

# Paviršinių darinių formavimas skaidriose dielektrinėse terpėse femtosekundiniais lazerio impulsais

## Femtosecond laser-induced periodic surface structures in transparent dielectric materials

Marius Navickas<sup>1</sup>, Robertas Grigutis<sup>1</sup>, Gintaras Tamošauskas<sup>1</sup>, Vytautas Jukna<sup>1</sup>, Audrius Dubietis<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Vilniaus universitetas, Lazerinių tyrimų centras, Saulėtekio al. 10, LT-10223 Vilnius

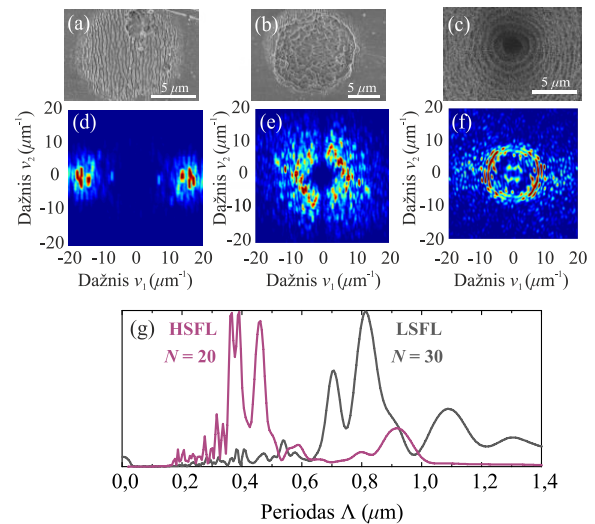
[marius.navickas@ff.vu.lt](mailto:marius.navickas@ff.vu.lt)

Apšvitinus skaidrias ir neskaidrias medžiagas: dielektrikus [1], puslaidininkius [2] ir metalus [3] didelio pasikartojimo dažnio femtosekundiniais lazerio impulsais, formuojasi skirtingo tipo paviršinės struktūrinės modifikacijos – nanoraibuliai, mikrorėžiai ir paviršinės periodinės žiedinės struktūros. Šis reiškinys plačiai tyrinėjamas kaip nauja ir perspektyvi lazerinio medžiagų apdirbimo kryptis, apimanti daugybę taikymo sričių, tokių kaip fotonika, plazmonika, mikrofluidika ir pan. [4], kuriose reikalingas paprastas, greitas ir efektyvus medžiagos optinių, cheminių ir kitų savybių modifikavimas.

Saviorganizuoti kvaziperiodiniai paviršiniai dariniai pagal jų periodiškumą ir gardelės orientaciją yra skirstomi į tris tipus: aukšto erdvinio dažnio (angl. HSFL), žemo erdvinio dažnio (angl. LSFL) bei periodines paviršines žiedines struktūras (angl. LIPASS). Pastebėta, jog HSFL struktūros gardelės orientacija yra statmena lazerio spinduliuotės poliarizacijai, tuo tarpu LSFL struktūros neturi griežtos gardelės orientacijos. Be to, teoriškai HSFL struktūros periodas siekia nuo  $\lambda / n_0$  iki  $\lambda / 2n_0$ , o LSFL maždaug  $\lambda / 2n_0$ , čia  $\lambda$  bangos ilgis, o  $n_0$  medžiagos lūžio rodiklis. Toks reiškinys pirmiausiai buvo pastebėtas lydytame kvarce, o vėliau plačiau tirtas chalkogenidiniuose stikluose [5].

Šiame darbe yra pristatomi didelio pasikartojimo dažnio femtosekundiniais lazerio impulsais sukurti periodinių paviršinių mikro ir nanostruktūrų tyrimai įvairiose dielektrinėse skaidriose medžiagose:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , IAG,  $\text{CaF}_2$  kristaluose bei lydytame kvarce. Eksperimentai buvo atliekami Yb:KGV lazerio impulsais (Pharos, Light Conversion), kurių trukmė pusės aukštyje siekia 180 fs, maksimalus impulsų pasikartojimo dažnis 200 kHz, o centrinis bangos ilgis 1035 nm. Suformuotų paviršiaus darinių vaizdinimas buvo atliekamas Prisma E Thermo Fisher Scientific skenuojančiu elektronų mikroskopu (SEM), o detalesnė šių vaizdų analizė atlikta pasitelkus dvimatę (2D) Furje transformaciją. 1 pav. pavaizduotos modifikuoto safyro paviršiaus SEM nuotraukos rodo, jog naudojant mažą impulsų skaičių (1 (a) pav.) formuojasi vadinamieji nanoraibuliai arba minėtos HSFL struktūros, kurių orientacija statmena žadinančios spinduliuotės poliarizacijos atžvilgiu, o pastarųjų struktūrų 2D Furje spektre (1 (d) pav.) stipriai išreikšti aukšti erdviniai dažniai. Toliau šiek tiek padidinus impulsų skaičių, susiformuoja mikrorėžiai arba LSFL (1 (b) pav.), kurių 2D Furje spektre (1 (e) pav.) dominuoja žemi erdviniai dažniai. Esant santykinai ilgoms ekspozicijos trukmėms arba dideliame impulsų skaičiui, suformuojamos vadinamosios periodinės

paviršiaus žiedinės struktūros arba LIPASS (1 (c) pav.), kurios sudarytos iš centre esančio kraterio su aplink kvaziperiodiškai išsidėsčiusiais žiedais. Toks morfologinis virsmas geriau pastebimas struktūrų periodų spektruose, kurie pavaizduoti 1 (g) pav. Čia aiškiai matyti, jog HSFL atveju dominuoja periodai, mažesni už  $0,45 \mu\text{m}$ , tuo tarpu LSFL struktūros sudarytos iš periodų, didesnių už  $0,65 \mu\text{m}$ . Be to, šis virsmas įvyksta per santykinai trumpą laiko tarpą – vos keletas papildomų lazerio impulsų sukuria ženklus morfologinius pokyčius. Tai buvo pastebėta ir  $\text{CaF}_2$ , IAG kristaluose bei lydytame kvarce, todėl galima daryti išvadą, jog toks virsmas yra universalus.



1 pav. Periodinių nanostruktūrų, suformuotų safyro kristalo paviršiuje su (a) 20, (b) 30 ir (c)  $3 \cdot 10^5$  impulsų SEM nuotraukos ir (d)–(f) jų 2D Furje spektrai. (g) dalis vaizduoja HSFL ir LSFL struktūrų periodų spektrus.

(a)–(c) dalyse pavaizduotos struktūros suformuotos su  $4,2 \text{ J/cm}^2$  energijos tankiu bei 200 kHz impulsų pasikartojimo dažniu.

*Reikšminiai žodžiai: lazeriu indukuotos paviršinės struktūros.*

### Literatūra

- [1] S. Höhm, A. Rosenfeld, J. Krüger and J. Bonse, J. Appl. Phys. **112**, 014901 (2012).
- [2] A. Browiec and H. Haugen, Appl. Phys. Lett. **82**, 4462–4464 (2003).
- [3] K. Okamuro, M. Hashida, Y. Miyasaka, Y. Ikuta, S. Tokita and S. Sakabe, Phys. Rev. B. **82**, 165417 (2010).
- [4] R. Stoian and J.-P. Colombier, Nanophotonics **9**, 4665–4688 (2020).
- [5] X. Yu, D. Qi, H. Wang, Y. Zhang, L. Wang, Z. Zhang, S. Dai, X. Shen, P. Zhang and Y. Xu, Opt. Express **27**, 10087–10097 (2019).