

Vilniaus universiteto
Fizikos fakulteto

Ramūnas Baueris
ELEKTROMAGNETINIO SUDERINAMUMO SISTEMŲ TYRIMAS

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Telekomunikacijų fizikos ir elektronikos
studijų programa

Studentas

Ramūnas Baueris

Leista ginti

2020.06.02

Darbo vadovas

Dr. Jan Macutkevič

Taikomosios elektrodinamikos ir
telekomunikacijų instituto direktorius

Prof. J. Matukas

Vilnius 2020

Sutrupinimai

ANV – Anglies nanovamzdeliai (angl. Carbon nanotubes)

VANV – Vienasieniai Anglies nanovamzdeliai (angl. Single-Walled carbon nanotubes)

DANV – Daugiasieniai Anglies nanovamzdeliai (angl. Multi-walled carbon nano-tube)

PEM - Pralaidumo elektroninis mikroskopas (angl. Transmission Electron Microscope)

TEM - Skersinė elektromagnetinės bangos (angl. Tansverse electromagnetic mode)

LPK – Laidūs polimeriniai kompozitai (angl. Conductive Polymer Composites)

EMI – Elektromagnetinė interferencija (angl. Eelectromagnetic Interference)

SE - Ekranavimo efektyvumu (angl. shielding effectiveness)

SG - Sugerties gylis (angl. skin depth),

EDP - Epoksidinės dervos polimeras

Turinys

<i>Įvadas</i>	4
<i>Literatūros apžvalga</i>	5
<i>Anglies nanovamzdeliai</i>	5
<i>Polimerinė matrica</i>	8
<i>Dielektrinis spektras</i>	10
<i>Elektrinė perkoliacija</i>	12
<i>Elektromagnetinis suderinamumas</i>	15
<i>Tyrimo metodika</i>	17
<i>Kompozitų su DANV ir MnFe₂O₄ intarpais gavimas</i>	17
<i>Kompozitų su DANV ir SiC intarpais gavimas</i>	18
<i>Matavimai 20 Hz – 1 MHz dažnių ruože</i>	19
<i>Matavimai 1 MHz – 3 GHz dažnių ruože</i>	21
<i>Matavimai 8 GHz – 12 GHz dažnių ruože</i>	24
<i>Rezultatai ir jų aptarimas</i>	27
<i>Kompozitų dielektrinių savybių tyrimas kambario temperatūroje</i>	28
<i>DANV kompozitai su skirtingomis MnFe₂O₄ koncentracijomis</i>	28
<i>DANV kompozitai su skirtingomis SiC koncentracijomis</i>	32
<i>Kompozitų dielektrinių savybių tyrimas plačiame temperatūros intervale</i>	34
<i>DANV kompozitai su skirtingomis MnFe₂O₄ koncentracijomis</i>	34
<i>DANV kompozitai su skirtingomis SiC intarpų koncentracijomis</i>	39
<i>Kompozitų ekranavimo savybės GHz dažnių ruože</i>	40
<i>Naudota literatūra</i>	44
<i>Summary</i>	46

Ivadas

Mus supančioje aplinkoje daugybė prietaisų skleidžia nepageidaujamą elektromagnetinę spinduliuotę, kuri gali trikdyti elektroninės įrangos darbą arba turėti įtakos žmonių sveikatai. Vystantis telekomunikacijų technologijoms prognozuojama, kad tokių prietaisų skaičius dar labiau augs. Per ateinančius penkerius metus pasaulyje turėtų būti daugiau nei septyniasdešimt penki milijardai įvairiuose dažniuose komunikuojančių įrenginių [1]. Tad vis svarbesnis tampa neefektyvaus spinduliavimo bei ekranavimo klausimas. Siekiant nuslopinti nepageidaujamą elektromagnetinę spinduliuotę yra kuriamos įvairios elektromagnetinės dangos. Šiuo metu yra ypač populiarios elektromagnetinės dangos polimerinių kompozitų pagrindu, pasižyminčios tvirtumu ir ilgaamžiškumu, ypatingomis elektrinėmis, mechaninėmis bei šiluminėmis savybėmis.

Darbo tikslas:

- Ištirti kompozitų su anglies nanovamzdeliais, $MnFe_2O_4$ ir SiC nanodalelių tarpais dielektrines savybes bei nustatyti jų panaudojimo galimybes elektromagnetinės spinduliuotės slopinimui.

Tyrimo metu siekta išnagrinėti kuo platesnį dažnių spektrą, todėl matavimai buvo atliekami nuo 10 Hz iki 1 MHz (LCR matuokliu), nuo 1 MHz iki 2 GHz (bendraašės linijos metodu) ir nuo 8.5 GHz iki 12.5 GHz (stačiakampiame bangolaidyje).

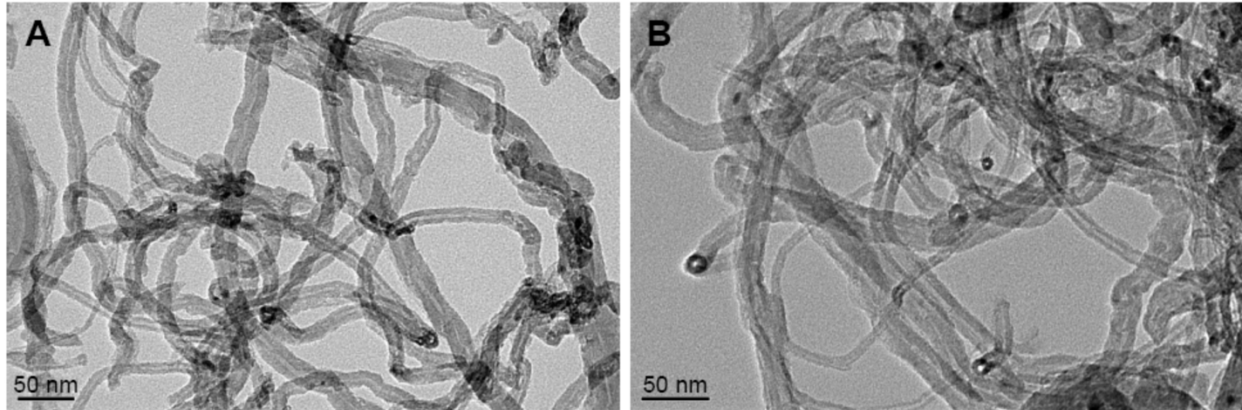
Literatūros apžvalga

Šiame skyriuje aptariama tyrimui aktuali literatūra. Gilinamasi į anglies nanovamzdelių sandarą ir panaudojimą, polimerinės struktūros savybes, dielektrinį spektrą ir jo reiškinius. Aiškinama elektrinės perkoliacijos proceso priežastis bei atsakoma į klausimą, kada medžiaga yra laikoma elektromagnetiškai suderinama su aplinka.

Anglies nanovamzdeliai

Anglis yra vienas svarbiausių cheminių elementų, be kurio turbūt neįsivaizduotumėme šiandienės gyvybės. Dėl medžiagos savybės egzistuoti įvairiose alotropinėse formose, anglies panaudojimas yra didžiulis. Anglis ir šios medžiagos junginiai yra svarbus energijos šaltinis, chemijos pramonės žaliava, elektronikos komponentų pagrindas bei nuolatinių tyrinėjimų objektas. Nanotekstūrinės bei nanomatmenų anglies alotropinės atmainos buvo sukurtos palyginti visai neseniai. Prie nanotekstūrinių medžiagų priskiriama dauguma jau žinomų anglies struktūrų, tokių kaip anglies pluoštas, pirolitinė anglis, stiklo pluošto bet deimanto tipo anglis. Prie nanomatmenų anglies alotropinių atmainų priskiriamos tokios struktūros kaip fulerenas, grafenas bei anglies nanovamzdeliai. Šiuo metu daugiausia dėmesio yra skiriama grafenui bei anglies nanovamzdeliams, nes būtent šios medžiagos yra naudojamos kuriant mažų matmenų struktūras - dirbtinius implantus, įvairius jutiklius, energijos saugojimo sistemas, spinduliavimo šaltinius, elektroninius prietaisus [2] bei laidžius, didelio elastinio modulio ir tempimo stiprumo kompozitus, kurių savybės ir buvo tyrinėjamos šiame darbe.

Anglies nanovamzdelių (ANV) atradimų ir intensyvių tyrinėjimų pradžia yra laikomas devintasis dvidešimto amžiaus dešimtmetis, kai Sumio Ilijima pirmą kartą susintetino grafitinės anglies nanometrinius darinius. Tačiau pirmosios tuščiavidurės nano gyslos buvo aprašytos Rusijos mokslininkų jau penktajame dešimtmetyje, bet dėl šaltojo karo taip ir liko neprieinamos vakarų pasauliui [3]. Anglies nanovamzdeliai komercinėje infrastruktūroje pradėti taikyti palyginti visai neseniai, nuo 2006 metų pasaulinė ANV gamyba eksponentiškai auga, o publikuotų mokslinių straipsnių ir patentų skaičius nepaliaujamai didėja.



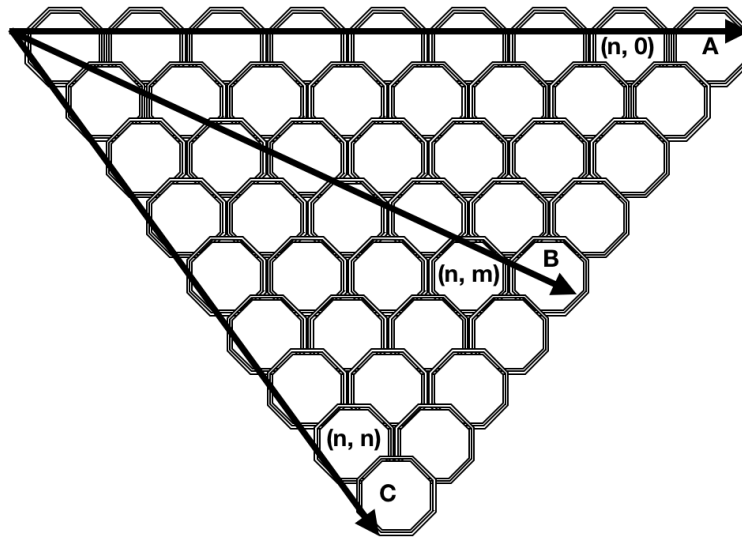
1 pav. Mažesnių nei 50 nm skersmens anglies nanovamzdelių pavyzdys, nuotrauka atlikta pralaidumo elektroniniu mikroskopu (angl. Transmission Electron Microscope, TEM) [3].

ANV yra cilindrinės formos, tuščiaviduriai dariniai - pasižymintys avilio formos struktūra ir turintys atvirus arba uždarus vamzdelio galus. Darinys yra sudarytas iš unikalios anglies atomų nanostruktūros, išsidėsčiusios viename ar keliuose grafeno sluoksniuose ir priklausančios sp^2 hibridizacijai. Anglies atomų tarpusavio geometrija yra aprašoma dviejų tiesiškai nepriklausomų vektorių (U bei V) suma, kur n ir m yra sveikieji skaičiai:

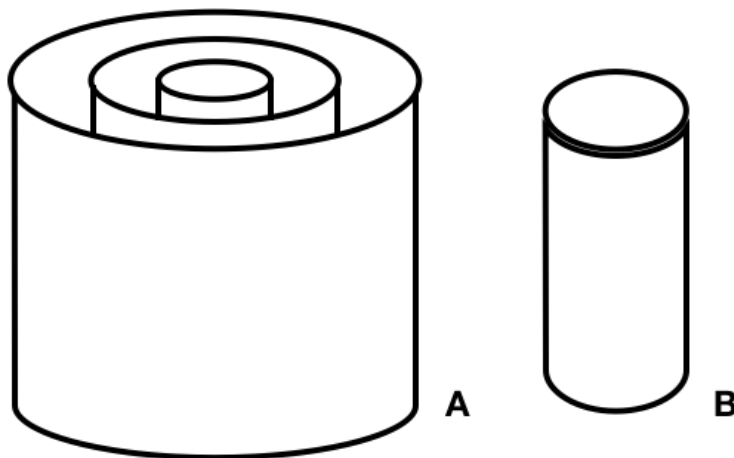
$$(n, m) = n \times U + m \times V . \quad (1)$$

Tad anglies nanovamzdelio sandara gali pasireikšti trimis skirtingomis formomis: „zig-zag“ (*Angl.*), „chiral“ (*Angl.*), bei „armchair“ (*Angl.*). „Zig-zag“ struktūra bus matoma, kai vektoriai išsidėstys atitinkamai $(n, 0)$, „chiral“ - esant (n, m) , o „armchair“ bus stebima esant (n, n) išsidėstymui. Minėtosios formos pavaizduotos žemiau esančiame 2 paveikslėlyje.

Kadangi anglies atomai yra išsidėstę vienoje plokštumoje, ANV medžiagos pasižymi ypač mažomis dimensijomis, jų diametras gali siekti nuo 0.4 nm iki 100 nm, o ilgis daugiau nei milijonus kartų viršyti diametrą. Anglies nanovamzdelių struktūros, pagal grafeno sluoksnių skaičių, gali būti skirstomi į du tipus, vienasienius ir daugiasienius, atvaizduotus 3 paveikslėlyje.



2 pav. Anglies nanovamzdelio galimos sandaros variantai: A – „zig-zag“ (*Angl.*) kai vektoriai $(n, 0)$, B - „chiral“ (*Angl.*), kai vektoriai (n, m) , C - „armchair“ (*Angl.*), kai vektoriai (n, n) .



3 pav. Anglies nanovamzdelių stilizuota struktūra: A - daugiasieniai, B - vienasieniai anglies nanovamzdeliai.

Vienasieniai anglies nanovamzdeliai – VANV (3 pav, a) (*Angl.* - *Single-Walled carbon nanotubes*), kurie yra sudaryti iš vieno grafeno sluoksnio ir pasižymintys ypač mažu skersmeniu - nuo 0.4 nm iki 3 nm. Bei daugiasieniai anglies nanovamzdeliai – DSANV (3 pav, b) (*Angl.* - *Multi-Walled carbon nanotubes*), sudaryti iš kelių ir daugiau grafeno sluoksnių ir turintys nuo 1.4 nm iki

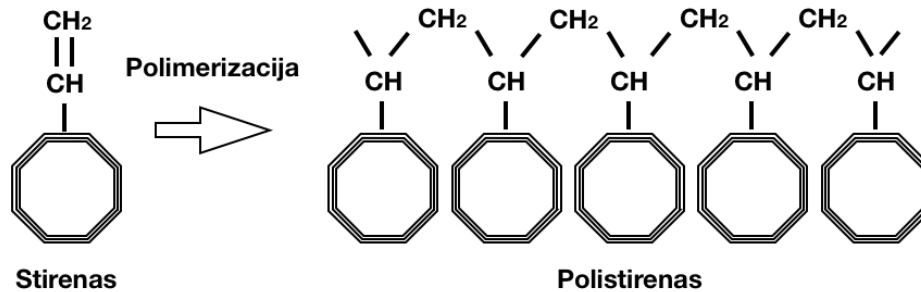
100 nm skersmenį. Mechaninės, elektrinės, optinės ir kitos ANV savybės yra nulemtos medžiagos chiraliteto – t.y. kaip grafeno gardelės yra orientuotos vamzdelio ašies atžvilgiu. Atsižvelgiant į anglies atomų išsidėstymą grafeno sluoksniuose, ANV gali pasižymėti labiau puslaidininkinėmis arba metalinėmis savybėmis - kai kurie nanovamzdeliai labiau tinkami kaip izoliatoriai, o tuo tarpu kiti demonstruoja puikias laidininko savybes ir gali praleisti srovę iki $10^9 A/cm^2$. ANV taip pat yra tvirtos ir ilgaamžės, atsparios aukštos temperatūros poveikiui medžiagos, pasižyminčios geromis mechaninėmis savybėmis - elastinis modulis siekia 1 TPa, tempimo stipris 100 GPa, o šiluminis laidumas gali siekti net $3500 \frac{1}{m K}$.

Būtent aukščiau paminėtos savybės lemia anglies nanovamzdelių panaudojimą įvairiausiose srityse: nuo mažų matmenų elektronikos, medicinos, pramoninių technologijų iki darbe nagrinėto elektromagnetinio suderinamumo sistemų kūrimo.

Polimerinė matrica

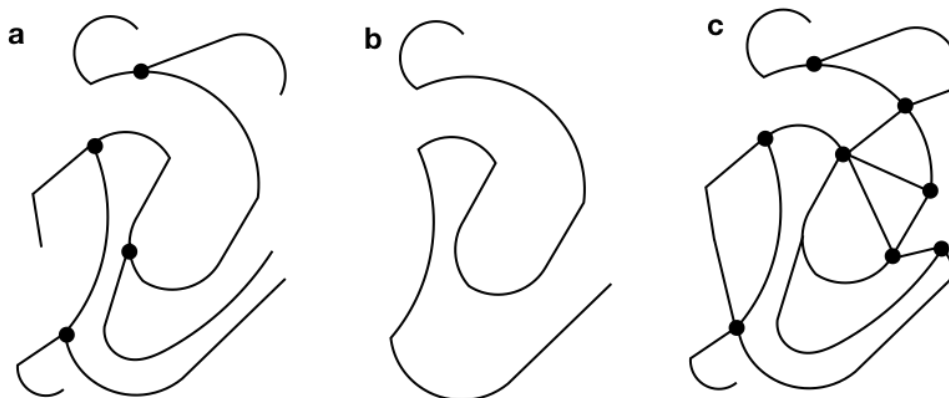
Darbo metu buvo tyrinėti įvairių intarpų turintys epoksidinės dervos polimeriniai kompozitai. Polimeru laikoma makromolekulė, kuri yra sudaryta iš daugybės besikartojančių, smulkesnių darinių - vadinamų monomerais. Monomerų tarpusavio sąveika nulemia sudarytojo polimero savybes, molekulės ilgį bei tai, kokios būsenos bus struktūra: kristalinės, pusiau kristalinės ar amorfinės.

Polimerai pagal savo kilmę gali būti skirstomi į gamtinius bei dirbtinius (arba kitaip – sintetinius) ir yra sudaryti iš organinių cheminių elementų, tokių kaip anglis, deguonis ar vandenilis. Tiek gamtiniai, tiek sintetiniai polimerai susidaro vykstant polimerizacijos procesui. Šios cheminės reakcijos metu daugybė mažų monomero molekulių susijungia į vieną, kovalentiniais ryšiais susijusį tinklą. Vienas paprasčiausių polimerizacijos pavyzdžių yra polistireno atsiradimas, kuomet didelis skaičius stireno monomerų susijungia ir suformuoja aromatinį polimerą (4 paveikslėlis).



4pav. Polimerizacijos proceso pavyzdys - stireno monomerai polimerizuojasi, sukurdami polistireną.

Viena svarbiausių polimerines medžiagas aprašančių savybių makro skalėje yra monomerų tapatumas polimerinėje medžiagoje. Pagal tai polimerus galime skaidyti į tris skirtingas klases: homopolimerus, kopolimerus bei terpolimerus [4]. Homopolimeru laikoma tokia struktūra, kurią sudaro tik vieno tipo besikartojantys monomerai, kopolimerą sudaro du ar daugiau, o terpolimerą – trijų skirtingų tipų monomerų molekulės. Besijungiančių monomerų grandinės ilgis vadinamas polimerizacijos laipsniu ir yra skirtingas kiekvienai polimeriniai medžiagai. Norint palyginti polimerą su kitomis molekulėmis taip pat gali būti naudojama molekulinio svorio sąvoka. Praktikoje dažniausiai naudojami ne pavieniai polimerai, o šių medžiagų junginiai ir mišiniai - plastikai. Pagal polimerinių grandinių išsidėstymą išskiriamos kelios skirtingos morfologinės sandaros, kurios pavaizduos 5 paveikslėlyje. Galime išskirti netvarkių (5pav. a), linijinių (5pav. b) bei sukryžiuotų (5pav. c) polimerų konfigūracijas, kurios atitinkamai skiriasi periodine struktūra, grandinių išsišakojimo laipsniu bei kristaline būsena.



5 pav. Polimerų morfologinė sandara: a – netvarkus, b – linijinis, c – sukryžiuotasis išdėstymas.

Polimeriniai plastikai pagal molekulinis ryšius yra skirstomi į termoreaktyvius ir termoelastinius. Termoreaktyvūs plastikai turi stiprius kovalentinius ryšius ir suvaržytą molekulių grandinių judėjimą, o termoelastiniams priskiriami plastikai su silpnais Van der Vals'o arba vandenilniais ryšiais ir laisvesniu molekulių grandinių judėjimu. Būtent dėl skirtingų molekulių ryšių termoelastiniai plastikai yra pranašesni už termoreaktyvinius ir pasižymi paprastu apdirbimu bei perdirbimui tinkamomis savybėmis – tokias medžiagas lengva pakartotinai išlydyti ir suteikti norimą formą.

Dėl plataus savybių panaudojimo polimeriniai dariniai yra nepakeičiami kasdieniniame mūsų gyvenime ir naudojami įvairių plastmasių, kaučiukų, audinių, jonitų bei dirbtinių žmogaus kūno implantų gamyboje.

Dielektrinis spektras

Eksperimento eigoje tyrinėti įvairūs polimeriniai kompozitai priklauso dielektrinių medžiagų klasei. Dielektrikas turi chaotiškai išsidėsčiusius elektrinius dipolius ir neturi laisvųjų elektronų, todėl dažnai yra nelaidus elektros srovei. Tačiau tokią medžiagą paveikus išoriniu elektriniu lauku, elektronai ir branduoliai nežymiai pasislenka – poliarizuojasi. Taip atsiradę nauji indukuotieji dipoliai, kartu su nuolatiniais, orientuojasi siekdami mažiausio elektrinio lauko poveikio. Fizikinis dydis, nusakantis šio atsako stiprumą, yra vadinamas dielektrine skvarba ir parodo, kaip medžiaga reaguoja į pridėtinį elektrinį lauką.

Bendruoju atveju dielektrinę skvarbą galime aprašyti kaip penkių skirtingų poliarizacinių procesų sumą:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_j + \varepsilon_{or} + \varepsilon_{er} + \varepsilon_d . \quad (2)$$

Aukščiau pateiktoje lygtyje ε_e elektroninė poliarizacija, ε_j – joninė, ε_{or} – orientacinė, ε_{er} – erdvinio krūvio, ε_d – domenų sienelių. Elektroninė poliarizacija egzistuoja visuose dielektrikuose ir yra pagrįsta neigiamų krūvių poslinkiu nuo teigiamų. Elektroninė poliarizacija yra apytiksliai

proporcinga elektronų apvalkalo tūriui, dideli atomai turės didelį elektroninį poliarizuotumą. Joninė poliarizacija stebima joniniuose kristaluose ir apibūdina teigiamų bei neigiamų gardelių išsidėstymą veikiant kintamam elektriniam laukui. Orientacinė poliarizacija apibūdina nuolatinių dipolių orientaciją. Kambario temperatūroje dipolių momentai dažniausiai yra pasiskirstę pagal statistinį pasiskirstymą. Elektrinis laukas generuoja dipolius tam tikra kryptimi, o šiluminis atomų judėjimas priešinasi šiai kryptčiai. Erdvinio krūvio poliarizacija egzistuoja dielektrinėse medžiagose, kurios pasižymi erdviniais krūvio tankio nehomogeniškumais. Erdvinio krūvio poliarizacijos efektai yra svarbūs ne tik puslaidininkiniuose įtaisuose, bet ir keramikuose su elektriškai laidžiais pluoštais bei izoliuojančių pluoštų ribose. Domeninė poliarizacija turi didžiausią įtaką feroelektrinėse medžiagose ir prideda dielektrinį atsaką. Domenų sienelių judėjimas atskiria skirtingai poliarizuotas medžiagos dalis. Veikiant tam tikros krypties laukui, domeninės sritys gali plėstis atitinkamai lauko kryptčiai. Elektroninė bei joninė poliarizacijos vyksta atomų gardelės viduje, todėl yra vadinamos vidinėmis, o domeninė, krūvio bei orientacinė – veikia visą atomų gardelių tinklą, todėl vadinamos išorinėmis [5].

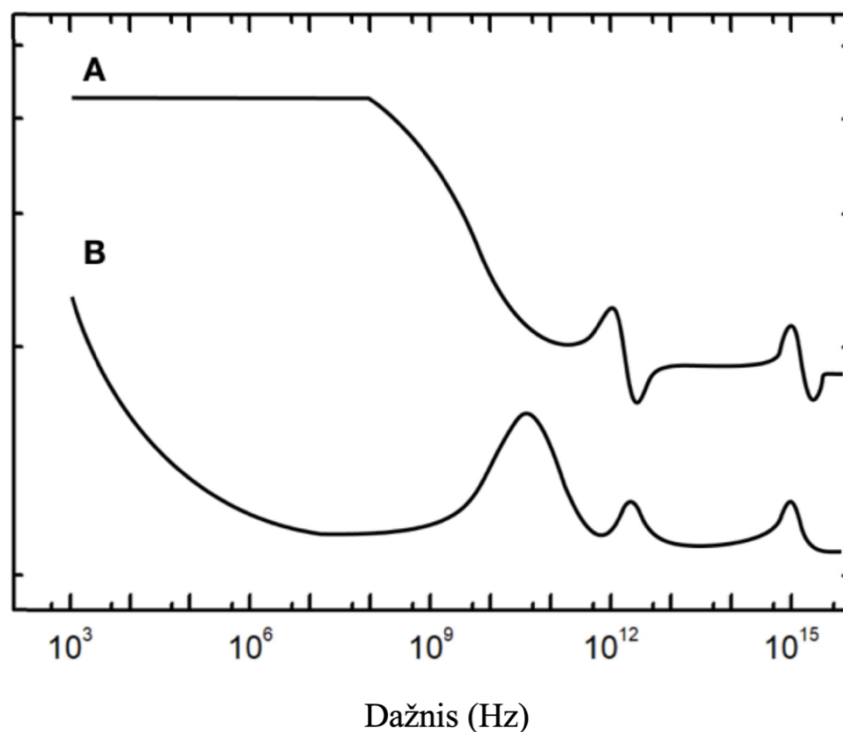
Kiekvienas iš aukščiau paminėtų dielektrinės skvarbos sandų kyla dėl krūvio poslinkio elektriniame lauke, tam tikru metu ir tik prie specifinių dažnių. Aukštuose dažniuose, infraraudonųjų bangų regione, pirmiausia lauko kryptimi pasilenka elektronai, o mažėjant dažniui pradeda judėti ir branduoliai – stebime rezonansinius procesus joninėje bei elektroninėje poliarizacijoje. Mikrobangų diapazone ir toliau žemėjant dažniui pasireiškia (*dipolinė relaksacinė dispersija, o toliau mažėjant dažniui*) laidumo procesų ir dipolių sąveikos sukeltos (*joninę relaksacinę dispersiją*) orientacinės, domeninės bei erdvinio krūvio poliarizacijos procesai. Dielektrinės skvarbos priklausomybė nuo dažnio pavaizduota 6 paveiksle.

Dielektrinės skvarbos sandų pasiskirstymas nulemia medžiagos dielektrinius nuostolius, kuriuos matematiškai galima išreikšti kompleksine dielektrine skvarba:

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'' \quad (3)$$

Dielektriniai nuostoliai gali būti įvertinami dielektrinės skvarbos menamąja dalimi arba dielektrinės skvarbos nuostolių tangentu, išreiškiamu realios bei menamos dalies santykiu:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (4)$$

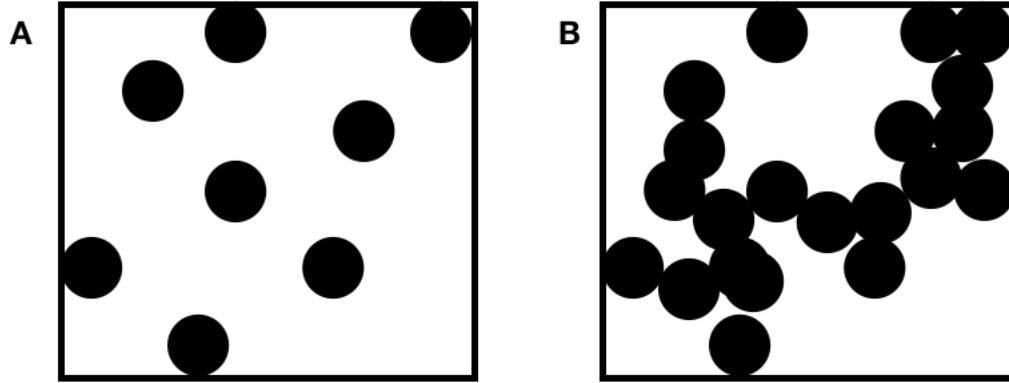


6 pav. Kompleksinės dielektrinės skvarbos priklausomybė nuo dažnio: A – realioji dielektrinės skvarbos dalis, B – menama dielektrinės skvarbos dalis.

Elektrinė perkoliacija

Epoksidinės dervos polimerinio kompozito ir DANV sistemą galime įsivaizduoti kaip dielektriką ir jo tūryje atsitiktine tvarka išsidėsčiusius laidžius, labai mažų matmenų elementus. Tokioje sistemoje elektros srovė galės tekėti tik tarp gretimai esančių laidžių elementų. Jeigu tarpai tarp intarpų išaugs – elektros srovė nebetekės ir kompozitas bus laikomas nelaidžiu izoliatoriumi. Šiuos netvarkiųjų objektų ryšius medžiagoje apibūdina elektrinės perkoliacijos reiškinys bei perkoliacijos sąlyga. Laikant, kad p yra laidžių intarpų koncentracija, galime nusakyti minimalų

tokių elementų kiekį p_c , vadinamą perkoliacijos slenksčiu, kuriam esant elektros srovė galės tekėti bandiniu ir kompozitas iš izoliatoriaus virs laidininku.



7 pav. Perkoliacijos sąlyga: A – laidžių intarpų koncentracija mažesnė už perkoliacijos slenkstį ($p < p_c$), B – laidžių intarpų koncentracija didesnė už perkoliacijos slenkstį ($p > p_c$).

Darbe tyrinėtas kelių komponentų sistemas galime išreikšti kaip didelio laidumo elementus, patalpintus mažo laidumo elementų matricoje. Tuomet efektyvusis laidumas arti perkoliacijos slenksčio p_c gali būti aprašytas [6]:

$$\sigma(p, \omega) \propto \sigma_1 |p - p_c|^t \Phi_{\pm} \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right) |p - p_c|^{-(t+s)}. \quad (5)$$

Aukščiau pateiktoje lygtyje p yra laidžių elementų koncentracija, Φ_{\pm} žymi mastelio keitimo funkciją kai $p > p_c$ $p < p_c$, o s ir t apibūdina kritines eksponentes. Jeigu perkoliacijos sistemą laikytume atsitiktinių rezistorių R ir kondensatorių C su būdinga relaksacijos trukme $\tau = \frac{1}{\omega_0} = RC$, tuomet (5) lygtį arti perkoliacijos slenksčio galėtume išreikšti forma [6]:

$$\sigma(p, \omega) \propto \frac{1}{R} |p - p_c|^t \Phi_{\pm} \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right) |p - p_c|^{-(t+s)}. \quad (6)$$

Vienas iš pagrindinių parametrų, kylančių iš aukščiau pateiktos lygties, yra kritinė plėtimosi trukmė (angl. „Critical time scale“)

$$\tau \propto \frac{1}{\omega_c(p)} \propto \frac{1}{\omega_0} |p - p_c|^{-(t+s)}. \quad (7)$$

Statinės arba nuolatinės (nulinio dažnio) įtampos atveju, kondensatoriai tampa izoliatoriais ir aukščiau aprašytasis varžų modelis tampa laidininko-izoliatoriaus modeliu. Tuomet σ_{DC} laidumo ir užpildo koncentracijos priklausomybė perkoliacijos slenksčio aplinkoje gali būti išreikšta tokiu dėsniu:

$$\sigma_{DC}(p) \propto (p_c - p)^{-s}. \quad (8)$$

Jeigu užpildo koncentracija yra žemiau perkoliacijos slenksčio, tuomet:

$$\sigma_{DC}(p) \propto (p - p_c)^{-t}. \quad (9)$$

Sudėtingesniu, kintamos srovės laidumo atveju turime įskaityti ir dažninę priklausomybę, tuomet realioji dielektrinės skvarbos bei laidumo dedamosios bus išreikštos Bergman - Imry dėsniais [6]:

$$\sigma' \propto \omega^{\frac{t}{t+s}}, \quad (10)$$

$$\varepsilon' \propto \omega^{-\frac{s}{t+s}}. \quad (11)$$

Kur ω nusako dažnį, s ir t apibūdina kritines eksponentes, $p_c > p$ ir kai $p_c < p$, atitinkamai.

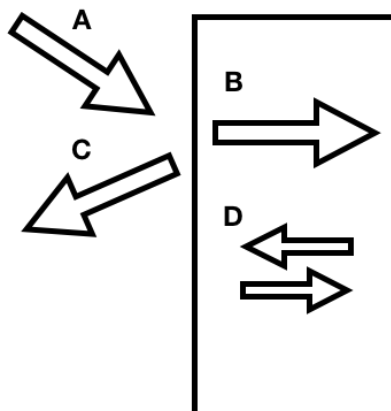
Norint praktikoje pritaikyti epoksidinės dervos polimerinį kompozitą su DANV intarpais, labai svarbu naudoti tokią intarpų koncentraciją, kad perkoliacijos sąlyga būtų patenkinama ir bandinys būtų laidus. Kompozitas virš perkoliacijos slenksčio pasižymės pakankamai didelėmis dielektrinės skvarbos ir elektrinio laidumo vertėmis plačiame dažnių diapazone, įskaitant mikrobangų diapazoną. Keičiant intarpų koncentraciją bei tipą galima sukurti elektromagnetinio suderinamumo sistemą [6].

Elektromagnetinis suderinamumas

Medžiagos, kurtos darbe tyrinėtų laidžių polimerinių kompozitų (*angl. CPC - Conductive Polymer Composites*) pagrindu, gali būti laikomos elektromagnetiškai suderinamomis su aplinka. Medžiaga arba prietaisas bus laikomas elektromagnetiškai suderintu, jeigu neskleis jokios EM spinduliuotės ir nesąveikaus su kitais spinduliuotės šaltiniais. Dėl savo fizikinių savybių, universalumo ir sąlyginai nebrangių gamybos kaštų polimeriniai kompozitai gali būti naudojami elektromagnetinių bangų slopinime, ekranuojant nepageidaujamą spinduliuotę ar padengiant spinduliuotės šaltinį polimerų pagrindu sukurta danga. Gera apsauginė danga turėtų nepraleisti nei įeinančios, nei išeinančios elektromagnetinės spinduliuotės (*angl. EMI – Eelectromagnetic Interference*). EMI sugerties stiprumas apibūdinamas ekranavimo efektyvumu (*angl. SE - shielding effectiveness*), matuojamu logaritminėje skalėje ir yra išreiškiamu decibelais (dB). Laikoma, kad 30 dB ekranavimo efektyvumo vertės danga slopins 99,9 % EM spinduliuotės ir bus tinkama praktiniams pritaikymams.

Elektromagnetinė spinduliuotė medžiagoje ar apsauginėje dangoje yra slopinama veikiant trims procesams: sugerties SE_S , atspindžio SE_A , bei pakartotinio atspindžio SE_M vyksmui (8 pav.). Bendras slopinimo stiprumas gali būti išreikštas šių trijų veiksmių suma [7]:

$$SE_T = SE_S + SE_A + SE_M. \quad (12)$$



8 pav. Elektromagnetinė spinduliuotė sugerties procesas: A – krintanti EM banga, B - sugerties procesas SE_S , B – atspindžio procesas SE_A , C - pakartotinio atspindžio SE_M procesas.

Homogeniškai laidžioje medžiagoje, pavyzdžiui metale, didžiausią įtaką slopinimui turės atspindžio proceso dedamoji. Tokia medžiaga pasižymi dideliu impedanso skirtumu su aplinka, būtent dėl šio skirtumo beveik visa krintanti EM banga bus atspindėta, o SE_A veiksnys gali būti išreikštas [7]:

$$SE_A = 10 \log_{10} \left(\frac{\sigma}{16 \mu' \omega \varepsilon_0} \right). \quad (13)$$

Aukščiau pateiktoje lygtyje μ' yra magnetinė-skvarba ir ji bus lygi vienetui jeigu medžiaga neturi magnetinių dipolių, ω – dažnis, o ε_0 – vakuumo dielektrinė skvarba. Kuriant elektromagnetinės spinduliuotės sugerties dangas atspindžių efektas (SE_A) nėra pageidaujamas. Kiekvienas papildomas atspindys didina EM spinduliuotės foną bei EM triukšmą, tad siekiama kiek įmanoma labiau sumažinti šio proceso įtaką. Norima, kad pagrindinis EM spinduliuotės slopinimo veiksnys būtų sugertis (SE_S). Dielektrinėse medžiagose elektrinių ar magnetinių dipolių sąveika su krentančia EM banga sumažina impedanso skirtumus ir sustiprina sugerties procesą (sutrumpinat sugerties gylį). Didžioji dalis EM spinduliuotės tampa sugerta, o ne atspindėta. Tokiu atveju SE_S gali būti išreikšta:

$$SE_S = \frac{20t}{\delta} \log_{10}(e) = 8,68 \frac{t}{\delta}. \quad (14)$$

Lygtyje δ – sugerties gylis (*angl. SD – skin depth*), apibūdinantis bangos įveiktą atstumą medžiagoje, kol prarandama $\frac{1}{e}$ energijos. Taip pat sugerties gylis gali būti išreikštas:

$$\delta = \left(\frac{2}{\mu' \omega \varepsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (15)$$

Nehomogeniškos struktūros polimerinių kompozitų atveju, jeigu medžiagos storis yra didesnis už sugerties gylį, pasikartojančių atspindžių įtaką galime atmesti. Tokiu atveju dėl efektyvios pasikartojančių atspindžių antrinės sugerties juos galime tiesiog ignoruoti ir bendrą EM bangų slopinimo stiprumą išreikšti SE_S bei SE_A suma:

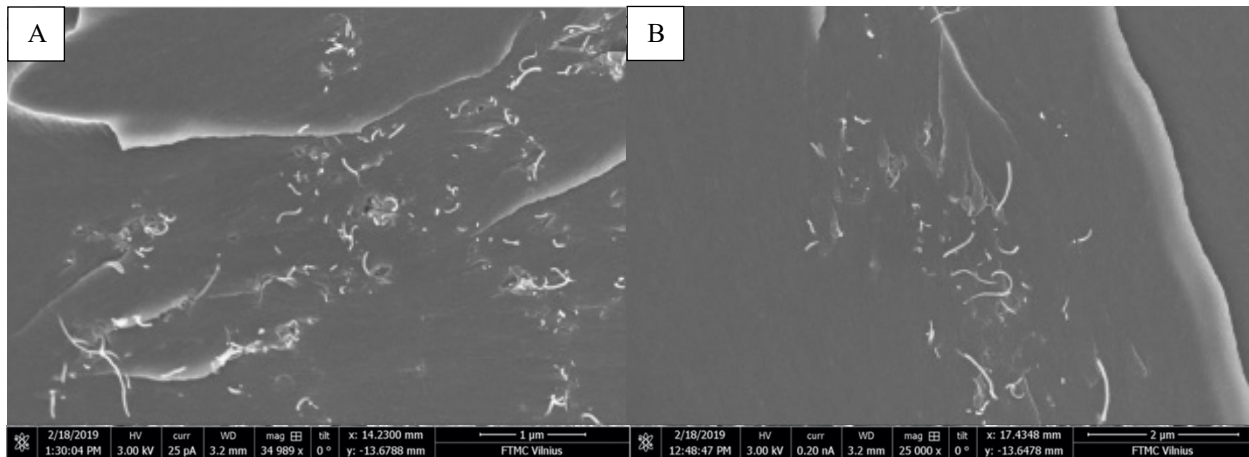
$$SE_T = SE_S + SE_A. \quad (16)$$

Tyrimo metodika

Tyrimo metu siekta išnagrinėti kuo platesnį dažnių spektrą, todėl matavimai buvo atliekami nuo 10 Hz iki 1 MHz (LCR matuokliu), nuo 1 MHz iki 2 GHz (bendraašės linijos metodu) ir nuo 8.5 GHz iki 12.5 GHz (stačiakampiam bangolaidyje). Šiame skyriuje bus trumpai aptariama matavimo metodika žemų, vidutinių bei aukštų dažnių ruožuose.

Kompozitų su DANV ir $MnFe_2O_4$ intarpais gavimas

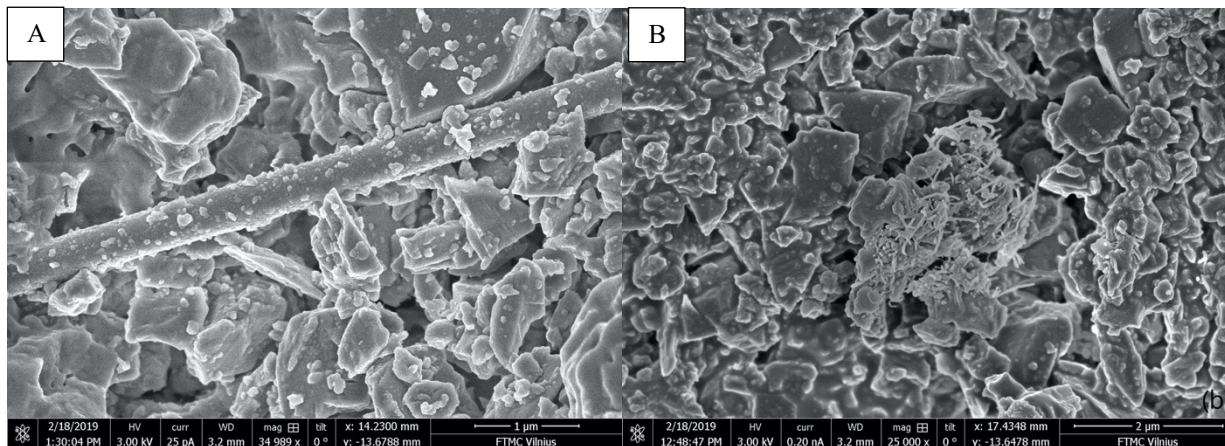
Visų pirma buvo paruoštas DANV ir epoksidinės dervos polimero tirpalas, DANV auginami pasitelkus cheminio nugarinimo depozicijos metodą (angl. „Chemical vapor deposition“), apibūdintą [8]. Susintetinti DANV buvo išsklaidyti etanolio tirpale, tuomet DANV buvo papildomai sklaidomi izopropanolio alkoholyje veikiant ultragarsu apie vieną valandą. Gautas mišinys sumaišytas su komerciškai prieinama epoksidine derva [9] ir dar kartą paveiktas ultragarsu dvi valandas 80 °C temperatūroje, kai ultragarso galia buvo 80 W. Toliau siekiant sukurti skirtingų koncentracijų $MnFe_2O_4$ intarpus, $MnFe_2O_4$ dalelės buvo atskirai išsklaidytos etanolio tirpale, tuomet tirpalas taip pat papildomai sklaidomas veikiant ultragarsu izopropanolio alkoholyje vieną valandą. Gautas mišinys sumaišytas su DANV/epoksidinės dervos tirpalu, paveiktas ultragarsu dvi valandas ir paliktas 50 °C temperatūroje keletai dienų, kad etanolis galėtų visiškai išgaruoti. Skenuojančio elektroniniu mikroskopu atliktos bandinių nuotraukos pateiktos 9 paveikslėlyje.



9 pav. Skanuojančio elektroniniu mikroskopu atliktos bandinių nuotraukos, (a) – DANV (tūrinė koncentracija yra 0.09 %) ir 0.025 % $MnFe_2O_4$ dalelių kompozitas, (b) – ir 0.65 % $MnFe_2O_4$ užpildo kompozitas.

Kompozitų su DANV ir SiC intarpais gavimas

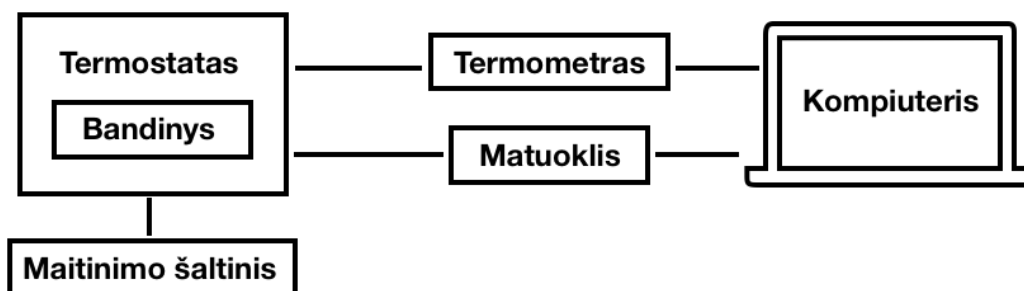
Keramikų paruošime buvo naudoti komerciškai prieinami SiC junginiai, kurių diametras pasižymėjo 2,5 mikrometrais, o vidutinis ilgis neviršijo 50-80 mikrometrų. Aliuminio fosfato keramiko matrica gaminta iš dviejų komponentų: homogeninio užpildo Al_2O_3 ir AlN dalelių, su masės santykiu $m(Al_2O_3):m(AlN) = 9:1$. Aliuminio hidroksidas, praskiestas fosforo rūgštyje, buvo naudotas kaip rišančioji medžiaga, molinis santykis tarp H_3PO_4 ir $Al(OH)_3$ lygus 3. Rišančioji medžiaga buvo sumaišyta su užpildu ir suformuotos 10 mm diametro, 1 mm ir 2 mm pločio tabletės. Po 24 valandų bandiniai buvo kaitinami iki 300 C temperatūros. DANV auginami pasitelkus cheminio nugarinimo depozicijos metodą (angl. „Chemical vapor deposition“), apibūdintą [8]. Galutinio bandinio paruošime komerciškai prieinama SiC [10] bei DANV buvo maišomi formuojant skirtingos tūrinės koncentracijos (nuo 0,025 % iki 10 %) SiC tarpų bei skirtingų DANV užpildo (0,5 % iki 2 % dalelių tūryje) keramikas. Skanuojančio elektroniniu mikroskopu atliktos bandinių nuotraukos pateiktos 10 paveikslėlyje.



10 pav. Skanuojančio elektroniniu mikroskopu atliktos bandinių nuotraukos, (a) – DANV ir 10 % tūrinės koncentracijos SiC kompozitas, (b) – gryno DANV užpildo kompozitas.

Matavimai 20 Hz – 1 MHz dažnių ruože

Atliekant tyrimą žemų dažnių diapazonu buvo laikoma 20 Hz – 1 MHz dažnių spektro juosta. Minėtoje juostoje buvo atlikti bandinių talpos C ir nuostolių tangento $\text{tg}\delta$ matavimai LCR HP4284 matuokliu [11]. LCR matavimo prietaisas, kurio blokinė matavimo schema pavaizduota 7 paveikslėlyje, yra skirtas matuoti bandinio ar grandinės komponento laidumą, talpą bei varžą. Prietaiso veikimas pagrįstas impedanso arba kompleksinės grandinės varžos skaičiavimu, kuris apibūdina bandinio pasipriešinimą kintamajai elektros srovei. Impedanso sąvoka naudojama kintamosios srovės grandinėse, kuomet apibūdinamas ne tik santykis tarp įtampos ir srovės, bet ir šių dydžių tarpusavyje susijusios fazės. Kai grandinė prijungta prie nuolatinės srovės, nėra jokio skirtumo tarp bandinio varžos ir impedanso, nuolatinės srovės varžą galime laikyti impedansu su nuline faze.



11 pav. Tyrimo 20 Hz – 1 MHz dažnių ruože struktūrinė schema.

Eksperimento eigoje buvo paruoštas reikalingų matmenų bandinys, išmatuotas paviršiaus plotas bei komponento aukštis. Efektyvusis plotas padengtas sidabro pasta, taip sukuriant kontaktus tarp priešingų bandinio pusių. Atlikus pasiruošimą bandinys patalpintas į termostatą, kuriame ir buvo atlikti matavimai. Kompleksinė dielektrinė skvarba gauta iš matuotosios talpos C ir apskaičiuota pagal plokščiojo kondensatoriaus formules:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}, \quad (17)$$

$$C_S - C_0 = \frac{\varepsilon_0 S}{d} (\varepsilon - 1). \quad (18)$$

Aukščiau pateiktose formulėse C_0 yra sistemos talpa be bandinio, C_S – sistemos talpa su bandiniu, d – bandinio aukštis, S – efektyvusis bandinio paviršius. Iš anksčiau minėto nuostoliu kampo apibrėžimo galime rasti kompleksinės dielektrinės skvarbos realia bei menamąją dedamąsias:

$$tg\delta = \frac{C'_{CSS}tg\delta_{SS} - C_{C0}tg\delta_0}{C'_{CSS} - C_{C0}} + 1, \quad (19)$$

$$\varepsilon' = \frac{(C'_{CSS} - C_{C0})d}{\varepsilon_0 S_S} + 1, \quad (20)$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \left(\frac{C_S tg\delta_S - C_0 tg\delta_0}{C_S - C_0} \right). \quad (21)$$

Formulėse C'_{CSS} sistemos talpa su bandiniu, $tg\delta_{SS}$ – nuostolių tangentas sistemoje su bandiniu, C_{C0} bei $tg\delta_0$ atitinka talpą bei nuostolių tangentą kai sistema yra be bandinio, o S_S – išreiškia kompozito vieno kontaktinio paviršiaus plotą.

Kontaktų, jungiamųjų laidų varža bei induktyvumas nebuvo skaičiuojami, kadangi matavimų dažnis neviršija 1 MHz. Matavimai buvo atliekami dviem etapais. Iš pradžių stebėtas dielektrinės skvarbos bei nuostolių tangento kitimas kambario temperatūroje. Vėliau matavimai kartoti prie skirtingų temperatūrų bandinį šaldant skystu heliu ir kaitinant termoporoje. Temperatūra buvo mažinama bei didinama pastoviu intervalu 1 K / min ir matuota termovarža.

Matavimai 1 MHz – 3 GHz dažnių ruože

Atliekant tyrimą vidutinių dažnių diapazonu laikyta 1 MHz – 3 GHz dažnių spektro juosta. Šiame ruože bendraašės linijos metodu bei E8363 vektoriniu analizatoriumi [12] išmatuotas skersinės EM bangos kompleksinis atspindžio koeficientas, iš kurio vėliau apskaičiuota dielektrinė skvarba. Svarbu pabrėžti, kad bendraašė linija yra plačiajuostė radijo signalų sistema, kurioje galime atlikti matavimus nuo itin žemų iki itin aukštų dažnių. Tačiau tam, kad sužadinus rezonatorių nusistovėtų skersinė elektromagnetinės bangos moda (TEM), turi būti išpildyta žemiau pateikta sąlyga [13]:

$$\lambda_{00} > \pi(r_3 + r_4). \quad (22)$$

Aukščiau pateiktoje lygtyje r_3 ir r_4 - vidinio ir išorinio bendraašės linijos kondensatoriaus spinduliai, o λ_{00} yra generuojamų elektromagnetinių bangų ilgis.

Kadangi matavimai buvo atliekami aukštesniuose nei 1 MHz dažniuose yra privaloma atsižvelgti į sistemos nehomogeniškumą. Rezultatų iškraipymai gali būti įvertinti naudojantis skaitmeniniu duomenų apdorojimu, analizuojant šešių jungčių informaciją tarp kondensatoriaus bei išvestinės plokštumos kontaktų. Tiesinių aštuonių jungčių sistema gali būti aprašyta kaip kompleksinių koeficientų U sklaidos matrica:

$$U_{ri} = \frac{b_r}{a_i}. \quad (23)$$

Gautoji matrica apibūtinama atspindėto signalo b_r nuo įeinančio signalo a_i įėjimo taške i. Tokios sistemos indikatorius apibūdina atspindžio faktorių R_M , santykį tarp išeinančių ir matuojamo signalo tam tikrame taške:

$$R_M = \frac{b_3}{b_4}. \quad (24)$$

Kur b_3 ir b_4 apibūdina santykį tarp atraminio bei išeinančio signalo atitinkamai. Idealių sistemų atveju atspindžio faktorių apibūdina formulė:

$$R_M = \frac{U_{12}U_{31}}{P_{42}} R = O_k R. \quad (25)$$

kur koeficientas O_k gali būti randamas iš spektrometro kalibravimo duomenų, kai trumpiklio vertė $R = -1$.

Bendroju atveju turime išspręsti tiesinių lygčių sistemą [13]:

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} \times \|U\| = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix}. \quad (26)$$

Žinodami, kad $a_1 = R_1 b_1$ galime rasti sąryšį tarp išmatuoto atspindžio faktoriaus R_M ir atspindžio koeficiento R .

$$R_M^* = \frac{o_{k1}R^* + o_{k2}}{o_{k3}R^* + 1}. \quad (27)$$

Pateiktoje lygtyje koeficientai o_{k1}, o_{k2}, o_{k3} susideda iš sandaugų ir sumų sklaidos matricos $U_{\gamma i}$ elementų bei atspindžio faktorių R_3, R_4 . Eksperimento eigoje minėtieji koeficientai yra nustatomi kiekviename dažnyje, išmatuojant kalibracinių bandinių elektromagnetinės bangos atspindį – kai grandinė yra užtrumpinta, atvira bei su suderintąja apkrova. Tuomet, naudojantis aukščiau pateikta lygtimi, kiekvienam bandiniui gaunama tiesinių lygčių sistema iš kurios nustatomi koeficientai k_1, k_2, k_3 .

Eksperimento eigoje buvo paruoštas reikalingų matmenų cilindrinis bandinys, išmatuotas paviršiaus plotas bei komponento aukštis. Bandinio priešingos pusės buvo padengtos sidabro pasta, taip sukuriant kontaktus. Atliekant matavimus, bandinys patalpintas bendraašės linijos pabaigoje, tarp trumpo stūmoklio bei vidinio laidininko – taip suformuojant kondensatorių. Bandinio dielektrinės skvarbos dažninė priklausomybė yra apskaičiuojama iš bendraašės linijos skersinės elektromagnetinės bangos modos atspindžio koeficiento, kuris aprašomas žemiau pateikta formule:

$$R^* = \frac{Z_{SS}^* - Z_0}{Z_{SS}^* + Z_0}. \quad (28)$$

Lygtyje Z_0 apibūdina plačiajuostės sistemos impedansą, o Z_{SS}^* - matuojamojo kondensatoriaus impedansą.

Žinome, kad kompleksinė plokščiojo kondensatoriaus talpa C_C^* gali būti užrašyta kaip realios bei menamos talpos suma:

$$C_C^* = C_C' - iC_C'' . \quad (29)$$

O kompleksinės talpos sąryšis su kompleksine dielektrine skvarba iš 19 formulės gali būti išreikštas:

$$\varepsilon' - i\varepsilon'' = \frac{d}{\varepsilon_0 S_s} (C_C' - iC_C'') + 1. \quad (30)$$

Kompleksinio sistemos impedanso Z_{SS} bei kompleksinės talpos C_C priklausomybė pateikta:

$$Z_{SS} = \frac{1}{\omega(C_C' - iC_C'')} . \quad (31)$$

Taigi iš viršuje pateiktų formulių galime teigti, kad reali bei menamoji kompleksinės dielektrinės skvarbos dedamosios bus:

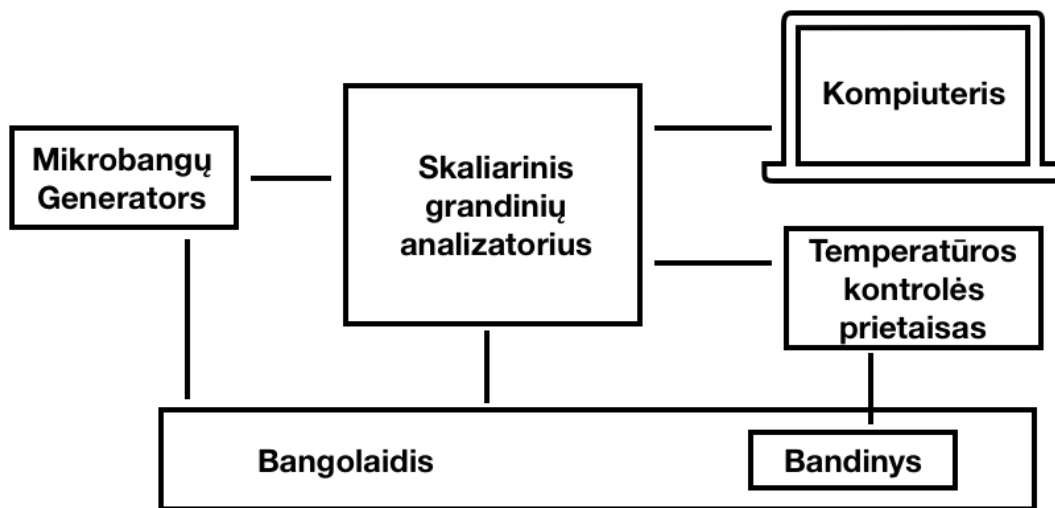
$$\varepsilon' = \frac{d}{\varepsilon_0 S_s} \left(\frac{-2R \sin \varphi}{\omega Z_0 (1 + 2R \cos \varphi + R^2)} - C_{C0} \right) + 1, \quad (32)$$

$$\varepsilon'' = \frac{d}{\varepsilon_0 S_s} \left(\frac{1 - R^2}{\omega Z_0 (1 + 2R \cos \varphi + R^2)} \right). \quad (33)$$

Matavimai 8 GHz – 12 GHz dažnių ruože

Tyrinėjant kompleksinės dielektrinės skvarbos spektrą, aukštų dažnių sritimi buvo laikomas centimetrinių ir milimetrinių bangų ruožas – 8 GHz – 12 GHz. Eksperimento metu stačiakampiame bangolaidyje buvo matuotas bandinio elektromagnetinės bangos atspindžio koeficientas - R bei pralaidumo koeficientas - T .

Atspindžio bei pralaidumo modulių priklausomybė nuo dažnio tyrinėta visame 5 GHz pločio spektre, pasirinkus kelis šimtus atskaitos taškų. Nagrinėjamo aukšto dažnio spektro plotis priklauso nuo mikrobangų generatoriaus spinduliuojamo spektro pločio ir pačio bangolaidžio sienelių pločio. Eksperimento eigoje buvo paruoštas reikalingų matmenų cilindro formos bandinys, išmatuotas paviršiaus plotas, gylis bei efektyvusis spindulys. Paviršiaus plotas bandinio galuose buvo padengtas sidabro pasta, taip sukuriant kontaktus tarp bandinio ir bangolaidžio. Atlikus pasiruošimą bandinys patalpintas į cilindrinę įpjovą laikiklyje. Laikiklis vėliau patalpintas metalinio bangolaidžio centre, lygiagrečiai pagrindinei elektrinio lauko modai TE_{10} . Atspindžio, pralaidumo bei galios matavimai atlikti naudojantis generatoriumi su kintančio dažnio šaltiniu - ГКЧ-61. Gauti matavimo rezultatai įvesti ir toliau skaitmeniškai apdoroti kompiuteriu. Bangolaidžio kalibravimui buvo naudoti du papildomi laikikliai, visiškai praleidžiantys bei slopinantys plokštelės elektromagnetinę bangą. Automatinio dielektrinio spektrometro supaprastinta matavimo schema pavaizduota 8 paveikslėlyje.



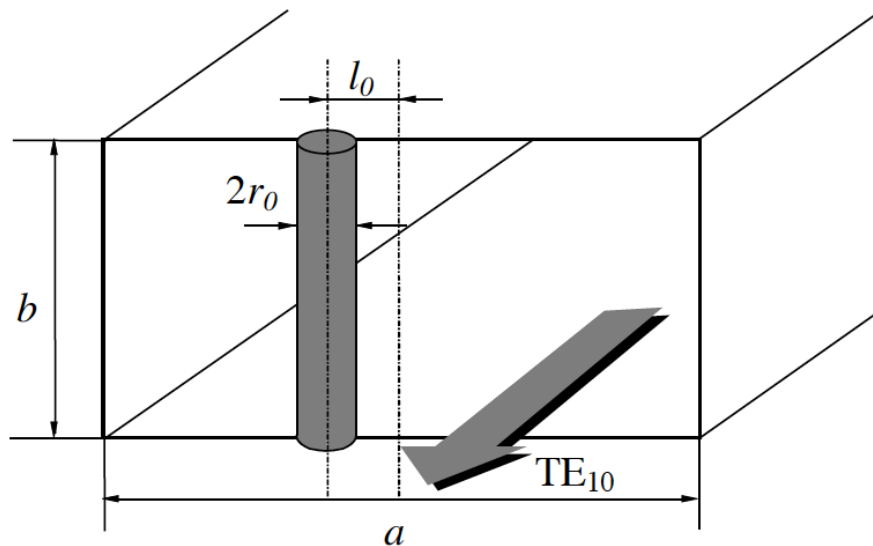
12 pav. Tyrimo 8 GHz – 12 GHz dažnių ruože supaprastinta blokinė schema.

Elektromagnetinių bangų sklidimas bangolaidyje gali būti apibūdinamas atspindžio R^* bei pralaidumo Δ kompleksiniais koeficientais, kurie priklauso nuo daugybės parametrų: mikrobangų dažnio, bangolaidžio fizinių matmenų, kompleksinės dielektrinės skvarbos ir pačio bandinio efektinio spindulio. Todėl kompleksinė dielektrinė skvarba gali būti išreikšta kaip netiesinė kompleksinio atspindžio R^* arba atspindžio ir pralaidumo koeficientų sąryšiu forma Δ , kur J_0, J_1 yra Beselio, $H_0^{(2)}, H_1$ – Hankelio funkcijos, $\beta_0 = k_0(\varepsilon)^{1/2}$, o a – bangolaidžio sienelės plotis [14]:

$$R^* = \frac{4(\varepsilon^* - 1)J_1(\beta_0)}{\pi\Delta_1\sqrt{\left(\frac{2a}{\lambda_{00}}\right)^2 - 1}}, \quad (34)$$

$$\Delta_1 = \varepsilon^* J_1(\beta_0) \left[H_0^{(2)}(\alpha_0) \right] + 2 \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m H_0^{(2)}\left(\frac{2\pi m a}{\lambda_{00}}\right) - \sqrt{\varepsilon^*} J_0(\beta_0) H_1(\alpha_0). \quad (35)$$

Matavimų metu cilindrinės formos bandinys buvo patalpintas mažu atstumu l_0 nuo bangolaidžio platesnės sienelės centro, taip kad sudarytų devyniasdešimties laipsnių kampą su elektrinio lauko modai TE_{10} , pavyzdys pateiktas 9 paveiksle.



13 pav. Plono cilindro stačiakampyje bangolaidyje schema [14].

Kuomet bandinio plotis yra pakankamai mažas ir galioja žemiau pateikta sąlyga:

$$\alpha_0 = \frac{2\pi r}{\lambda_{00}} \ll 1. \quad (36)$$

Viršuje pateikta formulė apibūdina scenarijų, kai bandinys patalpintas sienelės centre. Jeigu įskaitysime bandinio poslinkį nuo bangolaidžio centrinės ašies l_0 , tuomet kompleksinio atspindžio koeficiento išraiška bus:

$$R^* = \frac{4\sqrt{\varepsilon^*} \cos \frac{2\pi l_0}{\alpha} J_1(\beta_0)}{\pi \Delta_1 \sqrt{\left(\frac{2a}{\lambda_{00}}\right)^2 - 1} \Delta_2}, \quad (37)$$

$$\begin{aligned} \Delta_2 = & -\sqrt{\varepsilon^*} J'_1(\beta_0) [H_0^{(2)}(\alpha_0) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m H_0^{(2)}\left(\frac{2\pi m a}{\lambda_{00}}\right) - \sum_{m=0}^{\infty} H_0^{(2)}[(2m+1)\alpha + \\ & 2l_0] \left(\frac{2\pi}{\lambda_{00}}\right) - \sum_{m=0}^{\infty} H_0^{(2)}[(2m+1)\alpha - 2l_0] \left(\frac{2\pi}{\lambda_{00}}\right) - J_0(\beta_0) H_1^{(2)}(\alpha_0)]. \end{aligned} \quad (38)$$

Jeigu bandinio efektyvusis spindulys viršija minėtąją sąlygą (36) ir yra didesnis negu vienetas, tuomet kompleksinio atspindžio koeficientas apibūdinamas šiek tiek sudėtingesne išraiška:

$$R^* = \frac{4(\varepsilon^* - 1)}{\pi \Delta_1 \sqrt{\left(\frac{2a}{\lambda_{00}}\right)^2 - 1}} \left[\frac{J_1(\beta_0)}{\Delta_1} + \frac{\alpha_0 J_2(\beta_0)}{\Delta_3} \right], \quad (39)$$

$$\Delta_3 = -\sqrt{\varepsilon^*} J'_1(\beta_0) \left[H_1^{(2)}(\alpha_0) \sum_{m=1}^{\infty} \lambda_{00} \frac{(-1)^m}{\pi m a} H_0^{(2)}\left(\frac{2\pi m a}{\lambda_{00}}\right) - \varepsilon^* J'_1(\beta_0) H_1(\alpha_0) \right]. \quad (40)$$

Rezultatai ir jų aptarimas

Šiame darbe buvo tiriami epoksidinės dervos polimeriniai kompozitai su fiksuotos tūrinės koncentracijos DANV intarpais ir skirtingomis MnFe_2O_4 apvalių nanodalelių koncentracijomis. Magnetinių nanodalelių kiekis bandiniuose svyravo nuo 0,025 % iki 0,65 % dalelių tūryje, o DANV koncentracija kito nuo 0,09 % iki 0,58 %. Antrame etape tyrėme aliuminio fosfato su DANV ir SiC intarpų turinčiais keramikus. SiC intarpų kiekis bandiniuose siekė nuo 0,5 % iki 10 %, o DANV koncentracija kito nuo 0,5 % iki 2 % dalelių tūryje. Atlikus matavimus nustatyta, kaip nanodalelių intarpų koncentracija bandinyje keičia dielektrinių parametrų: santykinės dielektrinės skvarbos bei elektrinio laidumo priklausomybę nuo dažnio ir temperatūros. Tyrimo metu siekta išnagrinėti kuo platesnį dažnių spektrą, todėl dažninė priklausomybė buvo matuota trimis skirtingais etapais: LCR HP4284 matuokliu žemų dažnių srityje (nuo 10 Hz iki 1 MHz), bendraašės linijos metodu su E8363 vektoriniu analizatoriumi (nuo 1 MHz iki 2 GHz) ir analizuojant elektromagnetinės bangos atspindį stačiakampiame bangolaidyje aukštų dažnių diapazone (nuo 8,5 GHz iki 12,5 GHz). Temperatūrinė priklausomybė stebėta keliant bandinių su MnFe_2O_4 nanodalelių intarpais temperatūrą iki 502 K bei šaldant kompozitus su 0,025 %, 0,05 %, 0,35 %, 0,65 % MnFe_2O_4 ir 10% SiC iki 30 K temperatūros. Tiriant kompozitų su MnFe_2O_4 nanodalelėmis elektrinio laidumo nuolatiniame elektriniame lauke temperatūrinę priklausomybę naudojome 0,09 % bei 0,58 %, o kambario temperatūroje nagrinėjome 0,35 % DANV tūrinės koncentracijos kompozitus. Dėl nevienodų matavimo metodų buvo paruošti skirtingų matmenų mėginiai, kurių storis svyravo nuo 0,7 mm iki 1,4 mm, o efektyvus plotas kito nuo 9 mm² iki 16 mm². Mėginiai buvo cilindrinės formos, o jų viršutinė ir apatinė pusės buvo padengtos sidabro pasta, taip sukuriant kontaktus tarp priešingų bandinio pusių. Tyrimo metu gautos MnFe_2O_4 polimerinių kompozitų elektromagnetinio spektro sugerties savybės buvo lyginamos su aliuminio fosfato su DANV ir SiC intarpų turinčiais keramikais. Toliau pateikiamos realios bei menamos dielektrinės skvarbos, laidumo priklausomybės nuo dažnio, temperatūros ir intarpų koncentracijos.

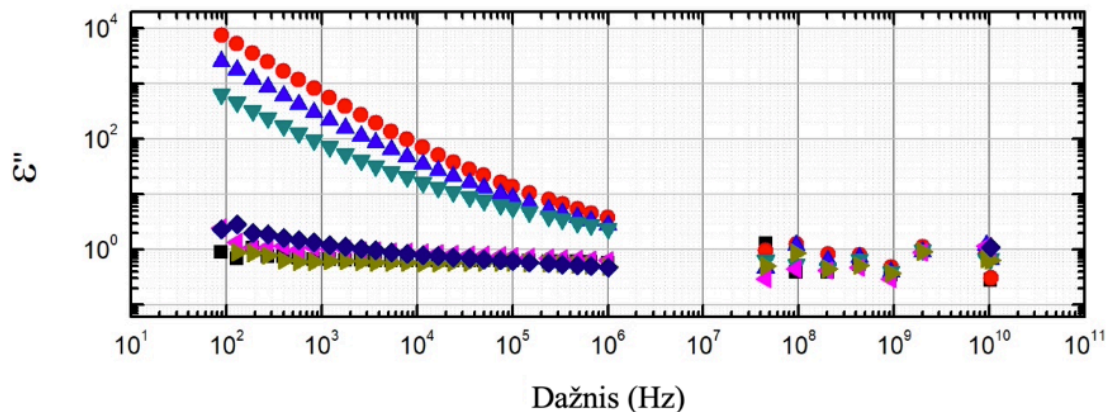
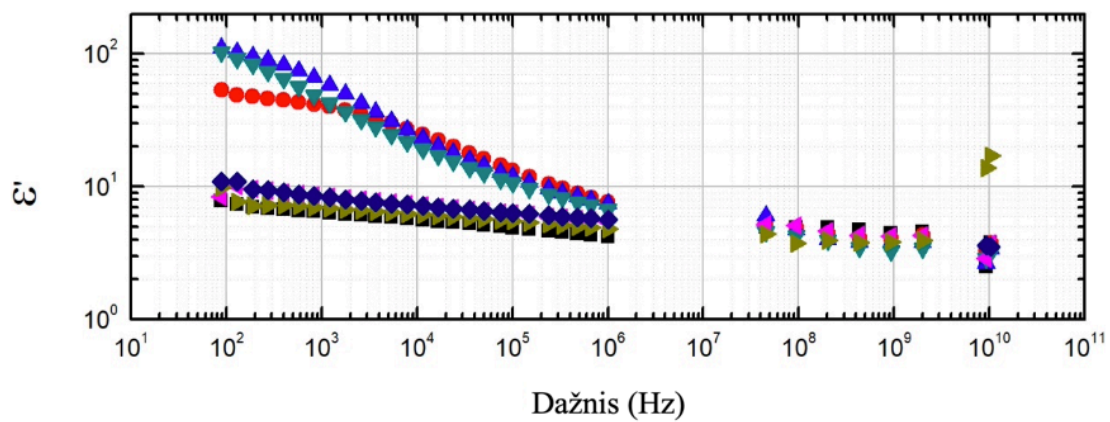
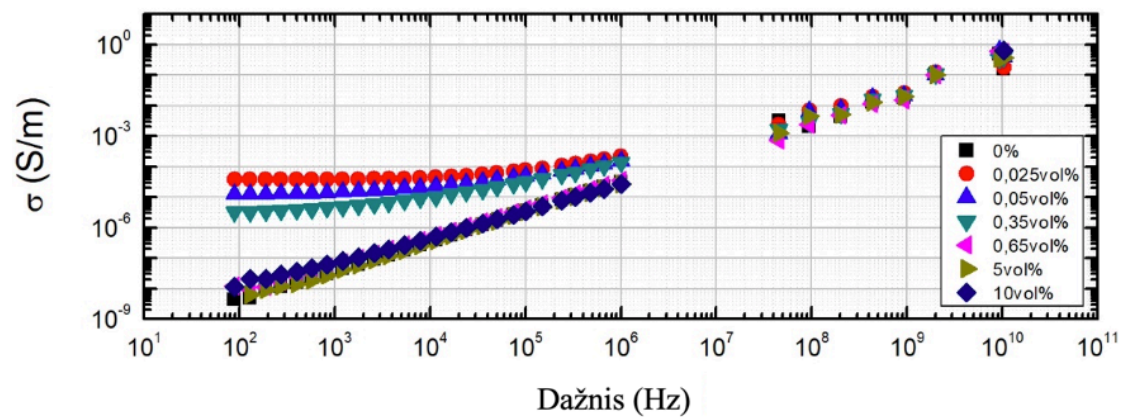
Kompozitų dielektrinių savybių tyrimas kambario temperatūroje

DANV kompozitai su skirtingomis MnFe₂O₄ koncentracijomis

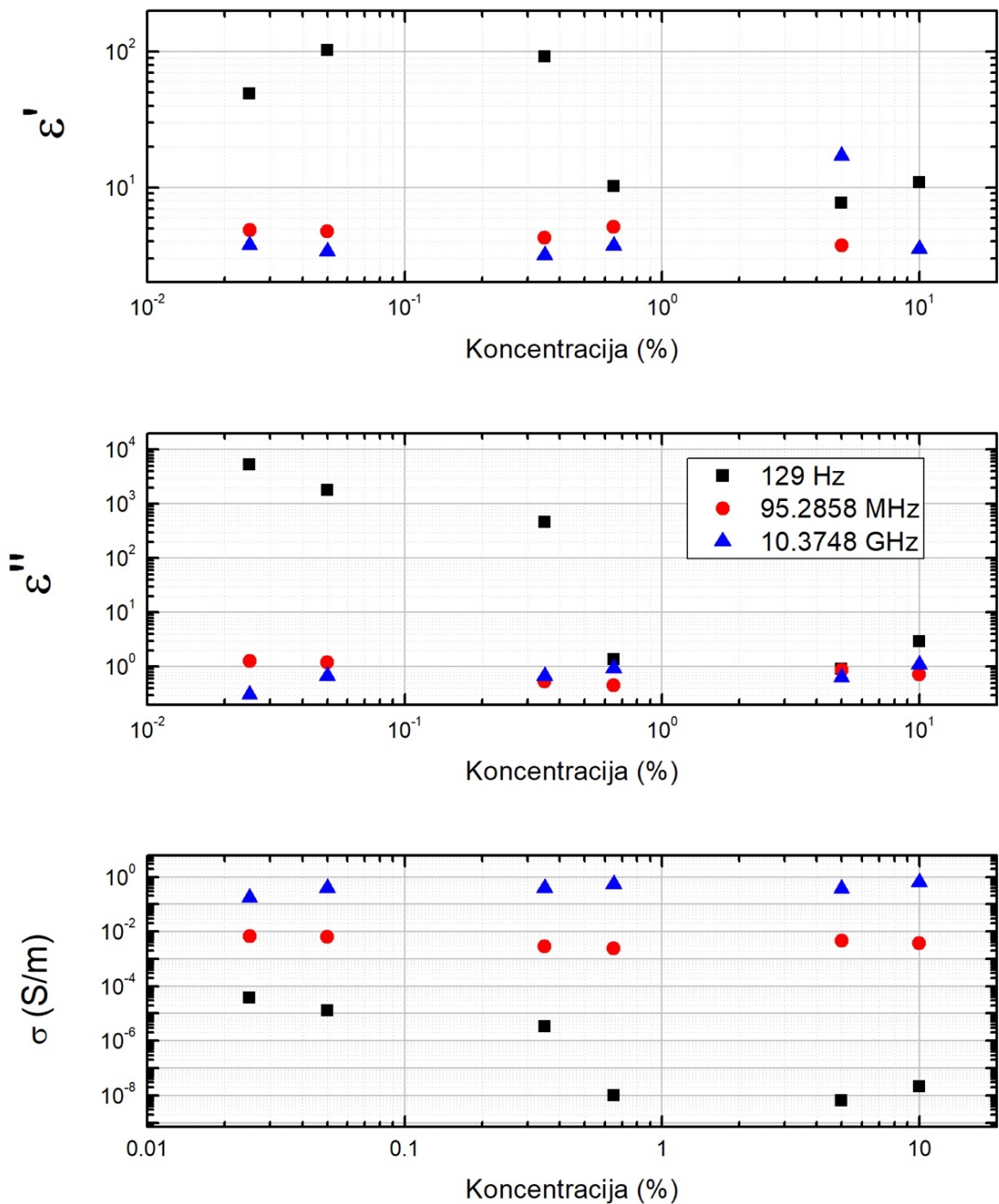
Tirtų epoksidinės dervos polimerinių kompozitų su DANV (fiksuota tūrinė koncentracija 0,35 %) intarpais ir skirtingomis MnFe₂O₄ nanodalelių koncentracijomis realios ir menamos dielektrinės skvarbos bei elektrinio laidumo priklausomybės nuo dažnio kambario temperatūroje pavaizduota 16 paveikslėlyje. Remiantis pateiktais rezultatais galime teigti, kad MnFe₂O₄ koncentracija turi didelę įtaką kompozito dielektrinėms savybėms. Gryno epoksidinės dervos polimero (ED) dielektrinės skvarbos vertės yra sąlyginai nedidelės ir neviršija 10 visame tirtų dažnių diapazone. Tačiau į tą pačią kompozitinę medžiagą įdėjus MnFe₂O₄ nanodalelių (tūrinė koncentracija 0,025 %) ir DANV (tūrinė koncentracija 0,035%) dielektrinės skvarbos vertės gali išaugti net 10 kartų. Ypač didelis verčių skirtumas matomas žemesniuose dažniuose (nuo 100 Hz iki 1 MHz). Kylant dažniui kompleksinės dielektrinės skvarbos vertės mažėja – realioji dalis artėja į vieneta, o menama dedamoji į nulį. Kompozitų su 0,65 %, 0,5 %, 0,10 % MnFe₂O₄ nanodalelių tūrinė koncentracija realioji dalis visame tirtame dažnių ruože yra didesnė už menamąją, tačiau 0,025 %, 0,05 %, 0,35 % koncentracijos bandinių dielektrinės skvarbos menama dedamoji, žemesniuose nei 1 MHz dažniuose, yra didesnė. Tiek realioji, tiek menama dielektrinės skvarbos dalis sparčiai auga didėjant intarpų koncentracijai, kol pasiekama ribinė magnetinių dalelių koncentracijos vertė (0,5 %) ir bandinys tampa mažiau laidus. Tad žemesniuose dažniuose išsiskiria dvi tirtų kompozitų grupės – bandiniai, pasižymintys aukštu laidumu, bei bandiniai, turintys mažesnes laidumo vertes. Pirmajai grupei galime priskirti gryną EPD bei EPD su 0,025 %, 0,05 %, 0,35 % MnFe₂O₄ nanodalelių koncentracija, o mažiau laidžių kompozitų grupei EPD su 0,65 %, 0,5 %, 0,10 % MnFe₂O₄ koncentracijos dalelėmis. Aukštesniuose dažniuose aukščiau minėta priklausomybė išnyksta ir visų kompozitų laidumas supanašėja.

Epoksidinės dervos polimerinių kompozitų su DANV intarpais priklausomybė nuo MnFe₂O₄ nanodalelių tūrinės koncentracijos pateikta 15 paveikslėlyje. Palyginime stebime dielektrinės skvarbos dedamųjų bei laidumo pasiskirstymą žemų, vidutinių ir aukštų dažnių juostoje – atitinkamai, kai dažniai yra 129 Hz, 95,28 MHz ir 10,37 GHz. Žemuose dažniuose galime pastebėti reikšmingą dielektrinės skvarbos skirtumą tarp tirtų kompozitų – 0,025 %, 0,05

%, 0,35 % koncentracijos bandinių dielektrinės skvarbos realioji dalis išauga beveik 10 kartų, o menamoji beveik 1000 lyginant su 0,65 %, 0,5 %, 0,10 % MnFe_2O_4 koncentracijomis. Pirmoji kompozitų grupė taip pat išsiskiria aukštesniu laidumu, apskaičiuotu pagal (4) formulę. Tačiau pirmosios bei antrosios kompozitų grupių dielektrinių parametrų skirtumas pasireiškia tik žemuose dažniuose. Vidutiniuose bei aukštuose dažniuose – reali dielektrinė skvarba, menama dielektrinė skvarba ir laidumas supanašėja tarp skirtingos koncentracijos bandinių. Remiantis pateiktais rezultatais matyti, kad kylant dažniui didėja ir laidumo vertės, nepriklausomai nuo MnFe_2O_4 nanodalelių koncentracijos. Dažninė elektrinio laidumo parametrų priklausomybė gali būti paaiškinama šuoliniu elektriniu laidumu, kuris dažniausia pasireiškia netvarkios sandaros struktūrose. Prie tos pačios užpildo koncentracijos vertės laidumas gali skirtis daugiau nei 10^5 kartų lyginant, kai dažnis 129 Hz ir 10,37 GHz. Reikia pažymėti, kad tiek DANV, tiek MnFe_2O_4 nanodalelės yra pakankamai laidžios. Tačiau MnFe_2O_4 nanodalelių koncentracija yra žymiai mažesnė negu perkoliacijos slenkstis MnFe_2O_4 /epoksidinės dervos sistemoje. Elektronų transportas vyksta daugiausiai tarp DANV klasterių ir mažesnė dalimi tarp DANV ir MnFe_2O_4 klasterių. Tai, kad egzistuoja kritinė MnFe_2O_4 nanodalelių koncentracija, kuriai esant prasideda laidumo mažėjimas parodo, kad MnFe_2O_4 nanodalelės keičia DANV pasiskirstymą ir esant pakankamai aukštoms MnFe_2O_4 nanodalelių koncentracijoms DANV pasiskirstymas pablogėja.



14 Pav. Kompozitų su DANV (tūrinė koncentracija yra fiksuota 0,35 %) ir skirtingomis MnFe₂O₄ koncentracijomis realios ir menamos dielektrinės skvarbos bei elektrinio laidumo priklausomybė nuo dažnio 100 Hz – 10 GHz diapazone.

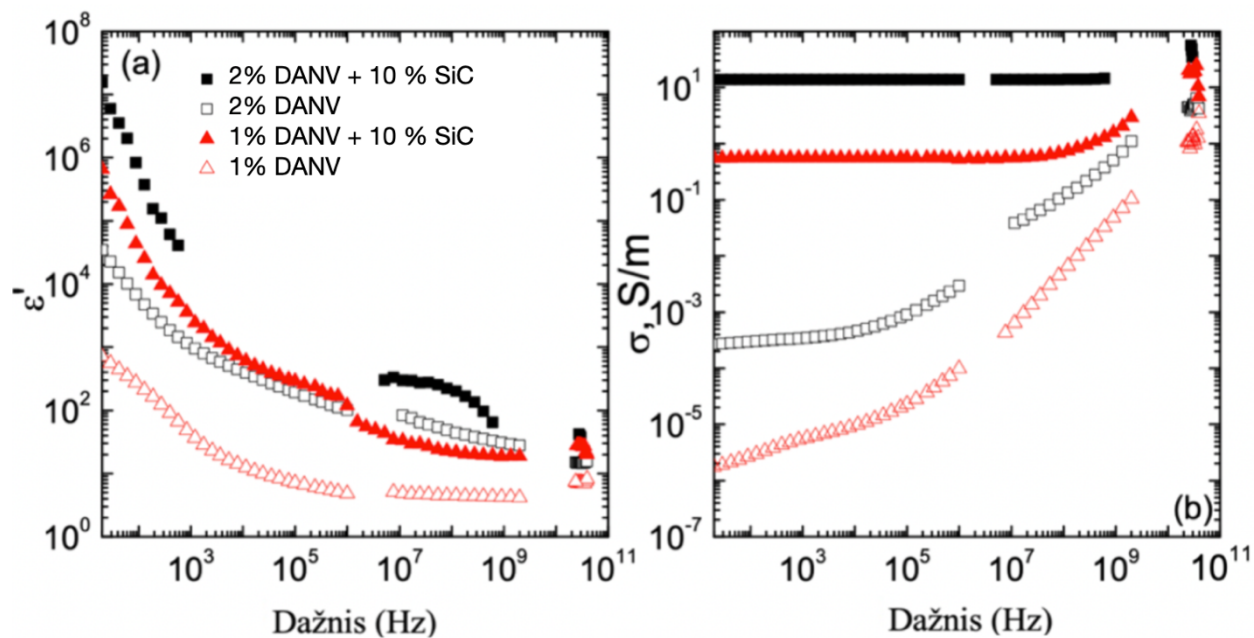


15 Pav. Realios ir menamos dielektrinės skvarbos bei elektrinio laidumo priklausomybė nuo MnFe_2O_4 interpų koncentracijos kompozite prie fiksuotų dažnių (129 Hz, 95,28 MHz ir 10,37 GHz).

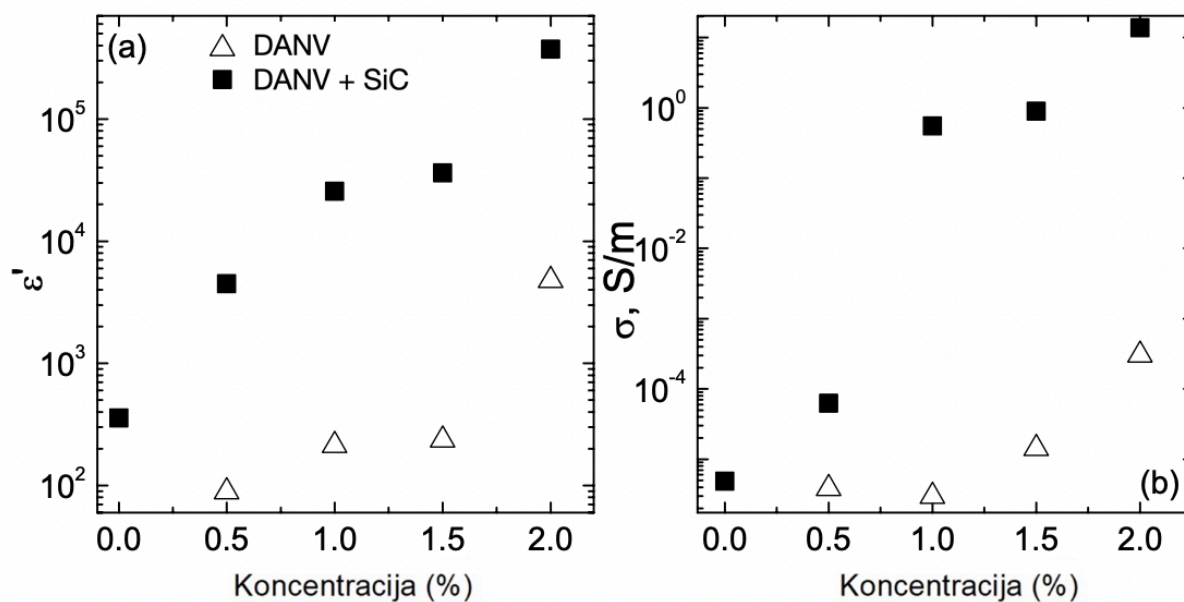
DANV kompozitai su skirtingomis SiC koncentracijomis

Nagrinėtų aliuminio fosfato polimerinių kompozitų su DANV intarpais (fiksuoja tūrinė koncentracija 1 % ir 2 %) bei skirtingomis SiC nanodalelių koncentracijomis (fiksuoja tūrinė koncentracija 0,5 %, 1 %, 1,5 %, 2 % ir 10 % atitinkamai) realios dielektrinės skvarbos bei elektrinio laidumo priklausomybė nuo dažnio kambario temperatūroje pavaizduota 16 paveikslėlyje. Iš pateiktų rezultatų galime teigti, kad SiC bei DANV dalelių koncentracijos kitimas turi didelę įtaką kompozito dielektrinėms savybėms. Visame tirtų dažnių diapazone 1 % DANV bandinys pasižymėjo $10\text{-}10^2$ žemesnėmis dielektrinės skvarbos bei elektrinio laidumo vertėmis nei kompozitas pasižymintis 2 % DANV tūrinę koncentraciją ar kompozitas su ta pačia DANV tūrine koncentracija, bet turintis 10 % SiC intarpų. Galime pastebėti, kad visuose bandiniuose dielektrinės skvarbos vertė buvo ganėtinai didelė ir viršijo 10, o dielektrinės skvarbos maksimumas yra žemesniuose dažniuose < 129 Hz. Aukščiausia dielektrinės skvarbos vertė stebėta 2 % DANV tūrinės koncentracijos ir 10 % SiC intarpų turinčiame kompozite. Kylant dažniui kompleksinės dielektrinės skvarbos vertės mažėja – realioji dalis artėja į vieneta, o menama dedamoji į nulį. Elektrinio laidumo priklausomybės nuo intarpų koncentracijos didžiausia įtaka pastebima taip pat žemesniuose dažniuose, dažniui kylant kompozitų su skirtingomis priemaišomis laidumas supanašėja. Dažninė elektrinio laidumo parametru priklausomybė gali būti paaiškinama šuoliniu elektriniu laidumu, kuris dažniausia pasireiškia netvarkios sandaros struktūrose.

Aliuminio fosfato kompozitų su DANV intarpais priklausomybė nuo SiC nanodalelių tūrinės koncentracijos pateikta 17 paveikslėlyje. Palyginime stebime realiosios dielektrinės skvarbos bei laidumo pasiskirstymą žemų dažnių juostoje – atitinkamai, kai dažnio vertė yra lygi 129 Hz. Galime teigti, kad SiC intarpų pridėjimas lemia žymų bandinio dielektrinės skvarbos bei laidumo padidėjimą. Perkoliacijos slenkstis abiejų tipų keramikuose yra apie 0,5 %. Keramikų su SiC intarpais nuolatinės srovės laidumas yra penkis kartus didesnis nei bandiniuose tik su DANV intarpais. Dielektrinė skvarba ties 129 Hz dažniu yra daugiau nei 10^3 kartų didesnė lyginant su gryno DANV užpildo kompozitais. Reikia pastebėti, kad tiek DANV, tiek SiC nanodalelės yra pakankamai laidžios, stebimas tolygus elektrinio laidumo augimas didėjant SiC koncentracijai. Galime teigti, kad elektronų transportas vyksta tarp DANV klasterių ir tarp DANV - MnFe_2O_4 klasterių.



16 Pav. Kompozitų su DANV (tūrinė koncentracija yra fiksuota 1 % bei 2 %) ir skirtingų SiC koncentracijų (0,5 %, 1 %, 1,5 % ir 2 %) realios dielektrinės skvarbos bei elektrinio laidumo priklausomybė nuo dažnio 100 Hz – 10 GHz diapazone.



17 Pav. Realios dielektrinės skvarbos bei elektrinio laidumo priklausomybė nuo SiC tarpų tūrinės koncentracijos (0,5 %, 1 %, 1,5 % ir 2 %) kompozite, kai dažnis yra 129 Hz.

Kompozitų dielektrinių savybių tyrimas plačiame temperatūros intervale

DANV kompozitai su skirtingomis MnFe₂O₄ koncentracijomis

Tyrinėtų polimerinių kompozitų su DANV intarpais (fiksuta tūrinė koncentracija 0,09 % ir 0,58 %) bei skirtingomis MnFe₂O₄ magnetinių intarpų koncentracijomis (fiksuta tūrinė koncentracija 0,025 %, 0,05 %, 0,35 %, 0,58 %, 0,65 %) elektrinio laidumo nuolatiniam elektriniam laukui priklausomybė keliant temperatūra iki 501 K pavaizduota 18 paveikslėlyje. Šios priklausomybės gautos aproksimuojant laidumo priklausomybes nuo dažnio esant skirtingoms fiksuotoms temperatūroms. Tame pačiame paveikslėlyje pridėti laidumo temperatūrinės priklausomybės rezultatai bandiniams vėstant iki kambario bei vėliau šaldant iki 30 K temperatūros (kryptis žymima vektoriumi). Galime pastebėti, kad kylant temperatūrai, 0,09 % DANV bandiniuose visame dažnių intervale elektrinio laidumo vertės didėja, su ryškiu maksimumu ir stipria priklausomybė nuo dažnio (kuri yra būdinga Maksvelo-Vagnerio relaksacijai) 380 K – 420 K intervale ir tiesiniu augimu nuo 470 K, kuris gali būti susietas su elektriniu laidumu EP matricoje. 0,58 % DANV bandiniams šylant matome laidumo verčių mažėjimą iki 420 K temperatūros, o vėliau tiesinę priklausomybę. Laidumo dažninėse priklausomybėse temperatūros intervale nuo 420 K iki 502 K yra stebimas nuo dažnio nepriklausantis laidumas, sutampantis su nuolatinės srovės laidumu. Laidumo temperatūrinėse priklausomybėse, bandiniams vėstant intervale nuo 273 K iki 30 K yra stebimas pastovios srovės laidumo verčių didėjimas iki kritinės temperatūros, kuri yra apie 170 K (priklausančios nuo polimero stiklėjimo temperatūros) kompozitui su 0,025 % ir 0,35 % MnFe₂O₄ magnetinių koncentracija, toliau mažinant temperatūrą pastovios srovės laidumas pradeda mažėti visiems kompozitams. Mažėjant temperatūrai epoksidinės dervos polimero matrica traukiasi, mažinant atstumus tarp elektronų DANV intarpuose bandinys tampa laidesnis ir stebime pastovios srovės laidumo didėjimą iki kritinės temperatūros. Laidumo verčių mažėjimą žemiau kritinės temperatūros galime paaiškinti Mott'o dėsniumi, kuris teigia, kad didėjant temperatūrai mažėja elektronų energija, reikalinga pereiti tarp laidžių sričių. Eksperimente šios laidžios sritys yra anglies nanovamzdelių klasteriai.

Esant aukštesnėms temperatūroms negu 400 K kompozitų elektrinio laidumo temperatūrinė priklausomybė buvo aprašyta Arenijaus dėsnio:

$$\sigma_{DC} = \sigma_0 \exp\left(\frac{-E_A}{k_B T}\right) . \quad (41)$$

kur σ_0 priešeksponentinis daugiklis, E_A aktyvacijos energija, k_B Boltzmano konstanta. Apskaičiuoti parametrai pateikti lentelėje 1. Matome kad aktyvacijos energija yra mažiausia tokiai $MnFe_2O_4$ nanodalelių koncentracijai (0.025 % tūrinės koncentracijos) kuriai esant elektrinis laidumas didžiausias. Kompozito elektrinį laidumą galima įsivaizduoti kaip sujungtą lygiagrečiai iš laidžių nanodalelių (perkoliacinio) tinklo ir matricos laidumo. Kompozito laidumo didėjimas yra sąlygotas perkoliacinio tinklo laidumo didėjimo, kuris nuo temperatūros praktiškai nepriklauso (esant temperatūroms, aukštesnėms negu kambario temperatūra). Todėl perkoliacinio tinklo laidumo indėlio didėjimas mažina aktyvacijos energija (Lentelė 1).

Lentelė 1. Arenijaus dėsnio parametrai.

Bandinys	Prieš kaitinimą		Po kaitinimo	
	σ_0 , S/m	E_A/k_B , K	σ_0 , S/m	E_A/k_B , K
0.09 % DANV	2.2×10^2	8892	5.6×10^2	9338
0.09 % DANV + 0.025 % $MnFe_2O_4$	9.5×10^{-3}	2357	6.7×10^{-4}	898
0.09 % DANV + 0.05 % $MnFe_2O_4$	7.5×10^{-2}	3736	5.7×10^{-4}	1266
0.09 % DANV + 0.35 % $MnFe_2O_4$	2.0×10^2	7998	1.0×10^{-2}	3103
0.09 % DANV + 0.65 % $MnFe_2O_4$	4.1×10^4	11380	1.7×10^3	9755
0.58 % DANV	3.0	1272	$0.5.8 \times 10^{-1}$	446
0.58 % DANV + 0.025 % $MnFe_2O_4$	5.0×10^2	5056	1.9×10^{-1}	897
0.58 % DANV + 0.58 % $MnFe_2O_4$	1.6×10^3	5623	1.1×10^{-1}	724

Esant temperatūroms žemesniems negu 250 K elektrinio laidumo temperatūrinė priklausomybė buvo aprašyta tuneliavimo dėsnio [15]:

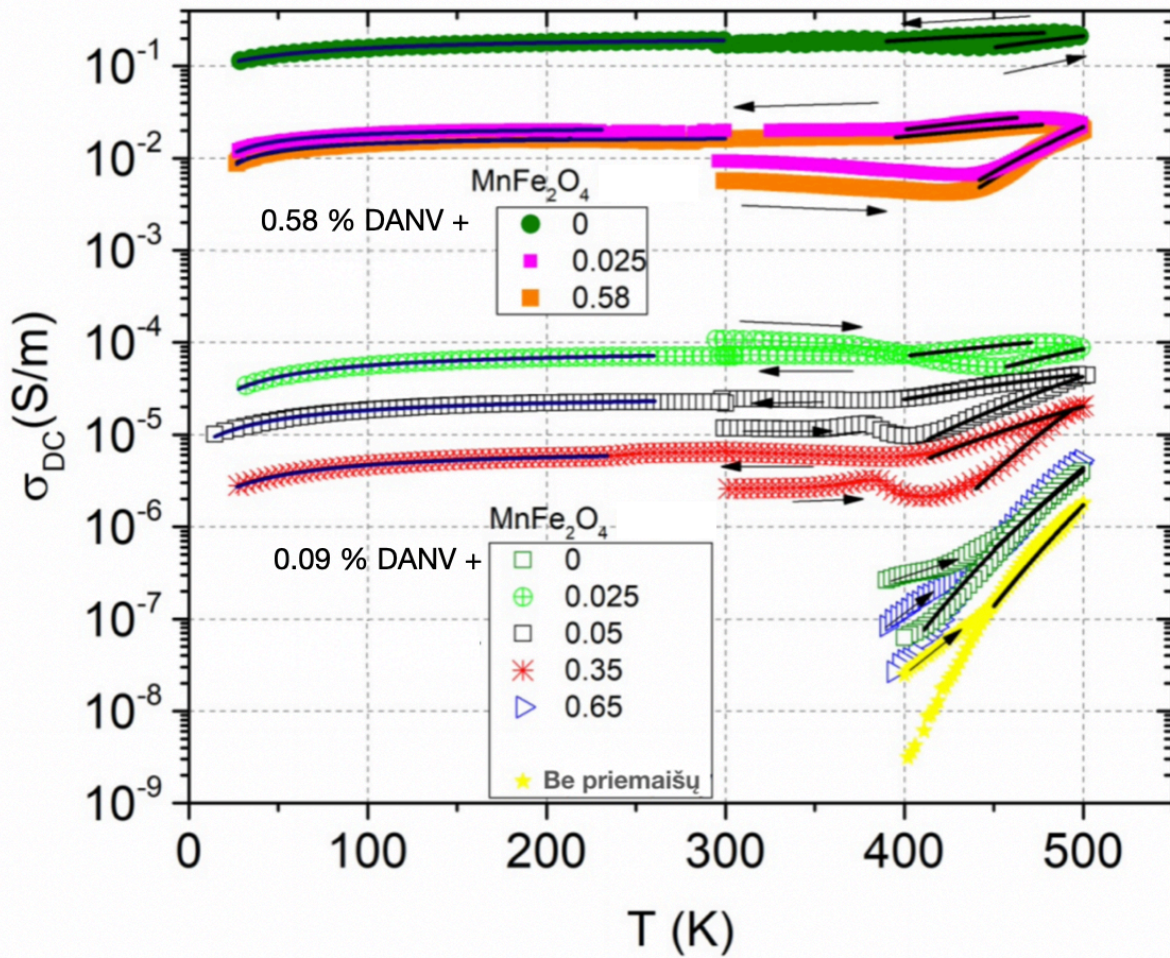
$$\sigma_{DC} = \sigma_0 \exp \left(\frac{-T_1}{T+T_0} \right) . \quad (42)$$

čia T_0 potencinio barjero aukštis, T_1 temperatūra kuriai esant prasideda tuneliavimas. Apskaičiuoti parametrai pateikti lentelėje 2.

Lentelė 2. Tuneliavimo dėsnio parametrai.

Bandinys	$\sigma_0, \text{S/m}$	T_1, K	T_0, K	T_1/T_0
0.09 % DANV + 0.025 % MnFe_2O_4	8.7×10^{-5}	55.3	26.2	2.1
0.09 % DANV + 0.05 % MnFe_2O_4	2.8×10^{-5}	59.5	40.4	1.5
0.09 % DANV + 0.35 % MnFe_2O_4	7.3×10^{-6}	59.3	32.9	1.8
0.58 % DANV	2.1×10^{-1}	49.2	47.4	1.0
0.58 % DANV + 0.025 % MnFe_2O_4	2.2×10^{-2}	20.7	5.3	3.9
0.58 % DANV + 0.58 % MnFe_2O_4	1.8×10^{-2}	27.3	11.6	2.4

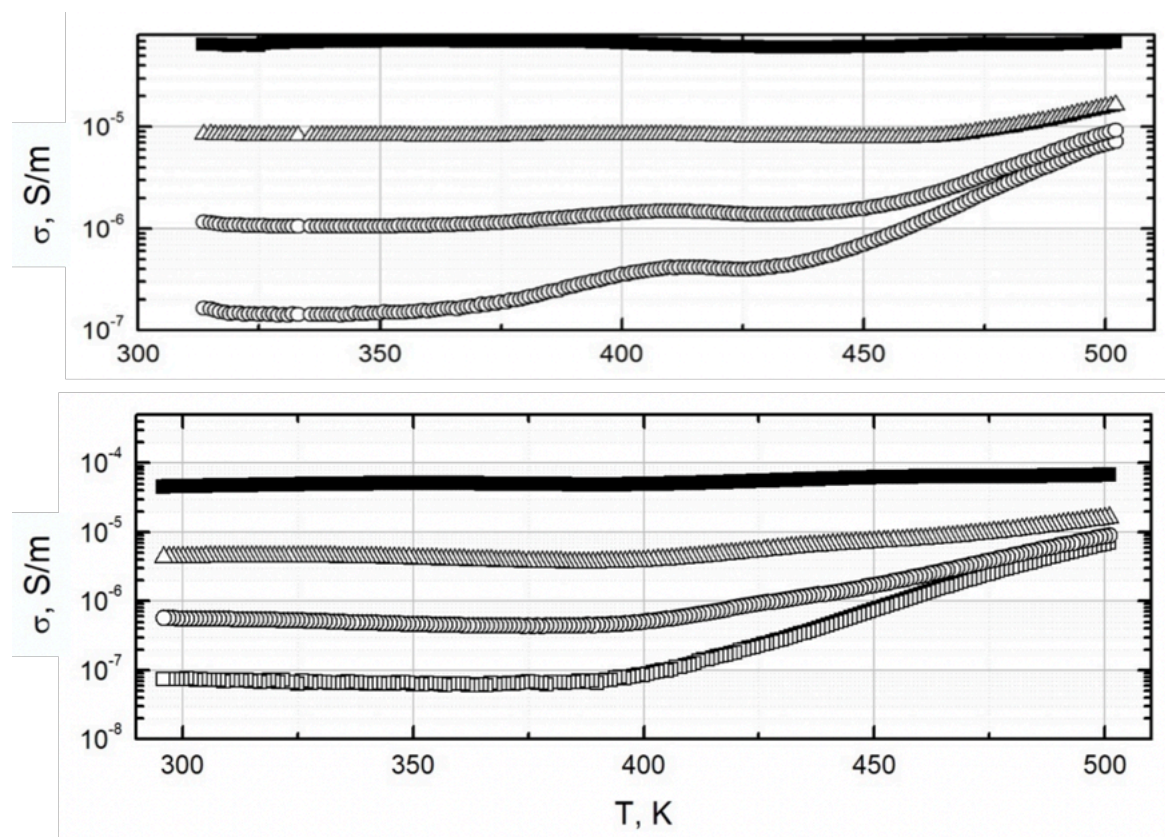
Pagal 42 lygtį išvestos nuolatinės srovės laidumo aproksimacinės kreivės pavaizduotos 18 paveikslėlyje. Kreivės atitinka eksperimentiškai išmatuotas rezultatų vertes. Atsižvelgiant į tuneliavimo dėsnio parametrų lentelę galime teigti, kad T_1/T_0 santykis mažėja augant MnFe_2O_4 magnetinių intarpų koncentracijomis. Prie didesnės DANV tūrinės koncentracijos (0.58 %) stebimas atvirkštinis procesas ir T_1/T_0 santykis mažėja. Yra žinoma, kad T_1/T_0 santykis proporcingas krūvininkų tuneliavimo atstumui ir potenciniam barjerui tarp ANV, didėjant ANV koncentracijai šis atstumas ir potencialinis barjeras mažėja.



18 Pav. Kompozitų su skirtingomis DANV ir MnFe_2O_4 nanodalelių tarpų tūrinėmis koncentracijomis elektrinio laidumo nuolatiniame elektriniame lauke temperatūrinė priklausomybė.

Kompozito su 0,65 % MnFe_2O_4 nanodalelių koncentracija elektrinio laidumo priklausomybė nuo temperatūros, kai bandinys buvo kaitinamas iki 502 K, esant skirtingiems dažniams (1 kHz, 11 kHz, 100 kHz, 1 MHz), pateikta 19 paveikslėlyje. Žvelgiant į laidumo priklausomybės rezultatus galime teigti, kad temperatūros kitimas didžiausią įtaką elektriniam laidumui turi žemiausiuose dažniuose, kur pasireiškia didžiausi nanodalelių klasteriai. Kylant dažniui, laidumo vertės pradeda augti esant vis aukštesnei slenkstinei temperatūrai: 1 kHz ties 370 K, 11 kHz ties 450 K, 100 kHz ties 480 K. Augimas matomas kol pasiekiamas ribinis dažnis. 1 MHz matavimų rezultatai pasižymėjo didžiausiu laidumu (10^{-4} S/m), beveik nekintančiu visame temperatūros ruože. Pasiekus 502 K temperatūrą, bandinys buvo paliktas vėsti iki kambario temperatūros. Atlikus matavimus pastebėta, kad mažėjant temperatūrai beveik visame dažnių intervale laidumo vertės

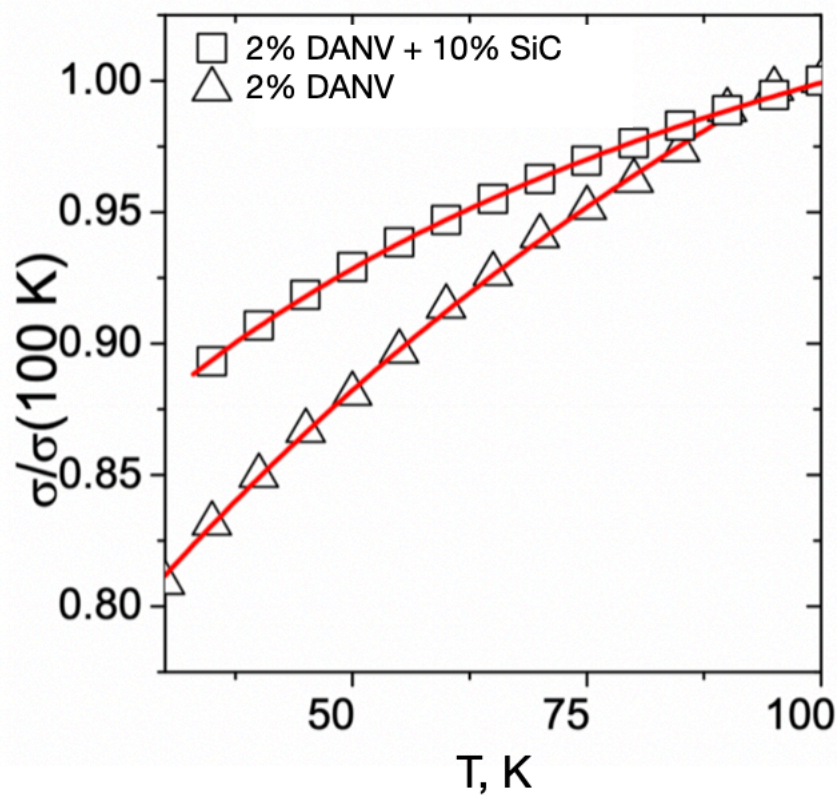
mažėja, su ryškiausiu tiesišku mažėjimu nuo 502 K iki 400 K. Išnyksta kaitinant stebėtas maksimumas 380 K – 420 K intervale. Mažėjant temperatūrai, laidumo vertė tampa pastovi esant aukštesnėms slenkstinės temperatūros vertėms: 1 kHz prie 390 K, 11 kHz prie 400 K, 100 kHz prie 410 K. Ši reiškinį galima paaiškinti DANV pasiskirstymo matricoje pakeitimais keičiant $MnFe_2O_4$ koncentraciją.



19 Pav. Kompozito su 0,65 % $MnFe_2O_4$ nanodalelimis ir 0,35 % anglies nanovamzdeliais elektrinio laidumo priklausomybė nuo temperatūros esant skirtingiems dažniams, kai kompozitas buvo kaitinamas iki 502 K (viršuje) bei vėso iki kambario temperatūros (apačioje).

DANV kompozitai su skirtingomis SiC intarpų koncentracijomis

Aliuminio fosfato kompozitų su DANV (fiksuota masinė koncentracija 2 %) intarpais ir SiC nanodalelių intarpais bandiniai buvo šaldomi skysto helio uždaro ciklo kriostate 1 K/min greičiu. Bandinių turinčių 10 % SiC koncentracijas bei grynios keramikos tik su DANV intarpais santykinio laidumo priklausomybė nuo temperatūros atvaizduotos 20 paveikslėlyje.



20 Pav. 10 % SiC (masinės koncentracijos) intarpų bei 2 % (masinės koncentracijos) DANV kompozitų santykinio elektrinio laidumo priklausomybė nuo temperatūros, kai kompozitas buvo šaldomas iki 30 K.

Tuneliavimo dėsnis, kurio išraiška pateikta 42 formulėje, gali būti pritaikytas eksperimentiškai išmatuotiems duomenims. Šio dėsnio atitikimu pasižymi abu nagrinėti bandiniai – grynasis bei kompozitas su 10 % koncentracijos SiC intarpais. Išraiškoje T_1 apibūdina energiją, reikalingą

elektronui peršokti atstumą tarp dviejų laidžių dalelių. T_0 nusako temperatūrą, nuo kurios pasireiškia termiškai aktyvuotas laidumas virš barjero. T_1 ir T_0 reikšmės yra susiję su kompozito mikrostruktūra, šių dydžių santykis gali būti nusakomas:

$$\frac{T_1}{T_0} = \left(\frac{\pi}{2}\right) \sqrt{\frac{2m_e}{\hbar}} \lambda^{\frac{1}{2}} d \sim \lambda^{\frac{1}{2}} d . \quad (43)$$

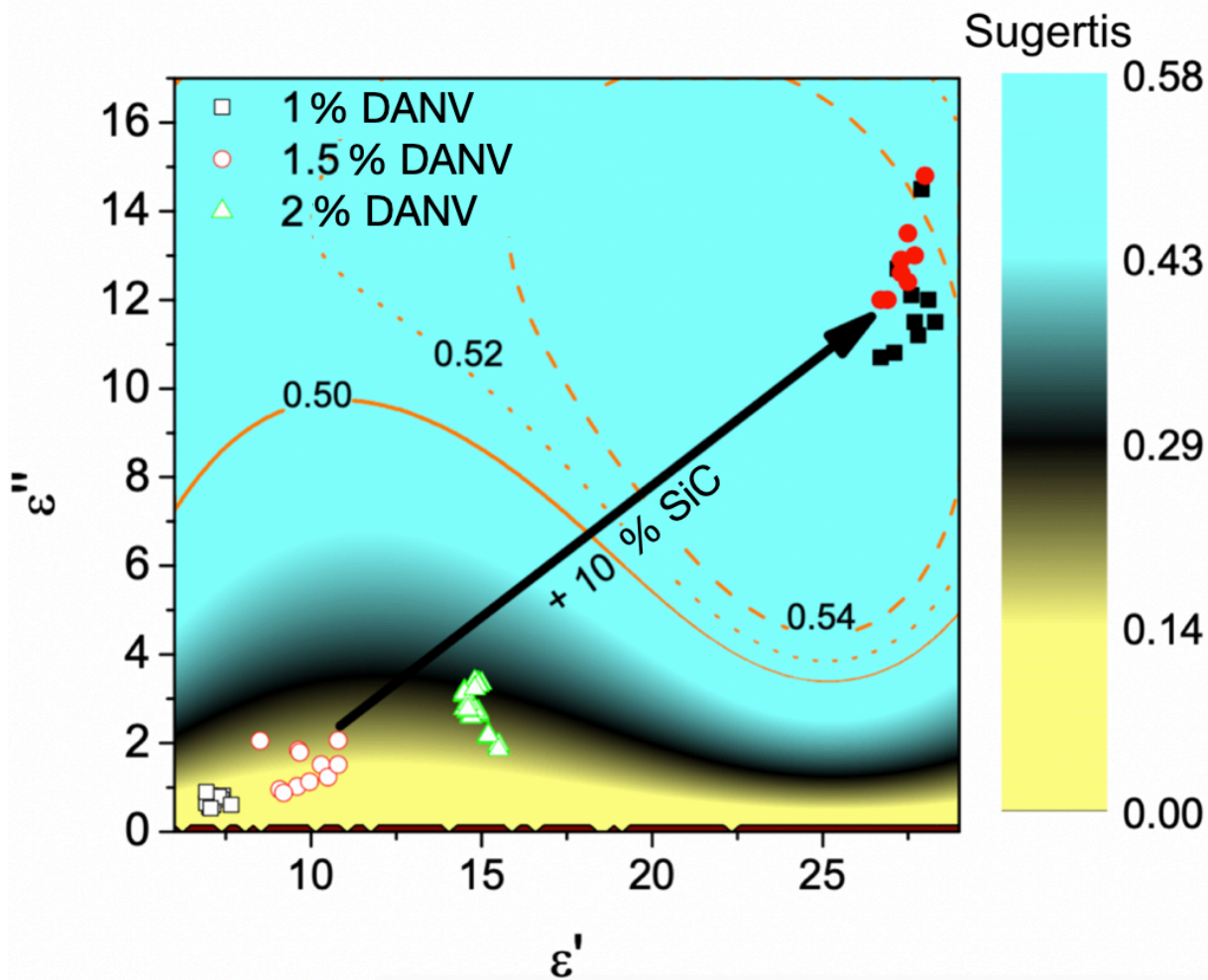
Gautos T_1/T_0 santykio reikšmės DANV kompozitui - 0,783, o kompozitui su DANV ir SiC intarpais - 0,435. Skirtumas tarp šių dydžių įrodo, kad mažesnis lygmenų atskyrimas yra kompozite su DANV ir SiC intarpais.

Kompozitų ekranavimo savybės GHz dažnių ruože

Aukštesniųjų dažnių srityje (daugiau nei 10 GHz) nagrinėjome DANV bei DANV ir SiC kompozitus. Mikrobangų dažnių ruože reali bei menama dielektrinės skvarbos dedamosios nepasižymi dažnine dispersija. Abiejų dydžių vertės didėja atitinkamai didėjant dalelių koncentracijai DANV bei DANV ir SiC bandiniuose. Norint aprašyti ekranavimo savybes buvo naudotas modelis, nusakantis plonos plokštelės, esančios laisvoje erdvėje, atsaką į statmenai veikiančią elektromagnetinę spinduliuotę. Tokios sistemos sklaidos parametrai pateikiami sekančiomis lygtimis [15]:

$$\begin{cases} S_{11} = \frac{-j\left[\left(\frac{k_z}{k_{2z}}\right)^2 - 1\right] \sin(k_{2z}\tau)}{-2\left(\frac{k_z}{k_{2z}}\right) \cos(k_{2z}\tau) + j\left[\left(\frac{k_z}{k_{2z}}\right)^2 + 1\right] \sin(k_{2z}\tau)} \\ S_{11} = \frac{2\left(\frac{k_z}{k_{2z}}\right)}{-2\left(\frac{k_z}{k_{2z}}\right) \cos(k_{2z}\tau) + j\left[\left(\frac{k_z}{k_{2z}}\right)^2 + 1\right] \sin(k_{2z}\tau)} \end{cases} . \quad (44)$$

$k_z = 2\pi/\lambda$ ir $k_{zz} = 2\pi\sqrt{\epsilon}/\lambda$ nusako bangos skaičių vakuume ir bandinyje atitinkamai, τ yra plokštelės sluoksnio storis. Sluoksnio sugertis gali būti apskaičiuota sekančia lygtimi $A = 1 - (S_{11}^T)^2 - (S_{21}^T)^2$. Plonos plokštelės sugertis, kaip spinduliavimo dažnio, bandinio storio ir kompleksinės dielektrinės skvarbos gali būti aprašoma $A = A(\nu, \tau, \epsilon^*)$ funkcija. Norėdami supaprastinti aprašytą kompleksinę funkciją, galime naudoti fiksuotą bandinio storį bei dažnį ($\nu_0 = 30 \text{ GHz}$, $\tau_0 = 1 \text{ mm}$). Gauti realios bei menamos dielektrinės skvarbos atitikimai sugerčiai atvaizduotos 21 paveikslėlyje.



21 Pav. Keramikų su 10 % SiC masinės intarpų koncentracija bei 1 %, 1,5 % 2 % tūrinės koncentracijos DANV kompozito realios ir menamos dielektrinės skvarbos atitikimas elektromagnetinio spinduliavimo sugerčiai (30 GHz), plokštelės storis 1 mm.

Gauti rezultatai leidžia teigti, kad 10 % masinės koncentracijos SiC intarpų pridėjimas bandinyje pagerina elektromagnetinės spinduliuotės sugėrimą net iki 56 %, kai plokštelės storis 1 mm. Palyginimui su gerai atspindinčiais kompozitais, užpildytais tikrai DANV, hibridiniai kompozitais užpildyti DANV ir SiC intarpais ekranuoja elektromagnetinę spinduliuotę daugiausia sugerties metodu.

Išvados

- Hibridinių kompozitų su DANV ir MnFe_2O_4 intarpais kompleksinė dielektrinė skvarba sparčiai auga didėjant MnFe_2O_4 nanodalelių koncentracijai, kol pasiekama kritinė magnetinių dalelių koncentracijos vertė (0.5 %), esant aukštesnėms MnFe_2O_4 nanodalelių koncentracijoms kompozitų kompleksinė dielektrinė skvarba mažėja. Ši reiškinį galima paaiškinti DANV pasiskirstymo matricoje pakeitimais keičiant MnFe_2O_4 koncentraciją.
- Šių kompozitų kompleksinė skvarba stipriai mažėja didėjant dažniui ir esant 10 GHz dažniui praktiškai nepriklauso nuo intarpų koncentracijos. Todėl kompozitai tinka elektromagnetiniam ekranavimui tik esant žemesniems dažniams negu 1 GHz.
- Hibridiniai kompozitai su DANV ir SiC intarpais pasirodė pranašesni nei bandiniai su DANV ir MnFe_2O_4 intarpais. Elektrinis laidumas tolygiai auga didėjant SiC nanodalelių koncentracijai, o kritinė SiC nanodalelių koncentracija, kuriai esant dielektrinės skvarbos vertės mažėtų, nebuvo pastebėta.
- Temperatūrų intervale 300-400 K kompozitų su DANV ir MnFe_2O_4 intarpais laidumas nuo temperatūros praktiškai nepriklauso, o esant aukštesnėms temperatūroms kinta pagal Areniuso dėsnį. Laidumo verčių didėjimas ir aktyvacijos energijos mažėjimas yra sąlygoti perkoliacinio tinklo laidumo augimo.
- Net nedidelis kiekis SiC nanodalelių (10 % masinės koncentracijos) pridėjimas į aliuminio fosfato kompozitus su DANV padidina mikrobangų sugertį iki 56 % (kai dažnis yra 30 GHz ir plokštelės storis 1 mm). Panaudojus veidrodį galima sukurti tokių kompozitų pagrindu veikiančią elektromagnetinio suderinamumo sistemą.

Naudota literatūra

- [1] Internet of Things (IoT) connected devices installed base worldwide from 2015 to 2025, Statista Research Department, <https://www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide>, November 2016.
- [2] Gul Rahman, Zainab Najaf, Asad Mehmood, Salma Bilal, Anwar ul Haq, Ali Shah, Shabeer Ahmad Mian and Ghulam Ali, An Overview of the Recent Progress in the Synthesis and Applications of Carbon Nanotubes, *Journal of Carbon Research*, October 2018.
- [3] Sumio Lijima, Carbon nanotubes: past, present, and future, *Physica B: Condensed Matter Volume 323*, pages 1-5, October 2002.
- [4] Polymer, Wikipedia encyclopedia, <https://en.wikipedia.org/wiki/Polymer>, April 2020.
- [5] Ulrich Bottger, Dielectric Properties of Polar Oxides, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/3527604650.ch1>, 12-2014.
- [6] Petra Potschkea, Sergej M. Dudkinb, Ingo Alig, Dielectric spectroscopy on melt processed polycarbonate — multiwalled carbon nanotube composites, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032386103004518>, 10-2003.
- [7] A. Plyushch, J. Macutkevici, J. Banys, V. Plausinaitiene, Dz. Bychanok, S. Maksimenko, A. Selskis, A. Sokal, K. N. Lapko, Silicon carbide/phosphate ceramics composite for electromagnetic shielding applications: Whiskers vs particles, *Appl. Phys. Lett.* 114, 183105, 2019.
- [8] Ivanov E, Kotsilkova R, Krusteva E, Effect of processing on rheological properties and structure development of Epoxy/MWCNT nanocomposites, *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics Volume 49*, Issue 6, January 2011.
- [9] US Research Nanomaterials Inc, Manganese Iron Oxide MnFe₂O₄ Nanopowder, <https://www.us-nano.com/inc/sdetail/7019>, April 2020.
- [10] US Research Nanomaterials Inc, Silicon Carbide SiC Micronwhisker, <https://www.us-nano.com/inc/sdetail/462>, April 2020.
- [11] Agilent 4284A/4285A Precision LCR Meter Family 20 Hz to 1 MHz 75 kHz to 30 MHz Technical Overview, <https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5952-1431.pdf?id=1000084045:epsg:dow>, April 2020.

- [12] Service Guide Agilent Technologies PNA Series Microwave Network Analyzers E8362A, E8363A, E8364A, <https://www.testworld.com/wp-content/uploads/service-guide-keysight-agilent-e8362a-e8363a-e8364a-pna-series-network-analyzers.pdf>, 2020.
- [13] Mohammed H. Al-Saleh, Uttandaraman Sundararaj, Electromagnetic interference shielding mechanisms of CNT/ polymer composites, *Elsavier*, 2009:738-1746.
- [14] J. Grigas, Microwave dielectric spectroscopy of ferroelectrics and related materials, *Gordon and Breach Science Publ.*, 40 – 47, 1996.
- [15] Artyom Plyushch, Jan Macutkevic, Polina Kuzhir, Aliaksei Sokal, Konstantin Lapko, Algirdas Selskis and Juras Banys, Synergy Effects in Electromagnetic Properties of Phosphate Ceramics with Silicon Carbide Whiskers and Carbon Nanotubes, <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/20/4388>, October 2019.

Summary

In this work polymer composites with different concentration of Multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) and multiple conductive nanoparticles (SiC and MnFe_2O_4) were investigated.

The dielectric properties (dielectric permittivity, losses and conductivity) of materials were investigated in a wide frequency range using three different measurement equipment: LCR tester (from 10 Hz to 1 MHz), coaxial line (from 1 MHz to 2 GHz) and rectangular waveguide (from 8.5 GHz to 12.5 GHz). All received results were described in the graphs and tables during this work. Composites demonstrated a clear electric percolation threshold, that was around 0,5 % for both SiC and MnFe_2O_4 samples. However, materials with MWCNT and SiC nanoparticles revealed better electric conductivity properties. The electric conductivity is one of the main factors that should be considered for creating shielding covers from polymer composites.

Therefore, for an electromagnetic shielding application more suitable are composites with a mixture of higher concentrations MWCNT (2 %) and SiC (10 %) particles.