



Dilfuza M. SAPAYEVA,

O'qituvchi-stajyori, RANCH texnologiya universiteti, Urganch, O'zbekiston

E-mail: sapayevadilfuza57@gmail.com. Orcid: 0009-0003-4858-4340

Sunbuloy R. RO'ZIMATOVA,

O'qituvchi-stajyori, RANCH texnologiya universiteti, Urganch, O'zbekiston

E-mail: sunbuloyrozimatova07@gmail.com. Orcid: 0009-0000-3960-3675

UrDU professori, PhD M.Vapayev taqrizi asosida

THE ROLE OF SINGLE-PULSE NANOMORPHOLOGY IN THE FORMATION OF LASER PERIODIC SURFACE STRUCTURES (LIPSS) ON METALLIC SURFACES

Annotation

This study investigates the role of nanomorphology formed after the first laser pulse in the generation of laser-induced periodic surface structures (LIPSS, or "ripples") on metals. Aluminum and stainless steel (AISI 304) were selected as reference materials under irradiation parameters of 515 fs and 1040 nm. It is demonstrated that in stainless steel the surface remains smooth following the first pulse, enabling a well-defined HSFL→LSFL transition, whereas in aluminum the pronounced spiky nanostructures formed after the initial pulse suppress surface plasmon-polariton (SPP) propagation and inhibit LIPSS formation entirely. The findings are corroborated by finite-difference time-domain (FDTD) simulations and two-temperature model (TTM) calculations.

Keywords: laser ablation, LIPSS, nanomorphology, surface electromagnetic waves, two-temperature model, FDTD simulation.

РОЛЬ НАНОМОРФОЛОГИИ, СФОРМИРОВАННОЙ ОДИНОЧНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ, В ОБРАЗОВАНИИ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ.

Аннотация

В данной статье исследована роль наноморфологии, формирующейся после первого лазерного импульса, в образовании лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (LIPSS, «рябь») на металлах. В качестве сравниваемых материалов выбраны алюминий и нержавеющей сталь (AISI 304) при параметрах излучения 515 фс и 1040 нм. Показано, что в нержавеющей стали поверхность остаётся гладкой после первого импульса, что обеспечивает последовательный переход HSFL→LSFL, тогда как в алюминии образующиеся острые наноструктуры блокируют распространение поверхностных плазмон-поляритонов (SPP) и подавляют формирование LIPSS. Полученные результаты подтверждены моделированием методом FDTD и двухтемпературной моделью (TTM).

Ключевые слова: лазерная абляция, LIPSS, наноморфология, поверхностные электромагнитные волны, двухтемпературная модель, моделирование FDTD.

METALLAR YUZASIDA LAZER BILAN INDUKSIYALANGAN DAVRIY TUZILMALAR HOSIL BO'LISHIDA BITTA IMPULS NANOMORFOLOGIYASINING ROLI

Annotatsiya

Ushbu maqolada metallar yuzasida LIPSS ("ripple") hosil bo'lishida birinchi lazer impulsdan keyin vujudga keluvchi nanomorfologiyaning roli o'rganilgan. Alyuminiy va zanglamaydigan po'lat (AISI 304) solishtirma material sifatida tanlangan (515 fs, 1040 nm). Zanglamaydigan po'latda birinchi impulsdan so'ng sirt tekis qolib, HSFL→LSFL tartibli o'tishni ta'minlash, alyuminiyda hosil bo'lgan tik nanotirgaklar SPP tarqalishini blokirovka qilib, LIPSS shakllanishini to'xtatadi. Natijalar FDTD simulatsiyasi va ikki haroratli model (TTM) bilan tasdiqlangan.

Kalit so'zlar: lazer ablatsiyasi, LIPSS, nanomorfologiya, sirt elektromagnit to'lqinlari, ikki haroratli model, FDTD simulatsiyasi.

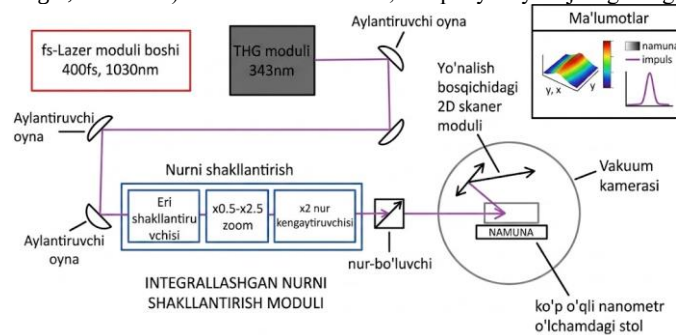
Kirish. Lazer bilan indutsilangan davriy yuzaki tuzilmalar (LIPSS yoki "ripple"lar) - ko'p impulsli ultrakisqa lazer ablatsiyasining tipik natijasidir. Bu hodisa birinchi marta 1965-yilda Birnbaum tomonidan germaniy ustida kuzatilgan [1]. O'tgan ikki o'n yillikda LIPSS deyarli barcha material guruhlari - dielektriklar, yarim o'tkazgichlar va metallarda namoyish etilgan. Ushbu tuzilmalar strukturali bo'yoq, tribologik xususiyatlar, boshqariladigan namlanish va tibbiy implantlardagi hujayralar yopishishini modulyatsiya qilish kabi ko'plab ilovalarda qo'llaniladi [2].

LIPSS hosil bo'lishining hozirgi tushunchasi lazer impulsining fazoviy jihatdan bir xil bo'lmagan yutilishiga asoslanadi. Birinchi impuls ta'sirida sirtagi oldindan mavjud nano-g'adir-budurligi sirt elektromagnit to'lqinlarini (SEW) uyg'otadi. Sirt plasmon-polaritonlari (SPP) va kiruvchi lazer nuri o'rtasidagi interferentsiya natijasida tartibli intensivlik taqsimoti hosil bo'lib, ablatsiya mexanizmlari orqali davriy yuzaki tuzilmalarga aylanadi [3-4]. Biroq, turli metallarda LIPSS hosil bo'lishidagi farqlar - masalan, zanglamaydigan po'lat va titanium qotishmalari yuqori sifatli LIPSS bersa-da, oltin, mis va alyuminiy zaif yoki kuzatilmaydigan LIPSS ko'rsatishi - hanuz to'liq tushuntirilmagan.

Avvalgi tadqiqotlarda bu farqlar asosan termofizik xususiyatlar bilan - xususan, issiqlik o'tkazuvchanligi va elektron-fonon bog'lanish nisbati - izohlanib kelingan [5-6]. Biroq ushbu modellar krater morfologiyasini ideallashtirilgan yoki makroskopik deb hisoblaydi, holbuki eksperimental ma'lumotlar birinchi impuls sirtida sezilarli morfologik o'zgarishlarga olib kelishini ko'rsatadi.

Ushbu maqolada alyuminiy va zanglamaydigan po'latning impulsdan impulsqa morfologik evolyutsiyasi miqdoriy tahlil qilinib, boshlang'ich nanomorfologiyaning keyingi LIPSS rivojlanishiga hal qiluvchi ta'siri ko'rsatiladi.

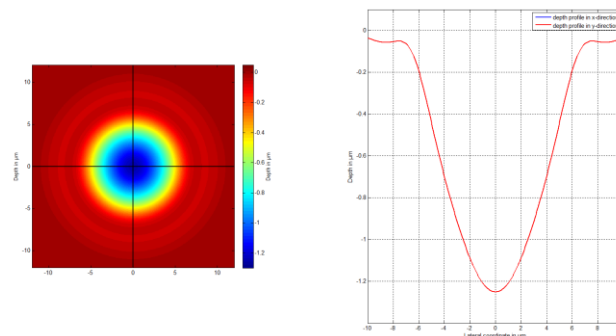
Metodlar. Tajribalar ambient muhitda 1040 nm to'liq uzunligi, 515 fs impuls davomiyligi va 15 μm (e^{-2} darajasida) nur nurchi radiusi bo'lgan ultrakisqa lazer yordamida amalga oshirildi. Nurlanish burchagi $\theta = 35^\circ$, qutblanish p-turdagi (tekislik parallel). Lazer $N = 1$ dan $N = 100$ gacha impuls soni bilan ishladi, 1 Hz takrorlash chastotasida issiqlik to'planishining oldini olish maqsadida foydalanilgan [6-7]. Namunalar sifatida yuqori sof alyuminiy (99,999%) va austenitik zanglamaydigan po'lat (AISI 304) ishlatildi. Alyuminiy uchun ablatsiya ostonasi 0,62 J/sm², zanglamaydigan po'lat uchun 0,25 J/sm² D²-usulida aniqlandi. Tajribalar $1,5 \times \phi_{\text{thr}}$ (ablatsiya ostonasining 1,5 barobari) fluentsida o'tkazildi, bu spallyatsiya rejimiga to'g'ri keladi [7].



1-rasm. Tajriba sxemasi

Yuzaki morfologiya skanerlash elektron mikroskopiyasi (SEM, LYRA3 GMU, Tescan) va atom kuchi mikroskopiyasi (AFM, FusionScope, Quantum Design) yordamida o'rganildi. FDTD simulatsiyalari Lumerical dasturida, 15 nm lateral va 1,5 nm vertikal panjaralar bilan amalga oshirildi. Ikki haroratli model (TTM) esa COMSOL Multiphysics dasturida yechildi, lazer energiyasi elektronlar va panjara o'rtasidagi muvozanatsiz issiqlik uzatishini ta'riflab berdi.

Muhokama va natijalar. Alyuminiyda birinchi impuls ($N = 1$) ta'sirida ablatsiya krateri $S_q = 90$ nm kvadratik o'rtacha g'adir-budurlik bilan keskin teshikchasimon (spiky) nanomorfologiyani namoyish etdi - bu silliqslanmagan sirt qiymatidan taxminan 6 barobar yuqori. AFM o'lchovlari 200 nm ga yaqin vertikal balandlik va 100 nm dan kam lateral o'lchamdagi tik chiqimlarni aniqladi. Yon korrelyatsiya uzunligi $r_c = 78$ nm, $m_{\text{RMS}} = 1,64$ bo'ldi - bu morfologiyani tik (steep) deb tasniflash imkonini beradi.

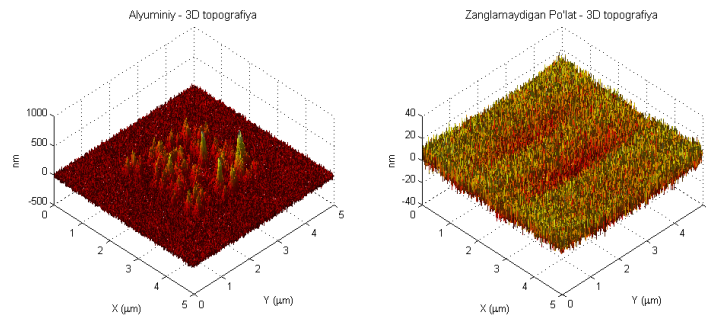


2-rasm. AFM yordamida o'lchangan ablatsiya kraterining chuqurlik xaritasi va gorizont/vertikal yo'nalishlardagi profilari (volfram, 100 impuls, 1,43 J/sm²).

Ikkinchi impulsdan ($N = 2$) so'ng alyuminiyda muhim morfologik o'zgarish kuzatildi: diametri 100–200 nm bo'lgan tarmoqlangan nanoqoziqlar, balandligi 1 μm ga yetuvchi, sferik uchli (≈ 350 nm) ustunlar vujudga keldi. $N \geq 3$ dan boshlab markaziy ablatsiya kraterida hech qanday davriy tuzilmalar kuzatilmadi - na LSFL, na HSFL. Bu holat 0,75 dan $e^2\phi_{\text{thr}}$ gacha bo'lgan barcha fluentalarda $N = 100$ gacha takrorlandi.

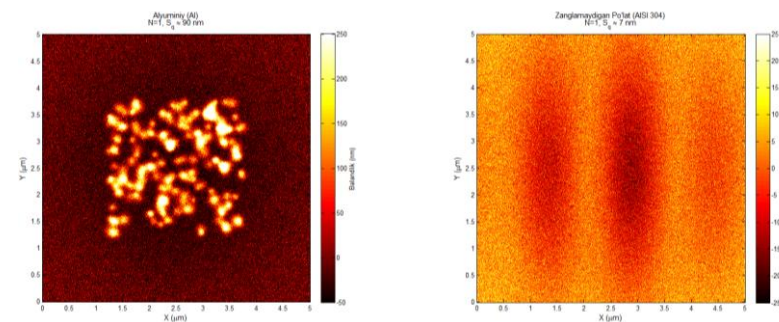
Zanglamaydigan po'latda birinchi impulsdan so'ng sirt $S_q = 6,6$ nm bilan tekis qoldi - spallyatsiya mexanizmi ishlagan bo'lsa-da, molten qavatning qayta qotishidan hosil bo'lgan kichik nanotuzilmalar kuzatildi. Ikkinchi impulsdan ($N = 2$) boshlab lazer qutblanishiga parallel 100 nm tartibli anizotropik nanostrukturalar paydo bo'ldi. $N = 3$ da $\Delta_{\text{HSFL}} = 200$ nm bo'lgan HSFL tuzilmalar, $N = 7-10$ dan boshlab esa lazer qutblanishiga perpendikulyar $\Delta_{\text{LSFL}} = 650$ nm bo'lgan LSFL tuzilmalar namoyon bo'ldi. $N = 20$ da LSFL amplitudasi 125 nm ga yetdi. $N = 100$ dan keyin LSFL to'liq uzunligidan katta davriy tuzilmalarga aylandi.

Alyuminiyda $N = 1$ impulsdan keyin FDTD simulatsiyasi ablatsiya krateri ichida Gauss profiliga nisbatan 2 tartibga yaqin intensivlik kuchayishini ko'rsatdi - bu doimiy ravishda tarqoq yutilish naqshini va davriy modulyatsiyaning yo'qligini ta'kidlaydi. Aksincha, zanglamaydigan po'latda $N = 1$ dan boshlab 650 nm davrlilik silliq davriy intensivlik modulyatsiyasi kuzatildi; bu modulyatsiya $N = 7$ da pik-vodiysiga nisbati 2,2 ga ko'tarildi va $N = 20$ da intensivlik maksimumlari LSFL vodiylariga aniq mos tushdi. To'liq uzunligiga bog'liq FDTD tahlili zanglamaydigan po'lat uchun krater chekkasida qayta tarqalish SPP qo'zg'atilishini tasdiqladi: hisoblangan LIPSS davri analitik SPP dispersiya munosabatiga to'liq mos keldi ($\Lambda_{\text{SPP}} = \lambda / (\xi(\lambda) \pm \sin(\theta))$), ayniqsa orqaga tarqalish holatida.



3-rasm. Birinchi lazer impulsidan ($N = 1$) keyin alyuminiy (chap) va zanglamaydigan po'lat AISI 304 (o'ng) yuzalarining AFM 3D topografiyasi: alyuminiyda teshikchasimon nanomorfologiya ($S_q \approx 90$ nm), zanglamaydigan po'latda esa tekis sirt ($S_q \approx 7$ nm) kuzatiladi (515 fs, 1040 nm).

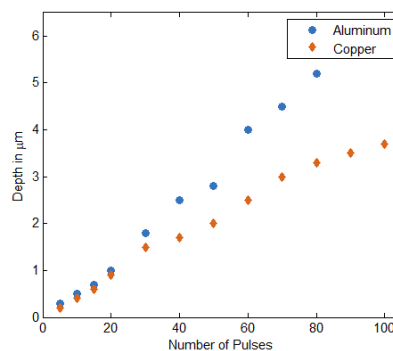
$N = 3$ dan boshlab zanglamaydigan po'latda HSFL hosil bo'lishi Rudenko va boshq. [5] modeli tomonidan bashorat qilingan Marangoni turi sirt kuchlanish kuchlaridan kelib chiqqichi gidrodinamik beqarorlik mexanizmi bilan yaxshi mos keladi. HSFL davri fluentaga bog'liqligi $\Delta_{HSFL} \propto \sqrt{L}$ (L - erish chuqurligi) formulasi bilan tasdiqlandi; bu bog'liqlik TTM tomonidan hisoblangan erish chuqurligining logaritmik fluentaga bog'liqligi $L = d_{eff} \cdot \ln(\phi/\phi_m)$ ($d_{eff} = 17$ nm, $\phi_m = 0,13$ J/sm²) bilan quvvatlanadi.



4-rasm. Birinchi lazer impulsidan ($N = 1$) keyin alyuminiy (chap) va zanglamaydigan po'lat AISI 304 (o'ng) yuzalarining AFM 2D topografik xaritasi: alyuminiyda markaziy zonada tartibsiz teshikchasimon nanotizgaklar ($S_q \approx 90$ nm), zanglamaydigan po'latda esa bir tekis sirt ($S_q \approx 7$ nm) kuzatiladi (515 fs, 1040 nm).

LSFL hosil bo'lishi asosan to'g'ridan-to'g'ri ablatsiya mexanizmi orqali tushuntiriladi [8-10]: SPP/SEW orqali modulyatsiyalangan intensivlik LSFL vodiylarida preferensial material olib ketilishini ta'minlaydi. Kuzatilgan LSFL amplitudasi o'sish tezligi $\approx 5,5$ nm/impuls bo'lib, oddiy to'g'ridan-to'g'ri ablatsiya modeli bilan muvofiqdir. LSFL davrining impuls soniga bog'liq kamayishi ($N = 7$ dan $N = 100$ gacha 650 nm dan 500 nm ga) panjara tomonidan ta'minlangan SPP bog'lanishining progressiv samaradorlik oshishi bilan izohlanadi. Alyuminiyda LIPSS hosil bo'lmasligi teshikchasimon nanomorfologiya bilan bog'liq. $N = 1$ dan keyin hosil bo'lgan tik nanotuzilmalar SEW uchun kuchli tarqatuvchi markazlar rolini o'ynaydi. SPP tarqalish uzunligi kompleks sindirish ko'rsatkichlari asosida hisoblandi: $LSPP \approx 5$ μ m (zanglamaydigan po'lat) va $LSPP \approx 60$ μ m (alyuminiy). Lazer dog'i radiusi $w_0 = 15$ μ m ni hisobga olsak, alyuminiy uchun LSPP qo'zg'atish maydonini sezilarli darajada oshib ketadi.

Tarasov modeli [13] asosida hisoblangan lokalizatsiya uzunliklari $N = 1$ kraterida $L_{fb} = 356$ nm (alyuminiy) va $L_{fb} = 73,6$ μ m (zanglamaydigan po'lat) ni berdi. Krater kengligi $L \approx 30$ μ m bilan solishtirish alyuminiy lokalizatsiya rejimiga ($L/L_{fb} \approx 123$), zanglamaydigan po'latni esa kvazibalistik tarqalish rejimiga ($L/L_{fb} \approx 0,5$) joylashtiradi. Shuning uchun alyuminiyda SPP lar kuchli ko'p marta tarqalishga uchrrab, konstruktiv interferentsiya oldini oladi va tartibli intensivlik naqshining hosil bo'lishini blokirovka qiladi. Biroq, krater chekkasida alyuminiy uchun ham LSFL-turli tuzilmalar kuzatildi: bu yerda sirt egri-bugriligi $m_{RMS} = 0,2$ ga kamayib, kvazibalistik rejim ($L/L_{fb} = 0,4$) bajariladi. Bu natija SPP propagatsiyasi uchun past g'adir-budurlik talabi zarurligini yana bir bor tasdiqlaydi.



3-rasm. Mis va alyuminiy ablatsiya kraterlarining chuqurligi 5 dan 100 gacha impuls soniga bog'liqligi.

Birinchi impulsdan keyin hosil bo'luvchi teshikchasimon nanomorfologiya metalga xos bo'lib, spallyatsiya mexanizmi bilan bog'liq. MD simulatsiyalari bo'yicha spallyatsiya paytida dastlabki bo'shliq nukleatsiya chuqurligi nikel uchun 10–20 nm, alyuminiy uchun ≈ 70 nm, oltin uchun ≈ 100 nm ni tashkil etadi [10-13] - bu eksperimental nanostruktura balandliklari bilan mos keladi. Frenkel gidrodinamik modeli asosida baholangan nanostruktura qayta shakllanuv vaqti $\tau \approx 2-3$ ns (alyuminiy uchun, $\sigma = 1,05$ N/m, $\eta = 1,86$ mPas bilan), MD va eksperimental qotib qolish vaqtlari ≈ 1 ns bilan solishtirganda tezda qotib qoluvchi nanostrukturalar mavjud bo'lishini ko'rsatadi. Demak, issiqlik o'tkazuvchanligi va elektron-fonon bog'lanishi nisbati (κ/G) LIPSS hosil bo'lishiga nafaqat erish chuqurligi va gidrodinamik oqim orqali, balki qotib qolish paytida rivojlanuvchi nanostruktura balandligi va tikligi orqali ham ta'sir ko'rsatadi. Bu ikkala mexanizm o'zaro bog'liqdir: yuqori κ/G nisbatiga ega materiallar (alyuminiy, mis, oltin) chuqurroq nukleatsiya chuqurliklari va natijada tik nanostrukturalarni namoyish etadi.

Xulosa. Ushbu tadqiqot metallar yuzasida LIPSS hosil bo'lishida material-spetsifik birinchi impuls nanomorfologiyasining hal qiluvchi rolini ko'rsatdi. Asosiy xulosalar quyidagicha:

Zanglamaydigan po'latda tekis birinchi impuls kraterlari izchil HSFL→LSFL rivojlanishini ta'minlaydi; LSFL to'g'ridan-to'g'ri ablatsiya, HSFL esa Marangoni-toifali gidrodinamik beqarorlik orqali hosil bo'ladi.

Alyuminiyda birinchi impulsdan keyin hosil bo'luvchi teshikchasimon nanomorfologiya SPP larni lokalizatsiya rejimiga tushiradi, natijada davriy intensivlik naqshi shakllanmaydi va LIPSS kuzatilmaydi.

FDTD simulatsiyalari va TTM hisob-kitoblari nanomorfologiya bilan optik ta'sir o'rtasidagi miqdoriy aloqani tasdiqladi.

Birinchi impuls nanomorfologiyasi - metalning κ/G nisbati bilan bog'liq bo'lgan - LIPSS sezgirlikni belgilaydigan qo'shimcha, lekin bevosita parametr sifatida ko'rib chiqilishi kerak.

Ushbu natijalarga asoslanib, alyuminiy, mis va oltindek "qiyin" metallarda LIPSS sifatini oshirish uchun impuls davomiyligi va fluentani maqbullashtirish orqali dastlabki impuls paytida teshikchasimon nanostrukturalar hosil bo'lishini kamaytirish perspektivli yo'nalish hisoblanadi.

ADABIYOTLAR

1. Birnbaum M. Semiconductor surface damage produced by ruby lasers // J. Appl. Phys. - 1965. - Vol. 36. - P. 3688.
2. Fauchet P.M., Siegman A.E. Surface ripples on silicon and gallium arsenide under picosecond laser illumination // Appl. Phys. Lett. - 1982. - Vol. 40. - P. 824.
3. Bonse J., Krüger J., Höhm S., Rosenfeld A. Femtosecond laser-induced periodic surface structures // J. Laser Appl. - 2012. - Vol. 24. - P. 042006.
4. Bonse J., Hohm S., Kirner S.V., Rosenfeld A., Kruger J. Laser-induced periodic surface structures - A scientific evergreen // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. - 2017. - Vol. 23. - P. 9000615.
5. Bonse J., Gräf S. Ten open questions about laser-induced periodic surface structures // Laser Photonics Rev. - 2020. - Vol. 14. - P. 2000215.
6. Rudenko A., Mauchair C., Garrelie F., Stoian R., Colombier J.-P. Self-organization of surfaces on the nanoscale by topography-mediated selection of quasi-cylindrical and plasmonic waves // Phys. Rev. B. - 2019. - Vol. 99. - P. 235412.
7. Tsibidis D., Lingos P., Stratakis E. Controlling laser-induced surface structures by multi-beam irradiation // Opt. Lett. - 2022. - Vol. 47. - P. 4251.
8. Zhigilei L.V., Lin Z., Ivanov D.S. Atomistic modeling of short pulse laser ablation of metals: connections between melting, spallation, and phase explosion // J. Phys. Chem. C. - 2009. - Vol. 113. - P. 11892.
9. Rudenko A. et al. High-frequency periodic patterns driven by non-radiative fields coupled to nanostructure-induced near-fields // Acta Mater. - 2020. - Vol. 194. - P. 93.
10. Gnilitzki I. et al. High-speed manufacturing of highly regular femtosecond laser-induced periodic surface structures // Sci. Rep. - 2017. - Vol. 7. - P. 8485.
11. Winter J. et al. Ultrashort single-pulse laser ablation of stainless steel, aluminium, copper and its surface structuring potential // Opt. Express. - 2021. - Vol. 29. - P. 14561.
12. Rethfeld B., Ivanov D.S., Garcia M.E., Anisimov S.I. Modelling ultrafast laser ablation // J. Phys. D: Appl. Phys. - 2017. - Vol. 50. - P. 193001.
13. Abou-Saleh A. et al. Spallation-induced roughness promoting high spatial frequency nanostructure formation on Cr // Appl. Phys. A. - 2018. - Vol. 124. - P. 308.
14. Tarasov Y.V., Stadnyk O.M. Electrodynamics of rough surfaces and Anderson localization of surface plasmon polaritons // Phys. Rev. B. - 2023. - Vol. 108. - P. 214202.