VILNIAUS UNIVERSITETAS

FIZIKOS FAKULTETAS

RADIOFIZIKOS KATEDRA

Povilas Bertašius

MEDŽIAGŲ ELEKTROMAGNETINIAM SUDERINAMUMUI TYRIMAS

Bakalaurinis darbas

TAIKOMOSIOS FIZIKOS STUDIJŲ PROGRAMA

Studentas	Povilas Bertašius
Darbo vadovas	Dr. Jan Macutkevič
Recenzentas	doc. V. Samulionis
Katedros vedėjas	Prof. Jūras Banys

Turinys

- Darbo tikslai 3
- Teorinis įvadas 4
- Tyrimo metodika 10
- Rezultatai 16
- Išvados 23
- Cituojama literatūra 24
- Apibendrinimas anglų kalba 25

Darbo tikslai

Naujos anglies struktūros sukurtos pažangiomis technologijomis, kelia susidomėjimą savo ypatingomis savybėmis. Iš šių struktūrų galima išskirti anglies nanovamzdelius, svogūninę anglį, anglies putas bei daugelį kitų darinių, kurių mechaninės, elektromagnetinės, terminės savybės yra unikalios ir kai kuriais atvejais turinčios žymiai daugiau panaudojimo galimybių nei įprastai atitinkamose srityse naudojamos medžiagos. Šiame darbe buvo tirtas įvairių daugiasluoksnių nanovamzdelių (angl. *multi-walled carbon nanotubes, MWCNT*), kopolyamido bei svogūninies anglies/polidimetilsiloksano (angl. *onion-like carbon, OLC-PMDS*) kompozitų, anglies putų (angl. *carbon foam*) elektromagnetinis pralaidumas plačiame dažnių diapazone nuo 10 GHz iki 1 THz, įvertintos galimybės panaudoti šias medžiagas apsaugai nuo elektromagnetinių spindulių minėtame diapazone bei ištirtas šių medžiagų elektromagnetinių savybių stabilumas esant skirtingoms temperatūroms.

Teorinis įvadas

Elektromagnetinės bangos

Elektromagnetinės bangos yra saviskleidės elektronio ir magnetinio lauko osciliacijos, statmenos vienas kitam sklidimo krypčiai, pernešamos fotonų srauto. Atstumas tarp osciliacijų yra vadinamas bangos ilgiu (λ), o osciliacijų skaičius per sekundę yra dažnis (ν). Fotonų energija yra proporcinga dažniui. Dažnio matavimo vienetas yra Hercas (Hz), kuris ekvivalentus vienai osciliacijai per sekundę. Elektromagnetinių bangų šaltiniai yra labai įvairūs, o regimoji šviesa yra tarp 790 – 400 THz. Kitų EM bangų dažnių diapazonų pavadinimai: iki 1 GHz yra vadinama radijo bangomis, nuo 1 GHz iki 100 GHz vadinama mikrobangomis, nuo 100 GHz iki 400 THz infraraudonosiomis bangomis, nuo 790 THz iki 10 PHz ultravioletinėmis. Nuo 10 PHz iki 30 PHz yra žinomos kaip Rentgeno, o nuo 100 EHz iki 300 Ehz ir aukščiau kaip gama spinduliuotė, turinti labai dideles fotonų energijas. Laisvoje erdvėje bangos energijos tankis yra atvirkščiai proporcingas atstumo nuo šaltinio kvadratui.

Radijo bangos suskirstomos į papildomas dažnio srytis, turinčias skirtingas sklidimo erdvėje charakteristikas bei skirtingi jų pritaikymo būdus. Mus labiausiai domina bangos iki 300 GHz dažnio, nes jos sklinda ilgiausią atstumą Žemės atmosferoje bei gali būtų naudojamos pernešti informaciją pasinaudojant bangos amplitudės, dažnio bei fazės moduliacijas. Informaciją įmanoma pernešti iki 1 THz dažnio, kol toliau tą daryti pasidaro labai sudėtinga technologiškai. Taip pat dažniai iki 300 GHz naudojami radarų sistemose, detektuojančiose objektus ore, arba pavyzdžiui oro uosto vartuose, nes ultraaukštos radijo bangos prasiskverbia per daugelį organinių medžiagų ir drabužių, taip matant kokius daiktus žmogus turi su savimi. Metalo detektoriai taip pat veikia atsispindėjusių spindulių detekcijos principu.

Žemo dažnio bangos keliauja Žemės polinkio kryptimi, pastoviai silpnėdamos. Aukšto dažnio bangos yra atspindimos jonosferos, taip žymiai prailginant jų galimąjį sklidimo kelią, tačiau yra mažiau patikimos dėl rentgeno bei gama bangų kosminės spinduliuotės įtakos. Ultraaukštų dažnių bangos dažniausiai tarp antenų yra skleidžiamos tiesiai viena į kitą, esant tiesioginiam matomumui. Šio diapozono bangos panaudojamos Žemės palydovų signaluose, televizijoje (TV) ar bevieliam ryšiui (angliškai Wi-Fi). 2010 metais pristatyta bevielio ryšio technologija 802.11ad Wi-Fi (WiGig) naudoja 60 GHz dažnį.

Svarbi elektromagnetinių bangų sklidimo charakteristika yra atmosferinė sugertis dėl rezonansinės sąveikos tarp dalelių ore [1]. Didėjant dažniui, vis labiau auga tikimybė, kad bangą paveiks dalelės, esančias sklindamojoje erdvėje, tačiau ne ypač aukšto dažnio radijo bangos sklinda atmosferoje labai gerai. Dėl to, kad optimalus transliacijos intervalas yra tarp 3 MHz bei 20 GHz, yra susidaręs perteklius skleidžiamų bangų šiame diapozone, sukuriant didelį kiekį triukšmo (bet koks elektroninis signalas esantis grandinėje be norimojo). Tai veda prie interferincinių (nepageidaujamo triukšmo poveikio) problemų tarp naudotojų [2].

Elektromagnetinis suderinamumas

Elektromagnetiniu suderinumamu yra vadinamas elektroninės sistemos gebėjimas normaliai funkcionuoti nustatyjoje elektromagnetinėje erdvėje ir nebūti taršos šaltiniu joje. Suderinamumas yra reguliuojamas tarptautiniais standartais: prietaiso kuriama interferencija negali sutrikdyti kitų prietaiso veikimo, bei turi turėti imunitetą nuo kitų šaltinių kuriamų laukų interferencijos. Komerciniai prietaisai turi veikti be nesklandumų, kai yra veikiami 3 V/m elektriniu lauku, kai industrinei įrangai yra nustatyta 10 V/m riba. Karinei technikai – 20 V/m [2].

Yra trys būdai apsisaugoti nuo elektromagnetinės interferencijos (EMI) reiškinio. Pirma, gali būti modifikuojami elektromagnetinių bangų šaltiniai. Antra, gali būti kuriamos apsauginės priemonės EMI padaryti mažiau efektyvią, pavyzdžiui apsauginiai metalo sluoksniai. Trečia, padaryti patį EMI gavėją mažiau pažeidžiamą, tai yra jam sukuriant imunitetą. EMI priežastys gali būti vidinės arba išorinės.

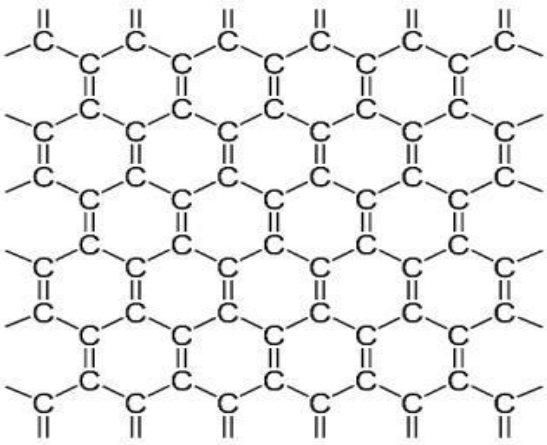
Vidinės yra tarp laidų visoje grandinėje, pvz. parazitinės srovės ar talpos, elektrinės iškrovos, sugadinančios ypač mažus elementus. Šios susidariusios problemos gali būti išspręstos kur įmanoma nutraukiant fizinį kontaktą arba įstatant filtrą, taipogi elektrinės iškrovos atveju vykstant trinčiai su izoliacine medžiaga. svarbiausios priežastys yra išorinės, nes bet kuris laidininkas, turintis kintančią elektros srovę, veikia kaip antena. Trumpabangės interferencijos (didesnės energijos mažesniame dažnio diapozone) šaltiniai yra mobilieji telefonai, TV, bevielis ryšys. Plačiabangės interferencijos (difuzinės EM bangų sklaidos) šaltiniai yra elektros linijos, elektriniai varikliai, kompiuteriai ir įvairi elektroninė įranga. Kiti egzotiniai plačiabangės interferencijos šaltiniai yra saulės žybsniai ar elektromagnetinių impulsų energija.

Viena iš problemų atliekant testavimus yra nustatyti ar interferencija yra pašalinta ar jos tiesiog nėra [1]. Taip pat testuojant svarbu nustatyti ar prietaisas gerai veikia skirtingose elektromagnetinėse aplinkose. Jis gali veikti stabliai ilgą laiką, tačiau dabartinėje technologijos eroje pastoviai vystosi EM aplinka, taip prietaisus po kelių metų padarančius nebeatitinkančius standartų. Testuoti galima dviem būdais, kai pirma imami maži energijos lygiai ir po truputi didinami, arba tiesiog testuojama prie reikiamos atitinkamos energijos. Geresnis variantas yra pirmasis, nes taip žymiai mažesnė tikimybė, kad bus sugadintas bandinys. Konstruojant prietaisą, svarbu elektromagnetinio suderinamumo reikalavimus atitikti kuo ankstesnėse gaminimo fazėse, nes vėlesnės pataisos kainuoja žymiai daugiau ir yra sunkiau įdiegiami [2].

Anglies nanovamzdeliai

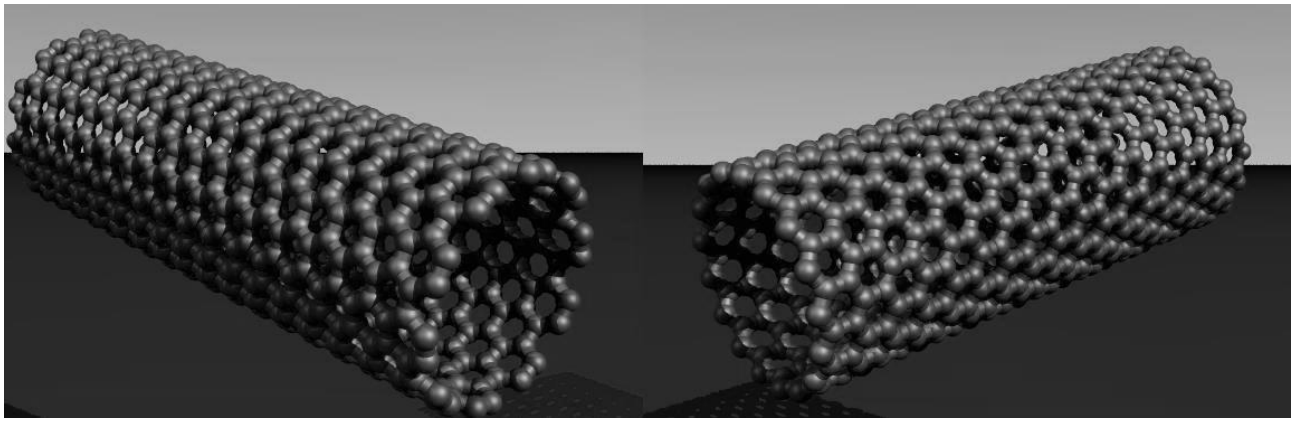
Anglies nanovamzdeliai yra anglies alotropinės modifikacijos, turinčios cilindrinę nanostruktūrą. Palyginus su skersmeniu nanovamzdelių cilindro ilgis gali būti labai didelis, iki 132 milijonus kartų didesnis nei jo skersmuo. Nanovamzdelių ilgio ir skersmens santykis yra žymiai didesnis nei bet kokios kitos struktūros. Turėdami neįprastai geras šilumos laidumo, mechanines ir elektrines savybes, jie yra labai vertinami nanotechnologijose, elektronikoje, optikoje bei daugumoje kitų sričių. Unikalų kietumą, elektrinį ir šiluminį laidį suteikia sp^2 orbitalių hibridizacija, panašiai kaip ir grafite, bet nanovamzdelyje ši hibridizacija yra tarp kiekvieno anglies atomo vamzdelyje.

Nanovamzdeliai gali būti vienasieniai arba daugiasieniai. Jie sudaromi iš grafeno (1 pav.), vieno anglies atomo storio sluoksnio susijungusių anglies atomų atstumu 0.142nm. Grafenas yra sulenkia-



1 pav. Grafeno struktūra [3].

mas, taip gaunant įvairią cilindrinę struktūrą priklausomai nuo lenkimo kampo (2 pav.). Nuo cilindrinės struktūros priklauso nanovamzdelio savybės[3].



2 pav. Anglies nanovamzdeliai. Kairėje, krėslo tipo. Dešinėje, zigzago[3].

Dažniausiai sutinkami vienasieniai nanovamzdeliai yra 1 nm skersmens, tačiau gali būti iki milijono kartų didesni. Cilindrinė struktūra įtakoja draustinės juostos tarpą nuo 0 iki 2 V, taigi šiuo atžvilgiu nanovamzdeliai yra panašus į laidininkus arba puslaidininkius. Vienasienių nanovamzdelių pagrindu yra kuriami miniatiūriniai molekulių dydžio lauko tranzistoriai [3]. Daugiasieniai nanovamzdeliai susideda iš daug kartų susuktų grafeno lakštų. Tai gali būti padaryta dviem būdais, užmaunant didesnio skersmens vienasienio anglies nanovamzdelio cilindrą ant mažesnio skersmens cilindro, arba susukant grafeno sluoksnį and savęs paties, panašiai kaip susukamas laikraštis. Atstumas tarp sluoksnių yra panašus kaip grafeno sluoksnių grafite, kuris yra apie 34 nm. Daugiasienis nanovamzdelis dažniausiai neturi draustinės juostos ir yra geras laidininkas [3].

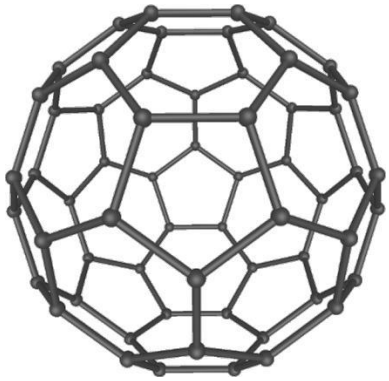
Sukurti įvarūs būdai, kaip pagerinti nanovamzdelių savybės. Jau vien uždedant bent dar vieną sluoksnį pirmajam, yra labai pagerinama apsauga nuo chemikalų, kuriais gali būti išdarkoma dviguboji anglies jungtis, taip padarant skylę nanovamzdelyje. Nuo bent vienos skylės yra pažeidžiamas nanovamzdelio homogeniškumas, kas lemia prastesnius parametrus. Nanovamzdelio forma nulemia tai, kad viso darinio maksimalus mechaninis stiprumas yro toks, koks jis yra silpniausioje jo vietoje. Dviejų sluoksnių atveju yra paveikiamas tik išorinis sluoksnis, apsaugantis vidinį. Kitas būdas yra sukurti pumpurus paviršiuje, taip padidinant trintį ir sumažinant vamzdelio slydimą. Taip pat pumpurai veikia kaip geri elektromagnetinio lauko skleidėjai. Be to keli nanovamzdeliai gali būti sujungti vienas šalia kito gaunant panašų į grafeną darinį. Taip pagerinama elektrinė talpa, įmanomas superlaidumas. Įmonomas azoto (arba kitų atomų) įvedimas, pagerinant talpą. Tai panaudojama Li-ion baterijoms kurti [3].

Anglies nanovamzdeliai yra tvirčiausia atrasta medžiaga dėl savo kovalentinių sp^2 hibridizacijos ryšių (tempiant atlaikomas iki 100 GPa slėgis), tačiau tai galioja tik išilgine kryptimi (dėl savo tuščiavidurės struktūros gana legvai deformuojami), taip pat daugiasluoksniams nanovamzdeliams, dėl saveikos tarp sluoksnių, nebent sluoksniai yra kaip nors sujungiami. Keletas kitų nanovamzdelių savybių: ypatingas hidrofobiškumas, vienakryptis elektronų keliavimas išilgai cilindro, labai geras šilumos pralaidumas (9 kartus didesnis už varį), 0.98 sugerties koeficientas išilgine kryptimi.

Galimas panaudojimas yra labai įvairus. Biomedicinoje, apsaugoti DNR molekules nuo oksidacijos, kuriant patvarius daiktus, pvz. sportinę aprangą, karines balistinės apsaugos priemones, elektros grandinėse, kuriant ypač mažus tranzistorius, gaminant elektros laidus, baterijas, saulės, chemines ar popierines, vandenilio saugojimui, karinės technikos apsaugai nuo radarų, vandens valymui ir daugelyje kitų [3].

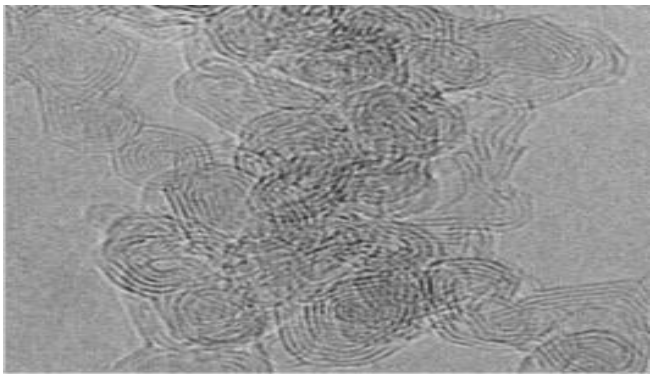
Anglies svogūnai ir fulerenai

Fulerenai yra anglies molekulės, sudarančios tuščiavidurę sferą, elipsoidą, jau minėtus cilindrus ir daugelį kitų įmanomų formų [4]. Fulerenų struktūra yra panaši į grafito, kuris yra sluoksnis anglies atomu susijungusių šešiakampiais, tačiau fulerenai gali būti taip pat penkiakampiai ar septynkampiai. Pirmas atrastas fulerenas buvo C_{60} 1985 metais. Jis buvo panašus į fubolo kamuolį (3 pav.). Dažniausi fulerenai yra C_{70}, tačiau yra sukurti ir fulerenai su 72, 76, 84 ar netgi 100 anglies atomų. Mažiausias susideda iš 20 atomų. Tai mažiausia fulereno molekulė.



3 pav. C_{60} fulerenas [4].

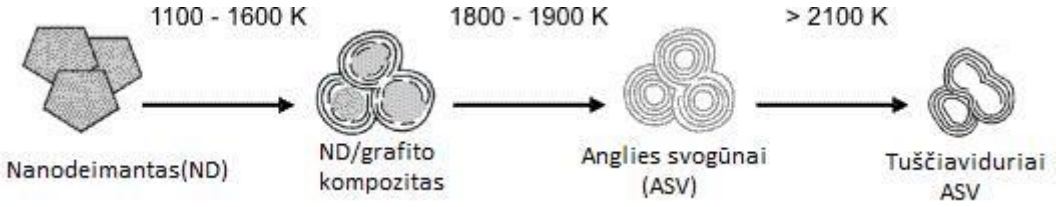
Anglies svogūnai (ASV) (angliškai *onion-like carbon* (*OLC*)) susideda iš kvazisferinių anglies sluoksnių uždarytų koncentriniais grafito sluoksniais [5]. Jie yra daugiasluoksniai fulerenai sudaryti iš labai didelio kiekio (milijono) anglies atomų, dėl tokio didelio anglies atomų skaičiaus tik dalis atomų sudaro grafito tipo ryšį (sp^2 hybridizacija) ir struktūroje visada atsiranda defektai. Šie fulerenai savo struktūra prašviečiančio elektroninio mikroskopo nuotraukuose primena svogūnus (4 pav.). Jie turi kitokias savybės nei kiti fulerenai, grafitas, nanodeimantai (ND) ar nanovamzdeliai.



4 pav. Elektronų mikroskopijos būdu gautas ASV vaizdas[5].

Vienas iš ASV pagaminimo būdų yra pavaizduotas 5 pav. Į svogūną panašios struktūros yra gaunamos atkaitinant nanodeimantą 1000 -1800 K temperatūroje. Varijuojant atkaitinimo temperatūra, galime gauti skirtingus sp^2/sp^3 hibridizacijų santykius. ASV susijungia į agregatus, kurių dydis maždaug atitinka lokalizacijos ilgį. ASV dalelių dydis ir struktūra nulemti ND dalelių dydžio bei atkaitinimo temperatūros, o ASV agregatų dydis priklauso nuo ND agregatų dydžio bei taip pat atkaitinimo temperatūros [6]. Didesni agregatai nulemia didesnę kompozito EM bangų

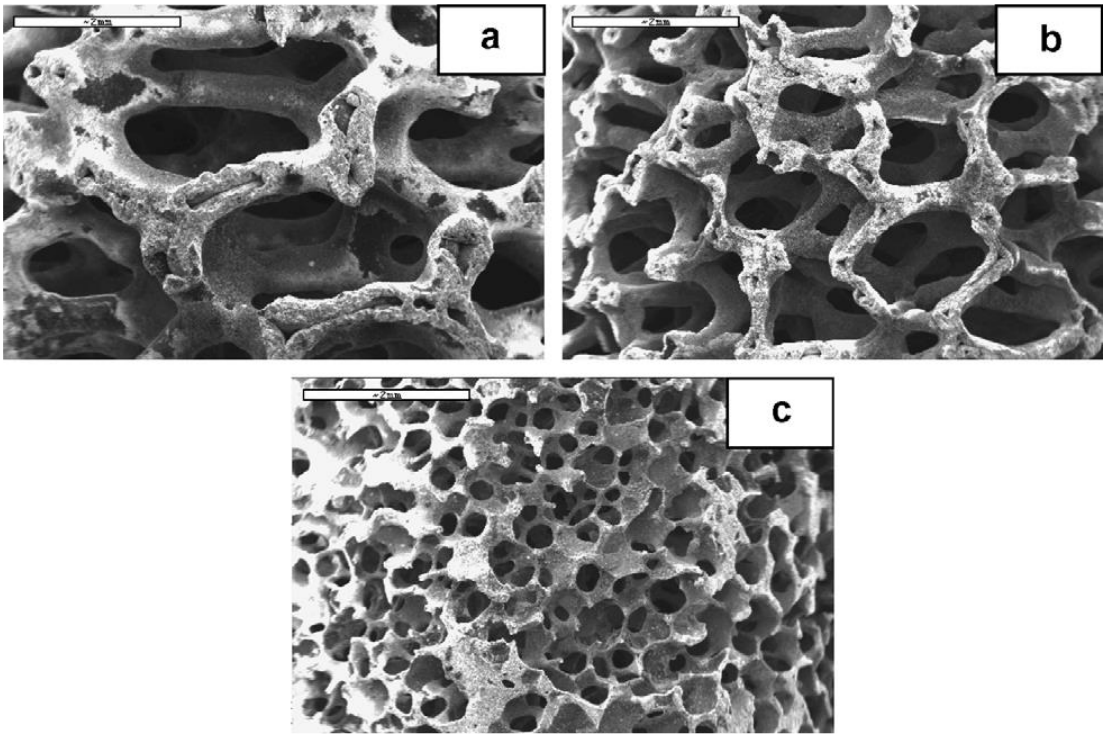
sugertį. Defektais, „Y“ sankirtomis ar skylėtais sluoksniais, galima keisti elektronų laisvąjį kelią, o kartu ir elektromagnetines savybes. Nuo defektų skaičiaus ir tipo priklauso ASV laidumas [6].



5 pav. Nanodeimantų transformacija į ASV [5].

Anglies putos

Anglies putos yra amorfiškai susijungusios anglies molekulės į kempinę primenančia struktūrą (6 pav.) su įvariais įmanomais porų dydžiais, tačiau gana tolygiu jų išsidėstymu. Tokias struktūras galima pagaminti iš organinių medžiagų (tanino) su atitinkamu takumu, sumaišant jį su furfulilo alkoholiu, formaldehidu bei vandeniu, atitinkamomis proporcijomis [7]. Gauta masė yra sumaišoma su dietilo eteriu bei katalizatoriumi [7], gauta kempininė struktūra išdžiovinama ir suanglinama pirolize inertinėse dujose. Toks gamybos būdas yra ypač pigus, nes naudojamos pilnai organinės medžiagos. Pagal šaltinio [7] teiginius, masinės gamybos priemonėmis 1 kilogramo anglies putų kaina yra 14 dolerių. Nuo maišomų medžiagų koncentracijų priklauso porų dydžiai bei kitos savybės. Taip pat galima soformuoti anglies putas pasinaudojant polimerų kempinėmis su skirtingais porų dydžiais [8], tačiau [7] šaltino teigimu, šis būdas yra žymiai brangesnis. Taip pat tokiu būdu gaunami defektai esant mažiems porų dydžiams, nes iškyla sunkumai pašalinti perteklinę pirminė masę iš kempinės [8].



6 pav. Elektroniniu mikroskopu gautas vaizdas porų dydžiams esant (a) apie 2mm skersmens, (b) apie 1mm skersmens, (c) apie 0.3mm skersmens [8].

Gauta medžiaga yra labai mažo tankio, nes apie 95% jos sudaro tuščia erdvė, taip pat mažo paviršiaus ploto (mažiau negu 1 kvadratinis metras į gramą) bei nedegi [7]. Anglies putos yra šiek tiek anizotropinės, lengvai praleidžia dujas bei pasižymi gana tvirtomis mechaninėmis savybėmis (apskaičiuota, kad 50 litrų anglies putų gali atlaikyti 130 kg daiktą lekiantį 60km/h greičiu), yra laidžios elektros srovei, gana gerai sugeriančios šilumą. Pastebėta, kad šilumos bei elektros laidumo vertės sutampa su anizotropijos santykiu, leidžiant daryti prielaidą, kad šiluma bei srovė per medžiagą keliauja per tuos pačios struktūros kanalus [7]. Nuo suanglinimo temperatūros tiesiogiai priklauso gautų anglies putų laidumas, nes padidinamas grafitizacijos lygis [8]. Su didesniu laidumu auga anglies putų poliarizuotumas, kas greičiausiai yra įtakojamas mikrostuktūrinių pokyčių.

Elektromagnetinė banga stipriausiai saveikauja su kliūtimis kurių matmenys yra panašūs į bangos ilgį. Anglies putų struktūros pagrindiniai matmenys yra žymiai mažesni už radijo bei mikrobangų ilgius, todėl anglies putos turi žymiai mažesnę realiają dielektrinės skvarbos dalį negu paprasta anglis [8]. Porų dydžiai mažai įtakoja realiają dielektrinės skvarbos dalį, kuri taip pat parodo medžiagos atspindžio koeficientą. Medžiagos su maža dielektrinės skvarbos realiaja dalimi EM bangų praktiškai ne atspindi. Elektromagnetinės bangos nuostolio koeficientas, nusakomas menamąja dielektrinės skvarbos dalimi, kuri yra susieta su elektriniu laidžiu [8]. Didėjant elektriniam laidžiui silpnėja paviršinis efektas ir vis mažiau EM spinduliuotės gali pateki į medžiagą. Taip pat anglies putose, palyginus su paprasta anglimi, yra didesni dielektrinės skvarbos nuostoliai, nes prie dipolinės poliarizacijos nuostolių prisideda Maksvelo-Wagnerio relaksacija [8].

Netikėtai, anglies putos turi savybę slopinti prasiskverbiančios EM bangos magnetinę komponentę [8]. Vienas iš šio efekto aiškinimo būdų yra tai, kad anglies putose susidaro indukuotos cirkuliacinės elektros srovės, kurios slopsta dėl šilumos nuostolių. Taip kisdamos laike jos susilpnina magnetinio lauko energiją. Lokalus elektrinis laukas išsisklaido putų struktūroje, tačiau lokalaus lauko kryptis beveik nepakinta. Išsklaidymo metu pakinta lauko kryptis ir energija, ir kintantis laukas indukuos cirkuliacines sroves pagal Lenco dėsnį.

Kompozitai elektromagnetiniam suderinamumui

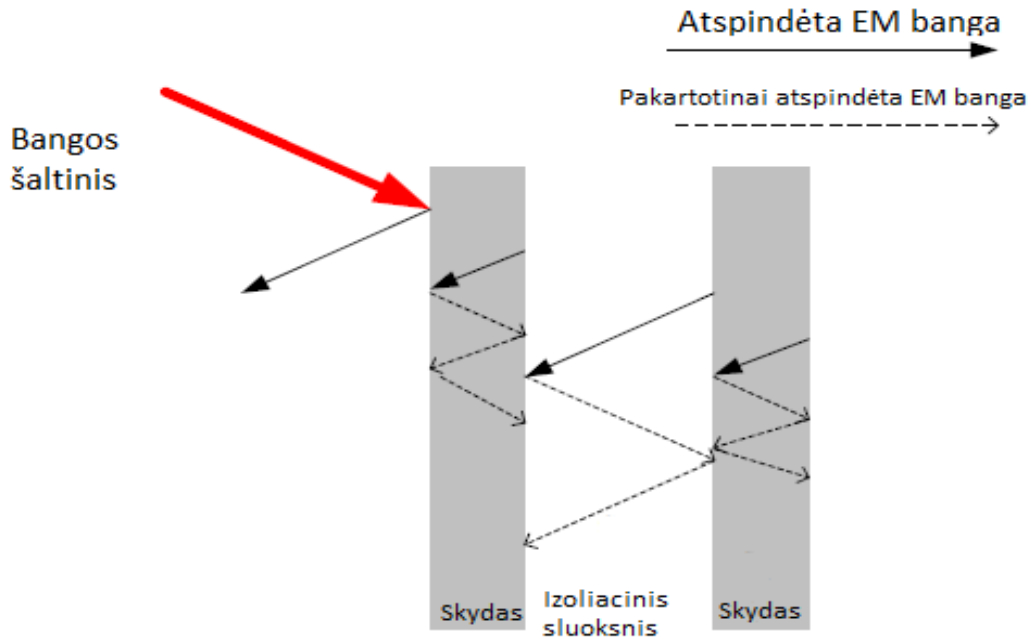
Plačiausiai naudojamos medžiagos EMI apsaugai yra metalai ir jų turintys polimerai. Rečiau sutinkami laidūs polimerų kompozitai sudaryti iš nerūdyjančio plieno, anglies skaidulų, nikeliu padengtų anglies skaidulų taip pat yra naudojami EMI apsaugai, nes šių medžiagų reikalingos didelės koncentracijos, kad būtų patenkinamas EMI slopinimas. Didelė koncentracija padidina gamybos kainą ir sumažina kompozito lankstumą. Anglies nanovamzdeliai atrasti kaip nauji ir efektyvūs nanoužpildai. Eksperimentiškai nustatyta, kad esant tai pačiai užpildo koncentracijai, polimerai su nanodalelėmis turi geresnį apsaugos lygį negu su mikro ar kitomis anglies struktūromis.

Labai svarbu ekonomiškai sumodeliuoti kompozitą, kadangi per didelė EMI apsaugos vertė iškelia kompozitų gamybos kainą, svorį bei gamybos sudėtingumą, kai tuo tarpu per silpnas izoliacijos lygis gali medžiagą padaryti neveiksnia. Siekiama, kad užpildo koncentracija būtų kuo mažesnė. Patenkinti šį reikalavimą labai tinka anglies putos taip pat polimerų kompozitai dėl savo lengvumo, mažų koncentracijų, visapusiškumo, paprastos gamybos, mažų kaštų, yra patrauklios medžiagos patenkinti elektromagnetinio suderinamumo reikalavimus [9].

Apsaugai nuo EM interferencijos, yra svarbūs trys veiksniai: atspindys, sugertis bei pasikartojantis antspindys. Elektromagnetinės apsaugos (slopinimo) lygis yra išreiškiamas decebelais (dB). 30 dB efektyvumas, reiškiantis 99.9% EM interferencijos slopinimą bei į kurį įeina trys minėtieji veiksniai, yra laikomas pakankamu. Homogeniškoje laidžioje medžiagoje (ne kompozite su laidžiu užpildu ir polimero izoliacine matrica, o pavyzdžiui metale) atspindys dažniausiai yra pagrindinis veiksnys. Norint tokiai apsaugai veikti, medžiaga turi turėti laisvų krūvininkų, kurie sąveikaitų su ateinančia EM banga. Sugertis yra antras pagal svarbą veiksnys tokioje medžiagoje ir jis yra nulemiamas medžiagos storio ar medžiagos struktūros. Ji yra

sustiprinama jeigu medžiagoje yra elektrinių arba magnetinių dipolių kurie sąveikauja su ateinančia EM banga. Trečiasis veiksnys, minėtasis pasikartojantis atspindys (7pav.), gali vykti apsaugančiojoje medžiagoje. Įprastai, pasikartojantis atspindys sumažina bendrą apsaugos lygį jeigu apsauginės priemonės storis yra plonesnis už atstumą kurio prasiskverbia EM banga ir gali būti ignoruotas jeigu apsaugančios medžiagos storis yra didesnės negu EM bangos prasiskverbimo gylis. EM bangos stipris eksponentiškai mažėja keliaujant per laidžią medžiagą. Tam tikrame gylyje ($\delta = (\sqrt{\pi f \mu \sigma})^{-1}$), elektrinis lauko vertė nukrenta iki 1/e nuo pradinės vertės. Čia f yra dažnis, μ yra apsaugančios medžiagos magnetinė skvarba ($\mu = \mu_0 \mu_r$), čia $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\mathrm{H/m}$, μ_r yra magnetinė skvarba priklausanti nuo medžiagos, o σ yra elektrinis laidumas.

Polimerų kompozituose, sklaidos mechanizmai yra labiau komplikuoti negu homogeniškuose laidžiuose barjeruose. Taip yra dėl didelio paviršiaus ploto kuriuose gali vykti įvairūs atspindžiai. Skirtumas tarp pirmojo atspindžio ir pasikartojančiųjų atspindžių yra pavaizduotas 7 pav. Anksčiau buvo neteisingai manyta, kad atspindys yra pagrindis apsaugos mechanizmas polimerų kompozituose, kaip kitų plačiai naudojamų apsauginių medžiagų. Taip pat pasikartojantis atspindys nebūtinai padidina apsaugos efektyvumą. Norint nustatyti šių medžiagų elektromagnetinės savybės, turi būti atlikti konkretūs bandymai [9].

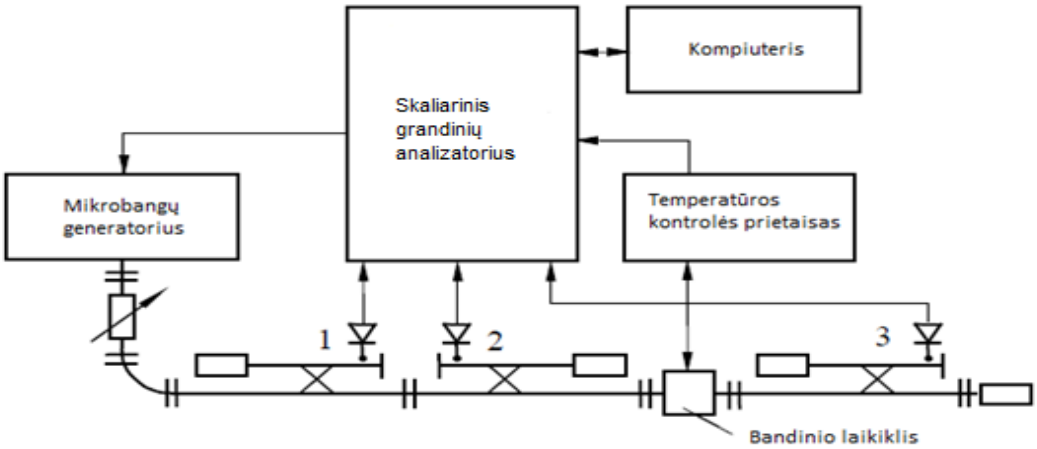


7 pav. Pakartotinai atspindėtos EM bangos schema [9].

Tyrimo metodika

Dielektrinėms savybėms matuoti centimetriniame ir milimetriniame elektromagnetinių bangų diapazonuose, buvo naudojamas cilindrinės formos bandinio stačiakampiame bangolaidyje metodas [10]. Mikrobangų atspindžio ir pralaidumo koeficientų moduliai buvo matuojami automatiniu dielektriniu spektrometru (8 pav.). Naudojantis generatoriumi (ГКЧ-61 8 - 12 GHz dažnių diapazone, P2-65 26 – 40 GHz dažnių diapazonuose) su kintančio dažnio šaltiniu, buvo nustatyti minėtų koeficientų moduliai. Madavimo diapazono plotis priklauso nuo mikrobangų osciliatoriaus juostos pločio ir nuo bangolaidžio sienelių matmenų. Atsispindėjusios, kritusios ir sugeneruotos galios matavimui esant skirtingiems dažniams bei sąsajai tarp kompiuterio ir matavimų buvo

naudojamas „Scalar Network Analyzer R2400“. Šis prietaisas turi skaitmeninio ir analoginio signalo konvertuotoją. Analoginiai signalai buvo naudojami kontroliuoti generatoriaus dažnį.



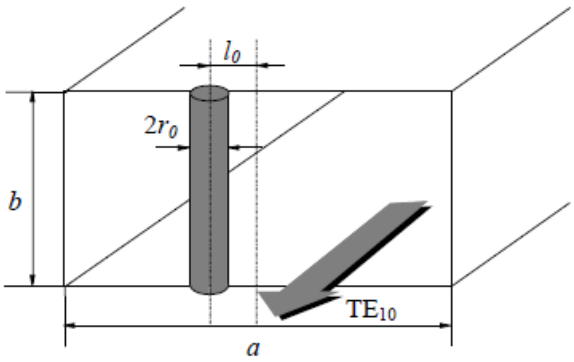
8 pav. Dielektrinio spektrometro schema atspindžio ir pralaidumo matavimams centimetriniame ir milimetriniame bangų diapazone [10].

Atspindžio R ir pralaidumo T_{tr} modulių buvo matuojami visame pasirinktame dažnių juostos plotyje keliams šimtams taškų, taip pat taškų vertės buvo išmatuotos daugiau nei vieną kartą ir suvidurkintos. Taip sumažinama atsitiktinių klaidų tikimybė ir pagerinamas metodo tikslumas ir patikimumas.

Cilindrinės formos bandinys buvo įstatytas bangolaidžio skerspjuvio centre lygiagrečiai su elektriniu lauku. Naudotas specialus laikiklis. Jame buvo padaryta vieta bandiniui sudarant kontaktą tarp jo ir bangolaidžio. Kiti du specialūs laikikliai buvo naudojami atspindžio ir pralaidumo kalibracijai.

Mikrobangų atspindžio R^* ir pralaidumo T_{tr}^* kompleksiniai koeficientai priklauso nuo bangolaidžio sistemos parametrų (sienelės pločio a), mikrobangų dažnio, kompleksinės dielektrinės skvarbos ε* ir bandinio spindulio r. Kompleksinė dielektrinė skvarba nustatoma iš netiesinių lygčių, siejančių jos priklausomybę su kompleksiniu atsipindžio koeficientu arba su atspindžio ir pralaidumo modulio vertėmis.

Cilindrinės formos bandinys buvo įdėtas bangolaidžio platesnės sienelės centre (arba kitu atstumu l_0) lygiagrečiai su pagrindinės modos TE_{10}elektriniu lauku (9 pav.).



9 pav. Plonas cilindras stačiakampyje bangolaidyje [10].

Kai bandinys yra pakankamai plonas ($a_0 = 2\pi r/\lambda_{00} \ll 1$) ir bangolaidžio sienelės centre, kompleksinis atspindžio koeficientas išreiškiamas (1) formule:

$$R^* = -\frac{4(\varepsilon^*-1)J_1(\beta_0)}{\pi\Delta_1\sqrt{(\frac{2a}{\lambda_{00}})^2-1}}, \tag{1}$$

$$\Delta_1 = \varepsilon^* J_1(\beta_0)\left[H_0^{(2)}(\alpha_0) + 2\sum_{m=1}^{\infty}(-1)^m H_0^{(2)}(2\pi ma/\lambda_{00})\right] - \sqrt{\varepsilon^*}J_0(\beta_0)H_1(\alpha_0),$$

kur J_0, J_1 yra Beselio funkcijos, H_1, $H_0^{(2)}$ yra Hankelio funkcijos, $\beta_0 = k_0(\varepsilon)^{1/2}$, a yra bangolaidžio sienelės plotis.

Kai atstumas nuo bandinio ašies iki bangolaidžio sienos centro yra l_0 , tada naudojama (2) kompleksinio atspindžio skaičiavimo formulė:

$$R^* = -\frac{4(\varepsilon^*-1)}{\pi\sqrt{\left(\frac{2a}{\lambda_{00}}\right)^2-1}}\left[\frac{J_1(\beta_0)}{\Delta_1} + \frac{\alpha_0 J_2(\beta_0)}{\Delta_3}\right], \tag{2}$$

$$\Delta_3 = -\sqrt{\varepsilon^*}J_1(\beta_0)\left[H_1^{(2)}(\alpha_0) + \sum_{m=1}^{\infty}\lambda_{00}\frac{(-1)^m}{\pi ma}H_0^{(2)}(2\pi ma/\lambda_{00})\right] + \varepsilon^* J_1'(\beta_0)H_1(\alpha_0).$$

Jeigu bandinio dydis neatitinka sąlygos $\alpha_0 \ll 1$, naudojama sudėtingesnė (2) lygties forma (3):

$$R^* = -\frac{4\sqrt{\varepsilon^*}\cos^2\frac{\pi l_0}{a}}{\pi\sqrt{\left(\frac{2a}{\lambda_{00}}\right)^2-1}}\frac{J_1(\beta_0)}{\Delta_2}, \tag{3}$$

$$\Delta_2 = -\sqrt{\varepsilon^*}J_0'(\beta_0)\left[H_1^{(2)}(\alpha_0) + 2\sum_{m=1}^{\infty}H_0^{(2)}(2\pi ma/\lambda_{00})\right] - \sum_{m=0}^{\infty}H_0^{(2)}[(2m+1)a + 2l_0$$

$$-\sum_{m=0}^{\infty}H_0^{(2)}[(2m+1)a - 2l_0]2\pi/\lambda_{00} - J_0(\beta_0)H_1^{(2)'}(\alpha_0).$$

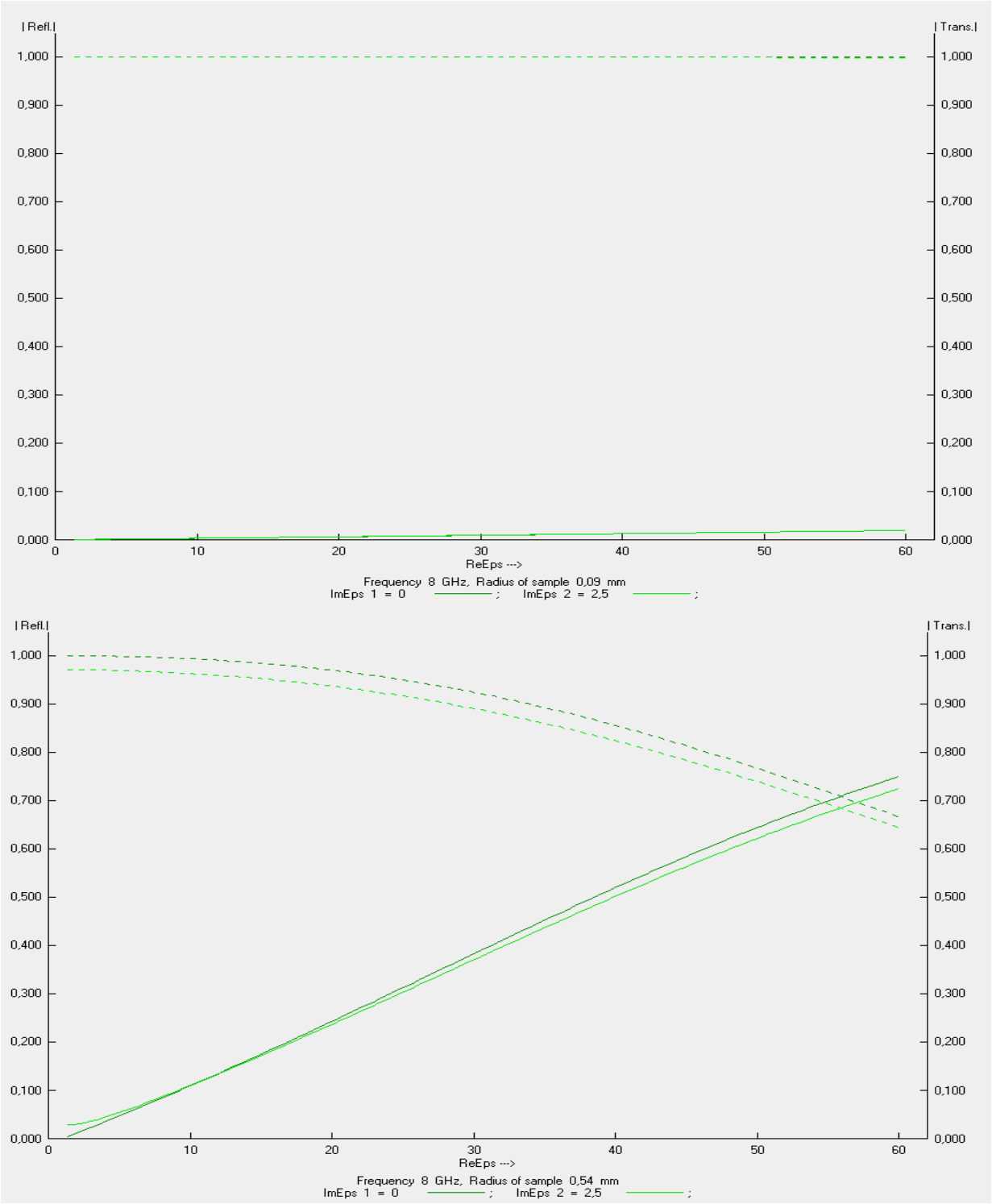
Iš 10 ir 11 pav. matyti, kad kreivių nurodančių pralaidumo ir atspindžio koeficientų modulių vertę geriausias statumas gaunamas, kai $0{,}2 < R < 0{,}85$. Kai dielektrinė skvarba didesnė, pataisos įgyja didesnę reikšmę. Jeigu nuostoliai bandinyje yra pilnai atspindimi, mikrobangų dažnis yra išreiškiamas (4) formule:

$$v_0 = \frac{c}{2\pi r\sqrt{\varepsilon}}, \tag{4}$$

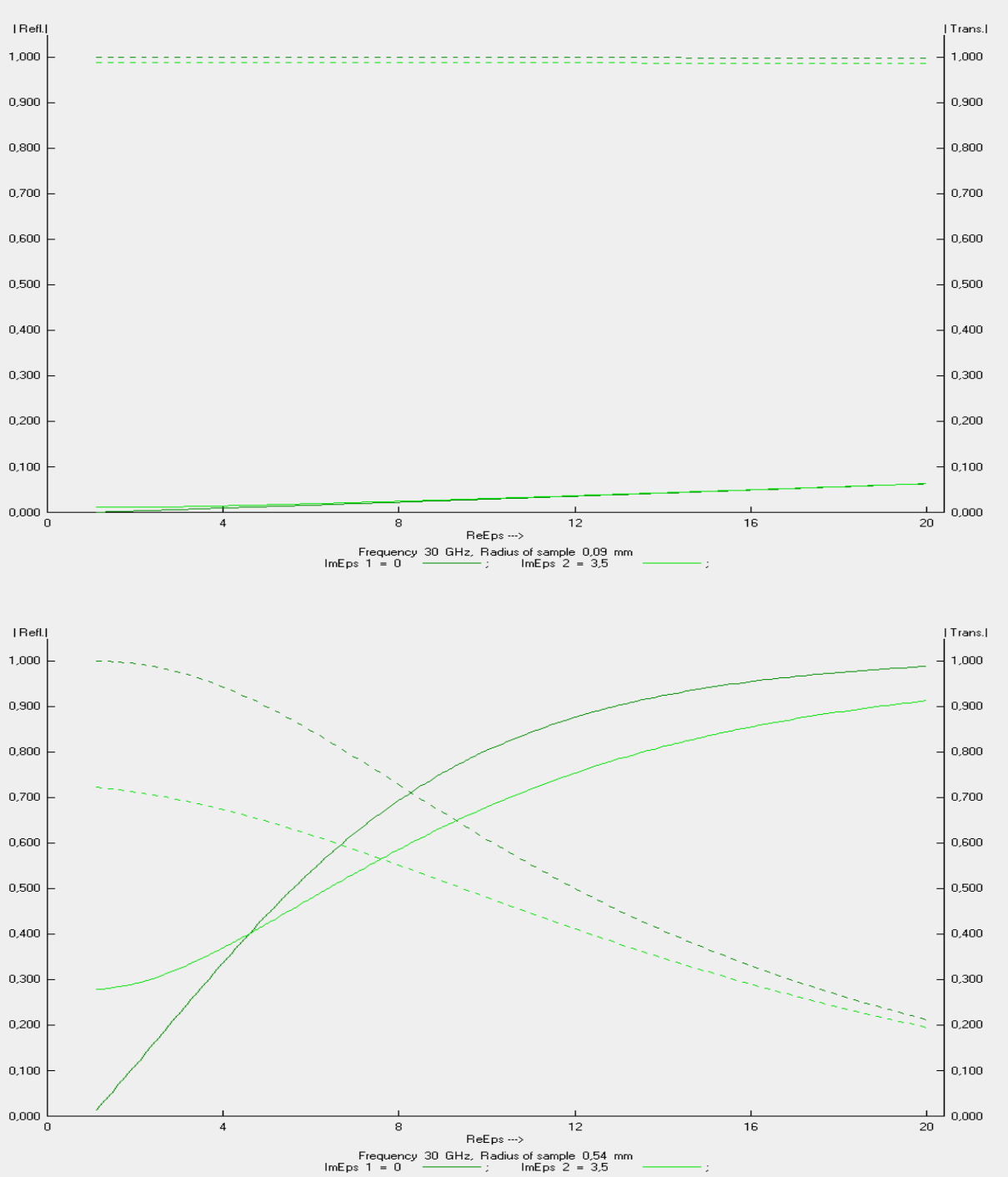
Kur c šviesos greitis vakuume. Padidėjus dielektriniams nuostoliams, atspindžio ir pralaidumo koeficientai mažiau priklauso nuo realiosios dielektrinės skvarbos dalies, taip sumažinant eksperimento tikslumą, ypač kai $v > v_0$.

Ruošiant bandinį, mums reikėjo, kad jis būtų cilindrinės formos ir jo aukštis turi buti lygus bangolaidžio sienelės aukščiui, taip pat, kad atspindžio ir pralaidumo vertės nebūtų mažesnės nei 0,2 ir didesnės nei 0,85. 10 Pav. iliustruoja teorinės paskaičiuotos atspindžio ir pralaidumo koeficientų vertės, kai dažnis yra 8 GHz (pagal lygtį (1)) su dviem skirtingais bandinio storiais. Pastebėtina, kad skaičiavimai įmanomi tik kai bandinys yra optimalaus skersmens. 11 Pav. iliustruoja panašų atvejį, tačiau pakeistas matavimo dažnis, kuris yra 30 GHz. Bandinys taip pat turi

buti optimalaus skersmens. Matyti, kad esant vienodiems parametrams aukštesniam dažniui reikia plonesnio bandinio [10].



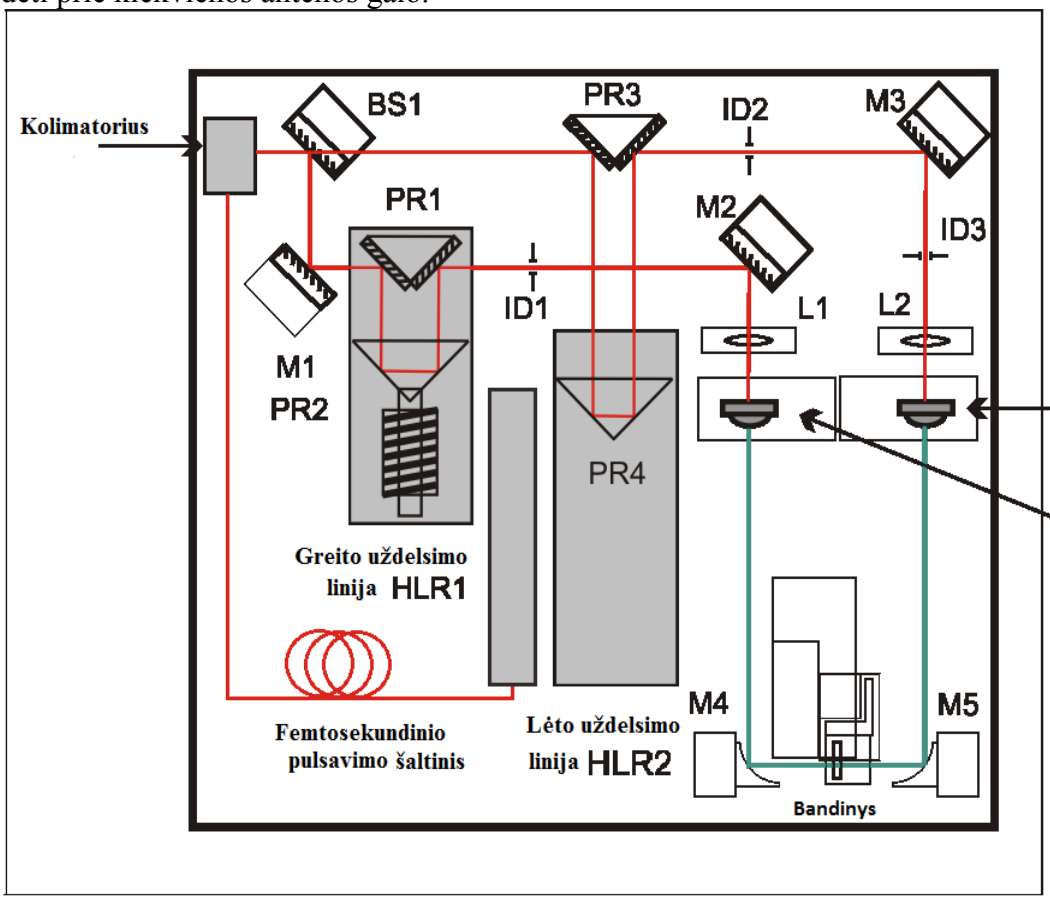
10 pav. Mikrobangų pralaidumo ir atspindžio koeficientų priklausomybė nuo bandinio dielektinės skvarbos, kai v=8GHz, o bandinio storis viršuje 0.09 mm, apačioje 0.54 mm, su dviem skirtingoms kompleksinės dielektrinės skvarbos vetėmis 0 ir 2.5. Punktyrine linija vaizduojamas pralaidumas.



11 pav. Mikrobangų pralaidumo ir atspindžio koeficientų priklausomybė nuo bandinio dielektinės skvarbos, kai v=30GHz, o bandinio storis 0.09 mm viršuje ir 0.54mm apačioje. Kompleksinės dielektrinės skvarbos menamosios dalies svertės paimtos nuo 0 iki 3.5. Punktyrine linija vaizduojamas pralaidumas.

Dielektrinėms savybėms matuoti terahercų dažniuose buvo panaudotas terahercinės spektroskopijos (angl. *Terahertz time-domain spectroscopy((THz-TDS))* metodas „T-Spec“ įrenginiu[11]. Optinis sistemos išsidėstymas parodytas 12 pav.

Fotolaidi antena, apšviesta ultratrumpų lazerio impulsų, naudota THz bangų skleidimui ir detekcijai [11]. Lazerio spinduliuotė yra 1050±40nm bangos ilgio bei 50-150 fs trukmės impulsas, kuris turi daugiau nei 40 mW galią išėjime bei pasikartoja maždaug 80 MHz dažniu. Efektyvesniai kolimacijai bei THz bangų spinduliavimo fokusacijai, lęšiai sudaryti iš didelio atsparumo silicio pridėti prie kiekvienos antenos galo.

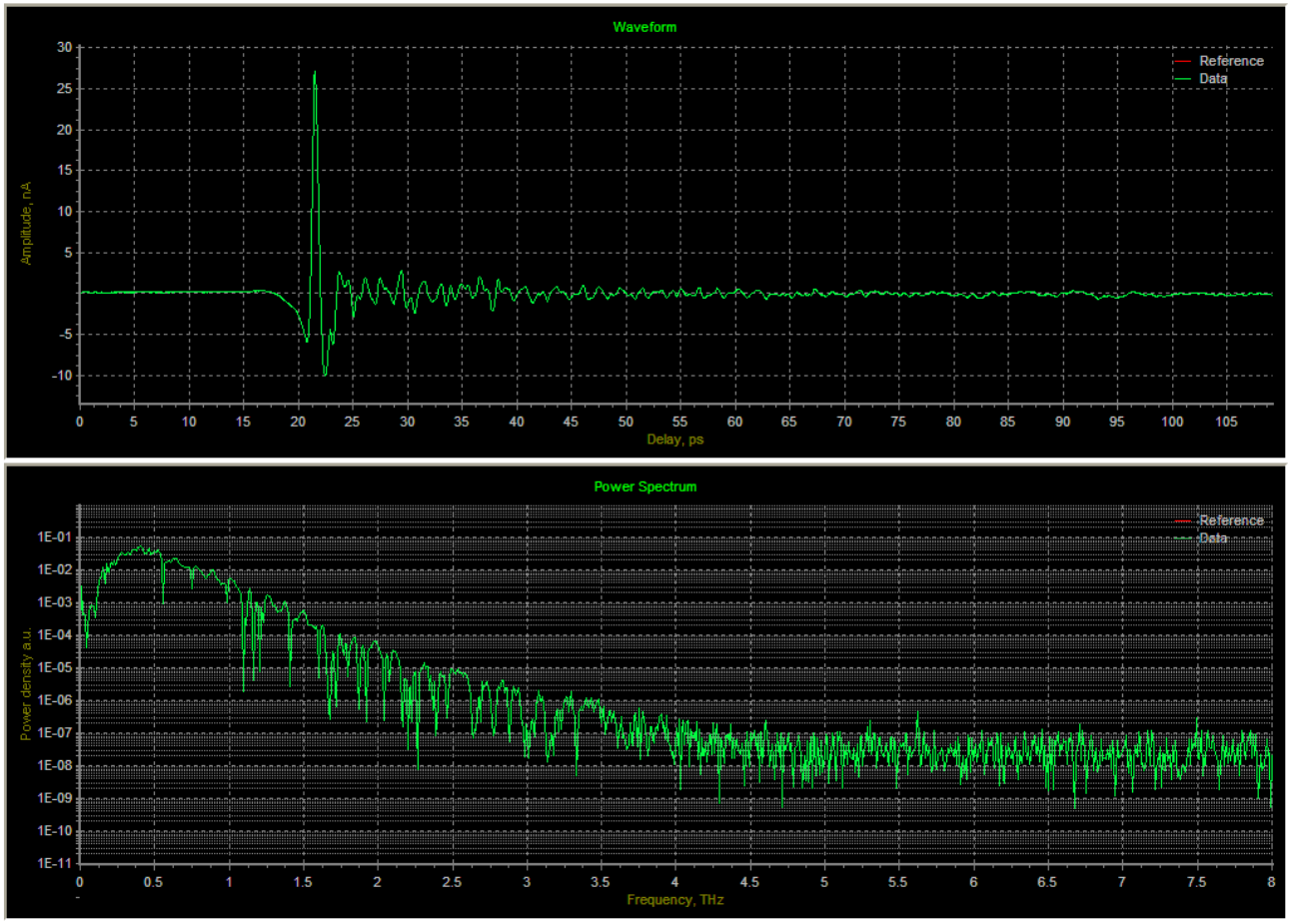


12 pav. Optinė „T-Spec“ spektrometro schema [11].

Impulsas plėveliniu spindulio skaidikliu BS1 yra padalinamas į du. Padalinimo santykis yra 55:45 ir jis nepriklauso nuo lazerio poliarizacijos. Veidrodžiai M1 ir M2 yra naudojami nukreipti spindulį į emiterį per greito uždelsimo liniją. Ši uždelsimo linija yra paremta 10 kartų per sekundę judančiu tuščiaviduriu atšvaitu HLR1. Atšvaitas yra uždėtas ant greitai judančios magnetinį lauką kuriančios ritės, taip pat yra 3 prizmės stabiliai stovinčios priešais judantį atšvaitą. Po užvėlinimo spindulys veidrodžiu MR2 yra nukreipiamas į THz bangų emiterį. Lęšis L1 sufokusuoja šviesos spindulį į tarpelį su fotolaidžia antena. Antra impulso dalis keliauja per lėto užvėlinimo liniją ir veidrodžiu M3 nukreipiamas į THz bangų detektorių. Lęšis L2 sufokusuoja spindulį į tarpelį su fotolaidžia antena. Terahercinės bangos yra sufokusuojamos į bandinį paraboliniu veidrodžiu M4 ir veidrodis M5 sufokusuoja terahercinę spinduliuotę į detektorių. Visa sistema yra sujungta su TMS-200 elektroniniu moduliu, kurio gauti signalai yra paverčiami skaitmeniniais.

THz bangų detektoriaus duomenys yra proporcingi impulso elektronio lauko stipriui. 10 Hz dažniu skanuojančia greito optinio uždelsimo linija, yra atkuriama skleidžiamų THz bangų forma. Palyginus spektrą, gautą įdėjus į spektrometrą bandinį ir be jo, mums suteikia bandinio sugerties spektrą. Gauti geresnius rezultatus dėl galimos triukšmo įtakos, rezultatas yra pateikimas

suvidurkinus 1024 bandimų. Tipinis gauto rezultato vaizdas pateikiamas 13 pav. THz bangos impulso forma ir Furjė spektras yra išmatuotas be įdėto bandinio.



13 pav. Tipinė THz spinduliavimo bangos forma bei Furjė transformacija nesant jokiam bandiniui [11].

Rezultatai ir jų aptarimas

Šiame darbe buvo ištirtos elektromagnėtinės savybės šių medžiagų (dažnių diapazone):

1. daugiasienių anglies nanovamzdelių su kopolyamido matrica kompozitų (įšvardintų 1 lentelėje) (8-12 GHz ir 24-40 GHz),
2. kompozito su daugiasieniais anglies nanovamzdeliais (kai jų masinė koncentracija 7%) bei 202.4 μm skersmeniu elektromagnetinių savybių temperatūrinės priklausomybės temperatūrų intervale nuo 120 K iki 400 K (24-40 GHz),
3. įvairių anglies svogūnų (ASV) bei polidimetylsiloksano kompozitų su ASV masinė koncentracija: 1, 2, 5, 8 ir 10%; ASV agregatų dydis buvo 40 ir 100 nm (24-40 GHz ir 0.1 – 1 THz),
4. grynojo polidimetylsiloksano (24-40 GHz),
5. skirtingo tankio anglies putų (24-40 GHz).

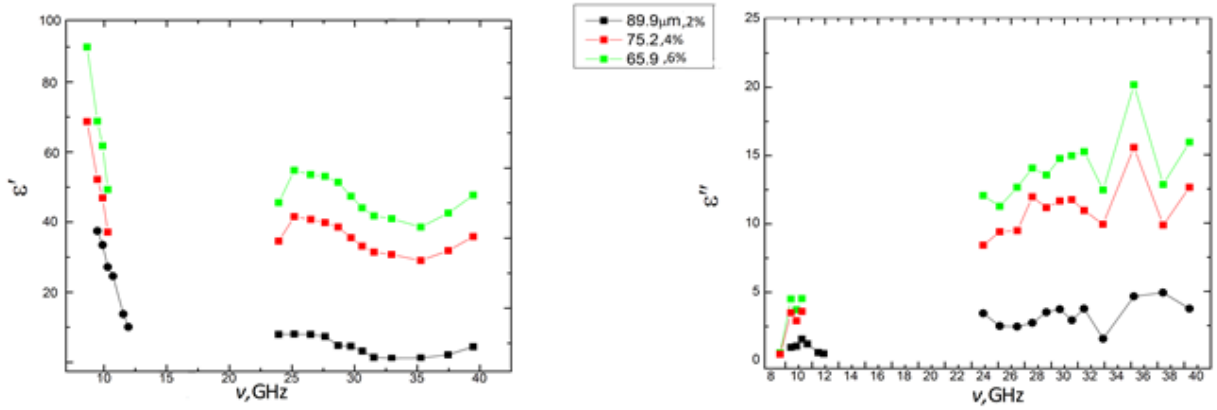
Šiame darbe tirti įvairūs daugiasienių nanovamzdelių su kopolyamido matrica kompozitiniai bandiniai su savo charakteristikomis yra išvardinti 1 lentelėje. Bandinys Nr. 8 yra su nanovamzdeliais paveiktais amoniaku. Visi bandiniai buvo panašus į juodus lanksčius labai

plonus, plastmasinius, slystančius siūlelius, kurie gana lengvai deformuojami bei yra apdorojami. Matavimo paklaidos buvo įtakojamos bandinio storio nehomogeniškumo. Visos 1 lentelėje išvardintos matricos yra komerciškai pasiekiamos (gamintojas EMS Griltex, Šveicarija) kopolyamido atmainos.

1 lentelė. Tirti kompozitai su daugiasieniais anglies nanovamzdeliais.

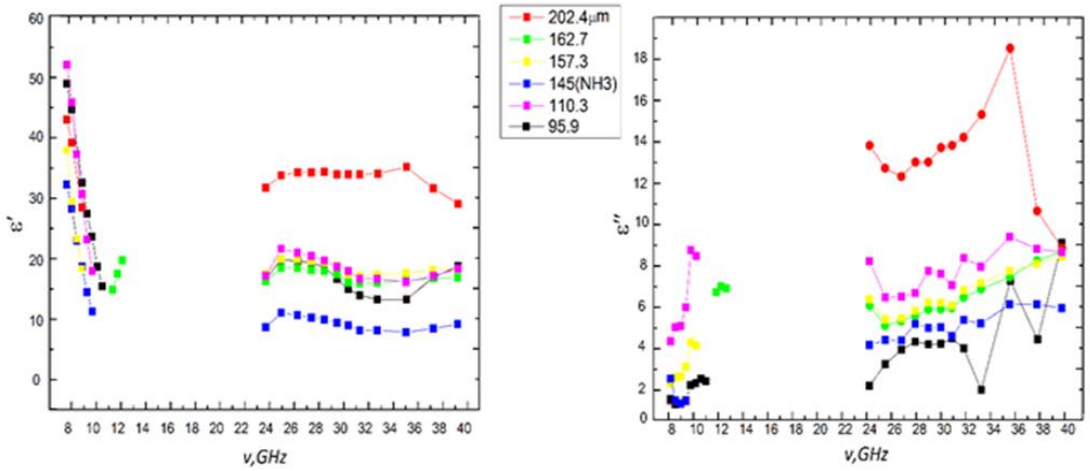
Bandinio numeris	**matrica**	**nanovamzdelių koncentracija, %**	**kompozito skersmuo, µm**
1.	Griltex 2A	2	89.9
2.	Griltex 2A	4	75.2
3.	Griltex 2A	6	65.9
4.	Griltex D1330A	7	95.9
5.	Griltex D1330A	7	202.4
6.	Griltex D1330A	7	162.7
7.	Griltex 2A	7	157.3
8.	Griltex D1330A	$7NH_2$	145
12.	Griltex 1566	7	110.3
13.	Griltex 1566	2	127.7
14.	Griltex 1566	2	58.7
15.	Griltex 1566	4	72.4
16.	Griltex 1576	6	92.8

Kompozitų su Griltex 2A matrica (bandinių nr. 1-3) kompleksinės dielektrinės skvarbos priklausomybė nuo dažnio yra pavaizduota 14 pav. Atliekant matavimus 24-40 GHz srityje, į laikiklį su sidabro pasta buvo įklijuota po vieną bandinį, kadangi šio skersmens užtenka pakankamai tiksliems matavimais. Tuo tarpu atliekant eksperimentą 8-12 GHz dažnių srityje iškilo nesklandumų dėl per nelyg plono bandinio. Į laikiklį sidabro pasta buvo įklijuoti trys bandiniai. Reikia pastebėti, kad kompozitų dielektrinė skvarba yra labai didelė (didesnė negu 45 esant dažniui 30 GHz ir nanovamzdelių koncentracijai 6%) ir didėja didėjant nanovamzdelių koncentracijai. Kadangi grynas kopoliamidas nėra elektriškai laidus ir jo kompleksinės dielektrinės skvarbos vertė yra maža [12] visuose tirtuose kompozituose nanovamzdelių koncentracija yra didesnė negu elektrinės perkoliacijos slenkstis. Tiek realioji kompleksinės dielektrinės skvarbos dalys, tiek menamoji praktiškai nepriklauso nuo dažnio 26 – 37 GHz dažnių diapazone, tuo tarpu 8-12 GHz dažnių diapazone matomas staigus dielektrinės skvarbos kitimas. Toks staigus kitimas gali buti sąlygotas ne medžiagos sąvybių, o specifinių geometrinių rezonansinių reiškinių.



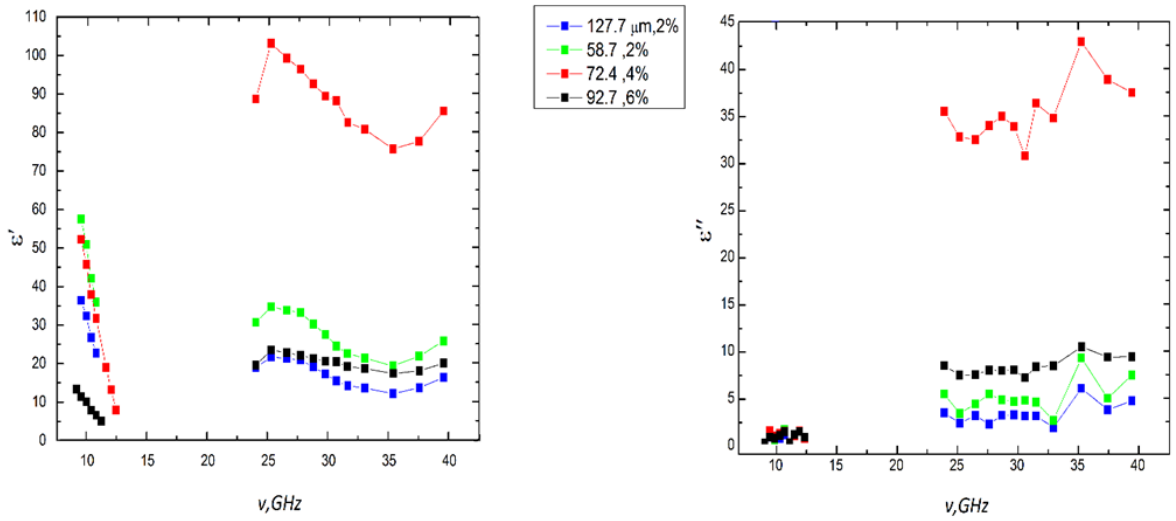
14 pav. Kompozitų su Griltex 2A matrica ir daugiasieniais nanovamzdeliais kompleksinės dielektrinės skvarbos priklausomybė nuo dažnio.

Toliau buvo tiriami bandiniai su pastovia vamzdelių koncentracija (7 proc.), gauti rezultatai pavaizduoti 15 pav. Vėlgi, atliekant tyrimus žemesnių dažnių srityje reikėjo sidabro pasta įklijuoti bent po 3 bandinius vienu kartu, keliais atvejais net po 6. Mėlyna spalva pažymėti rezultatai bandinio su nanovamzdeliais paveiktais amoniaku.



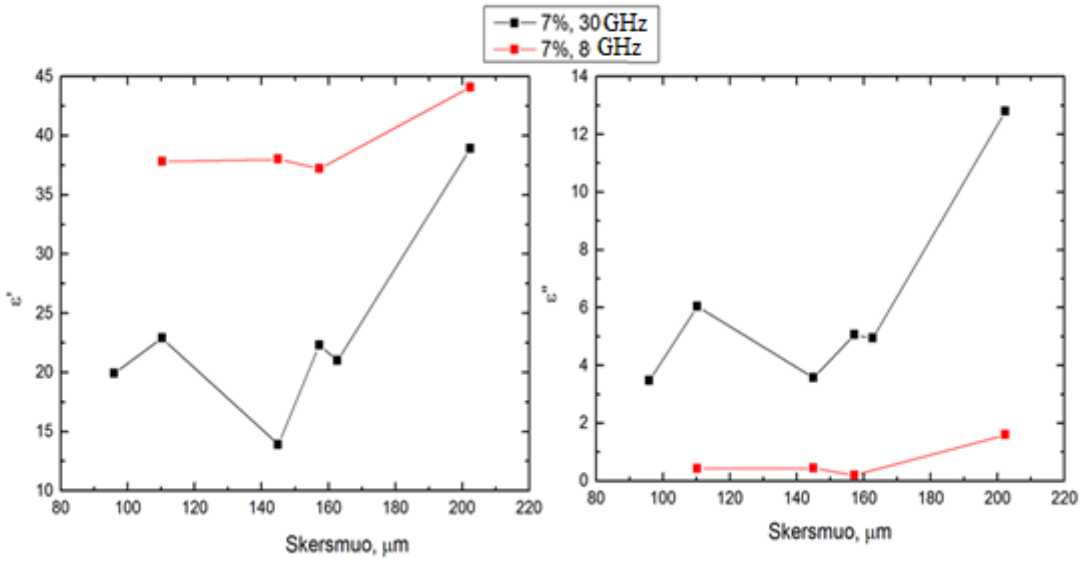
15 pav. Kompozitų turinčių 7% nanovamzdelių koncentraciją kompleksinės dielektrinės skvarbos priklausomybė nuo dažnio.

Kompozitų, kurių Nr. 13-16 kompleksinės dielektrinės skvarbos priklausomybė nuo dažnio pavaizduota 16 pav. Reikia pastebėti, kad rezultatai pateikti pav. 14-16 yra labai panašus, iš to galima padaryti išvada, kad matricos tipas nelabai įtakoja nagrinėjamų kompozitų dielektrinės savybes. 16 pav. raudona spalva pažymėtuose duomenyse greičiausiai įsivėlė klaida. Rezultatai yra akivaizdžiai nepatikimi. Tokių gauta ir daugiau, tačiau kiekvienu tokiu atveju eksperimentas būdavo pakartotas, padidinant bandinio skersmenį arba tiksliau bandinį įklijuojant. Jeigu imta daugiau negu vienas bandinys, stengtąsi juos susukti į vieną storesnę panašios formos figūrą. Minėtasis rezultatas paliktas tiesiog parodyti, kokie gauti duomenys būtų klaidingi.



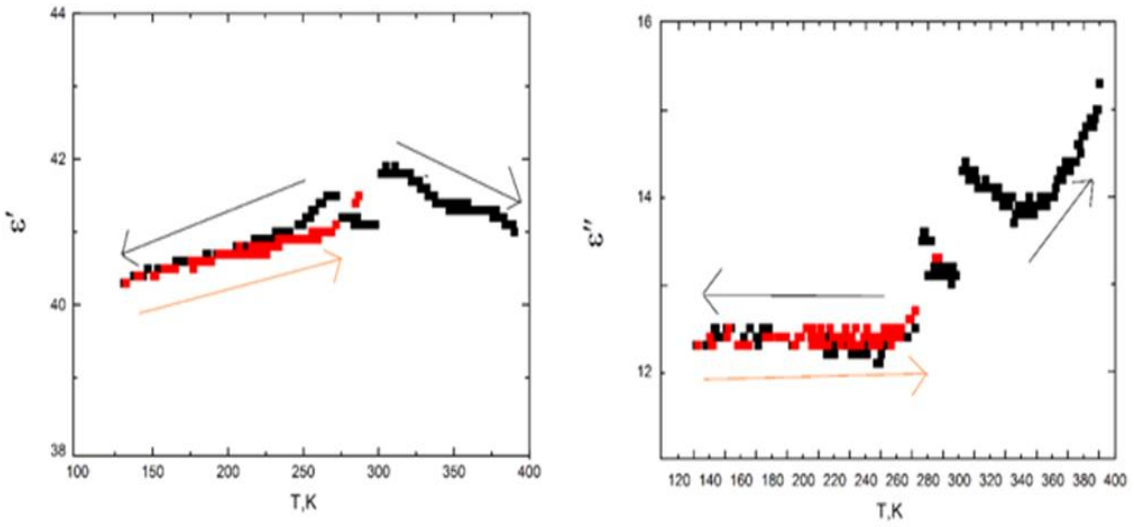
16 pav. Bandinių Nr. 13-16 (žr. 1 lentelę) kompleksinės dielektrinės skvarbos priklausomybė nuo dažnio.

Kadangi turėjome keletą kompozitų su pastovia nanovamzdelių koncentracija, tačiau skirtingu skersmeniu, buvo įmanoma nustatyti, kaip dielektrinė skvarba kinta didėjant kompozito spinduliui, esant pastoviam elektromagnetinės bangos dažniui. Ši priklausomybė atvaizduota 17 pav. Pavaizduoti duomenys yra gauti atrinkus kelis iš daugelio kartų išmatuotų tų pačių bandinių. Didėjant kompozito skersmeniui kompleksinė dielektrinė skvarba didėja, šis efektas gali būti paaiškintas geresniu nanovamzdelių pasiskirstymu storesniame bandinyje (esant tai pačiai nanovamzdelių koncentracijai). Kadangi kompozituose dominuoja elektronų tuneliavimas tarp anglies nanovamzdelių klasterių, geresnis anglies nanovamzdelių pasiskirstymas lemia didesnį elektrinį laidį ir kompleksinę dielektrinę skvarbą.



17 pav. Daugiasienų anglies nanovamzdelių kompozitų dielektrinės skvarbos priklausomybė nuo bandinio skersmens esant pastoviam dažniui ir vamzdelių koncentracijai.

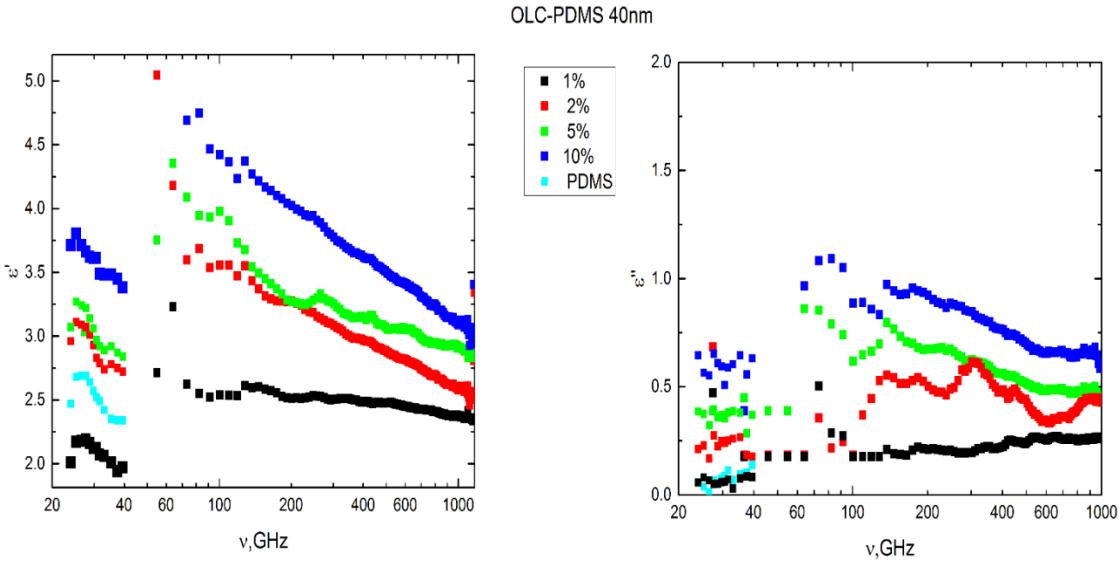
Vienas iš kompozitinių bandinių buvo paveiktas termiškai, taip norint nustatyti, ar šis išlaiko savo savybes esant skirtingoms temperatūroms. Tam buvo pasirinktas 202,4 μm skersmens kompozitas su didžiausia 7% nanovamzdelių koncentracija. Gauti rezultatai pavaizduoti 18 pav. Matavimai buvo atlikti dažnių diapazone nuo 24 iki 40 GHz. Kaitinant bandinį buvo panaudota krosnelė per kurią tekėjo elektros srovė, pastoviai didinama su pagalbine programa. Kaitinta iki 400 K temperatūros ir matuotos bandinio savybės. Kambario temperatūra buvo arti 300 K. Vėstant duomenys dėl programos klaidos buvo neįrašyti, tačiau jie beveik nesiskyrė nuo verčių kaitinant. Bandinys taip pat buvo atšaldytas iki 120 K temperatūros, pasinaudojus skystu azotu. Jis buvo pastoviai tiekiamas į bandinio laikiklį, stengiantis palaikyti šaldymo greitį apie -1 K/min. Buvo pasitelkta programa reguliuojanti azoto tiekimo tempą. Šaldant ir šildant duomenys taip pat praktiškai sutapo kaip ir ir kaitinimo atveju. Matyti, kad gautosios kompleksinės dielektrinės skvarbos reikšmės kinta labai mažame intervale, reali dalis tarp 40 ir 42, menama tarp 12 ir 15. Šio pokyčio priežastimi gali būti temperatūros pokyčių sudaryta vandens koncentracija ore arba bandinio šiluminis plėtimasis. Toks silpnas kompozitų kompleksinis dielektrinės skvarbos kitimas mikrobangų diapazone labai skirasi nuo įprastai stebimų kompozitų kompleksines dielektrinės skvarbos kitimo žemuose dažniuose [13].



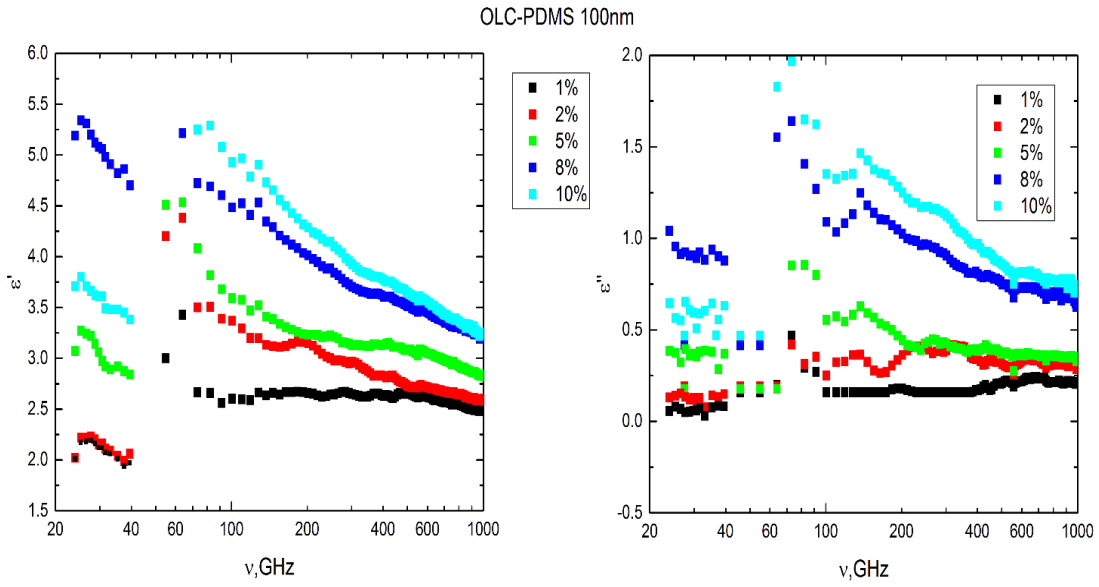
18 pav. Kompozito su 7% daugiasluoksnių anglies nanovamzdelių koncentracija bei 202.4μm skersmeniu kompleksinės dielektrinės skvarbos priklausomybė nuo temperatūros esant 30 GHz dažniui. Tamsi rodyklė rodo kaitinimą ir šaldimą, raudona vėsimą.

Rezultatai, gauti ištyrus ASV /polidimetilsiloksano kompozitus dviem skirtingais metodais 24-40 GHz dažnių bei 0.1-1 THz dažnių diapazonuose, yra pavaizduoti 19 - 21 pav. Šios medžiagos buvo dideli lankstūs, juodi, trintį turintys plastiko gabalėliai. Juos buvo stengtąsi apdoroti taip, kad būtų įmanoma atlikti matavimus. Idealiu atveju, bandiniai turėjo būti tolygaus ir aiškaus storio, tačiau labai svarbu paminėti, kad bandiniai buvo apdorojami ranka stengiantis gauti 0.5-0.7 mm storio bandinius, todėl buvo įmanona apie 0.1 mm storio paklaida, kas tiesiogiai įtakoja dielektrinės skvarbos rezultatus. Rezultatus buvo stengtąsi apibendrinti, kad būtų aiškiai matoma tendencija. 19 pav. pavaizduoti ASV/PDMS kompozitų su 40 nm skersmens agregatais duomenys. Taip pat palyginimui ištirta gryna polidimetilsiloksano medžiaga. Ši atrodė skaidri be jokių juodos spalvos požymių. Bandinių su 100 nm agregatais gautuosius duomenis yra pavaizduotos 20 pav. Bendrai pastebima tendencija, kad didėjant koncentracijai, kompleksinės dielektrinės skvarbos vertės didėja visame dažnių diapazone. Tačiau ASV kompozitų kompleksinės dielektrinės skvarbos dydis, esant tai pačiai nanointarpų koncentracijai, yra žymiai mažesnis negu kompozitų su anglies

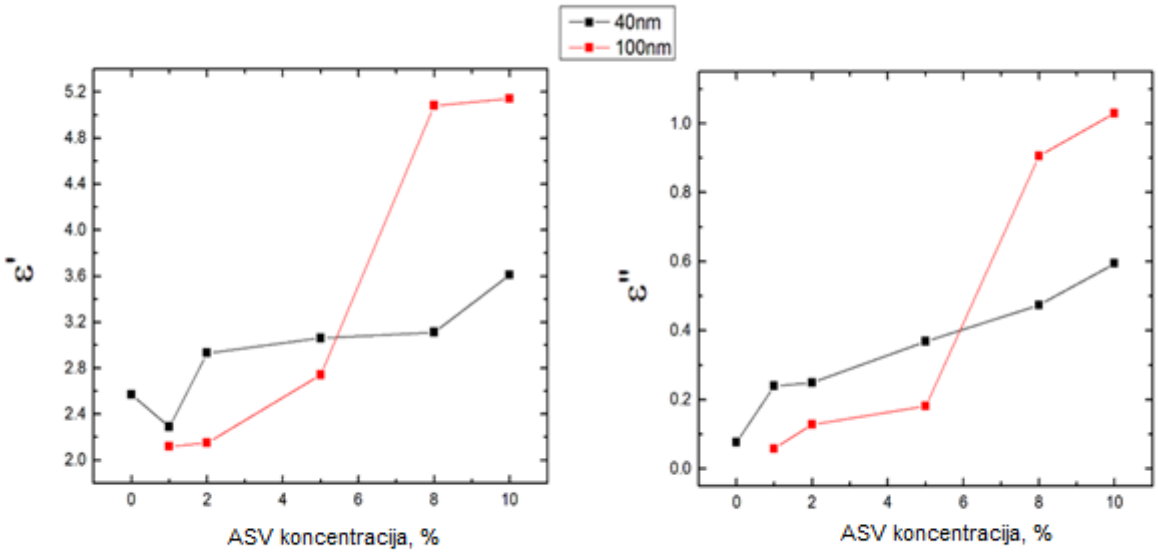
nanovamzdeliais nagrinėtais aukščiau. Taip yra dėl to, kad anglies nanovamzdelių ilgio ir skersmens santykis yra labai didelis ir tai sąlygoja kompozitų su nanovamdeliais žemą elektrinės perkoliacijos slenkstį bei didelį elektrinį laidį. Kompozitų su ASV svogūnais kompleksinės dielektrinės skvarbos augimo tendencija didinant ASV koncentracija yra iliustruota 21 pav, kur pateikta ASV/polidimetilsiloksano kompozitų kompleksinės dielektrinės skvarbos priklausomybė nuo ASV koncentracijos esant 30 GHz dažniui. Šuolis kompleksinės dielektrinės skvarbos priklausomybėje nuo koncentracijos yra stebimas esant 8% 100 nm dydžio ASV intarpams. Todėl ši koncentracija yra arti perkoliacijos slenkščio. Grynas polidimetilsiloksanas beveik neslopina elektromagnetinės spinduliuotės.



19 pav. ASV/PDMS kompozitų su 40 nm skersmens ASV agregatais kompleksinės dielektrinės skvarbos priklausomybė nuo dažnio.

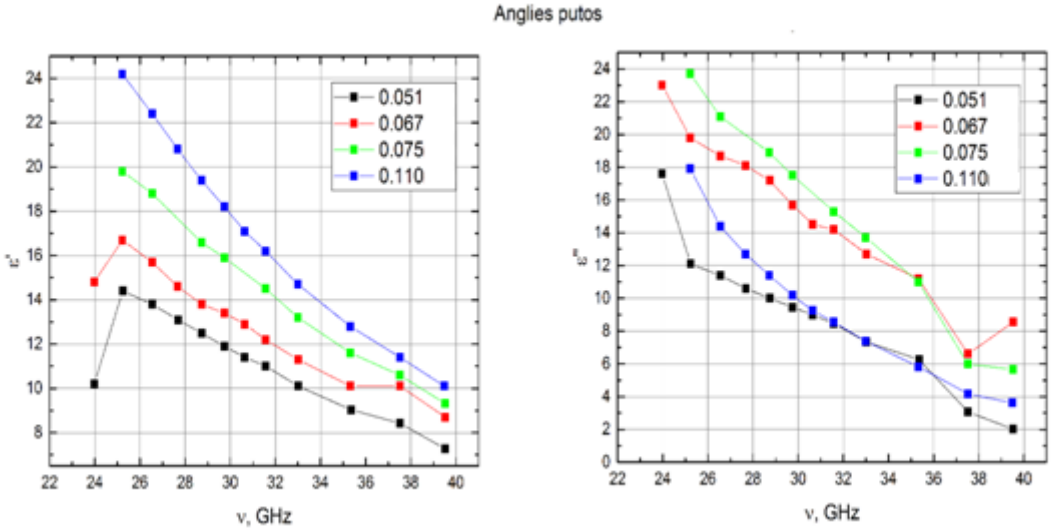


20 pav. ASV/PDMS kompozitų su 100 nm skersmens agregatais kompleksinės dielektrinės skvarbos priklausomybė nuo dažnio.



21 pav. ASV/PDMS kompozitų su 40 nm ir 100 nm ASV agregatais kompleksinės dielektrinės skvarbos priklausomybė nuo ASV koncentracijos esant 30 GHz dažniui.

Skirtingo tankio anglies putų (jų tankis buvo 0.051 g/cm^3, 0.067 g/cm^3, 0.075 g/cm^3, 0.110 g/cm^3) 24-40 GHz dažnių diapazone dielektriniai rezultatai yra pateikti 22 pav. Medžiaga buvo tamsi, gana trapi, todėl jos nepavyko ištirti 8-12 GHz dažnių diapazone, nes matavimo metodika šiame diapazone reikalauja ypač plonų ir ilgų bandinių, kurių dėl trapumo buvo neįmanoma suformuoti ranka. Anglies putų kompleksinė dielektrinė skvarba yra pakankamai didelė (palyginama su anglies nanovamzdeliais kompozitų savybėmis) ir ji didėja didėjant anglies putų tankiui. Stebėtinai didelė menamoji dielektrinės skvarbos dalis, esanti kai kuriais atvejais net aukštesnė už realiąją, reiškia, kad medžiaga į šilumą paverčia didelę dalį mikrobangų energijos. Tokią medžiagą galima efektyviai panaudoti elektromagnetiniam ir šiluminiam suderinamumui.



22 pav. Skirtingo tankio (nurodyti g/cm^3) anglies putų kompleksinės dielektrinės skvarbos priklausomybė nuo dažnio.

Išvados

1) Mikrobangų diapazone daugiasienių anglies nanovamzdelių ir kopoliamido kompozitų kompleksinė dielektrinė skvarba yra labai didelė esant net 2 % masinei nanovamzdelių koncentracijai ir 58 mikrometrų kompozito skersmeniui. Tai rodo, kad šiuose kompozituose elektrinės perkoliacijos slenkstis yra mažesnis negu 2% masinės koncentracijos. Be to šių kompozitų kompleksinė dielektrinė skvarba didėja kartu su kompozito skersmeniu ir nanovamzdelių koncentracija.
2) Daugiasienių anglies nanovamzdelių ir kopoliamido kompozitų elektromagnetinės savybės mikrobangų dažnių diapazone yra stabilios 120-400 K temperatūros intervale.
3) Skirtingai nuo daugiasienių anglies nanovamzdelių kompozitų su anglies svogūnų intarpais kompleksinė dielektrinė skvarba nėra didelė. Didinant anglies svogūnų intarpus kompleksinė skvarba taip pat didėja. Elektrinės perkoliacijos slenkstis kompozitams su 100 nm anglies svogūnų intarpais yra arti 8 % masinės koncentracijos.
4) Anglies putos tyrimo rezultatuose pasižymėjo ypač aukšta menamaja dielektrine skvarba, kai kuriais atvejais aukštesne už realiają dielektrinę skvarbą. Tai rodo, kad tokia medžiaga gerai sugeria elektromagnetines bangas.

Iš trijų ištirtų medžiagų, visos rodo potencialą būti panaudotos kaip skydinės medžiagos EM bangoms. Geriausias savybes turėjo anglies nanovamzdelių kompozitai, tačiau anglies putos pasižymėjo dideliu nuostolių tangentu.

Cituojama literatūra

[1] J. D. Pierce Jr., *Electromagnetic Compatibility (EMC) Requirements for Military and Commercial Equipement*, daktaro disertacija, Naval Postgraduate School, 7-13 (2009).
[2] L. Spano, *Electromagnetic compatibility Issues of Electromagnetic and Electronic Devices*, daktaro disertacija, Cagliari universitetas, 11-27 (2014).
[3] Carbon nanotube, en.wikipedia.org/wiki/Carbon_nanotube.
[4] Fullerene, en.wikipedia.org/wiki/Fullerene.
[5] Onion-like carbon, research.ncl.ac.uk/nanoscale/research/olc.html.
[6] J. K. McDonough, Y. Gogotsi, Carbon Onions: Synthesis and Electrochemical Applications, *The Electrochemical Society Interface*, 61-65 (2013).
[7] G. Tondi, V. Fierro, A. Pizzi, A. Celzard Tannin-based carbon foams, *Carbon 47*, 1480-1492 (2009).
[8] Z. Fang, C. Li, J. Sun, H. Zhang, J. Zhang, The electromagnetic characteristics of carbon foams, *Carbon 45*, 2873-2879 (2007).
[9] M. H. Al-Saleh, U. Sundararaj, Electromagnetic interference shielding mechanisms of CNT/polymer composites, *Carbon 47*, 1738-1739 (2009).
[10] J. Grigas, Microwave dielectric spectroscopy of ferroelectrics and related materials, *Gordon and Breach Science Publ.*, OPA Amsterdam (1996).
[11] Ekspla UAB, *THz Spectrometer T-SPEC series technical description and user's manual*, 4 skyrius (2013).
[12] C.M. Leu, Y.T. Chang, K.H. Wei, Synthesis and Dielectric Properties of Polyimide-Tethered Polyhedral Oligomeric Silsesquioxane (POSS) Nanocomposites via POSS-diamine, *Macromolecules 36*, 9122-9127 (2003).
[13] J. Macutkevic, R. Adomavicius, A. Krotkus, J. Banys, V. Kuznetsov, Localization and electrical transport in onion-like carbon based composites, *Journal of Applied Physics 111*, 103701 (2012).

Summary

In this work it has been examined how several different carbon materials (multi-walled carbon nanotube (MWCNT) and copolyamide composites, onion-like carbon and polydimethylsiloxane (OLC-PDMS) composites, carbon foams) interact with electromagnetic waves in microwave frequency range, using a wave-guide method, and in terahertz frequency range, using Terahertz time-domain spectroscopy method.

The MWCNT filler concentration in samples was up to 7% and this material showed huge values of the complex dielectric permitivity even for filler concentrations of 2% wt. These characteristics were well maintained in the wide temperature range (120 - 400 K). By increasing the filler concentration or the sample size, complex dielectic permitivity values of composites also increase. OLC- PDMS samples needed at least 8% wt concentration of OLC to reach the electric percolation. Carbon foams had an extremely high imaginary complex permitivity part as well as the real part, which states that this material acts as an insulator for electromagnetic, heat and sound waves.

All three materials could be sucessfully used as electromagnetic wave shielding materials, while carbon foams are also additionally the heat and sound waves insulator.