



ERIKA RAJACKAITĖ

---

**PLANARINIO IR  
VERTIKALIAUS GRAFENO  
SLUOKSNIŲ MIKROBANGE  
PLAZMA AKTYVINAMAS  
CHEMINIS NUSODINIMAS  
IŠ GARŲ FAZĖS BEI  
KOKYBĖS TYRIMAI**

---

DAKTARO DISERTACIJOS  
SANTRAUKA

TECHNOLOGIJOS  
MOKSLAI, MEDŽIAGŲ  
INŽINERIJA (T 008)

K a u n a s  
2 0 2 2

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ERIKA RAJACKAITĖ

**PLANARINIO IR VERTIKALIAUS GRAFENO SLUOKSNIŲ  
MIKROBANGE PLAZMA AKTYVINAMAS CHEMINIS  
NUSODINIMAS IŠ GARŲ FAZĖS BEI KOKYBĖS TYRIMAI**

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

2022, Kaunas

Disertacija rengta 2016–2021 m. Kauno technologijos universiteto Medžiagų mokslo institute. Mokslinius tyrimus rėmė Lietuvos mokslo taryba.

**Mokslinis vadovas:**

prof. habil. dr. Sigitas TAMULEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija, T 008)

**Disertacijos santrauką redagavo:** Aurelija Gražina Rukšaitė (Leidykla „Technologija“)

**Medžiagų inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:**

prof. habil. dr. Juozas Vidas GRAŽULEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija, T 008) – **pirmininkas**;

dr. Donats ERTS (Latvijos universitetas, Latvija, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija, T 008);

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

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

prof. dr. Nerija ŽURAUSKIENĖ (Fizinių ir technologijos mokslų centras, gamtos mokslai, fizika, N 002).

Disertacija bus ginama viešame Medžiagų inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje 2022 m. rugpjūčio 31 d. 12 val. Kauno technologijos universiteto „Santakos“ slėnyje, Posėdžių kambaryje A228.

Adresas: K. Baršausko g. 59-A228, 51423 Kaunas, Lietuva.

Tel. (370) 37 30 00 42; faks. (370) 37 32 41 44; el. paštas [doktorantura@ktu.lt](mailto:doktorantura@ktu.lt)

Disertacijos santrauka išsiųsta 2022 m. liepos 29 d.

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

## TURINYS

1. ĮVADAS .....	5
Tyrimų tikslas .....	6
Uždaviniai .....	6
Mokslinis naujumas .....	6
Ginamieji teiginiai .....	6
2. LITERATŪROS APŽVALGA .....	7
3. DARBO METODIKA .....	8
3.1. Mikrobange plazma aktyvinamas grafeno sluoksnių nusodinimas iš garų fazės .....	8
3.2. Grafeno sluoksnių perkėlimas .....	9
3.3. Analitiniai metodai .....	10
3.3.1. Skenuojamoji elektroninė mikroskopija .....	10
3.3.2. Atominių jėgų mikroskopija .....	10
3.3.3. Ramano sklaidos spektroskopija .....	10
3.3.4. Rentgeno spindulių fotoelektronų spektroskopija .....	10
3.3.5. Skirtuminės sugerties spektroskopija .....	10
3.4. Elektrochrominių prietaisų su grafeno elektrodais formavimas ....	11
3.5. Organinių saulės elementų su grafeno elektrodais formavimas .....	11
4. REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS .....	12
4.1. Planarinio grafeno ir vertikalų grafeno nanolapelių sluoksnių tyrimai .....	12
4.1.1. Morfologijos tyrimai .....	12
4.1.2. Struktūros tyrimai .....	14
4.1.3. Optinių savybių tyrimai .....	15
4.2. Vertikalų grafeno nanolapelių dangų savybių kitimo priklausomai nuo nusodinimo trukmės tyrimai .....	19
4.2.1. Morfologijos tyrimai .....	19
4.2.2. Struktūros tyrimai .....	21
4.2.3. Optinių savybių tyrimai .....	23
4.3. Elektrochrominių prietaisų veikimo tyrimai .....	26

4.4. Organinių saulės elementų veikimo tyrimai .....	26
5. IŠVADOS .....	28
LITERATŪRA.....	30
INFORMACIJA APIE AUTOREĮ .....	37
MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ, KONFERENCIJŲ IR STAŽUOČIŲ SĄRAŠAS .....	37
Su disertacija susijusios publikacijos .....	37
Kitos publikacijos .....	38
Su disertacija susijusios konferencijos, kuriose dalyvavo disertacijos autorė .....	38
Su disertacija susijusios konferencijos, kuriose dalyvavo pranešimų bendraautorai .....	40
Stažuotės užsienyje .....	40

## 1. ĮVADAS

Visame pasaulyje grafeno tyrimai, kurie lėmė reikšmingus atradimus, yra vystomi jau septyniolika metų ir dabar siekiama jį pritaikyti masinėje gamyboje. [1,2]. Šiuo metu grafeno dangos gali būti formuojamos įvairiais būdais, tokiais kaip epitaksinis nusodinimas, mechaninis sluoksnių atskyrimas, grafeno oksido redukcija, cheminis nusodinimas iš garų fazės ir kt. [3,4]. Mikrobange plazma aktyvinamas cheminis nusodinimas iš garų fazės (angl. *microwave plasma assisted chemical vapor deposition* – MW PACVD), kurį galima atlikti santykinai žemoje temperatūroje, yra patvirtintas kaip veiksmingas būdas planarinio ir vertikalios grafeno dangoms, pasižyminčioms įvairiomis morfologinėmis, struktūrinėmis ir kitomis savybėmis, formuoti ant katalizatorių ir nekatalitinių paviršių [5]. Kita vertus, grafeno plėvelių sintezės kontrolė ir tokių dangų defektų tyrimai yra iki šiol gana sudėtinga užduotis. Todėl grafeno komercializavimas yra pakankamai lėtas procesas, ir tikėtina pagrindinė to priežastis yra nepakankamai aukšta daugelio kompanijų gaminamo grafeno kokybė [4]. Dėl to yra labai svarbu vystyti ir tobulinti grafeno kokybės tyrimo metodus, susijusius su defektų analize.

Nepaisant intensyvių šios srities tyrimų, išsamūs vertikalių grafeno nanolapelių (angl. *vertical graphene nanosheets* – VGN) sluoksnių nusodinimo mechanizmai veikiant plazma nėra visiškai suprasti ir yra reikalingi papildomi tyrimai [6,7]. Todėl sisteminiai VGN susidarymo tyrimai, pradedant nuo jų nukleacijos iki sudėtingesnių anglies nanostruktūrų formavimosi, įskaitant jų atitinkamus struktūros ir savybių skirtumus, tarpinių sluoksnių susidarymo bei VGN augimo kinetikos, yra būtini tolesniems šios anglies nanomedžiagos pritaikymams [8,9].

Be abejojimo, labai svarbu sukurti ir patobulinti grafeno kokybės analizės metodus ir priemones, arba, kitaip tariant, kokybės tyrimus, kurie leistų sukurti naujus sintezės standartus [4]. Šiuo metu vienas efektyviausių grafeno kokybės analizės metodų yra Ramano sklaidos spektroskopija. Ji yra nedestruktyvi, greita, didelės skiriamosios gebos ir suteikia daug struktūrinės bei elektroninės informacijos apie grafeno sluoksnius [10,11]. Tačiau vertikalios grafeno atveju dėl šių sluoksnių kompleksiškoji ji nepateikia visos galimos struktūrinės informacijos.

Vienas iš perspektyvių metodų, kuris gali būti naudojamas defektų analizei, yra skirtuminės sugerties spektroskopija (angl. *transient absorption spectroscopy* – TAS). Ši spektroskopija yra gerai žinoma technologija, kuri intensyviai naudojama tiriant sužadintos būsenos relaksacijos procesus įvairiose anglies pagrindo medžiagose: nanodeimanto, deimanto tipo anglies [12,13], grafito [14], monosluoksnių bei daugiasluoksnių grafeno [15] dangose. Yra paskelbta publikacijų apie skirtuminės sugerties spektroskopijos panaudojimą grafeno defektų, susijusių su domenų ribomis, analizei, kurios tikslumas

prilygsta Ramano sklaidos spektroskopijos tyrimams, bet su daug spartesniu matavimo greičiu [16]. TAS suteikia informacijos apie karštųjų elektronų relaksacijos dinamiką, iš kurios galima spręsti apie laiko apibrėžtus procesus, kurios negali suteikti Ramano sklaidos spektroskopija [16]. Be to, grafene vykstančios ultrasparčios krūvininkų dinamikos supratimas yra ypač aktualus optiniams ir greitaeigės elektronikos pritaikymams [17].

## **Tyrimų tikslas**

Susintetinti planarinio bei vertikalaus grafeno sluoksnius mikrobange plazma aktyvinamo cheminio nusodinimo iš garų fazės būdu, ištirti jų kokybę skirtingais analitiniais metodais ir patikrinti juos kaip galimus lanksčius elektrodus organiniuose prietaisuose.

## **Uždaviniai**

1. Eksperimentiškai parinkti sintezės parametrus, bandinio įtvirtinimo būdą ir suformuoti planarinio grafeno ir vertikalių grafeno nanolapelių sluoksnius ant katalizatoriaus ir nekatalitinių dielektrinių paviršių, naudojant mikrobange plazma aktyvinamo cheminio nusodinimo iš garų fazės metodą.

2. Ištirti suformuotų grafeno dangų morfologines, struktūrines, elektrines, taip pat optines, elektrooptines savybes ir išnagrinėti skirtingų nusodinimo sąlygų poveikį.

3. Atlikti grafeno sluoksnių defektų / kokybės tyrimus naudojantis pažangiu skirtuminės sugerties spektroskopijos metodu ir palyginti jį su Ramano sklaidos spektroskopijos metodu.

4. Planarinio grafeno sluoksnius pritaikyti kaip skaidrius lanksčius elektrodus organiniuose prietaisuose, naudojant grafeno perkėlimo procesą.

## **Mokslinis naujumas**

1. Planarinio grafeno ir vertikalių grafeno nanolapelių dangų sužadintos būsenos relaksacijos ultrasparti krūvininkų dinamika buvo ištirta atominiu lygmeniu, defektų atžvilgiu naudojant skirtuminės sugerties spektroskopiją.

2. Buvo nustatyta koreliacija tarp Ramano sklaidos spektroskopijos ir skirtuminės sugerties spektroskopijos gautų duomenų, analizuojant grafeno sluoksnių kokybę.

3. Planarinio grafeno dangos kaip skaidrūs lankstūs elektrodai buvo integruoti į organinius prietaisus, taikant grafeno perkėlimo procesą, kurio metu nebuvo naudojami jokie papildomi apsauginiai viršutiniai sluoksniai ar apdirbimas plazma.

## **Ginamieji teiginiai**

1. Cheminio grafeno perkėlimo procesą galima optimizuoti ir sėkmingai įvykdyti nenaudojant jokių papildomų pagalbinių medžiagų.

2. Pritaikyta skirtuminės sugerties spektroskopijos technologija gali papildyti Ramano sklaidos spektroskopijos metodu gautus duomenis ir būti perspektyvi grafeno sluoksnių kokybės / defektų analizės priemonė.

3. Sintetinti grafeno sluoksniai turi didelį potencialą būti pritaikomi kaip lankstūs skaidrūs elektrodai.

## 2. LITERATŪROS APŽVALGA

Grafenas yra dvimatė (2D) pusmetalio sistema, susidedanti iš anglies atomų, susijungusių  $sp^2$  kovalentiniais ryšiais į šešiakampes kristalinės gardelės struktūras [18]. Grafenui būdingas linijinis elektroninių juostų pasiskirstymas, kuris lemia jo didelį mobilumą ir unikalias optines savybes [19,20]. Kitos išskirtinės grafeno savybės yra ultrasparti krūvininkų dinamika, nuo bangos ilgio nepriklausanti absorbcija, modifikuojamos optinės savybės naudojant elektrostatinį legiravimą, mažas sklaidos greitis, didelis krūvininkų mobilumas ir galimybė apriboti elektromagnetinę energiją iki itin mažų verčių [21].

Vertikalių grafeno nanolapelių (VGN) dangos susideda iš nanografitinio pagrindo sluoksnio ir vertikalių kelių sluoksnių grafeno nanolapelių tinklo [22–24]. VGN pasižymi dideliu specifiniu paviršiaus plotu, chemiškai aktyviais kraštais, didžiausiu briaunų ir atomų santykiu, palyginti su bet kuriuo kitu anglies dariniu, dideliu elektriniu ir šiluminiu laidumu, cheminiu stabilumu [25,26].

Yra daugybė planarinio grafeno ir VGN dangų paruošimo būdų, įskaitant terminį SiC grafitizavimą silicio sublimacijos būdu [27], mechaninę grafito eksfoliaciją [11], grafeno oksido redukciją [28], epitaksinį nusodinimą [29], cheminį nusodinimą iš garų fazės [26,30]. Kadangi plazmoje yra energingųjų elektronų, fotonų, laisvųjų radikalų ir kitų aktyviųjų dalelių, mikrobange plazma aktyvinamas cheminis nusodinimas iš garų fazės (MW PACVD) suteikia pranašumą gauti didesnę augimo selektyvumą ir geresnę kontrolę formuojant nanostruktūras [5,31].

Defektų ir struktūros analizei dažniausiai naudojami metodai yra skenuojamoji ir prašviečiančioji elektronų mikroskopija (SEM ir TEM), atominių jėgų mikroskopija (AJM), Ramano sklaidos mikroskopija, elementinė analizė, rentgeno fotoelektronų spektroskopija (XPS) [4]. Vienas iš labiausiai išvystytų grafeno dangų analizės metodų yra Ramano sklaidos spektroskopija, kuri suteikia maksimalią grafitinių medžiagų struktūrinę informaciją apibūdinant jų kristališkumą bei defektus [11,32]. Šis metodas tapo gerai žinoma ir veiksminga technologija, skirta suprasti elektronų ir fotonų elgesiui grafeno sluoksniuose [33].

Dėl defektų grafeno Ramano sklaidos spektruose matomos D, D', 2D', D'', D+D' ir D+D'' juostos [34]. Šių smaيليų nėra bedefekčiame grafene. Pagal kilme defektai gali būti įvardijami kaip vakansijos, tarpmazginiai atomai, grūdėlių



ribos bei kraštai ir tūriniai defektai, atsirandantys dėl anglies hibridizacijos pasikeitimo iš  $sp^2$  į  $sp^3$  [35]. Yra žinoma, kad D ir G smalių intensyvumų santykis  $I_D/I_G$  kiekybiškai nusako netvarkingos grafitinės sistemos defektų kiekį [36,37], o D ir D' smalių intensyvumų santykis  $I_D/I_{D'}$  priklauso nuo fizinės defektų kilmės, tačiau nepriklauso nuo defektų koncentracijos medžiagoje [38,39]. Šiuo metu kiekybinis ir kokybinis įvairių defektų įvertinimas medžiagose grafeno pagrindu Ramano sklaidos spektroskopijos metodu yra intensyvi tyrinėjimo sritis.

Skirtuminės sugerties spektroskopija (TAS) yra žadinanti-zonduojanti spektroskopinė technologija, naudojama tiriamų medžiagų fotogeneruotos sužadintos būsenos relaksacijos absorbcijos energijoms ir būdingosioms gyvavimo trukmėms registruoti [16,40]. Pažymėtina, jog aukštos kokybės grafeno sužadintos būsenos relaksacijos krūvininkų dinamikos TAS signalas turi dvi gesimo komponentes: ultrasparčiąją (elektronų-fononų sklaida,  $> 100$  fs) ir lėtesnę (fonono-fonono sklaida,  $\sim 2$  ps) [16,41]. TAS išmatuotos relaksacijos trukmės yra ilgesnės aukštos kokybės grafeno, palyginti su grafenu, turinčiu įvairių defektų [16]. Be to, fonono-fonono sklaida buvo užregistruota naudojant TAS tik aukštos kokybės grafeno bandiniuose [16,17,42], o tai rodo, kad ilgiau trunkančios TAS signalo relaksacijos komponentės santykinė amplitudė gali būti kokybės veiksnio rodiklis.

Pastaraisiais metais grafenas pasirodė esąs perspektyvi medžiaga įvairioms elektrooptinėms sistemoms, tokioms kaip fotodetektoriai [21], fotovoltiniai elementai [43], saulės energijos konversija [44,45], fotokatalizė [46,47], optinių ir rentgeno spindulių fotonų detektoriai [48], tranzistoriai [49], ultraspartieji lazeriai [50], elektrodai [51,52], šviesą generuojantys prietaisai [53], jutikliniai ekranai [54], biomedicina [55] ir kitiems pritaikymams fotonikos, plazmonikos ir optoelektronikos srityse [56,57].

### **3. DARBO METODIKA**

#### **3.1. Mikrobange plazma aktyvinamas grafeno sluoksnių nusodinimas iš garų fazės**

Grafeno dangoms formuoti plačiai naudojamas pažangus mikrobangės plazmos aktyvinamo cheminio nusodinimo iš garų fazės (MW PACVD) metodas. Lanksti technologinių parametų kontrolė suteikia galimybę suformuoti norimų savybių, didelio ploto bei aukštos kokybės grafeno sluoksnius. Šiame darbe grafeno dangos buvo suformuotos naudojant MW PACVD sistemą CYRANNUS I-6 („IPLAS Innovative Plasma Systems“ GmbH) [58], kurios reaktorius sudarytas iš cilindrinio nerūdijančio plieno kameros ir stalelio su kaitintuvu, kuriuo galima reguliuoti padėklo temperatūrą nepriklausomai nuo mikrobangų galios.

Didelio ploto grafeno sluoksniai buvo nusodinti dviem būdais: planarinis grafenas ant katalitinio metalo padėklo (45 μm storio Cu folija, 19 mm × 19 mm ploto) ir vertikalių grafeno nanolapelių (VGN) sluoksnis ant silicio dioksido (0,5 mm storio kvarco padėklas, 15 mm × 15 mm ploto). Siekiant sudaryti nusodinimo sąlygas, specialiai tinkamas vertikalių grafeno nanolapelių sluoksnių sintezei, buvo naudojami papildomi apsauginiai metaliniai dangteliai, atitraukiantys plazmą nuo padėklo paviršiaus [67].

Planarinio grafeno ir VGN dangų formavimo procesas vykdomas dviem etapais, kurių charakteristikos nurodytos **1 lentelėje**. I etape vyksta atkaitinimas bei valymas vandenilio plazmoje, II etape – cheminio nusodinimo iš garų fazės metu, naudojant vandenilio ir angliavandenilio-metano dujų mišinį, formuojama grafeno danga.

**1 lentelė.** Planarinio grafeno ir VGN dangų cheminio nusodinimo iš garų fazės parametrai

			MW galia, kW	p, mbar	H <sub>2</sub> srautas, sccm	CH <sub>4</sub> srautas, sccm	T, °C	t, min
Planarinis grafenas	Cu folija	Atkaitinimas	1,3	30	200	0	↑550	30
		Nusodinimas	1,1	30	200	25	550	10
VGN 20– 40 min.	Kvarcas	Atkaitinimas	1,2	26	200	0	↑850	15
		Nusodinimas	1,2	26	150	50	850	20, 40
VGN 20– 140 min.	Kvarcas	Atkaitinimas	1,2	22	200	0	↑800	10
		Nusodinimas	1,2	22	150	50	800	20, 40, 60, 80, 100, 140

Darbinių metano ir vandenilio dujų santykis 1:3 pasirinktas atlikus preliminarinius eksperimentus, kurių rezultatais remiantis buvo nustatytas optimalus procesas, leidžiantis užtikrinti geriausią VGN sluoksnių kristalinę struktūrą. CH<sub>4</sub> koncentracija buvo pasirinkta pakankamai didelė, kad būtų palaikomas intensyvus nukleacijos procesas ir dėl to pakankamai didelis VGN tankis [59].

### 3.2. Grafeno sluoksnių perkėlimas

Grafeno sluoksniai nuo vario padėklų buvo atskirti cheminio ėsdinimo proceso metu. Buvo ištirti ir naudoti trijų rūšių ėsdikliai:

I. Vario ėsdiklis (FeCl<sub>3</sub>: 30–50%, HCl: 1–5%) („Sigma-Aldrich“). Vario padėklo ėsdinimo trukmė: 30 min.

II. Chromo ėsdiklis (CeH<sub>8</sub>N<sub>8</sub>O<sub>18</sub>: 20–25%, HNO<sub>3</sub>: 5–10%) („Sigma-Aldrich“). Taikomas ir variui ėsdinti. Vario padėklo ėsdinimo trukmė: 12 val.

III. FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O vandeninis tirpalas, gaminamas ištirpinant FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O miltelius dejonizuotame vandenyje. Vario padėklo ėsdinimo trukmė: 5 val.

Visiškai ištirpinus Cu foliją kambario temperatūroje, plūduriuojanti grafeno plėvelė buvo perkelta ant dejonizuoto vandens paviršiaus 24 valandoms

likutiniams ėsdinimo reagentams pašalinti. Tuomet grafeno plėvelė buvo perkelta ant norimo padėklo – kvarco ir galiausiai palikta išdžiūti atmosferos ore.

### **3.3. Analitiniai metodai**

#### *3.3.1. Skenuojamoji elektroninė mikroskopija*

Paviršiaus vaizdų tyrimai buvo atlikti naudojant skenuojamąjį elektroninį mikroskopą (SEM) „Quanta 200 FEG“ („ThermoFisher Scientific“, JAV), turintį Schottky tipo lauko emisijos elektronų šaltinį, užtikrinantį 1,2 nm skiriamąją gebą esant dideliame vakuumui ir 30 kV greitinančiai įtampai. SEM analizės metu bandiniai buvo pakreipti 45° arba 90° kampais analizuojančio elektronų pluošto atžvilgiu.

#### *3.3.2. Atominių jėgų mikroskopija*

Kiekybiniai paviršiaus morfologijos tyrimai analizuojant paviršių šiurkštumą buvo atlikti naudojant atominių jėgų mikroskopijos (AJM) sistemą „NanoWizard 3“ (JKP, Bruker, Vokietija) ir duomenų apdorojimo programinę įrangą „Gwyddion-2.49.win64“. Matavimams buvo naudojamas I formos silicio zondas („ACTA-AppNano“, JAV), veikiantis kontaktiniu ir dinaminiu režimais. Zondo smaigalio spindulys: 10 nm, elastingumo konstanta 13–77 N/m.

#### *3.3.3. Ramano sklaidos spektroskopija*

Buvo naudojamas Ramano sklaidos spektrometras inVia („Renishaw“, Jungtinė Karalystė) su 532 nm bangos ilgio diodiniu lazeriu, gardele, turinčia 2400 griovelių/mm, ir termoelektriniu būdu aušinama 1024 pikselių CCD kamera, užtikrinančia ne mažesnę kaip 1 cm<sup>-1</sup> spektrinę skiriamąją gebą. Lazero galia analizės metu buvo 2,25 mW, lazero spindulio skersmuo – 4 μm. Ramano duomenys buvo analizuojami naudojant OMNIC32v7.2.0.616 programinę įrangą, o smailės aproksimuotos taikant Lorencio (angl. *Lorentzian*) funkcijas.

#### *3.3.4. Rentgeno spindulių fotoelektronų spektroskopija*

Paviršinio sluoksnio ryšių struktūros tyrimams atlikti buvo naudojamas „Thermo Scientific ESCALAB 250Xi“, spektrometras su monochromatine Al Kα žadinimo spinduliuote ( $h\nu = 1486,6$  eV). Spektrams apdoroti pasitelkta originali „Thermo Scientific Advantage“ programinė įranga (v5,979).

#### *3.3.5. Skirtuminės sugerties spektroskopija*

Ultraspartieji relaksacijos procesai buvo tiriami naudojant skirtuminės sugerties spektrometrą HARPIA („Light Conversion“, LT). Sistemai žadinti naudotas 290 fs impulso trukmės bei 1030 nm bangos ilgio Yb:KGW lazeris „Pharos“ su regeneratyviniu stiprintuvu, kurio pasikartojimo dažnis 66,7 kHz. Žadinančio spindulio bangos ilgis buvo nustatytas 350, 400 ir 700 nm naudojant kolinearinį optinį parametrinį generatorių „Orpheus“ ir harmonikų generatorių

„Lyra“. Bandiniams žadinti naudoti  $17 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ ,  $19 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ ,  $24 \mu\text{J}/\text{cm}^2$  ir  $54 \mu\text{J}/\text{cm}^2$  energijos tankiai. Bandiniai buvo zonduojami baltos šviesos superkontinuumu, kurio spektrinis diapazonas kito nuo 367 iki 674 nm ir nuo 491 iki 794 nm. Superkontinuumo zonduojančio spindulio skersmuo apie 500  $\mu\text{m}$ .

### 3.4. Elektrochrominių prietaisų su grafeno elektrodais formavimas

Polietileno tereftalato (PET) padėklai su laidžiomis indžio alavo oksido (ITO) ir perkelta grafeno dangomis buvo naudojami kaip elektrodai elektrochrominiame (EC) prietaise su prūsiškojo mėlynojo (angl. *Prussian blue*) (PB,  $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$ ) aktyviaja medžiaga. Elektrochemiškai nusodintų PB sluoksnių optinių savybių moduliacija buvo iširta redokso reakcijų procesų metu naudojant 1 M KCl vandeninį tirpalą kaip elektrolitą. Sluoksnių pralaidumo pokyčiai veikiant prijungtai įtampai registruoti UV/VIS „Avantes“ spektrofotometru „AvaSpec-2048“ su deuterio ir halogeno šviesos šaltiniu, kurio spektrinė sritis 172–1100 nm, skiriamoji geba – 1,4 nm.

### 3.5. Organinių saulės elementų su grafeno elektrodais formavimas

Planarinio grafeno sluoksniai buvo integruoti į organinius saulės elementus (OSE) kaip skaidrūs, lankstūs, elektrai laidūs elektrodai. OSE funkcinį sluoksnių formavimas vyko naudojant šiuos technologinius žingsnius:

a) Elektronų transporto sluoksnis (ETL). Komercinių ZnO nanodalelių (H-SZ01034, Genes'ink) sluoksnis buvo suformuotas centrifugavimu (angl. *spin-coating*);

b) Aktyvusis sluoksnis. PCE12 ir ITIC (*Brillant Mater*) tirpalas buvo paruoštas santykiu 1:1 (PCE12:ITIC), kai bendra koncentracija 10 mg/1,2 ml chlorbenzene su 0,5% dijudoktano (CB:5%DIO). Aktyvūs sluoksniai buvo suformuoti centrifugavimo būdu.

c) Skylių transporto sluoksnis (HTL). Komerciniai  $\text{MoO}_x$  ( $x = \sim 3$ ) milteliai (99, 99%, „Sigma-Aldrich“) buvo termiškai užgarinti esant ypač dideliame vakuumui (10–9 mbar).

d) Elektrodai. ~100 nm storio sidabro kontaktai per specialią kaukę, kurioje išpjautos keturios 5,4 mm<sup>2</sup> ploto saulės elementų formos, buvo nusodinti naudojant nuolatinės srovės magnetroninį dulkinimą (galia 150 W, slėgis  $6 \cdot 10^{-3}$  mbar, trukmė 170 s). Lankstūs grafeno elektrodai buvo suformuoti grafeno dangas nuo Cu folijos cheminio išdėsinimo būdu pernešant ant PET plėvelės (15 mm × 15 mm).

Visi OSE bandiniai buvo pagaminti azoto aplinkoje specialioje spintoje (angl. *glovebox*), sujungtoje su nusodinimo įrenginiu, kad būtų galima nepertraukiamai suformuoti visą prietaisą.

Siekiant padidinti OSE efektyvumą, buvo formuojami papildomi sluoksniai. Sidabro nanokubai su  $\text{TiO}_2$  apvalkalu ( $\text{Ag}@\text{TiO}_2$ ) [60] buvo įmaišyti

į ZnO tirpalą. Ant grafeno elektrodų magnetroninio dulkinimo būdu remiantis kvarcinio daviklio rodmenimis nusodinta plona 3 nm storio sidabro danga bei sukamojo dengimo būdu nusodintas 20 nm skersmens sidabro nanosferų („Sigma-Aldrich“) sluoksnis.

Ekperimentuose naudotos šios medžiagų ir struktūrų konfigūracijos:

- a) Stiklas/ITO/ZnO/PCE12:ITIC/MoO<sub>3</sub> (10 nm)/Ag (Etalonas)  
PET/Gr/ZnO/PCE12:ITIC/MoO<sub>3</sub> (10 nm)/Ag;
- b) PET/Gr/MoO<sub>3</sub> (10 nm)/PCE12:ITIC/Bphene (20 nm)/Ag;
- c) PET/Gr/Ag užgarintas (3 nm)/ZnO/PCE12:ITIC/MoO<sub>3</sub> (10 nm)/Ag;
- d) PET/Gr/Ag užgarintas (3 nm)/MoO<sub>3</sub> (10 nm)/PCE12:ITIC/Bphene (20 nm)/Ag;
- e) Stiklas/ITO/ZnO+77 nm Ag@TiO<sub>2</sub> NP/PCE12:ITIC/MoO<sub>3</sub> (10 nm)/Ag;  
PET/Gr/ZnO+77 nm Ag@TiO<sub>2</sub> NP/PCE12:ITIC/MoO<sub>3</sub> (10 nm)/Ag;
- f) Stiklas/ITO/20 nm Ag NP/ZnO/PCE12:ITIC/MoO<sub>3</sub> (10 nm)/Ag  
PET/Gr/20 nm Ag NP/ZnO/PCE12:ITIC/MoO<sub>3</sub> (10 nm)/Ag;
- g) Stiklas/ITO/20 nm Ag NP/MoO<sub>3</sub>/PCE12:ITIC/Bphene (20 nm)/Ag;
- h) PET/Gr/20 nm Ag NP/MoO<sub>3</sub>/PCE12:ITIC/Bphene (20 nm)/Ag.

Organiniams saulės elementams testuoti ir įvertinti srovės tankio ir įtampos (*J-V*) charakteristikų matavimai buvo atlikti naudojant 300 klasės AAA saulės simulatorių („Abet Technologies“ Inc.) ir Keithley 2400 pikoampermetrą („Keithley Instruments“ Inc.).

## 4. REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS

### 4.1. Planarinio grafeno ir vertikalų grafeno nanolapelių sluoksnių tyrimai

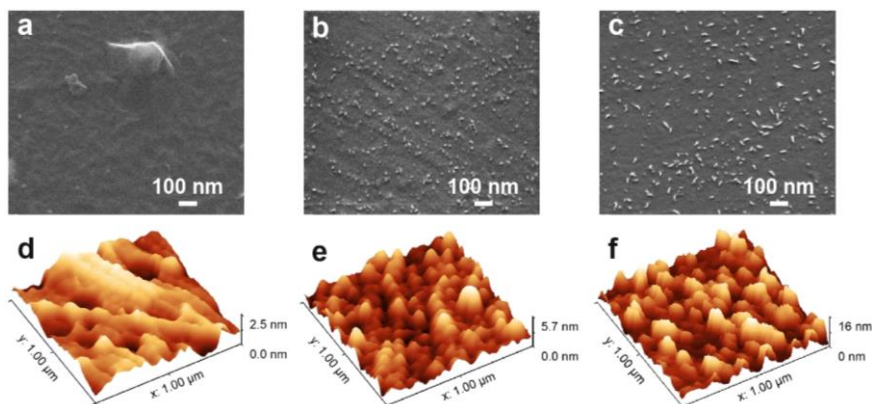
Šiame skyriuje nagrinėjamos perkelta planarinio grafeno ir tiesiogiai ant kvarco padėklų susintetintų vertikalų grafeno nanolapelių dangų morfologinės (SEM, AJM), struktūrinės (Ramano spektroskopija, XPS) bei optinės savybės (skirtuminės sugerties spektroskopija), didelį dėmesį skiriant sužadintos būsenos relaksacijos dinamikos tyrimams analizuojant susidariusius defektus.

#### 4.1.1. Morfologijos tyrimai

Planarinio ir vertikalaus grafeno dangų ant kvarco padėklų paviršiaus morfologija buvo tiriama SEM (**1 pav., a, b, c**) ir AJM (**1 pav., d, e, f**) metodais. Apskaičiuoti paviršių šiurkštumo parametrai  $R_a$ ,  $R_q$  pateikti **2 lentelėje**.

**1 paveiksle, a**, pateikta horizontalaus grafeno ištisinio sluoksnio, perkelta ant kvarco padėklo, SEM nuotrauka, kurioje matomas užterštumas, atsirandantis dėl perkėlimo proceso, esdiklio bei Cu folijos kokybės [31]. Dangos lygumą patvirtina gautos mažos paviršiaus šiurkštumo aritmetinio vidurkio ( $R_a = 0,422$  nm) ir vidutinio kvadratinio šiurkštumo ( $R_q = 0,533$ ) vertės (**2 lentelė**).

**1 paveiksle, b, c**, SEM nuotraukose pavaizduotos vertikalių grafeno nanolapelių (VGN) dangos, susidedančios iš ištisinio nanografitinio (NG) pagrindo sluoksnio ir ant jo paviršiaus užaugusių vertikalių grafeno nanolapelių. Čia vertėtų pažymėti, jog sintezės metu pirmiausia susiformuoja NG pagrindo sluoksnis su defektais, tokiais kaip amorfinė anglis, anglies svogūnai, aromatiniai žiedai ir kt. Prasidėjus antrinei nukleacijai, NG dangos defektų vietose pradeda augti vertikalūs grafeno lapeliai. Po 20 min. auginimo VGN vidutinis aukštis siekia 5,7 nm,  $R_a = 0,926$  nm ir  $R_q = 1,176$  nm. Praėjus 40 min., VGN vidutinis aukštis padidėja iki 16 nm,  $R_a = 2,717$  nm,  $R_q = 3,375$  nm (**1 pav., 2 lentelė**).

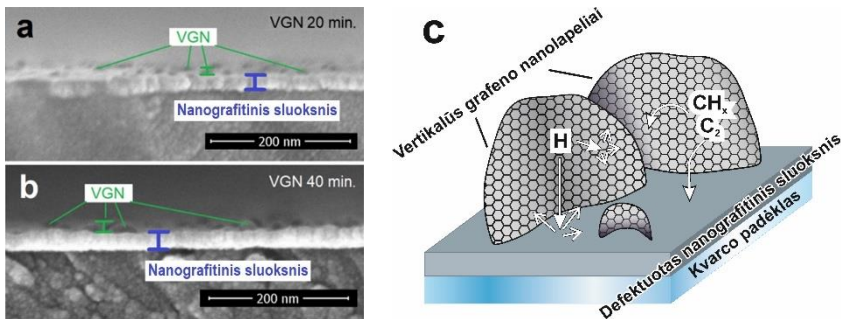


**1 pav.** SEM nuotraukos (bandiniai buvo pasukti  $0^\circ$ ) (**a, b, c**) ir AJM 3D vaizdai (**d, e, f**) planarinio grafeno (**a, d**), VGN 20 min. (**b, e**) bei VGN 40 min. (**c, f**) bandinių ant kvarco padėklų

**2 lentelė.** Grafeno bandinių paviršiaus šiurkštumo aritmetinis vidurkis ( $R_a$ ) ir vidutinis kvadratinis šiurkštumas ( $R_q$ )

	Planarinis grafenas	VGN 20 min.	VGN 40 min.
$R_a$	0,422 nm	0,926 nm	2,717 nm
$R_q$	0,533 nm	1,176 nm	3,375 nm

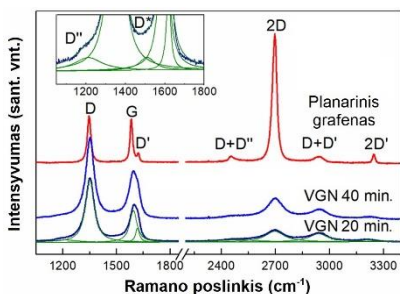
**2 paveiksle, a, b**, matomos VGN bandinių skersinių pjūvių SEM nuotraukos. VGN 20 min. bandinio NG sluoksnio storis, apskaičiuotas naudojant ImageJ programą, buvo  $20,31 \pm 2,09$  nm, o VGN 40 min. bandinio –  $35,35 \pm 4,91$  nm. VGN sluoksnių susidarymo mechanizmo iliustracija pateikta **2 paveiksle, c**.



**2 pav.** VGN 20 min. (a) ir VGN 40 min. (b) bandinių skersinių pjūvių SEM nuotraukos. VGN 20 min. storis, apskaičiuotas naudojant ImageJ programą, buvo  $20,31 \pm 2,09$  nm, o VGN 40 min. bandinio –  $35,35 \pm 4,91$  nm. VGN sluoksnių susidarymo iliustracija (c)

#### 4.1.2. Struktūros tyrimai

Planarinio grafeno bei VGN 20 min., VGN 40 min. bandinių Ramano sklaidos spektruose (**3 pav.**) matomos gerai išreikštos G ( $\sim 1590$   $\text{cm}^{-1}$ ) ( $\text{Pos}_G$ ) ir 2D ( $\sim 2700$   $\text{cm}^{-1}$ ) ( $\text{Pos}_{2D}$ ) smailės, kurios patvirtina grafitinę struktūrą. Taip pat spektruose užfiksuotos D, D', D'', 2D', D+D', D+D'', D\* smailės, atsirandančios dėl defektų, tokių kaip grūdelių ribos, briaunos,  $\text{sp}^3$  hibridizuoti anglies atomai, taškiniai defektai, sintezės metu jonų sukurti defektai, aromatiniai žiedai, į fulerenus panašios struktūros, neplokštuminiai defektai [61–63]. Charakteringų smailių G, 2D, D parametrai pateikti **3 lentelėje**.



**3 pav.** Planarinio grafeno ir vertikalių grafeno nanolapių dangų (VGN 20 min., VGN 40 min.) Ramano sklaidos spektrai. Vidiniame grafike pateikta padidinta VGN 20 min. spektro dalis ir jo aproksimacija pagal Lorencio funkciją

**3 lentelė.** Perkelta planarinio grafeno ir tiesiogiai susintetintų VGN 20 min. ir VGN 40 min. ant kvarco padėklų bandinių Ramano spektrų parametrai

	Planarinis grafenas	VGN 40 min.	VGN 20 min.
$\text{Pos}_D$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	1347,9	1352,5	1351,7
$\text{FWHM}_D$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	22,9	55,2	58
$\text{Pos}_G$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	1584	1591,6	1595,4
$\text{FWHM}_G$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	19	51,6	49,3
$\text{Pos}_{2D}$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	2696,2	2699,3	2696,9
$\text{FWHM}_{2D}$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	29,1	108	128,2
$I_D/I_G$	1,13	1,92	1,97
$I_{D'}/I_{D''}$	6,69	4,38	4,43

Ilginant sintezės trukmę, VGN bandinių spektrų smailių G, 2D, D intensyvumas didėjo, 2D, D pikų pusplotis (FWHM) mažėjo, G smailės padėtis pasislinko nuo 1595,4 iki 1591,6  $\text{cm}^{-1}$ , o  $I_{2D}/I_G$  santykio vertė pakilo. Tai parodo padidėjusį VGN dangos kristališkumą. Lyginant VGN bandinių Ramano spektrus su planarinio grafeno, pastebimas didesnis smailių G, 2D, D pusplotis, o smailės G ir D' beveik persidengia – tai pažymi didesnę VGN plėvelių defektiškumą [64].

Smalių intensyvumų santykis  $I_D/I_G$  suteikia informacijos apie defektų kiekį grafitinėje medžiagoje, o santykis  $I_D/I_{D'}$  rodo defektų rūšį [24]. Galima pastebėti, kad šio santykio reikšmė planariniame grafene yra pastebimai mažesnė (**3 lentelė**). Pagal klasifikaciją [24] nustatyta, kad perkelta planarinio grafeno santykio  $I_D/I_D'$  vertė lygi 6,7 – tai reikštų, kad vyraujantys defektai yra vakansijos, o VGN dangų šio santykio vertė yra lygi 4,4 – tai rodo, kad dangose vyrauja ribų defektai.

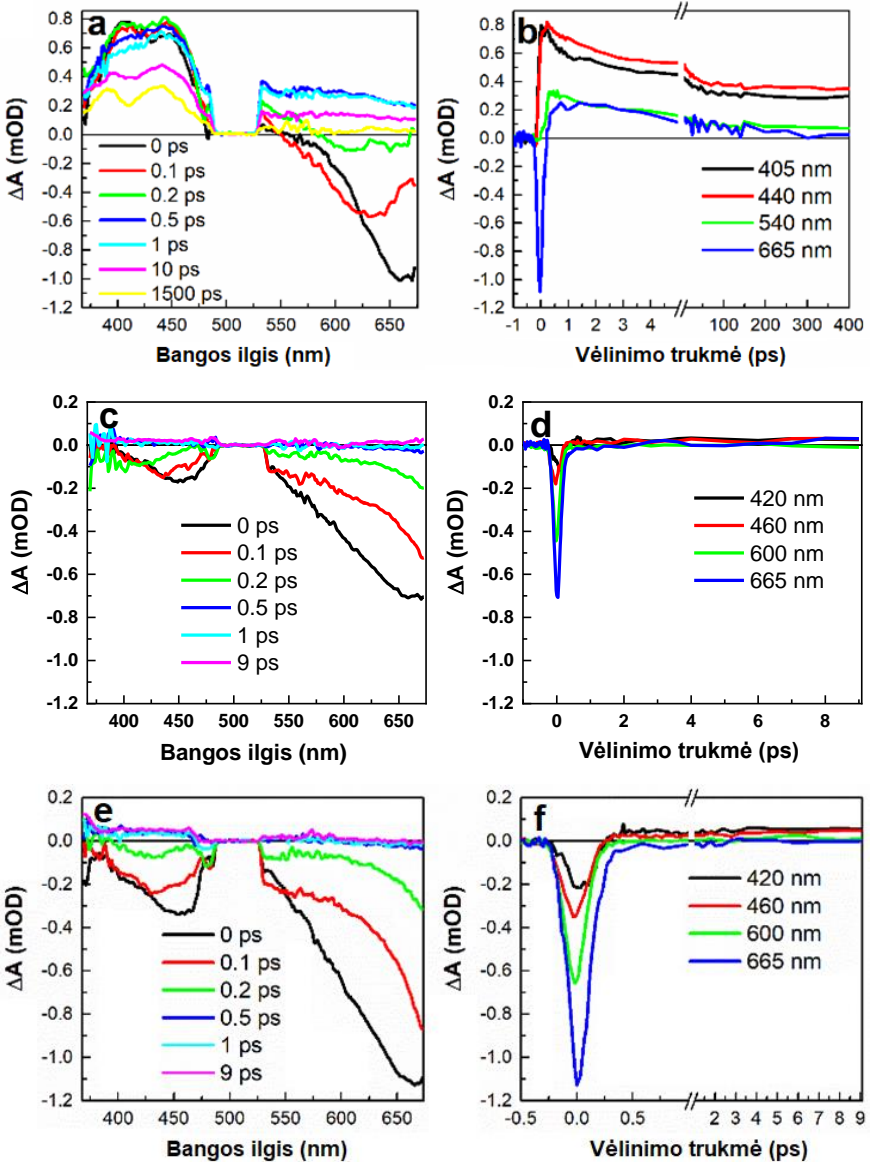
Planarinio grafeno spektro 2D ir G smalių intensyvumų santykis  $I_{2D}/I_G$  lygus 3,19 (o kituose matavimo taškuose ir mažesnis – artimas 1). Tai reiškia, kad dangą daugiausia sudaro monosluoksnis, o kai kuriuose plotuose ir keli sluoksniai [11].

#### 4.1.3. Optinių savybių tyrimai

Planarinio grafeno ir VGN 20, 40 min. bandinių skirtuminės sugerties spektrai bei kreivės pateikti **4 paveiksle**, kai bandiniai buvo žadinami 350 nm bangos ilgio spinduliu.

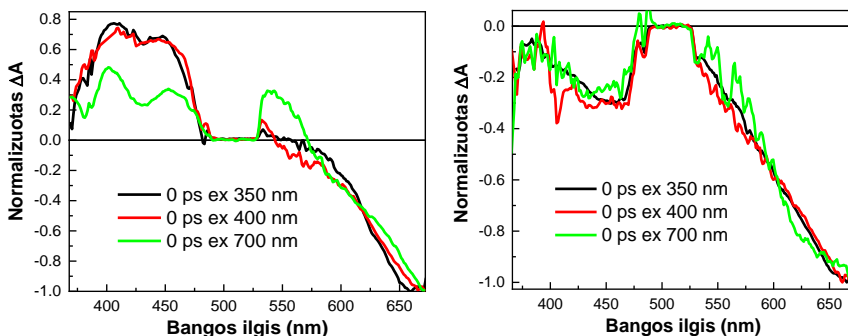
Planarinio grafeno TAS spektrai sudėtingesni, juos sudaro teigiama komponentė 370–480 nm srityje ir neigiama komponentė 550–670 nm srityje per pirmąsias 0,5 ps. Vėliau TAS spektruose matoma tik teigiama komponentė. Kitų tyrėjų atliktuose tyrimuose aukštos kokybės (artimose bedefektėms) grafeno dangose gautuose TAS spektruose užfiksuotas tik neigiamas signalas [17,65]. Tad čia pateiktuose rezultatuose teigiamas grafeno TAS signalas yra susijęs su energijos perėjimais tarp papildomų energijos lygmenų, už kuriuos atsakingi defektai, o neigiamas – bedefekčio grafeno sužadintos būsenos relaksacija (pagrindinės būsenos išbalinimas (angl. *bleaching*) dėl Pauli draudimo principo) [15]. VGN bandinių TAS spektruose teigiamas signalas neužfiksuotas – tai reiškia, kad vertikalūs grafeno lapeliai yra mažai defektuoti (aukštos kokybės grafenas).





**4 pav.** Planarinio grafeno (a, b), VGN 20 min. (c, d) bei VGN 40 min. (e, f) skirtuminės sugerties spektrai (a, c, e) ir kreivės (b, d, f). Bandiniai buvo žadinami 350 nm bangos ilgio spinduliu. Žadinant naudotas  $23 \mu\text{J}/\text{cm}^2$  intensyvumas [A2]

Planarinio grafeno ir VGN 40 min. bandinių normalizuotų TAS spektrų, esant 350, 400 ir 700 nm žadinimams, palyginimas pateiktas **5 paveiksle**. Planarinio grafeno atveju defektai turi stipresnę įtaką grafeno relaksacijos dinamikai, kai bandinys sužadinas didesnės galios / trumpesnio bangos ilgio lazerio impulsais (didesnė teigiamo signalo amplitudė) (**5 pav., a**). Tai parodo didesnę giluminių energijos lygmenų tankį, palyginti su labiau paviršinių lygmenų tankiu.



**5 pav.** Planarinio grafeno ir VGN 40 min. bandinių normalizuoti TAS spektrai, esant 350, 400 ir 700 nm žadinimams, 0 ps vėlinimo trukmei

Analizuojant planarinio grafeno ir VGN 40 min. bandinio normalizuotus TAS spektrus (**5 pav., a, b**) pastebima, kad VGN 40 min. dangos neigiamo signalo dinamika nepriklauso nuo žadinančio spindulio bangos ilgio. Abiejų bandinių ribų, briaunų defektai nedaro įtakos TAS spektrams tiek, kiek vakansijų defektai.

Planarinio grafeno TAS kreivės buvo aproksimuotos pagal eksponentinę ar bieksponentinę gesimo funkciją su viena ar dviem gesimo komponentėmis (**4 lentelė**). Teigiamo signalo (400 nm ir 440 nm kreivės) relaksacijos procesas yra lėčiausias žadinant trumpo bangos ilgio (350 nm) spinduliu ir greičiausias žadinant ilgo bangos ilgio (700 nm) spinduliu, nes sužadunami skirtingi defektų energijos lygmenys. Relaksacijos procesas dalyvaujant defektams su aukštesniais energijos lygmenimis yra lėtesnis.

Vertikalaus grafeno bandinių TAS kreivių aproksimacijos rezultatai pateikti **5 lentelėje**. Kuo didesnė fotono energija, tuo VGN 40 min. bandinio sužadintos būsenos relaksacijos trukmė ilgesnė, o VGN 20 min. bandinio atveju nepastebima aiški tendencija (galimai dėl didelio triukšmo lygio). TAS kreivėse matoma tik greitoji neigiama gesimo komponentė (susijusi su elektrono-fonono sklaida ~0,1 ps) [17,66–70], o lėtoji teigiama komponentė neužfiksuota (fonono-fonono sklaida). Tai patvirtina aukštos kokybės grafeno struktūrą tirtuose bandiniuose.

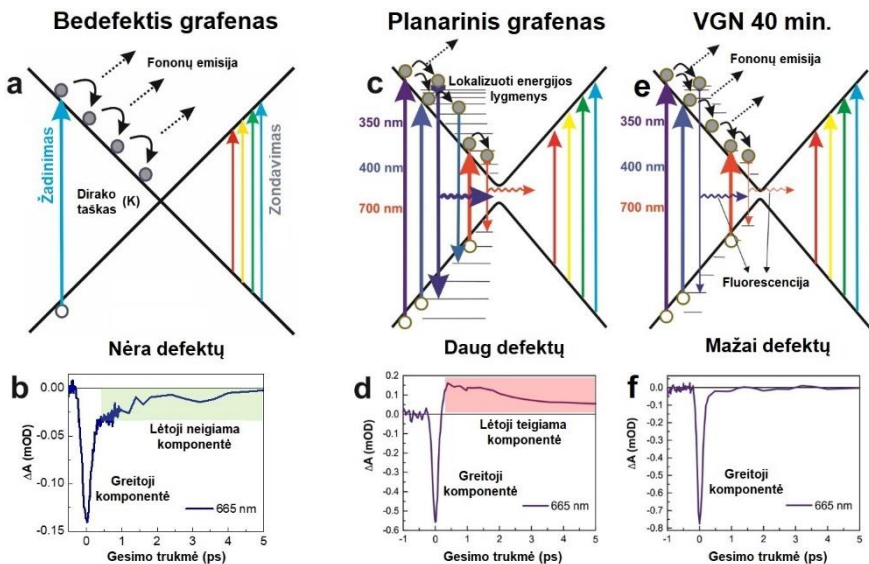
**4 lentelė.** Planarinio grafeno TAS kreivių relaksacijos gesimo trukmės ( $\tau$ ), kai zonduojančio spindulio pasirinkti bangos ilgiai: 400–407, 440–455, 665 nm, o žadinančio spindulio: 350, 400 ir 700 nm [A2]

TAS kreivė/žadinimas	$\tau_1$ (ps)	$A_1$	$\tau_2$ (ps)	$A_2$
404 nm / žad. 350 nm	0,82±0,06	0,42±0,02	24,4±2,8	0,24±0,01
407 nm / žad. 400 nm	0,50±0,05	0,46±0,02	9,4±1,1	0,27±0,02
400 nm / žad. 700 nm	0,30±0,03	0,86±0,03	2,3±0,4	0,31±0,04
440 nm / žad. 350 nm	1,95±0,11	0,40±0,01	58,7±5,8	0,20±0,01
440 nm / žad. 400 nm	1,86±0,13	0,43±0,01	52,8±9,1	0,16±0,01
455 nm / žad. 700 nm	1,64±0,09	0,77±0,02	-	-
665 nm / žad. 350 nm	0,15±0,01	1,09±0,02	-	-
665 nm / žad. 400 nm	0,15±0,01	1,11±0,04	-	-
665 nm / žad. 700 nm	0,18±0,01	1,72±0,04	-	-

**5 lentelė.** Vertikalaus grafeno ultrasparčios relaksacijos gesimo trukmės ( $\tau$ ), susijusios su elektrono-fonono sklaidos procesu (greitoji gesimo komponentė) VGN 20 min. ir VGN 40 min. bandiniuose [A2]

Bangos ilgis (nm)	$\tau$ (ps)/350 nm	$\tau$ (ps)/400 nm	$\tau$ (ps)/700nm
<b>VGN 20 min.</b>			
420	0,098±0,009	0,098±0,007	0,147±0,011
460	0,150±0,009	0,088±0,005	0,090±0,008
600	0,123±0,005	0,123±0,006	0,095±0,004
665	0,115±0,004	0,147±0,008	0,147±0,008
<b>VGN 40 min.</b>			
420	0,149±0,010	0,104±0,006	0,093±0,009
460	0,150±0,008	0,119±0,006	0,082±0,006
600	0,117±0,005	0,105±0,005	0,098±0,006
665	0,139±0,005	0,119±0,005	0,101±0,004

Apibendrinant gautus rezultatus ir vadovaujantis [15,66] pateiktais paaiškinimais, **6 paveiksle** grafiškai pavaizduojami elementarūs procesai, vykstantys sužadintos būsenos relaksacijos metu bedefekčiame / aukštos kokybės grafene, planariniame defektuotame grafene ir VGN 40 min. bandinyje.



**6 pav.** Bedefekčio grafeno (a, b), planarinio grafeno (c, d) ir VGN 40 min. (e, f) ultrsparčiųjų procesų supaprastinta energijos lygmenų diagrama (a, c, e) ir TAS signalo relaksacijos kreivės (665 nm) (b, d, f) [A2]

## 4.2. Vertikalių grafeno nanolapelių dangų savybių kitimo priklausomai nuo nusodinimo trukmės tyrimai

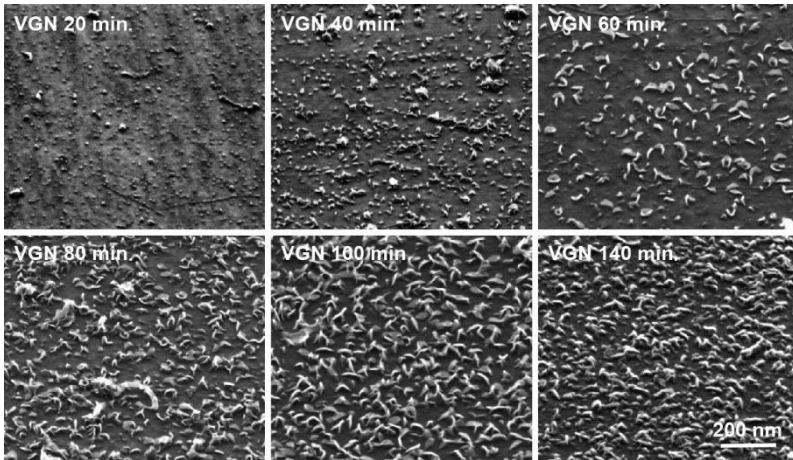
Šiame skyriuje nagrinėjamas vertikalių grafeno nanolapelių dangų ant kvarco padėklų formavimasis, struktūros pokyčiai, priklausomai nuo nusodinimo trukmės (20–140 min.).

### 4.2.1. Morfologijos tyrimai

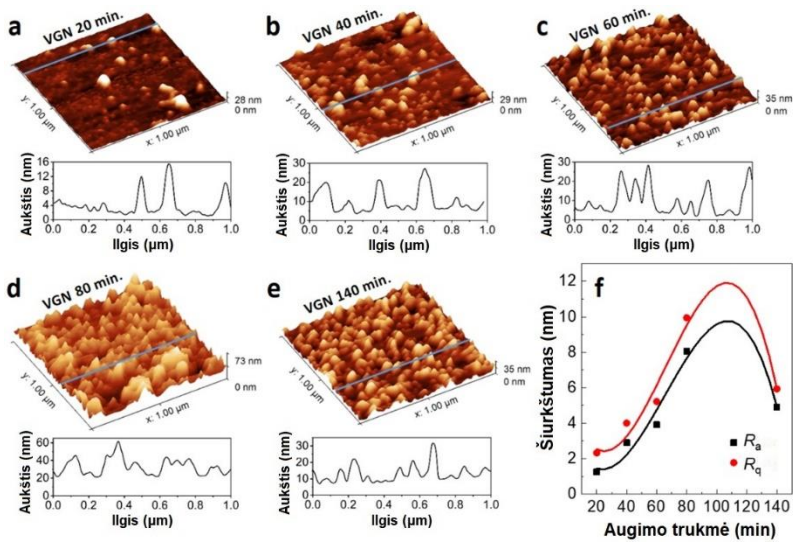
**7 paveiksle** iš pateiktų VGN 20–140 min. bandinių SEM nuotraukų matoma, kad, nusodinus dangą 20 min., jau susiformavo ištisinis nanografinis sluoksnis ir jo paviršiuje atsirado vertikalių grafeno nanolapelių užuomazgų. Ilginant sintezės trukmę, šių nanolapelių matmenys bei tankis didėjo auginant iki 100 min. Dar pailginus nusodinimo trukmę (140 min.), nanolapeliai užaugo mažesni, bet pakankamai tankūs.

Morfologijai kiekybiškai įvertinti buvo pamatuoti VGN 20–140 min. bandinių AJM 3D vaizdai ( $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ ) (**8 pav.**, a–e) ir apskaičiuotos šiurkštumo vertės (**8 pav.**, c, e, f). Vidutinis grafeno nanolapelių aukštis kito nuo 28 nm iki 73 nm tiriant bandinius VGN 20–80 min., o ilgiausiai augintoje dangoje VGN 140 min. užfiksuotas sumažėjimas iki 35 nm. VGN 140 min. šiurkštumo parametrai  $R_a$ ,  $R_q$  panašūs į VGN 60 min. bandinio (**8 pav.**, f), tačiau VGN tankis artimesnis VGN 80 min. (**7 pav.**). Tokie VGN dangų morfologijos

formavimosi pokyčiai galėjo atsirasti dėl plazmos nestabilumo (elektrinio lauko netolygaus pasiskirstymo) reaktoriuje esant ilgesnei nei 100 min. nusodinimo trukmei.



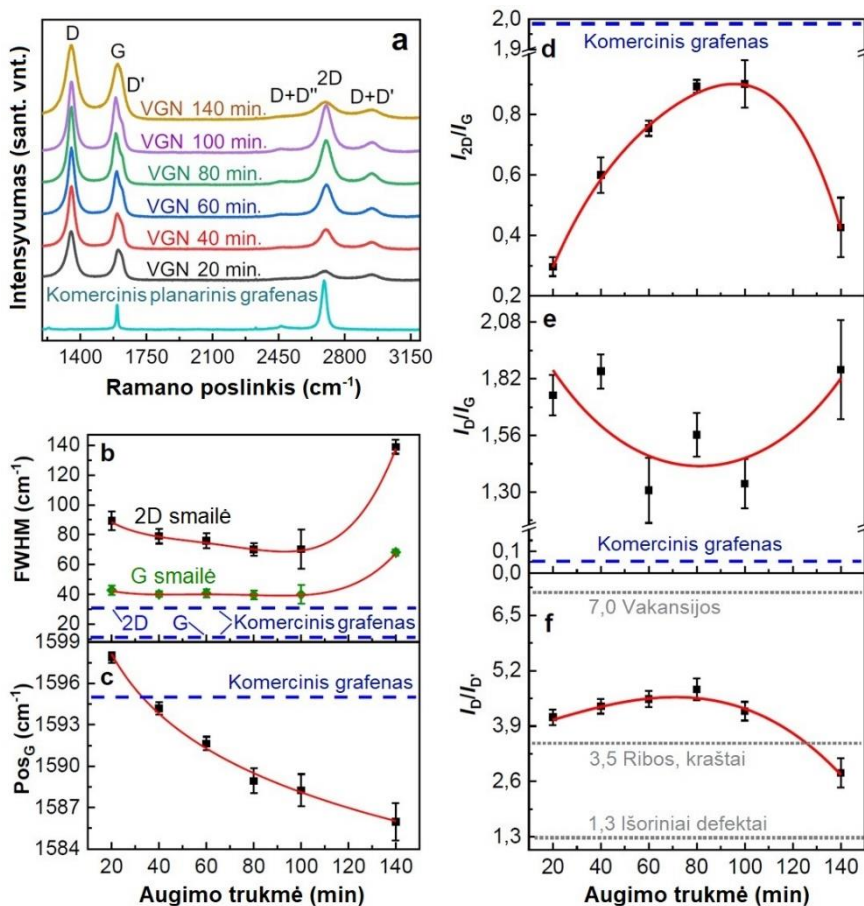
**7 pav.** VGN dangų, nusodintų tomis pačiomis sąlygomis (1,2 kW mikrobangų galia,  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  dujų santykis 1/3), išskyrus augimo trukmę: 20–140 min. Visi bandiniai buvo pakreipti  $45^\circ$  kampu [A1]



**8 pav.** VGN 20–140 min. bandinių paviršių AJM 3D vaizdai ir profiliai (pažymėtos matavimo linijos) (a–e) bei apskaičiuotų šiurkštumo parametų ( $R_a$ ,  $R_q$ ) priklausomybė nuo auginimo trukmės (f) [A1]

#### 4.2.2. Struktūros tyrimai

VGN 20–140 min. bandinių grafitinę prigimtį ( $sp^2$  jungtimis susijungusius C atomus) patvirtina tipiniuose Ramano sklaidos spektruose matomos charakteringosios G ir 2D smailės (**9 pav.**, **a**). Tai, kad dangos turi struktūrinių defektų, (daugiausia dėl susiformavusio nanografitinio sluoksnio), patvirtina ir D, D', D+D', D+D'' pikai. Pastarųjų smailių nėra aukštos kokybės komercinio planarinio grafeno spektre.

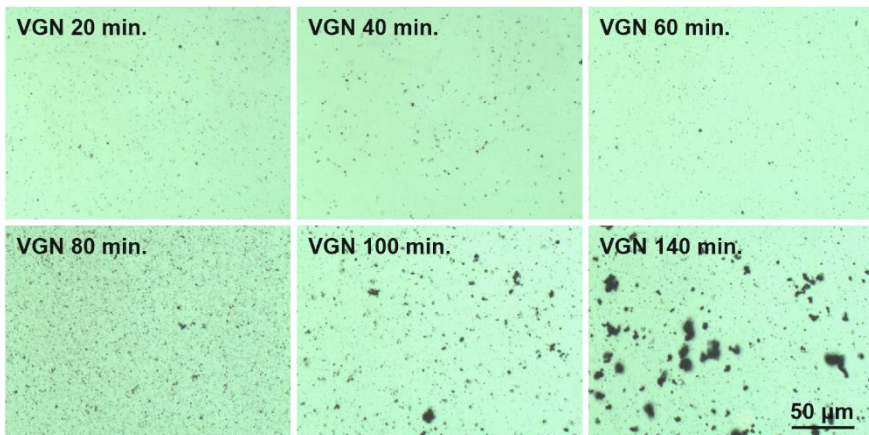


**9 pav.** Ramano sklaidos spektrų analizė. VGN 20–140 min. bandinių bei komercinio grafeno Ramano sklaidos spektrai (**a**), FWHM (**b**), Pos<sub>G</sub> (**c**),  $I_{2D}/I_G$  (**d**),  $I_D/I_G$  (**e**),  $I_D/I_{D'}$  (**f**) priklausomybės nuo augimo trukmės [A1]

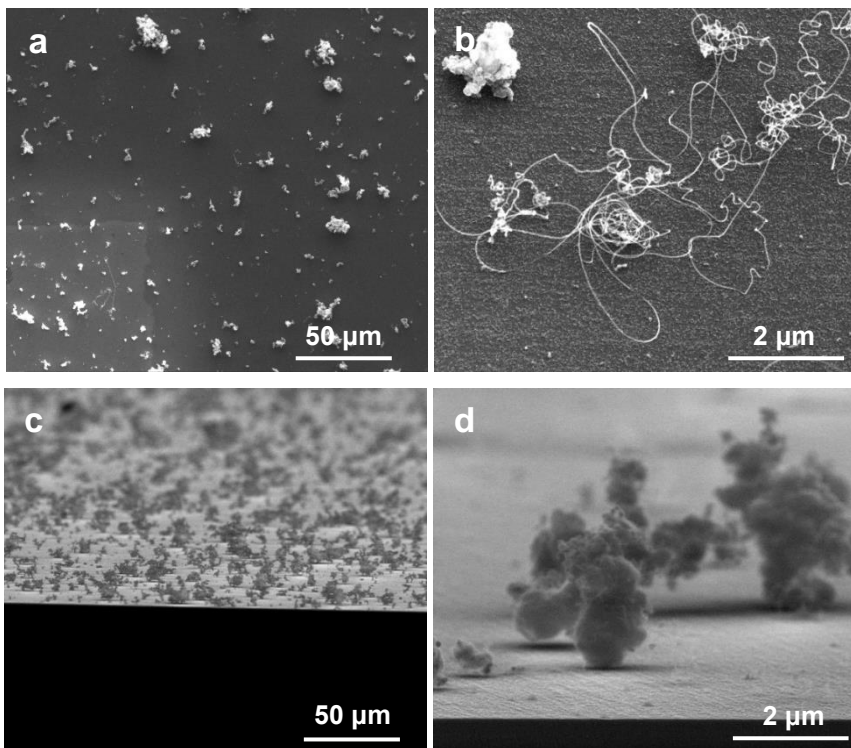
Būdingųjų smailių parametrų priklausomybės nuo sintezės trukmės grafikai pateikti **9 paveiksle, b–f**. Ilginant nusodinimo laiką G, 2D smailių intensyvumas didėjo, FWHM mažėjo (**9 pav., b**), o intensyvumų santykio  $I_{2D}/I_G$  vertė kilo (**9 pav., d**) nusakant didėjantį kristališkumą, išskyrus ilgiausiai augintą bandinį VGN 140 min. (labiau defektuotas, mažiau išvystyta kristalinė struktūra).

Intensyvumų santykio  $I_D/I_G$  priklausomybės nuo nusodinimo trukmės grafikas (**9 pav., e**) yra parabolės formos, nurodantis, kad VGN 60 min. danga turi mažiausią kiekį defektų, o VGN 140 min. – didžiausią. VGN 20–100 min. bandiniuose  $I_D/I_G$  santykio vertės artimos 3,5, t. y. vyraujantys defektai yra briaunos, kraštai, grūdelių ribos, o VGN 140 min. dangoje artėja link 1,3 reikšmės (**9 pav., f**), t. y. dangoje dominuoja neplokštuminiai defektai, kurie yra susiję su išoriniais atomais, prisijungusiais prie anglies atomų plokštumoje, dažniausiai dimerų bei klasterių forma.

Visų VGN bandinių optinio mikroskopo nuotraukos (**10, 11 pav.**) bei didelės rezoliucijos SEM vaizdai patvirtina Ramano spektroskopijos rezultatus. Bandinių paviršiuje susiformavę įvairaus dydžio bei tankio juoduliai (**10 pav.**) – tai nanosiūlų kamuoliai ir kitos 3D anglies struktūros (**11 pav.**) (neplokštuminiai defektai). VGN 60 min. dangos paviršius „švariausias“, o VGN 140 min. – labiausiai „užterštas“.



**10 pav.** VGN 20–140 min. bandinių optinio mikroskopo nuotraukos



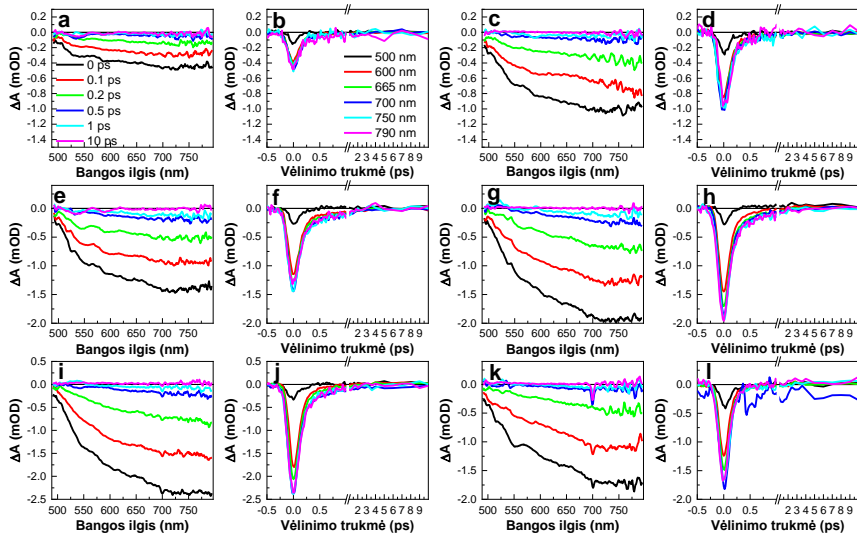
**11 pav.** VGN 140 min. bandinio mažo didinimo SEM nuotraukos; (a, b) pakreipti 45°, (c, d) 90°

#### 4.2.3. Optinių savybių tyrimai

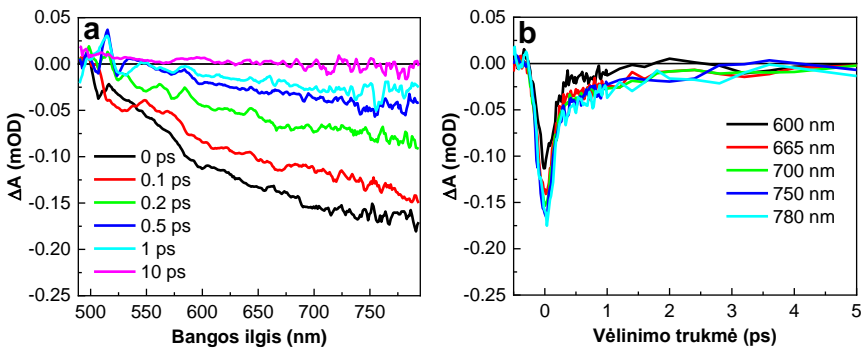
VGN 20–140 min. dangų ir komercinio aukštos kokybės grafeno TAS spektrai bei kreivės pateiktos **12, 13 paveiksluose**. Visų tirtų bandinių buvo užregistruotas tik neigiamas TAS signalas, identifikuojantis  $sp^2$  jungtis tarp anglies atomų.

750 nm TAS kreivių esant 0 ps vėlinimo trukmei signalo amplitudžių verčių priklausomybės nuo nusodinimo trukmės grafikas pateiktas **14 paveiksle**. Ilgėjant sintezės trukmei, TAS signalo amplitudė didėjo tiesiškai, išskyrus 140 min. atvejį. TAS duomenys koreliuoja su Ramano spektroskopijos bei morfologijos tyrimo rezultatais. VGN 140 min. bandinys pasižymi mažesniu grafeno, bet didesniu kitų anglies atmainų kiekiu. Aproximuotų TAS signalų parametrų vertės pateiktos **6 lentelėje** ir **14 paveiksle, c**.

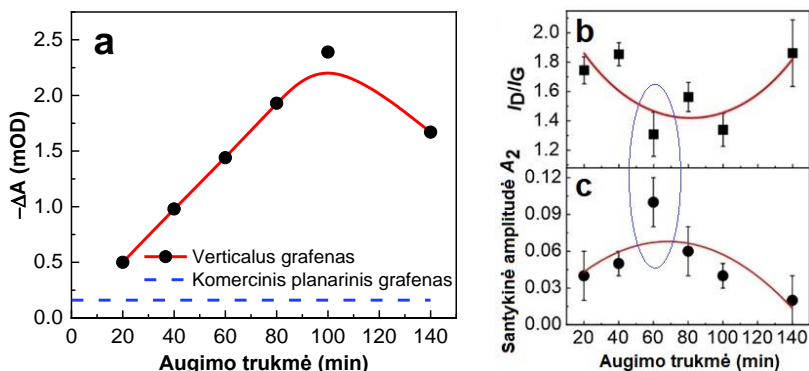




12 pav. VGN dangu, nusodintų skirtingomis trukmėmis: 20 (a, b), 40 (c, d), 60 (e, f), 80 (g, h), 100 (i, j) ir 140 min. (k, l) TAS spektrai (a, c, e, g) ir kreivės (b, d, f, h, j, i)



13 pav. Komercinio planarinio grafeno (bedefekčio), perkelta ant kvarco padėklo, TAS spektrai (a) ir kreivės (b)



**14 pav.** VGN 20–140 min. bandinių ir komercinio planarinio grafeno TAS signalo amplitudės ties 750 nm priklausomybė nuo augimo trukmės (0 ps gesimo trukmė) (**a**),  $I_D/I_G$  santykio (**b**) ir TAS signalo santykinės amplitudės  $A_2$  (**c**) priklausomybė nuo augimo trukmės (pastebima aiški koreliacija)

**6 lentelė.** VGN 20–140 min. bandinių TAS signalo relaksacijos gesimo trukmės bei amplitudės\*

Bandinys (665 nm kreivė)	$\tau_1$ (ps)	$A_1$	$\tau_2$ (ps)	$A_2$	$R^2$
VGN 20 min.	0,15±0,01	0,96±0,03	2,33±2,41	0,04±0,02	0,9748
VGN 40 min.	0,16±0,01	0,95±0,02	4,82±3,27	0,05±0,01	0,9860
VGN 60 min.	0,16±0,01	0,9±0,02	1,93±0,62	0,1±0,02	0,9913
VGN 80 min.	0,16±0,01	0,94±0,02	1,71±1,22	0,06±0,02	0,9913
VGN 100 min.	0,16±0,01	0,96±0,02	2,44±2,04	0,04±0,01	0,9898
VGN 140 min.	0,13±0,01	0,98±0,02	4,55±11,93	0,02±0,02	0,9892
Komercinis grafenas	0,14±0,01	0,79±0,03	2,28±0,58	0,21±0,02	0,9700

\* $A_1 + A_2 = I$

TAS ir Ramano spektroskopijos rezultatai patvirtina, kad VGN 60 min. bandinys pasižymi geriausios kokybės grafenu (mažiausiu defektų kiekiu) (**14 pav.**, **b**, **c**). VGN dangų kokybės tyrimams reikšmingas parametras – TAS kreivės lėtosios gesimo komponentės santykinė amplitudė  $A_2$ . Jos reikšmė (0,1) didžiausia bandinio VGN 60 min., o mažiausia (0,02) – VGN 140 min. Komercinio grafeno  $A_2$  vertė siekia 0,21. Didėjant grafeno dangos kokybei (mažėjant defektų kiekiui), parametro  $A_2$  vertė didėja.

Šiame skyriuje buvo pademonstruota, kad TAS duomenys suteikia reikšmingos informacijos apie VGN dangų defektus / kokybę.

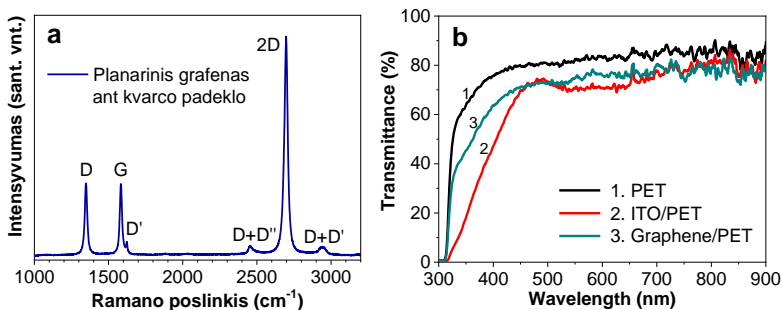
### 4.3. Elektrochrominių prietaisų veikimo tyrimai

Prie elektrochrominio prietaiso prijungus išorinę įtampą (-3 V sistemai PB/grafenas/PET), vyksta PB medžiagos elektrocheminė redukcija, ir sluoksnis tampa bespalvis arba išblyškęs. Prijungus atvirkštinę įtampą (3 V), vyksta oksidacijos procesas, kurio metu gaunama mėlyna elektrochrominių sluoksnių spalva. Ilgiau laikant 3 V išorinę įtampą, EC sluoksnio spalva tampa geltona.

Ištirta išorinės įtampos įtaka PB/Grafeno/PET sistemos pralaidumui. Optinis pralaidumas išblyškimo būsenoje:  $T_{700\text{nm}} = 32\%$ , spalvos įgavimo:  $T_{700\text{nm}} = 10\%$ , ir tarpinėje geltonos spalvos būsenoje:  $T_{700\text{nm}} = 17\%$ . Įprastos blyškimo ir spalvos įgavimo trukmės yra atitinkamai 39 s ir 20 s. Šios vertės gautos didesnės, palyginti su EC prietaisų, suformuotų naudojant tą pačią PB aktyviają medžiagą ir elektrolitą, bet su ITO elektrodais: išblyškimas – 3 s, spalvos įgavimas – 10 s. Tokį skirtumą daugiausia lėmė 100 kartų didesnė grafeno dangų paviršinė varža.

### 4.4. Organinių saulės elementų veikimo tyrimai

Vieno iš planarinio grafeno bandinių susintetintų tomis pačiomis sąlygomis ant kvarco padėklo Ramano spektras pavaizduotas **15 paveiksle, a**. Puikiai išreikštos charakteringosios G ir 2D smailės patvirtina dangos grafitinę struktūrą bei susiformavusį monosluoksnį ( $I_{2D}/I_G = \sim 3$ ). Smailė D parodo, kad dangoje yra ir defektų.



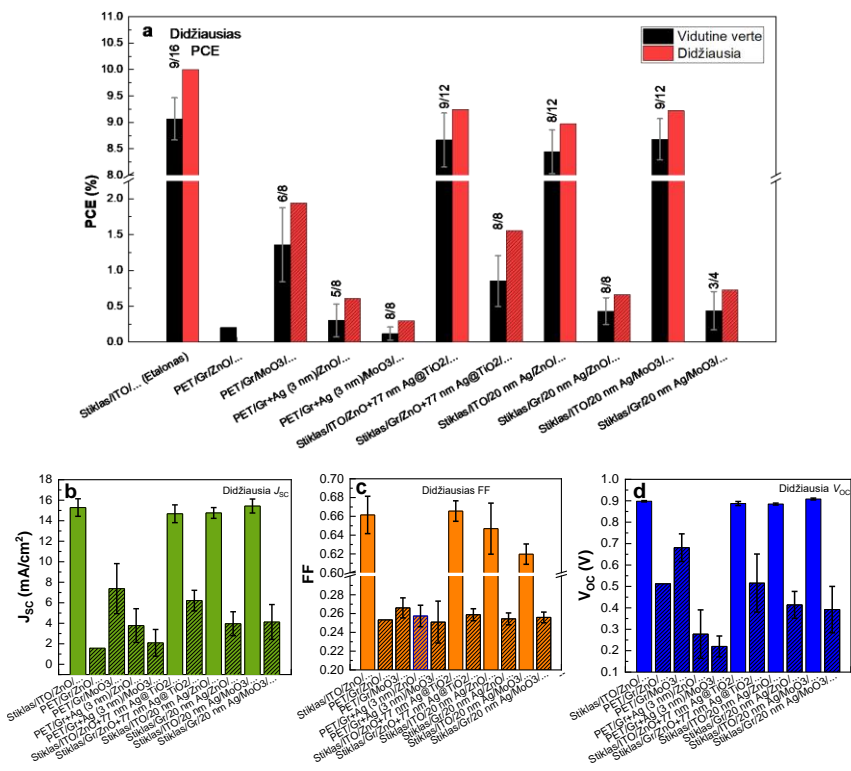
**15 pav.** Planarinio grafeno, perkeltos ant kvarco padėklo, Ramano sklaidos spektras (a), PET folijos, ITO ant PET, grafeno ant PET pralaidumo spektrai (b)

Grafeno sluoksnių ant kvarco padėklų paviršinė varža yra apie 1,2 k $\Omega$ /kv., o komercinių ITO dangų ant PET  $\leq 10 \Omega$ /kv., t. y. 100 kartų mažesnė. Iš pateiktų pralaidumo spektrų (**15 pav., b**) matyti, kad grafeno ir ITO plėvelių ant PET pagrindų skaidrumas labai panašus ( $\sim 75\%$ ).

Pagrindinės charakteristikos, apibūdinančios suformuotų OSE veikimą, yra trumpojo jungimo srovės tankis ( $J_{SC}$ ), atviros grandinės įtampa ( $V_{OC}$ ), užpildos koeficientas (FF), apskaičiuotas pagal išmatuotas voltamperines ( $J$ - $V$ ) kreives ir galios konvertavimo efektyvumas (PCE), jos pavaizduotos

**16 paveiksle.** OSE su ITO elektrodais veikimas visapusiškai geresnis. Etaloninio OSE su ITO bandinio PCE vertė buvo didžiausia ir siekė 10%. Papildomai suformuotas Ag nanodalelių sluoksnis ant ITO esant OSE konfigūracijai: Stiklas/ITO/20 nm Ag NP/MoO<sub>3</sub>/PCE12:ITIC/Bphene (20 nm)/Ag, lėmė didžiausias  $J_{SC}$  ir  $V_{OC}$  vertes. O OSE su grafeno elektrodais didžiausios visų charakteristikų reikšmės (PCE = 2%,  $J_{SC}$ ,  $V_{OC}$ , FF) buvo nustatytos OSE, turinčiam PET/Gr/MoO<sub>3</sub> (10 nm)/PCE12:ITIC/Bphene (20 nm)/Ag konfigūraciją.

Užpildos koeficientas parodo saulės elementų kokybę. Visų OSC su grafeno elektrodais FF artimas 0,25 vertei (**16 pav., c**). Elementuose su ITO nustatytas daugiau nei dvigubai didesnis FF, viršijantis 0,62. Geriausias FF (0,67) gautas esant atvirkštinei konfigūracijai: Stiklas/ITO/ZnO+77 nm Ag@TiO<sub>2</sub> NP/PCE12:ITIC/MoO<sub>3</sub> (10 nm)/Ag. Išsamūs Ag@TiO<sub>2</sub> nanodalelių savybių tyrimai pateikti [60].



**16 pav.** OSE su grafeno ir ITO elektrodais energijos konvertavimo efektyvumo PCE (a), trumpojo jungimo srovės tankio  $J_{SC}$  (b), užpildos koeficiento FF (c) ir atviros grandinės įtampos  $V_{OC}$  (d) diagramos

Nors organiniai fotovoltiniai įtaisai su integruotais skaidriais lanksčiais grafeno elektrodais nepalengviau įprastų OSE su ITO elektrodais, tačiau grafeno sluoksniai yra perspektyvūs lankstaus elektrodo konfigūracijai, o tai neįmanoma naudojant ITO [71–73].

## 5. IŠVADOS

1. Kompleksinė analizė, atlikta skenuojamąja elektronine mikroskopija, atominių jėgų mikroskopija, rentgeno spindulių fotoelektronų spektroskopija, Ramano sklaidos spektroskopija, skirtuminės sugerties spektroskopija ir kitais metodais, parodė, kad grafeno sluoksnių, suformuotų mikrobange plazma aktyvinamu cheminiu nusodinimu iš garų fazės ant vario folijos ir perkeltų ant kvarco padėklų (planarinis grafenas) bei tiesiogiai nusodintų vertikalių grafeno nanolapelių sluoksnių ant kvarco, savybės morfologijos, struktūros ir defektų atžvilgiu skyrėsi. Pagrindiniai vyraujantys defektai vertikalaus grafeno dangose yra grūdelių ribos ir kraštai, o planariniame grafene – vakansijos.

2. Planarinis grafenas, aktyvinant mikrobange plazma, chemiškai nusodintas iš garų fazės, ant katalitinio vario padėklo sudaro vientisą 1–3 sluoksnių plėvelę, kurios paviršinė varža lygi 1,2 kΩ/kv. Eksperimentiškai patvirtinta, kad cheminis perkėlimo procesas gali būti sėkmingai atliktas nenaudojant poli(metilmetakrilato) apsauginio sluoksnio ir plazminio apdirbimo, ir tai leidžia sumažinti dangų užteršimą.

3. Iširta vertikalių grafeno nanolapelių sluoksnių sintezės mikrobange plazma aktyvinamo cheminio nusodinimo iš garų fazės metodu kinetika, naudojant pastovią mikrobangų galią ir fiksuotą darbinių metano ir vandenilio dujų santykį, tačiau parenkant skirtingą auginimo trukmę. Parodyta, kad tokios dangos yra sudarytos iš vientiso nanografitinio pagrindo sluoksnio ir skirtingo aukščio vertikalių grafeno nanostruktūrų. Remiantis morfologijos analize nustatyta, jog, ilginant nusodinimo trukmę, vertikalių grafeno nanolapelių aukštis didėja iki tam tikro kritinio storio (arba nusodinimo laiko), kai pastebimi plazmos nestabilumai ir dėl to sukelti elektrinio lauko pokyčiai, trukdantys tolimesniam dangų augimui.

4. Tiek linijinės, tiek nelinijinės vertikalių grafeno nanolapelių dangų skirtuminės sugerties spektrų intensyvumo amplitudės didėja tiesiškai ilgėjant nusodinimo trukmei iki tam tikro kritinio laiko, kai pradeda formuotis įvairūs anglies alotropai kaip paviršiniai defektai. Tai parodo, kad dėl labai ilgo sintezės laiko vertikalaus grafeno sluoksnių formavimasis tampa nestabilus.

5. Pademonstruota, kad skirtuminės sugerties absorbcijos signalo būdingosios gesimo trukmės gali suteikti informacijos apie defektus ir kad ši skirtuminės sugerties spektroskopija yra veiksminga charakterizavimo technologija, leidžianti įvertinti įvairių tipų grafeno kokybę, todėl gali papildyti Ramano sklaidos spektroskopijos metodą. Vertikalaus grafeno sluoksnių

skirtuminės sugerties spektroskopijos ir Ramano sklaidos spektroskopijos spektruose atsispindi panašios tendencijos defektų tyrimo atžvilgiu. Skirtuminės sugerties spektroskopijos duomenys gerai koreliuoja su intensyvumų santykių  $I_{2D}/I_G$ ,  $I_D/I_G$  priklausomybėmis nuo auginimo trukmės, o tai rodo, kad metodas gali būti naudojamas kaip veiksminga grafeno kokybės vertinimo priemonė.

6. Išsami grafeno dangų analizė kartu su skirtuminės sugerties spektroskopijos matavimais parodo, kad, pasitelkiant grafeno sluoksnių sužadintos būsenos relaksacijos dinamikos tyrimus, galima sukurti veiksmingą, greitą ir patikimą grafeno kokybės vertinimo metodiką. Deja, vis dar lieka atviras klausimas, kaip, naudojantis skirtuminės sugerties spektroskopijos rezultatais, nustatyti defektų tipą ir jų koncentraciją. Siekiant, kad šis metodas taptų universalesnis ir būtų iki galo pritaikytas įvairių grafeno sluoksnių kokybės nuodugniai įvertinimui, reikia atlikti daugiau sisteminių tyrimų, nustatant, kokią konkrečių įtaką skirtuminės sugerties signalui daro tam tikros rūšies defektai.

7. Į taikymus orientuotų eksperimentų rezultatai patvirtino potencialų mikrobange plazma aktyvinamo cheminio nusodinimo iš garų fazės būdu susintetintų grafeno sluoksnių pritaikymą laidžių, chemiškai stabilių, skaidrių ir lanksčių elektrodų gamyboje. Elektrochrominio prietaiso su prūsiškojo mėlynojo (angl. *Prussian blue*) aktyviaja medžiaga ir grafeno elektrodais spalvos išblyškimo ir spalvos įgavimo procesų laikų trukmės buvo atitinkamai 13 ir 2 kartus ilgesnės nei elektrochrominio prietaiso su indžio alavo oksido elektrodais.

8. Didžiausios pagrindinių voltamperinių charakteristikų vertės: galios konvertavimo efektyvumas 1,94%, užpildos koeficientas 0,27, buvo nustatytos organinių saulės elementų su grafeno sluoksniais PET/Gr/MoO<sub>3</sub>/PCE12:ITIC/Bphene/Ag konfigūracijai, o tai yra atitinkamai apie 5 ir 2 kartus mažiau nei saulės elementų su indžio alavo oksido dangomis (galios konvertavimo efektyvumas 10,00%, užpildos koeficientas 0,66). Nors organinių saulės elementų veikimas, naudojant grafeno elektrodus, nepranoko elementų su įprastais indžio alavo oksido elektrodais, tačiau grafeno sluoksniai yra daug žadantys lanksčioms elektrodo konfigūracijoms formuoti, o tai yra neįmanoma naudojant indžio alavo oksidą.

## LITERATŪRA

1. L. LIN, H. PENG, Z. LIU, Synthesis challenges for graphene industry. *Nat. Mater.* 2019, Vol. 18, p. 520–529. DOI 10.1038/s41563-019-0341-4.
2. R. YE, J.M. TOUR, Graphene at Fifteen. *ACS Nano.* 2019, Vol. 13, p. 10872–10878. DOI 10.1021/acsnano.9b06778.
3. E. MALIC, A. KNORR, Graphene and Carbon Nanotubes. 2013, DOI 10.1002/9783527658749.
4. A.P. KAULING, A.T. SEEFELDT, D.P. PISONI, R.C. PRADEEP, R. BENTINI, R.V.B. OLIVEIRA, K.S. NOVOSELOV, A.H.C. NETO, The Worldwide Graphene Flake Production. *Adv. Mater.* 2018, Vol. 30, no. 44, p. 1803784 (1-6). DOI 10.1002/adma.201803784.
5. O. BAYRAM, O. SIMSEK, Vertically oriented graphene nano-sheets grown by plasma enhanced chemical vapor deposition technique at low temperature. *Ceram. Int.* 2019, Vol. 45, no. 11, p. 13664–13670. DOI 10.1016/j.ceramint.2019.04.034.
6. H. WANG, E. GAO, P. LIU, D. ZHOU, D. GENG, X. XUE, L. WANG, K. JIANG, Z. XU, G. YU, Facile growth of vertically-aligned graphene nanosheets via thermal CVD: The experimental and theoretical investigations. *Carbon N. Y.* 2017, Vol. 121, p. 1–9. DOI 10.1016/j.carbon.2017.05.074.
7. P. JI, J. CHEN, T. HUANG, C. JIN, L. ZHUGE, X. WU, Fast preparation of vertical graphene nanosheets by helicon wave plasma chemical vapor deposition and its electrochemical performance. *Diam. Relat. Mater.* 2020, Vol. 108, p. 107958. DOI 10.1016/j.diamond.2020.107958.
8. Z. CHEN, Y. QI, X. CHEN, Y. ZHANG, Z. LIU, Direct CVD Growth of Graphene on Traditional Glass: Methods and Mechanisms. *Adv. Mater.* 2019, Vol. 31, p. 1803639. DOI 10.1002/adma.201803639.
9. S. XU, S. WANG, Z. CHEN, Y. SUN, Z. GAO, H. ZHANG, J. ZHANG, Electric-Field-Assisted Growth of Vertical Graphene Arrays and the Application in Thermal Interface Materials. *Adv. Funct. Mater.* 2020, Vol. 30, no. 34, p. 2003302 (1-7). DOI 10.1002/adfm.202003302.
10. A.C. FERRARI, Raman spectroscopy of graphene and graphite: Disorder, electron-phonon coupling, doping and nonadiabatic effects. *Solid State Commun.* 2007, Vol. 143, p. 47–57. DOI 10.1016/j.ssc.2007.03.052.
11. L.M. MALARD, M.A. PIMENTA, G. DRESSSELHAUS, M.S. DRESSSELHAUS, Raman spectroscopy in graphene. *Phys. Rep.* 2009, Vol. 473, p. 51–87. DOI 10.1016/j.physrep.2009.02.003.
12. D. PECKUS, T. TAMULEVIČIUS, Š. MEŠKINIS, A. TAMULEVIČIENĖ, A. VASILIAUSKAS, O. ULČINAS, V. GULBINAS, S. TAMULEVIČIUS, Linear and Nonlinear Absorption Properties of Diamond-Like Carbon Doped With Cu Nanoparticles. *Plasmonics.* 2016, Vol. 12, p. 47–58. DOI 10.1007/s11468-016-0227-0.

13. Š. MEŠKINIS, D. PECKUS, A. VASILIAUSKAS, A. ČIEGIS, R. GUDAITIS, T. TAMULEVIČIUS, I. YAREMCHUK, S. TAMULEVIČIUS, Photovoltaic Properties and Ultrafast Plasmon Relaxation Dynamics of Diamond-Like Carbon Nanocomposite Films with Embedded Ag Nanoparticles. *Nanoscale Res. Lett.* 2017, Vol. 12, p. 288. DOI 10.1186/s11671-017-2065-1.
14. R.W. NEWSON, J. DEAN, B. SCHMIDT, H.M. VAN DRIEL, Ultrafast carrier kinetics in exfoliated graphene and thin graphite films. *Opt. Express.* 2009, Vol. 17, no. 4, p. 2326. DOI 10.1364/OE.17.002326.
15. D. BRIDA, A. TOMADIN, C. MANZONI, Y.J. KIM, A. LOMBARDO, S. MILANA, R.R. NAIR, K.S. NOVOSELOV, A.C. FERRARI, G. CERULLO, M. POLINI, Ultrafast collinear scattering and carrier multiplication in graphene. *Nat. Commun.* 2013, Vol. 4, p. 1–9. DOI 10.1038/ncomms2987.
16. K.-C. HUANG, J. MCCALL, P. WANG, C.-S. LIAO, G. EAKINS, J.-X. CHENG, C. YANG, High-Speed Spectroscopic Transient Absorption Imaging of Defects in Graphene. *Nano Lett.* 2018, Vol. 18, no. 2, p. 1489–1497. DOI 10.1021/acs.nanolett.7b05283.
17. K. OUM, T. LENZER, M. SCHOLZ, D.Y. JUNG, O. SUL, B.J. CHO, J. LANGE, A. MULLER, Observation of Ultrafast Carrier Dynamics and Phonon Relaxation of Graphene from the Deep-Ultraviolet to the Visible Region. *J. Phys. Chem. C.* 2014, Vol. 118, no. 12, p. 6454–6461. DOI 10.1021/jp4072197.
18. R. MA, Y. ZHOU, H. BI, M. YANG, J. WANG, Q. LIU, F. HUANG, Multidimensional graphene structures and beyond: Unique properties, syntheses and applications. *Prog. Mater. Sci.* 2020, Vol. 113, p. 100665. DOI 10.1016/j.pmatsci.2020.100665.
19. M.J. ALLEN, V.C. TUNG, R.B. KANER, Honeycomb Carbon: A Review of Graphene. *Chem. Rev.* 2010, Vol. 110, p. 132–145.
20. A. GARCÍA-RUIZ, J.J.P. THOMPSON, M. MUCHA-KRUCZY, V.I. FAL'KO, Electronic Raman Scattering in Twistrionic Few-Layer Graphene. *Phys. Rev. Lett.* 2020, Vol. 125, p. 197401. DOI 10.1103/PhysRevLett.125.197401.
21. F.H.L. KOPPENS, T. MUELLER, P. AVOURIS, A.C. FERRARI, M.S. VITIELLO, M. POLINI, Photodetectors based on graphene, other two-dimensional materials and hybrid systems. *Nat. Nanotechnol.* 2014, Vol. 9, no. 10, p. 780–793. DOI 10.1038/nnano.2014.215.
22. S. ZHENG, G. ZHONG, X. WU, L.D. ARSI, J. ROBERTSON, Metal-catalyst-free growth of graphene on insulating substrates by ammonia-assisted microwave plasma-enhanced chemical vapor deposition. *RSC Adv.* 2017, Vol. 7, p. 33185–33193. DOI 10.1039/c7ra04162d.
23. A. MAXIMENKO, E. RAJACKAITĖ, Š. MEŠKINIS, T. TAMULEVIČIUS, S. TAMULEVIČIUS, A. KHARCHANKA, A. FEDOTOV, J. FEDOTOVA, Electrical transport properties of a carbon nanostructure obtained by plasma-enhanced



- chemical vapor deposition during thermal cycling. *J. Belarusian State Univ. Phys.* 2020, Vol. 3, p. 89–96. DOI 10.33581/2520-2243-2020-3-89-96.
24. S. GHOSH, K. GANESAN, S.R. POLAKI, T.R. RAVINDRAN, N.G. KRISHNA, M. KAMRUDDIN, A.K. TYAGI, Evolution and defect analysis of vertical graphene nanosheets. *J. Raman Spectrosc.* 2014, Vol. 45, no. 8, p. 642–649. DOI 10.1002/jrs.4530.
  25. K. YU, P. WANG, G. LU, K. CHEN, Z. BO, J. CHEN, Patterning Vertically Oriented Graphene Sheets for Nanodevice Applications. *J. Phys. Chem. Lett.* 2011, Vol. 2, p. 537–542. DOI 10.1021/jz200087w.
  26. W. ZHENG, X. ZHAO, W. FU, Review of Vertical Graphene and its Applications. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2021, Vol. 13, p. 9561–9579. DOI 10.1021/acsami.0c19188.
  27. P. CIOCHO, M. MARZEC, N. OLSZOWSKA, J. KO, Reversible graphitization of SiC: A route towards high-quality graphene on a minimally step bunched substrate. *Appl. Surf. Sci.* 2020, Vol. 528, p. 146917. DOI 10.1016/j.apsusc.2020.146917.
  28. S. KANIYANKANDY, S.N. ACHARY, S. RAWALEKAR, H.N. GHOSH, Ultrafast Relaxation Dynamics in Graphene Oxide: Evidence of Electron Trapping. *J. Phys. Chem. C.* 2011, Vol. 115, no. 39, p. 19110–19116. DOI 10.1021/jp206923q.
  29. P. A. GEORGE, J. STRAIT, J. DAWLATY, S. SHIVARAMAN, M. CHANDRASHEKHAR, F. RANA, M.G. SPENCER, Spectroscopy of the Carrier Relaxation Epitaxial Graphene. *Nano Lett.* 2008, Vol. 8, no. 12, p. 17–20. DOI 10.1021/nl8019399.
  30. S. XU, S. WANG, Z. CHEN, Y. SUN, Z. GAO, H. ZHANG, J. ZHANG, Electric-Field-Assisted Growth of Vertical Graphene Arrays and the Application in Thermal Interface Materials. *Adv. Funct. Mater.* 2020, Vol. 30, p. 2003302. DOI 10.1002/adfm.202003302.
  31. L. TAI, D. ZHU, X. LIU, T. YANG, L. WANG, R. WANG, S. JIANG, Z. CHEN, Z. XU, X. LI, Direct Growth of Graphene on Silicon by Metal-Free Chemical Vapor Deposition. *Nano-Micro Lett.* 2018, Vol. 10, no. 2, p. 1–9. DOI 10.1007/s40820-017-0173-1.
  32. D.L. SILVA, L.R.P. MACHADO, E.M. SOARES, D.R. MIQUITA, H. MIRANDA, C. RABELO, O.P. VILELA, A. JORIO, L. GUSTAVO, Raman spectroscopy analysis of number of layers in mass-produced graphene flakes. *Carbon N. Y.* 2020, Vol. 161, p. 181–189. DOI 10.1016/j.carbon.2020.01.050.
  33. M.V.O. MOUTINHO, P. VENEZUELA, M.A. PIMENTA, Raman Spectroscopy of Twisted Bilayer Graphene. *J. Carbon Res. C.* 2021, Vol. 7, p. 10.
  34. J.-B. WU, M.-L. LIN, X. CONG, H.-N. LIU, P.-H. TAN, Raman spectroscopy of graphene-based materials and its applications in related devices. *Chem. Soc. Rev.* 2018, Vol. 47, no. 5, p. 1822–1873. DOI 10.1039/c6cs00915h.
  35. A. ECKMANN, A. FELTEN, A. MISHCHENKO, L. BRITNELL, R. KRUPKE, K.S.

- NOVOSELOV, C. CASIRAGHI, Probing the Nature of Defects in Graphene by Raman Spectroscopy. *Nano Lett.* 2012, Vol. 12, no. 8, p. 3925–3930. DOI 10.1021/nl300901a.
36. A.C. FERRARI, J. ROBERTSON, Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. *Phys. Rev. B.* 2000, Vol. 61, p. 95–107. DOI 10.1103/physrevb.61.14095.
  37. L.G. CANÇADO, A. JORIO, E.H.M. FERREIRA, F. STAVALE, C.A. ACHETE, R.B. CAPAZ, M.V.O. MOUTINHO, A. LOMBARDO, T.S. KULMALA, A.C. FERRARI, Quantifying defects in graphene via Raman spectroscopy at different excitation energies. *Nano Lett.* 2011, Vol. 11, no. 8, p. 3190–3196. DOI 10.1021/nl201432g.
  38. K. FAN, J. FU, X. LIU, X. WANG, Dependence of the fluorination intercalation of graphene toward high-quality fluorinated graphene formation. *Chem. Sci.* 2019, Vol. 10, p. 5546–5555. DOI 10.1039/c9sc00975b.
  39. J. KWAK, Y. JO, S. PARK, N.Y. KIM, S. KIM, H. SHIN, Z. LEE, S.Y. KIM, S. KWON, Oxidation behavior of graphene-coated copper at intrinsic graphene defects of different origins. *Nat. Commun.* 2017, Vol. 8, p. 1549. DOI 10.1038/s41467-017-01814-8.
  40. S. WINNERL, M. MITTENDORFF, C.K. JACOB, H. SCHNEIDER, M. HELM, T. WINZER, A. KNORR, E. MALIC, Ultrafast Processes in Graphene: From Fundamental Manybody Interactions to Device Applications. *Ann. Phys.* 2017, Vol. 529, p. 1700022. DOI 10.1002/andp.201700022.
  41. J.M. IGLESIAS, M.J. MARTÍN, E. PASCUAL, R. RENGEL, Substrate influence on the early relaxation stages of photoexcited carriers in monolayer graphene. *Appl. Surf. Sci.* 2017, Vol. 424, DOI 10.1016/j.apsusc.2017.02.114.
  42. K.J. TIELROOIJ, L. PIATKOWSKI, M. MASSICOTTE, A. WOESSNER, Q. MA, Y. LEE, K.S. MYHRO, C.N. LAU, P. JARILLO-HERRERO, N.F. VAN HULST, F.H.L. KOPPENS, Generation of photovoltage in graphene on a femtosecond timescale through efficient carrier heating. *Nat. Nanotechnol.* 2015, Vol. 10, no. 5, p. 437–443. DOI 10.1038/nnano.2015.54.
  43. J. KUSUMA, R.G. BALAKRISHNA, S. PATIL, M.S. JYOTHI, H.R. CHANDAN, R. SHWETHARANI, Exploration of graphene oxide nanoribbons as excellent electron conducting network for third generation solar cells. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2018, Vol. 183, p. 211–219. DOI 10.1016/j.solmat.2018.01.039.
  44. L. LIU, K. ZHENG, Y. YAN, Z. CAI, S. LIN, X. HU, Graphene Aerogels Enhanced Phase Change Materials prepared by one-pot method with high thermal conductivity and large latent energy storage. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2018, Vol. 185, p. 487–493. DOI 10.1016/j.solmat.2018.06.005.
  45. S. SAADI, B. NAZARI, Recent developments and applications of

- nanocomposites in solar cells: a review. *J. Compos. Compd.* 2019, Vol. 2, p. 41–50. DOI 10.29252/jcc.1.1.7.
46. S. ESKANDARINEZHAD, R. KHOSRAVI, M. AMARZADEH, P. MONDAL, F.J.C.M. FILHO, Application of different nanocatalysts in industrial effluent treatment: A review. *J. Compos. Compd.* 2021, Vol. 3, p. 43–56. DOI 10.52547/jcc.3.1.5.
  47. J. SCREMIN, I.V.J. DOS SANTOS, J.P. HUGHES, A.G.-M. FERRARI, E. VALDERRAMA, W. ZHENG, X. ZHONG, X. ZHAO, E.J.R. SARTORI, R.D. CRAPNELL, S.J. ROWLEY-NEALE, C.E. BANKS, Platinum nanoparticle decorated vertically aligned graphene screen-printed electrodes: electrochemical characterisation and exploration towards the hydrogen evolution reaction. *Nanoscale.* 2020, Vol. 12, p. 18214–18224. DOI 10.1039/d0nr04336b.
  48. J. KUSUMA, R.G. BALAKRISHNA, S. PATIL, M.S. JYOTHI, H.R. CHANDAN, R. SHWETHARANI, Enhanced X-ray photon response in solution-synthesized CsPbBr<sub>3</sub> nanoparticles wrapped by reduced graphene oxide. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 2018, Vol. 183, p. 211–219.
  49. G. SOAVI, S.D. CONTE, C. MANZONI, D. VIOLA, A. NARITA, Y. HU, X. FENG, U. HOHENESTER, E. MOLINARI, D. PREZZI, K. MULLEN, G. CERULLO, Exciton–exciton annihilation and biexciton stimulated emission in graphene nanoribbons. *Nat. Commun.* 2016, DOI 10.1038/ncomms11010.
  50. T. LI, L. LUO, M. HUPALO, J. ZHANG, M.C. TRINGIDES, J. SCHMALIAN, J. WANG, Femtosecond population inversion and stimulated emission of dense dirac fermions in graphene. *Phys. Rev. Lett.* 2012, Vol. 108, no. 16, p. 1–5. DOI 10.1103/PhysRevLett.108.167401.
  51. C. DENG, L. LAN, P. HE, C. DING, B. CHEN, W. ZHENG, X. ZHAO, W. CHEN, X. ZHONG, M. LI, H. TAO, J. PENG, Y. CAO, High-performance capacitive strain sensors with highly stretchable vertical graphene electrodes. *J. Mater. Chem. C.* 2020, Vol. 8, p. 5541–5546. DOI 10.1039/d0tc00491j.
  52. C. DENG, P. GAO, L. LAN, P. HE, X. ZHAO, W. ZHENG, Ultrasensitive and Highly Stretchable Multifunctional Strain Sensors with Timbre-Recognition Ability Based on Vertical Graphene. *Adv. Funct. Mater.* 2019, Vol. 29, p. 1907151. DOI 10.1002/adfm.201907151.
  53. S. ZHAO, L. RONDIN, G. DELPORT, C. VOISIN, U. BESER, Y. HU, X. FENG, K. MÜLLEN, A. NARITA, S. CAMPIDELLI, J.S. LAURET, Fluorescence from graphene nanoribbons of well-defined structure. *Carbon N. Y.* 2017, Vol. 119, p. 235–240. DOI 10.1016/j.carbon.2017.04.043.
  54. G. ANAGNOSTOPOULOS, P.-N. PAPPAS, Z. LI, I.A. KINLOCH, R.J. YOUNG, K.S. NOVOSELOV, C.Y. LU, N. PUGNO, J. PARTHENIOS, C. GALIOTIS, K. PAPAGELIS, Mechanical Stability of Flexible Graphene-Based Displays. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2016, Vol. 8, no. 34, p. 22605–22614. DOI 10.1021/acsami.6b05227.

55. E. ASADI, A.F. CHIMEH, A.H.V. TAHMORSATI, S. HOSSEINI, S. RAHIMI, B. SARKHOSH, L. BAZLI, R. BASHIRI, A review of clinical applications of graphene quantum dot-based composites. *J. Compos. Compd.* 2019, Vol. 2, p. 31–40. DOI 10.29252/jcc.1.1.6.
56. M.W. GRAHAM, S.-F. SHI, Z. WANG, D.C. RALPH, J. PARK, P.L. MCEUEN, Transient Absorption and Photocurrent Microscopy Show That Hot Electron Supercollisions Describe the Rate-Limiting Relaxation Step in Graphene. *Nano Lett.* 2013, Vol. 13, no. 11, p. 5497–5502. DOI 10.1021/nl4030787.
57. G. YU, X. LIU, G. XING, S. CHEN, C.F. NG, X. WU, E.K.L. YEOW, W.S. LEW, T.C. SUM, Spatially-Resolved Ultrafast Optical Spectroscopy of Polymer-Grafted Residues on CVD Graphene. *J. Phys. Chem. C.* 2014, Vol. 118, no. 1, p. 708–713. DOI 10.1021/jp406675r.
58. Š. MEŠKINIS, R. GUDAITIS, A. VASILIAUSKAS, S. TAMULEVIČIUS, G. NIAURA, Multiwavelength Raman Scattering Spectroscopy Study of Graphene Synthesized on Si(100) and SiO<sub>2</sub> by Microwave Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition. *Phys. Status Solidi - Rapid Res. Lett.* 2019, Vol. 1900462, no. 100, p. 3–7. DOI 10.1002/pssr.201900462.
59. Z. BO, Y. YANG, J. CHEN, K. YU, J. YAN, K. CEN, Plasma-enhanced chemical vapor deposition synthesis of vertically oriented graphene nanosheets. *Nanoscale.* 2013, Vol. 5, no. 12, p. 5180–5204. DOI 10.1039/c3nr33449j.
60. D. PECKUS, H. RONG, L. STANKEVIČIUS, M. JUODĖNAS, S. TAMULEVIČIUS, T. TAMULEVIČIUS, J. HENZIE, Hot Electron Emission Can Lead to Damping of Optomechanical Modes in Core-Shell Ag@TiO<sub>2</sub> Nanocubes. *J. Phys. Chem. C.* 2017, Vol. 121, no. 43, p. 24159–24167. DOI 10.1021/acs.jpcc.7b06667.
61. I.A. VERZHBITSKIY, M. DE CORATO, A. RUINI, E. MOLINARI, A. NARITA, Y. HU, M.G. SCHWAB, M. BRUNA, D. YOON, S. MILANA, X. FENG, K. MULLEN, A.C. FERRARI, C. CASIRAGHI, D. PREZZI, Raman Fingerprints of Atomically Precise Graphene Nanoribbons. *Nano Lett.* 2016, Vol. 16, p. 3442–3447. DOI 10.1021/acs.nanolett.5b04183.
62. P. VENEZUELA, M. LAZZERI, F. MAURI, Theory of double-resonant Raman spectra in graphene: Intensity and line shape of defect-induced and two-phonon bands. *Phys. Rev. B.* 2011, Vol. 84, p. 035433. DOI 10.1103/PhysRevB.84.035433.
63. S. GHOSH, K. GANESAN, S.R. POLAKI, T. MATHEWS, S. DHARA, M. KAMRUDDIN, A.K. TYAGI, Influence of substrate on nucleation and growth of vertical graphene nanosheets. *Appl. Surf. Sci.* 2015, Vol. 349, p. 576–581. DOI 10.1016/j.apsusc.2015.05.038.
64. J. WU, M. LIN, X. CONG, H. LIU, P. TAN, Raman spectroscopy of graphene-based materials and its applications in related devices. *Chem. Soc. Rev.*

- 2018, Vol. 47, p. 1822–1873. DOI 10.1039/c6cs00915h.
65. J. SHANG, Z. LUO, C. CONG, J. LIN, T. YU, G.G. GURZADYAN, Femtosecond UV-pump/visible-probe measurements of carrier dynamics in stacked graphene films. *Appl. Phys. Lett.* 2010, Vol. 97, p. 163103. DOI 10.1063/1.3504704.
  66. J. SHANG, T. YU, G.G. GURZADYAN, Femtosecond energy relaxation in suspended graphene: phonon-assisted spreading of quasiparticle distribution. *Appl. Phys. B Lasers Opt.* 2012, Vol. 107, no. 1, p. 131–136. DOI 10.1007/s00340-011-4853-0.
  67. T. KOYAMA, K. MIZUTANI, H. AGO, H. KISHIDA, Two-Step Excitation Triggered by One-Photon Absorption on Linear Dispersion in Monolayer Graphene. *J. Phys. Chem. C.* 2016, Vol. 120, no. 20, p. 11225–11229. DOI 10.1021/acs.jpcc.6b01490.
  68. P.A. OBRAZTSOV, M.G. RYBIN, A. V. TYURNINA, S. V. GARNOV, E.D. OBRAZTSOVA, A.N. OBRAZTSOV, Y.P. SVIRKO, Broadband Light-Induced Absorbance Change in Multilayer Graphene. *Nano Lett.* 2011, p. 1540–1545. DOI 10.1021/nl104303c.
  69. J. SHANG, Z. LUO, C. CONG, J. LIN, T. YU, G.G. GURZADYAN, Femtosecond UV-pump/visible-probe measurements of carrier dynamics in stacked graphene films. *Appl. Phys. Lett.* 2010, Vol. 97, no. 16, p. 95–98. DOI 10.1063/1.3504704.
  70. D. BRIDA, A. TOMADIN, C. MANZONI, Y.J. KIM, A. LOMBARDO, S. MILANA, R.R. NAIR, K.S. NOVOSELOV, A.C. FERRARI, G. CERULLO, M. POLINI, Ultrafast collinear scattering and carrier multiplication in graphene. *Nat. Commun.* 2013, Vol. 4, p. 1–9. DOI 10.1038/ncomms2987.
  71. P. MANDAL, J. DEBBARMA, M. SAHA, A Review on the Emergence of Graphene in Photovoltaics Industry. *Biointerface Res. Appl. Chem.* 2021, Vol. 11, no. 6, p. 15009–15036. DOI 10.33263/BRIAC116.1500915036.
  72. J. DU, D. ZHANG, X. WANG, H. JIN, W. ZHANG, B. TONG, Y. LIU, P.L. BURN, H.-M. CHENG, W. REN, Extremely efficient flexible organic solar cells with a graphene transparent anode: Dependence on number of layers and doping of graphene. *Carbon N. Y.* 2021, Vol. 171, p. 350–358. DOI 10.1016/j.carbon.2020.08.038.
  73. S. MARAGKAKI, K. SAVVA, E. STRATAKIS, Advanced Photonic Processes for Photovoltaic, Energy Storage, and Environmental Systems. *Adv. Sustain. Syst.* 2021, Vol. 5, p. 2000237. DOI 10.1002/adsu.202000237.

## INFORMACIJA APIE AUTORE

**Vardas, pavardė:** Erika Rajackaitė  
**Kontaktai:** erika.rajackaite@ktu.lt

### Išsilavinimas:

Studijos Kauno technologijos universitete  
2008–2012 m. Fizikos bakalauras  
2012–2014 m. Fizikos magistras

### Profesinė patirtis:

Darbas Kauno technologijos universitete  
2013–2014 m. Projekto laborantė  
2017 m. Projekto inžinierė  
2017–2022 m. Projekto jaunesnioji mokslo darbuotoja  
Nuo 2018 m. Inžinierė

### Mokslinių interesų sritys

Plonų dangų technologijos, grafeno sintezė, Ramano sklaidos spektroskopija, žadinimo-zondavimo spektroskopija

## MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ, KONFERENCIJŲ IR STAŽUOČIŲ SĄRAŠAS

### Su disertacija susijusios publikacijos

- A1. Erika Rajackaitė, Domantas Peckus, Rimantas Gudaitis, Tomas Tamulevičius, Šarūnas Meškinis, Sigita Tamulevičius. The Evolution of Properties with Deposition Time of Vertical Graphene Nanosheets Produced by Microwave Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition. *Surfaces and Interfaces*, Vol 27, 101529, 2021. DOI: 10.1016/j.surf.2021.101529. [IF: 4.837 (2021) Q1].
- A2. Erika Rajackaitė, Domantas Peckus, Rimantas Gudaitis, Mindaugas Andrulevičius, Tomas Tamulevičius, Dmytro Volyniuk, Šarūnas Meškinis, Sigita Tamulevičius. Transient absorption spectroscopy as a promising optical tool for measure of quality of graphene layers deposited by microwave plasma. *Surface and Coatings Technology*, Vol. 395, 125887, 2020. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.125887. [IF: 4.158 (2020) Q1].
- A3. Maximenko A. A., Rajackaitė E., Meškinis Š., Tamulevičius T., Tamulevičius S., Kharchanka A.A., Fedotov A.K., Fedotova Ju.A. Electrical transport properties of a carbon nanostructure obtained by plasma-enhanced chemical vapor deposition during thermal cycling.

### **Kitos publikacijos**

1. Domantas Peckus, Šarūnas Meškiniš, Andrius Vasiliauskas, Erika Rajackaitė, Mindaugas Andrulevičius, Vitoldas Kopustinskas, Sigitas Tamulevičius. Structure and optical properties of diamond like carbon films containing aluminium and alumina. *Applied Surface Science*, Vol. 529, 147040, 2020. DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.147040. [IF: 6.707 (2020) Q1].
2. Domantas Peckus, Joel Henzie, Tomas Tamulevičius, Mindaugas Andrulevičius, Algirdas Lazauskas, Erika Rajackaitė, Šarūnas Meškiniš, Sigitas Tamulevičius. Ultrafast relaxation dynamics of aluminum nanoparticles in solution. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, Vol. 117, 113795, spec. iss., 2020. DOI: 10.1016/j.physe.2019.113795. [IF: 3.382 (2020) Q1].

### **Su disertacija susijusios konferencijos, kuriose dalyvavo disertacijos autorė**

1. Erika Rajackaitė, Domantas Peckus, Rimantas Gudaitis, Tomas Tamulevičius, Šarūnas Meškiniš, Sigitas Tamulevičius. Influence of the Deposition Duration on the Properties of Vertical Graphene Nanosheets Synthesized by Microwave Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition Technique. 4<sup>th</sup> International Conference “Nanotechnology and Innovation in the Baltic Sea Region 2021”, virtuali konferencija, 2021 m. rugpjūčio 4–6 d.
2. Erika Rajackaitė, Rimantas Gudaitis, Domantas Peckus, Tomas Tamulevičius, Šarūnas Meškiniš, Sigitas Tamulevičius. Low-Temperature Synthesis of Vertically Aligned Graphene Nanosheets on Glass Substrate. 22<sup>nd</sup> International Conference-School “Advanced materials and technologies 2020”, Palanga, Lietuva, 2020 m. rugsėjo 24–28 d.
3. Erika Rajackaitė, Domantas Peckus, Rimantas Gudaitis, Mindaugas Andrulevičius, Tomas Tamulevičius, Šarūnas Meškiniš, Sigitas Tamulevičius. Quality Studies of Vertical Graphene Nanosheets Using Transient Absorption Spectroscopy. 43<sup>rd</sup> National Physics Conference of Lithuania, Vilnius, Lietuva, 2019 m. spalio 3–5 d.
4. Erika Rajackaitė, Domantas Peckus, Rimantas Gudaitis, Tomas Tamulevičius, Mindaugas Andrulevičius, Šarūnas Meškiniš, Sigitas Tamulevičius. The Control of Quality of Graphene Layers Based on Their Ultrafast Relaxation Properties. 21<sup>st</sup> International Conference-School “Advanced materials and technologies 2019”, Palanga, Lietuva, 2019 m. rugpjūčio 19–23 d.
5. Erika Rajackaitė, Domantas Peckus, Rimas Gudaitis, Tomas Tamulevičius, Mindaugas Andrulevičius, Šarūnas Meškiniš, Sigitas Tamulevičius. Excited

- state relaxation dynamics as a measure of quality of graphene layers deposited by plasma based techniques. European Materials Research Society (E-MRS) 2019 Spring Meeting, Nica, Prancūzija, 2019 m. gegužės 27–31 d.
6. Erika Rajackaitė, Domantas Peckus, Rimantas Gudaitis, Mindaugas Andrulevičius, Tomas Tamulevičius, Šarūnas Meškiniš, Sigitas Tamulevičius. Transient absorption spectroscopy as a promising tool for defects characterization of graphene layers. 62<sup>nd</sup> international conference for students of physics and natural sciences “Open readings 2019”, Vilnius, Lietuva, 2019 m. kovo 19–22 d.
  7. Erika Rajackaitė, Domantas Peckus, Asta Tamulevičienė, Tomas Tamulevičius, Rimantas Gudaitis, Šarūnas Meškiniš, Sigitas Tamulevičius. Preparation method influence on morphology and ultrafast optical properties of graphene layers. 16<sup>th</sup> International conference “Apropos 16: Advanced properties and processes in optoelectronics materials and systems”, Vilnius, Lietuva, 2018 m. spalio 10–12 d.
  8. Erika Rajackaitė, Domantas Peckus, Asta Tamulevičienė, Tomas Tamulevičius, Rimas Gudaitis, Šarūnas Meškiniš, Sigitas Tamulevičius. Dynamic optical properties of graphene layers with different preparation and morphology. 11<sup>th</sup> International conference on photo-excited processes and applications – ICPEPA 11, Vilnius, Lietuva, 2018 m. rugsėjo 10–14 d.
  9. Erika Rajackaitė, Domantas Peckus, Rimas Gudaitis, Šarūnas Meškiniš, Sigitas Tamulevičius. Synthesis and Analysis of Ultrafast Excited State Dynamics of Graphene Mono and Polyayers. 20<sup>th</sup> International Conference-School “Advanced materials and technologies 2018”, Palanga, Lietuva, 2018 m. rugpjūčio 27–31 d.
  10. Asta Tamulevičienė, Erika Rajackaitė, Domantas Peckus, Rimas Gudaitis, Tomas Tamulevičius, Sigitas Tamulevičius. Investigation of Graphene Influence on the Performance of Electrochromic Devices. European Materials Research Society (E-MRS) 2018 Spring Meeting, Strasbūras, Prancūzija, 2018 m. birželio 18–22 d.
  11. Erika Rajackaitė, Domantas Peckus, Asta Tamulevičienė, Tomas Tamulevičius, Rimas Gudaitis, Šarūnas Meškiniš, Sigitas Tamulevičius. Ultrafast Excited State Relaxation Dynamics of Mono and Multilayer Graphene. 61<sup>st</sup> International conference for students of physics and natural sciences “Open readings 2018”, Vilnius, Lietuva, 2018 m. kovo 20–23 d.
  12. Erika Rajackaitė, Rimantas Gudaitis, Sigitas Tamulevičius. Synthesis and investigation of the properties of graphene layers. 42<sup>nd</sup> National Physics Conference of Lithuania, Vilnius, Lietuva, 2017 m. spalio 4–6 d.
  13. Erika Rajackaitė, Rimantas Gudaitis, Sigitas Tamulevičius. Formation and Characterization of Graphene Films on Copper Substrates. 19<sup>th</sup>



International Conference-School “Advanced materials and technologies 2017”, Palanga, Lietuva, 2017 m. rugpjūčio d. 27–31 d.

14. Erika Rajackaitė, Rimantas Gudaitis, Sigita Tamulevičius. Synthesis of Graphene by Microwave Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition. International Conference “Nanotechnology and Innovation in the Baltic Sea Region”, Kaunas, Lietuva, 2017 m. birželio 14–16 d.
15. Erika Rajackaitė, Rimantas Gudaitis, Sigita Tamulevičius. Characterization of Graphene Films Grown on Different Copper Substrates. Physics and Chemistry of Advanced Materials (PCAM) in collaboration with ITN Thinface Workshop in Kraków Poland: “Advanced topics in physics and materials engineering”, Krokua, Lenkija, 2017 m. gegužės 18–19 d.

### **Su disertacija susijusios konferencijos, kuriose dalyvavo pranešimų bendraautoriai**

1. Domantas Peckus, Joel Henzie, Tomas Tamulevičius, Mindaugas Andrulevičius, Algirdas Lazauskas, Erika Rajackaitė, Šarūnas Meškiniš, Sigita Tamulevičius. Properties of Ultrafast Relaxation Dynamics of Plasmonic Aluminum Nanoparticles. 21<sup>st</sup> International Conference-School “Advanced materials and technologies 2019”, Palanga, Lietuva, 2019 m. rugpjūčio 19–23 d.
2. Valentinas Andrulis, Erika Rajackaitė, Tomas Matulaitis, Asta Dabulienė, Audrius Bučinskas, Dalius Gudeika, Asta Tamulevičienė. Investigation of bipolar small organic molecules as active material in electrochromic devices. 61<sup>st</sup> International conference for students of physics and natural sciences “Open readings 2018”, Vilnius, Lietuva, 2018 m. kovo 20–23 d.
3. Asta Tamulevičienė, Rimantas Gudaitis, Erika Rajackaitė, Šarūnas Meškiniš, Sigita Tamulevičius. Graphene monolayers for flexible electrochromic devices. 42<sup>nd</sup> National Physics Conference of Lithuania, Vilnius, Lietuva, 2017 m. spalio 4–6 d.
4. Domantas Peckus, Sigita Tamulevičius, Joel Henzie, Tomas Tamulevičius, Lukas Stankevičius, Mindaugas Juodėnas, Aušrinė Jurkevičiūtė, Erika Rajackaitė, Rimantas Gudaitis, Šarūnas Meškiniš, Brigita Abrazevičienė, Hongpan Rong. Ultrafast dynamics of coherent oscillations of highly monodispersed plasmonic Ag nanocubes and their assemblies. European Materials Research Society (E-MRS) 2017 Spring Meeting, Strasbūras, Prancūzija, 2017 m. gegužės 22–26 d.

### **Stažuotės užsienyje**

1. 3 mėnesių trukmės tarptautinė stažuotė pagal „Erasmus+“ praktikos ir „Physics and Chemistry of Advanced Materials“ (PCAM) programos Pietų Danijos universiteto Mads Clausen institute, „Grafeno sluoksnių taikymas

- organiniuose saulės elementuose“, Sønderborgas, Danija, 2019 m. rugsėjo 2–gruodžio 5 d.
2. Physics and Chemistry of Advanced Materials (PCAM) in collaboration with ITN Thinface Workshop “Advanced topics in physics and materials engineering”, Krokua, Lenkija, 2017 m. gegužės 18–19 d.

UDK 546.26 + 539.216](043.3)

SL344. 2022-06-17, 2,75 leidyb. apsk. I. Tiražas 36 egz. Užsakymas 110.  
Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas  
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas