

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

AUŠRINĖ JURKEVIČIŪTĖ

**NANOKOMPOZITINIŲ DEIMANTO TIPO ANGLIES PLONŲ
DANGŲ SU METALO NANODALELĖMIS LAZERINIS
STRUKTŪRIZAVIMAS IR JŲ OPTINIŲ BEI STRUKTŪRINIŲ
SAVYBIŲ TYRIMAS**

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, medžiagų inžinerija (T 008)

2020, Kaunas

Disertacija rengta 2015–2019 metais Kauno technologijos universiteto Medžiagų mokslo institute. Mokslinius tyrimus rėmė Lietuvos mokslo taryba ir Europos socialinis fondas.

Mokslinis vadovas:

Prof. dr. Tomas TAMULEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – T 008)

Redagavo: Aurelija Gražina Rukšaitė (leidykla „Technologija“)

Medžiagų inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Prof. habil. dr. Arvidas GALDIKAS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – T 008) – pirmininkas;

Dr. Viktoras GRIGALIŪNAS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – T 008);

Dr. Till LEISSNER (Pietų Danijos universitetas, gamtos mokslai, fizika – N 002);

Dr. Ieva PLIKUSIENĖ (Vilniaus universitetas, gamtos mokslai, chemija – N 003);

Dr. Juris PRIKULIS (Latvijos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – T 008).

Disertacija bus ginama viešame Medžiagų inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje 2020 m. gegužės 18 d. 13 val. Kauno technologijos universiteto Disertacijų gynimo salėje.

Adresas: K. Donelaičio g. 73-403, 44249 Kaunas, Lietuva.

Tel. (370) 37 300 042; faks. (370) 37 324 144; el. paštas doktorantura@ktu.lt.

Disertacijos santrauka išsiųsta 2020 m. balandžio 17 d.

Su disertacija galima susipažinti internetinėje svetainėje <http://ktu.edu> ir Kauno technologijos universiteto bibliotekoje (K. Donelaičio g. 20, 44239 Kaunas).

KAUNAS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

AUŠRINĖ JURKEVIČIŪTĖ

**LASER PATTERNING OF NANOCOMPOSITE DIAMOND-LIKE
CARBON THIN FILMS WITH METAL NANOPARTICLES AND
INVESTIGATION OF THEIR OPTICAL AND STRUCTURAL
PROPERTIES**

Summary of Doctoral dissertation
Technological Sciences, Materials Engineering (T 008)

2020, Kaunas

This doctoral dissertation was prepared at Kaunas University of Technology, Institute of Materials Science during the period of 2015-2019. The studies were supported by Research Council of Lithuania and European Social Fund.

Scientific Supervisor:

Prof. dr. Tomas TAMULEVIČIUS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Materials Engineering – T 008)

Editor: Aurelija Gražina Rukšaitė (Publishing Office “Technologija”)

Dissertation Defence Board of Materials Engineering Science Field:

Prof. habil. dr. Arvidas GALDIKAS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Materials Engineering – T 008) – chairman;

Dr. Viktoras GRIGALIŪNAS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Materials Engineering – T 008);

Dr. Till LEISSNER (University of Southern Denmark, Natural Sciences, Physics – N 002);

Dr. Ieva PLIKUSIENĖ (Vilnius University, Natural Sciences, Chemistry – N 003);

Dr. Juris PRIKULIS (University of Latvia, Technological Sciences, Materials Engineering – T 008).

The official defence of the dissertation will be held at 1 p.m. on 18 May, 2020 at the public meeting of Dissertation Defence Board of Materials Engineering Science Field in Dissertation Defence Hall at Kaunas University of Technology.

Address: K. Donelaičio St. 73-403, 44249 Kaunas, Lithuania.

Tel. no. (+370) 37 300 042; fax. (+370) 37 324 144; e-mail doktorantura@ktu.lt.

Summary of doctoral dissertation was sent on 17 April, 2020.

The doctoral dissertation is available on the internet <http://ktu.edu> and at the library of Kaunas University of Technology (K. Donelaičio St. 20, 44239 Kaunas, Lithuania).

ABSTRACT

Metallic nanoparticles exhibiting plasmonic properties (e.g., copper and silver) are attractive for applications in optical (e.g., refractive index) sensors. The optical response of nanoparticles depends on their shapes and sizes. The surrounding environment also has an impact on the nanoparticles: the elements in the air can react with metal and change their properties. It is necessary to prevent unwanted environmental effects for nanoparticles, but still maintain the desired properties of plasmonic metals. For such purpose, nanoparticles can be embedded in a matrix of another material. Additionally, optical properties can be altered and sensitivity of the sensor can be improved by imposing periodic lines in the material.

In this dissertation, a systematic study of copper and silver nanoparticles in diamond-like carbon matrix is provided. Nanocomposites with varying metal concentrations are deposited by reactive unbalanced magnetron sputtering technique. Transmission electron microscopy is used to determine the layering of thin films. Scanning electron and helium ion microscopies are used to investigate nanoparticles sizes. Raman spectroscopy is used to obtain the type of diamond-like carbon matrix and to investigate surface enhanced Raman scattering effect. Spectroscopic ellipsometry is used to determine the optical properties of nanocomposites.

After investigation of pristine films, one-dimensional periodic structures are imposed in diamond-like carbon with silver nanoparticles. The feasibility of laser interference patterning is tested by modelling the pattern and implementing it in photoresist layer by holographic lithography using continuous wave laser. The pattern in nanocomposite is created by using direct laser interference patterning with femtosecond laser. The patterning threshold (lowest required laser energy density to acquire the pattern in the material) is determined for nanocomposite with silver nanoparticles and compared to patterning threshold of diamond-like carbon and silver separately. Two-dimensional fast Fourier transformations are employed to obtain diffraction patterns from scanning electron and helium ion microscopies of periodic patterns in nanocomposites.

Additionally, the possibility to tailor the nanoparticles sizes by laser irradiation is reported. If the nanocomposite has bimodal distribution (with two predominant diameter values) of nanoparticles, it can be changed into unimodal by applying laser irradiation of specific parameters. The effect of femtosecond laser irradiation on diamond-like carbon and silver nanoparticles nanocomposite is illustrated by spectroscopic ellipsometry mapping, which is compared to optical microscopy image. The changes of nanocomposites in laser affected areas compared to unaffected areas are recorded by dark field microscopy and two-photon luminescence.

1. ĮVADAS

Šviesos manipuliacijos nanometriniu masteliu būtinybę lėmė pastarųjų metų nanotechnologijų plėtra. Šiame mastelyje tradicine (geometrine) optika paremti prietaisai pasiekia difrakcijos ribą ir nebegali veikti, todėl atsiranda naujų optinių prietaisų poreikis. Miniatiūrizacija fotonikos srityje ne tik sumažina prietaisų dydį, bet taip pat ir suteikia galimybę išgauti geresnes savybes, palyginti su tūriniais optiniais elementais.

Metalų nanodalelės yra plačiai tiriamos dėl plazmoninių efektų, ypač dėl lokalizuoto paviršiaus plazmonų rezonanso (LSPR). Auksas yra tradicinis pasirinkimas plazmonikai, tačiau kiti metalai, tokie kaip sidabras, varis, aliuminis, paladis, platina, nikelis, alavas, itris ir kt., taip pat sulaukia daug dėmesio. Metalų nanodalelių LSPR yra labai jautrus medžiagai, supančiai daleles. Kai metalas yra chemiškai aktyvus ir linkęs reaguoti su aplinka, siekiama rasti pasyvuojančią, bet pageidaujamą metalo savybių neslopinančią medžiagą. Būtent tai ir lemia intensyvius tyrimus plazmoninių (nano)kompozitų srityje.

Dažniausiai metalų nanodalelės yra įterpiamos į polimerinę ar stiklo matricą. Jų alternatyva yra amorfinė (deimanto tipo) anglis, kuri pati savaime turi daug privalumų ir pritaikymų. Ji turi panašių savybių, kaip deimantas, ir gali apsaugoti metalus nuo oksidacijos, išlaikydama jų plazmonines savybes.

Susidarančių nanokompozitų struktūra dažniausiai apribojama pasirinkto dangos užnešimo metodo. Tačiau jau nusodintos dangos struktūrą galima keisti ją paveikiant ultratrumpų impulsų lazerio spinduliuote. Pažangūs struktūrizavimo metodai, tokie kaip holografinė litografija ir tiesioginis lazerinis interferencinis struktūrizavimas, gali būti panaudojami vienmatėms, dvimatėms ir netgi trimatėms periodinėms struktūroms sukurti praktiškai bet kokių medžiagų dangose arba tūryje. Ultratrumpų impulsų spinduliuotė gali išlydyti daleles ir pakeisti jų struktūrą bei matmenis. Tačiau lazerio parametrai turi būti atitinkamai parinkti specifinėms medžiagoms, nes medžiaga yra paveikiama tik tada, kai lazerio parametrai yra lygūs arba viršija būdingąją slenkstinę vertę. Norint iširti suformuotų struktūrų morfologiją, skenuojanti elektronų mikroskopija ne visada yra tinkamas metodas dėl įsikrovimo efektų. Tokiu atveju geriau naudoti pažangius mikroskopijos metodus, pavyzdžiui, helio jonų mikroskopiją. Periodinės struktūros su submikrometriniais kritiniais matmenimis turi daug galimų pritaikymų: nuo optinių difrakcinių elementų ir skysčių dinamikos prietaisų iki optinių jutiklių ir plazmoninių kristalų.

Optiniai pritaikymai remiasi medžiagų optinėmis savybėmis. Nanokompozitų atveju egzistuoja bent dvi fazės su savomis optinėmis savybėmis: nanokompozitų optinės savybės priklauso nuo metalo kiekio matricoje, nanodalelių dydžio, formos ir kt. Norint nustatyti plazmoninių nanokompozitų optines savybes, reikia pasitelkti pažangius optinius tyrimų

metodus. Spektroskopinė elipsometrija yra nuodugnus optinis tyrimo metodas, visų pirma naudojamas plonų dangų storiui ir optinėms konstantoms nustatyti. Ji taip pat gali būti pritaikyta nustatant metalų tūrines koncentracijas mišiniuose, kas yra labai svarbu norint perprasti metalo turinčių nanokompozitų optines savybes.

Tyrimo tikslas

Nustatyti įvairiomis sąlygomis nusodintų, metalų nanodalelėmis legiruotų deimanto tipo anglies dangų optines savybes bei ištirti mikro- ir nanoapdirbimo galimybes naudojant pažangius lazerinius metodus.

Tyrimo uždaviniai

- 1) Parinkti dangų nusodinimo sąlygas ir nusodinti plazmoninėmis savybėmis pasižyminčias amorfinės deimanto tipo anglies nanokompozitines dangas su skirtingomis vario ir sidabro koncentracijomis;
- 2) Išsamiai apibūdinti suformuotas dangas: struktūrą, elementinę sudėtį, optines savybes, metalų tūrines koncentracijas, nanodalelių dydžių skirstinius, dangų storius;
- 3) Įsisavinti lazerio pluošto interferencija paremtus struktūrizavimo metodus ir suformuoti submikrometrines periodines vienmatis ir dvimatis struktūras nanokompozitinėse dangose;
- 4) Nustatyti nanokompozitinių dangų lazerinio struktūrizavimo slenkstį ir jį palyginti su atskirų nanokompozito sudedamųjų dalių slenkstinėmis vertėmis;
- 5) Ištirti nanodalelių dydžio pasiskirstymo modifikavimo ultratrumpų impulsų lazerio spinduliuote galimybes ir ribas.

Mokslinis naujumas

- 1) Buvo nustatytas deimanto tipo anglies su sidabro nanodalelėmis nanokompozitų tiesioginio lazerinio interferencinio struktūrizavimo slenkstis;
- 2) Spektroskopinės elipsometrijos metodu buvo nustatytos nanokompozitinių dangų dielektrinės funkcijos ir legiruojančių elementų koncentracijos bei pasiskirstymas gylyje, kurie buvo palyginti su alternatyvių analitinių metodų rezultatais;
- 3) Nustatyta sidabro nanodalelių amorfinės deimanto tipo anglies nanokompozitinėse dangose dydžių pasiskirstymo priklausomybė nuo ultratrumpų impulsų lazerio spinduliuotės poveikio parametru.

Ginamieji teiginiai

- 1) Pralaidumo elektronų mikroskopijos, rentgeno spindulių energijos dispersijos spektroskopijos, rentgeno spindulių atspindžio ir spektroskopinės elipsometrijos metodų kombinacija atskleidžia nanokompozitinių dangų daugiasluoksniškumą ir suteikia informacijos apie kiekvieno dangos sluoksnio savybes;
- 2) Interferencija paremtais dviejų spindulių lazerinio struktūrizavimo metodais (holografine litografija ir tiesioginiu lazeriniu interferenciniu struktūrizavimu) galima suformuoti įvairių geometrijų ir simetrijų vienmatis ir dvimatis periodines struktūras, padengiančias didelį plotą. Lazeriu paveiktų zonų mikroskopijos vaizdų Furjė transformacijos suteikia pirminę informaciją apie struktūras;
- 3) Dėl lokalizuoto paviršiaus plazmonų rezonanso metalo nanodalelėse nanokompozitui struktūrizuoti yra reikalingas mažesnis energijos tankis nei jį sudarantioms medžiagoms atskirai;
- 4) Nanodalelių skersmuo nanokompozituose gali būti keičiamas keičiant lazerio įtėkį arba impulsų skaičių. Paveiktas tam tikro energijos tankio lazerine spinduliuote, bimodalinis nanodalelių skirstinys gali būti pakeistas į unimodalinį.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro 5 pagrindiniai skyriai: įvadas, literatūros apžvalga, darbo metodologija, rezultatai ir diskusija, išvados. Joje taip pat yra literatūros sąrašas, padėka, autorės gyvenimo aprašymas, publikacijų ir konferencijų tezių sąrašas. Disertacijos apimtis yra 136 puslapiai. Joje yra 71 paveikslas, 12 lentelių, 54 sunumeruotos lygtys ir 201 literatūros šaltinis.

Autorės asmeninis indėlis

Disertacijoje pateikiamas darbas buvo atliktas Kauno technologijos universiteto Medžiagų mokslo institute ir ERASMUS+ praktikos metu Pietų Danijos universiteto Mads Clausen institute kaip europinės doktorantūros programos „Physics and Chemistry of Advanced Materials“ (PCAM) dalis.

Autorė suplanavo visus eksperimentus (nanokompozitinių dangų užnešimo ir periodinių struktūrų formavimo šiose dangose reikalavimai) ir atliko holografines litografijas, bandinių morfologijos (periodinių struktūrų skenuojanti elektronų ir optinė mikroskopijos), spektroskopijos (Ramano sklaidos, UV-Vis-NIR) ir elipsometrijos (įprastinės ir žemėlapijo) matavimus bei gautų duomenų analizę (periodinių struktūrų periodas, lazeriu paveiktų linijų plotis, nanodalelių dydžio pasiskirstymas, slenkstinės vertės, duomenų modeliavimas). Holografines litografijas eksperimentus autorė atliko kartu su magistrantu Nerijumi Armakavičiumi ir doktorantu Dainiumi Virganaivičiumi. N. Armakavičius taip pat parašė programą, naudotą interferenciniams vaizdams apskaičiuoti. Pagal

sudarytą eksperimentų planą autorei paprašius nanokompozitinių dangų nusodinimą atliko dr. Andrius Vasiliauskas, tiesioginį lazerinį interferencinį struktūrizavimą – bakalaurantas Linas Šimatonis ir doktorantas Mindaugas Juodėnas. Rentgeno spindulių atspindžio matavimus ir analizę atliko dr. Algirdas Lazauskas. Helio jonų mikroskopiją ir dvifotonę liuminescenciją autorei dalyvaujant atliko atitinkamai Vadzim Adashkevich ir doktorantas Paweł Piotr Cielecki iš Mads Clausen instituto. Pralaidumo elektronų mikroskopiją atliko dr. Algirdas Selskis ir dr. Martynas Skapas iš Fizinių ir technologijos mokslų centro ir dr. Arno Meingast iš „NanoPort Europe“ bendradarbiaujant su UAB „Vildoma“. Dalį nanodalelių mikrofotografijų ir elipsometrijos analizės atliko bakalaurantai Gerda Klimaitė, Alvita Žabaitė ir Justas Deveikis, mentorijami autorės.

Disertacijoje pateikta medžiaga yra paskelbta 4 moksliniuose straipsniuose žurnaluose su citavimo indeksu „Clarivate Analytics Web of Science“ duomenų bazėje ir 16 konferencijos pranešimų, iš kurių 11 pristatė pati disertacijos autorė. Apytiksliai pusė pirmų dviejų, o paskutinė – visiškai, su disertacija susijusių publikacijų buvo parengta disertacijos autorės. Bendraautoriai prisidėjo eksperimentais ir analize, publikacijos rašymu, idėjomis ir konsultacijomis. Prie trečios publikacijos disertacijos autorė prisidėjo bandinių mikroskopiniu vaizdinimu ir vaizdų analize, visa kita buvo atlikta bendraautorių. Kai „Rezultatų ir diskusijos“ skyriuje pateikti duomenys yra paskelbti straipsnyje arba konferencijoje, jie yra atitinkamai pažymėti [A] arba [B] su skaičiumi, kuris atitinka skaičių iš su disertacija susijusių publikacijų ir konferencijų sąrašo.

2. LITERATŪROS APŽVALGA

Plazmonikos sritis jungia optiką ir nanoelektroniką, perkeldama šviesą į nanometrinių matmenų skalę. Plazmoninės medžiagos pasižymi neigiama realiąja dielektrinės funkcijos dalimi, turi daug laisvųjų elektronų, kurie osciliuoja paveikus išoriniu elektromagnetiniu lauku [1]. Auksas yra vienas populiariausių plazmoninių metalų, tačiau dėl jo didelės sugerties ieškoma alternatyvių medžiagų [2]. Tarp variantų yra sidabras [3] ir varis [4].

Metallų nanodalelės yra plačiai tiriamos dėl lokalizuoto paviršiaus plazmonų rezonanso (angl. *localized surface plasmon resonance*, LSPR) efekto [4]: rezonansinių kolektyvinių elektronų svyravimų nanodalelėse, kurie sužadunami apšvietus daleles. Prie rezonansinio bangos ilgio bus matoma stipri sugertis arba sklaida nuo metalo nanodalelių, kurios generuoja sustiprintą elektrinį lauką [5]. LSPR priklauso ne tik nuo pasirinkto metalo, bet ir nuo dalelių dydžio, išsidėstymo ir aplinkos, kurioje jos patalpintos [3].

Pagrindinis vario ir sidabro trūkumas, apribojantis jų pritaikymą plazmonikoje, yra cheminis aktyvumas: šios medžiagos lengvai oksiduojasi ir praranda plazmonines savybes [3]. Vienas iš būdų apsaugoti daleles nuo

nepageidaujamo aplinkos poveikio yra jas patalpinti kitos medžiagos, su kuria sidabras ir varis nesudaro junginių, matricoje [6]. Kaip tokios matricos variantas yra plačiai tiriama deimanto tipo anglis (angl. *diamond-like carbon*, DLC) [7]. Tai amorfinės anglies atmaina su sp^2 ir sp^3 fazių ryšiais tarp anglies atomų [8].

Plazmoninės medžiagos labai dažnai pritaikomos optiniuose jutikliuose [2], kurie labiau tinkami naudoti pavojingose aplinkose nei elektroniniai jutikliai [4]. Jutiklio jautrumas gali būti padidinamas sukuriant specifinės geometrijos medžiagas [9]. Medžiagų lūžio rodiklio erdvinis pasiskirstymas ir kartu difraccinis efektyvumas gali būti keičiamas suformuojant periodines struktūras, sudarytas iš nanodalelių, o tam yra reikalingi pažangūs medžiagų struktūrizavimo metodai. Ieškant greitų, pigių, įvairiapusių ir gebančių struktūrizuoti didelį plotą metodų, yra išbandoma holografinė litografija (HL) ir tiesioginis lazerinis interferencinis struktūrizavimas (angl. *direct laser interference patterning*, DLIP) [10]. Tiesa, šie metodai apsiriboja vien periodinių struktūrų formavimu. Tiek HL, tiek DLIP metoduose vienas eksponavimas su dviem interferuojančiais spinduliais sukuria vienmatę (1D) periodinę struktūrą (t. y. su periodiškumu viena kryptimi). Naudojant daugiau spindulių arba bandinį pasukant tarp kelių eksponavimų, gaunamos dvimatės (2D) periodinės struktūros [11].

Nanodalelių dydžių skirstinys dažniausiai yra nulemiamas dangos formavimo metu [12], tačiau jį dar galima pakeisti vėliau, dangą apšvietus ultratrumpais lazerio impulsais [13]. Kaip pasikeis nanodalelės, priklauso nuo lazerio bangos ilgio, impulso energijos, energijos tankio, pasikartojimo dažnio, impulso trukmės [14] ir pan. Abliacijos slenkstis yra mažiausia energijos vertė, kurios reikia medžiagai pašalinti naudojant lazerį [14]. Atitinkamai mažiausia energijos vertė, kurios reikia medžiagoje sukurti struktūrą, gali būti pavadinta struktūrizavimo slenksčiu.

3. DARBO METODOLOGIJA

3.1. Dangų užnešimas

Nanokompozitinės dangos iš amorfinės deimanto tipo anglies ir vario arba sidabro nanodalelių bei grynos DLC dangos buvo užneštos ant (100) orientacijos, n-tipo, 0,5 mm storio kristalinio silicio (Siltronix) ir 1 mm storio lydyto kvarco (University Wafer) pagrindų reaktyviojo nesubalansuoto magnetroninio dulkinimo metodu. DLC ir DLC:Ag dangos buvo formuojamos nuolatinės srovės režimu, o DLC:Cu – impulsinės srovės režimu. Impulso trukmė buvo 100 μ s, darbinis ciklas – 1%, dažnis – 100 Hz. Buvo naudojamas argono (99,6% grynumas) ir acetileno (99,99% grynumas) dujų mišinys bei vario (99,99% grynumas, Kurt J. Lesker Company), sidabro (99,99% grynumas, Kurt J. Lesker Company), arba anglies (grafitinis, 99,999% grynumas, Kurt J. Lesker Company) taikiny. Atstumas tarp taikinio ir pagrindo buvo 8–10 cm.

Pagrindinis slėgis buvo iki $9,0 \cdot 10^{-4}$ Pa, darbinis slėgis – iki 0,89 Pa. Pagrindai buvo įžeminti, išskyrus DLC:Ag-2, DLC:Ag-2', DLC:Ag-6 bandinius, kuriems buvo pridėti atitinkamai -100 V, -150 V, -50 V priešįtampiai. Užnešimo trukmė buvo parinkta siekiant gauti pastovią dangos masę (DLC:Cu) arba pastovų storį (DLC, DLC:Ag). Visos užnešimo sąlygos pateiktos 3.1 lentelėje. Gryno sidabro (bandinys Ag-100) dangos buvo užneštos elektroninio spindulio garinimo metodu CUBIVAP sistemoje. Slėgis kameroje buvo mažesnis nei 0,13 Pa, užnešimo greitis – apie 1,3 Å/s. DLC, Ag ir DLC:Ag dangų siekiamas storis buvo apie 60 nm.

3.1 lentelė. Bandinių pavadinimai ir DLC, DLC:Ag ir DLC:Cu bandinių magnetroninio dulkinimo sąlygos. Čia I – impulso srovė, t – nusodinimo trukmė

Bandinys	Dujų srautas (sccm)		Šaltinio galia		I (A)	t (s)	Taikiny
	Ar	C ₂ H ₂	Įtampa (V)	Srovė (A)			
DLC-0	70	11,7	432-450	0,09-0,11	DC ^a	784	C
DLC-0'	70	11,7	430	0,09-0,12	DC	159 7	C
DLC:Ag-2	80	7,8	405-413	0,12-0,15	DC	321	Ag
DLC:Ag-2'	80	7,8	396	0,1	DC	205	Ag
DLC:Ag-6	80	7,8	387-392	0,1	DC	223	Ag
DLC:Ag-7	70	11,7	387-392	0,1-0,12	DC	300	Ag
DLC:Ag-8	70	11,7	369-379	0,09-0,1	DC	276	Ag
DLC:Ag-14	80	5,4	404	0,09-0,13	DC	171	Ag
DLC:Ag-14'	80	7,8	395	0,08-0,09	DC	295	Ag
DLC:Ag-15	80	5,4	420	0,1	DC	178	Ag
DLC:Cu-14	63	60,3	590	0,04	8	464	Cu
DLC:Cu-27	63	30,5	595	0,02	4,4	450	Cu
DLC:Cu-33	63	7,8	580	0,02	2,4	458	Cu
DLC:Cu-44	63	3,9	580	0,02	2,4	425	Cu
DLC:Cu-49	63	14,9	730	0,16	30	60	Cu

^aNuolatinė srovė (angl. *direct current*).

3.2. Struktūrų formavimas

Struktūros periodas Λ (nm) interferencija paremtuose metoduose apskaičiuojamas pagal [15]:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2n \sin \theta'} \quad (3.1)$$

čia λ – lazerio bangos ilgis (nm), n – aplinkos medžiagos lūžio rodiklis (šiuo atveju oro, $n = 1$), θ' – šviesos kritimo kampas. HL θ buvo keičiamas keičiant veidrodžių padėtis, o DLIP – pakeičiant vieno periodo difrakcinį optinį elementą į kito periodo.

Holografinė litografija buvo naudojama periodinėms struktūroms formuoti pozityviniame ma-P 1205 fotoreziste (Micro resist technology) ant 2×2 cm² plukdyto stiklo (Gravera) pagrindu. Fotorezisto sluoksnio storis, esant 3000 rpm,

buvo 0,5 μm . Eksponavimui buvo naudojamas 442 nm bangos ilgio, 90 mW galios HeCd lazeris (CVI Melles Griot 4074-P-A03). Lazerio spindulys buvo išplėstas erdvinio filtru: 40 \times , 0,65 skaitinės apertūros objektyvu (Lomo) ir 30 μm apertūra (Standa). Jis buvo sukolinuotas 50 mm skersmens, 75 mm židinio nuotolio išgaubtuju lęšiu (Eksma Optics). Spindulys buvo padalintas 50 \times 50 mm², 1800 linijų milimetre difrakcinės gardelės spindulio dalikliu (Thorlabs). Padalinti spinduliai buvo suvesti bandinio paviršiuje naudojant 50 mm dielektrinį veidrodį (Eksma Optics). Galutinis interferuojančių spindulių skersmuo buvo 5 cm. Eksponavimo laikas buvo nuo 4 iki 9 sekundžių ir lazerio galios tankis ties bandiniu buvo 2,9–4,3 mW/cm². Po eksponavimo bandiniai buvo ryškinami MF-26A ryškalu (Micro resist technology) 9–14 s.

Tiesioginis lazerinis interferencinis struktūrizavimas buvo naudojamas periodinėms struktūroms formuoti DLC:Ag dangose. Tam buvo naudojama antroji Yb:KGW Pharos lazerio (Light Conversion) harmonika (515 nm bangos ilgis) ir FemtoLab mikro- / nanoapdirbimo sistema (Altechna R&D). Lazerio impulso trukmė buvo 290 fs, pasikartojimo dažnis – 40 kHz, spindulio matmenys – 75 \times 75 μm^2 . Siekiant gauti tolygų kvadratinį šviesos pasiskirstymą, Gausinės formos spindulys buvo išplėstas ir nukreiptas per kvadratinę apertūrą. Difrakcinis optinis elementas (DOE) buvo panaudotas lazerio spinduliui padalinti į du simetriškus vienodo intensyvumo spindulius, kauke blokuojant nepageidaujamus difrakcijos maksimumus. 4f lęšių sistema buvo panaudota spinduliams suvesti ant bandinio paviršiaus. Lazeris, XYZ bandinio stalelis, slopintuvas ir DOE buvo valdomi SCA programine įranga (Altechna R&D). Kad struktūra būtų gauta didesniame plote, lazeriu buvo paveikiamas 4 \times 4 spindulio dydžio laukas, ir galutinis bandinio paviršiuje suformuotos struktūros plotas buvo 300 \times 300 μm^2 . Lazerio įtėkis DLC:Ag dangoms buvo 1–17 mJ/cm², DLC – 1–145 mJ/cm², grynai sidabru – 6–145 mJ/cm². Visais atvejais impulsų skaičius buvo nuo 1 000 iki 125 000.

3.3. Mikroskopijos metodai ir vaizdų analizė

Periodinės struktūros fotoreziste (100 \times objektyvas) ir bendros paveiktos zonos DLC (20 \times objektyvas) buvo tiriamos optiniu mikroskopu B-600MET (Optika). Iš šių vaizdų buvo nustatytas DLC abliacijos slenkstis naudojant formulę [16]:

$$D^2 = 2w^2 \ln \frac{\Phi}{\Phi_{\text{th}}}, \quad (3.2)$$

čia D – matomo poveikio skersmuo (μm), w – apytikris lazerio dėmės ant bandinio paviršiaus dydis (μm), Φ – lazerio įtėkis (mJ/cm²), Φ_{th} – abliacijos slenkstis (mJ/cm²). DLC:Ag dangų paviršius buvo paveiktas daug tolygiau, todėl nebuvo įmanoma išmatuoti paveiktos zonos skersmens ir šiuo metodu nustatyti abliacijos slenkščio.

Dauguma bandinių buvo tiriami skenuojančiu elektronų mikroskopu (SEM) Quanta 200 FEG (FEI). DLC:Ag nanokompozitai ant silicio pagrindo ir sidabro dangos ant silicio ir kvarco pagrindų buvo tiriami SEM S-4800 (Hitachi). Pirmuoju atveju darbinis atstumas buvo 7,3 mm, greitinanti įtampa – 30 kV, emisijos srovė – 160 μ A, skenavimo išlaikymo trukmė – 10 μ s. Antruoju atveju darbinis atstumas buvo 6 mm, greitinanti įtampa – 15 kV, elektronų spindulio srovė – 10 μ A, skenavimo išlaikymo trukmė – 15 μ s.

DLC ant silicio ir kvarco pagrindų bei DLC:Ag ant kvarco pagrindo buvo tiriami helio jonų mikroskopu (angl. *helium ion microscope*, HIM) ORION NanoFab (Zeiss). Krūviui neutralizuoti buvo pridėta bandinio įtampa (-60 V) ir panaudotas elektronų spindulys (600 eV). Darbinis atstumas buvo 10 mm, greitinanti įtampa – 25 kV, spindulio srovė – 0,260 pA, skenavimo išlaikymo trukmė – 2 μ s.

Iš mikrofotografijų buvo nustatomas lazeriu paveiktų linijų plotis, kuris galėtų suteikti informacijos apie slenkstinę nanokompozitų lazerinio poveikio (struktūrizavimo ar abliacijos) vertę. Kiekvienai lazeriu paveiktos zonos mikrofotografijai buvo atliekama dvimatė greitoji Furjė transformacija (angl. *fast Fourier transform*, FFT), kuri parodo difrakcinį vaizdą, naudojant „ImageJ“ programą [17]. Jeigu difrakcinis vaizdas turi ne tik nulinį maksimumą, vadinasi, bandinyje yra suformuota periodinė struktūra, ir galima daryti apytiksles išvadas apie struktūrizavimo slenkstį. Iš FFT taip pat buvo nustatomas struktūrų periodas. Iš SEM vaizdų „ImageJ“ programa taip pat buvo atliekama nanodalelių dydžių skirstinio analizė. Gauti dalelių duomenys buvo filtruojami imant tik tas daleles, kurios patenka į lazeriu paveiktų linijų plotį, ir apskaičiuojamas jų skersmuo. Dalelių pasiskirstymui pagal skersmenis buvo pritaikytas lognormalinis skirstinys „Origin“ programoje, iš kurio nustatytas centrinis dalelės skersmuo x_c [18]:

$$y = y_0 + \frac{A}{\sqrt{2\pi\omega x}} e^{-\frac{(\ln \frac{x}{x_c})^2}{2\omega^2}}, \quad (3.3)$$

čia y koordinatė reiškia dalelių skaičių procentais, o x koordinatė – dalelės skersmenį, y_0 yra atsvara, A – plotas po kreive, ω – standartinio nuokrypio logaritmas.

DLC:Cu bandinių skerspjūviai buvo tiriami pralaidumo elektronų mikroskopu (TEM) Tecnai G2 F20 X-TWIN (FEI) su 200 kV Šotki tipo elektronų emisijos šaltiniu. DLC:Ag-2 ir DLC:Ag-15 buvo tiriami Talos F200X (FEI) TEM naudojant 200 kV greitančią įtampą. TEM nuotraukos buvo naudojamos tikrajam dangų storiui nustatyti.

3.4. Cheminės analizės metodai

Elementinė dangų sudėtis buvo nustatyta rentgeno spindulių energijos dispersijos spektroskopijos (angl. *energy dispersive X-ray spectroscopy*, EDS)

metodu. Tam buvo naudojama Quantax 200 sistema su XFlash 4030 detektoriumi (Bruker) Quanta 200 FEG (FEI) skenuojančiame elektronų mikroskope. Pirminė energija buvo 5 keV.

Skirtingų anglies darinių struktūra buvo tiriama naudojant Ramano spektroskopiją. Tam buvo panaudotas Renishaw inVia Ramano spektrometras su 532 nm bangos ilgio 45 mW galios sužadavimo lazeriu ir 50×, 0,75 skaitinės apertūros mikroskopo objektyvu. Lazero galia ant bandinio paviršiaus buvo 1%, o apšvitos laikas – 10 s. Gauto spektro smailės buvo aprašomos Gauso funkcija „Origin“ programoje:

$$y = y_0 + \frac{A}{\omega \sqrt{\frac{\pi}{2}}} e^{-2\frac{(x-x_c)^2}{\omega^2}}, \quad (3.4)$$

čia y koordinatė reiškia intensyvumą, x koordinatė – banginį skaičių, y_0 yra atsvara, x_c – smailės centras (smailės maksimumo pozicijos koordinatė), ω – smailės plotis, A – plotas po kreive.

3.5. Optinių savybių analizės metodai

Optinis dangų pralaidumas ir atspindys buvo tiriami ultravioletinės-regimosios-infraraudonosios (UV-Vis-NIR) šviesos spektroskopijos metodu. Tam buvo naudojamas AvaSpec-2048 (Avantes) arba V-670 (Jasco) spektrometras ir AvaLight-DHC (Avantes) šviesos šaltinis. Iš šių matavimų buvo apskaičiuojama dangos šviesos sugertis. Dangų sklaida buvo tiriama integruojančioje sferoje RTC-060-SF (Labsphere) su stabilizuotu halogeniniu šviesos šaltiniu SLS301 (ThorLabs) ir Maya 2000Pro spektrometru (Ocean Optics).

Spektroskopinės elipsometrijos (SE) matavimams atlikti buvo naudojamas spektroskopinis elipsometras GES5-E (Semilab) atspindžio režimu. Jame naudojama ksenono lempa, kuri skleidžia 185–2000 nm šviesos spektrą. Atspindėtą šviesą registruoja UV-Vis CCD detektorius 190–900 nm diapazone su 0,8 nm skiriamąja geba. Matavimų metu šviesos kritimo kampas buvo keičiamas nuo 30° iki 75° su 5° žingsniu. Buvo naudojami du spindulio režimai: lygiagretaus spindulio (3 mm × 12 mm esant 75°) ir mikrotiško (365 μm × 470 μm esant 75°). Rezultatų analizei atlikti bandinio optinis modelis buvo sukurtas naudojant „Spectroscopic Ellipsometry Analyzer“ v1.3.8 (SEA, Semilab) programą. Nanokompozitinės medžiagos sluoksnis buvo apibūdintas Bruggeman efektyviosios terpės artiniu, sidabras ar varis šiame sluoksnyje – $n&k$ failais iš duomenų bazės, DLC – Cody-Lorentz dispersijos dėsniumi. Sumodeliuoto optinio atsako atitikimas eksperimentiniams duomenims buvo tikrinamas pagal šaknį iš vidutinės kvadratinės paklaidos (angl. *root mean square error*, RMSE) ir determinacijos koeficientą (R^2). DLC:Cu dangos buvo apibūdintos 10 sluoksnių modeliu, remiantis TEM vaizdais ir rentgeno spindulių atspindžio rezultatais, o DLC:Ag – 1–2 sluoksnių modeliu. Iš sluoksniuotų modelių gautos optines

savybes apibūdinančios kreivės buvo perskaičiuotos į efektyviasias, kad visą dangą apibūdintų viena dispersijos kreivė.

Papildomai buvo sudaromas elipsometrinių parametų žemėlapis lazeriu paveiktoms dangoms. Matavimai buvo atliekami 101×98 taškų plote kas $30 \mu\text{m}$ naudojant mikrotiško režimą esant 75° šviesos kritimo kampui. Bendras tirtas bandinio plotas buvo apie $3 \times 3 \text{ mm}^2$. Gauti duomenys buvo filtruojami parenkant vieną bangos ilgį kiekvienam žemėlapiui, kuris duoda didžiausią elipsometrinių parametų kontrastą.

3.6. Kiti analizės metodai

DLC:Ag bandinių dvifotonės liuminescencijos (angl. *two-photon luminescence*, TPL) matavimai buvo atliekami naudojant dvi skirtingas sistemas. Vieną jų sudarė 100 fs, 795 nm bangos ilgio, 75,5 MHz pasikartojimo dažnio titano-safyro lazeris (Tsunami, Spectra Physics) ir invertuotas skenuojantis fluorescencinis mikroskopas su $100\times$, 0,65 skaitinės apertūros objektyvu [19]. Kitą sudarė 200 fs, 730-860 nm bangos ilgio, 80 MHz pasikartojimo dažnio titano-safyro lazeris ir skenuojantis optinis mikroskopas su $100\times$, 0,70 skaitinės apertūros objektyvu [20].

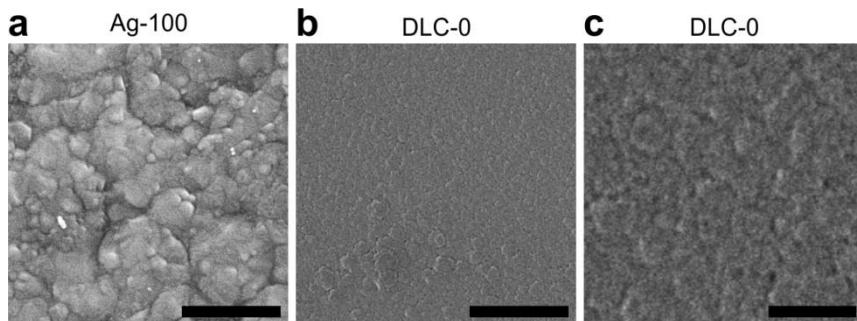
DLC:Cu bandinių rentgeno spindulių atspindžio (angl. *X-ray reflectivity*, XRR) matavimai buvo atlikti naudojant D8 Discover difraktometrą (Bruker) su vario K_α rentgeno spindulių šaltiniu ($\lambda = 0,154 \text{ nm}$), lygiagretaus spindulio 60 mm Giobelio veidrodžio geometrija. Rentgeno spindulių generatorius naudoja 40 kV įtampą ir 40 mA srovę. 2Theta-Omega skenavimo diapazonas buvo nuo 0° iki 5° su $0,0025^\circ$ žingsniu ir 0,1 s matavimo trukme kiekviename žingsnyje. Modeliavimas buvo atliekamas „DIFFRAC.Leptos“ (Bruker) programine įranga. Modelį sudarė 10 sluoksnių su kintamu storiu, elektronų tankiu ir šiurkštumu. Iš rezultatų buvo nustatytas efektyvusis dangos tankis.

4. REZULTATAI IR DISKUSIJA

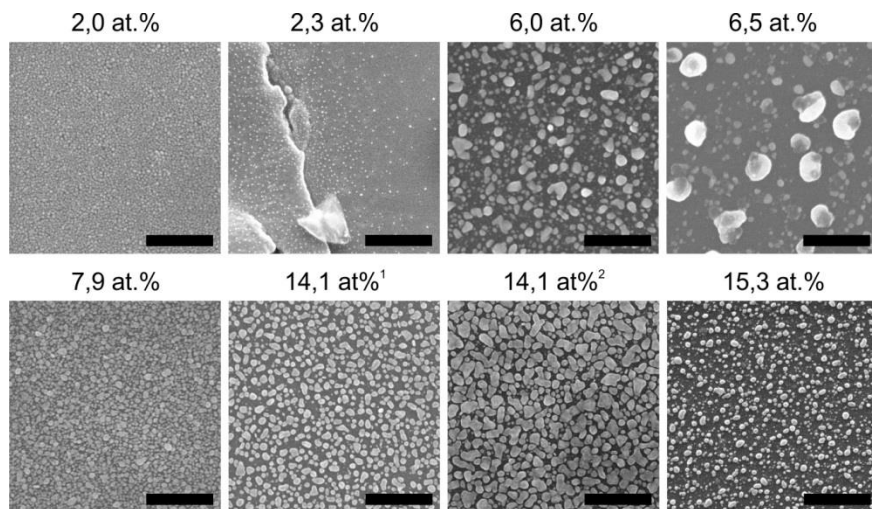
4.1. Nepaveiktų nanokompozitinių plonų dangų analizė

Iš EDS tyrimo buvo nustatyta, kad sidabro atominė koncentracija DLC:Ag dangose yra nuo 2,0 at.% (DLC:Ag-2) iki 15,3 at.% (DLC:Ag-15), o vario atominė koncentracija DLC:Cu dangose yra nuo 13,6 at.% (DLC:Cu-14) iki 48,8 at.% (DLC:Cu-49). Bandiniai yra atitinkamai pavadinti pagal metalo koncentraciją juose. Suformuotų grynų sidabro ir DLC plonų dangų paviršiaus mikrofotografijos yra pateiktos 4.1 pav. Nuotraukose matomas skirtingas kontrastas, kuris sudaro įspūdį, kad sidabras yra šiurkštesnis nei DLC. Suformuotų DLC:Ag dangų SEM mikrofotografijos pateiktos 4.2 pav. Mažiausios sidabro koncentracijos (2,0 at.% ir 2,3 at.%) dangose sunku nustatyti,

ar tai labai mažos dalelės, ar paviršinis šiurkštumas. Visi kiti bandiniai turi aiškias įvairių dydžių daleles.



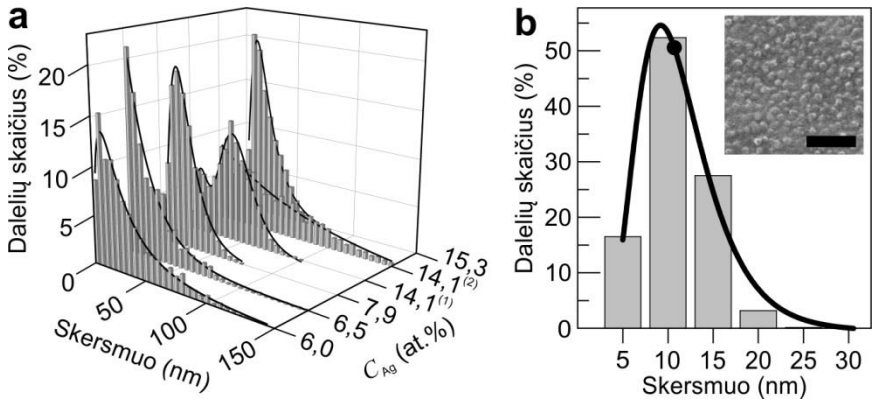
4.1 pav. Grynų, nepaveiktų medžiagų mikrofotografijos (a) Ag-100, SEM, žymės ilgis 500 nm; (b) DLC-0, HIM, žymės ilgis 500 nm; (c) priartintas (b) vaizdas, žymės ilgis 100 nm. Publikuota [A4]



4.2 pav. Skirtingų sidabro koncentracijų DLC:Ag nanokompozitinių plonų dangų ant silicio pagrindo SEM nuotraukos. Žymės ilgis 500 nm. ¹DLC:Ag-14, ²DLC:Ag-14'. Publikuota [A4], pristatyta [B2, B3, B5, B7, B9, B13]

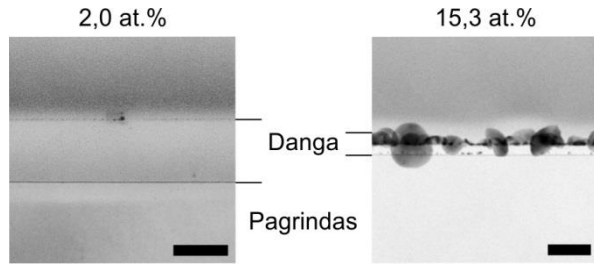
Nanodalelių tankis DLC:Ag dangose, nustatytas iš SEM mikrofotografijų, yra: $293 \mu\text{m}^{-2}$ (DLC:Ag-6), $244 \mu\text{m}^{-2}$ (DLC:Ag-7), $920 \mu\text{m}^{-2}$ (DLC:Ag-8), $336 \mu\text{m}^{-2}$ (DLC:Ag-14), $249 \mu\text{m}^{-2}$ (DLC:Ag-14') ir $601 \mu\text{m}^{-2}$ (DLC:Ag-15). Dalelių skersmenų histogramos su lognormaliniu skirstiniu yra pateiktos 4.3 pav. Visi bandiniai, išskyrus DLC:Ag-14, pasižymi unimodaliu pasiskirstymu, o pastarasis – bimodaliu. Dviejų bandinių (DLC:Ag-7 ir DLC:Ag-14') dalelių

skirstinys nėra lognormalinis dėl itin didelio mažiausių (< 5 nm) dalelių skaičiaus. Didelių dalelių skaičius šiuose bandiniuose mažėja eksponentiškai. Taip pat DLC:Ag-14' bandinio skirstinys skiriasi nuo tos pačios sidabro koncentracijos DLC:Ag-14 bandinio skirstinio. To priežastis galimai yra skirtingas dangų storis: vienoje dangoje dalelės gali būti labiau pasiskirsčiusios tūryje, o kitoje – paviršiuje. Kadangi lognormalinis skirstinys nėra simetrinis, centrinis dalelių skersmuo x_c , apskaičiuotas pagal (3.3) formulę, nesutampa su pasiskirstymo smaile. Nustatyti tokie x_c : 11 nm (DLC:Cu-62), 26 nm (DLC:Ag-6), 24 nm (DLC:Ag-8), 20 nm (DLC:Ag-15), mažiau nei 5 nm (DLC:Ag-7, DLC:Ag-14'). DLC:Ag-14 atveju yra du centriniai skersmenys: 17 nm ir 46 nm.

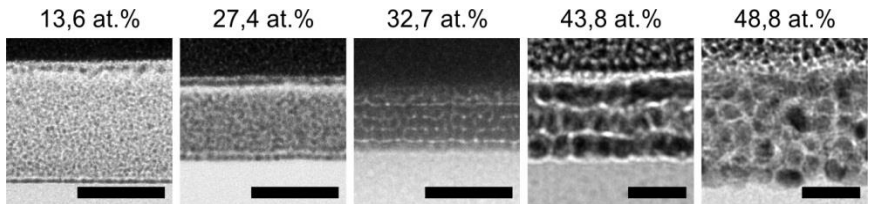


4.3 pav. Dalelių pasiskirstymas pagal skersmenis ($R^2 \geq 0,96$): (a) DLC:Ag dangose, ⁽¹⁾DLC:Ag-14, ⁽²⁾DLC:Ag-14'; (b) DLC:Cu (62,0 at.% Cu) dangoje. Taškas žymi centrinį skersmenį x_c . Įdėta nuotrauka rodo šio bandinio HIM vaizdą 20° pakreipimo kampu. Žymės ilgis 100 nm. Publikuota [A3, A4]

DLC:Ag-2 ir DLC:Ag-15 bandinių TEM skerspjūvis yra pateiktas 4.4 pav.: sidabro nanodalelės yra linkusios susiformuoti ne dangos tūryje, bet paviršiuje. Iš TEM EDS tyrimo buvo pastebėta, kad deguonies ir sieros koncentracija yra padidėjusi prie sidabro dalelių. Visų DLC:Cu bandinių skerspjūviai yra pateikti 4.5 pav.: mikrofotografijose yra matomas arba tolygus vario pasiskirstymas tūryje (DLC:Cu-14, DLC:Cu-27), arba dangų susisluoksniavimas (DLC:Cu-33, DLC:Cu-44, DLC:Cu-49). Vario nanodalelių skersmuo, nustatytas iš TEM vaizdų, yra 2–6 nm.



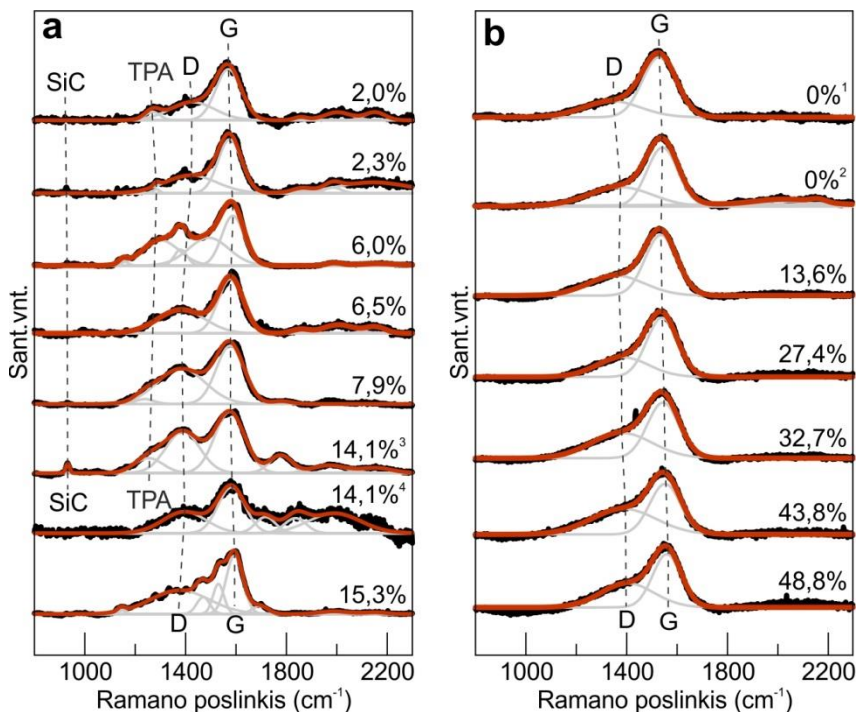
4.4 pav. DLC:Ag bandinių skerspjūvio TEM vaizdai. Žymės ilgis 100 nm



4.5 pav. DLC:Cu bandinių skerspjūvio TEM vaizdai. Žymės ilgis 13,6–32,7 at.% atveju yra 50 nm, 43,8–48,8 at.% – 20 nm. Publikuota [A1]

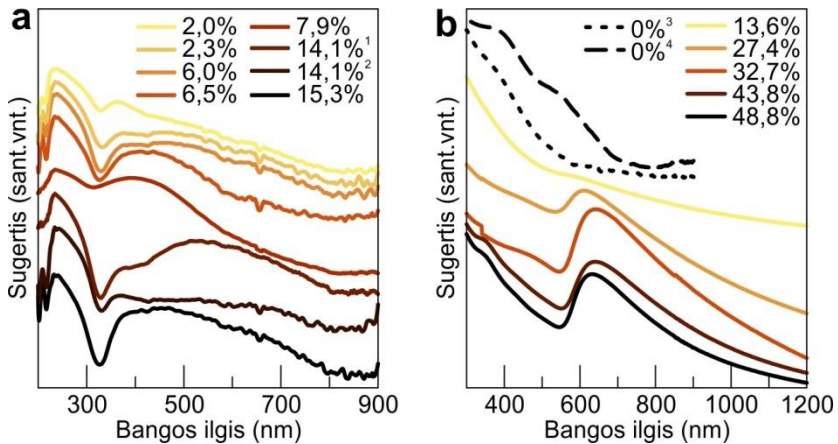
Iš XRR matavimų buvo nustatytas 2 nm paviršinis DLC:Cu dangų šiurkštumas. Sukurtas 10-ties sluoksnių modelis gerai atitiko TEM vaizdus (4.5 pav.): TEM vaizduose matomos šviesios juostos atitiko mažesnio tankio sluoksnius XRR. Buvo nustatyta, kad efektyvusis dangos tankis didėja didėjant vario koncentracijai dangoje. Apskaičiuotas DLC tankis yra: $1,722 \text{ g/cm}^3$ (DLC:Cu-14), $1,653 \text{ g/cm}^3$ (DLC:Cu-27), $1,537 \text{ g/cm}^3$ (DLC:Cu-33), $1,503 \text{ g/cm}^3$ (DLC:Cu-44) ir $1,427 \text{ g/cm}^3$ (DLC:Cu-49).

Dangų Ramano spektroskopijos rezultatai su Gauso sutapdintomis smailėmis ((3.4) formulė) yra pavaizduoti 4.6 pav. DLC spektrai turi būdinguosius amorfinės hidrogenizuotos deimanto tipo anglies spektro požymius [21]: D petį (1400 cm^{-1}) ir G smailę (1535 cm^{-1}). DLC:Ag nanokompozitinėse dangose D petys išryškėja ir tampa D smaile, kai sidabro koncentracija viršija 6,0 at.%. Taip pat DLC:Ag spektruose išryškėja šios smailės: SiC (932 cm^{-1}) [22] ir transpoliacetilenas (TPA, 1245 cm^{-1}) [23]. DLC:Cu Ramano sklaidos spektrai yra identiški DLC spektrams, neturi jokių papildomų smailių.



4.6 pav. Ramano sklaidos DLC:Ag (a) ir DLC, DLC:Cu (b) bandinių spektrai ($R^2 \geq 0,94$).
¹DLC-0, ²DLC-0', ³DLC:Ag-14, ⁴DLC:Ag-14'. Publikuota [A4]

Normalizuoti dangų sugerties spektrai, perslinkinti vienas kito atžvilgiu, yra pavaizduoti 4.7 pav. DLC:Ag bandinių spektrai pasižymi smailėmis arba pečiais 363–530 nm diapazone, kas yra siejama su LSPR. Visi bandiniai su sidabro dalelėmis pasižymi sugerties minimumu ties 315–333 nm. Jie, kaip ir DLC, yra skaidresni tolstant į infraraudonąją sritį. Bimodalinis DLC:Ag-14 bandinio dalelių pasiskirstymas (4.3 pav.) gali būti nuspėtas iš sugerties spektro: šio bandinio spektras turi tiek smailę, tiek pečių. DLC:Cu nanokompozitų atveju mažiausios vario koncentracijos (13,6 at.%) bandinio spektras nepasižymi plazmonine smaile, o kitų DLC:Cu bandinių spektrai turi smailes 610–641 nm diapazone. Artima smailių padėtis rodo nedidelius skirtumus tarp vario nanodalelių dydžio nanokompozituose. Yra nustatyta, kad LSPR pasižymi tie vario nanokompozitai, kuriuose jo yra daugiau nei 10 at.% ir dalelės yra didesnės nei 2 nm [24, 25], tai paaiškina smailės nebuvimą DLC:Cu-14 bandinio sugerties spektre.



4.7 pav. DLC:Ag (a) ir DLC, DLC:Cu (b) bandinių optinės sugerties normalizuoti ir perslinkinti vienas kito atžvilgiu spektrai. ¹DLC:Ag-14, ²DLC:Ag-14², ³DLC-0, ⁴DLC-0². Legendoje pažymėta metalo atominė koncentracija. Publikuota [A1, A4]

Dangų storiai, gauti taikant skirtingus tyrimo metodus, yra palyginti 4.1 lentelėje. Kadangi TEM yra vienintelis tiesioginis storio nustatymo metodas šiame tyrime, todėl šį storį reiktų laikyti tikroju dangos storiu. Geriausias atitikimas yra tarp DLC:Cu rezultatų, nes šioms dangoms XRR ir SE teoriniam modeliui sudaryti buvo naudojami 10-ties sluoksnių struktūrų modeliai. DLC:Ag-2 SE storis yra mažesnis nei TEM galimai todėl, kad SE modelyje buvo priimta, jog dangoje yra nanodalelių, kai iš tiesų jų buvo itin mažai. Blogiausiai rezultatai atitinka su kvarcinio mikrobalanso jutiklio duomenimis. Tačiau tai yra masės matavimo metodas, o dangos storis yra nustatomas netiesiogiai. Todėl, pakitus dangos tankiui, gali atsirasti duomenų paklaidų. DLC ir DLC:Ag bandiniai išsiskiria didele SE matavimų paklaida, kuri galėjo atsirasti dėl dangos netolygumo (kai kurios dangos pasižymėjo spalvų pokyčiais, matomais vizualiai). Kiti neatitikimai tarp duomenų gali būti paaiškinti neatsižvelgimu į paviršiaus šiurkštumą ar nepakankamu sluoksnių sandūrų aprašymu modeliuose.

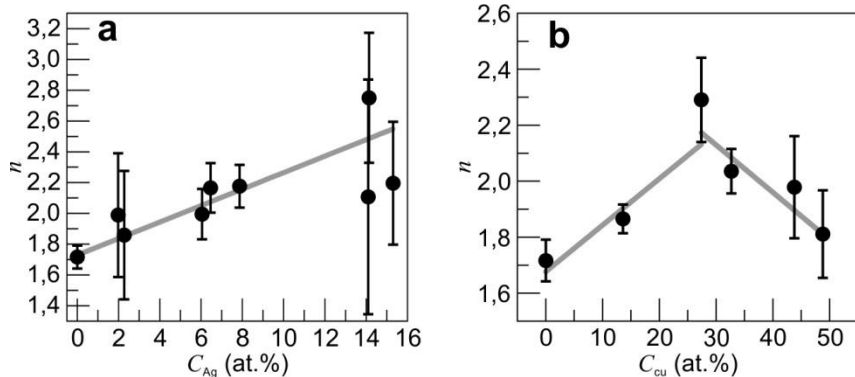
4.1 lentelė. DLC, DLC:Ag ir DLC:Cu storių, gautų iš kvarcinio mikrobalanso jutiklio, pralaidumo elektronų mikroskopijos (TEM), rentgeno spindulių atspindžio (XRR) ir spektroskopinės elipsometrijos (SE) duomenų, palyginimas

Bandinys	Storis (nm)			
	Kvarcinis mikrobalansas	TEM	XRR	SE ^a
DLC-0	60	-	-	193,2 ± 29,0
DLC-0 ²	170	-	-	220,6 ± 68,7
DLC:Ag-2	140	117,7	-	74,7 ± 17,4
DLC:Ag-2 ²	100	-	-	54,5 ± 23,2
DLC:Ag-6	120	-	-	61,0 ± 11,7

DLC:Ag-7	100	-	-	57,1 ± 10,1
DLC:Ag-8	60	-	-	57,8 ± 13,9
DLC:Ag-14	60	-	-	42,5 ± 12,9
DLC:Ag-14'	160	-	-	65,5 ± 12,1
DLC:Ag-15	100	26,8-74,8	-	50,1 ± 20,2
DLC:Cu-14	100	64,7	51,2	50,7 ± 7,0
DLC:Cu-27	100	48,2	43,8	43,4 ± 1,1
DLC:Cu-33	100	33,4	24,4	32,3 ± 2,5
DLC:Cu-44	100	30,4	25,4	27,6 ± 2,2
DLC:Cu-49	100	40,5	36,4	34,1 ± 0,6

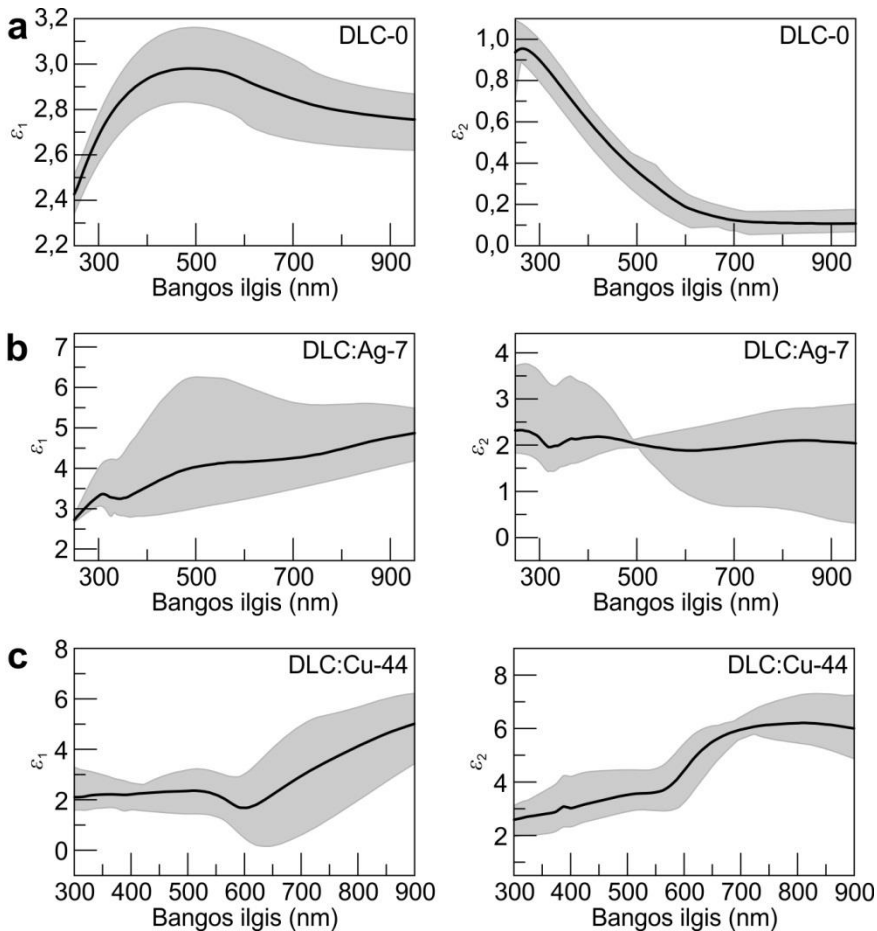
^aPaklaidos vertė spektroskopinės elipsometrijos rezultatuose yra standartinis nuokrypis verčių, gautų skirtinguose bandinio taškuose.

Metalų nanokompozitų lūžio rodiklių priklausomybė nuo metalo atominės koncentracijos pateikta 4.8 pav. DLC:Ag bandiniuose ši priklausomybė yra tiesinė (didėjant sidabro koncentracijai, lūžio rodiklis didėja). O DLC:Cu lūžio rodiklio priklausomybė nuo metalo koncentracijos nėra visiškai tiesinė: ji sudaryta iš dviejų dalių. Iš pradžių, kaip ir DLC:Ag atveju, lūžio rodiklis didėja didėjant vario koncentracijai, tačiau, dar labiau didinant koncentraciją (daugiau nei 27,4 at.%), lūžio rodiklis ima mažėti. 632,8 nm bangos ilgis yra artimas vario LSPR bangos ilgiui (600 nm), tai galėtų būti priežastis, kodėl mažos vario koncentracijos bandinys netinka tiesinei priklausomybei, kaip jau buvo pastebėta iš sugerties spektro (4.7 pav.).



4.8 pav. DLC:Ag (a) ir DLC:Cu (b) lūžio rodiklio, esant 632,8 nm bangos ilgiui, priklausomybė nuo metalo atominės koncentracijos. Taškai yra vidutinė vertė iš SE matavimų, o paklaidos – standartinis nuokrypis. Pilkos linijos yra tiesinės priklausomybės (atitinkamai $R^2 = 0,87$ ir $R^2 \geq 0,65$). Publikuota [A1]

DLC ir nanokompozitinių dangų dielektrinės funkcijos, gautos iš spektroskopinės elipsometrijos modeliavimo, sutapdinant su eksperimentinėmis kreivėmis, pateiktos 4.9 pav.



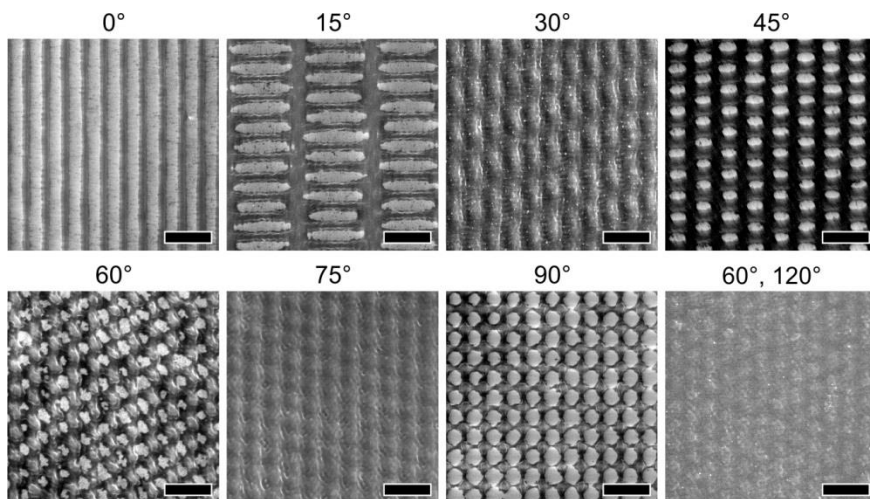
4.9 pav. Dielektrinės funkcijos realioji (ϵ_1) ir menamoji (ϵ_2) dalys: (a) DLC-0, (b) DLC:Ag-7, (c) DLC:Cu-44. Juoda linija yra visų to paties bandinio matavimų vidurkis, o pilka zona yra ribos tarp mažiausių ir didžiausių gautų verčių

DLC dielektrinės funkcijos menamoji dalis (4.9 pav.), apibūdinanti nuostolius medžiagoje, gerai sutampa su sugerties spektru (4.7 pav.): didėjant bangos ilgiui ϵ_2 , mažėja ir yra beveik pastovi infraraudonojoje srityje. DLC:Ag dielektrinių funkcijų ir sugerties spektruose (4.9 pav.) yra įdubimas ties maždaug 330 nm. Kadangi jo nėra DLC spektruose, tai jis yra tiesioginė sidabro pasekmė. Panašus ir DLC:Cu atvejis: čia abiejų metodų spektrai turi įdubimą ties maždaug 600 nm. DLC:Ag ir DLC:Cu dielektrinių konstantų spektrai smarkiai skiriasi nuo grynų medžiagų (sidabro ir vario) spektrų: realioji dalis nebeturi neigiamų verčių, o menamoji dalis yra beveik pastovi arba su nedideliais pokyčiais.

Funkcijos monotoniškumas galėjo atsirasti dėl rezultatų vidurkinimo, jeigu dangos optinės savybės skirtinguose matavimo taškuose smarkiai skyrėsi. Tačiau monotoniškumas yra teigiama dangų savybė, leidžianti tokias dangas pritaikyti prietaisuose, vienodai veikiančiuose esant bet kokiam bangos ilgiui. Taip pat ϵ_2 vertės nanokompozituose yra mažesnės nei grynų metalų, o tai naudinga siekiant išvengti energijos nuostolių. Kadangi dielektrinėse funkcijose vis dar yra išlikę ekstremumo taškai, būdingi gryniems metalams, šie nanokompozitai gali būti vadinami plazmoniniais.

4.2. Periodinės struktūros plonose dangose

Ištyrus pradines užneštų dangų savybes, jose buvo formuojamos periodinės struktūros. Pirmiausia buvo išbandytas vienmačių ir dvimačių periodinių struktūrų formavimas fotorezisto sluoksnyje naudojant holografinę litografiją. Gautų struktūrų (4.10 pav.) periodas buvo $1,2\ \mu\text{m}$, o taškinės gardelės tipai ir simetrijos buvo rombinė antros eilės (15° , 30° , 45° , 75°), trikampė antros ir šeštos eilės (atitinkamai dvigubas eksponavimas su 60° ir trigubas eksponavimas su 60° ir 120°) ir kvadratinė ketvirtos eilės (90°).

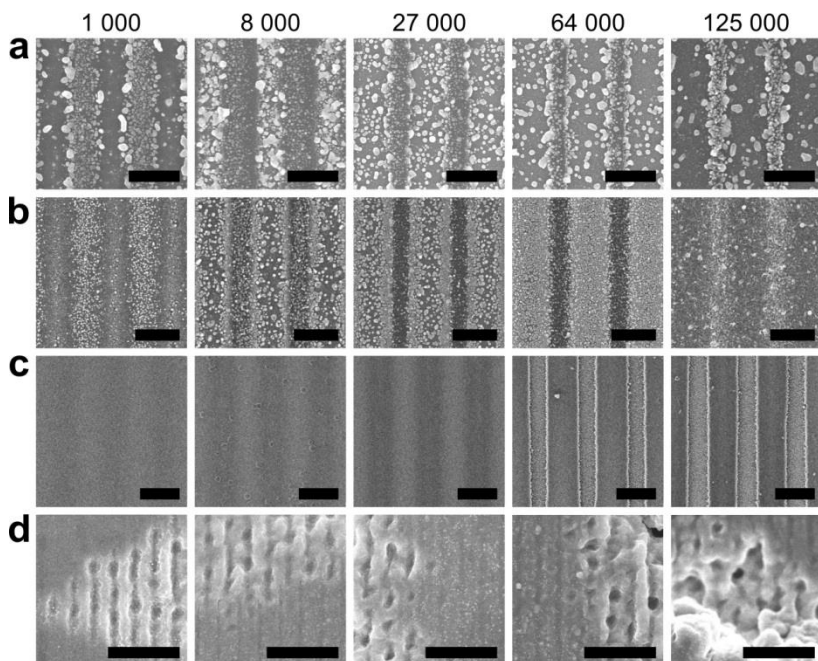


4.10 pav. 1D (0° , vienas eksponavimas) ir 2D (15° - 90° du eksponavimai, 60° , 120° trys eksponavimai) periodinių struktūrų fotoreziste SEM vaizdai. Žymės ilgis $3\ \mu\text{m}$.

Publikuota [A2]

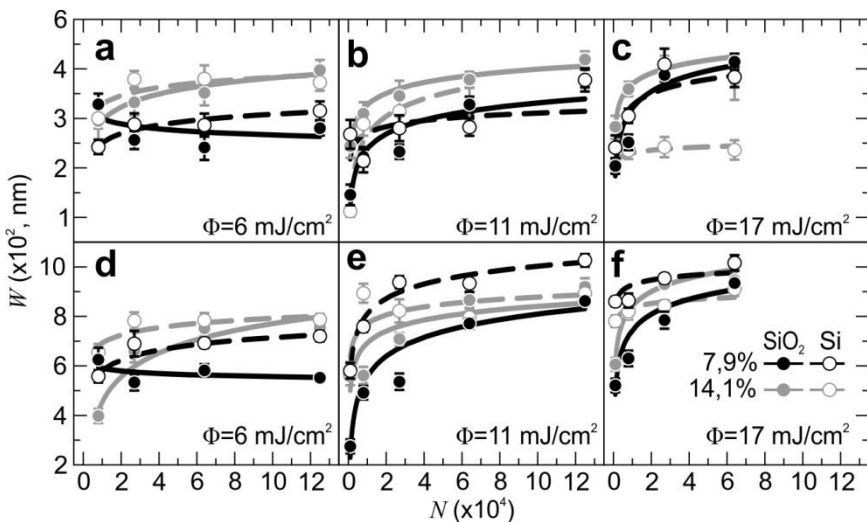
Skirtingų lazerio parametrų poveikis DLC:Ag nanokompozitiniams ir grynų DLC bei sidabro dangų bandiniams buvo tiriamas juose suformuojant $564 \pm 14\ \text{nm}$ ir $1306 \pm 46\ \text{nm}$ periodų vienmatis periodines struktūras tiesioginio lazerinio interferencinio struktūrizavimo metodu. Keletas būdingųjų struktūrų pateikta 4.11 pav. Gryno sidabro dangos buvo paveiktos didesniu energijos

tankiu, tačiau jose vis tiek nepavyko gauti tolygios periodinės struktūros: danga atšoko nuo pagrindo. Buvo sutarta, kad 145 mJ/cm^2 lazerio įtėkis yra mažesnis už abliacijos slenkstį.



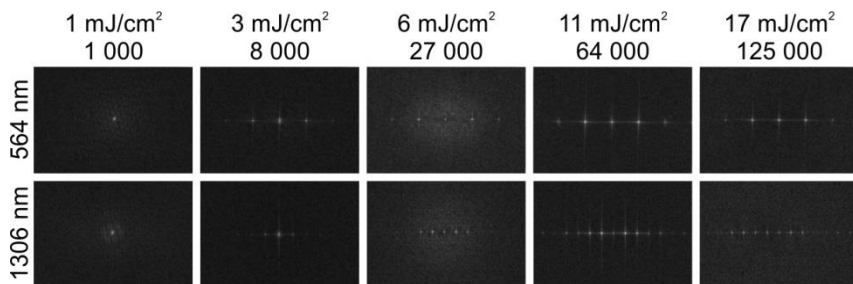
4.11 pav. Periodinių struktūrų vaizdai, gauti dangas paveikus 17 mJ/cm^2 lazerio įtėkiu ir 1000–125 000 impulsais: (a) DLC:Ag-8, 564 nm, SEM, silicio pagrindas, žymės ilgis 500 nm, (b) DLC:Ag-14, 1306 nm, SEM, silicio pagrindas, žymės ilgis $1 \mu\text{m}$, (c) DLC-0, 1306 nm, HIM, kvarco pagrindas, žymės ilgis $1 \mu\text{m}$, (d) 145 mJ/cm^2 , Ag-100, 564 nm, SEM, kvarco pagrindas, žymės ilgis $2 \mu\text{m}$. Publikuota [A4], pristatyta [B4, B5, B9, B11]

Lazeriu paveiktų linijų pločių tyrimas pateiktas 4.12 pav. Didėjant lazerio impulsų skaičiui, lazeriu paveiktos linijos plotis didėja, iki kol priartėja prie vertės, artimos struktūros periodui. Esant didesnėms lazerio įtėkio vertėms (11 ir 17 mJ/cm^2), padidėjimas yra staigesnis, palyginti su mažesnėmis įtėkio vertėmis (6 mJ/cm^2). Didinant impulsų skaičių iki 27 000, linijos plotis padidėja iki 2 kartų. Tolimesnis impulsų skaičiaus didinimas papildomai padidina linijos plotį iki 1,2 karto. Buvo iškelta hipotezė, kad iš linijos pločių analizės galima nustatyti struktūrizavimo slenkstį. Tačiau dėl sinusoidinio interferencinio lauko pasiskirstymo kai kuriais atvejais yra sunku nustatyti paveiktos linijos plotį, nes nėra ryškaus perėjimo iš nepaveiktos į nepaveiktą bandinio zonas, o tai didina matavimo paklaidas. Todėl struktūrizavimo slenkstinė vertė buvo nustatoma iš FFT.



4.12 pav. Lazerių paveiktų linijų pločių W priklausomybė nuo impulsų skaičiaus N ir skirtingo lazerio įtėkio: 6 mJ/cm² (a, d), 11 mJ/cm² (b, e), 17 mJ/cm² (c, f). Linijos yra orientacinės. Publikuota [A4], pristatyta [B11]

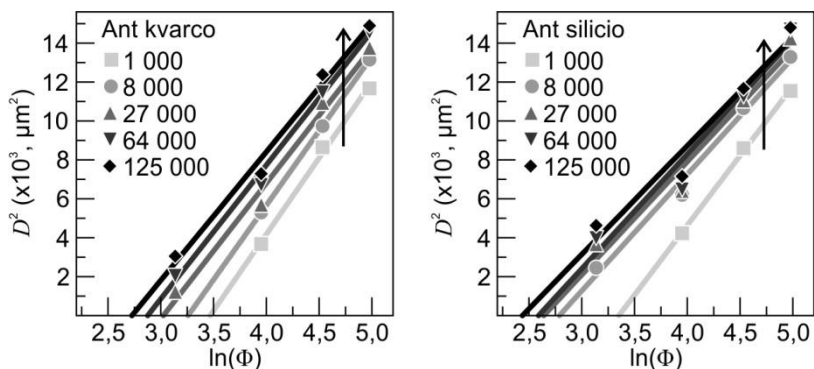
Keletas būdingųjų DLC:Ag dangų Furjė transformacijų pateikta 4.13 pav. Aiškiai išreikštas difrakcinis vaizdas Furjė transformacijoje rodo egzistuojančią periodinę struktūrą. Net jeigu suformuota struktūra neturi aiškių linijų, o tik šiek tiek paveiktą paviršių, tolygiai pereinanti į nepaveiktą, FFT vis tiek turi difrakcinį vaizdą. Tokiu atveju galima teigti, kad struktūrai formuoti panaudoti lazerio parametrai viršija struktūrizavimo slenkstinę vertę. Jeigu FFT yra tik vienas ryškus taškas (kaip, pavyzdžiui, 4.13 pav. 1 mJ/cm², 1 000 impulsų), tuomet periodinė struktūra esant šiems parametrams neegzistuoja, ir jie yra laikomi mažesniais už slenkstinę vertę.



4.13 pav. DLC:Ag-8 bandinio ant silicio pagrindo SEM mikrofotografijų Furjė transformacijos. Publikuota [A4], pristatyta [B11]

Iš Furjė transformacijų (4.13 pav.) taip pat matomas ir skirtingas struktūrų periodas, nes maksimumai yra išsidėstę skirtingais atstumais (ši sąlyga galioja, kai visos FFT daromos iš to paties didinimo mikrofotografijų).

Kadangi DLC buvo papildomai struktūrizuota naudojant didesnę energijos tankį, joje buvo pastebėtos skritulio formos paveiktos zonos. Išmatavus kiekvienos zonos skersmenį D , buvo nustatytas abliacijos slenkstis pagal (3.2) formulę (4.14 pav.). Gavus kiekvieno impulso skaičiaus abliacijos slenkstį, buvo galima nustatyti vieno impulso abliacijos slenkstį. DLC, Ag ir DLC:Ag bandinių struktūrizavimo ir abliacijos slenkstinių verčių santrauka pateikiama 4.2 lentelėje. Iš čia matyti, kad struktūrizavimo ir abliacijos slenkstinės vertės yra efektyviai sumažinamos padidinus impulsų skaičių. Kadangi dangai struktūrizuoti nėra būtina pašalinti medžiagą, tai struktūrizavimo slenkstis yra žemesnis už abliacijos. Skirtumas tarp DLC ir DLC:Ag struktūrizavimo slenkščių atsiranda dėl LSPR sukeltos efektyviosios šviesos sugerties sidabro nanodalelėse ir dėl lauko stiprinimo reiškinio sidabro ir DLC sandūroje, paveikus nanokompozitą šviesa. Nustatytas DLC abliacijos slenkstis skiriasi, kai dangos yra ant skirtingų pagrindų. Tai gali būti paaiškinta skirtingu pagrindų lūžio rodikliu, atspindžiu ir sugertimi.



4.14 pav. DLC-0 dangos lazeriu paveiktos zonos skersmens D priklausomybė nuo lazerio įtėkio Φ . Linijos yra tiesinės priklausomybės ($R^2 \geq 0,93$). Publikuota [A4], pristatyta [B11]

4.2 lentelė. DLC:Ag, DLC ir Ag struktūrizavimo ir abliacijos slenkščiai

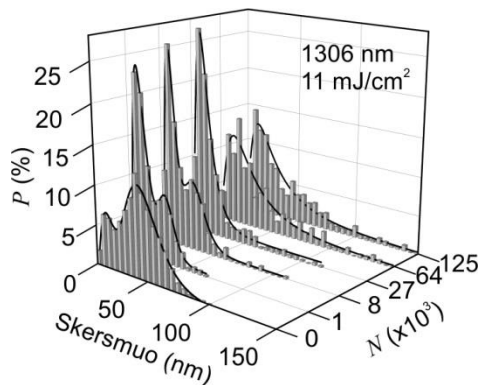
Bandinys	Slenkstinis įtėkis (mJ/cm^2) esant tam tikram impulsų skaičiui					
	1	1 000	8 000	27 000	64 000	125 000
DLC:Ag-8	-	<6	<3	<1	<1	<1
DLC:Ag-14	-	<11	<6	<6	<3	<3
DLC-0 ant silicio ^a	-	<6	<3	<3	<3	<3
DLC-0 ant kvarco ^a	-	>17	>17	<17	<11	<11
DLC-0 ant silicio ^b	148	45	26	22	21	18

DLC-0 ant kvarco ^b	156	51	41	32	28	24
Ag-100	-	>145	>145	>145	>145	>145

^aStruktūrizavimo slenkstis.

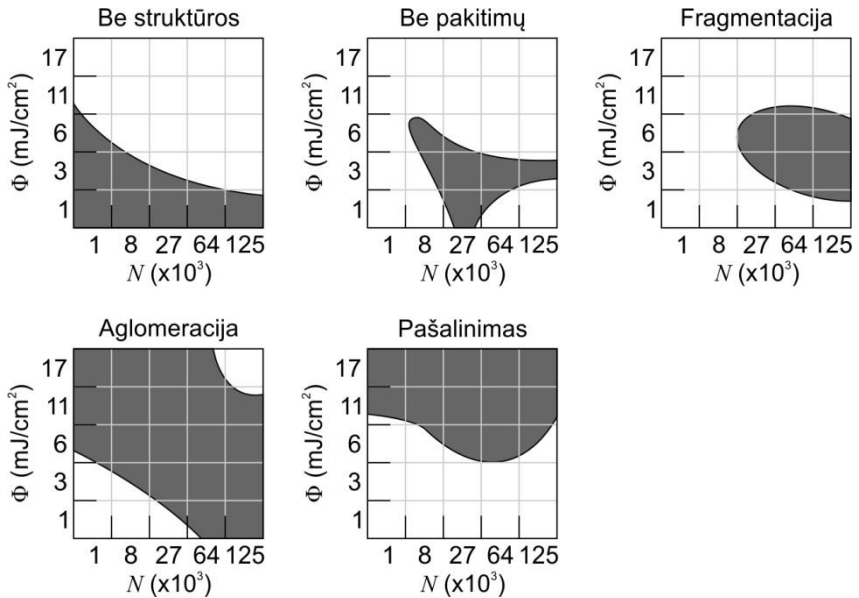
^bAbliacijos slenkstis.

Ištyrus DLC:Ag nanodalelių pokyčius jas paveikus skirtingų lazerio parametrų spinduliuote, buvo pastebėta, kad DLC:Ag-8 bandinio unimodalinis pasiskirstymas toks išlieka esant visiems tirtiems lazerio poveikiams, o DLC:Ag-14 (4.15 pav.) iš bimodalinio į unimodalinį pasikeičia paveikus bandinį $\Phi = 11 \text{ mJ/cm}^2$, $N = 27\,000$. Abiejų bandinių atveju, didėjant lazerio įtėkiui, centrinis dalelių skersmuo x_c slenkasi į didesnę pusę, kas rodo aglomeraciją. Kartu dalelių tankis sumažėja iki 7 kartų – dalelės aglomeruojasi, bet taip pat yra ir pašalinamos. Esant mažesnėms lazerio įtėkio vertėms ir impulsų skaičiui, buvo pastebėtas dalelių centrinio skersmens sumažėjimas, kas rodo dalelių fragmentaciją. Apibendrinant galima teigti, kad pradžioje vyksta dalelių fragmentacija, vėliau prasideda aglomeracija, o galiausiai įvyksta jų pašalinimas (4.16 pav.).



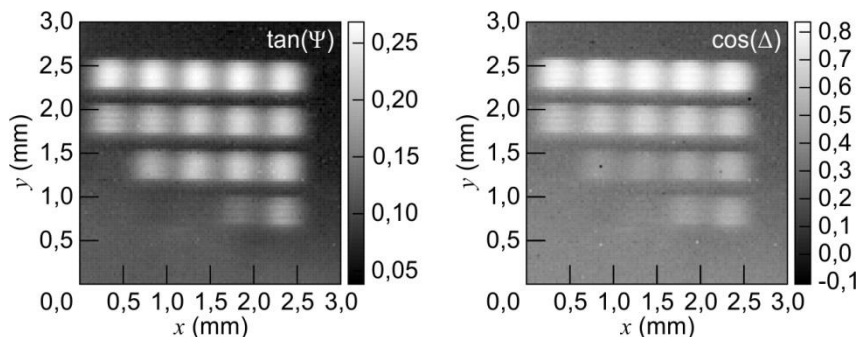
4.15 pav. DLC:Ag-14 bandinio ant silicio pagrindo sidabro nanodalelių skersmenų pasiskirstymas (0 impulsų atitinka nepaveiktą dangą). P yra atitinkamo skersmens dalelių procentinė dalis nuo visų paveiktų dalelių prie atitinkamo lazerio poveikio. $R^2 \geq 0,93$.

Publikuota [A4]



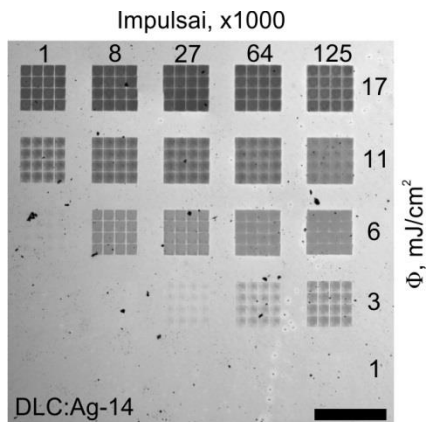
4.16 pav. Galimų nanodalelių pokyčių esant įvairiems lazerio poveikio energijos tankiams DLC:Ag-8 ir DLC:Ag-14 nanokompozituose schema. Pristatyta [B11]

Pasikeitus nanodalelių dydžiui nanokompozite, pasikeičia ir optinės savybės. Ši pokyčių buvo nuspręsta vizualizuoti elipsometriniu žemėlapiu. DLC:Ag-14 bandinio žemėlapis pateiktas 4.17 pav. Lazeriu paveiktos zonos elipsometriniuose žemėlapiuose yra aiškiai matomos, tačiau $\tan(\Psi)$ parametras, susijęs su šviesos intensyvumų santykiu, turi šiek tiek geresnį kontrastą tarp paveiktų ir nepaveiktų zonų, todėl gali būti laikomas jautresniu nei $\cos(\Delta)$, susijusiu su fazės skirtumu. Didinant lazerio įtekį arba impulsų skaičių, kontrastas tarp paveiktų ir nepaveiktų bandinio zonų didėja.



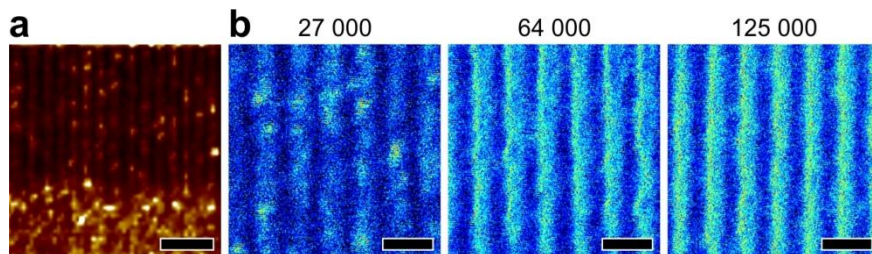
4.17 pav. DLC:Ag-14 bandinio ant kvarco pagrindo elipsometrinis žemėlapis. 679,1 nm bangos ilgis buvo panaudotas $\tan(\Psi)$ žemėlapiui, 587,0 nm – $\cos(\Delta)$. Lazero įtėkis kinta iš apačios (3 mJ/cm^2) į viršų (17 mJ/cm^2), impulsų skaičius – iš kairės (1 000) į dešinę (125 000). Pristatyta [B8, B10]

Spektroskopinės elipsometrijos žemėlapis gali būti sulyginamas su optinio mikroskopo mikrofotografija (4.18 pav.): joje taip pat matomas intensyvesnis lazerio poveikis, kai didėja įtėkis arba impulsų skaičius. Kaip ir SE žemėlapyje, 1 mJ/cm^2 įtėkiu paveiktų zonų visiškai nesimato. Taip pat nesimato 3 mJ/cm^2 , 1 000–8 000 impulsų. Kai nanokompozitas buvo paveiktas 3 mJ/cm^2 , 27 000 impulsų ir 6 mJ/cm^2 , 1 000 impulsų, šios zonos buvo silpnai įžiūrimos optinio mikroskopo vaizde, tačiau ne elipsometriniame žemėlapyje. Tačiau gali būti, kad, pasirinkus kitą bangos ilgį žemėlapiui, šios zonos išryškėtų, bet kitų zonų kontrastas sumažėtų.



4.18 pav. DLC:Ag-14 bandinio ant kvarco pagrindo optinio mikroskopo nuotrauka. Žymės ilgis 500 μm . Pristatyta [B10]

Dvifotonės liuminescencijos rezultatai pateikti 4.19 pav. Šie DLC:Ag-15 bandinio tyrimai buvo atlikti praėjus daugiau nei metams po dangos užnešimo, nelaikant jo jokiais specialiomis sąlygomis. Kadangi TPL signalas vis dar buvo pakankamai stiprus, galima teigti, kad DLC matrica efektyviai išsaugojo sidabro savybes. Lyginant DLC:Ag-14 bandinio skirtingų impulsų skaičiaus TPL vaizdus, galima pastebėti, kad ryškios juostos (nepaveiktos) šiek tiek siaurėja didėjant impulsų skaičiui. Tai sutampa su linijų pločio matavimais (4.12 pav.).



4.19 pav. Dvifotonė liuminescencija: (a) atsitiktinėje DLC:Ag-15 bandinio vietoje, gauta [20] sistema, žymės ilgis 5 μm ; (b) DLC:Ag-14 bandinio 1306 nm periodo, paveikto 17 mJ/cm^2 ir nurodytais impulsų skaičiais, gauta [19] sistema, žymės ilgis 2 μm

5. IŠVADOS

- 1) Deimanto tipo anglies su vario nanodalelėmis nanokompozitinė danga yra linkusi augti sluoksniuotai, su besikeičiančiais anglies ir vario prisotintais sluoksniais. Ši struktūra yra efektyviai atskleidžiama rentgeno spindulių atspindžio ir spektroskopinės elipsometrijos metodais, eksperimentinių duomenų interpretacijai sukuriant kintančios vario koncentracijos daugiasluoksnius modelius. Modeliai gerai sutampa su pralaidumo elektronų mikroskopijos ir rentgeno spindulių energijos dispersijos spektroskopijos rezultatais. Priešingai nei formuojant vario turinčias dangas, formuojant deimanto tipo anglies su sidabro nanodalelėmis nanokompozitines dangas sidabras yra linkęs sudaryti nanodaleles ant dangos paviršiaus, o ne jos viduje. Sidabras yra linkęs jungtis su deguonimi ir siera, tačiau dvifotonės liuminescencijos signalas rodo, kad plazmoninės savybės yra išlaikytos ilgą laiką.
- 2) Modeliuojant spektroskopinės elipsometrijos rezultatus, optinis modelis geriausiai atitinka eksperimentinius duomenis, kai deimanto tipo anglis apibūdinama Cody-Lorentz dispersijos dėsniumi, o nanokompozitas – Bruggeman efektyviosios terpės artiniu. Gautos vario (nuo 27,4 at.%) ir sidabro (visos koncentracijos) turinčių nanokompozitų dispersinės funkcijos pasižymi ypatybėmis (esant atitinkamai 600 nm ir 330 nm bangos ilgiams), būdingomis šių metalų plazmoninėms savybėms.

- 3) Holografinė litografija yra patogus metodas fotojautrioms medžiagoms struktūrizuoti, sukuriant vienmates ir dvimates periodines struktūras su skirtingais taškinės gardelės tipais ir simetrijomis. Unikalioms struktūroms numatomos modeliuojant interferencinį vaizdą ir atsižvelgiant į interferuojančių spindulių kieki, jų poliarizacijas, ekspozicijų skaičių ir šviesos kritimo kampą. Suformuotų struktūrų difrakcinis vaizdas vizualizuojamas atliekant struktūros mikrofotografijos Furjė transformaciją.
- 4) Buvo įrodyta, kad tiesioginis lazerinis interferencinis struktūrizavimas yra lankstus ir efektyvus submikrometrinių matmenų struktūrų formavimo deimanto tipo anglies su sidabro nanodalelėmis dangose metodas. Keičiant energijos tankį, buvo suformuotos linijos, kurių plotis 150–420 nm (564 nm periodui) ir 400–960 nm (1306 nm periodui).
- 5) Femtosekundinio lazerio spinduliuotė yra efektyvus metodas nanodalelių dydžio pasiskirstymui jau suformuotame nanokompozite pakeisti. Pradinis bimodalinis pasiskirstymas su centriniais 17 nm ir 46 nm skersmenimis (14,1 at.% sidabro deimanto tipo anglyje) buvo sėkmingai pakeistas į unimodalinį su centriniu skersmeniu nuo 14 nm (11 mJ/cm² lazerio įtėkis, 64 000 impulsų) iki 69 nm (17 mJ/cm² lazerio įtėkis, 64 000 impulsų). Pradinis unimodalinis sidabro nanodalelių pasiskirstymas deimanto tipo anglies su 7,9 at.% sidabro dangoje (24 nm centrinis skersmuo) buvo išlaikytas po lazerinio poveikio, tačiau pakito centrinis skersmuo: jis buvo nuo 13 nm (11 mJ/cm² lazerio įtėkis, 8 000 impulsų) iki 44 nm (11 mJ/cm² lazerio įtėkis, 125 000 impulsų).
- 6) Pagrindinės nanokompozitų struktūrizavimo slenksčio sumažėjimo priežastys yra skirtumai deimanto tipo anglies ir jos nanokompozitų sugerties spektruose, taip pat lokalaus lauko stiprinimas dėl metalo nanodalelių lokalizuoto paviršiaus plazmonų rezonanso. Norint struktūrizuoti nanokompozitą, reikia nuo 4 kartų (prie 1 000 impulsų) iki 24 kartų (prie 125 000 impulsų) mažesnio energijos tankio, palyginti su nanokompozitą sudarančių medžiagų (deimanto tipo anglies ir sidabro) struktūrizavimo slenksčiais.
- 7) Nanokompozitams struktūrizuoti nėra būtinas medžiagos pašalinimas: struktūra gaunama modifikavus nanodalelių matmenis. Šis procesas vyksta lazerio įtėkiui pasiekus ar viršijus struktūrizavimo slenksštį. Toliau didinant lazerio įtėkį virš abliacijos slenksčio, gaunamos struktūros su pašalintomis dalelėmis. Mikroskopijos nuotraukų dvimatis greitosios Furjė transformacijos yra efektyvus būdas patikrinti suformuotų struktūrų kokybę, net jei struktūra nuotraukoje nėra ryški.
- 8) Spektroskopinės elipsometrijos žemėlapis atskleidžia lazerio spinduliuotės įtaką: didesnis lazerio įtėkis arba impulsų skaičius lemia

didesnį elipsometrinių parametų kontrastą tarp paveiktų ir nepaveiktų zonų.

LITERATŪROS ŠARAŠAS

1. WEST, Paul R., ISHII, Satoshi, NAIK, Gururaj V., EMANI, Naresh K., SHALAEV, Vladimir M. and BOLTASSEVA, Alexandra. Searching for better plasmonic materials. *Laser and Photonics Reviews*. 2010. Vol. 4, no. 6, p. 795–808. DOI 10.1002/lpor.200900055.
2. RIFAT, Ahmmmed A., MAHDIRAJI, G. Amouzad, CHOW, Desmond M., SHEE, Yu Gang, AHMED, Rajib and ADIKAN, Faisal Rafiq Mahamd. Photonic crystal fiber-based surface plasmon resonance sensor with selective analyte channels and graphene-silver deposited core. *Sensors*. 2015. Vol. 15, no. 5, p. 11499–11510. DOI 10.3390/s150511499.
3. SCHMIDL, G., DELLITH, J., SCHNEIDEWIND, H., ZOPF, D., STRANIK, O., GAWLIK, A., ANDERS, S., TYMPEL, V., KATZER, C., SCHMIDL, F. and FRITZSCHE, W. Formation and characterization of silver nanoparticles embedded in optical transparent materials for plasmonic sensor surfaces. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*. 2015. Vol. 193, no. C, p. 207–216. DOI 10.1016/j.mseb.2014.12.001.
4. WADELL, Carl, NUGROHO, Ferry Anggoro Ardy, LIDSTRÖM, Emil, IANDOLO, Beniamino, WAGNER, Jakob B. and LANGHAMMER, Christoph. Hysteresis-free nanoplasmonic Pd-Au alloy hydrogen sensors. *Nano Letters*. 2015. Vol. 15, no. 5, p. 3563–3570. DOI 10.1021/acs.nanolett.5b01053.
5. WADELL, Carl, SYRENOVA, Svetlana and LANGHAMMER, Christoph. Plasmonic hydrogen sensing with nanostructured metal hydrides. *ACS Nano*. 2014. Vol. 8, no. 12, p. 11925–11940. DOI 10.1021/nn505804f.
6. TUMKUR, T., BARNAKOV, Y., KEE, S. T., NOGINOV, M. A. and LIBERMAN, V. Permittivity evaluation of multilayered hyperbolic metamaterials: Ellipsometry vs. Reflectometry. *Journal of Applied Physics*. 2015. Vol. 117, no. 10. DOI 10.1063/1.4914524.
7. PARDO, A., GÓMEZ-ALEIXANDRE, C., CELIS, J. P. and BUIJNSTERS, J. G. Friction and wear behavior of plasma assisted chemical vapor deposited nanocomposites made of metal nanoparticles embedded in a hydrogenated amorphous carbon matrix. *Surface and Coatings Technology*. 2012. Vol. 206, no. 13, p. 3116–3124. DOI 10.1016/j.surfcoat.2011.12.041.
8. CASIRAGHI, C., PIAZZA, F., FERRARI, A. C., GRAMBOLE, D. and

- ROBERTSON, J. Bonding in hydrogenated diamond-like carbon by Raman spectroscopy. *Diamond and Related Materials*. 2005. Vol. 14, no. 3–7, p. 1098–1102. DOI 10.1016/j.diamond.2004.10.030.
9. LU, Xiaoyuan, WAN, Rengang, LIU, Feng and ZHANG, Tongyi. High-sensitivity plasmonic sensor based on perfect absorber with metallic nanoring structures. *Journal of Modern Optics*. 2015. Vol. 63, no. 2, p. 177–183. DOI 10.1080/09500340.2015.1066459.
 10. PELÁEZ, R. J., FERRERO, A., SKEREN, M., BERNAD, B. and CAMPOS, J. Customizing plasmonic diffraction patterns by laser interference. *RSC Advances*. 2017. Vol. 7, no. 48, p. 30118–30127. DOI 10.1039/C7RA02878D.
 11. LEE, Jeong Bong, CHOI, Kyung Hak and YOO, Koangki. Innovative SU-8 lithography techniques and their applications. *Micromachines*. 2015. Vol. 6, no. 1, p. 1–18. DOI 10.3390/mi6010001.
 12. FAUPEL, Franz, ZAPOROJTCHEKOV, Vladimir, STRUNSKUS, Thomas and ELBAHRI, Mady. Metal-polymer nanocomposites for functional applications. *Advanced Engineering Materials*. 2010. Vol. 12, no. 12, p. 1177–1190. DOI 10.1002/adem.201000231.
 13. ROCH, Teja, BEYER, Eckhard and LASAGNI, Andrés. Surface modification of thin tetrahedral amorphous carbon films by means of UV direct laser interference patterning. *Diamond and Related Materials*. 2010. Vol. 19, no. 12, p. 1472–1477. DOI 10.1016/j.diamond.2010.10.003.
 14. CORREA, Daniel, ALMEIDA, Juliana, ALMEIDA, Gustavo, CARDOSO, Marcos, DE BONI, Leonardo and MENDONÇA, Cleber. Ultrafast Laser Pulses for Structuring Materials at Micro/Nano Scale: From Waveguides to Superhydrophobic Surfaces. *Photonics*. 2017. Vol. 4, no. 1, p. 1–26. DOI 10.3390/photonics4010008.
 15. RÖSSLER, Florian, KUNZE, Tim and LASAGNI, Andrés Fabián. Fabrication of diffraction based security elements using direct laser interference patterning. *Optics Express*. 2017. Vol. 25, no. 19, p. 22959. DOI 10.1364/OE.25.022959.
 16. DI NISO, Francesca, GAUDIUSO, Caterina, SIBILLANO, Teresa, MEZZAPESA, Francesco Paolo, ANCONA, Antonio and LUGARÀ, Pietro Mario. Role of heat accumulation on the incubation effect in multi-shot laser ablation of stainless steel at high repetition rates. *Optics Express*. 2014. Vol. 22, no. 10, p. 12200. DOI 10.1364/OE.22.012200.
 17. SCHNEIDER, Caroline A, RASBAND, Wayne S and ELICEIRI, Kevin W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*. 28 July 2012. Vol. 9, no. 7, p. 671–675. DOI 10.1038/nmeth.2089.
 18. ZIMNY, Kévin, MASCARO, Benoit, BRUNET, Thomas, PONCELET, Olivier, ARISTÉGUI, Christophe, LENG, Jacques, SANDRE, Olivier

- and MONDAIN-MONVAL, Olivier. Design of a fluorinated magneto-responsive material with tuneable ultrasound scattering properties. *Journal of Materials Chemistry B*. 2014. Vol. 2, no. 10, p. 1285–1297. DOI 10.1039/c3tb21585g.
19. CIELECKI, Paweł Piotr, SOBOLEWSKA, Elzbieta Karolina, KOSTIUOČENKO, Oksana, LEISSNER, Till, TAMULEVIČIUS, Tomas, TAMULEVIČIUS, Sigitas, RUBAHN, Horst Günter, ADAM, Jost and FIUTOWSKI, Jacek. Plasmon–organic fiber interactions in diamond-like carbon coated nanostructured gold films. *Optics Communications*. 2017. Vol. 402, p. 635–640. DOI 10.1016/j.optcom.2017.06.064.
 20. NOVIKOV, Sergey M., POPOK, Vladimir N., EVLYUKHIN, Andrey B., HANIF, Muhammad, MORGEN, Per, FIUTOWSKI, Jacek, BEERMANN, Jonas, RUBAHN, Horst Günter and BOZHEVOLNYI, Sergey I. Highly Stable Monocrystalline Silver Clusters for Plasmonic Applications. *Langmuir*. 2017. Vol. 33, no. 24, p. 6062–6070. DOI 10.1021/acs.langmuir.7b00772.
 21. ARUTYUNYAN, Natalia R., KOMLENOK, Maxim S., ZAVEDEEV, Evgeny V. and PIMENOV, Sergei M. Raman Spectroscopy of Amorphous Carbon Films Modified by Single-Pulse Irradiation of Nanosecond and Femtosecond Lasers. *Physica Status Solidi B*. January 2018. Vol. 255, no. 1, p. 1700225. DOI 10.1002/pssb.201700225.
 22. SASINKOVÁ, Vlasta, ARBET, Juraj, BOHÁČEK, Pavol, HURAN, Jozef, KLEINOVÁ, Angela and SEKÁČOVA, Mária. Raman spectroscopy study of SiC thin films prepared by PECVD for solar cell working in hard environment. *Reliability of Photovoltaic Cells, Modules, Components, and Systems VIII*. 2015. Vol. 9563, p. 95630V. DOI 10.1117/12.2186749.
 23. JO, Yeong Ju, ZHANG, Teng Fei, SON, Myoung Jun and KIM, Kwang Ho. Synthesis and electrochemical properties of Ti-doped DLC films by a hybrid PVD/PECVD process. *Applied Surface Science*. 2018. Vol. 433, p. 1184–1191. DOI 10.1016/j.apsusc.2017.10.151.
 24. GHODSELAHI, T., VESAGHI, M. A. and SHAFIEKHANI, A. Study of surface plasmon resonance of Cu@Cu₂O core-shell nanoparticles by Mie theory. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2009. Vol. 42, no. 1, p. 015308. DOI 10.1088/0022-3727/42/1/015308.
 25. ZIASHAHABI, A., GHODSELAHI, T. and HEIDARI SAANI, M. Localized Surface Plasmon Resonance properties of copper nano-clusters: A theoretical study of size dependence. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2013. Vol. 74, no. 7, p. 929–933. DOI 10.1016/j.jpcs.2013.02.009.

CURRICULUM VITAE

Vardas: AUŠRINĖ

Pavardė: JURKEVIČIŪTĖ

Gimimo data: 1990 m. lapkričio 10 d.

Elektroninis paštas: ausrine.jurkeviciute@ktu.lt

Išsilavinimas:

- 2009 baigė Kazlų Rūdos Kazio Griniaus gimnaziją ir įgijo vidurinį išsilavinimą (diplomas su pagyrimu).
- 2009–2013 studijavo Taikomąją fiziką Kauno technologijos universitete ir 2013 įgijo fizikos bakalauro laipsnį (diplomas su pagyrimu).
- 2013–2015 studijavo Medžiagų mokslą Kauno technologijos universitete ir 2015 įgijo medžiagų technologijos magistro laipsnį (diplomas su pagyrimu).
 - 2014 01 27 – 2014 06 30 ERASMUS studijos Pietų Danijos universitete, Odense, Danija.
- 2015–2019 studijavo Medžiagų inžinerijos doktorantūros programoje Kauno technologijos universiteto Medžiagų mokslo institute ir dalyvavo europinės doktorantūros programoje „Physics and Chemistry of Advanced Materials“ (PCAM).
 - 2017 03 01 – 2017 06 18 ERASMUS+ praktika Pietų Danijos universiteto Mads Clausen institute, Sønderborg, Danija.
 - 2017 10 15 – 2018 01 22 ERASMUS+ praktika Pietų Danijos universiteto Mads Clausen institute, Sønderborg, Danija.

Dalyvavimas Kauno technologijos universiteto Medžiagų mokslo instituto vykdomuose mokslo projektuose:

- 2011 08 30 – 2011 10 31 jaunesnioji technikė, „Mikro- ir nanostruktūros kietojo oksido mikrokuo elementams“ (MIKROKOKE-1), Nr. ATE-05/2010, finansavo Lietuvos mokslo taryba.
- 2013 01 21 – 2013 12 31 jaunesnioji laborantė, „Membraninių struktūrų technologijos kietųjų elektrolitų kuro mikroelementams“ (MIKROKOKE-2), Nr. ATE-09/2012, finansavo Lietuvos mokslo taryba.
- 2013 10 01 – 2014 12 31 specialistė, „Paviršiaus reljefo ir molekulinį jėgų įtakos nanodalelių saviorganizacijos procesams fundamentiniai moksliniai tyrimai ir šioje srityje dirbančių mokslininkų ir kitų tyrėjų tarptautinio konkurencingumo ugdymas“ (PARMO), Nr. VP1-3.1-ŠMM-10-V-02-028, finansavo Europos socialinio fondo agentūra.
- 2013 07 01 – 2015 04 30 inžinierė, „Tvarkios tūrinės struktūros optiniams jutikliams“ (3DSens), Nr. MIP-13147, finansavo Lietuvos mokslo taryba.

- 2015 05 04 – 2015 12 31 laborantė, „Išmanaus antibakterinio pleistro kūrimas panaudojant sidabro nanostruktūras ir biopolimerus“ (NANOSMARTPLASTER), Nr. PP38/152, finansavo Kauno technologijos universitetas ir Lietuvos sveikatos mokslų universitetas.
- 2015 10 05 – 2015 12 31 laborantė, „Ultraspartūs procesai skyliniuose ir bipoliniuose organiniuose puslaidininkiuose“ (UPOS), Nr. MTERI-P-15023, finansavo Kauno technologijos universitetas.
- 2016 03 21 – 2016 12 31 jaunesnioji mokslo darbuotoja, „Krūvininkų ir energijos pernašos procesų tyrimai organinių medžiagų sluoksniuose ir sistemose“ (KEPOS), Nr. MTEPI-P-16025, finansavo Kauno technologijos universitetas.
- 2016 07 11 – 2016 12 31 inžinierė, „Paslėptos litografinės mikrostruktūros trimačiam akustinės mikroskopijos vaizdinimo kalibravimui“ (3DSonic), Nr. PP35/161, finansavo Kauno technologijos universitetas.
- 2017 07 17 – 2017 10 05 jaunesnioji mokslo darbuotoja, „Hologramos difrakcinio vaizdo projekcijų algoritmo sukūrimas bei realizavimas išmaniesiems įtaisams“ (HoloAPP), Nr. PP29/172, finansavo Kauno technologijos universitetas.
- 2017 09 01 – 2017 10 13 jaunesnioji mokslo darbuotoja, „Mažos antrinių elektronų emisijos dangos CERN superprotonų sinchrotronui“, Nr. CERN1/17, finansavo Lietuvos mokslų akademija.
- 2017 10 02 – 2019 12 31 jaunesnioji mokslo darbuotoja, „Plazmoniniai nanokompozitiniai savaime įsisotinančios sugerties veidrodžiai skaiduliniais lazeriams“ (NASAM), Nr. P-MIP-17-243, finansavo Lietuvos mokslo taryba.
- 2018 02 01 – 2018 05 31 jaunesnioji mokslo darbuotoja, „Išmanios apykablės, saugančios nuo nuskendimo, sukūrimas ir išbandymas“, Nr. 31V-93;31V-11, finansavo Mokslo, inovacijų ir technologijų agentūra.
- 2018 01 22 – 2018 08 31 jaunesnioji mokslo darbuotoja, „Grafeno ir susijusių 2D nanomedžiagų heterosandūros ir supergardenės fotovoltaikai“ (3D FOTOGRAF), Nr. 09.3.3-LMT-K-712-01-0183, finansavo Europos sąjungos struktūriniai fondai.
- 2018 09 03 – 2018 12 21 jaunesnioji mokslo darbuotoja, „Dangų, naudojamų CERN greitintuvuose, funkcinių savybių įvertinimas“ (DAFUS), Nr. CERN-KTU-2018-1, finansavo Lietuvos mokslų akademija.
- 2019 09 02 – 2019 12 23 jaunesnioji mokslo darbuotoja, „Plonų plėvelių ir struktūrų, naudojamų dalelių greitintuvų vakuuminėje kameroje, eksperimentinis vertinimas“ (DAFU-2), Nr. CERN-KTU-2019-1, finansavo Lietuvos mokslų akademija.

- Nuo 2018 01 22 jaunesnioji mokslo darbuotoja, „2D nanostruktūros su metalų nanodalelėmis biojutikliams“, Nr. P-LLT-18-11, finansuoja Lietuvos mokslo taryba.
- Nuo 2018 06 11 jaunesnioji mokslo darbuotoja, „Naujos kartos mikro- / nanoprietaisų ir struktūrų optinėms reikmėms kūrimas ir vystymas“, Nr. 01.2.2-CPVA-K-703-02-0014, finansuoja Europos sąjungos struktūriniai fondai.
- Nuo 2019 02 01 jaunesnioji mokslo darbuotoja, „Daugiafunkcinės ZnO nanovielų dangos selektyviems jutikliams bei saulės energijos konvertavimo efektyvumui“ (MultiFun), Nr. 01.2.2-LMT-K-718-02-0011, finansuoja Europos sąjungos struktūriniai fondai.
- Nuo 2019 02 01 jaunesnioji mokslo darbuotoja, KTU MMI.

Dalyvavimas organizaciniame tarptautinio mokslo renginio komitete:

Tarptautinės konferencijos-mokyklos „Advanced Materials and Technologies“, vykstančios rugpjūčio pabaigoje Palangoje (Lietuva), organizacinio komiteto sekretorė (2016, 2017, 2018, 2020) ir organizacinio komiteto narė (2012, 2013, 2014, 2015, 2019).

Stažotės, mokymai ir vasaros mokyklos užsienyje:

- 2014 11 22 – 2014 12 19 projekto stažotė, Mads Clausen institutas, Pietų Danijos universitetas, Sønderborg, Danija;
- 2015 07 05 – 2015 07 11 europinė vasaros mokykla, Université de Strasbourg, Strasbūras, Prancūzija;
- 2015 09 07 – 2015 09 17 intensyvūs jonizuojančios spinduliuotės pritaikymo medžiagoms apdoroti kursai, I dalis, Branduolinės chemijos ir technologijos institutas, Varšuva, Lenkija;
- 2015 09 28 – 2015 10 02 intensyvūs jonizuojančios spinduliuotės pritaikymo medžiagoms apdoroti kursai, II dalis, Università degli studi di Palermo, Palermo, Italija;
- 2016 07 04 – 2016 07 08 PCAM organinės elektronikos vasaros mokykla, Pjero ir Mari Kiuri universitetas, Paryžius, Prancūzija;
- 2017 06 26 – 2017 07 07 Lietuvos ir Prancūzijos programos „Žiliberas“ stažotė, Institut des Matériaux Jean Rouxel, Nantes, Prancūzija.

Darbo su moksline įranga patirtis:

Spektroskopinė elipsometrija; struktūrų formavimas holografinės bei kontaktinės litografijų metodais; reaktyviojo joninio ėsdinimo technologija; optinė, skenuojanti elektronų, helio jonų ir atominės jėgos mikroskopijos; paviršiaus hidrofobiškumo ir hidrofiliškumo tyrimai; optiniai dangų savybių tyrimai šviesolaidiniu spektrometru ir integruojančia sfera; Ramano spektroskopija.

Apdovanojimai ir stipendijos:

- Akademinio skautų sąjūdžio Vydūno fondo mecenato Igno Končiaus stipendija 2012;
- KTU rektorius skatinamoji stipendija už gerus studijų ir mokslinės veiklos rezultatus 2011, 2012, 2014, 2015;
- Geriausias pranešimas konferencijoje „Advanced Materials and Technologies“ 2012, 2013, 2016;
- KTU aktyviausių doktorantų konkursas 2017;
- Geriausias žodinis pranešimas konferencijoje „Mathematics and Natural Sciences: Theory and Applications“ 2018;
- Lietuvos mokslo tarybos parama doktorantams už akademinis pasiekimus 2017, 2019.

SU DISERTACIJA SUSIJUSIŲ PUBLIKACIJŲ IR KONFERENCIJŲ SĄRAŠAS

Publikacijos

- A1. **JURKEVIČIŪTĖ, Aušrinė, LAZAUSKAS, Algirdas, TAMULEVIČIUS, Tomas, VASILIAUSKAS, Andrius, PECKUS, Domantas, MEŠKINIS, Šarūnas, TAMULEVIČIUS, Sigitas.** Structure and density profile of diamond-like carbon films containing copper: study by X-ray reflectivity, transmission electron microscopy, and spectroscopic ellipsometry. *Thin Solid Films*. 2017. Vol. 630, p. 48-58. DOI: 10.1016/j.tsf.2016.10.015. [IF: 1,939; AIF: 4,131; IF/AIF: 0,469; Q2 (2017)];
- A2. **JURKEVIČIŪTĖ, Aušrinė, ARMAKAVIČIUS, Nerijus, VIRGANAVIČIUS, Dainius, ŠIMATONIS, Linas, TAMULEVIČIUS, Tomas, TAMULEVIČIUS, Sigitas.** Fabrication and characterization of one- and two-dimensional regular patterns produced employing multiple exposure holographic lithography. *Journal of optoelectronics and advanced materials*. 2017. Vol. 19, no. 3-4, p. 119-126. [IF: 0,390; AIF: 3,702; IF/AIF: 0,105; Q4 (2017)];
- A3. **MEŠKINIS, Šarūnas, VASILIAUSKAS, Andrius, ANDRULEVIČIUS, Mindaugas, JURKEVIČIŪTĖ, Aušrinė, PECKUS, Domantas, KOPUSTINSKAS, Vitoldas, VISKONTAS, Karolis, TAMULEVIČIUS, Sigitas.** Self-saturable absorption and reverse-saturable absorption effects in diamond-like carbon films with embedded copper nanoparticles. *Coatings*. 2019. Vol. 9, no. 2, p. 100. DOI: 10.3390/coatings9020100. [IF: 2,330; AIF: 3,479; IF/AIF: 0,669; Q2 (2018)];

- A4. **JURKEVIČIŪTĖ, Aušrinė, KLIMAITĖ, Gerda, TAMULEVIČIUS, Tomas, FIUTOWSKI, Jacek, RUBAHN, Horst-Günter, TAMULEVIČIUS, Sigitas.** Tailoring of silver nanoparticle size distributions in diamond-like carbon nanocomposite thin films by direct femtosecond laser interference patterning. *Advanced Engineering Materials*. 2019. DOI: 10.1002/adem.201900951. [IF: 2,906; AIF: 4,951; IF/AIF: 0,586; Q2 (2018)].

Konferencijų tezės

Konferencijos, kuriose dalyvavo disertacijos autorė

- B1. **JURKEVIČIŪTĖ, Aušrinė, ŽABAITĖ, Alvita, TAMULEVIČIUS, Tomas, TAMULEVIČIUS, Sigitas.** Investigation of optical properties of diamond like carbon thin films with embedded silver nanoparticles employing spectroscopic ellipsometry. *8th School on Organic Electronics: Nano-organics and Devices*, liepos 4-8, 2016, Paryžius, Prancūzija. p. 56-57. Stendinis pranešimas.
- B2. **JURKEVIČIŪTĖ, Aušrinė, ŽABAITĖ, Alvita, TAMULEVIČIUS, Tomas, TAMULEVIČIUS, Sigitas.** Spectroscopic ellipsometry studies of diamond like carbon thin films containing silver nanoparticles. *18th international conference-school "Advanced materials and technologies"*, rugpjūčio 27-31, 2016, Palanga, Lietuva. ISSN 1822-7759, p. 112. Stendinis pranešimas, apdovanotas "Young scientist award for the best poster presented".
- B3. **JURKEVIČIŪTĖ, Aušrinė, ŠIMATONIS, Linas, VASILIAUSKAS, Andrius, TAMULEVIČIUS, Tomas, FIUTOWSKI, Jacek, RUBAHN, Horst-Günter.** Ablation of amorphous diamond-like carbon nanocomposite films with embedded silver nanoparticles by femtosecond laser interference field = Nanokompozitinių deimanto tipo amorfinės anglies dangų su sidabro nanodalelėmis abliacija femtosekundinio lazerio interferenciniu lauku. *42-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija = Lithuanian national physics conference*, spalio 4-6, 2017, Vilnius, Lietuva. ISBN 9786094598807, p. 187. Stendinis pranešimas.
- B4. **JURKEVIČIŪTĖ, Aušrinė, JUODĖNAS, Mindaugas, ADASHKEVICH, Vadzim, VASILIAUSKAS, Andrius, TAMULEVIČIUS, Tomas, FIUTOWSKI, Jacek, TAMULEVIČIUS, Sigitas, RUBAHN, Horst-Günter.** Helium ion microscopy of 1D structures ablated employing femtosecond laser interference field. *61st international conference for students of physics and natural sciences "Open readings"*, kovo 20-23, 2018, Vilnius, Lietuva. p. 233. Stendinis pranešimas.

- B5. **JURKEVIČIŪTĖ, A.**, JUODĖNAS, M., ADASHKEVICH, V., VASILIAUSKAS, A., TAMULEVIČIUS, T., FIUTOWSKI, J., TAMULEVIČIUS, S., RUBAHN, H.G. Vienmačių periodinių struktūrų nanokompozituose formavimas lazerine interferencine abliacija bei jų vaizdinimas skenuojančiu elektronų ir helio jonų mikroskopais. *XVI studentų konferencija "Matematika ir gamtos mokslai: teorija ir taikymai"* = "*Mathematics and natural sciences: theory and applications*", balandžio 19, 2018, Kaunas, Lietuva. ISBN 9786090214534, p. 28-29. Žodinis pranešimas, apdovanotas "Best presentation".
- B6. KLIMAITĖ, Gerda, **JURKEVIČIŪTĖ, Aušrinė**, FIUTOWSKI, Jacek, RUBAHN, Horst-Günter, TAMULEVIČIUS, Tomas. Analysis of the silver nanoparticle size distribution in nanocomposite thin films upon femtosecond laser irradiation. *20th international conference-school "Advanced materials and technologies"*, rugpjūčio 27-31 2018, Palanga, Lietuva. ISSN 1822-7759, p. 44. Stendinis pranešimas.
- B7. **JURKEVIČIŪTĖ, Aušrinė**, JUODĖNAS, Mindaugas, ADASHKEVICH, Vadzim, TAMULEVIČIUS, Tomas, FIUTOWSKI, Jacek, RUBAHN, Horst-Günter, TAMULEVIČIUS, Sigitas. Direct laser interference patterning of diamond-like carbon silver nanocomposite thin films. *E-MRS Fall Meeting*, rugsėjo 17-20, 2018, Varšuva, Lenkija. K.P.6, p. 1. Stendinis pranešimas.
- B8. DEVEIKIS, Justas, **JURKEVIČIŪTĖ, Aušrinė**, TAMULEVIČIUS, Tomas, TAMULEVIČIUS, Sigitas. Visualisation of femtosecond laser ablated microstructures in DLC:Ag nanocomposite thin films via mapping with spectroscopic ellipsometry. *62nd international conference for students of physics and natural sciences "Open readings"*, kovo 19-22, 2019, Vilnius, Lietuva. ISBN 9786090701379, p. 207. Stendinis pranešimas.
- B9. KLIMAITĖ, Gerda, **JURKEVIČIŪTĖ, Aušrinė**, TAMULEVIČIUS, Tomas, TAMULEVIČIUS, Sigitas. Analysis of the changes in average area of silver nanoparticles embedded in diamond-like carbon thin films upon femtosecond laser irradiation. *62nd international conference for students of physics and natural sciences "Open readings"*, kovo 19-22, 2019, Vilnius, Lietuva. ISBN 9786090701379, p. 300. Stendinis pranešimas.
- B10. **JURKEVIČIŪTĖ, Aušrinė**, DEVEIKIS, Justas, TAMULEVIČIUS, Tomas, TAMULEVIČIUS, Sigitas. Spectroscopic ellipsometry mapping of femtosecond laser irradiated diamond-like carbon:metal nanocomposite thin films. *8th international conference on spectroscopic ellipsometry*, gegužės 26-31, 2019, Barselona, Ispanija, p. 215. Stendinis pranešimas.

- B11. **JURKEVIČIŪTĖ, Aušrinė, TAMULEVIČIUS, Tomas, TAMULEVIČIUS, Sigitas.** Determination of laser patterning threshold of diamond-like carbon nanocomposite films with embedded silver nanoparticles = Deimanto tipo anglies nanokompozitinių dangų su sidabro nanodalelėmis lazerinio struktūrizavimo slenksčio nustatymas. *43-oji Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija = Lithuanian national physics conference*, spalio 3-5, 2019, Kaunas, Lietuva. ISBN 9786090216385, p. 41. Žodinis pranešimas.

Konferencijos, kuriose dalyvavo pranešimo bendraautorius

- B12. ŽABAITĖ, Alvita, **JURKEVIČIŪTĖ, Aušrinė, TAMULEVIČIUS, Tomas.** Dangų tyrimas spektroskopiniu elipsometru. *XIV studentų konferencija "Matematika ir gamtos mokslai: teorija ir taikymai" = "Mathematics and natural sciences: theory and applications"*, balandžio 29, 2016, Kaunas, Lietuva. ISBN 9786090212257, p. 7-8. Žodinis pranešimas, Alvita Žabaitė.
- B13. **JURKEVIČIŪTĖ, Aušrinė, JUODĖNAS, Mindaugas, ADASHKEVICH, Vadzim, TAMULEVIČIUS, Tomas, FIUTOWSKI, Jacek, RUBAHN, Horst-Günter, TAMULEVIČIUS, Sigitas.** The effect of silver nanoparticles on the direct laser interference patterning of DLC:Ag nanocomposites. *International conference "Nanotechnology and innovation in the Baltic Sea region"*, gegužės 30 – birželio 1, 2018, Sønderborg, Danija. ISBN 9786090213452, p. 28. Stendinis pranešimas, Sigitas Tamulevičius.
- B14. KLIMAITĖ, G., **JURKEVIČIŪTĖ, A., TAMULEVIČIUS, T., TAMULEVIČIUS, S.** Sidabro nanodalelių ant deimantiškosios anglies nanokompozitų analizė naudojant femtosekundinio lazerio spinduliuotę. *XVII studentų konferencija "Matematika ir gamtos mokslai: teorija ir taikymai" = "Mathematics and natural sciences: theory and applications"*, balandžio 4, 2019, Kaunas, Lietuva. eISSN 2669-056X, p. 33-34. Žodinis pranešimas, Gerda Klimaitė, apdovanotas "Best presentation".
- B15. KLIMAITĖ G., **JURKEVIČIŪTĖ A., TAMULEVIČIUS T., TAMULEVIČIUS S.** Deimantiškosios anglies nanokompozitų su sidabro nanodalelėmis lazerinė abliacija femtosekundiniu lazeriu. *Studentų moksliniai tyrimai 2018/2019*, birželio 12, 2019, Vilnius, Lietuva. ISBN 9786094820274, p. 24-25. Žodinis pranešimas, Gerda Klimaitė.
- B16. KLIMAITĖ, Gerda, **JURKEVIČIŪTĖ, Aušrinė, TAMULEVIČIUS, Tomas, TAMULEVIČIUS, Sigitas.** Analysis of the silver nanoparticle size distribution in DLC matrix before and after fs-laser irradiation. *21th international conference-school "Advanced materials and*

technologies”, rugpjūčio 19-23, 2019, Palanga, Lietuva. ISSN 1822-7759, p. 51. Stendinis pranešimas, Gerda Klimaitė.

UDK 539.216+620.3](043.3)

SL344. 2020-03-19, 2,75 leidyb. apsk. I. Tiražas 50 egz.

Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas