

VILNIAUS UNIVERSITETAS  
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

Armandas  
BALČYTIS

# Subbanginių funkcinių komponentų gamyba litografijos metodais

**DAKTARO DISERTACIJOS SANTRAUKA**

Technologijos mokslai,  
Medžiagų inžinerija 08T

---

VILNIUS 2018

Disertacija rengta 2013– 2018 metais valstybinio mokslinių tyrimų instituto Fizinių ir technologijos mokslų centre, Lazerinių technologijų skyriuje.

**Mokslinis vadovas:**

**dr. Raimondas Petruškevičius** (Fizinių ir technologijos mokslų centras, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija - 08T).

**Mokslinis konsultantas:**

**prof. Saulius Juodkazis** (Swinburno technologijos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija - 08T).

Gynimo taryba:

Pirmininkas – **prof. habil. dr. Valdas Sirutkaitis** (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T),

Nariai:

**doc. dr. Tadas Malinauskas** (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02P),

**dr. Vaidas Pačebutas** (Fizinių ir technologijos mokslų centras, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T),

**dr. Paul Seidler** (IBM tyrimai – Ciurichas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T),

**prof. dr. Darius Viržonis** (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T).

Disertacija ginama viešame Gynimo tarybos posėdyje 2018 m. gruodžio mėn. 5 d. 14 val. Fizinių ir technologijos mokslų centro Fizikos instituto posėdžių salėje. Adresas: Savanorių pr. 231, Vilnius, LT-02300, Lietuva.

Disertaciją galima peržiūrėti Fizinių ir technologijos mokslų centro, Vilniaus universiteto bibliotekose ir VU interneto svetainėje adresu:

<https://www.vu.lt/naujienos/ivykiu-kalendorius>

## TURINYS

IVADAS . . . . .	4
Disertacijos darbo tikslai . . . . .	5
Ginamieji teiginiai . . . . .	5
Darbo naujumas . . . . .	6
Aprobacija . . . . .	8
Publikacijų sąrašas . . . . .	8
Pranešimų konferencijose sąrašas . . . . .	13
Auroriaus ir bendraautorijų indėlis . . . . .	15
Auroriaus tiesioginis indėlis . . . . .	16
Bendraautorijų indėlis . . . . .	16
Disertacijos sandara . . . . .	18
1 LITOGRAFIJOS METODAI . . . . .	19
1.1 Elektronų pluošto litografija . . . . .	20
1.2 Frezavimas fokusuotų jonų pluoštu . . . . .	20
2 MIKROŽIEDINIAI FOTONINIAI JUTIKLIAI . . . . .	22
2.1 Mikrožiedinių rezonatorių pagrindai . . . . .	22
2.2 SOI bangolaidinių darinių gamyba . . . . .	24
2.3 Mikrožiedinių jutiklių modų indžinerija . . . . .	26
3 GAMYBA FOKUSUOTŲ JONŲ PLUOŠTAIS . . . . .	31
3.1 Valdomo skersmens kieto kūno nanoporos . . . . .	31
3.2 Optinių poliarizatorių FIB frezavimas . . . . .	33
3.3 Lenkti mikrooptiniai spiralinių zonų dariniai . . . . .	36
4 FUNKCINIAI PRIETAISAI IŠ SLUOKSNIUOTŲ METALŲ . . . . .	40
4.1 Mikrotermpora ant nanomembranos . . . . .	40
4.2 Vandens detekcija modifikuotais Pd sluoksniais . . . . .	44
4.3 Plazmoniniai IR bangas sugeriantys metapaviršiai . . . . .	47
4.4 Magnetinės gardelės atomų pagavimui . . . . .	50
IŠVADOS . . . . .	55
SANTRAUKA ANGLŲ KALBA (ABSTRACT) . . . . .	58
LITERATŪROS SĄRAŠAS . . . . .	61

## IVADAS

Prietaisų bei jų funkcinių komponentų miniaturizacija pastarųjų dešimtmečių eigoje buvo viena iš produktyviausių technologijos vystymosi krypčių. Matmenų mažinimas turi daugybę multiplikatyvių privalumų, bene akivaizdžiausias iš jų yra didžiulis fotoninių ir elektroninių komponentų tankio, taigi, gamybos išėigos, padidėjimas. Tai buvo esminis faktorius išplečiant puslaidininkinių kompiuterinių atmintinių talpą bei mažinant jų kainą [1]. Taipogi, miniaturizacija sąlygoja ir kertinių veikimo parametrų pagerinimą, tokių kaip kad energijos sąnaudų bei atsako laiko konstantų sumažinimas, kurio žinomiausia apraiška yra Moore dėsnio apibūdinti  $10^4$  kartų išaugę lauko tranzistorių pagrindu veikiančių mikroprocesorių taktiniai dažniai [2].

Kita vertus, kai struktūrinių elementų matmenys yra parenkami taip, kad individualiai ar kolektyviai atitiktų charakteringus tam tikrų fizikinių procesų ilgius, gali tapti įmanomi visiškai nauji sąveikos reiškiniai ir funkcionalumai. Puikus to pavyzdys yra periodinis bangos ilgio matmenų komponentų išdėstymas sudarant fotoninius kristalus, kuris, difrakcijos ir interferencijos reiškinių dėka, įgalina šviesos sklaidimo ir lokalizacijos kontrolę nanometrines skalės srityse [3]. Metamedžiagos – dirbtiniai periodiniai ar kvaziperiodiniai metalinių struktūrinių komponentų dariniai – yra kita fotoninių struktūrų klasė, kuri gali pasižymėti egzotiškais gamtoje nepasitaikančiomis savybėmis kaip kad neigiamas lūžio rodiklis [4].

Minėtų darinių gamyba yra įgalinama plačiu asortimentu įvairių apdirbimo metodikų, pasižyminčių erdvine skyra tarp  $1\ \mu\text{m}$  ir  $1\ \text{nm}$  skalių ir bendrai vadinamą nanolitografijos terminu. Nanoapdirbimo technologijos gali būti lygiagrečios arba serijinės ekspozicijos pobūdžio. Pirmoji kategorija apima platų ratą savaiminio susirinkimo metodikų [5], bei prieš tai sukurto darinio replikavimą fotolitografijos [6] ar nanoštam pavimo litografijos [7] būdais. Būtent šio tipo realizacijos pasižymi pramoninei gamybai reikiama sparta ir mastais, o labiausiai išskirtinė iš jų yra imersinė fotolitografija giliame UV bangų ruože, sudaranti CMOS (*Angl.* Complementary metal–oxide–semiconductor) integrinių grandynų, naudojamų skaitmeninės logikos prietaisams sukurti, gamy-

bos pagrindą. Tačiau, nors nuoseklaus tobulinimo dėka šio tipo litografija pajėgė pasiekti 10 nm skyrą formuojant finFET darinius [8], vienas iš didžiausių fotolitografijos trūkumas yra dideli fotokaukių kaštai. Kita vertus, serijinio apdirbimo pavyzdžiai yra lazerinė [9], skenuojančio zondo [10], elektronų [11] bei jonų pluošto [12] tiesioginio rašymo metodikos. Šie metodai kenčia nuo ribotų gamybos apimčių, tačiau pasižymi neeiliniu lankstumu kuriant ir sparčiai iteruojant naujus darinius bei prietaisus tiek mokslinių tiek ir pramoninių tyrimų kontekste.

### Disertacijos darbo tikslai

Šis darbas siekia pritaikyti nanoskyra pasižyminčias elektronų (EBL, *Angl.* Electron beam lithography) bei jonų pluošto (FIB, *Angl.* Focused ion beam) litografijas, bei pagalbines fizinio garų nusodinimo (PVD, *Angl.* Physical vapor deposition) ar ėsdinimo reaktyviais jonais (RIE, *Angl.* Reactive ion etching) metodikas, kuriant įvairius pagrinde optiniais funkcionalumais pasižyminčius darinius ir prietaisus, kuriu veikimas pagrįstas subbanginiais elementų matmenimis.

Pagrindiniai šio darbo tikslai yra:

1. Sukurti elektronų pluošto litografijos ir ėsdinimo reaktyviais jonais procesus reikalingus telekomunikacinių bangos ilgių diapazone veikiančių mikrožiedinių rezonatorių gamybai naudojant silicio ant silicio dioksido platformą.
2. Sukurti jonų pluošto litografijos procesus reikalingus optinei manipuliacijai taikytinų ir šviesos poliarizacijos ar struktūrizacijos funkcionalumais pasižyminčių mikrooptinių elementų gamybai įgalinti.
3. PVD ir RIE metodais sukurti metalų sandūrų ar jų sluoksniuotų darinių pagrindu veikiančius plokštuminius prietaisus, atliekančius optinės detekcijos, termometrijos ar ultrašaltų atomų gaudyklių funkcijas.

### Ginamieji teiginiai

1. Elektronų pluošto litografijos pagrindu įgyvendinta silicio ant silicio dioksido mikrožiedinių rezonatorių gamyba buvo atlikta su

~ 10 nm tikslumu, kuris buvo pakankamas subbanginių fotoninių struktūrų, įgalinusių pasiekti erdvinį bei spektrinį rezonansinių modų pasiskirstymo valdymą, sukūrimui.

2. Apjungiant adityvius trimatės lazerinės fotopolimerizacijos pajėgumus su atimtinu subbanginės nanoskyros jonų pluošto litografiniu frezavimu yra galima sukurti hibridinius (dielektrinius/metalinius) mikrooptinius elementus, kurie pasižymi tiek difrakciniais, tiek ir refrakciniais optiniais funkcionalumais.
3. Elektronų pluošto litografija ant 30 nm storio  $\text{Si}_3\text{N}_4$  membranos paviršiaus suformuotos Au-Ni sandūros mikrotermoporos pasižymi jautriu 10 kHz terminei moduliacijai, kas atitinka penkis kartus didesnę vertę nei būdinga analogiškiems dariniams pagamintiems ant tūrinių padėklų.
4. Elektronų pluošto litografija yra pajėgi eksponuoti  $1 \text{ mm}^2$  ploto darinius su 10 nm skyra, kas įgalina sukurti 700 nm periodo dvimatės magnetinės gardelės ultrašaltų  $^{87}\text{Rb}$  atomų pagavai nuolatiniuose submikroninių matmenų gaudyklėse realizuoti.

#### Darbo naujumas

1. EBL pagaminti mikrožiediniai rezonatoriai su kontroliuojamo užpildos faktoriaus apskritiminėmis Bragg gardelėmis pasižymi dėl dispersijos kylančiu specifinės modos kokybės faktoriaus padidėjimu, bei visų kitų difrakcijos sąlygos neatitinkančių modų nuslopinimu, kuris padeda praplėsti tokio tipo jutiklių dinaminį diapazoną.
2. Gradientinio efektyvaus lūžio rodiklio mikrožiediniai rezonatoriai, kurių paskirtis yra pasiekti optinio lauko delokalizaciją tuo būdu padidinant prietaiso jutos srities tūrį, nepaisant ženkliai didesnio paviršiaus ploto pasižymėjo  $Q \simeq 15000$  eilės kokybės faktoriais, kas atitinka trigubai didesnę efektyvumą nei panašių matmenų standartinis mikrožiedinis darinys.
3. Dešimties nanometrų eilės skersmens nanoporos fokusuotu jonų pluoštu buvo įgrežtos į 10 – 30 nm storio  $\text{Si}_3\text{N}_4$  membranas, o skylės forma ir pavidalas priklausė nuo ekspozicijos dozės ir

pluošto intensyvumo skirstinio, o jų skersmuo buvo dar labiau tolydžiai sumažintas naudojant pakartotinį skenavimą elektronų pluoštu.

4. Joninis frezavimas leidžia sukurti 200 nm periodo ir 0.5 užpildos faktoriaus metalines Au poliarizacines gardeles, kurios vidutiniame IR bangų ruože pasižymi apytiksliai  $T_{\max}/T_{\min} \approx 150$  ekstinkcijos santykiu, ir įgalino patikrinti keturių poliarizacijų mikrospektroskopijos metodo adekvatumą tiriant erdvinės molekulių orientacijos skirstinius sudėtingose anizotropinėse medžiagose.
5. Didelis FIB sistemų fokusavimo gylis leidžia nanotiksliu frezuoti darinius ir ant sudėtingų lazerinės fotopolimerizacijos būdu suformuotų neplokštuminių topologijų, ir įgalino sukurti hibridinius refrakcinius/difrakcinius mikrooptinius elementus, kurie sukuria stipriai lokalizuotus  $NA \approx 0.7$  skaitine apertūra sufokusuotus optinius sūkurius.
6. Dideliu jautrumu ir atsako sparta pasižymintis Au-Ni microtermoporos pagrindu veikiantis temperatūros jutiklis buvo pagamintas ant 30-nm storio  $\text{Si}_3\text{N}_4$  membranos paviršiaus sąlyginai nedidelės skyros elektronų pluošto litografijos būdu, ir buvo pajėgus aptikti tiek lazerio tiek ir elektrono pluošto apšvita sukeltus  $2 \times 10^5 \text{ K s}^{-1}$  spartos šiluminius pokyčius.
7. Mažesnio nei 100 nm storio Au ir Pd lydinių sluoksniai, pagaminti fizinio garų nusodinimo būdu, pasižymi didesne  $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$  spinduliuotės pralaidumo atsako į  $\text{H}_2$  dujų absorbciją sparta nei grynas Pd, kita vertus, sluoksniuoti Au/Pd dariniai pasižymi didesniu jautrumu vandeniliui bet lėtesniu atsaku.
8. Sluoksniuotų metalo-dielektriko-metalo nanodiskų masyvų pavidalo plokštuminiai plazmoniniai spinduliuotę sugeriantys meta-paviršiai, pagaminti redukcijos projekcijos fotolitografijos būdu, vidutiniame IR bangų ruože pasižymi 50% ekstinkcijos plazmoniniais rezonansais, ypač kuomet struktūros yra sudarytos Au ir Ag metalų, bei Si ar  $\text{SiO}_2$  dielektrikų pagrindu.
9. Dvimatės 700 nm periodo magnetinės girdelės, skirtos  $^{87}\text{Rb}$

atomų pagavai realizuoti, buvo pagamintos elektronų pluošto litografijos būdu, ir leido pirmą kartą pademonstruoti ultrašaltų atomų lokalizaciją 100 nm atstumu nuo metalo paviršiaus 800 kHz dažnio potencialo duobėje ir padėjo pagrindą iki šiol eksperimentiškai nepatvirtintų kvantinių reiškinų tyrimams.

### Aprobacija

Šioje disertacijoje aprašomų darbų vykdymo metu buvo parengtos 43 recenzuotos mokslinės publikacijos, 13 iš jų yra tiesiogiai susijusios su čia aprašomais rezultatais. Kartu su bendraautorais buvo pristatyta 17 pranešimų tarptautinėse mokslinėse konferencijose, 8 iš jų pristatyti asmeniškai, o su disertacijose aprašomais darbais susiję atitinkamai 9 ir 5 pranešimai.

### Publikacijų sąrašas

#### **Publikacijos disertacijos tema:**

1. D. Urbonas, **A. Balčytis**, M. Gabalis, K. Vaškevičius, G. Naujokaitė, S. Juodkazis, and R. Petruškevičius. Ultra-wide free spectral range, enhanced sensitivity, and removed mode splitting SOI optical ring resonator with dispersive metal nanodisks. *Opt. Lett.*, 40(13):2977–2980, 2015.
2. D. Urbonas, **A. Balčytis**, K. Vaškevičius, M. Gabalis, and R. Petruškevičius. Air and dielectric bands photonic crystal microring resonator for refractive index sensing. *Opt. Lett.*, 41(15):3655–3658, 2016.
3. **A. Balčytis**, D. Hakobyan, M. Gabalis, A. Žukauskas, D. Urbonas, M. Malinauskas, R. Petruškevičius, E. Brasselet, and S. Juodkazis. Hybrid curved nano-structured micro-optical elements. *Opt. Express*, 24(15):16988–16998, 2016.
4. Y. Hashimoto, G. Seniutinas, **A. Balčytis**, S. Juodkazis, and Y. Nishijima. Au-Ag-Cu nano-alloys: tailoring of permittivity. *Sci. Rep.*, 6:25010, 2016.
5. G. Seniutinas, **A. Balčytis**, and S. Juodkazis. Ultraviolet-photoelectric effect for augmented contrast and resolution in electron microscopy. *APL Photonics*, 1(2):021301, 2016.
6. Y. Wang, T. Tran, P. Surendran, I. Herrera, **A. Balčytis**, D. Nissen,



- M. Albrecht, A. Sidorov, and P. Hannaford. Trapping ultracold atoms in a sub-micron-period triangular magnetic lattice. *Phys. Rev. A*, 96(1):013630, 2017.
7. K. Vaškevičius, M. Gabalis, D. Urbonas, **A. Balčytis**, R. Petruškevičius, and S. Juodkazis. Enhanced sensitivity and measurement range SOI microring resonator with integrated one-dimensional photonic crystal. *J. Opt. Soc. Am. B*, 34(4):750–755, 2017.
  8. Y. Nishijima, Y. Hashimoto, **A. Balčytis**, G. Seniutinas, and S. Juodkazis. Alloy materials for plasmonic refractive index sensing. *Sens. Mater.*, 29(9):1233–1239, 2017.
  9. Y. Nishijima, S. Suda, G. Seniutinas, **A. Balčytis**, and S. Juodkazis. Plasmonic sensor: towards parts-per-billion level sensitivity. *Sens. Mater.*, 29(9):1253–1258, 2017.
  10. Y. Nishijima, **A. Balčytis**, G. Seniutinas, S. Juodkazis, T. Arakawa, S. Okazaki, and R. Petruškevičius. Plasmonic hydrogen sensor at infrared wavelengths. *Sens. Mater.*, 29(9):1269–1274, 2017.
  11. Y. Nishijima, S. Shimizu, K. Kurihara, Y. Hashimoto, H. Takahashi, **A. Balčytis**, G. Seniutinas, S. Okazaki, J. Juodkazytė, T. Iwasa, T. Taketsugu, Y. Tominaga, and S. Juodkazis. Optical readout of hydrogen storage in films of Au and Pd. *Opt. Express*, 25(20):24081–24092, 2017.
  12. **A. Balčytis**, M. Ryu, S. Juodkazis, and J. Morikawa. Microthermocouple on nano-membrane: thermometer for nanoscale measurements. *Sci. Rep.*, 8:6324, 2018.
  13. Y. Nishijima, **A. Balčytis**, S. Naganuma, G. Seniutinas, and S. Juodkazis. Tailoring metal and insulator contributions in plasmonic perfect absorber metasurfaces. *ACS Appl. Nano Mater.*, 1(7):3557–3564, 2018.

#### **Kitos publikacijos:**

14. R. Komatsu, **A. Balčytis**, G. Seniutinas, T. Yamamura, Y. Nishijima, and S. Juodkazis. Plasmonic photo-thermoelectric energy converter with black-Si absorber. *Sol. Energ. Mater. Sol. Cells*, 143:72–77, 2015.
15. Y. Nishijima, R. Komatsu, T. Yamamura, **A. Balčytis**, G. Seniutinas, and S. Juodkazis. Design concept of a hybrid photo-

- voltaic/thermal conversion cell for mid-infrared light energy harvester. *Opt. Mater. Express*, 7(11):3484–3493, 2015.
16. **A. Balčytis**, M. Ryu, G. Seniutinas, Y. Nishijima, Y. Hikima, M. Zamengo, R. Petruškevičius, J. Morikawa, and S. Juodkazis. Si-based infrared optical filters. *Opt. Eng.*, 54(12):127103, 2015.
  17. **A. Balčytis**, M. Ryu, G. Seniutinas, J. Juodkazytė, B. C. C. Cowie, P. R. Stoddart, M. Zamengo, J. Morikawa, and S. Juodkazis. Black-CuO: surface-enhanced Raman scattering and infrared properties. *Nanoscale*, 7:18299–18304, 2015.
  18. S. Dinda, V. Suresh, P. Thoniyot, **A. Balčytis**, S. Juodkazis, and S. Krishnamoorthy. Engineering 3D nanoplasmonic assemblies for high performance spectroscopic sensing. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 7(50):27661–27666, 2015.
  19. F. C. P. Masim, H.-L. Liu, M. Porta, T. Yonezawa, **A. Balčytis**, S. Juodkazis, W.-H. Hsu, and K. Hatanaka. Enhanced photoacoustics from gold nano-colloidal suspensions under femtosecond laser excitation. *Opt. Express*, 24(13):14781–14792, 2016.
  20. F. C. P. Masim, W.-H. Hsu, C.-H. Tsai, H.-L. Liu, M. Porta, M. T. Nguyen, T. Yonezawa, **A. Balčytis**, X. Wang, S. Juodkazis, and K. Hatanaka. Enhanced photoacoustics from gold nano-colloidal suspensions under femtosecond laser excitation. *Opt. Express*, 24(15):17050–17059, 2016.
  21. W.-H. Hsu, F. C. P. Masim, M. Porta, M. T. Nguyen, T. Yonezawa, **A. Balčytis**, X. Wang, L. Rosa, S. Juodkazis, and K. Hatanaka. Femtosecond laser-induced hard X-ray generation in air from a solution flow of Au nano-sphere suspension using an automatic positioning system. *Opt. Express*, 24(18):19994–20001, 2016.
  22. **A. Balčytis**, T. Tolenis, X. Wang, G. Seniutinas, R. Drazdys, P. R. Stoddart, and S. Juodkazis. Percolation threshold gold films on columnar coatings: characterisation for SERS applications. *Asian J. Phys.*, 25(7):871–878, 2016.
  23. G. Seniutinas, **A. Balčytis**, Y. Nishijima, A. Nadzeyka, S. Bauerdick, and S. Juodkazis. Ion beam lithography with gold and silicon ions. *Appl. Phys. A*, 122:383, 2016.
  24. J. Morikawa, M. Ryu, G. Seniutinas, **A. Balčytis**, K. Maximova, X. Wang, M. Zamengo, E. P. Ivanova, and S. Juodkazis. Nanos-

- structured antireflective and thermoisolative cicada wings. *Langmuir*, 32(18):4698–4703, 2016.
25. J. Morikawa, M. Ryu, K. Maximova, **A. Balčytis**, G. Seniutinas, L. Fan, V. Mizeikis, J. Li, X. Wang, M. Zamengo, X. Wang, and S. Juodkazis. Silk fibroin as a water-soluble bio-resist and its thermal properties. *RSC Adv.*, 6(14):11863–11869, 2016.
  26. K. Maximova, X. Wang, **A. Balčytis**, L. Fan, J. Li, and S. Juodkazis. Silk patterns made by direct femtosecond laser writing. *Biomicrofluidics*, 10(5):054101, 2016.
  27. B. Sanchez-Padilla, A. Žukauskas, A. Aleksanyan, **A. Balčytis**, M. Malinauskas, S. Juodkazis, and E. Brasselet. Wrinkled axicons: shaping light from cusps. *Opt. Express*, 24(21):24075–24082, 2016.
  28. X. Wang, G. Seniutinas, **A. Balčytis**, I. Kašalynas, V. Jakštas, V. Janonis, R. Venckevičius, R. Buividas, D. Appadoo, G. Valušis, and S. Juodkazis. Laser structuring for control of coupling between THz light and phonon modes. *J. Laser Micro Nanoeng.*, 11(3):377–380, 2016.
  29. Y. Nishijima, R. Komatsu, S. Ota, G. Seniutinas, **A. Balčytis**, and S. Juodkazis. Anti-reflective surfaces: Cascading nano/micro-structuring. *APL Photonics*, 1(7):076104, 2016.
  30. T. Shoji, A. Mototsuji, **A. Balčytis**, D. Linklater, S. Juodkazis, and Y. Tsuboi. Optical tweezing and binding at high irradiation powers on black-Si. *Sci. Rep.*, 7:12298, 2017.
  31. **A. Balčytis**, M. Ryu, G. Seniutinas, P. R. Stoddart, M. A. Al Mamun, J. Morikawa, and S. Juodkazis. Nano-rescaling of gold films on polystyrene: thermal management for SERS. *Nanoscale*, 9(2):690–695, 2017.
  32. G. Seniutinas, **A. Balčytis**, I. Reklaitis, F. Chen, J. Davis, C. David, and S. Juodkazis. Tipping solutions: emerging 3D nano-fabrication/imaging technologies. *Nanophotonics*, 6(5):923–941, 2017.
  33. F. C. P. Masim, W.-H. Hsu, H.-L. Liu, T. Yonezawa, **A. Balčytis**, S. Juodkazis, and K. Hatanaka. Photoacoustic signal enhancements from gold nano-colloidal suspensions excited by a pair of time-delayed femtosecond pulses. *Opt. Express*, 25(16):19497–19507, 2017.

34. W.-H. Hsu, F. C. P. Masim, **A. Balčytis**, S. Juodkazis, and K. Hatanaka. Dynamic position shifts of X-ray emission from a water film induced by a pair of time-delayed femtosecond laser pulses. *Opt. Express*, 25(20):24109–24118, 2017.
35. **A. Balčytis**, M. Ryu, X. Wang, F. Novelli, G. Seniutinas, S. Du, X. Wang, J. Li, J. Davis, D. Appadoo, J. Morikawa, and S. Juodkazis. Silk: Optical properties over 12.6 octaves THz-IR-Visible-UV range. *Materials*, 10(4):356, 2017.
36. M. Ryu, **A. Balčytis**, X. Wang, J. Vongsvivut, Y. Hikima, J. Li, M. J. Tobin, S. Juodkazis, and J. Morikawa. Orientational mapping augmented sub-wavelength hyper-spectral imaging of silk. *Sci. Rep.*, 7:7419, 2017.
37. M. Ryu, H. Kobayashi, **A. Balčytis**, X. Wang, J. Vongsvivut, J. Li, N. Urayama, V. Mizeikis, M. Tobin, S. Juodkazis, and J. Morikawa. Nanoscale chemical mapping of laser-solubilized silk. *Mater. Res. Express*, 4(11):115028, 2017.
38. M. Ryu, D. Linklater, W. Hart, **A. Balčytis**, E. Skliutas, M. Malinauskas, D. Appadoo, Y.-R. E. Tan, E. P. Ivanova, J. Morikawa, and S. Juodkazis. 3D printed polarizing grids for IR-THz synchrotron radiation. *J. Opt.*, 20(3):035101, 2018.
39. D. H. K. Nguyen, V. T. H. Pham, V. Khanh Truong, I. Sbarski, J. Wang, **A. Balčytis**, S. Juodkazis, D. E. Mainwaring, R. J. Crawford, and E. P. Ivanova. Role of topological scale in the differential fouling of *Pseudomonas aeruginosa* and *Staphylococcus aureus* bacterial cells on wrinkled gold-coated polystyrene surfaces. *Nanoscale*, 10(11):5089–5096, 2018.
40. C. M. Bhadra, M. Werner, V. A. Baulin, V. K. Truong, M. Al Kobaisi, S. H. Nguyen, **A. Balčytis**, S. Juodkazis, J. Y. Wang, D. E. Mainwaring, R. J. Crawford, and E. P. Ivanova. Subtle variations in surface properties of black silicon surfaces influence the degree of bactericidal efficiency. *Nano-Micro Lett.*, 10(2):36, 2018.
41. Z. Wei, M. Janczarek, M. Endo, K. Wang, **A. Balčytis**, A. Nitta, M. G. Méndez-Medrano, C. Colbeau-Justin, S. Juodkazis, B. Oh-tani, E. Kowalska. Noble metal-modified faceted anatase titania photocatalysts: Octahedron versus decahedron. *Appl. Catal. B*,

237574–587, 2018.

42. E. Mitsai, A. Kuchmizhak, E. Pustovalov, A. Sergeev, A. Mironenko, S. Bratskaya, D. P. Linklater, **A. Balčytis**, E. Ivanova, S. Juodkazis. Chemically non-perturbing SERS detection of a catalytic reaction with black silicon. *Nanoscale*, 10:(20):9780–9787, 2018.
43. **A. Balčytis**, Y. Nishijima, S. Krishnamoorthy, A. Kuchmizhak, P. R. Stoddart, R. Petruškevičius, S. Juodkazis. From fundamental toward applied SERS: Shared principles and divergent approaches. *Adv. Opt. Mater.*, 6:(16):1800292, 2018.

Pranešimų konferencijose sąrašas

**Pranešimai disertacijos tema mokslinėse konferencijose:**

1. R. Petruškevičius, D. Urbonas, M. Gabalis, K. Vaškevičius and **A. Balčytis**. Plasmonic and silicon-on-insulator nanostructures for optical biosensing. In *IEEE Proc. 2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 6-10 July, Graz, Austria, pages 1–4, 2014.
2. **A. Balčytis**, G. Seniutinas, D. Urbonas, M. Gabalis, K. Vaškevičius, R. Petruškevičius, G. Molis, G. Valušis, S. Juodkazis. High precision fabrication of antennas and sensors. In *Proc. SPIE 9446, Ninth International Symposium on Precision Engineering Measurement and Instrumentation*, 8-10 August, Changsha, China, page 94461G, 2015.
3. G. Seniutinas, G. Gervinskas, **A. Balčytis**, F. Clark, Y. Nishijima, A. Krotkus, G. Molis, G. Valušis, S. Juodkazis. Nanoscale precision in ion milling for optical and terahertz antennas. In *Proc. SPIE 9374, Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics VIII*, 8-11 February, San Francisco, CA, USA, page 93740P, 2015.
4. Y. Nishijima, Y. Hashimoto, S. Gediminas, **A. Balčytis** and S. Juodkazis. Alloy plasmonic materials. In *Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), 2015 11th Conference on, Vol. 1*, 24-28 August, Busan, South Korea, pages 1-2, 2015.
5. **A. Balčytis**, D. Hakobyan, M. Gabalis, A. Žukauskas, D. Urbonas, M. Malinauskas, R. Petruškevičius, E. Basselet, S. Juod-

- kazis. 3D micro-optical elements for generation of tightly focused vortex beams. In *MATEC Web of Conferences 32, International Symposium of Optomechatronics Technology (ISOT 2015)*, 14-16 October, Neuchatel, Switzerland, page 03002, 2015.
6. **A. Balčytis**, D. Urbonas, M. Gabalis, S. Juodkazis, R. Petruškevičius. Mode control in SOI microring resonators through sub-wavelength modifications. In *Applied Nanotechnology and Nanoscience International Conference (ANNIC 2016)*, 9-11 November, Barcelona, Spain, 2016.
  7. C. Briosne-Fréjaville, A. Mau, **A. Balčytis**, X. Li, S. Juodkazis. Resizable nanopores. In *Applied Nanotechnology and Nanoscience International Conference (ANNIC 2016)*, 9-11 November, Barcelona, Spain, 2016.
  8. **A. Balčytis**, D. Urbonas, M. Gabalis, S. Juodkazis, R. Petruškevičius. Sub-wavelength modifications in silicon-on-insulator microring resonators for enhanced sensing. In *IONS Conference on Optics, Atoms and Laser Applications 2016 (KOALA 2016)*, 27 November - 2 December, Melbourne, VIC, Australia, 2016.
  9. **A. Balčytis**, C. Briosne-Fréjaville, A. Mau, X. Li, S. Juodkazis. Rescalable solid-state nanopores. In *AIP Conference Proceedings 1874, International Conference on Metamaterials and Nanophotonics (METANANO-2017)*, 18-22 September, Vladivostok, Russia, page 030002, 2016.

#### **Kiti pranešimai mokslinėse konferencijose:**

10. Y. Nishijima, R. Komatsu, T. Yamamura, G. Seniutinas, **A. Balčytis**, S. Juodkazis. Photo-Thermoelectric Energy Converter with Black-Si Absorber. In *IEEE Proc. 2014 Conference on Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices (COMMAD)*, 14-17 December, Perth, Australia, pages 109–112, 2014.
11. G. Seniutinas, **A. Balčytis**, R. Tomašiūnas, R. Petruškevičius, S. Urnikaitė and V. Getautis. Photo-Switching dynamics of azo-phenylcarbazoles in polycarbonate around  $\beta$  transition temperature. In *IEEE Proc. 2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 6-10 July, Graz, Austria, pages 1–4, 2014.

12. Y. Nishijima, **A. Balčytis**, R. Komatsu, T. Yamamura, G. Seniutinas, B. T. Wong, S. Juodkazis. Thermal to electrical energy converter based on black Si. In *Proc. SPIE 9374, Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics VIII*, 8-11 February, San Francisco, CA, USA, page 93740J, 2015.
13. **A. Balčytis**, G. Seniutinas, J. Juodkazytė, B. C. C. Cowie, F. Lapierre, S. Juodkazis. Nanotextured CuO: sensing and light harvesting platform. In *Proc. SPIE 9374, Advanced Fabrication Technologies for Micro/Nano Optics and Photonics VIII*, 8-11 February, San Francisco, CA, USA, page 93740K, 2015.
14. R. Komatsu, **A. Balčytis**, G. Seniutinas, Y. Nishijima, S. Juodkazis. Energy harvesting with black Si/plasmonics composite material. In *Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), 2015 11th Conference on, Vol. 2*, 24-28 August, Busan, South Korea, pages 1-2, 2015.
15. J. Getautis, **A. Balčytis**, R. Tomašiūnas, R. Petruškevičius, S. Urnikaitė and V. Getautis. All-optical poling kinetics of azophenyl-carbazoles influenced by attached anchor. In *2015 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 5-9 July, Budapest, Hungary, pages 1-4, 2015.
16. **A. Balčytis**, J. Juodkazytė, G. Seniutinas, X. Li, G. Niaura, S. Juodkazis. Nanotextured surfaces for surface enhanced Raman spectroscopy and sensors. In *Proc. SPIE 9736, Laser-based Micro- and Nanoprocessing X*, 16-18 February, San Francisco, CA, USA, page 97360G, 2016.
17. K. Maximova, X. Wang, **A. Balčytis**, J. Li, S. Juodkazis. Writing of bio-compatible silk patterns: 3D laser nano-printing. In *Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest*, 5–10 June, San Jose, CA, USA, page AF1J.2, 2016.

#### Autoriaus ir bendraautorių indėlis

Šioje disertacijoje aprašyti darbai yra keleto kolaboratyvių mokslinių tyrimų projektų, kurie skiriasi tiek savo sudėtingumu tiek ir dalyvaujančių tyrėjų grupių skaičiumi, rezultatas. Kiekvienu atveju kolaboruojančios grupės yra įvardinamas atitinkamų skilčių įžanginėse dalyse.

## Autoriaus tiesioginis indėlis

Šios disertacijos autorius atliko visas čia aprašomas su nanoapdirbimu susijusias veiklas, bei skaitmeninius fotoninių reiškinių simuliacijų skaičiavimus. Svarbiausi autoriaus indėliai apima:

- EBL gamybos procesų sudarymas ir subbanginių matmenų funkcinių komponentų, tokių kaip silicio su bangolaidžiu susietų mikrožiedinių rezonatorių jutiklių, ant membranos suformuotų mikrotermoporų sandūrų, bei submikroninių magnetinių atomų gaudyklų gardelių, sukūrimas.
- FIB litografinės gamybos procesų sudarymas kietojo kūno nanoporų makromolekulinės translokacijos detektorių, bei iš nanokomponentų sudarytų gardelinių poliarizatorių ir spiralinių zonų struktūrų difrakcinių mikrooptinių elementų gamybai.
- Litografinio raštų pernešimo į funkcines medžiagas atlikimas atimtinu išdėdiniu reaktyviais jonais arba adityviais magnetroninio nusodinimo ar šiluminio garinimo PVD būdais.
- PVD nusodinimo protokolų sudarymas ir įvykdymas kuriant skirtingus plonasluoksnius Pd, Au, Ag, Cu, Ti, Si, SiO<sub>2</sub> ir ZnO lydinius ar sluoksniuotus darinius, o taip pat kaukės inversijos atlikimas kuriant atitinkamas plazmonines struktūras.
- FDTD (*Angl.* Finite-difference time-domain) fotoninių simuliacijų sudarymas ir skaičiavimų atlikimas tiriant mikrožiedinius rezonatorius, spiralinių zonų darinius, bei plazmoninių sugėriklių meta-paviršius.
- Pagamintų darinių charakterizavimas naudojant SEM, optinės profilometrijos, atominės jėgos mikroskopijos, sinchroninės detekcijos termojtampos matavimus, bei Australijos sinchrotrono IR spektroskopijos pajėgumus.

## Bendraautorių indėlis

Bendraautorių ir kolegų indėlis į šioje disertacijoje aprašytus darbus dažniausiai siejasi su eksperimentiniu pagamintų struktūrų charakterizavimu, be to daugeliu atveju jie diktavo kokiomis savybėmis turėtų pasižymėti parengti dariniai. Svarbiausi bendraautorių indėliai yra:

- Mikrožiedinių rezonatorių prietaisai, aprašomi Skyriuje 2.3, buvo suprojektuoti Fizinių ir technologijos mokslų centre dr. Rai-



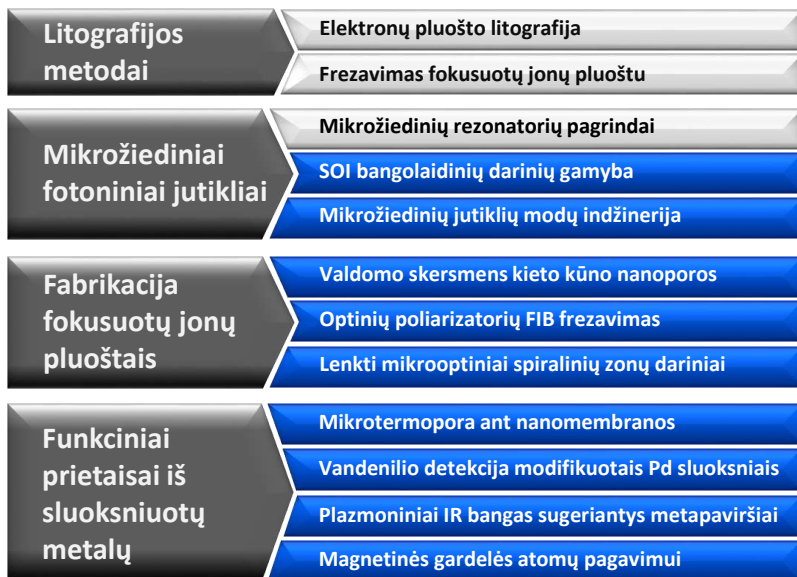
mondo Petruškevičiaus vadovaujamoje grupėje, kur bangolaidinių struktūrų pralaidumo spektroskopinį charakterizavimą atliko Konstantinas Vaškevičius.

- Kietojo kūno nanoporų, aprašytų Skyriuje 3.1, charakterizavimą TEM ir elektrocheminio laidumo matavimų metodais atliko Portugalijos kompanijoje "Nanopore Solutions Lda" dirbantys specialistai.
- Keturių poliarizacijų metoda, skirtą vizualizuoti orientaciškai selektyvią molekulinių vibracinių modų sugertį kaip aprašyta Skyriuje 3.2, sukūrė ir kolaboratyviai Australijos sinchrotrone išmatuotų spektrų analizei pritaikė Tokyo Institute of Technology dirbanti prof. Junko Morikawa vadovaujama tyrėjų grupė.
- Neplokštuminės dielektrinės pjedestalo struktūras, naudotas tam kad suformuoti hibridinius mikrooptinius spiralinių zonų darinius aprašytus Skyriuje 3.3, lazeriu supolimerizavo Vilniaus universiteto tyrėjų komanda vadovaujama dr. Mangirdo Malinausko, o FIB struktūrizuotų difrakcinių darinių optinį charakterizavimą atliko University of Bordeaux grupės, vadovaujamos prof. Etienne Brasselet, nariai.
- Pradinę idėją ant ultraplonos membranos sukurti mikrotermoporos prietaisą, aprašytą Skyriuje 4.1, pasiūlė prof. Saulius Juodkazis, o priemonės ir patirtį reikalingą prototipo sukūrimui bei charakterizavimui suteikė Tokyo Institute of Technology dirbanti prof. Junko Morikawa vadovaujama tyrėjų grupė.
- Vandens optinės detekcijos eksperimentus naudojant Pd pagrindu pagamintus lydinius bei sluoksniuotus darinius, aprašytus Skyriuje 4.2, atliko asoc. prof. Yoshiaki Nishijima vadovaujama grupė iš Yokohama National University, naudojant jų pačių pagamintą dujų srauto kamerą.
- Sluoksniuotų metalo-dielektriko-metalo nanodiskų metapaviršius, aprašytus Skyriuje 4.3, IR spektroskopijos būdu taipogi charakterizavo asoc. prof. Yoshiaki Nishijima vadovaujama grupė iš Yokohama National University.
- Plonus magnetinius metalo sluoksnius, kuriuose EBL būdu buvo sukurtos gardelės aprašytos Skyriuje 4.4, sukūrė prof. Manfred Albrecht grupė University of Augsburg, o pačių gardelių pro-

jektavimą bei eksperimentinius atomų pagavos tyrimus atliko Swinburne University of Technology dirbantys prof. Peter Hanford vadovaujamos grupės nariai.

### Disertacijos sandara

Disertacijos sandara yra iliustruota Pav. A pateiktoje schemeje. Ji prasideda trumpa svarbiausių šiame darbe naudotų elektronų bei jonų pluoštų litografijos metodų apžvalga, kurios pasėkoje detalizuojami originalūs tiriamieji darbai, surūšiuoti į tris temines grupes. Išsamūs konkrečių modeliavimo, gamybos ar charakterizavimo procesų aprašymai yra pateikiami pagal poreikį kiekviename iš skirtingus projektus apimančių skyrių, siekiant kad darbų aprašai būtų kiek įmanoma autonomiški.



Pav. A: Disertacijos sudėties schema. Originalūs tiriamieji darbai yra aprašomi mėlyna spalva pažymėtuose skyriuose.

## 1 LITOGRAFIJOS METODAI

Įkrautos dalelės, elektronai ir jonai, atitinkamo pluošto litografijose atlieka analogišką vaidmenį kaip ir fotonai optinėje litografijoje. Tiek elektronų, tiek ir jonų pluoštai suprantami analogiškais pamatiniais principais ir gali būti naudojami panašioms rezultatams pasiekti. Abiem atvejais įkrautų dalelių srautas iš atitinkamų šaltinių yra generuojamas bei greitinamas panašiais lauko emisijos metodais. Taipogi abiem atvejais pluošto sklidimas bandinio link yra kontroliuojamas eile elektrostatiinių ar magnetinių lęšių bei apertūrų. Tiek elektronų, tiek ir jonų pluoštų sistemos gali būti naudojamos bandinio vaizdinimui, ėsdinimui bei medžiagų nusodinimui ant jų. Šios dalelės perneša energiją ir ją perduoda deramo jautrumo rezisto sluoksniams arba tiesiogiai pašalina medžiagos atomus. Kitaip nei optinėje litografijoje, kur procesas iš esmės tėra prieš tai sukurtos kaukės replikavimas, jonų ir elektronų pluoštai elektromagnetiniais lęšiais gali būti sufokusuoti į itin mažo diametro sritis ir tiesiogiai skenuojant betarpiškai sugeneruoti pageidaujamas planarines struktūras [13].

Nepaisant daugelio pranašumų ir galimybės užrašyti mažesnius nei 100 nm struktūrinius komponentus, EBL ir FIB metodų sparta yra nedidelė ir negali būti pritaikyta didelio masto integruotų lustų gamybai. Kelių nanometrų dydžio pluoštelio nuoseklus skenavimas visos eksponuotinos srities plotu yra per lėtas ir negali varžytis su projekcinės optinės litografijos paraleline ekspozicija didelio intensyvumo fotonų srautu.

Šioje dalyje, remiantis moksline literatūra, trumpai aprašoma rezistų ekspozicijai naudotina elektronų pluošto litografija, bei tiesiogiai medžiagą modifikuoti pajėgi frezavimo fokusuotu jonų pluoštu metodika. Čia apibūdinama abu metodus realizuojanti techninė įranga, įvardinami esminiai fizikiniai procesai, bei detalizuojamos bazinių gamybos procesų gairės, skiriant ypatingą dėmesį tiek EBL tiek ir FIB taikymo privalumams bei apribojimams.

## 1.1 Elektronų pluošto litografija

Elektronų pluošto litografija (*Angl.* Electron beam lithography, EBL) yra itin svarbus įrankis ne tik formuojant pavienius funkcinis darinius su  $<100$  nm elementų dimensijomis, bet ir sukuria prielaidas industrinio masto optinei litografijai, kadangi tai pagrindinis būdas DUV bei EUV litografijos kaukėms gaminti. Pirminis, tiesioginio rašymo EBL metodas suteikia galimybę betarpiškai, pagal skaitmeniniu būdu užduotus parametrus, ant paviršiaus suformuoti pageidaujamus dvimačius raštus. Tipiško EBL aparato veikimo principas yra panašus į skenuojančio elektronų mikroskopo, kadangi elektronų pluoštas sufokusuojamas į labai mažą sritį ir tam tikra trajektorija elektroniškai vedamas per rezisto paviršių. Elektrono spindulys rezisto sluoksnyje inicijuoja tam tikrus cheminius pokyčius, kurie eksponuotas sritis padaro labiau tirpias (teigiamo tono rezistas) arba mažiau tirpias (neigiamo tono rezistas) deramai parinktame ryškale. Tokiu būdu rezisto sluoksnyje sukuriama pageidaujamos struktūros dvimatis atvaizdas. Šis raštas iš rezisto gali būti perduodamas funkcinėms medžiagoms išdvinant arba užnešant plonus jų sluoksnius.

## 1.2 Frezavimas fokusuotų jonų pluoštu

Jonų pluošto litografija (*Angl.* Ion beam lithography, IBL) bandinio paviršių bombarduoja tūkstančius kartų didesnę masę nei elektronai turinčiomis įkrautomis dalelėmis. Kadangi jonai turi atitinkamai didesnį judesio kiekį bei skerspjūvį negu elektronai, pagrindinis jų pluoštų taikymas susijęs su tiesiogine bandinio medžiagos abliacija, nors jonai taip pat gali būti naudojami rezisto ekspozicijai arba medžiagos nusodinimui iš dujinio prekursoriaus. Pirmieji jonų šaltiniai buvo dujų išlydžio tipo ir dėl pernelyg plataus erdvinio pasiskirstymo, nebuvo įmanoma gauti stipriai sufokusuotų jonų pluoštų. Visa tai pasikeitė sukūrus skysto metalo jonų šaltinius [14]. Šiuolaikinės jonų litografijos sistemos gali  $Ga^+$  jonų pluoštus sufokusuoti į 5 nm diametro sritis, o naudojant  $He^+$  jonus pluoštas ties židiniu gali siekti ir  $\sim 1$  nm. Taigi, turint tokį siaurą pluoštą, galimybę eksponuoti rezistus, šalinti bandinio medžiagą arba vykdyti nusodinimą iš tam tikrų dujinių junginių, FIB sistemos pasižymi neeiliniu lankstumu.

Panašiai kaip ir EBL atveju, jonų pluošto litografija nėra tinkama

didelio masto gamybos poreikiams, todėl funkcinių elektronikos bei fotonikos komponentų gamybos kontekste FIB taikymas apsiriboja prototipų kūrimu ir naujų veikimo principų moksliniais tyrimais. Esminis FIB bruožas yra tai, kad jonų pluoštai gali tiesiogiai graviruoti medžiagas, ir, kitaip nei visi kiti litografijos metodai, nėra būtina naudoti rezistų kaip specializuoto jautrumo sluoksnių. Šiuo būdu jonų pluošto litografija gerai papildo visus kitus nanoapdirbimo metodus. Dar daugiau, IBL frezavime jonų dozė yra proporcinga pašalinamos medžiagos kiekiui, o naudojant dujinius prekursorius galima ir nusodinti medžiagos sluoksnius, taigi egzistuoja galimybė tiesiogiai formuoti trimačius darinius. Be frezavimo, jonų pluoštas taip pat gali funkcionalizuoti paviršius implantacijos ar laidumo modifikacijos lokaliai generuojant defektus būdais.

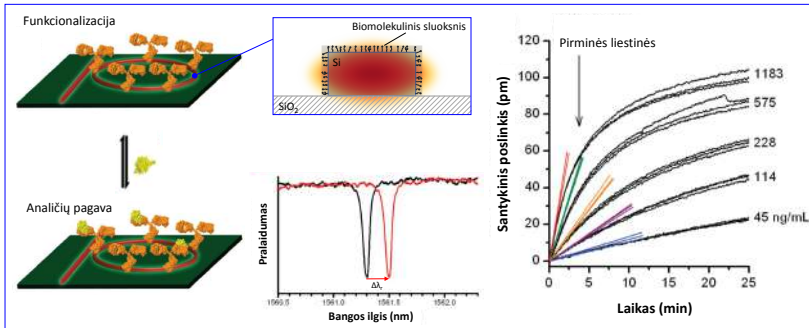
## 2 MIKROŽIEDINIAI FOTONINIAI JUTIKLIAI

Šioje dalyje aptariama naujo pobūdžio su bangolaidžiais susietų mikrožiedinių rezonatorių gamyba elektronų pluošto litografijos metodu naudojant silicio ant dielektriko (*Angl.* Silicon-on-insulator, SOI) padėklų platformą. Didelės skyros tiesioginio rašymo EBL pajėgumai įgalina sparčiai generuoti prietaisų prototipus ir su didesniu nei 10 nm tikslumu formuoti jų struktūrinius komponentus. Aprašymas prasideda nuo apibendrinto mikrožiedinių rezonatorių prietaisų aprašymo, ypatinę dėmesį skiriant SOI pagrindu pagamintiems  $\lambda \approx 1.55 \mu\text{m}$  telekomunikacijos bangos ilgių spektriniame ruože veikiantiems prietaisams bei jų taikymui kuriant bežymeklinius biojutiklius. Tai, savo ruožtu, suformuoja reikalavimus kuriuos turi atitikti šių darinių EBL gamybos procesai, kurie yra aptariami toliau. Galiausiai yra apibūdinami du skirtingi mikrožiedinių rezonatorių pavyzdžiai, kurių veikimas remiasi subbanginių matmenų komponentų įtaka, naudojant FDTD simuliacijų bei eksperimentinio charakterizavimo rezultatus. Vienas iš jų yra gradientinio efektyvaus lūžio rodiklio pagrindu suformuotas žiedo pavidalo darinys, kuris padeda delokalizuoti stipriai si įspraustą modą ir padidinti jos sąveiką su išorine aplinka. Kita vertus, mikrožiedą modifikavus Bragg gardele galima įvesti papildomą difrakcinį komponentą įgalinantį filtruoti nepageidaujamas rezonansines modas ir tokiu būdu praplėsti jutiklio dinaminį diapazoną.

### 2.1 Mikrožiedinių rezonatorių pagrindai

Žiedinis rezonatorius yra sudarytas iš uždaros optinio bangolaidžio kilpos, kuri yra susieta su tam tikru dariniu, dažniausiai greta esančiu bangolaidžiu, skirtu įgalinti elektromagnetinės energijos perdavimą į ją ir iš jos. Žiediniai rezonatoriai palaiko modas, sklindančias tokiomis uždaromis trajektorijoms kurioms galioja konstruktyvios interferencijos sąlyga, t.y. kurių optinis kelias atitinka lyginį bangos ilgių skaičių. Idealizuotu apskritiminiu atveju tai išreiškiama:

$$m\lambda_r = 2\pi R n_{\text{eff}}, \quad (2.1)$$



Pav. 2.1: Mikrožiedinių rezonatorių pagrindu sukurtų bežymeklinių biojutiklių veikimas [15]. Silicio bangolaidžių paviršiai yra funkcionalizuojami biomolekulėmis pasižyminčiomis polinkiu sąveikauti su tam tikrais analitiškai svarbiais junginiais. Periferinės bangolaidinės modos sritys apčiuopia SOI darinio aplinką. Bet kokie aplinkos lūžio rodiklio pokyčiai sąlygoja rezonansinio piko spektrinį poslinkį, kuris gali būti naudojamas kaip signalas analičių koncentracijai įvertinti, kaip atidėta dešinėje paveikslėlyje.

kur  $m$  yra sveikas skaičius,  $\lambda_r$  yra rezonansinis bangos ilgis,  $R$  yra žiedo spindulys, o  $n_{\text{eff}}$  yra efektyvus modos lūžio rodiklis. Taigi, remiantis Lygtimi 2.1, rezonansinių modų spektrinė padėtis yra nulemta spinduliuotės sklaidimo trajektorijos ilgio, o jų pavidalas yra apsprendžiamas įvairių optinių nuostolių sąlygotų faktorių.

Kuo didesniu kokybės faktoriumi  $Q$  pasižymi rezonatorius, tuo ilgiau jame lokalizuota spinduliuotė gali cirkuliuoti, ir tuo didesnis yra maksimalus pasiekiamas modos elektromagnetinio lauko intensyvumas. Šie du faktoriai lemia mikrožiedinių rezonatorių jautrumą įvairiems aplinkos poveikiams, ką galima išreikšti per darinio geometrijos bei dielektrinių terpių pokyčius:

$$\frac{\Delta\lambda_r}{\lambda_r} = \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta n_{\text{eff}}}{n_{\text{eff}}}. \quad (2.2)$$

Pastaroji rezonansinės modos spektrinės padėties prieklausa nuo jos apčiuopiamos aplinkos tūrio lūžio rodiklio pokyčių sudaro mikrožiedinių rezonatorių taikymo bežymeklinių optinių jutiklių kūrimui pa-

grindą.

Literatūroje aptariamos esminės mikrožiedinių optinių jutiklių savybės yra apibendrintos Paveiksle 2.1. Su bangolaidžiu susieti mikrožiediniai rezonatoriai yra vadinami bežymekliniais, kadangi jų taikymai nereikalauja chemiškai modifikuoti analitinių junginių. Tačiau, siekiant optinio atsako specifiškumo, šio tipo prietaisus būtina funkcionalizuoti tam tikroms molekulėms selektyviais junginiais [16]. Rezonatoriumi sklindančios modos gali reaguoti tik į itin arti prietaiso paviršiaus vykstančius lūžio rodiklio pokyčius, o spektriniu poslinkiu pasireiškiančio atsako dydis priklauso nuo lokalaus elektromagnetinės spinduliuotės intensyvumo, taigi, nuo to kuri modos dalis gali būti išlaisvinta iš didesnės dielektrinės skvarbos terpės į supančią aplinką [17]. Mikrožiedinių darinių miniatūrizacija suteikia du esminius pranašumus – sumažina detekcijos slenkstį ir padidina modų delokalizaciją.

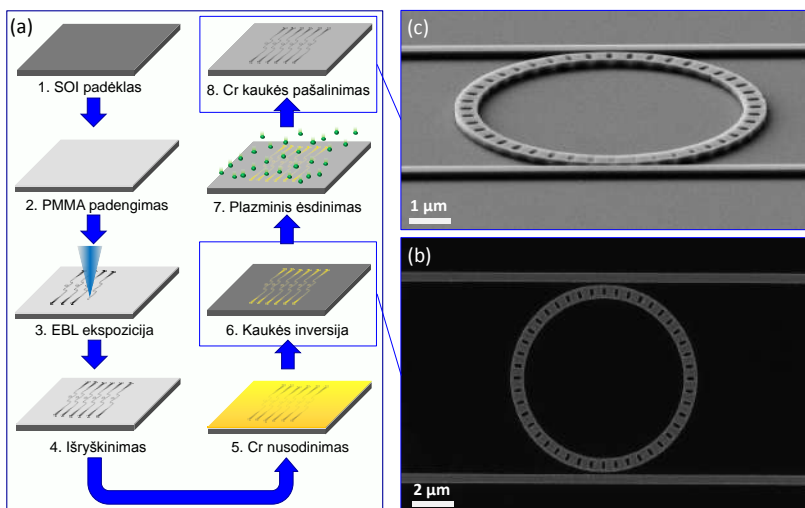
## 2.2 SOI bangolaidinių darinių gamyba

Šiame darbe apibūdinamos su bangolaidžiais susietos mikrožiedinių rezonatorių struktūros buvo pagamintos iš Si, kaip žaliavą naudojant SOI padėklus, ir buvo pritaikytos veikti  $\lambda \approx 1.55 \mu\text{m}$  telekomunikacijos bangos ilgių spektriniame ruože. Vienmodis bangolaidžių veikimas su pakankamai ženkliu modų lokalizacija tokio pobūdžio spinduliuotei užtikrinamas kuomet jų skersiniai matmenys yra  $400 \times 220 \text{ nm}^2$ . Tokio dydžio darinių gamybos tikslumas buvo užtikrintas naudojant EBL metodiką, pasižyminčią 10 nm eilės skyra, kuri įgalino atkartojamai su nedidesniais nei  $\leq 5 \text{ nm}$  nuokrypiais realizuoti sudėtingas funkcijas realizuojančius subbanginių matmenų funkcinius komponentus.

EBL gamybos procedūra naudota sukuriant pirminius prototipinius SOI darinius yra pateikta Paveiksle 2.2 (a) ir rėmėsi teigiamo PMMA rezisto ekspozicija ir po ryškinimo atliekama kaukės inversija į neigiamo tono 12 nm storio Cr sluoksnį. Gamyba buvo vykdoma naudojant komerciškai įsigytus SIMOX tipo SOI padėklus [18]. Ant organiniuose tirpikliuose nuplauto SOI padėklo 90 nm storio PMMA buvo užneštas sukamojo padengimo būdu. Ekspozicija taikant  $650 \mu\text{Ccm}^{-2}$  bazinę dozę buvo atlikta naudojant Melbourne nanofabrikacijos centre esantį Raith EBPG5000plusES (Raith GmbH) 100 kV elektronų greitintimo įtampa bei  $1 \text{ mm}^2$  rašymo lauku pasižymintį elektronų pluošto



litografijos aparata. Artumo efekto korekcija buvo atlikta remiantis Monte Karlo simuliacijų, atskleidžiančių elektronų sklaidą padėkle, rezultatais, kas leido užtikrinti tolydžią viso rašto apšvitos dozę. Po ekspozicijos latentinis raštas išryškintas MIBK/IPA tirpiklių mišinyje. Kieta metalinė 12 nm storio neigiamo tono kaukė buvo suformuota AXXIS PVD (Kurt J. Lesker) aparate atliekant šiluminį chromo garinimą ir po to PMMA ištirpinus acetone, o šio proceso rezultatas iliustruojamas Paveiksle 2.2 (b). Plokštuminis kaukės raštas į funkcinį Si sluoksnį buvo pervestas atliekant  $CF_4/O_2$  chemijos reaktyvių jonų



Pav. 2.2: (a) Kaukės inversijos EBL procesas naudotas gaminant pirminius SOI mikrožiedinių rezonatorių darinius. SOI padėklas pirmiausia ultragarsu valomas acetone, IPA ir metanolyje. Po to 90 nm storio PMMA rezisto sluoksnis suformuojamas sukamuoju padengimu. EBL ekspozicija atliekama naudojant 100 kV įtampa greitinaimą elektronų pluoštą, ir latentinis raštas išryškintas 1:3 MIBK/IPA tirpiklyje. Naudojant šiluminį garinimą nusodinamas 12 nm storio Cr sluoksnis, kuris, rezistą pašalinus acetone, tampa invertuota kauke pavaizduota (b) SEM vaizde. Struktūrų ėsdinimas atliekamas naudojant  $CF_4/O_2$  plazmą, o Cr kaukės likučiai pašalinami chemiškai ėsdinant. (c) Izometrinis vienos iš galutinių rezonatorių struktūrų SEM atvaizdas.

ėsdinimą SAMCO RIE-101iPH aparate tol, kol visas kaukės neuždengtas silicis buvo pašalintas iki pat SiO<sub>2</sub> oksido sluoksnio paviršiaus. Galiausiai Cr kaukės likučiai buvo pašalinti azoto rūgšties pagrindu sudarytame specialiaame tirpiklyje, o vieno iš tokiu būdu pagamintų rezonatorių pavyzdys yra pateiktas Paveiksle 2.2 (c).

Nors PMMA/Cr kaukės pagrindu pagaminti SOI mikrofoniniai dariniai pasižymėjo visomis numatytomis savybėmis, jų efektyvumą mažino dėl metalo kaukės nanokristalingumo atsirandantis vidutiniškai ~ 10 nm eilės bangolaidžių šoninių sienelių šiurkštumas. Taigi, siekiant pilnai išnaudoti EBL teikiamą gamybos skyros pranašumą buvo pasirinkta naudoti aukštesnės kokybės HSQ rezistą, tiekiamą kaip 6% MIBK tirpalas. Šiuo rezistu paremta SOI darinių gamyba koncepcine prasme buvo panaši kaip pavaizduota Paveiksle 2.2 (a), su esminiu skirtumu kad nereikalingi metalizacijos ir kaukės inversijos žingsniai. Po 3500 μCcm<sup>-2</sup> bazinės dozės EBL ekspozicijos ryškinimas buvo atliktas 55 °C temperatūros 25% vandeniniame TMAH tirpale, po kurio sekė Si struktūrų suformavimas reaktyvių jonų ėsdinimo būdu.

Ėsdinimo režimas taip pat turi didelę įtaką darinių kokybei ir šoninių sienelių šiurkštumui, todėl HSQ paremto gamybos proceso vystymo eigoje buvo svarbu optimizuoti ir šį žingsnį. HSQ nepasižymi tokiu dideliu jautrumu O<sub>2</sub> plazmai koks būdingas metalams, taigi suteikė daugiau lankstumo parenkant geriausius parametrus, kurie šiuo atveju buvo 100 sekundžių trukmės ėsdinimas 40/6/6 sccm srautų CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/Ar dujų mišinio  $P = 0.5$  Pa slėgio plazmoje, inicijuotoje naudojant 300 W induktyvinio elemento ir 10 W jonų bombardavimo galias. Šis galutinis EBL gamybos procesas įgalino aukštos kokybės SOI bangolaidinių rezonatorių realizaciją, bei pasižymėjo tikslumu reikalingu subbanginių nanomatmenų funkcinių komponentų suformavimui.

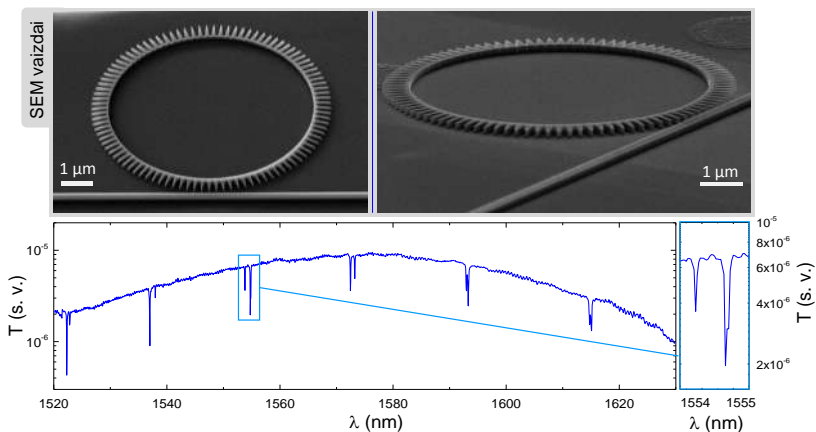
### 2.3 Mikrožiedinių jutiklių modų indžinerija

Šiame skyriuje aprašoma kaip EBL buvo naudota naujo pobūdžio mikrožiedinių rezonatorių prietaisų, kurių veikimas remiasi ženkliai mažesnių nei  $\lambda/n_{Si}$  matmenų darinių poveikiu, prototipams sukurti. Didelė metodikos skyra įgalino iš subbanginio dydžio elementų suformuoti kontroliuojamo efektyvaus lūžio rodiklio bangolaidines struktūras, kas leidžia valdyti rezonansinių modų erdvinį pasiskirstymą darinių

aplinkoje. Kita vertus, mikrožiedinių rezonatorių paviršius modifikavus apskritiminėmis antros eilės Bragg gardelėmis realizuotas selektyvus palaikomų modų filtravimas, bei aptiktas mechanizmas padidinantis specifinio sužadavimo kokybės faktorių ir eliminuojantis modų skilimą.

Skirtingos konstrukcijos SOI žiedinių rezonatorių veikimas buvo tiriamas juos inkorporavus į to pačio EBL proceso metu sukurtą paprasto pobūdžio integrinį fotoninį grandyną, sudarytą iš poros simetriškai išdėstytų gardelinių įvedimo bei išvedimo elementų, skirtų susieti spinduliuotės sklaidimą laisvoje erdvėje ir submikroninių matmenų Si dariniuose, ir tarp šių darinių išęsto ir šonu prie rezonatoriaus priartinto bangolaidžio. Eksperimentinė darinių charakterizacija buvo atlikta matuojant bangolaidžio pralaidumo spektrus pro vieną iš įvedimo elementų šviesolaidžiu injektuojant  $\lambda = 1.53 - 1.57 \mu\text{m}$  bangos ilgių ruožo lazerinę spinduliuotę, o išvedimo elementą zonduojant prie kito šviesolaidžio prijungtu telekomunikacinių InGaAs IR detektoriumi. Be to, FDTD (*Angl.* Finite-difference time-domain) skaičiavimai realizuoti "MODE Solutions" programinės įrangos platformoje (Lumerical Solutions Inc) [19], tiesiogiai diskretizuotoje erdvėje sprendžiantys Maxwell lygtis, buvo atlikti siekiant įvertinti tiek erdvinį tiek ir spektrinį elektromagnetinės spinduliuotės intensyvumo pasiskirstymą atitinkamuose idealizuotuose rezonatoriuose.

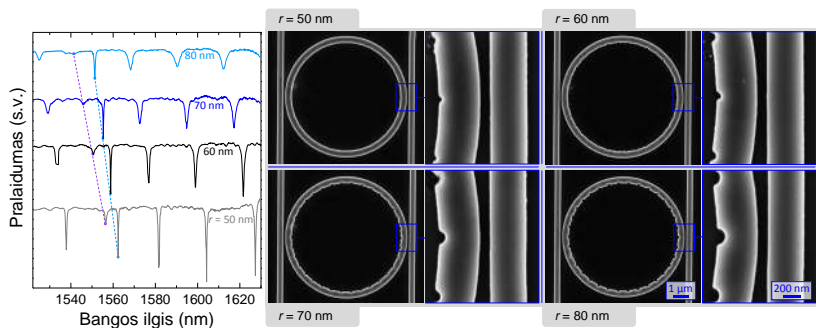
Gradientinio lūžio rodiklio pagrindu suformuotų mikrožiedinių rezonatorių numatyta paskirtis yra užtikrinti, kad, kitaip nei įprastuose didelio lūžio rodiklio Si bangolaidžiuose, didelė jų palaikomų modų energijos dalis būtų delokaluota ir sklįstų darinių supančioje terpėje [20]. Tai sąlygoja stipresnę spinduliuotės sąveiką su zonduojamomis analitinėmis medžiagomis, ypač kuomet detekcija nėra lokalizuota ties funkcionalizuotu paviršiumi, bet paskirstyta erdvėje, pavyzdžiui, optiškai aptinkant dujinius junginius. Šis funkcionalumas čia buvo įgyvendintas 9.2  $\mu\text{m}$  vidinio spindulio mikrožiedinių rezonatorių suformuojant iš 101 trikampių 800 nm aukštinės ir 30 nm smaigalio skersmens subbanginių matmenų komponentų, periodiškai išdėliotų taip, kad jų užpildos faktorius mažėtų radialine kryptimi, kaip pavaizduota Paveiksle 2.3 pateiktuose SEM vaizduose. Esminė šios geometrijos sąlygota savybė yra tai, kad išilgine kryptimi trikampiniai komponentai yra itin siauri, taigi, su  $\sim 1550 \text{ nm}$  bangos ilgio spinduliuote sąveikauja beveik



Pav. 2.3: Gradientinio efektinio lūžio rodiklio mikrožiedinių rezonatorių izometriniai SEM vaizdai yra pateikti viršutinėje iliustracijos dalyje. Apačioje atidėtas eksperimentiškai išmatuotas šios SOI struktūros pralaidumo spektras. Dešinėje pateiktas didesnės skyros rezonansinio dupletų spektras.

taip tarsi būtų tolydi medžiaga. Be to, kadangi žiedinio darinio tankis mažėja periferinių sričių linkme, tokiu pat būdu kinta ir efektyvus lūžio rodiklis bei rezonansinių modų lokalizacija.

Paveikslo 2.3 apačioje yra atidėtas gradientinio lūžio rodiklio mikrožiedinio rezonatoriaus pralaidumo spektras. Kaip būdinga uždaro kilpos rezonatoriams, modos yra išsidėsčiusios vienodais bangos ilgiu intervalais, ir pasižymi dideliais  $Q \simeq 15000$  eilės kokybės faktoriais, kurie buvo net tris kartus didesni nei to pačio EBL proceso metu pagamintų standartinių mikrožiedinių darinių. Tačiau dauguma rezonansų pasireiškė kaip dupletai, kurių tiksli prigimtis buvo nustatyta pasitelkiant FDTD simuliacijas. Skaitmeniškai apskaičiuoti ekvivalentiškų darinių pralaidumo spektrai taipogi pasižymėjo siauromis rezonansinėmis linijomis bei modų skilimu stipriausiai pasireiškiančiu trumpabangėje charakteristikos dalyje. Skirtingų rezonansinių dupletinių modų erdviniai elektromagnetinės spinduliuotės intensyvumo skirstiniai buvo panašūs, tačiau turėjo fazės poslinkius vienas kito atžvilgiu. Savo ruožtu tai patvirtino hipotezę, kad rezonansas skyla dėl konstruktyviai inter-



Pav. 2.4: Apskritinėmis Bragg gardelėmis modifikuotų mikrožiedinių rezonatorių veikimo eksperimentinis tyrimas. Pralaidumo spektrai atitinka skirtingo spindulio  $r$  cilindrinės įpjovos turinčius SOI mikrožiedinius rezonatorius, pavaizduotus dšinėje pusėje esančiose SEM nuotraukose.

feruojančios atgal nuo elementų sienelių atspindėtos spinduliuotės, ko rezultatas yra dvi priešingomis kryptimis mikrožiediu cirkuliuojančios modos. Taipogi, šis rezultatas parodo kad skilimo potencialiai galima išvengti dar labiau sumažinant trikampių komponentų skersinius matmenis, tuo būdu griežčiau laikantis subbangiškumo sąlygos.

Bragg gardele modifikuoti mikrožiediniai rezonatoriai padeda išspręsti kitą tokios prigimties optinių jutiklių problemą susijusią su ribotu mažiau nei 20 nm spektriniu atstumu tarp gretimų modų, kuris aprėžia analitiškai svarbių junginių koncentracijų vienareikšmiško nustatymo ribas. Žiedinių struktūrų perturbacija antriniu rezonansiniu dariniu įgalino realizuoti modų filtravimą, kuomet vienas difrakcijos sąlyga atrinktas sužadainimas tampa išskirtinis visų kitų rezonansų atžvilgiu. Taigi, aplinkos lūžio rodiklio pokyčių sąlygoti spektriniai poslinkiai gali būti vienareikšmiškai aptinkami esant žymiai didesnėms analičių koncentracijų kitimo riboms.

Šiame darbe mikrožiedinių modų filtravimo funkcionalumas buvo įgyvendintas didelės skyros EBL būdu suformuojant azimutiškai išdėliotas seklias cilindrinės įpjovos, kaip iliustruota SEM vaizdais Paveiksle 2.4. Įpjovos buvo periodiškai suformuotos  $m = 2$  Bragg kon-

figūracijoje:

$$m\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad (2.3)$$

kur  $\Lambda$  yra atsikartojimo periodas,  $n_{eff}$  efektyvus kompleksinis lūžio rodiklis, o  $\lambda_B$  yra rezonansinis bangos ilgis. Įpjovų gylis buvo keičiamas 10 nm žingsniais nuo  $r = 50$  nm iki 140 nm visus kitus struktūros parametrus palaikant vienodus.

Eksperimentiniai pralaidumo spektrinių matavimų duomenys pateikti kairėje Paveikslo 2.4 pusėje atskleidžia esminius procesus vykstančius didėjant gardelės sąlygotai žiedinių modų perturbacijai. Bragg gardelė sukelia rezonansinės modos skilimą, kadangi atspindžiai nuo periodiškai išdėstytų sklaidančių darinių gali interferuoti konstruktyviai ir suformuoti priešinga kryptimi sklindančią modą. Didinant įpjovų gylį nuo 60 nm iki 80 nm žemesniosios energijos skilusi moda įgyja didesnę kokybės faktorių nei visi kiti sužadainimai, o mažesnio intensyvumo trumpabangis rezonansas yra stipriai slopinamas. Skilusių modų asimetrinis atsakas į perturbacijų gylį yra paaiškinamas normalia ir anomalia dispersijomis [21], kurios atitinkamai veikia žemesniosios ir aukštesniosios energijos rezonansus, atsirandančiomis skirtingose Bragg gardelės sąlygoto pseudo-draustinio fotoninių juostų tarpo pusėse [22]. Kuomet įpjovos padaromos dar gilesnės sklaida pirmiausia eliminuoja Bragg sąlygos neatitinkančias modas ir, galiausiai, nuslopinamas filtravimo operacija atrinktas rezonansas.

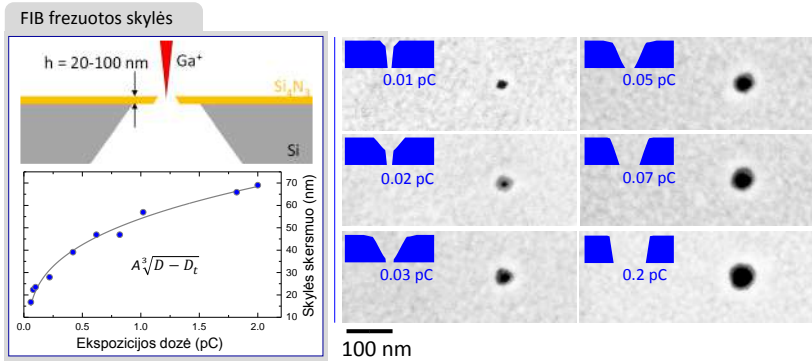
FDTD skaičiavimai buvo naudoti atskleidžiant erdvinį skilusio sužadainimo dupletu intensyvumo skirstinį, ir parodė, kad žemesniosios energijos rezonansas sklinda optiškai tankiame Si, o trumpesnio bangos ilgio slopinamoji moda randama lokalizuota aplink įpjovas mažesnio lūžio rodiklio terpėje. Geras sutapimas tarp teorinių ir eksperimentinių rezultatų rodo, kad EBL pajėgumai buvo pakankami suformuoti mikrožiedinius rezonatorius su tiksliai parinktais nanomatmenų struktūrų parametrais, leidusiais įgyvendinti konkretaus rezonanso kokybės padidinimą, efektyvų visų kitų modų filtravimą, bei modų skilimo pašalinimą.

### 3 GAMYBA FOKUSUOTŲ JONŲ PLUOŠTAIS

Šioje dalyje aptariami keletas FIB litografijos taikymo pavyzdžių, kurie remiasi unikaliais šios metodikos privalumais ir atsižvelgia į esminius technologinius apribojimus. Svarbiausias trūkumas yra nedidelė frezavimo sparta, kuri verčia FIB naudoti kontekstuose kur nedidelis kiekis pašalintos medžiagos lemia didelį savybių kontrastą. Pirmasis skyrius detalizuoja bene paprasčiausio jonų pluošto frezavimu sukurti įmanomo prietaiso – pavienės  $\sim 10$  nm skersmens nanoporos  $\text{Si}_3\text{N}_4$  nanomembranoje – gamybą. Nepaisant šio paprastumo, nanoporos gali būti taikomos sudėtingiems makromolekulinių darinių detekcijos uždaviniams atlikti. Antrajame ir trečiame skyriuose aprašyta dvimačių plonasluoksnių subbanginių metalinių darinių, galinčių įvairiais būdais manipuluoti šviesos sklidimo pobūdį, FIB gamyba. Gardelinio pavidalo poliarizatoriumi frezavimas aiškiai iliustruoja jonų pluošto litografijos skyros galimybes bei atskleidžia sunkumus kylančius dėl ribotų rašymo lauko matmenų. Šio pobūdžio gardelės buvo panaudotos kalibruojant poliarizacijos kryptis selektyvios sugerties reiškinii pagrįstos vidutinės IR srities mikrospektroskopijos metodikas. Galiausiai pateikiamas įmantrių difrakcinių mikrooptinių elementų gamybos ant lazeriu polimerizuotų refraktyvių dielektrinių darinių aprašas, parodantis kaip didelis jonų pluošto fokusavimo gylis gali būti pritaikytas kuriant nanomatmenų darinius ant neplokštuminės topologijos paviršių.

#### 3.1 Valdomo skersmens kieto kūno nanoporos

Šiame skyriuje aprašomas darbas, atliktas bendradarbiaujant su Portugalijos kompanija "Nanopore Solutions Lda", kurio eigoje fokusuotu jonų pluoštu buvo atliktas kontroliuojamas 10 nm skersmens nanoporų gręžimas 10 – 30 nm storio  $\text{Si}_3\text{N}_4$  membranose [23]. Suformuotos angos dydis bei forma priklausė tiek nuo jonų dozės tiek ir nuo jų pluošto radialinio intensyvumo skirstinio, kuris buvo įvertintas SEM bei TEM metodais. Skenavimas elektronų pluoštu buvo identifiukuotas kaip vienas iš būdų papildomai keisti nanoporos diametrą. Be to, šis mechanizmas suteikia galimybę redaguoti ir sudėtingesnius FIB frezavimu



Pav. 3.1: Jonų apšvitos dozės įtaka gręžiant nanoporas. Viršutiniame kairiame kampe pateikta supaprastinta  $\text{Si}_3\text{N}_4$  membranos FIB frezavimo schema. Žemiau yra pavaizduota nanoporos skersmens priklausoma nuo  $\text{Ga}^+$  jonų dozės. Dešinėje yra nanoporų išgręžtų naudojant skirtingas jonų dozes SEM atvaizdai, atskleidžiantys kaip pluošto intensyvumo skirstinys perduodamas į 20 nm storio  $\text{Si}_3\text{N}_4$  membraną.

membranose išpjautus darinius.

Paveikslas 3.1 pateikia supaprastintą komerciškai įsigytos  $\text{Si}_3\text{N}_4$  membranos [24] ir tiesioginio nanoporų gręžimo joje  $\text{Ga}^+$  jonais schemą. Mažiausio įmanomo skersmens angų sukūrimas reikalauja kaip galima stipriau fokusuoto jonų pluošto, o tai, savo ruožtu, galima pasiekti tik tuomet kai įkrautų dalelių srovės yra mažos. Šiame darbe naudotoje Raith ionLINE FIB litografijos sistemoje didžiausios skylės frezavimas atliekamas naudojant keletos pikoamperų eilės jonų srautus.

Jonų apšvita, reikalinga prasiskverbti pro membranas, buvo įvertinta empiriškai eksponuojant dozių matricą, kur kiekvienas taškas atitinka skirtingą frezavimo trukmę. Nanoporos suformavimui reikalinga dozė priklauso nuo membranos storio – 10 nm membranai pramušti reikėjo  $\approx 0.01$  pC jonų dozės, 20 nm  $\text{Si}_3\text{N}_4$  sluoksnis buvo pragręžtas esant  $\approx 0.02$  pC vertei, o 30 nm gylis buvo pasiektas su  $\approx 0.06$  pC doze. Visais atvejais frezavimas truko keletą milisekundžių. Be to, kaip pavaizduota dešinėje Paveikslo 3.1 pusėje, išgręžtos skylės skersmuo ir pavidalas taipogi kinta priklausomai nuo naudotos jonų dozės. Jonų pluoštas ties židiniu susideda iš apytiksliai trijų sričių: didelio intensyvumo  $\approx 9$  nm



FWHM centrinės Gausinės dalies, silpnescio antrinio  $\approx 40$  nm FWHM Gausinio komponento, ir vos pastebimą poveikį turinčio periferinio eksponentiškai gėstančio išsklaidytų jonų fono [25, 26]. Šių komponentų radialiniai skirstiniai frezavimo metu palaiptniui perduodami į membraną ir apsprendžia nanoporų formą, bei sąlygoja  $d \sim (D - D_t)^{1/3}$  jų skersmens priklausą nuo dozės.

Papildomas nanoporų skersmenų sumažinimas yra įmanomas iteratyviai skenuojant jas fokusuotu 5 keV elektronų pluoštu įprasto SEM vaizdinimo eigoje. Tikėtina, kad ertmės susitraukia dėl elektronų apšvitos sąlygoto vakuuminėje kameroje esančių angliavandenilių nusodinimo [27, 28]. Šis procesas taipogi gali būti naudojamas sudėtingesniems membranose išfrezuotiems raštams redaguoti. Kita vertus, anglies nusodinimo pagrindu atlikti pakeitimai gali neturėti stabilumo kurio paprastai tikimasi iš kieto kūno nanoporinių darinių.

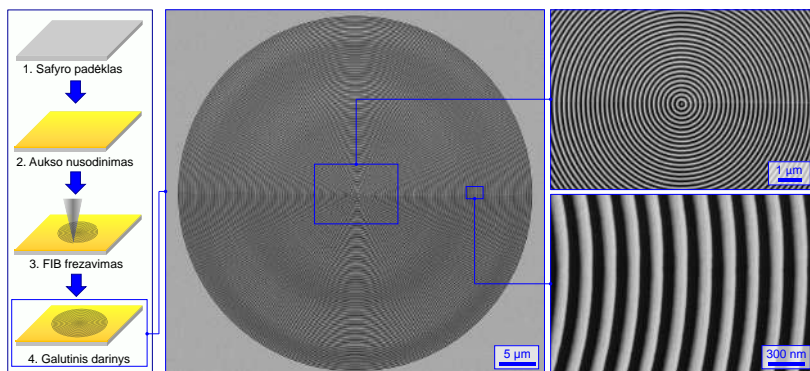
Detalų FIB išgręžtų nanoporų charakterizavimą atliko "Nanopore Solutions Lda" firmoje dirbantys specialistai. TEM vaizdinimas parodė, kad tikslus 20 nm storio  $\text{Si}_3\text{N}_4$  membranose suformuotų apskritų porų vidutinis skersmuo buvo 12.9 nm. Pirminė šiame darbe gamintų nanoporų paskirtis yra susijusi su jų taikymu kaip mažo pralaidumo barjeras elektrocheminėje celėje, įgalinančiu pagal joninės srovės pokyčių pobūdį aptikti makromolekulių translokacijos per nanomatmenų skylę įvykius [29]. Molekulinė detekcija buvo realizuota elektrocheminėje celėje su pH 8.0 1 M KCl ir 10 mM HEPES buferiniu tirpalu, atraminio elektrodo pusėje pridėjus 48.5kb phage lambda DNR molekulių, kurios pro nanoporos ertmę buvo traukiamos +200 mV potencialu. DNR translokacijos metu  $\text{K}^+$  ir  $\text{Cl}^-$  jonų srautai yra prislopinami, kas pasireiškia kaip vidutiniškai 2  $\mu\text{s}$  trukmės srovės sumažėjimai. FIB metodu pagamintos kieto kūno nanoporos ultraplonoje  $\text{Si}_3\text{N}_4$  membranose pasižymėjo geru elektriniu bei mechaniniu stabilumu, kas patvirtina jų tinkamumą pavienių makromolekulių detekcijos funkcijoms atlikti.

### 3.2 Optinių poliarizatorių FIB frezavimas

Šiame skyriuje aprašomas darbas, atliktas bendradarbiaujant su prof. Junko Morikawa vadovaujama Tokyo Institute of Technology dirbančia tyrėjų grupe, kuriame FIB litografija buvo naudojama 200 nm periodo ir 0,5 užpildos faktoriaus plonasluoksnio Au poliarizatorių gardelėms ant

30  $\mu\text{m}$  safyro padėklų sukurti. Šie bandiniai pasižymėjo stipriu TE spinduliuotės atspindžiu ir dideliu pralaidumu TM poliarizacijai, taigi buvo panaudoti molekulinė ryšių orientacijos reiškinė vizualizacijos poliarizuotos vidutinės IR srities mikrospektroskopijos metodais paremto algoritmo kalibravimui atlikti [30]. Spektroskopijos matavimai buvo atlikti Australijos sinchrotrono infraraudonosios mikrospektroskopijos laboratorijoje.

Paveikslas 3.2 iliustruoja tiesmuką FIB frezavimo procesą, naudotą sukuriant pageidaujamas gardeles aukso sluoksnyje ant trapeaus plono padėklo, sudėtingai suderinamo su įprastais rezistus naudojančiomis litografijos metodikomis. Pirmiausia, safyro padėklas buvo magnetroniškai padengtas 5 nm adhezinio Cr ir 100 nm storio aukso sluoksniais, naudojant AXXIS PVD įrenginį (Kurt J. Lesker). Gardelių įrėžimas tiek koncentrine tiek ir tiesine konfiguracijomis buvo atliktas naudojant Raith ionLINE Plus 35 kV įtampa greitinamus  $\text{Ga}^+$  jonus, sufokusuotus į 45 nm skersmens dėmelę ant bandinio paviršiaus. Dešinėje Paveikslo 3.2 pusėje pavaizduoti 200 nm periodo ir 50  $\mu\text{m}$  skersmens ap-



Pav. 3.2: Koncentriniai poliarizatoriai suformuoti iš FIB litografijos metodais pagamintų 200 nm periodo ir 0,5 užpildos faktoriaus Au gardelių. Procesas atliktas naudojant 30  $\mu\text{m}$  storio safyro padėklą, magnetroniškai padengtą 100 nm storio Au sluoksniu, tiesiog frezuojant raštą  $\text{Ga}^+$  pluoštu. Dešinėje pusėje pateikiamos 50  $\mu\text{m}$  skersmens koncentrinės gardelės SEM atvaizdai.

skritiminės gardelės SEM atvaizdai. Nors jonų pluošto skenavimo sritis dėl techninių apribojimų yra tik  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ , buvo išfrezuotos gardelės su skersmenimis iki  $250 \mu\text{m}$ , tačiau šiuo atveju dėl pozicionavimo netikslumų nepavyko išvengti iki  $100 \text{ nm}$  eilės lygiavimo defektų.

FIB išfrezuotų poliarizatorių darinių pirminė paskirtis buvo patikrinti adekvatumą keturių poliarizacijos kampų metodo [31], skirto vizualizuoti vidutinę molekulinį ryšių orientaciją hiperspektrinio vaizdinimo vidutinių IR bangų ilgiu diapazone būdu. Poliarizuotos spinduliuotės molekulinę sugertį  $A$  galima išreikšti per dipolinio šuolio momento  $\mathbf{M}$  ir poliarizacijos vektoriaus  $\mathbf{p}$  skaliarinę sandaugą:

$$A \propto (\mathbf{p} \cdot \mathbf{M})^2 = (pM \cos \mu)^2, \quad (3.1)$$

kur  $\mu$  yra kampas tarp dviejų minėtų vektorių. Esant sugerties anizotropijai jos santykinį dydį bei kryptingumą galima atkurti remiantis mažiausiai keturiais sugerties vaizdinimo duomenų rinkiniais, išmatuotais naudojant  $\pi/4$  vienas kito atžvilgiu pasuktos poliarizacijos žadinančios spinduliuotės pluoštus [30]. Spektroskopijos eksperimentiniai matavimai buvo atlikti Australijos sinchrotrono infraraudonosios mikrospektroskopijos laboratorijoje, naudojant pralaidumo režime veikiančią  $4.1 \mu\text{m}$  skyros Hyperion 2000 infraraudonosios srities mikroskopą, prijungtą prie Vertex V80v FT-IR spektrometro (Bruker Corp.).

Spektroskopinis FIB darinių charakterizavimas parodė, kad subbanginių matmenų komponentų dėka, poliarizuotos spinduliuotės pralaidumas pasižymi silpna prieklausa nuo bangos ilgio ir išlieka daugmaž pastovus bangos skaičių ruože nuo  $4000 \text{ cm}^{-1}$  iki  $1000 \text{ cm}^{-1}$ . Taipogi, kaip įprasta metalinių gardelių poliarizatoriams, didžiausias iki 80% pralaidumas užfiksuotas spinduliuotei, kurios elektrinio vektoriaus komponentė buvo orientuota skersai lokaliai gardelės režių kryptims, o liestinės kryptimi poliarizuota spinduliuotė buvo beveik visiškai atspindima. Visame vidutinių IR bangų ilgių ruože šių ortogonalų poliarizacijų ekstinkcijos santykis buvo  $T_{\text{max}}/T_{\text{min}} \approx 150$ .

Keturių poliarizacijų metodo būdu iš IR spektroskopinio vaizdinimo duomenų atkurti poliarizacinių gardelių orientaciniai skirstiniai pilnai atitiko numatytus pagal gamybos metu užduotą geometriją. Be to šis orientacinės anizotropijos matavimo algoritmas buvo panaudotas tiriant ir molekulinį struktūrą, tokių kaip poli-hidroksibutyrate (PHB) ir

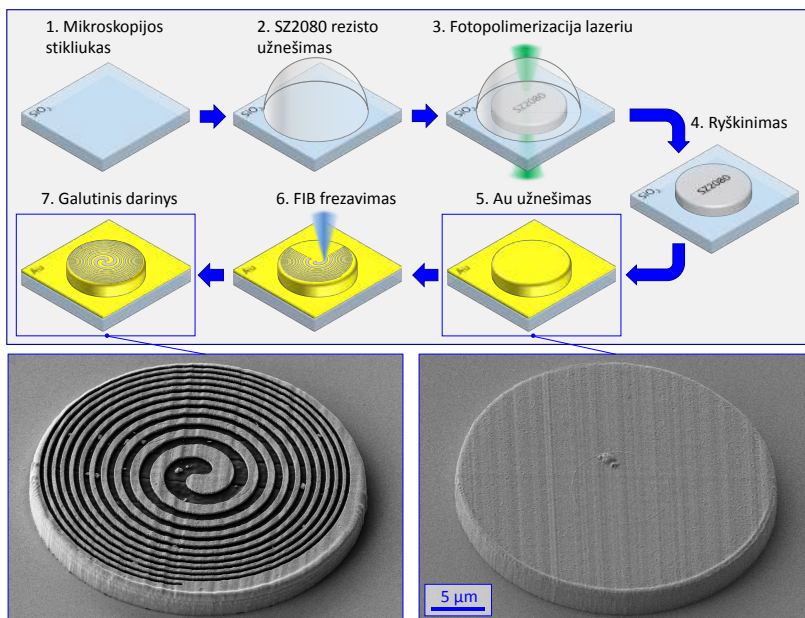
poli-L-laktinė rūgštis (PLLA) sferulitų darinius [32], bei natūralaus šilko skaidulas [30]. Taigi, subbanginiu tikslumu pasižyminti FIB litografija ploname metalo sluoksnyje įgalina sukurti mikroskopinio ploto darinius, atliekančius poliarizatoriaus funkciją, kuri šiuo atveju buvo sėkmingai pritaikyta vienareikšmiams sudėtingų spektroskopinių metodikų kalibraciniams matavimams atlikti.

### 3.3 Lenkti mikrooptiniai spiralinių zonų dariniai

Šiame skyriuje aprašomas darbas, atliktas bendradarbiaujant su dr. Mangirdo Malinausko vadovaujama Vilniaus Universitete dirbančia tyrėjų grupe, bei su prof. Etienne Brasselet komanda University of Bordeaux, kuriame kombinuojant adityvią lazerinę fotopolimerizaciją ir atimtinę FIB frezavimo litografiją buvo sukurti hibridiniai dielektriniai/metaliniai mikrooptiniai elementai, sujungiantys difrakcinius bei refrakcinius funkcionalumus [33, 34]. Konkretus šio principo pavyzdys yra ant skirtingo paviršiaus kreivumo dielektrinių topologijų FIB suformuoti stipriai sufokusuotus  $\ell = 1, 2$  topologinio krūvio optinius sūkurius generuojantys spiralinių zonų dariniai. FDTD skaičiavimai ir optinio pralaidumo vaizdinimas buvo naudoti siekiant įvertinti skirtingų 2D metalinių ir 3D dielektrinių subkomponentų indėlius į suminį optinį atsaką. Eksperimentinių matavimų ir teorinių skaičiavimų rezultatai rodo, kad adityvus trimatis lazerinis rašymas, jį sukombinavus su nanoskyla pasižyminčiu FIB frezavimu, gali būti naudojamas sukuriant topologiškai sudėtingo pobūdžio optinius metapaviršius.

Gamybos procesas, naudotas sukuriant hibridinius SZP mikrooptinius elementus, yra iliustruojamas Paveiksle 3.4. Pirmoji jo stadija susijusi su dielektrinių pjedestalų suformavimu ant stiklinio padėklo iš SZ2080 neigiamo tono neorganinio rezisto lazerinio fotopolimerizavimo būdu. Tai buvo atlikta naudojant PHAROS Yb:KGW 300 fs impulsų trukmės lazerį, veikiantį antrosios  $\lambda = 515$  nm harmonikos režime su 200 kHz atsikartojimo dažniu. Po lazerinės ekspozicijos, latentiniai dariniai buvo išryškinti MIBK tirpiklyje. Šiuo būdu pagaminti 15  $\mu\text{m}$  skersmens 3D dielektriniai pjedestalai buvo dviejų tipų: plokšti 3  $\mu\text{m}$  diskai ir  $165^\circ$  viršūnės kampo kūginiai aksikonai. Subbanginės skyros FIB frezavimo stadija prasideda aksikono paviršių magnetroninio nusodinimo būdu AXXIS PVD sistema (Kurt J. Lesker)

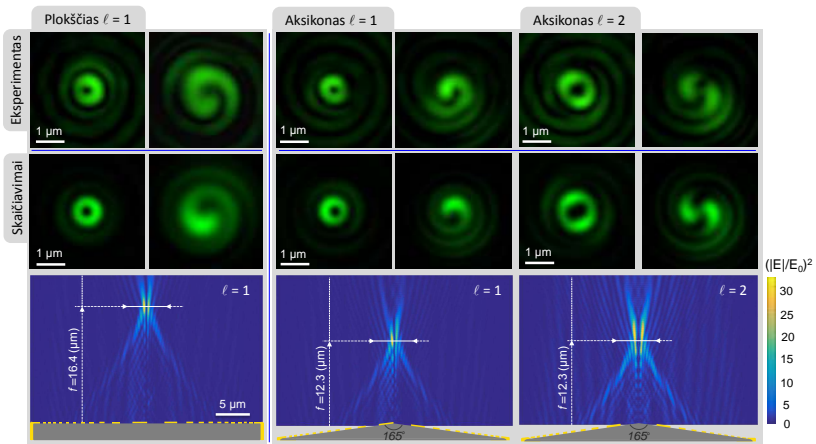
konformaliai padengus optiškai nepralaidžiu 200 nm storio aukso sluoksniu, kaip tai pavaizduota apatiniame dešiniame Paveikslo 3.4 kampe pateiktoje SEM nuotraukoje. Galiausiai, difrakciniai SZP dariniai buvo išpjauti aukso sluoksnyje fokusuotu 35 kV įtampa pagreintų  $\text{Ga}^+$  jonų pluoštu tiesiogiai pašalinant medžiagas, naudojant Raith ionLINE Plus litografijos įrenginį. Jonų srovė buvo 40 pA, pluošto skersmuo ant bandinio paviršiaus buvo apytiksliai 25 nm, o siekiant išvengti redepozicijos reiškinių, frezavimas buvo atliktas per  $10^4$  skenavimo ciklų. Svarbu paminėti, kad didelis FIB fokusavimo nuoto-



Pav. 3.3: Lazerine fotopolimerizacija ir FIB frezavimu paremta lenktų SZP darinių gamyba. Mikromatmenų dielektriniai pjestalai buvo suformuoti tiesioginiu lazeriniu rašymu iš SZ2080 rezisto. Dariniai buvo padengti 200 nm storio konformalium Au sluoksniu. Nanoskyros difrakcinės struktūros buvo išfrezuotos naudojant FIB. SEM nuotraukos vaizduoja disko pavidalo pjestalus prieš ir po FIB frezavimo. Polimerizacija atliko Vilniaus Universitete dirbanti dr. Mangirdo Malinausko vadovaujama tyrėjų grupė.

lis leido binarinio pralaidumo darinius iki mažiausių 200 nm pločio rėžių periferinių komponentų suformuoti dideliu tikslumu, nepaisant apdirbamų pjedestalų 3  $\mu\text{m}$  aukščio variacijų. Analogiški spiralinių zonų dariniai naudojant tokius pačius frezavimo parametrus buvo parngti ir ant plokščio stiklo paviršiaus, praleidžiant lazerinės polimerizacijos žingsnį.

Šviesos bangos fronto formavimo funkcionalumą atliekantys difrakciniai spiralinių zonų raštai atitinka azimutinį fazės kitimą suformuojančios šakotos gardelės ir fokusuojančio Frenelio lęšio matematinę konvoliuciją [35]. Struktūros topologinio krūvio rodiklis  $\ell = 1, 2$  atspindi spiralinių vijų skaičių ir pralaidume sugeneruoto optinio sūkuriu eilę. Detalus tyrimas kaip SZP dariniai keičia monochromatinės  $\lambda = 532 \text{ nm}$



Pav. 3.4: Pluošto formavimas SZP gardelėmis, pagamintomis ant fotopolimerizuotų 3D padėklų. Apatinėje iliustracijos dalyje pavaizduoti FDTD būdu  $x$ - $z$  plokštumoje suskaičiuoti  $\lambda = 532 \text{ nm}$  spinduliuotės intensyvumo skirstiniai, difragavę per  $\ell = 1$  ir  $\ell = 2$  gardeles ant  $165^\circ$  viršūnės kampo aksikono, bei pro  $\ell = 1$  darinį ant plokščio pjedestalo. Viršutinė iliustracijos dalis pateikia  $x$ - $y$  plokštumoje FDTD apskaičiuotus ir eksperimentiškai pamatuotus  $3 \times 3 \mu\text{m}^2$  židinio srities intensyvumo bei interferencijos skirstinius. Optinį charakterizavimą atliko prof. Etienne Brasselet grupė, dirbanti University of Bordeaux.

bangos ilgio spinduliuotės sklidimą buvo atliktas skaitmeninių FDTD simuliacijų būdu, o jų rezultatų 3D dariniams suvestinė yra pateikta Paveiksle 3.4. Nepriklausomai nuo naudojamo dielektrinio pjedestalo pobūdžio, visais atvejais spiralinių zonų struktūros turi mažesniu nei  $f = 18 \mu\text{m}$  atstumu nuo binarinės kaukės paviršiaus esančius židinio nuotolius, kas apytiksliai atitinka  $NA \approx 0.67$  skaitinę apertūrą. Ties židinio plokštuma suskaičiuoti šviesos intensyvumo skirstiniai yra apskritiminio Lagero ir Gauso pluošto pavidalo, su nuliniu intensyvumu centrinėje dalyje, o jų skersmuo yra arti difrakcinės ribos. Be to, interferogramos su koherentine Gausinio pluošto spinduliuote atskleidžia topologinį  $\ell = 1, 2$  krūvį atitinkančius spiralinius fazės skirstinius, kas identifikuoja optinio sūkurio susiformavimą.

Eksperimentinis spiralinių zonų darinių charakterizavimas buvo atliktas iš stiklinio padėklo pusės į pagamintus darinius šviečiant  $\lambda = 532 \text{ nm}$  bangos ilgio nuolatinės veikos lazeriu, o praleistą spinduliuotę surenkant  $100\times$  didinimo ir  $NA = 0.8$  skaitinės apertūros mikroskopo objektyvu. Kaip pavaizduota viršutinėje Paveikslo 3.4 dalyje, egzistuoja geras sutapimas tarp židinio srityje FDTD apskaičiuotų ir eksperimentiškai išmatuotų intensyvumo skirstinių bei interferogramų. Abiem atvejais FWHM pluošto skersmuo ties židiniu buvo  $\approx 1.4 \mu\text{m}$  ir  $\approx 2.1 \mu\text{m}$  atitinkamai  $\ell = 1$  ir  $\ell = 2$  spiralinėms gardelėms. Esminis skirtumas tarp SZP darinių, suformuotų ant plokščių ir aksikoninių dielektrinių pjedestalų, yra sąlygotas pastarosios struktūros laužiamosios gebos, kuri prisideda prie Frenelio lęšio fokusavimo pajėgumų. Aksikonas su  $165^\circ$  viršūnės kampu padidina struktūros skaitinę apertūrą nuo  $NA \approx 0.64$  iki  $NA \approx 0.76$ . Taigi, lazeriu supolimerizuoti dielektriniai komponentai yra itin naudingi kuriant didelės laužiamosios gebos mikrooptinius elementus, kuriems analogišką difrakciniais komponentais įgyvendintą skaitinę apertūrą būtų galima pasiekti tik frezuojant mažesnius nei  $100 \text{ nm}$  eilės darinius. Apibendrinant, sparti trimatė lazerinė polimerizacija gerai papildo subbanginės skyros frezavimo jonų pluoštu metodiką, ir įgalina sukurti pageidaujamo bangos fronto šviesos spindulius, kurie papildomai gali būti valdomi iš nanomatmenų komponentų suformuotais metapaviršiais.

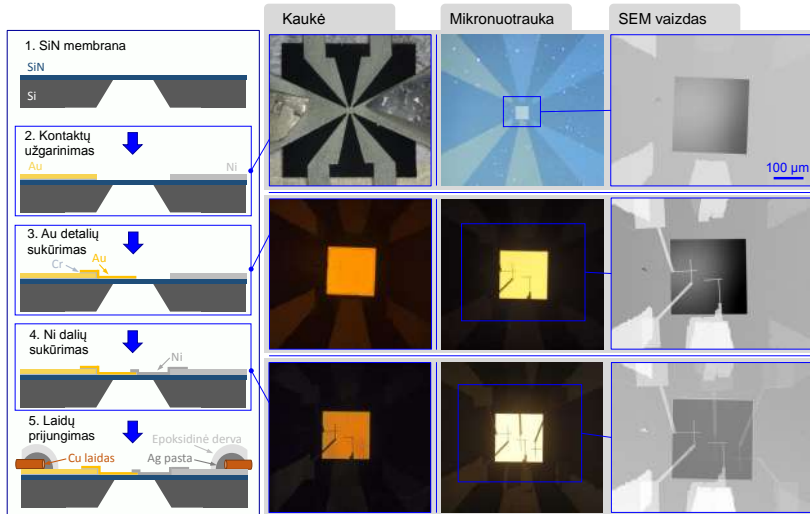
## 4 FUNKCINIAI PRIETAISAI IŠ SLUOKSNIUOTŲ METALŲ

Šioje dalyje aprašoma gamyba nanomatmenų prietaisų, kurių veikimas bei funkcionalumai esmine dalimi yra nulemti tam tikrų metalų ar jų sandūrų fizikinių savybių. Pirmasis skyrius apibūdina jautrių spartaus veikimo Au/Ni termoporų EBL gamybą ant 30 nm storio membranos paviršiaus. Antras skyrius detalizuoja Pd/Au pagrindu sudarytų lydinių bei sluoksniuotų darinių, suformuotų magnetroninio plonų sluoksnių padengimo metodais, taikymus H<sub>2</sub> dujų optinės detekcijos reikmėms. Taipogi aprašomos galimybės panašius funkcionalumus įgyvendinti vidutinių IR bangos ilgių srityje optinės litografijos būdais struktūrizuojant Pd sluoksnius taip, kad metaliniai elementai palaikytų rezonansines plazmonines modas minėtame elektromagnetinės spinduliuotės dažnių diapazone. Šis darbas tiesiogiai veda į trečiame skyriuje pateiktą metalo-dielektriko-metalo sluoksnių pagrindu sudarytų plazmoninių sugėriklių metapaviršių aprašymą, kuriame diskutuojami jų gamybos žingsniai, simuliacijų skaičiavimai, bei eksperimentiniai IR bangų ekstinkcijos spektrai, ypatingą dėmesį skiriant kaip naudojamų metalinių bei dielektrinių medžiagų pasirinkimai įtakoja darinių fotoninį atsaką. Galiausiai apibūdinamas alternuojančių Co/Pd magnetinių sluoksnių EBL apdirbimas siekiant sukurti didelio 1 mm<sup>2</sup> ploto dvi-mates submikroninio 700 nm periodiškumo ultrašaltų <sup>87</sup>Rb atomų pagavimo gardeles, kuriose pirmą kartą pademonstruota atomų debesėlio lokalizacija 100 nm atstumu nuo lusto paviršiaus.

### 4.1 Mikrotermopora ant nanomembranos

Šiame skyriuje aprašomas darbas, atliktas bendradarbiaujant su prof. Junko Morikawa vadovaujama Tokyo Institute of Technology dirbančia tyrėjų grupe, kuriame EBL metodu ant 30 nm storio Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> membranos buvo suformuotas 2.5 μm pločio Au/Ni sandūros termoporis jutiklis [36]. Itin plonas padėklas padėjo išvengti šilumos nuotėkio ir sąlygojo didelį prietaiso jautrumą, leidusį aptikti nedidelius IR lazerio bei elektronų pluošto apšvitos sukeltus temperatūros pokyčius. Be to,





Pav. 4.1: Au/Ni mikrotermoporos ant 30 nm storio  $\text{Si}_3\text{N}_4$  membranos EBL gamyba. Schema kairėje pusėje iliustruoja naudotą gamybos procesą, o žingsnius atitinkantys optiniai ir SEM vaizdai pateikti dešinėje. Pirmiausia, didelio ploto periferiniai Au ir Ni kontaktai yra termiškai užgarinami pro lazeriu išpjautą kaukę. Skirtingų metalų termoporos komponentai bei kalibraciniai rezistoriai po to yra suformuojami naudojant dvi atskiras EBL ekspozicijas, metalizacijos ir rezisto pašalinimo procedūras.

maža nanomatmenų storio darinių šiluminė talpa lėmė spartų termoelektrovaros signalo atsaką net kuomet  $\Delta T = 2$  K paviršiaus temperatūros pokyčius atitinkantis kaitinimas buvo moduluojamas 10 kHz dažniu.

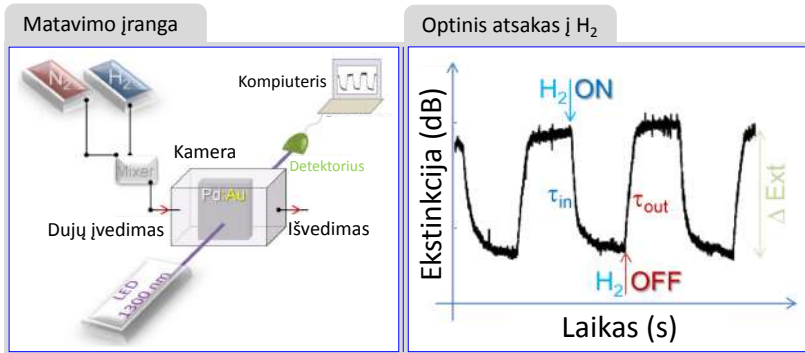
Mikrotermoporos gamybos ant ultraplonos iš komercinio tiekėjo (Norcada Ltd.) išigytos  $250 \times 250 \mu\text{m}^2$  paviršiaus ploto membranos schema yra pateikta Paveiksle 4.1 ir pirmiausia prasideda nuo makroskopinių periferinių metalinių kontaktų, skirtų mikroskopinių jutiklių susieti su elektrinių matavimų įranga, sukūrimo. Tai buvo atlikta dešimčių kvadratinų milimetru ploto metalinius darinius termiškai užgarinant pro lazeriu išpjautą metalo folijos kaukę, atskirai iš 10 nm adhezinio Cr ir 90 nm storio Au, bei savaime gera adhezija pasižyminčio 100 nm storio Ni sluoksnių suformuojant atitinkamoms sandūroms

skirtus kontaktus. Priderintų metalų kontaktai padeda abi atskaitines termoporos sandūras lokalizuoti kuo toliau nuo membranos srities.

Mikroskopinė termoporos sandūra ir tokios pačios geometrijos vienmetalčiai rezistoriai buvo suformuoti per du atskirus EBL procesus, pirma sukuriant Au komponentus, o po to uždariant elektrinę grandinę Ni dalimi. Kiekvienu atveju ant membranos lusto sukamuojų padengimu buvo užneštas 300 nm storio ZEP520A teigiamo tono rezistas (ZEON Corporation), o ekspozicija buvo atlikta naudojant paprasto ACE-7000/EBU (Sanyu Electron Ltd.) SEM pagrindu realizuota sąlyginai nedidelės 100 nm skyros 25 kV EBL sistemą. Ryškinimas buvo atliktas n-amyl acetate, o 50 nm storio metalo sluoksniai buvo užnešti magnetroniškai. Vaizdai apatinėje dešinėje Paveikslė 4.1 dalyje pavaizduoja metalo darinius po rezisto pašalinimo 60 °C temperatūros dimetilacetamide sukūrus aukso ir, galiausiai, nikelio struktūras. Periferinės kontaktų sritys sidabro pasta buvo sujungtos su variniais laideliais, o šios sąlyčio sritys buvo papildomai sutvirtintos epoksidine derva. Analogiškas gamybos procesas buvo naudotas sukuriant tokio pat pobūdžio termoporų darinius ant storo stiklinio padėklo.

Pagamintos Au/Ni termoporos sandūros plotas buvo 6.25  $\mu\text{m}^2$ , o prietaiso varža buvo apie 500  $\Omega$ . Palyginimui, ekvivalentiškas vien iš aukso pagamintas darinys turėjo 90  $\Omega$  varžą. Jutiklio atsakas į šiluminį poveikį buvo charakterizuojamas naudojant kaitinimą  $\lambda = 830$  nm bangos ilgio nuolatinės veikos lazerine, bei fokusuoto elektronų pluošto spinduliuotėmis. Abiem atvejais apšvita buvo periodiškai moduluojama, o termoelektrinis signalas buvo matuojamas sinchroniniu stiprintuvu. Membranos paviršiaus temperatūriniai pokyčiai buvo įvertinti remiantis literatūroje pateikta Sebeko koeficiento verte  $S_{\text{Au/Ni}} = 10.1 \mu\text{VK}^{-1}$  [37].

Kvazinuostovus kaitinimas infraraudonąja spinduliuote moduluojama nedideliu 30 Hz dažniu atskleidė, kad ant mažos šiluminės talpos 30 nm storio membranos suformuotos termoporos pasižymi 34,5 kartus didesniu jautrumu nei analogiški dariniai ant  $\sim 1$  mm stiklinio padėklo. Be to, dvimačio prietaiso atsako sparta taipogi buvo ženkliai didesnė, kadangi jo pagalba pavyko aptikti net  $f = 10$  kHz dažniu moduluotos spinduliuotės inicijuotus  $\Delta T \approx 2$  K temperatūros pokyčius, kai toks



Pav. 4.2:  $H_2$  absorbcijos sąlygotų metalų optinių savybių pokyčių matavimai. Kairėje pavaizduotas spinduliuotės pralaidumo matavimo standas, kur plonų metalo sluoksnių dariniai yra patalpunami kontroliuojamos sudėties dujų kameroje. Dešinėje pusėje atidėtos hidrogenizacijos sąlygotų optinės ekstinkcijos pokyčių  $\Delta Ext = -10\lg(I_t/I_0)$  kinetikos, kur  $I_t$  ir  $I_0$  atitinkamai yra pro metalo sluoksnį bei tuščią dujų kamerą prasklidusios spinduliuotės intensyvumai. Vandenilio optinės detekcijos matavimus atliko asoc. prof. Yoshiaki Nishijima vadovaujamos grupės nariai, dirbantys Yokohama National University.

pat metalinis darinys ant stiklo paviršiaus nepasiekė stacionarios temperatūros esant  $f = 2$  kHz apšvitos dažniui. Kita vertus, kaitinimą elektronų pluoštu pavyko registruoti tik naudojant ant membranos suformuotą plonasluoksnę termoporą. SEM sistemos teikiama didelė erdvinė skyra buvo panaudota detaliau skenuojant visą membranos paviršių, kas leido aptikti metalinių komponentų sąlygoto didesnio lokalaus šiluminio laidumo, bei darinį laikančio silicio rėmelio šiluminės talpos įtaką. Šis darbas pademonstruoja tik pirminį tokio pobūdžio prietaiso prototipą ir aukštesnės skyros EBL gamyba gali būti pritaikyta ant membranų formuojant įmantresnius tiesinius submikroninių termoporų masyvus nanomatmenų skalėje vykstantiems šiluminiais reiškiniais tirti.

## 4.2 Vandenilio detekcija modifikuotais Pd sluoksniais

Šiame skyriuje aprašomas darbas, atliktas bendradarbiaujant su asoc. prof. Yoshiaki Nishijima vadovaujama Yokohama National University dirbančia tyrėjų grupe, kuriame tirtos paladžio pagrindu parengtų plonų optinių sluoksnių H<sub>2</sub> detekcijos savybės, bei galimybės padidinti šių darinių jautrį bei atsako spartą [38]. Plonasluoksniai  $\leq 100$  nm storio dariniai buvo parengti magnetroninio nusodinimo būdu, arba alternuojant Au ir Pd dulkiniamą ant kambario temperatūros stiklinio padėklo, arba ant 250 °C temperatūros paviršiaus abiejų metalų šaltinius įjungiant vienu metu. Tuo būdu buvo suformuoti arba sluoksniuoti Au/Pd bimetaliniai dariniai, arba homogeniški Au:Pd lydiniai, kurių struktūra buvo patvirtinta Rentgeno spindulių difrakcijos matavimais.

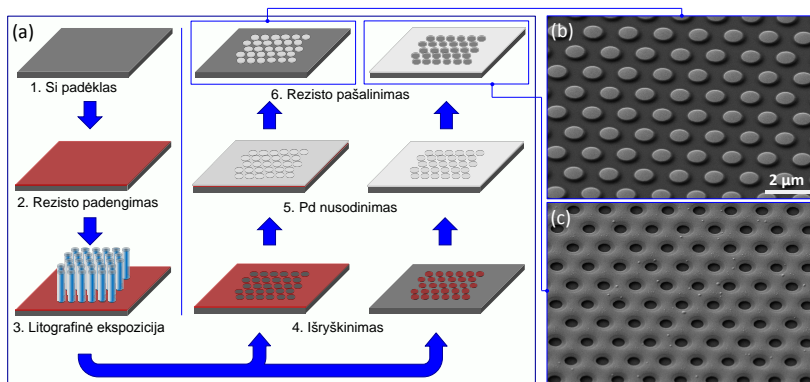
Kairėje Paveikslo 4.2 pusėje yra schematiškai atvaizduotas vandenilio absorbcijos sąlygotų optinio pralaidumo pokyčių matavimo stendas, sudarytas iš kontroliuojamos sudėties H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> dujų srauto kameros,  $\lambda = 1.3$  nm MPS-8012 (ILX Lightwave Corp.) LED spinduliuotės šaltinio ir Ge fotodiodinio detektoriaus AQ2150A (Ando Electric Co., Ltd.). Kaip pavaizduota to pačio paveikslo dešinėje pusėje, H<sub>2</sub> absorbcija Pd sluoksniuose sukelia optinės ekstinkcijos  $Ext = -\lg(I_t/I_i)$  sumažėjimą. Išmatavus keletą skirtingo storio sluoksnių pralaidumo bei atspindžio koeficientų spektrus buvo atkurtos metalų kompleksino lūžio rodiklio  $\tilde{n} = n + ik$  charakteristikos, kurios, savo ruožtu, naudojant Drude modelį yra susiejamos su medžiagos sandaros savybėmis, tokiomis kaip kvazilaisvų krūvininkų tankis bei jų laisvo lėkio nuotolis [39]. Vandenilio disocijacija ir inkorporacija į metalo gardele sąlygoja laisvųjų krūvininkų tankio padidėjimą bei papildomos sklaidos H<sup>+</sup> jonais atsiradimą.

Vandenilio absorbcijos ir ekstrakcijos iš Pd ir jo darinių bei mišinių su Au plonų sluoksnių optinio atsako kinetikos gali būti aproksimuojamos eksponentinėmis prieklausomis su  $\tau_{in}$  ir  $\tau_{out}$  laiko konstantomis. Gryno Pd sluoksnių konstantos  $\tau_{in} = 50$  s ir  $\tau_{in} = 120$  s atitinka bazines vertes kurių atžvilgiu palyginamos Au:Pd lydinių ir Au/Pd sluoksniuotų darinių savybės. Asimetrija tarp H<sub>2</sub> pagavos ir pašalinimo spartų yra sąlygota principinių skirtumų tarp šių molekulių disocijacijos ir asociacijos procesų [40].

Palyginus su grynu Pd, kambario temperatūroje nusodinti sluoksni-

uoti Au/Pd dariniai pasižymi ženkliai didesnėmis ekstinkcijos pokyčio  $\Delta Ext$  signalo vertėmis, tačiau jų atsako trukmės yra vidutiniškai tris kartus didesnės. Be to, šios savybės tampa labiau išreikštos kuomet Au/Pd darinys yra sudarytas iš didesnio kiekio plonesnių vienmetalių sluoksnių. Tikėtina, kad lėtas atsakas yra  $H^+$  difuzijos procesų heterogeniškame sluoksnyje išdava. Kita vertus, magnetronine kodepozicija ant 250 °C temperatūros stiklinių padėklų parengti skirtingos stecheometrijos Au:Pd lydiniai pasižymėjo šiek tiek mažesniais ekstinkcijos pokyčiais, ypač kuomet Pd ir Au santykis buvo mažesnis nei 1:1. Tačiau didesnis Au kiekis lėmė spartesnį  $\tau_{in}$  atsaką į  $H_2$ , kuris priskirtinas mažesniai lydinio giminingumui H adatomams dėl žemesnės Fermi lygmens padėties [41, 42], lemiančios sumažintą adsorbcijos ir desorbcijos procesų aktyvacijos energiją.

Kitas Pd sluoksnių modifikavimo būdas yra jų struktūrizavimas į nanomatmenų darinius, pajėgius palaikyti lokalizuotus paviršinius plazmoninius-polaritoninius sužadinius. Tačiau, nors paladis pasižymi

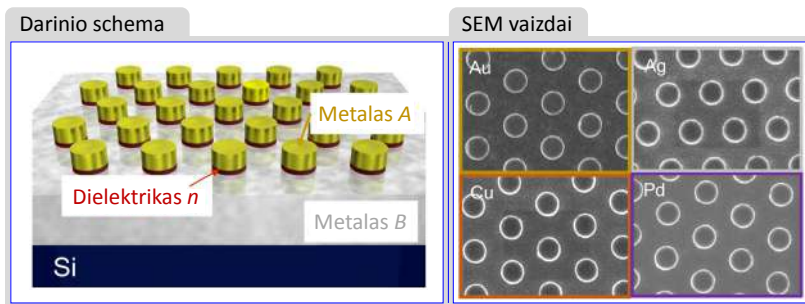


Pav. 4.3: (a) Vidutiniame IR bangų ruože veikiančių Pd plazmoninių struktūrų gamyba redukcijos projekcijos fotolitografijos būdu. Si padėklai yra padengiami fotorezistu ir  $i$ -linijos steperiu eksponuojami heksagoniškai išdėstyto diskų raštu. Priklausomai nuo to ar rezistas buvo teigiamas ar neigiamas, padengus 50 nm storio Pd sluoksnį ir acetone pašalinus rezistą gaunami arba (b) nanodiskų arba (c) nanoskylių masyvo dariniai, iliustruoti SEM vaizdais dešinėje iliustracijos pusėje.

itin išreikšta  $H_2$  absorbcija, šio metalo tinkamumas optinėje srityje veikiančios plazmonikos prietaisams kurti yra ribotas dėl stiprios tarpjuostinės sugerties. Kita vertus, vidutiniame IR bangų ruože dauguma šių apribojimų nebėra aktualūs ir Pd gali palaikyti plazmonines oscilacijas [43, 44]. Šiame darbe du skirtingi plazmoniniai dariniai – skylių metale masyvai (*Angl.* metal hole array, MHA) bei nanodiskų masyvai (*Angl.* nanodisk array, NDA) – buvo parengti naudojant optinę redukcijos projekcijos litografijos metodiką, o jų atsakas į  $H_2$  dujų poveikį buvo tiriamas IR spektroskopijos metodais [45].

Paladžio darinių gamyba yra detalizuojama Paveiksle 4.3 (a) pateiktoje schemoje. Litografinė ekspoziciją atliko Tokyo Ohka Kogyo Co. Ltd. firmoje dirbantys specialistai naudodamiesi *i*-linijos ( $\lambda = 365$  nm) stepperiu NSR-2205i14E (Nikkon Corp.). Priklausomai nuo to, ar buvo naudotas teigiamo tono TLOR-P003 HP ar neigiamo tono TLOR-N001 PM rezistas, apšvitinimas submikroninio diametro dėmių heksagoninio masyvo atvaizdu reziste suformuoja atitinkamai skylių arba diskų pavidalo latentinį raštą. Išryškintus rezistą jo paviršius buvo magnetroniškai padengtas 5 nm adheziniu Ti ir 50 nm storio Pd sluoksniais naudojantis AXXIS PVD įrenginiu (Kurt J. Lesker). Galutiniai metalo NDA ir MHA dariniai, suformuoti MIBK bei acetone pašalinus rezistą, yra pavaizduoti atitinkamai Paveiksluose 4.3 (b) ir (c). Redukcijos projekcijos sistema keičiant rašto didinimo faktorių buvo parengtos nuo  $P = 1.36$   $\mu\text{m}$  iki  $P = 1.52$   $\mu\text{m}$  periodų struktūros su apytiksliai 0,5 skersmens ir komponentų atstumo santykiais.

Vandenilio detekcijos savybių charakterizavimas buvo atliekamas plazmoninių darinių vidutinių IR bangų ruožo spektrinius matavimus FT/IR-6200 spektrometru (JASCO Corp.) vykdant 4%  $H_2/N_2$  dujų mišinio kameroje. Aptiktos plačios 3 – 5  $\mu\text{m}$  bangų ilgių ruože centruotos rezonansinės juostos, kurios NDA dariniams atitiko plazmoninę sugertį, o MHA struktūroms – ypatingą IR bangų pralaidumą. Vandens inkorporavimas į paladžį sąlygojo šių spektrinių linijų  $\Delta\text{FWHM} = 350$  nm išplatėjimą ir ženklų  $\Delta\lambda_{\text{max}} = 160$  nm poslinkį didesnių bangos ilgių link. Kita vertus, minėti spektriniai pokyčiai vyko gana lėtai ir pasiekė sotį tik po apytiksliai 40 minučių, kas, tikėtina, yra didelio dujų kameros tūrio sąlygotas matavimo netikslumas. Taigi, nors čia pateikti rezultatai neleido tiksliai įvertinti Pd plazmoninio atsako į  $H_2$  spartos



Pav. 4.4: Nanodiskų masyvo pagrindu pagamintų vidutinės IR bangos ilgių srities spinduliuotės plazmoninių sugėriklių metapaviršių apžvalga. Kairėje pavaizduotas tiriamų darinių eskizas, kuriuos sudaro metalo *B* pagrindas, metalo *A* nanodiskų masyvas, kuriuos skiria ultraplonas dielektriko *n* sluoksnis. Dešinėje esantys SEM vaizdai rodo plazmoninių sugėriklių realizacijas kuriuose diskai yra sudaryti iš Au, Ag, Cu ir Pd metalų.

vidutiniame IR spektriniame ruože, šis pirmas reiškinio pademonstravimas naudojant pramoniniais pajėgumais pasižyminčią UV litografiją suformuoja pagrindus sudėtingesnių metapaviršių realizacijai bei taikymui.

### 4.3 Plazmoniniai IR bangas sugeriantys metapaviršiai

Šiame skyriuje aprašomas darbas, atliktas bendradarbiaujant su asoc. prof. Yoshiaki Nishijima vadovaujama Yokohama National University dirbančia tyrėjų grupe, kurio apimtyje buvo pagaminti ir spektroskopiškai bei FDTD skaičiavimais tirti sluoksnuotų metalų-dielektrikų-metalų pagrindu sudaryti vidutinius IR bangos ilgius sugeriantys plazmoniniai metapaviršiai [46]. Ypatingas dėmesys buvo skirtas nustatant įvairių Au, Ag, Cu, ir Pd metalų bei SiO<sub>2</sub>, Si, ZnO dielektrikų parinkimo, kaip iliustruota kairėje Paveikslo 4.4 pusėje pateiktoje schemeje, įtaką plazmoninių darinių sugerties savybėmis. Nanodiskų masyvo struktūros buvo pagamintos taikant projekcijos litografijos metodą apibūdintą Paveiksle 4.3, tačiau esminis skirtumas buvo, kad eksponuojami Si padėklai pirmiau buvo termiškai užgarinti

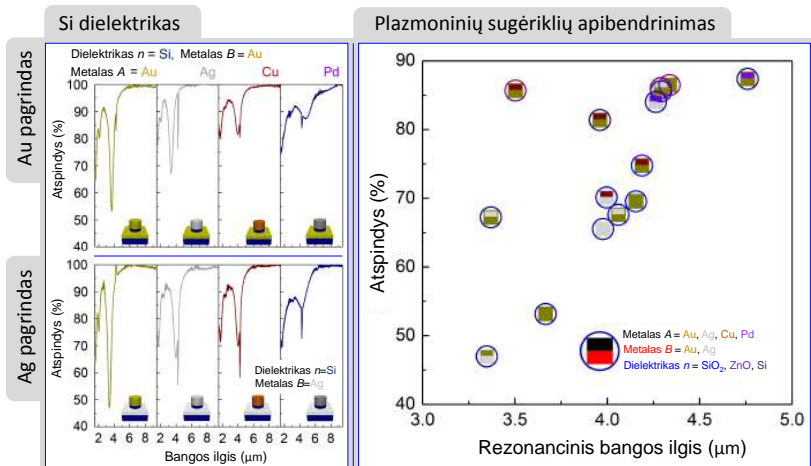
200 nm storio Au arba Ag sluoksniais, o išryškinius rezistą magnetroniniu nusodinimu buvo sukurti 50 nm storio skirtingų metalų nanodiskai, nuo pagrindo izoliuoti ultraplonu 10 nm tarpiniu dielektriku. Adhezija heterogeninių medžiagų sandūrose buvo užtikrinta naudojant 3 nm Ti sluoksnius, nusodintus abejose dielektriko pusėse.

Skirtingų medžiagų pagrindu pagamintų plazmoninių metapaviršių SEM atvaizdai yra pateikti dešinėje Paveikslo 4.4 pusėje, ir rodo, kad darinių morfologija nepriklauso nuo jų sandaros. Metapaviršių kokybė buvo pastovi visame jų  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  plote, tačiau kai kurie nanodiskai pasižymėjo defektais, tokiais kaip išlinkusios bei atrupėjusios periferinės jų sritys, bei  $\sim 50 \text{ nm}$  eilės paviršinis PVD nusodinto metalo šiurkštumas. Šių faktorių įtaka vidutinės IR bangos ilgių sugėriklių veikimui buvo įvertinta atliekant FDTD skaičiavimus. Palyginus su idealizuotu plokštuminiu nanodiskų masyvo paviršiumi, jų išlinkimas sąlygoja nedidelį rezonansinių sugerties modų išplitimą bei poslinkį mažesnių bangos ilgių link. Kita vertus, metalo paviršių šiurkštumas, dėl ženklių sklaidos nuostolių, gali turėti daug didesnę neigiamą poveikį plazmoninių sužadinių kokybei ir baigtis visišku sugerties linijų eliminavimu.

Iš viso kiekvienai metalų/dielektrikų kombinacijai buvo parengti keturi NDA metapaviršių rinkiniai, su  $1.36 \mu\text{m}$ ,  $1.41 \mu\text{m}$ ,  $1.48 \mu\text{m}$  ir  $1.52 \mu\text{m}$  masyvų heksagoninės simetrijos išdėstymo periodais bei 0,5 diskų pločio ir tarpusavio atstumų santykiais. Tačiau, kadangi tokio pobūdžio metapaviršių mastelio pokyčiai iš esmės keičia tik rezonansinių modų spektrinę poziciją, čia aprašomi tik  $P = 1.36 \mu\text{m}$  atvejį atitinkantys rezultatai [46]. Eksperimentinis plazmoninių NDA struktūrų vidutinės IR spektrinės srities atspindžio charakterizavimas buvo atliktas FT/IR-4200 spektrometru, prijungtu prie IRT-1000 mikroskopo.

Kairėje Paveikslo 4.5 pusėje yra pateikti išmatuotų atspindžio spektrų pavyzdžiai, atitinkantys visas tirtas metalų kombinacijas su Si tarpiniu dielektriko sluoksniu. Visais atvejais plazmoninės sugerties sąlygoti atspindžio sumažėjimai aptinkami  $\lambda \approx 3 - 5 \mu\text{m}$  spektrinėje srityje, o jų tiksli padėtis yra pagrinde apsprendžiama geometrinių nanodiskų masyvo matmenų ir yra šiek tiek įtakojama metalų dielektrinių savybių. Dešinėje to paties paveikslo pusėje yra pateikiama visų eksperimentiškai





Pav. 4.5: (a) Eksperimentiškai išmatuoti 1.34  $\mu\text{m}$  periodo plazmoninių sugėriklių, pagamintų naudojant Si kaip dielektrinį sluoksnį, atspindžio spektrai vidutinėje IR bangos ilgių srityje. Spektrai viršutinėje ir apatinėje skiltyse atitinka metapaviršius su atitinkamai Au ir Ag pagrindo sluoksniais. (b) Labiausiai išreikštų kiekvieno skirtingos sandaros metapaviršių rezonansinių modų spektrinių pozicijų ir atspindžio koeficientų sąvadas. Infraraudonosios spinduliuotės spektroskopijos matavimus atliko asoc. prof. Yoshiaki Nishijima vadovaujamos grupės nariai, dirbantys Yokohama National University.

ištirtų skirtingos sudėties metapaviršių rezonansines modas atitinkančių atspindžio verčių ir spektrinių padėčių suvestinė. Kai metalinio pagrindo sluoksnis yra suformuotas iš sidabro pastebima apytiksliai 5%–10% didesnė ekstinkcija nei naudojant Au, dėl mažesnių plazmoninės sugerties nuostolių Ag atveju. Kita vertus, nors abiejų šių metalų naudojimas 50 nm storio nanodiskų suformavimui sąlygoja stiprų plazmoninį atsaką, Au pasižymi labiau išreikšta ekstinkcija, tikėtina, dėl to kad sidabras turi polinkį oksiduotis. Varis bei paladis pasižymi gerokai silpnesne plazmonine ekstinkcija bei labiau spektriškai išplitusiais rezonansais.

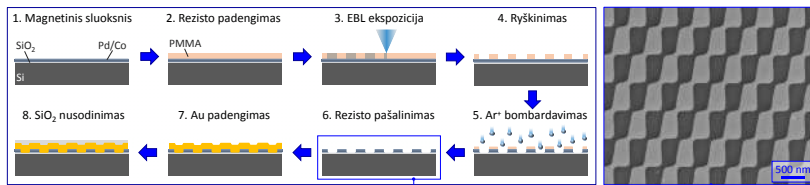
Skirtingų dielektrinių sluoksnių, kuriuose lokalizuojama beveik visa poliaritoninė metapaviršiaus elektromagnetinio sužadavimo dalis,

parinkimo įtaka plazmoniniam atsakui buvo daug mažiau aiški, ir eksperimentinių rezultatų sutapimas su FDTD skaičiavimų rezultatais buvo gana ribotas. Aukso pagrindu suformuotų NDA metapaviršių simuliacijų su 10 nm storio izoliatoriais, kurių lūžio rodikliai buvo varijuojami nuo  $n = 1.5$  iki  $n = 3.5$ , rezultatai numatė, kad didėjanti dielektrinė skvarba lemia rezonansinių modų poslinkį į didesnių bangos ilgių sritį nuo  $\lambda \approx 4.2 \mu\text{m}$  iki  $\lambda \approx 7 \mu\text{m}$  bei jų kokybės sumažėjimą. Kita vertus, nors  $\text{SiO}_2$   $n = 1.5$  skaičiavimai gerai atitiko eksperimentinius rezultatus, kitaip nei numatyta teoriškai, labiausiai išreikšta ir geriausiai spektriškai lokalizuota plazmoninė sugertis buvo stebėta naudojant apytiksliai  $n_{\text{Si}} \approx 3.4$  amorfinio Si sluoksnius. Tarpinis  $n_{\text{ZnO}} \approx 2.0$  lūžio rodiklio atvejis pasižymėjo silpniausia ekstinkcija, kas, kitaip nei Si atveju, gali būti paaiškinta šių sluoksnių elektroninio laidumo įtaka [47, 48].

Čia aprašyti sluoksniuoti metalo-dielektriko-metalo nanodiskų pagrindu UV litografija suformuoti plazmoniniai vidutinės IR spektrinės srities elektromagnetinę spinduliuotę sugeriantys metapaviršiai yra potencialiai taikytini spektroskopinei molekulinei detekcijai realizuoti. Nors nedidelės skyros optinė litografija leido pasiekti tik apytiksliai 50% ekstinkcijos vertes, EBL pagaminti analogiški dariniai su gretimais diskais skiriančiais 30 nm tarpais tame pačiame bangos ilgiu ruože pasižymėjo iki 90% ekstinkcija [46].

#### 4.4 Magnetinės gardelės atomų pagavimui

Šiame skyriuje aprašomas darbas, atliktas bendradarbiaujant su prof. Peter Hannaford vadovaujama Swinburne University of Technology dirbančia tyrėjų grupe, kurio eigoje Co/Pd magnetiniuose metalų sluoksniuose buvo suformuotos 700 nm periodo dvimatės gardelės, kurios įgalino pirmą kartą pademonstruoti ultrašaltų  $^{87}\text{Rb}$  atomų lokalizaciją submikroninėse magnetinėse gaudyklėse [49]. Naudojantis Melburno nanofabrikacijos centre esančiais EBL pajėgumais, šie dariniai buvo pagaminti su  $\sim 5$  nm tikslumu ir aprėpė sąlyginai didelį  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  plotą. Tokio pobūdžio trikampės simetrijos submikroninių periodų dvimatės magnetinės gardelės leido įvertinti atomų sąveiką su 100 nm atstumu nuo jų esančiu lusto paviršiumi, tačiau  $\sim 1.69$  ms vidutinė pagavos trukmė nebuvo pakankama kvantinio tuneliavimo tarp atskirų



Pav. 4.6: Submikroninio periodo magnetinių gardelių, skirtų ultrašaltų atomų pagavimui, EBL gamybos procedūra. Si padėklas su Co/Pd magnetiniais metalų sluoksniais yra padengiamas 300 nm storio PMMA rezistu ir eksponuojamas EBL. Latentinis raštas yra išryškintas MIBK, o metalas atidengtose srityse yra pašalinamas bombarduojant  $\text{Ar}^+$  jonais. Rezisto likučiai yra ištirpinami anizolyje. Galiausiai, gardelės yra uždengiamos 50 nm storio Au ir 25 nm  $\text{SiO}_2$  sluoksniais. Dešinėje pavaizduotas 700 nm periodo trikampės simetrijos dvimatės gardelės SEM atvaizdas.

potencinių barjerų reiškiniams aptikti.

Efektyvių atomų gaudyklių gardelių realizavimui yra būtinos aukštos kokybės plonasluoksnės nuolatinės magnetinės medžiagos pasižyminčios didele skersine magnetine anizotropija, liktine magnetizacija ir koerciniu stipriu, didesne nei 300 °C Kiuri temperatūra, bei smulkia nanokristaline sandara. Šiame darbe naudoti 8 sluoksnių alternuojančiu 0.28 nm Co ir 0.9 nm Pd magnetroninio nusodinimo būdu ant Si padėklų parengti magnetiniai paviršiai, sukurti prof. Manfred Albrecht vadovaujamos University of Augsburg dirbančios grupės narių [50, 51].

Magnetinių gardelių EBL gamybos proceso schema yra pavaizduota Paveiksle 4.6. Ant organiniais tirpikliais nuvalytų magnetinių sluoksnių padėklų sukamuoju padengimu buvo užneštas 300 nm storio PMMA teigiamo tono rezistas. EBL ekspozicija buvo atlikta naudojant Raith EBPG5000plusES aparatą su 100 kV elektronų greitinimo įtampą ir  $1 \text{ mm}^2$  rašymo lauko plotu, kuris leido visą gardelės raštą nuskenuoti nejudinant bandinio laikiklio. Vienas iš iššūkių EBL gaminant tankius didelio ploto darinių masyvus yra artumo efekto, atsirandančio dėl papildomos rezisto apšvitos atgal išskaidytais elektronais, įtakos, kuri šiuo atveju buvo įvertinta Monte Karlo simuliacijų būdu ir įskaityta atitinkamai varijuojant struktūrų ekspozicijos dozes kad kiekvienoje

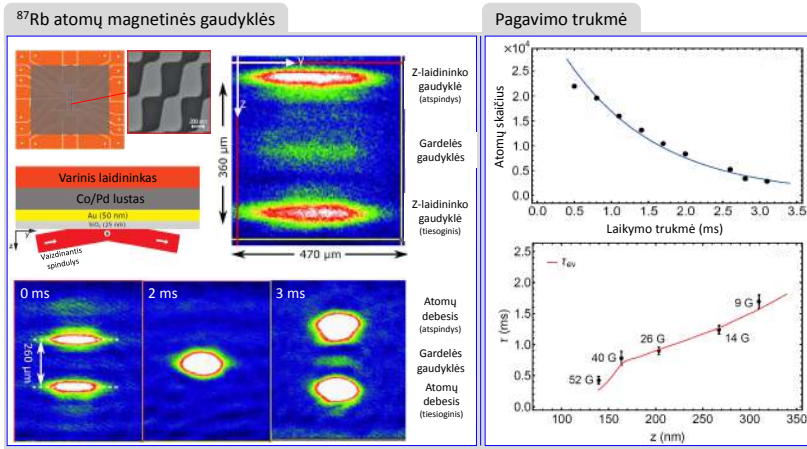
gardelės srityje būtų išlaikoma pastovi suminė dozė. Reziste suformuoti latentiniai raštai buvo išryškinti 1:3 MIBK ir IPA tirpiklių mišinyje, po ko litografiškai suformuotas raštas buvo perneštas į funkcinį Co/Pd sluoksnį fiziškai jį bombarduojant argono jonais Samco RIE-101iPH ICP-RIE įrenginyje (SAMCO Inc.). Apsauginės PMMA kaukės likučiai yra ištirpinami 60 °C anizolio, acetono ir IPA tirpikliuose. Magnetiniame metale išsėdintos trikampės simetrijos dvimatės atomų pagavos gardelės SEM atvaizdas yra pateiktas dešinėje Paveikslo 4.6 pusėje. Paskutiniai gamybos proceso žingsniai apima lusto magnetroninį uždengimą lazerio spinduliuotę atspindinčia 50 nm storio aukso, bei rubidžio atomams prilipti prie paviršiaus neleidžiančia 25 nm SiO<sub>x</sub> dangomis, naudojant AXXIS PVD sistemą (Kurt J. Lesker).

Sudėtingas išlankstytas gardelės rašto pavidalas yra sugeneruojamas skaitmeninio programavimo algoritmu, kuris siekia suformuoti magnetinius potencialus neturinčius nulinių lauko verčių, sąlygojančių atomų pradžią sukinių apsivertimo metu [52]. Bazinis pagautų atomų lokalizacijos atstumas nuo paviršiaus atitinka apytiksliai pusę gardelės periodo  $z = z_{\min} = P/2 = 350$  nm. Aplink išsėdintų darinių perimetrą cirkuliuojančių virtualių srovių sudarytų magnetinių potencialų gylį ir atstumą nuo lusto paviršiaus galima papildomai kontroliuoti išoriniais  $B_x$  ir  $B_y$  laukais.

Eksperimentinius <sup>87</sup>Rb atomų pagavos tyrimus, kurių suvestinė pateikta Paveiksle 4.7, atliko Swinburne University of Technology dirbanti prof. Peter Hannaford vadovaujama tyrėjų grupė [49]. Būtent <sup>87</sup>Rb atomų pasirinkimą motyvavo tai, kad jie turi magnetiškai aktyvią  $|F = 1, m_F = -1\rangle$  būseną, bei pasižymi uždaro ciklo pobūdžio energijos lygmenų struktūra, leidžiančia įgyvendinti efektyvų lazerinį aušinimą. Pirmiausia, apytiksliai  $\sim 5 \times 10^5$  <sup>87</sup>Rb atomų debesis standartinėje keturių spindulių veidrodinėje magneto-optinėje gaudyklėje yra ataušinamas iki  $\sim 1$   $\mu$ K temperatūros. Tada, naudojantis viršutinėje kairėje paveikslo dalyje pavaizduotais po lusto esančioje vario plokštėje suformuotais U ir Z pavidalo laidininkais tekančios srovės sudarytais magnetiniais potencialais, atomų debesis yra pernešamas į padėtį apytiksliai  $\sim 670$   $\mu$ m žemiau gardelės. Atomų debesies vizualizacija buvo realizuota vaizdinant jų sugertį 2° lėkštu kampu nuo lusto atspindėtu lazerio pluoštu, kas CCD detektoriuje suformuoja tiek tikrą tiek ir

virtualų atomų debesėlio atvaizdą, su paaiškinimu pateiktą vidurinėje Paveikslo 4.7 dalyje.

Atomų pakrovimas atliekamas lėtai suvedant EBL pagamintos magnetinės gardelės ir Z-laidininko, naudojamo kaip  $^{87}\text{Rb}$  atomų rezervuaras, potencialus, kaip tai pavaizduoja apatinėje kairėje Paveikslo 4.7 dalyje pateikta vaizdų seka. Centre esantis retesnis atomų debesėlis atitinka submikroninio periodo dvimatės magnetinės gardelės potencialo lauke pagautus  $^{87}\text{Rb}$  atomus, kurių skaičius buvo apytiksliai  $\sim 2 \times 10^4$  arba 4 atomai kiekviename mazge. Pagavos trukmė



Pav. 4.7: Eksperimentinė ultrašaltų  $^{87}\text{Rb}$  atomų pagava 700 nm periodo trikampėse magnetinėse gardelėse [49]. Eskizas viršutiniame kairiajame kampe atvaizduoja pagamintą lustą, patalpintą ant varinės plokštelės su laidininkų pagrindu įgyvendintomis atomų transportui skirtomis gaudyklėmis. Žemiau esanti schema parodo sugerties vaizdinimo geometriją naudojamą ultrašaltiems atomams vizualizuoti. Apačioje pateikta atomų pakrovimo į magnetinę gardelę proceso laikinė seka. Dešinėje pusėje atidėti grafikai apibūdina gardelėje pagautų atomų kiekio mažėjimą laikui bėgant, bei šios gyvavimo trukmės prieklausą nuo gaudklės atstumo iki lusto paviršiaus. Atomų pagavos eksperimentus atliko prof. Peter Hannaford vadovaujama tyrėjų grupė dirbanti Swinburne University of Technology.

buvo įvertinta stebint eksponentinį gardelės užpildos mažėjimą laikui bėgant, kaip atidėta viršutinėje dešinėje Paveikslo 4.7 dalyje. Magnetinės gardelės potencialas  $V_M(z)$ , taigi, ir nuo jo priklausanti atomų pagavos trukmė, gali būti varijuojamas keičiant išorinį magnetinį lauką  $B_x$  ir be to stipriai priklauso nuo sąveikų su lusto paviršiumi. Kaip pavaizduota apatinėje dešinėje Paveikslo 4.7 dalyje, didinant magnetinę indukciją nuo  $B_x = 9$  G iki  $B_x = 52$  G  $^{87}\text{Rb}$  pagavos trukmė sumažėja nuo 1.69 ms iki 0.43 ms. Spartus gyvavimo trukmės nuosmukis arti paviršiaus yra priskirtinas jungtiniam Kasimir-Polder ir van der Waals potencialų poveikiui [53, 54].

## IŠVADOS

Šio darbo tikslas yra taikyti nanotikslumu pasižyminčius gamybos metodus kuriant įvairius su medžiagos ir elektromagnetinės spinduliuotės sąveika susijusius funkcionalumus atliekančius komponentus bei darinius, tokius kaip integriniai bangolaidiniai fotoniniai grandynai, mikrooptiniai elementai generuojantys pageidaujamų savybių šviesos pluoštus, bei spinduliuotę sugeriantys plazmoniniai metapaviršiai. Be to, miniaturizacija čia naudojama siekiant sukurti naujas galimybes termometrijai, makromolekulinių junginių detekcijai, ir netgi ultrašaltų atomų pagavai reikalingai sudarant modelines kvantines sistemas fundamentinės krypties tyrimams atlikti. Esminiai šios disertacijos rezultatai yra:

1. Didelė  $\sim 10$  nm EBL skyra yra pakankama tam, kad tiksliai ir atkartojamai būtų suformuoti  $\lambda/n_{Si}$  eilės struktūriniai komponentai, sukuriantys galimybę valdyti artimojo IR spektrinio ruožo spinduliuotės sklaidimą vienmodžiuose Si bangolaidiniuose dariniuose.
2. Mikrožiedinių rezonatorių bei apskritiminių antros eilės Bragg gardelių superpozicija gali būti naudojama selektyviam modų filtravimui atlikti ir modų skilimui eliminuoti, paliekant tik vieną difrakcijos sąlygą išpildantį rezonansą, kuris dėl dispersijos pasižymi padidėjusiu  $Q$ -faktoriumi.
3. Gradientinio lūžio rodiklio mikrožiediniai rezonatoriai pasiekia sklindančių bangolaidinių modų delokalizaciją ir, nepaisant ženkliai išaugusio darinio paviršiaus ploto, prototipiniai prietaisai pasižymi  $Q \simeq 15000$  eilės kokybės faktoriais, kurie yra tris kartus didesni nei ekvivalentiškuose įprasto pobūdžio mikrožiediniuose rezonatoriuose.
4. Naudojant galio jonų pluoštus įmanoma 10 – 30 nm storio  $Si_3N_4$  membranose išgręžti 10 nm skersmens skylės, kurios taikytinos kaip didelio elektrocheminio bei mechaninio stabilumo kieto kūno nanoporos makromolekulių translokacijų detekcijai.

5. Frezavimas fokusuotais jonų pluoštais įgalina sukurti 200 nm periodo ir 0,5 užpildos faktoriaus Au mikrooptinius gardelinius poliarizatorius, pasižyminčius iki  $T_{\max}/T_{\min} \approx 150$  ekstinkcijos santykiais visame vidutinių IR bangos ilgų ruože.
6. Didelio fokusavimo nuotolio jonų pluošto sistemose dėka yra įmanoma nanomatmenų darinius tiksliai frezuoti ir ant sudėtingų neplokščios topologijos paviršių. Tai įgalina, kombinuojant fotopolimerizaciją lazeriu ir FIB litografiją, sukurti trimačius hibridinius dielektrinius/metalinius mikrooptinius elementus. Difrakcinės spiralinių zonų darinių savybės yra papildomai sustiprintos po jais esančių supolimerizuotų pjedestalų laužiamosios gebos dėka, kas leidžia generuoti stipriai erdviškai lokalizuotus  $NA \approx 0.7$  skaitine apertūra  $f \approx 12.3 \mu\text{m}$  nuotolio židinyje sufokusuotus optinius sūkurius.
7. EBL būdu ant 30 nm storio  $\text{Si}_3\text{N}_4$  membranos suformuota  $6.25 \mu\text{m}^2$  ploto Au/Ni termoporos sandūra, dėl mažos šio plonasluoksnio darinio šiluminės talpos, pasižymi 34,5 didesniu jautrumu nei analogiška ant storo padėklo pagaminta termopora, ir įgalina aptikti tiek lazerio tiek ir elektronų pluošto apšvita inicijuotą iki  $2 \times 10^5 \text{Ks}^{-1}$  spartos kaitimą.
8. Magnetroniškai nusodintų paladžio pagrindu parengtų plonasluoksnių darinių optinės savybės priklauso nuo į metalą absorbuoto vandenilio kiekio, kas sąlygoja jautrumą  $\text{H}_2$  dujoms. Pd lydiniai su Au pasižymi mažesne optinio atsako į  $\text{H}_2$  inkorporavimą amplitudę, tačiau didesne sparta. Kita vertus, nanomatmenų storio alternuoančios Au/Pd daugiasluoksnės struktūros veikia priešingai – analogiškas vandenilio kiekis sukelia didelius tačiau lėtai vykstančius optinės ekstinkcijos pokyčius. Litografiškai parengti Pd nanodiskų ir nanoskylių masyvai gali būti taikomi pazmoninės vandenilio detekcijos realizacijai vidutinių IR bangos ilgių spektriniame ruože.
9. Redukcijos projekcijos UV litografijos metodu suformuoti sluoksniuoti metalas-dielektrikas-metalas nanodiskų masyvų pavidalo plazmoniniai vidutinės IR spektrinės srities spinduliuotę sugeriantys metapaviršiai palaikė siaurajuosčius rezonansus su iki 50%



ekstinkcija, o aukščiausios kokybės modos gautos naudojant Au ir Ag tauriuosius metalus kartu su 10 nm storio Si arba SiO<sub>2</sub> tarpiniais dielektriniais sluoksniais.

10. Didelio 1 mm<sup>2</sup> ploto ir aukštos skyros EBL ekspozicija įgalina suformuoti 700 nm periodo dvimates sluoksniuotų Co/Pd metalų magnetines gardeles ultrašaltų atomų pagavimui, kuriose <sup>87</sup>Rb atomai yra lokalizuojami 100 nm atstumu nuo lusto paviršiaus su ~ 1.69 ms gyvavimo trukme.

## SANTRAUKA ANGLŲ KALBA (ABSTRACT)

The purpose that directs the field of lithographic fabrication is to provide reliable methods of producing structures with maximally strictly defined geometries. In general terms, the dimensions of functional component features or their arrangements dictate which physical phenomena they will be capable of affecting or interfacing with, as well as the duration of various transport processes. Therefore, on one end miniaturization can result in increased device efficiency, or, conversely, be absolutely essential for enabling a certain functionality. However, among all of the available approaches only a few possess patterning resolution capability in the nanoscale, necessary, in particular, for realization and fine control over numerous photonic phenomena.

This work is geared towards leveraging the nanoscale resolution patterning capabilities of electron and ion beam lithography approaches, as well as the auxiliary pattern transfer techniques such as physical vapor deposition or reactive ion etching, to fashion structures and devices that for their optics-related operation rely on subwavelength scale features along at least one of their dimensions. It is divided into three parts, based on which fabrication technique was instrumental, and deals with electron beam lithography for silicon-on-insulator photonics, focused ion beam milling of micro-optical components, as well as metal junction or multilayer based devices.

Planar silicon-on-insulator waveguide structures exhibit a high refractive index which enables highly miniaturized and cost effective label-free sensors to be created. On the other hand, the tight confinement of electromagnetic energy in Si represents a considerable challenge for generating structures that are capable of advanced control over spatial and spectral distribution of propagating or resonant modes. Here, after overviewing the key concepts pertaining to waveguide-coupled micro-ring resonator sensors, we focus on the ways 10 nm resolution of electron beam lithography can be harnessed for the creation of custom subwavelength structural features that serve to incorporate effective refractive index and dispersion engineering concepts to enhance the sensitivity and broaden the utility of resonant multi-pass label-free

sensors. Micro-ring resonators equipped with annular second-order Bragg gratings gave rise to suppression of all modes at odds with the diffraction condition and simultaneously exhibited dispersion-derived  $Q$ -factor enhancement for a specific resonant excitation. A different approach relies on fine control over pattern geometry to ensure a desired gradient effective refractive index, which, when applied onto micro-ring resonators, achieves optical field delocalization for probing extended sensing volumes, thereby side-stepping the limitations associated with strong mode confinement in Si structures.

One of the difficulties associated with electron beam lithography is that the small charged particle mass renders their energy transfer to atoms largely inefficient. Hence, patterning has to proceed by first inducing chemical changes in a resist film and then performing pattern transfer. Focused ion beam milling, on the other hand, relies on massive ions that are capable of direct surface atom sputtering. Although the amount of material that can be practicably removed is limited to the single-micrometer depth range, processing layers with some type of a strong contrast in material properties can nevertheless yield substantive effects. A case-in-point example of this principle relates to generation of 10 nm diameter pores in nanoscale  $\text{Si}_3\text{N}_4$  membranes, which, despite being arguably the simplest conceivable lithographically patterned device type, can operate as single-molecule sensors by detecting their individual translocation events. From a photonic perspective, directly milling complex patterns in high opacity metal films can be employed for the creation subwavelength feature size diffractive components as well as polarizer structures. Furthermore, the large depth of focus possessed by focused ion beam systems allows for patterning of complex curved surface geometries, which, in conjunction with complimentary laser photopolymerization additive fabrication methods, can be harnessed for the creation of hybrid diffractive/refractive micro-optical elements.

Nanofabrication is not constrained to the planar dimension accessible to lithographic exposure, since pattern transfer methods such as etching or physical vapor deposition can generate different structures to exert control over the third out-of-plane fabrication dimension as well. Materials can be layered as discrete stacks of media with bulk

properties, as disparate component junctions as well as nanoscale multilayer or superlattice stacks with novel behaviors, or tailored in their composition and characteristics by way of alloying. In particular, metals, due to their rich variety of electron mobility-derived properties, including plasmonic, magnetic, catalytic and electric among others, provide a wide range of possibilities for development of advanced sub-wavelength scale devices. Here, the principles of creating layered metal functional components, patterned mostly but not exclusively by way of lithography, are illustrated by examples of membrane-suspended micro-thermocouples, palladium-based alloy composites for hydrogen sensing, metal-insulator-metal plasmonic absorber metasurfaces, as well as magnetic ultracold atom trapping lattices. Miniaturization of such structures confers a multitude of different benefits, ranging from the fairly mundane decrease in heat capacity of a thermocouple that results in higher sensitivity and a higher response rate, or how nanoscale thickness of metal films makes it possible to register their permittivity changes by monitoring optical transmittance, all the way to advanced instances where downscaling atom trapping lattices may provide opportunities to study quantum tunneling phenomena, or how creating subwavelength plasmonic structures allows to control and tailor their resonant response.

## LITERATŪROS SARAŠAS

- [1] J.E. Green, J.W. Choi, A. Boukai, Y. Bunimovich, E. Johnston-Halperin, E. DeIonno, Y. Luo, B.A. Sheriff, K. Xu, Y.S. Shin, H.-R. Tseng, J. F. Stoddart, and J. R. Heath. A 160-kilobit molecular electronic memory patterned at 1011 bits per square centimetre. *Nature*, 445(7126):414–417, 2007.
- [2] B. Hoefflinger. *ITRS 2028 international roadmap of semiconductors*. In *Chips 2020*, volume 2. Springer, 2016.
- [3] R. M. De La Rue and C. Seassal. Photonic crystal devices: some basics and selected topics. *Laser Photon. Rev.*, 6(4):564–597, 2012.
- [4] D.R. Smith, J.B. Pendry, and M. C. K. Wiltshire. Metamaterials and negative refractive index. *Science*, 305(5685):788–792, 2004.
- [5] S.-J. Jeong, J. Y. Kim, B. H. Kim, H.-S. Moon, and S. O. Kim. Directed self-assembly of block copolymers for next generation nanolithography. *Mater. Today*, 16(12):468–476, 2013.
- [6] R. P. Seisyan. Nanolithography in microelectronics: A review. *Tech. Phys.*, 56(8):1061–1073, 2011.
- [7] N. Kooy, K. Mohamed, L. T. Pin, and O. S. Guan. A review of roll-to-roll nanoimprint lithography. *Nanoscale Res. Lett.*, 9(1): 320, 2014.
- [8] K. J. Kuhn. Considerations for ultimate CMOS scaling. *IEEE Trans. Electron Devices*, 59(7):1813–1828, 2012.
- [9] M. Malinauskas, A. Žukauskas, S. Hasegawa, Y. Hayasaki, V. Mizeikis, R. Buividas, and S. Juodkazis. Ultrafast laser processing of materials: from science to industry. *Light Sci. Appl.*, 5: e16133, 2016.
- [10] R. Garcia, A. W. Knoll, and E. Riedo. Advanced scanning probe

lithography. *Nat. Nanotechnol.*, 9:577–587, 2014.

- [11] Y. Chen. Nanofabrication by electron beam lithography and its applications: A review. *Microelectron. Eng.*, 135:57–72, 2015.
- [12] A. Joshi-Imre and S. Bauerdick. Direct-write ion beam lithography. *J. Nanotechnol.*, 2014:170415, 2014.
- [13] Z. Cui. *Nanofabrication: Principles, Capabilities and Limits*. Springer, New York, NY, USA, 2008.
- [14] V. E. Krohn and G. R. Ringo. Ion source of high brightness using liquid metal. *Applied Physics Letters*, 27:479, 1975.
- [15] A. L. Washburn, L. C. Gunn, and R. C. Bailey. Label-free quantitation of a cancer biomarker in complex media using silicon photonic microring resonators. *Anal. Chem.*, 81(22):9499–9506, 2009.
- [16] M. S. Luchansky and R. C. Bailey. High-Q optical sensors for chemical and biological analysis. *Anal. Chem.*, 82(12):793–821, 2012.
- [17] K. Tiefenthaler and W. Lukosz. Sensitivity of grating couplers as integrated-optical chemical sensors. *J. Opt. Soc. Am. B*, 6(2): 209–220, 1989.
- [18] S. Nakashima and K. Izumi. Analysis of buried oxide layer formation and mechanism of threading dislocation generation in the substoichiometric oxygen dose region. *J. Mater. Res.*, 8(3): 523–534, 1993.
- [19] M. Hammer and O. V. Ivanova. Effective index approximations of photonic crystal slabs: a 2-to-1-D assessment. *Opt. Quant. Electron.*, 41(4):267–283, 2009.
- [20] T. Stoeferle. Electromagnetic wave resonator with effective refractive index gradient. *International patent WO 2012/123835 A1*, issued 20 Sept. 2012.
- [21] M. Soljačić, E. Lidorikis, L. V. Hau, and J. D. Joannopoulos.

Enhancement of microcavity lifetimes using highly dispersive materials. *Phys. Rev. E*, 71(2):026602, 2005.

- [22] D. Urbonas, A. Balčytis, M. Gabalis, K. Vaškevičius, G. Naujokaitė, S. Juodkazis, and R. Petruškevičius. Ultra-wide free spectral range, enhanced sensitivity, and removed mode splitting SOI optical ring resonator with dispersive metal nanodisks. *Opt. Lett.*, 40(13):2977–2980, 2015.
- [23] A. Balčytis, C. Briosne-Fréjaville, A. Mau, X. Li, and S. Juodkazis. Rescalable solid-state nanopores. In *AIP Conf. Proc.*, volume 1874, page 030002, 2016.
- [24] A. W. Grant, Q.-H. Hu, and B. Kasemo. Transmission electron microscopy 'windows' for nanofabricated structures. *Nanotechnology*, 15(9):1175–1181, 2004.
- [25] S. Tan, R. Livengood, Y. Greenzweig, Y. Drezner, and D. Shima. Probe current distribution characterization technique for focused ion beam. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 30(6):06F606, 2012.
- [26] G. Seniutinas, G. Gervinskas, J. Anguita, D. Hakobyan, E. Brasselet, and S. Juodkazis. Nano-proximity direct ion beam writing. *Nanofabrication*, 2(1):54–62, 2016.
- [27] S. Liu, T. D. Yuzvinsky, and H. Schmidt. Effect of fabrication-dependent shape and composition of solid-state nanopores on single nanoparticle detection. *ACS Nano*, 7(6):5621–5627, 2013.
- [28] R. Kox, C. Chen, G. Maes, L. Lagae, and G. Borghs. Shrinking solid-state nanopores using electron-beam-induced deposition. *Nanotechnology*, 20(11):115302, 2009.
- [29] A. Oukhaled, B. Cressiot, L. Bacri, M. Pastoriza-Gallego, J.-M. Betton, E. Bourhis, R. Jede, J. Gierak, L. Auvray, and J. Pelta. Dynamics of completely unfolded and native proteins through solid-state nanopores as a function of electric driving force. *ACS Nano*, 5(5):3628–3638, 2011.
- [30] M. Ryu, A. Balčytis, X. Wang, J. Vongsvivut, Y. Hikima, J. Li,

- M. J. Tobin, S. Juodkazis, and J. Morikawa. Orientational mapping augmented sub-wavelength hyper-spectral imaging of silk. *Sci. Rep.*, 7:7419, 2017.
- [31] Y. Hikima, J. Morikawa, and T. Hashimoto. FT-IR image processing algorithms for in-plane orientation function and azimuth angle of uniaxially drawn polyethylene composite film. *Macromolecules*, 44(10):3950–3957, 2011.
- [32] B. Crist and J. M. Schultz. Polymer spherulites: A critical review. *Prog. Polym. Sci.*, 56:1–63, 2016.
- [33] A. Balčytis, D. Hakobyan, M. Gabalis, A. Žukauskas, D. Urbonas, M. Malinauskas, R. Petruškevičius, E. Brasselet, and S. Juodkazis. 3D micro-optical elements for generation of tightly focused vortex beams. In *MATEC Web Conf.*, volume 32, page 03002, 2015.
- [34] A. Balčytis, D. Hakobyan, M. Gabalis, A. Žukauskas, D. Urbonas, M. Malinauskas, R. Petruškevičius, E. Brasselet, and S. Juodkazis. Hybrid curved nano-structured micro-optical elements. *Opt. Express*, 24(15):16988–16998, 2016.
- [35] L. Wei, Y. Gao, X. Wen, Z. Zhao, L. Cao, and Y. Gu. Fractional spiral zone plates. *J. Opt. Soc. Am. A*, 30(2):233–237, 2013.
- [36] A. Balčytis, M. Ryu, S. Juodkazis, and J. Morikawa. Micro-thermocouple on nanomembrane: thermometer for nanoscale measurements. *Sci. Rep.*, 8:6324, 2018.
- [37] D. Chu, D. T. Bilir, R. F. W. Pease, and K. E. Goodson. Submicron thermocouple measurements of electron-beam resist heating. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 20(6):3044–3046, 2002.
- [38] Y. Nishijima, S. Shimizu, K. Kurihara, Y. Hashimoto, H. Takahashi, A. Balčytis, G. Seniutinas, S. Okazaki, J. Juodkazytė, T. Iwasa, T. Taketsugu, Y. Tominaga, and S. Juodkazis. Optical readout of hydrogen storage in films of Au and Pd. *Opt. Express*, 25(20):24081–24092, 2017.
- [39] L. Novotny and B. Hecht. *Principles of nano-optics*. Cambridge



University Press, Cambridge, UK, 2st edition, 2012.

- [40] D. M. Nace and J. G. Aston. Palladium hydride. i. the thermodynamic properties of  $\text{pd}_2\text{h}$  between 273 and 345°k. *J. Am. Chem. Soc.*, 79(14):3619–3623, 1957.
- [41] W.-Y. Yu, G. M. Mullen, and C. B. Mullins. Hydrogen adsorption and absorption with Pd-Au bimetallic surfaces. *J. Phys. Chem. C*, 117(38):19535–19543, 2013.
- [42] P. M. Quaino, R. Nazmutdinov, L. F. Peiretti, and E. Santos. Unravelling the hydrogen absorption process in Pd overlayers on a Au(111) surface. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 18(5):3659–3668, 2016.
- [43] C. Langhammer, I. Zorič, B. Kasemo, and B. M. Clemens. Hydrogen storage in Pd nanodisks characterized with a novel nanoplasmonic sensing scheme. *Nano Lett.*, 7(10):3122–3127, 2007.
- [44] C. Wadell, S. Syrenova, and C. Langhammer. Plasmonic hydrogen sensing with nanostructured metal hydrides. *ACS Nano*, 8(12):11925–11940, 2014.
- [45] Y. Nishijima, A. Balčytis, G. Seniutinas, S. Juodkazis, T. Arakawa, S. Okazaki, and R. Petruškevičius. Plasmonic hydrogen sensor at infrared wavelengths. *Sens. Mater.*, 29(9):1269–1274, 2017.
- [46] Y. Nishijima, A. Balčytis, S. Naganuma, G. Seniutinas, and S. Juodkazis. Tailoring metal and insulator contributions in plasmonic perfect absorber metasurfaces. *ACS Appl. Nano Mater.*, 1(7):3557–3564, 2018.
- [47] T. Minami, H. Nanto, and S. Takata. Highly conductive and transparent zinc oxide films prepared by rf magnetron sputtering under an applied external magnetic field. *Appl. Phys. Lett.*, 41(10):958–960, 1982.
- [48] G. Xiong, J. Wilkinson, B. Mischuck, S. Tüzemen, K. B. Ucer, and R. T. Williams. Control of *p*- and *n*-type conductivity in sputter deposition of undoped ZnO. *Appl. Phys. Lett.*, 80(7):1195–1197,

2002.

- [49] Y. Wang, T. Tran, P. Surendran, I. Herrera, A. Balčytis, D. Nissen, M. Albrecht, A. Sidorov, and P. Hannaford. Trapping ultracold atoms in a sub-micron-period triangular magnetic lattice. *Phys. Rev. A*, 96(1):013630, 1995.
- [50] P. F. Carcia, A. D. Meinhaldt, and A. Suna. Perpendicular magnetic anisotropy in Pd/Co thin film layered structures. *Appl. Phys. Lett.*, 47(2):178–180, 1985.
- [51] I. Herrera, Y. Wang, P. Michaux, D. Nissen, , P. Surendran, S. Juodkazis, S. Whitlock, R. J. McLean, A. Sidorov, M. Albrecht, and P. Hannaford. Sub-micron period lattice structures of magnetic microtraps for ultracold atoms on an atom chip. *J. Phys. D*, 48(11):115002, 2015.
- [52] R. Schmied, D. Leibfried, R. J. C. Spreeuw, and S. Whitlock. Optimized magnetic lattices for ultracold atomic ensembles. *New J. Phys.*, 12:103029, 2010.
- [53] E. A. Power. Casimir-Polder potential from first principles. *Eur. J. Phys.*, 22(4):453–461, 2001.
- [54] Y.-J. Lin, I. Teper, C. Chin, and V. Vuletić. Impact of the Casimir-Polder potential and Johnson noise on Bose-Einstein condensate stability near surfaces. *Phys. Rev. Lett.*, 92(5):050404, 2004.

## TRUMPOS ŽINIOS APIE DOKTORANTĄ

**Vardas:** Armandas  
**Pavardė:** Balčytis  
**Gimimo data:** 1987 gruodžio 18 d.  
**Gimimo vieta:** Šilutė  
**El. paštas:** armandas.balcytis@gmail.com  
**Telefono Nr.:** +37062875184  
**Išsilavinimas:**  
1994 – 2006 Šilutės pirmoji gimnazija  
2006 – 2010 Fizikos bakalauro diplomas (Cum Laude), Taikomoji  
Fizika, Vilniaus Universitetas  
2010 – 2013 Fizikos magistro laipsnis (Magna Cum Laude),  
Medžiagotyra ir puslaidininkų fizika, Vilniaus  
Universitetas  
2013 – 2018 Doktorantūros studijos, Fizinių ir technologijos  
mokslų centras (Vilnius, Lietuva) ir Swinburno  
technologijos universitetas (Melburnas, Australija)

Vilniaus universiteto leidykla  
Universiteto g. 1, LT-01513 Vilnius  
El. p. [info@leidykla.vu.lt](mailto:info@leidykla.vu.lt),  
[www.leidykla.vu.lt](http://www.leidykla.vu.lt)  
Tiražas 40 egz.