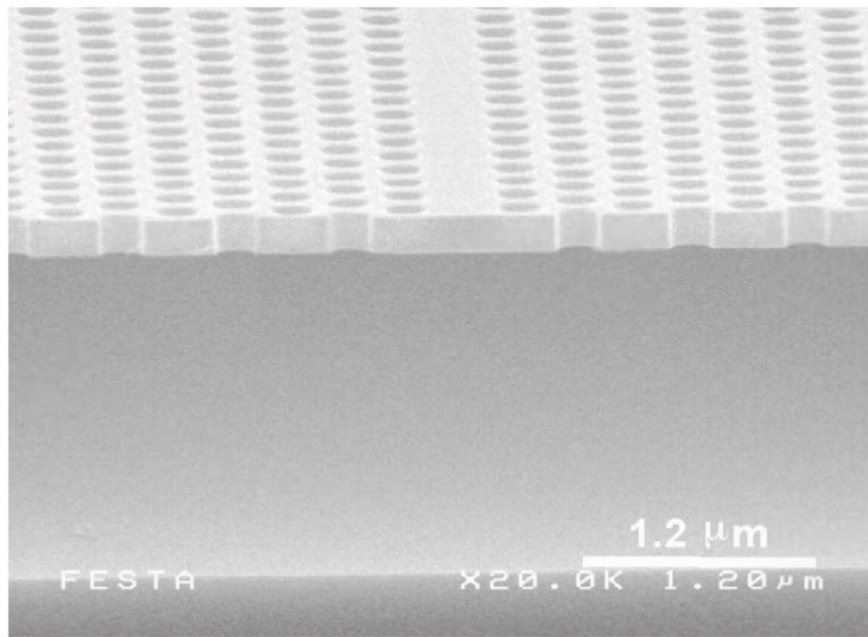
1.4 Skylių padėklų linijiniai defektai [13]

Vidutinę dielektrinę konstantą galima padidinti pastumiant juostas žemyn nuo viršutinio tarpo krašto. Projekcinė juostų diagrama skylių padėklui pavaizduota 5 pav. Tokio bangolaidžio pavyzdys parodytas 6 pav.

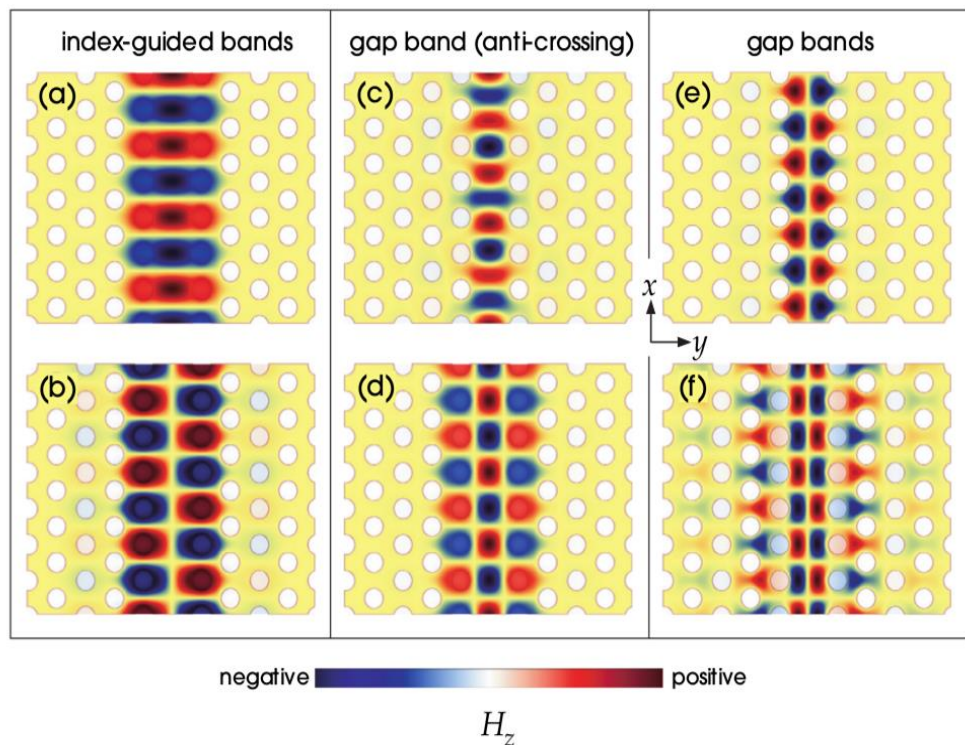
Šis bangolaidis turi kelias serijas modų, kurias horizontalia kryptimi izoliuoja draustinis tarpas, o vertikalia – lūžio rodiklio kontrastas tarp padėklo ir aplinkos. Tačiau šiuo atveju yra antra nukreiptų bangų modų kategorija, kuri atsiranda iš to, kad bangolaidis turi didesnę vidutinę dielektrinę konstantą negu jį supantis oras. Kadangi visos nukreiptų bangų modos yra TE tipo ir fundamentinės z kryptimi, jas galima atvaizduoti piešiant H_z $z = 0$ plokštumoje. 7 pav. rodo lauko struktūras penkioms tokioms modoms. Kadangi sistema yra simetriška atspindžiui $y = 0$ plokštumoje, todėl galima visas modas klasifikuoti kaip lygines ar nelygines šiam atspindžiui. Šios modos yra lengviausiai žadinamos plokščios bangos.



5 pav. Projekcinė juostų diagrama TE tipo būsenoms "W1" defektui skylių padėklui, suformuota kai trūksta artimiausios kaimyninės skylių eilės x kryptimi. Tamsiai raudonos sritys žymi išplėstines TE tipo kristalo modas. Nukreiptų bangų modos yra pateiktos ir tarpe (raudonos juostos ružavoje srityje) ir žemiau visų išplėstinių kristalo modų (žalios juostos po raudona sritimi). Nukreiptų bangų modos yra skirstomos į y - lygines (vientisos linijos) ir y - nelygines (punktyrinės linijos) atsižvelgiant į $y = 0$ veidrodinės simetrijos plokštumas bangolaidžio pjūviui. [13]

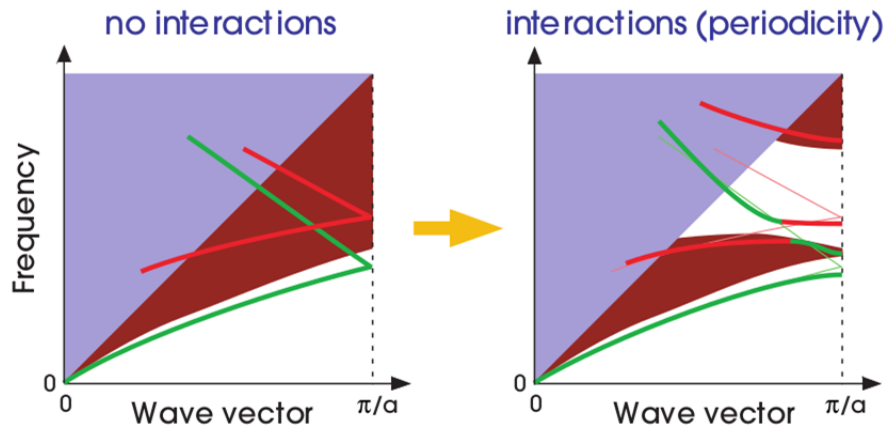


6 pav. Bangolaidžio suformuoto kai trūksta skylių eilės SEM nuotrauka (Sugimoto et al., 2004). [13]



7 pav. H_z lauko skerspjūvis bangolaidžiui su trūkstama skylių eile. Dielektrikas yra pažymėtas geltonai. Kairėje: y – nelyginės (viršuje) ir y – lyginės (apačioje) skirtingo lūžio rodiklio modos kai $k_x = \pi/a$, kurios turi žemesnius dažnius negu beatkuri išplėstinė kristalo moda arba oras prie šio k_x . (Kadangi H yra pseudovektorius, lyginės modos atrodo nelyginės ir atvirkščios.) Viduryje: Du taškai tame pačiame y – nelyginėje juostoje, kai $k_x=0,3 2\pi/a$ (viršuje) ir $k_x = \pi/a$ (apačioje). [13]

7 pav. (b) rodo $k_x = 0.3\pi/a$ struktūrą, o 7 pav. (c) rodo $k_x = 0.5\pi/a$ struktūrą. Sekanti moda turi papildomą mazgų porą y kryptimi. Šis drastiškas pasikeitimas yra įtakotas to, kad dvi juostos, kurios turėtų susikirsti, iš tikrųjų susidės viena su kita ir juostos atsistums. Šis reiškinys schematiškai pavaizduotas 8 pav.

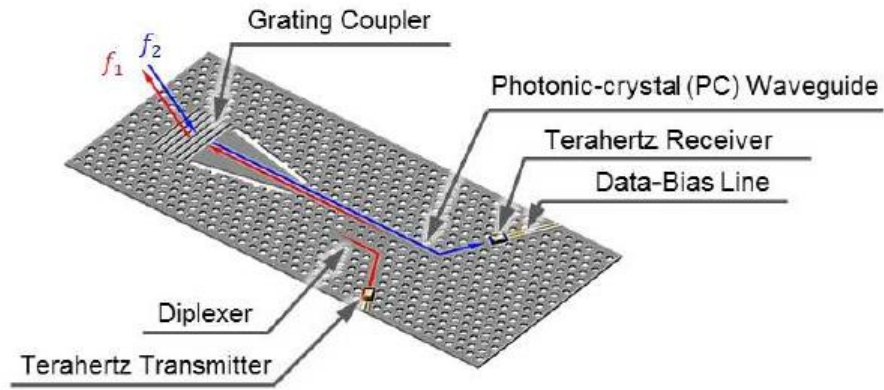


8 pav. Juostų struktūra, pridėjus periodiškumą (dešinėje) ir neperiodiniam bangolaidžiui (kairėje). Fundamentinė nukreiptų bangų moda (žemiau esanti žalia linija) yra atlenkta atgal iki Briueno zonos krašto ir susikerta su aukštesnės eilės moda (aukščiau esanti raudona linija). Periodiškumas (dešinėje) atveria tarpą ir taip pat suporuoja juostas jų susikirtimo taške. Jos išsiskiria ir suformuoja hibridinę juostą (raudona ir žalia linijos tarpe). [13]

Visų pirma reikia išivaizduoti y – nelygines juostas neperiodiniam bangolaidžiui (parodyta kairėje). Kontrastingo lūžio rodiklio moda (žalia) yra „atlenkta atgal“ iki menamo Briueno zonos krašto. Aukštesnės eilės y moda (raudona) gula ant aukštesnio dažnio ir taip pat yra „atlenkta atgal“. Toliau galime apžvelgti periodinį variantą (parodyta dešinėje). Atsiranda draustinis tarpas, juostos „stumia“ viena kitą. Tai vyksta ne tik Briueno zonos krašte, tačiau ir ten kur susikerta raudona ir žalia juostos. k_x didėja kartu su antra juosta, lauko struktūra nenutrūksta ir keičiasi iš raudonos modos, pavaizduota 7 pav. (b), į žalią modą, pavaizduota 7 pav. (c).

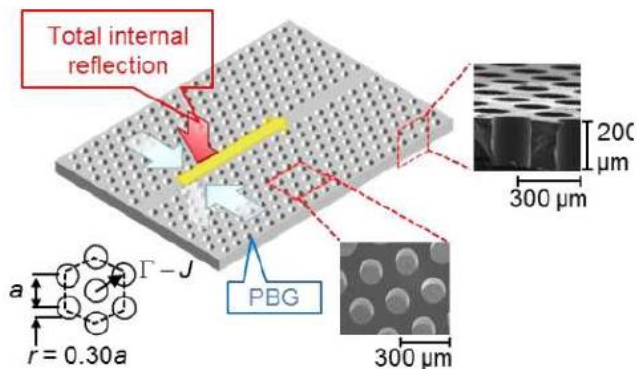
1.5 Terahercų dažnių ruožui skirti bangolaidžiai fotoniniuose kristaluose [14]

Šiuo metu terahercų dažnių juosta yra plačiai tyrinėjama ir traukia mokslininkus dėl savo unikalių panaudojimo galimybių. Šiame, viename iš daugelio straipsnių, buvo parodyta ir apžvelgta, kaip yra tobulinami visi komponentai parodyti 9 pav. Kompaktiškas šakotuvus (angl. diplexer) yra sukurtas ir pagamintas dažnių padalinimo (angl. frequency-division) komunikacijai. Gardelinis šakotuvus yra naudojamas kaip įėjimo/išėjimo sąsaja vietoj tradicinės antenos. Taip pat yra aptariama kaip terahercinės bangos bangolaidyje gali būti panaudotos diodiniuose prietaisuose. Taip pat pademonstruota gigabitinio ryšio galimybė, naudojant diodą su integruotu bangolaidžiu.

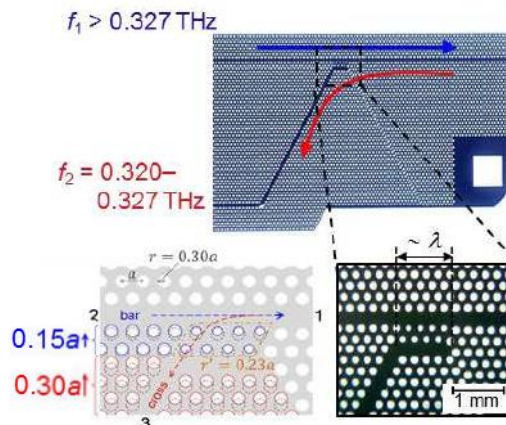


9 pav. Terahercinių bangų siųstuvo/imtuvo schema. [14]

10 pav. pavaizduota fotoninio kristalo bangolaidžio schema. Šis fotoninio kristalo padėklas turi dvidimensę trikampę gardelę su apvaliomis oro skylėmis 200 μm storio silicyje. Taipogi buvo pademonstruotas dažnio selektorius šviesos bangų ruože naudojantis dvidimensio fotoninio kristalo ertmes. Šio prietaiso schema pavaizduota 11 pav.

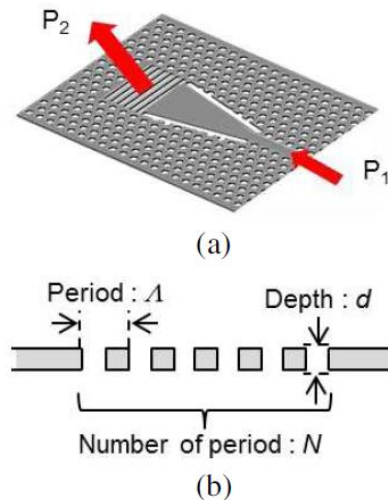


10 pav. Fotoninio kristalo bangolaidžio schema. [14]



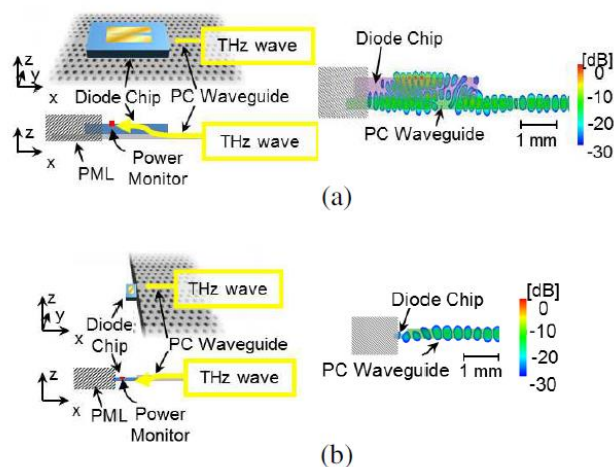
11 pav. Šakotuvo struktūros schema. [14]

Gardelinė jungtis, tai vienas iš metodų įėjimo/išėjimo sąsajos grandinėje realizavimui. 12 pav. parodyta šio prietaiso schema. Periodas, gardelės gylis ir periodų skaičius šiuo atveju atitinkamai lygūs 600 μm , 200 μm ir 5. Sėkmingas šio prietaiso veikimas buvo pasiektas prie 0.327 THz centriniam dažniui. Šiame dažnių ruože 6% pralaidumas gali būti padidintas iki daugiau nei 50% optimizuojant gardelinius parametrus.



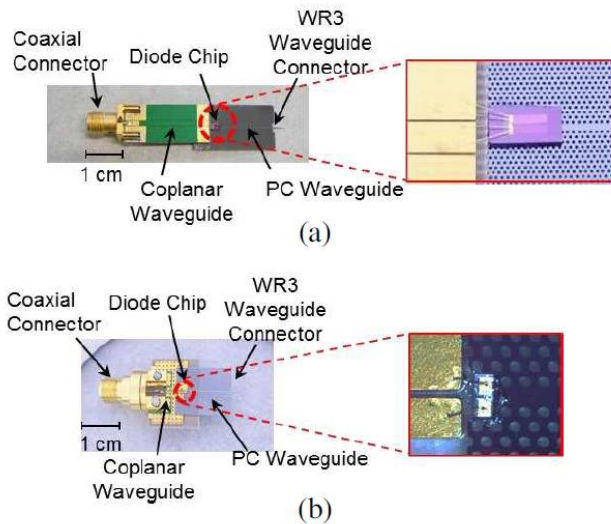
12 pav. (a) Gardelinės antenos (angl. grating coupler) schema, (b) struktūros parametrai. [14]

Taipogi pateikiamos dvi schemas diodų integracijai į fotoninio kristalo bangolaidį, parodyta 13 pav. Diodas yra sumontuotas ant fotoninio kristalo bangolaidžio. Nukreipta terahercinė banga bangolaidyje yra nukreipiama tiesiogiai ir sklinda smailia antena, kaip parodyta 13 pav. (a). Terahercinė banga sklindanti bangolaidyje tiesiogiai įsiskverbia į padėklą, kaip parodyta 13 pav. (b).



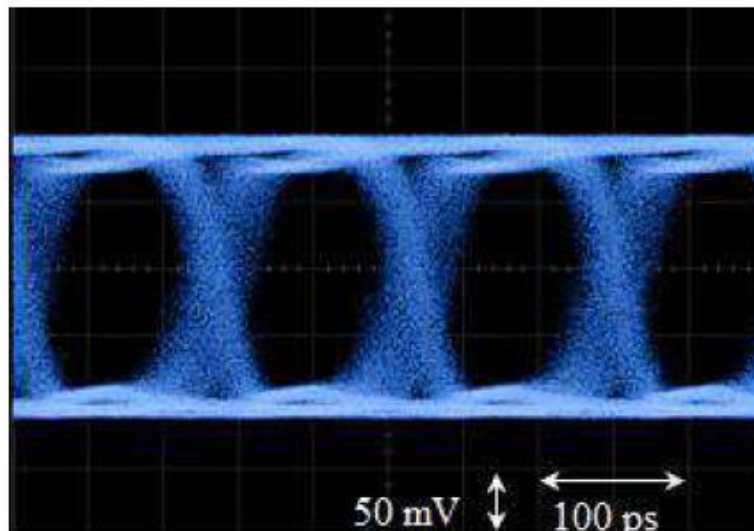
13 pav. Šakotuvų struktūrų schemas ir modeliavimo rezultatai. (a) Tiesioginis šakotuvas, (b) Galinis šakotuvas (angl. end-fire coupling). [14]

14 pav. parodyta pagamintų modulių, prijungtų prie koplanaraus bangolaidžio ir koaksialinio sujungimo, fotografijos. Buvo parodyta, kad teorinėje bangolaidžio sklidimo juostoje signalo ir triukšmo santykis pasiekia daugiau kaip 30 dB nuo 0.30 THz iki 0.31 THz. Tai leidžia terahercines bangas, kurios sklinda fotoninio kristalo bangolaidžiu, sėkmingai panaudoti elektroniniuose prietaisuose.



14 pav. Pagamintų modulių fotografijos. [14]

Buvo pademonstruotas ir taikymo pavyzdys – terahercinių bangų transmisija naudojant pagamintą detektoriaus modulį. 15 pav. pavaizduota akies diagrama prie 7.5 Gbit/s spartai ir 0.351 THz dažniui. Tokiu būdu, terahercinių bangų komunikacija buvo sėkmingai pademonstruota integruojant Šotkio barjero diodą su fotoninio kristalo bangolaidžiu.

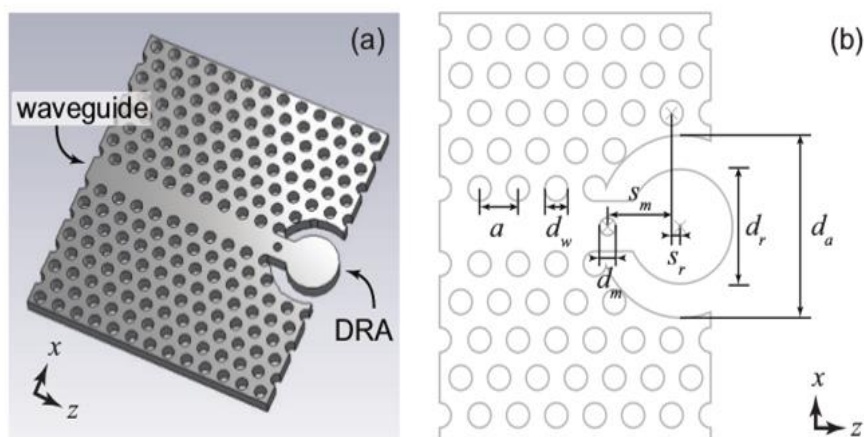


15 pav. Išmatuota akies diagrama (angl. eye diagram). [14]

1.6 Pilnai dielektrinė rezonansinė antena ir fotoninio kristalo bangolaidis [12]

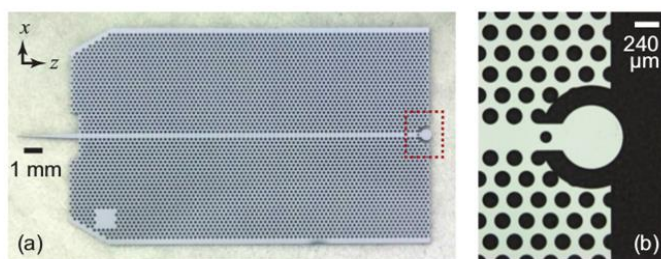
Šiuo atveju buvo bandyta sujungti dielektrinę rezonansinę anteną (DRA) ir dvidimensio fotoninio kristalo bangolaidį. Ši antena yra įmontuota bangolaidžio krašte efektyvaus spinduliavimo tikslais. Ši koncepcija įgyvendinta ir patikrinta eksperimentiškai terahercinių bangų ruože. Visa ši struktūra pagaminta ant vientisos silicio plokštės, kad veiktų 0.32 THz dažniui. Ši sistema suteikia galimybę sukurti didelio jautrumo, nedidelių nuostolių antenos platformą, kuri gali panaikinti laisvos erdvės kelio nuostolius teraherciniame perdavime. Naudojant mažo nuostolio dielektrines medžiagas šis dizainas gali suteikti galimybę infraraudonos ir matomos šviesos valdymui.

Silicis pasirinktas norint sukurti visišką bangolaidžio ir antenos integraciją. Ši medžiaga pasižymi išskirtinai mažu sugerties koeficientu, taipogi yra beveik nedispersinė terahercinių dažnių ruože. Silicio vidutinė dielektrinė skvarba lygi 11.68 ir yra puikiai suderinama su fotoninių kristalų technologijomis, bei dielektrinėmis rezonansinėmis antenomis. Silicio storis - 200 μm . Kaip parodyta 16 pav., buvo suformuota trikampė gardelė su skylių masyvais, kur gardelės konstanta ir skylių diametras atitinkamai lygūs 240 μm ir 144 μm . Bangų nukreipimui į bangolaidį yra įmontuota cilindrinė dielektrinė rezonansinė antena, kaip parodyta 16 pav. 100 μm diametro oro skylutė tarp antenos ir bangolaidžio padaryta geresniam suderinimui ir aukštesniam perdavimo koeficientui.



16 pav. Dielektrinės rezonansinės antenos (DRA) signalas fotoniniame kristale. (a) Vaizdas iš perspektyvos, (b) Bangolaidžio ir DRA išmatavimai. [12]

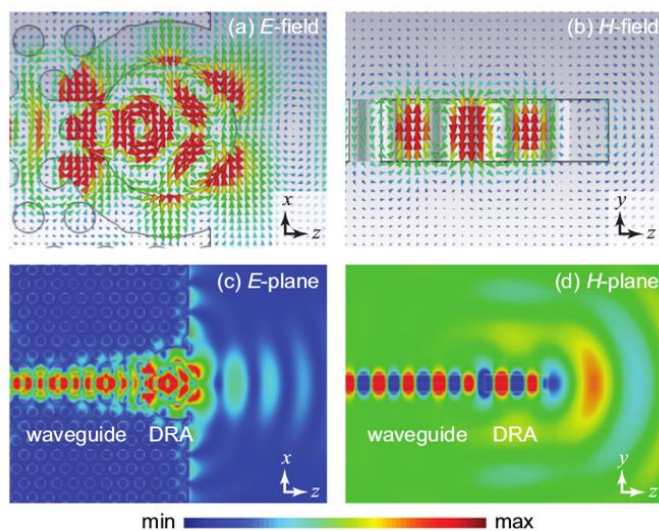
Taigi antenos-bangolaidžio struktūra gaminama litografijos ir gilaus joninio ėsdinimo būdu norint suformuoti oro skyles ir tarpus padėkle. 17 pav. parodyta pagaminta struktūra ir nurodyti mikroskopiniai jos parametrai.



17 pav. Pagaminta struktūra. (a) Struktūra pagaminta iš vieno sluoksnio silicio padėklo, (b) antenos nuotrauka padaryta optiniu mikroskopu. [12]

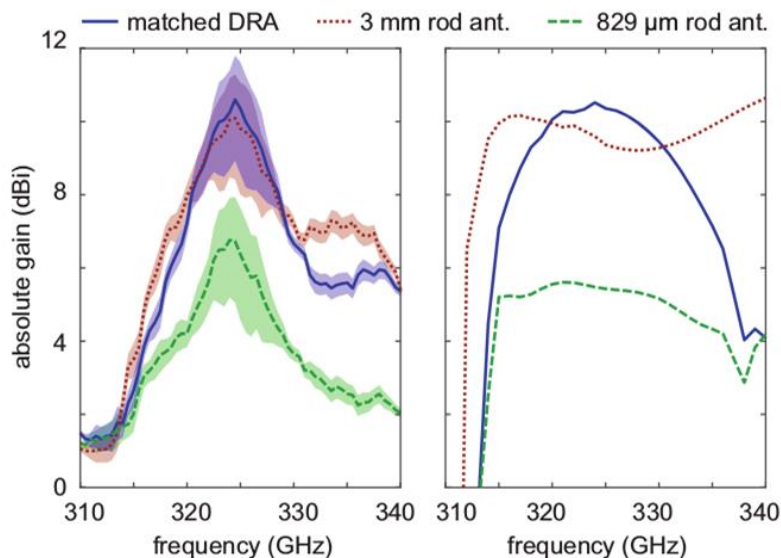
Vėliau naudojant šią anteną buvo atlikti dviejų tipų matavimai, vienas, jautrumo priklausomybės nuo dažnio charakterizavimui, o kitas, spinduliavimų struktūroms dvejose plokštumose gauti.

Rezultatų apžvalgoje susitelkiama į 325 GHz dažnį, nes aplink šį dažnį atspindžio koeficientas yra minimalus. Iš 18 pav. (a) ir 18 pav. (b) akivaizdžiai matosi kad dielektrinė rezonansinė antena veikia aukštesnės eilės modoje, kai laukas E osciliuoja plokštumoje, o H laukas už jos ribų. 18 pav. (c) atskleidžia, kad bangos yra šonais suglaustos bangolaidyje ir antenoje. 18 pav. (d) pavaizduotas kitas skerspjūvis, kuris parodo, kad pagrindinis spinduliavimas šioje plokštumoje turi palyginti platų kampinį plotį.



18 pav. Sumodeliuotas modų laukų pasiskirstymas prie 325 GHz dažnio. (a-b) Vektoriniai E ir H laukų pasiskirstymai atitinkamai. (c-d) Tangentinės ir normalizuotos E lauko komponentės plokštumoje ir už jos ribų atitinkamai. [12]

19 pav. pavaizduoti jautrio modeliavimo ir matavimo rezultatai dielektrinei rezonansinei antenai ir dviems papildomoms antenoms. Ir matavimo, ir modeliavimo atvejais didžiausias jautrumas prie 325 GHz dažnio yra maždaug 10.6 dBi. Modeliavimo atveju gaunamas 3-dB jautrumo dažnių juostos plotis.

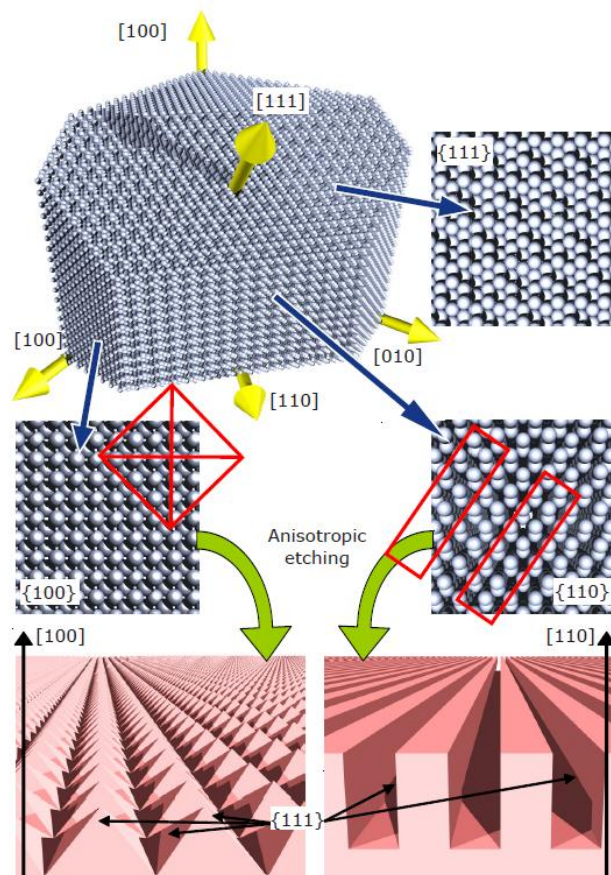


19 pav. DRA ir kitų antenų jautrumas. (a) išmatuota eksperimentiškai, (b) modeliavimo rezultatai.[12]

1.7 Anizotropinis silicio ėsdinimas [15]

Silicio atomų ryšio energija yra skirtinga kiekvienai kristalinei plokštumai, todėl silicio ėsdinimas gali būti stipriai anizotropinis. Kol gan efektyviai ėsdinamos tokios kristalinės plokštumos kaip (100) ir (110), stabilios (111) plokštumos veikia kaip ėsdinimo stabdiklis. (111) orientuoti silicio padėklai yra beveik neveikiami ėsdinimo. (100) orientuotuose padėkluose formuojamos keturkampės piramidės su (111) paviršiais. Tokio tipo piramidės naudojamos c-Si saulės celėse atspindžio minimizavimui. (110) orientuotuose padėkluose ėsdinant formuojasi statmenos lygiagrečios tranšėjos su (111) šoninėmis sienelėmis. Vienas tokių struktūrų taikymo pavyzdžių - mikrokanalai mikroelektromechaninėse sistemose. Visos šios geometrijos pavaizduotos 20 pav.

Anizotropiškumo laipsnis, ėsdinimo sparta ir ėsdinimo homogeniškumas priklauso nuo ėsdinimo temperatūros, atominių defektų silicio kristale, būdingų silicio kristalo priemaišų, ėsdiklio priemaišų (metalo jonai) ir jau išėsdinto silicio atomų koncentracijos. Silicio legiravimo koncentracija taip pat stipriai įtakoja ėsdinimą. Pavyzdžiui, ėsdinant boru legiruotą silicį susidaro boro silikatinis stiklas ant paviršiaus, kuris veikia kaip ėsdinimo stabdiklis, jei boro legiravimo koncentracija pasiekia 10^{19} cm^{-3} .



20 pav. Anizotropiškai išdinto silicio geometrijos įvairioms kristalinėms plokštumoms.[15]

1.8 Programa MEEP [16]

1.8.1 MEEP

Meep yra nemokamas, atviro kodo programinės įrangos paketas skirtas modeliuoti elektromagnetines sistemas naudojant baigtinių skirtumų laiko skalėje (angl. finite-difference time-domain (FDTD)) metodą. Meep - tai akronimas, reiškiantis *MIT Electromagnetic Equation Propagation*. Kadangi tai laikinis metodas, FDTD gali vieno modeliavimo metu pateikti sprendinius plačiam dažnių ruožui. Meep suteikia daug įvairių funkcijų, tokių kaip pilnas suderinimas su Python, Scheme ar C++ kodais, modeliavimas viendimensėje, dvidimensėje, tridimensėje ir cilindrinėje erdvėse, įvairiausių geometrijų elementų modeliavimas ir daug kitų. Pagrindinės programos apima perdavimo ir atspindžio spektrus, rezonansines modas ir dažnius, lauko struktūras. Meep kodinė sąsaja leidžia sukombinuoti daug skaičiavimų rūšių su daugiaparametrine optimizacija vienoje sekoje ar paraleliai.

1.8.2 Ctl failas

Naudojant Meep pagrindas yra kontrolinis failas, sutrumpintai "ctl", kuris tipiškai vadinamas kaip nors panašiai kaip pvz.ctl. Kontrolinis failas aprašo norimą tirti geometriją, tam tikrus šaltinius, skaičiavimų išvestis ir direktorijas, bei visa kita kas apibūdina norimus atlikti skaičiavimus. Lyginant su paprastu, lanksčiu formatu, ctl failas iš tikrųjų yra parašytas kodo kalba. Tai reiškia, kad šis failas gali atrodyti labai įvairiai, nuo paprastos geometriją aprašančių komandų sekos iki pilnos programos su naudotojo įvestimis, ciklais ir visu kitu ko gali prireikti atliekant modeliavimus.

1.8.3 Laukai bangolaidyje

Trumpai aptarsime tiesinio bangolaidžio modeliavimą. Prieš apibūdinant struktūrą, reikia apibūdinti skaičiavimo elementą. Žadinimas vyks vienoje bangolaidžio pusėje ir bus stebima kaip šis signalas sklis x kryptimi. Tam reikalingas tam tikrų išmatavimų bangolaidis. Tai yra aprašoma kontroliniame faile geometry-lattice kintamuoju ir atrodo štai taip:

```
(set! geometry-lattice (make lattice (size 16 8 no-size)))
```

Set! tai komanda nustatanti įėjimo reikšmės vertę. No-size parametras nusako kad elementas z kryptimi dydžio neturi, yra dvidimensis. Dabar jau galima pridėti ir bangolaidį. Dažniausiai struktūra yra aprašoma naudojant komandą list. Tai geometrinių objektų sąrašas kaupiamas kintamajame geometry. Kontroliniame faile tai atrodo štai taip:

```
(set! geometry (list  
  (make block (center 0 0) (size infinity 1 infinity)  
    (material (make dielectric (epsilon 12)))))
```

Šiuo atveju bangolaidis yra aprašomas block objektu, jo dielektrinė skvarba 12, o centro koordinatės (0,0). Kai jau turime struktūrą, reikia apibūdinti norimus šaltinius. Tai aprašoma komandomis list ir source:

```
(set! sources (list  
  (make source  
    (src (make continuous-src (frequency 0.15)))  
    (component Ez)  
    (center -7 0)))
```

Šiuo atveju šaltinio dažnis yra 0.15, jis apibūdinamas kaip continuous-src, kas yra tiesiog fiksuoto dažnio sinusoidė. Pastebėsime kad žadinimo šaltinio pradžios taško centras yra ties koordinatėmis (-7,0), tai yra per vieną vienetinį atstumą nuo kairio elemento krašto. Mažas tarpelis tarp šaltinio ir elemento krašto yra paliekamas tam, kad išvengti interferencijos. Dėl to Meep turi funkciją, kuri visą elementą apjuosia absorbuojančiomis kraštinėmis, ko pasekoje sumažėja interferenciniai reiškiniai

kraštuose. Šie sugėrikliai Meep programoje vadinami idealiai suderintais sluoksniais (angl. perfectly matched layers arba PML). Šis procesas yra aprašomas taip:

```
(set! pml-layers (list (make pml (thickness 1.0))))
```

Meep elemento struktūrą diskretizuoja erdvėje ir laike. Tai yra aprašoma kintamuoju resolution, kuris reiškia taškų skaičių ilgio vienetui:

```
(set! resolution 10)
```

Toliau jau galima pradėti modeliavimą. Tai atliekama iškviečiant run-until funkciją. Pirmasis argumentas aprašo vykdymo laiką, vėlesni argumentai apibūdina išvesties parametrus:

```
(run-until 200  
  (at-beginning output-epsilon)  
  (at-end output-efield-z))
```

Failai yra išvedami HDF5 formatu, taigi vėliau juos apdoroti galime bet kokia programa palaikančia šį formatą.

2. Modeliavimo metodikos

Anizotropiškai išsėdintų silicio kristalų modeliavimui buvo naudojama programa MEEP. Šio darbo atveju visų pirma buvo pasirenkami tam tikri modeliavimo parametrai, kurie yra aprašomi programos pradžioje. Vėliau yra aprašinėjama visa išsėdinamo silicio kristalo geometrija. Šiame darbe silicio padėkle buvo išsėdinamos periodiškai išdėstytos piramidės formos kiaurymės ir keičiamas padėklo storis.

Visų pirma buvo aprašyta pačio silicio padėklo geometrija:

```
(make block  
  (center 0 0 0)  
  (size infinity infinity h)  
  (material (make dielectric (epsilon eps))))
```

Vėliau į padėklą buvo įterptos piramidės. Vienos piramidės aprašymas yra sudarytas iš kelių geometrinių formų aprašo. Visų pirma padėkle yra padaroma stačiakampio gretasienio formos erdvė užpildyta oru:

```
(make block  
  (center (/ a -2) b z)  
  (size c c p)  
  (material air))
```

Vėliau šis oro tarpas buvo ribojamas keturiais pareloloidais iš visų pusių norint suformuoti piramidę:

```
(geometric-object-duplicates  
  (vector3 0 (* 2 b) 0) (- 0 N) (- N 1)  
  (make block  
    (size g c p)  
    (center (/ (- c (* 2 a)) 4) b (+ z (/ p -2)))  
    (e1 (/ c 2) 0 p)  
    (e2 0 c 0)  
    (e3 0 0 p)  
    (material (make dielectric (epsilon eps))))  
  ))
```

```
(geometric-object-duplicates  
  (vector3 0 (* 2 b) 0) (- 0 N) (- N 1)  
  (make block  
    (size g c p)  
    (center (/ (+ c (* 2 a)) -4) b (+ z (/ p -2)))  
    (e1 (/ c -2) 0 p)  
    (e2 0 c 0)  
    (e3 0 0 p)  
    (material (make dielectric (epsilon eps))))  
  ))
```

```
(geometric-object-duplicates  
  (vector3 0 (* 2 b) 0) (- 0 N) (- N 1)  
  (make block  
    (size g c p)
```

```

(center (/ a -2) (- b (/ c 4)) (+ z (/ p -2))
(e1 0 (/ c -2) p)
(e2 c 0 0)
(e3 0 0 p)
(material (make dielectric (epsilon eps)))
))

```

```

(geometric-object-duplicates
(vector3 0 (* 2 b) 0) (- 0 N) (- N 1)
(make block
(size g c p)
(center (/ a -2) (+ b (/ c 4)) (+ z (/ p -2)))
(e1 0 (/ c 2) p)
(e2 c 0 0)
(e3 0 0 p)
(material (make dielectric (epsilon eps)))
))

```

Naudojant paraboloidus piramidžių formavime lieka tam tikrų parazitinių figūrų virš padėklo, tačiau meep leidžia užkloti norimas erdves oru ant parazitinių silicio struktūrų. Tai atliekama labai paprasta komanda:

```

(make block
(center 0 (* -2 b) (+ (/ 0.6667 -2) (/ p -2)))
(size infinity infinity (- p x))
(material air))

```

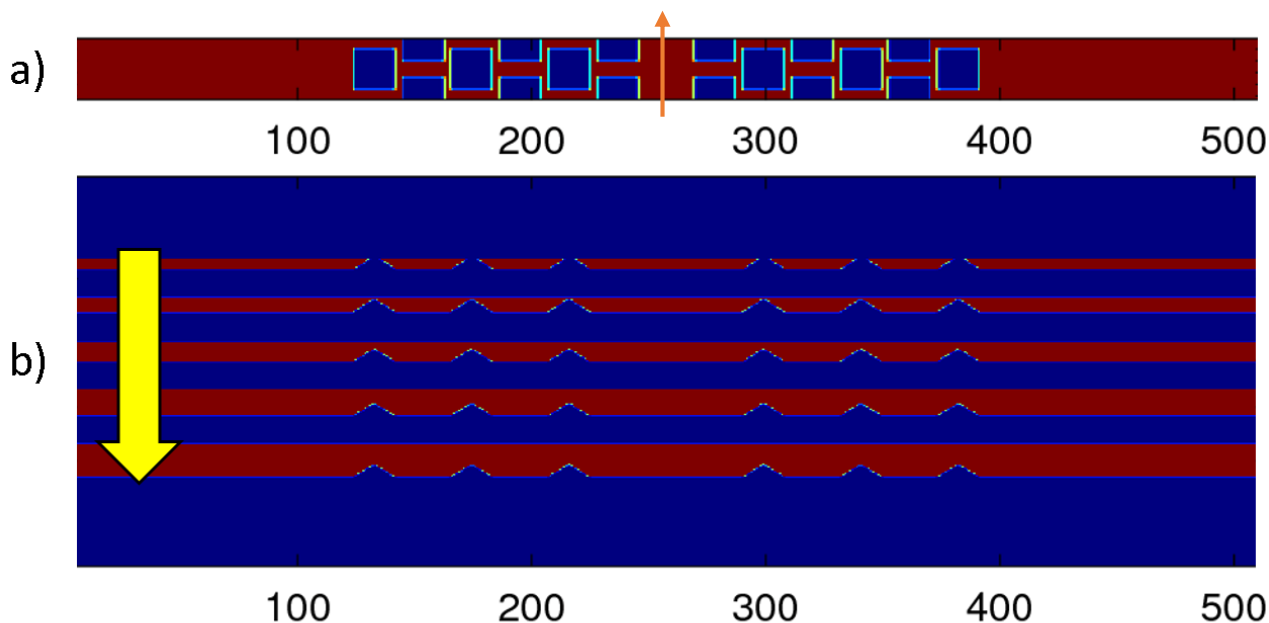
Naudojant meep simetrijos ir dubliavimo funkcijas piramidė yra atkartojama, kad sudarytų masyvą tinkantį bangolaidžio struktūrai. Visa struktūra apjuosiamą PML sluoksniu norint išvengti parazitinių interferencijos reiškinių.

Vėliau seka vykdymas (rezoliucijos, šaltinių, direktorių ir kiti nustatymai) ir norimų rezultatų išvedimas HDF5 formatu, taigi vėliau juos apdoroti galime bet kokia programa, palaikančia šį formatą. Šiame darbe buvo naudota GNU Octave programa, pritaikyta Linux operacinei sistemai. Tai nemokamas programos MatLab klonas.

3. Anizotropiškai išsėdintų fotoninių kristalų savybių modeliavimas terahercų dažnių ruože

3.1 Išsėdinto silicio fotoninio kristalo modelis

Šio darbo metu buvo tiriamos įvairios silicio kristalo ir piramidinių oro skylių konfigūracijos. Yra spėjama, kad gali atsirasti stiprus bangolaidžio savybių tendencingas kitimas keičiant padėklo storį, todėl modeliuojant tai ir buvo pagrindinis faktorius. Įvairūs padėklo storiai pasirinkti atsižvelgiant į komerciškai prieinamus didžiavaržio silicio padėklų variantus. Modeliavimai atlikti 150 μm , 200 μm , 275 μm , 350 μm storio padėklams. Taipogi vienas modeliavimas buvo atliktas ir daugiau teoriniam (komerciškai dažniausiai nesiūlomam) 100 μm storio silicio padėklui. Sumodeliuotos struktūros pavyzdys yra pateikiamas 21 pav.



21 pav. Viršutinėje dalyje a pavaizduota bangolaidžio struktūros piramidžių išsidėstymas iš apačios. Dalyje b pavaizduotas bangolaidžio skerspjūvis, geltona rodyklė žymi padėklo storėjimo kryptį nuo ploniausio 100 μm iki storiiausio 350 μm . Mėlynas fonas žymi sritis su santykinė dielektrine skvarba 1 (oras), o raudonas –11,7 (silicis). Oranžinė rodyklė rodo bangos sklidimo kryptį. Po paveikslėliais nurodyti atstumai Meep skaičiavimams naudotais santykiniais vienetais.

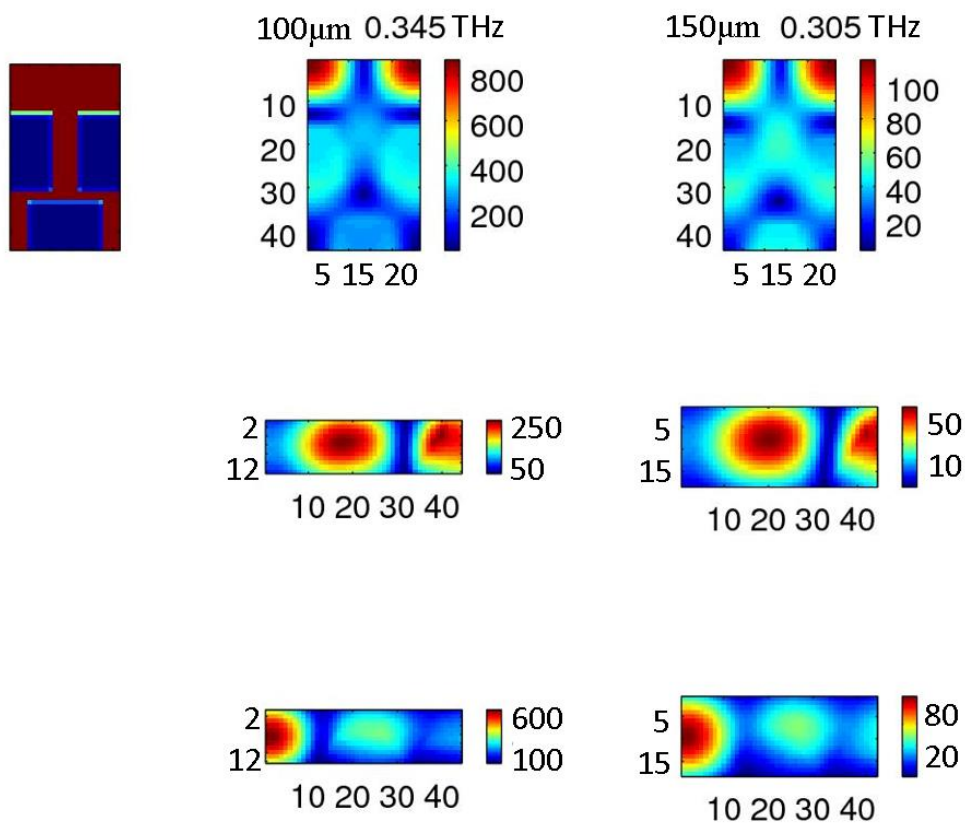
21 pav. (b) pavaizduoti modeliuotų fotoninio kristalo bangolaidžių skerspjūviai. Geltona rodyklė rodo padėklo storėjimo kryptį atitinkamai nuo 100 μm iki 350 μm . Matome, kad piramidžių dydis nesikeičia. Jis yra maksimalus šiam atvejui. Dar labiau didinant piramides jų pagrindai persiklotų ir nesudarytų taisyklingo bangolaidžio. 21 pav. (a) ir matome visų tirtų bangolaidžių pagrindų vaizdą.

Jis nesikeičia visiems atvejams. Mažinti piramidės yra neprotinga dėl iš karto prastėjančių bangolaidžių parametrų, ką aptarsime sekančiuose skyreliuose.

3.2 Bangolaidžių savybių tyrimas

3.2.1 Modos

Atlikus modeliavimus pastebėta, kad didinant bangolaidžio storį norimi išgauti geriausi parametrai (kaip pvz. slopinimo koeficientas) mažėja, todėl toliau trumpai aptarsime du, geriausius rezultatus davusius, bangolaidžius. Tai 100 μm ir 150 μm storio atvejai. Nors 100 μm atvejis yra tik teorinis jį vis tiek aptarsime, dėl to, jog sumažinus dažnį, panašius rezultatus galima pasiekti su storesniais padėklais. 22 pav. pavaizduotos 100 μm ir 150 μm storio silicio bangolaidžiuose išsiskiriančios modos įvairiems skerspjūviams atitinkančios 0,3 THz dažnį.



22 pav. Kairėje pavaizduotas modeliuojamas segmentas. Viduryje- modų intensyvumų pasiskirstymas 100 μm padėklui įvairiems skerspjūviams. Dešinėje- modų intensyvumų pasiskirstymas 150 μm padėklui įvairiems skerspjūviams.

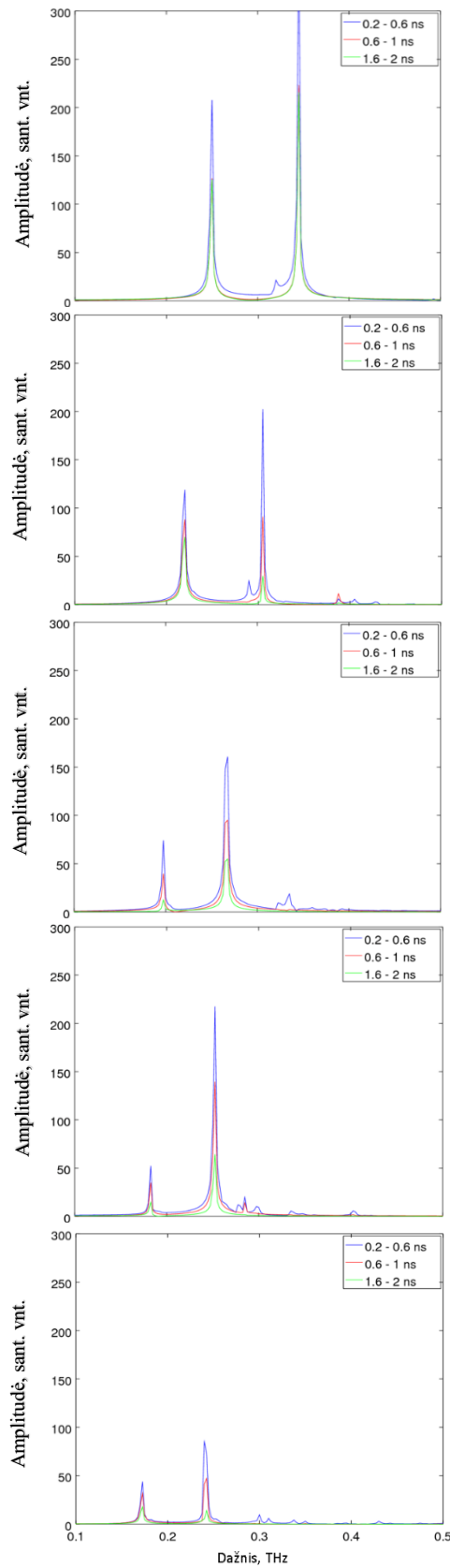
Kairėje 22 pav. pusėje matome segmento, kuriam buvo atlikti modų modeliavimai, vaizdą. Jis yra vienodas abiem padėklams, nes jų pagrindai atrodo idealiai vienodai, skiriasi tik storis. Viduryje ir dešinėje pusėse pateikti intensyvumų pasiskirstymai, atitinkamai 100 μm ir 150 μm storio silicio bangolaidžiuose, keliuose pjūviuose, Iškart galima pastebėti kad visais atvejais plonesniajam

padėklui intensyvumai yra kelis kartus didesni negu storesniajam. Padėklo pagrinde (viršutinė 22 pav. dalis) intensyvumas yra 8 kartus didesnis 100 μm storio padėklo atveju, negu 150 μm padėklui. Taipogi matome, jog banga sklinda išsėdintomis piramidėmis, kur pastebimas didesnis signalo intensyvumas. Skirtinguose bangolaidžio gyliuose (vidurinė ir apatinė 22 pav. eilutė) taipogi matomi skirtingi modų pasiskirstymai abejais atvejais. Arčiau padėklo pagrindo (vidurinė 22 pav. eilutė) signalo pasiskirstymai panašūs, tačiau plonesniojo padėklo atveju 5 kartus didesni. Taip pat ir imant skerspjūvį, artėjant link išsėdintų piramidžių viršūnių, (apatinė 22 pav. dalis) intensyvumo pasiskirstymai abejais atvejais yra labai panašios formos, bet vėlgi plonesniojo padėklo signalas yra didesnio lygio maždaug 5 kartus. Iš šių duomenų jau galima spėti, kad plonesnis padėklas yra geriau tinkamas bangolaidžiui.

3.2.2 Bangos sklidimas bangolaidyje

Taigi norint iki galo iširti bangolaidžių savybes buvo atlikti laikiniai vyksmų modeliavimai bangolaidžiuose. Buvo stebimas skirtingų modų amplitudžių slopinimas. 23 pav. pavaizduota skirtingų modų intensyvumai skirtingais laiko momentais nuo žadinimo pradžios, viršuje 100 μm storio bangolaidžio atveju, o einant žemyn storėja iki 350 μm apačioje. Rezultatai buvo nagrinėti modoms atitinkančioms artimiausią 0,3 THz dažnį, grafikuose šias modas atitinkantys intensyvumų kitimai laike yra smailės dešiniau. Matome, jog storinant padėklą, artimiausią 0,3 THz modų smailės slenkasi žemesnių dažnių link. Taipogi iškart galima pastebėti, jog storinant bangolaidį, smailės, atitinkančios amplitudes po daugiau laiko (žalios kreivės), silpsta palyginus su pradines laiko vertes atitinkančiomis amplitudėmis.

Taigi sumodeliavus šiuos vyksmus, buvo galima apskaičiuoti pagrindinį mus dominantį parametą, apibūdinantį bangolaidžio savybes - slopinimo koeficientą. Skaičiavimams buvo pasirinkti du geriausius rezultatus parodę bangolaidžiai su ploniausiais 100 μm ir 150 μm padėklais. Iš 23 pav. galime iškart pastebėti, kad ploniausiojo bangolaidžio atveju (viršuje) signalo slopinimas laike yra daug lėtesnis, lyginant su storesniais bangolaidžiais. Skaičiavimams atlikti buvo pasirinktos smailės atitinkančios 0,6 – 1 ns ir 1,6 – 2 ns laiko intervalus (atitinkamai raudona ir žalia kreivės), kur visos vertės skiriasi per 1 ns. Vertės po 0,2 – 0,6 ns yra dar nenusistovėjusios, todėl skaičiavimams nelabai tinkamos. Atlikus skaičiavimus buvo gauti tokie rezultatai: 100 μm storio bangolaidžio atveju bangos slopinimo koeficientas yra lygus 0,023 cm⁻¹, o 150 μm storio bangolaidžiui – 0,62 cm⁻¹. Taigi ploniausiojo bangolaidžio atveju slopinimas yra apie 27 kartus silpnesnis lyginant su storesniu 150 μm bangolaidžiu. Didinant storį šis santykis tik didėja.



23 pav. Bangolaižiu sklindančios bangos slopimas laike. Viršuje pavaizduotas amplitudės slopimas 100 μm padėklui, o apačioje - 350 μm padėklui. Padėklo storis einant žemyn keičiasi atitinkamai taip - 100 μm , 150 μm , 200 μm , 275 μm , 350 μm . Skirtingos smailės atitinka skirtingą dažnį atitinkančių modų slopimą.

4. Išvados

1. Plonų 100 μm storio silicio padėklų atveju teoriškai įvertintas slopinimo koeficientas bangolaidžiui anizotropiškai išdintuose fotoniniuose kristaluose būtų $\alpha = 0,023 \text{ cm}^{-1}$ 0,3 THz dažniui. Ši vertė yra artima eksperimentiškai gautai [12] publikacijoje klasikinio fotoninio kristalo su cilindrinėmis ertmėmis atveju ir patvirtina, kad ir piramidinės struktūros gali užtikrinti pakankamus efektinio lūžio rodiklio skirtumus.

2. Storinant padėklus, nuostoliai bangolaidžiuose greitai auga (pavyzdžiui, 27 kartus pastorinus padėklą tik 1,5 karto) dėl fiksuoto, kristalinio Si plokštumų nulemto, apverstų piramidžių sienelių polinkio kampo ir mažai išėsdinto arba neišėsdinto Si sluoksnio virš apverstų piramidžių viršūnių.

Literatūros sąrašas

- [1] E. Yablonovitch, “Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics,” *Phys. Rev. Lett.* 58, 2059–2062 (1987).
- [2] S. John, “Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices,” *Phys. Rev. Lett.* 58, 2486–2489 (1987).
- [3] A. Scherer, O. Painter, J. Vuckovic, M. Loncar ir T. Yoshie, “Photonic crystals for confining, guiding, and emitting light,” *IEEE Trans. Nanotechnol.* 1, 4–11 (2002).
- [4] S. Noda, “Recent progresses and future prospects of two- and three-dimensional photonic crystals,” *J. Lightw. Technol.* 24, 4554–4567 (2006).
- [5] T. Baba, “Photonic crystals: Remember the light,” *Nat. Photon.* 1, 11–12 (2007).
- [6] S. Noda, M. Fujita ir T. Asano, “Spontaneous-emission control by photonic crystals and nanocavities,” *Nat. Photon.* 1, 449–458 (2007).
- [7] M. Notomi, “Manipulating light with strongly modulated photonic crystals,” *Rep. Prog. Phys.* 73, 096501 (2010).
- [8] M. Boroditsky, T. F. Krauss, R. Coccioli, R. Vrijen, R. Bhat ir E. Yablonovitch, “Light extraction from optically pumped light-emitting diode by thin-slab photonic crystals,” *Appl. Phys. Lett.* 75, 1036–1038 (1999).
- [9] R. Kakimi, M. Fujita, M. Nagai, M. Ashida, ir T. Nagatsuma, “Capture of a terahertz wave in a photonic-crystal slab,” *Nat. Photon.* 8, 657–663 (2014).
- [10] T. Stomeo, F. V. Laere, M. Ayre, C. Cambournac, H. Benisty, D. V. Thourhout, R. Baets ir T. F. Krauss, “Integration of grating couplers with a compact photonic crystal demultiplexer on an InP membrane,” *Opt. Lett.* 33, 884–886 (2008).

- [11] M. Fujita ir T. Nagatsuma, “Photonic crystal technology for terahertz system integration,” *Proc. SPIE* 9856, 98560P (2016).
- [12] Withawat Withayachumnakul, Ryoumei Yamada, Christophe Fumeayx, Masayuki Fujita ir Tadao Nagatsuma, “ All-dielectric integration of dielectric resonator antenna and photonic crystal waveguide,” *Optics express*, 14706-14714, 2017.
- [13] J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, J. N. Winn ir R. D. Meade, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light* (Princeton University, 2008), 2nd ed.
- [14] Kazuisao Tsuruda, Masayuki Fujita, Asako Suminokura, Masahiro Yata, Toshikazu Mukai ir Tadao Nagatsuma, “Terahertz-wave Integrated Circuits Based on Photonic Crystals,” *PIERS Proceedings*, 2254-2259, 2015.
- [15] www.microchemicals.com/downloads/application_notes.html
- [16] http://ab-initio.mit.edu/wiki/index.php/Meep_Tutorial

Santrauka

Šio darbo tikslas yra suskaičiuoti, kokiomis savybėmis pasižymėtų terahercų dažniams skirti bangolaidžiai fotoniniuose kristaluose, anizotropiniu ęsdinimu suformuotuose didžiavaržio silicio monokristalinėse plokštelėse.

Anizotropiškai išėsdintų silicio kristalų modeliavimui buvo naudojama programa MEEP. Rezultatų apdorojimui - GNU Octave programa, pritaikyta Linux operacinei sistemai. Plonų 100 μm storio silicio padėklų atveju teoriškai įvertintas slopinimo koeficientas bangolaidžiui anizotropiškai ęsdintuose fotoniniuose kristaluose būtų $\alpha = 0,023 \text{ cm}^{-1}$ 0,3 THz dažniui. Ši vertė yra artima eksperimentiškai gautai [12] publikacijoje klasikinio fotoninio kristalo su cilindrinėmis ertmėmis atveju ir patvirtina, kad ir piramidinės struktūros gali užtikrinti pakankamus efektinio lūžio rodiklio skirtumus. Storinant padėklus, nuostoliai bangolaidžiuose greitai auga (pavyzdžiui, 27 kartus pastorinus padėklą tik 1,5 karto) dėl fiksuoto, kristalinio Si plokštumų nulemto, apverstų piramidžių sienelių polinkio kampo ir mažai išėsdinto arba neišėsdinto Si sluoksnio virš apverstų piramidžių viršūnių.

Gediminas Kyburys

Numerical simulations of anisotropically etched photonic crystals for terahertz frequency range

Summary

The purpose of this paper is to investigate the properties of photonic crystal waveguides for terahertz frequency range formed by anisotropic etching in highly resistive silicon monocrystal wafers.

Meep software was used for the simulations of anisotropically etched silicon. Results was processed with GNU Octave software, suitable with Linux operating system. In case of thin 100 μm silicon wafers waveguide loss of $\alpha = 0,023 \text{ cm}^{-1}$ was evaluated for 0,3 THz frequency. This value is close to experimental ones obtained for photonic crystal with cylindrical holes and reported in literature sources. This fact confirms that pyramyde-shaped structures can ensure sufficient differences of refraction index for an efficient mode confinement. Increasing thickness of wafers leads to efficiency loss in the waveguide increases very fast (for example 27 times by increasing the thickness of wafer just 1,5 times) because of fixed inclination angles of inverted pyramids walls, which is determined by crystal Si planes, leading either small removed silicon amount or ever unetched Si layer above inverted pyramids peaks.