

ДОСЛІДЖЕННЯ ЛАЗЕРНО-ІНДУКОВАНИХ ПЕРІОДИЧНИХ ПОВЕРХНЕВИХ СТРУКТУР, СТВОРЕНИХ У РІЗНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Я. А. Заїка^{1,а}, Є. С. Бутакова^{1,2}, А. М. Негрійко^{1,2}

¹ Навчально-науковий Фізико-технічний інститут

² Інститут фізики НАН України

Анотація

У роботі досліджено формування лазерно-індукованих періодичних поверхневих структур (LIPSS) на молібденових дзеркалах під дією імпульсного лазерного випромінювання в різних середовищах. Показано, що зміна середовища суттєво впливає на морфологію та ступінь впорядкованості поверхневого рельєфу, а також на характер модифікації дзеркальної поверхні.

Ключові слова: Лазерно-індуковані періодичні поверхневі структури, дифракція, мікроструктура поверхні

Вступ

Лазерно-індуковані періодичні поверхневі структури (LIPSS) є перспективним інструментом функціоналізації поверхонь, оскільки дають змогу цілеспрямовано змінювати їхні оптичні, трибологічні, хімічні та змочувальні властивості [1, 2, 3]. Завдяки високій просторовій роздільній здатності, відтворюваності та гнучкості керування параметрами лазерне структурування широко застосовується для формування мікро- та нанорельєфів на металах і напівпровідниках, зокрема для створення функціональних поверхонь із заданими властивостями [1, 3, 4].

Попри значний обсяг експериментальних даних, фізичні механізми формування LIPSS залишаються предметом активних дискусій [2, 5, 4]. Класичні моделі, засновані на інтерференції падаючого випромінювання з поверхневими електромагнітними хвилями, адекватно описують виникнення низькочастотних за просторовою частотою структур на гладких однорідних поверхнях [6, 2]. Водночас такі підходи виявляються недостатніми для пояснення формування LIPSS на попередньо текстурованих або шорстких підкладках, а також для опису квазіперіодичних і надхвильових морфологій, що відзначається в сучасних оглядових роботах [2, 5, 4].

Численні дослідження свідчать, що еволюція лазерно-індукованого рельєфу визначається спільною дією електромагнітних, плазмових і гідродинамічних процесів [7, 5, 4]. Просторовий перерозподіл енергії поглинання внаслідок поширення лазерного випромінювання в неоднорідному йонізованому середовищі, розвиток нестійкостей розплавленого шару та періодично модульовані потоки речовини можуть суттєво впливати на період, контраст і стабільність

LIPSS [7, 5, 8].

У зв'язку з цим особливого значення набувають дослідження механізмів формування та модифікації LIPSS за різних режимів лазерної обробки, зокрема в умовах багатостадійного та рідинно-асистованого опромінення, де важливу роль відіграють додаткові плазмові й гідродинамічні ефекти [8, 5, 4]. Такі дослідження є ключовими як для поглибленого фундаментального розуміння нелінійних процесів взаємодії інтенсивного лазерного випромінювання з речовиною, так і для подальшої розробки функціональних поверхонь із керованими властивостями для застосувань у трибології, фотоніці, сенсоричі та біомедичній інженерії [1, 3, 2].

Метою роботи є дослідження особливостей формування LIPSS на поверхні молібденового дзеркала під дією імпульсного лазерного випромінювання в різних середовищах, в яких здійснюється лазерна обробка. Основну увагу зосереджено на порівнянні морфології сформованих структур, ступеня впорядкованості поверхневого рельєфу та характеру модифікації дзеркальної поверхні після опромінення в різних умовах.

1. Експериментальна установка

Для дослідження формування LIPSS на поверхні молібденових дзеркал використовувалася експериментальна установка на основі імпульсного лазера. В основі імпульсного лазера на ітрій-алюмінієвому гранаті з домішками неодиму Nd:YAG з модульованою добротністю. Характеристики випромінювання становили: енергія випромінювання $P = 1$ Дж, частота випромінювання $\nu = 4$ Гц, довжина хвилі, що випромінювалася, $\lambda = 1.06$ мкр, тривалість імпульсу $t = 130$ нс.

^аzaika.yana@lil.kpi.ua

Лазерне випромінювання спрямовувалося на поверхню зразка з метою модифікації поверхневого шару та формування періодичного мікро- і нанорельєфу.

У роботі було використано шість зразків молібденового дзеркала з початково гладкою поверхнею. Кожен зразок оброблявся в окремому середовищі для дослідження впливу навколишніх умов на процес формування LIPSS та морфологію отриманих структур. Як робочі середовища було обрано повітря, дистильовану воду, ізопропіловий спирт, гліцерин, імерсійна речовина для мікроскопії та вазелінову олію.

Під час експерименту зразки розміщувалися таким чином, щоб поверхня молібденового дзеркала перебувала безпосередньо в досліджуваному середовищі в зоні дії лазерного випромінювання. Такий підхід дав змогу порівняти особливості лазерної модифікації поверхні в середовищах, що відрізняються оптичними та теплофізичними властивостями, зокрема в'язкістю, прозорістю, умовами тепловідведення та характером взаємодії з продуктами лазерної абляції.

Після опромінення проводився порівняльний аналіз стану поверхні зразків з метою виявлення відмінностей у характері сформованого рельєфу залежно від середовища обробки. Така схема експерименту дала можливість оцінити роль навколишнього середовища у процесах самоорганізації поверхневих структур на молібдені під дією імпульсного лазерного випромінювання.

Характерний період розміщення структур пов'язаний з довжиною хвилі. Ми поставили задачу перевірити цю залежність з різними показниками заломлення, а саме: повітря, дистильована вода, ізопропіловий спирт, гліцерин, імерсійна речовина для мікроскопії та вазелінова олія.

2. Обробка результатів

Для кожного зразка лазерне опромінення здійснювали на трьох різних відстанях відносно фокальної площини: у фокусі, на відстані 4.3 см від фокуса та на відстані 7.5 см від фокуса, що давало розміри пучка на поверхні відповідно 0.5 мм, 1.2 мм та 2.6 мм (рис. 1). Інтенсивність лазерного випромінювання складала відповідно $4 \cdot 10^9 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$, $7 \cdot 10^8 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$ та $1.5 \cdot 10^9 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$. Такий підхід дав змогу простежити вплив ступеня дефокусування лазерного пучка на характер модифікації поверхні молібденового дзеркала та на умови формування LIPSS. Зі зміною положення зразка відносно фокуса змінювалися розміри плями опромінення, густина енергії та, відповідно, режим взаємодії лазерного випромінювання з поверхнею.

Установлено, що виражена дифракційна картина спостерігалася лише на тих ділянках поверхні, які оброблялися на найбільшій відстані від фокуса. Це може свідчити про те, що саме за таких умов формувалася більш впорядкований або більш однорідний періодичний рельєф, здатний ефективно дифрагувати падаюче світло. Для ділянок, оброблених у фокусі або на меншому віддаленні від нього, дифракційний

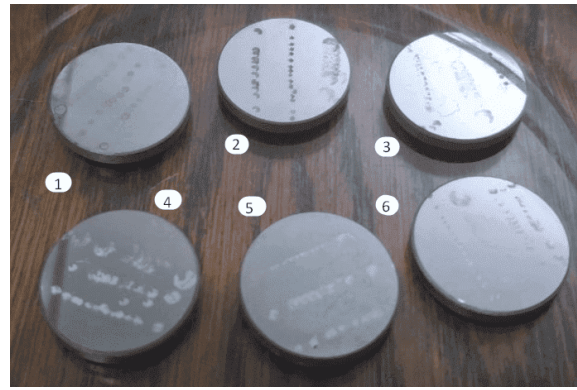


Рис. 1. Фото LIPSS після опромінення імпульсним лазером у середовищах: 1) повітря, 2) дистильована вода, 3) ізопропіловий спирт, 4) гліцерин, 5) імерсійна рідина для мікроскопії, 6) вазелінова олія

ефект був відсутній або виражений значно слабше, що, ймовірно, пов'язано з іншим характером поверхневої модифікації, меншою регулярністю структур або надмірною інтенсивністю локальної дії лазерного випромінювання.

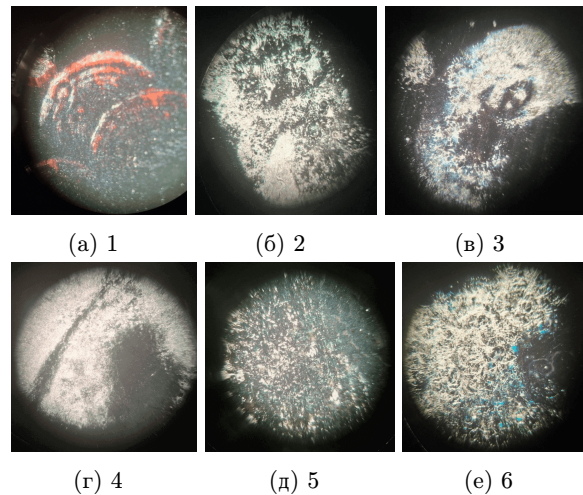


Рис. 2. Фото LIPSS під мікроскопом після опромінення імпульсним лазером у середовищах: (а) повітря, (б) дистильована вода, (в) ізопропіловий спирт, (г) гліцерин, (д) імерсійна рідина для мікроскопії, (е) вазелінова олія

Період LIPSS тісно пов'язаний із довжиною хвилі лазерного випромінювання, оскільки саме хвильова природа світла визначає характер просторового перерозподілу енергії на поверхні матеріалу. Для класичних LIPSS характерно, що їхній період є співрозмірним із довжиною хвилі випромінювання або її частиною, тому зміна ефективної довжини хвилі в зоні взаємодії може призводити до зміни відстані між сусідніми поверхневими структурами.

Відомо, що довжина хвилі випромінювання в середовищі визначається співвідношенням $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$, де λ_0 — довжина хвилі у вакуумі, а n — показник заломлення середовища. Таким чином, зі збільшенням показника заломлення середовища ефективна дов-

жина хвилі лазерного випромінювання зменшується. Оскільки період LIPSS пов'язаний з ефективною довжиною хвилі, зміна середовища може впливати на геометричні параметри сформованих структур.

Саме тому в роботі було використано декілька середовищ — повітря, дистильовану воду, ізопропіловий спирт, гліцерин, імерсійну речовину для мікроскопії та вазелінову олію. Такий вибір дає змогу простежити, як зміна оптичних властивостей навколишнього середовища, насамперед показника заломлення, впливає на умови формування LIPSS на поверхні молібденового дзеркала. Крім того, різні середовища відрізняються не лише оптичними, а й теплофізичними характеристиками, що також може позначатися на процесах лазерної абляції, плавлення та самоорганізації поверхневого рельєфу.

Під час аналізу отриманих структур за допомогою оптичної мікроскопії всі зразки спостерігалися під однаковим кутом. Це є важливим, оскільки LIPSS являють собою періодичний рельєф, здатний дифрагувати світло, а візуальне забарвлення поверхні суттєво залежить від геометрії спостереження та освітлення. За однакових умов спостереження відмінності в кольорі на мікрофотографіях можна пов'язувати з відмінностями у дифракції світла на сформованих структурах.

Отже, кольори, що спостерігаються на зображеннях поверхні під мікроскопом, не є власним кольором матеріалу, а зумовлені дифракційними та інтерференційними ефектами на періодичному рельєфі. Різний колір окремих ділянок свідчить про відмінності у просторовому періоді, впорядкованості або орієнтації LIPSS.

Висновки

У даній роботі досліджено формування лазерно-індукованих періодичних поверхневих структур (LIPSS) на поверхні молібденового дзеркала під дією імпульсного лазерного випромінювання в різних навколишніх середовищах.

Показано, що зміна середовища суттєво впливає на механізми самоорганізації поверхні та на характеристики сформованих LIPSS. Це може бути пов'язано зі зміною умов розширення плазми, інтенсивності повторного осадження продуктів абляції, ефективності тепловідведення та ступеня хімічної взаємодії поверхні з навколишнім середовищем, що узгоджується із загальними уявленнями про роль плазмових, електромагнітних і гідродинамічних процесів у формуванні лазерно-індукованого рельєфу.

Отримані результати можуть бути використані

для оптимізації режимів лазерного структурування молібденових поверхонь і керованого формування функціональних мікро- та наноструктур для оптичних і технічних застосувань.

Перелік використаних джерел

1. Vorobyev A. Y., Guo C. Direct Femtosecond Laser Surface Nano/Microstructuring and Its Applications // *Laser & Photonics Reviews*. — 2013. — Vol. 7, no. 3. — P. 385–407. — DOI: [10.1002/lpor.201200017](https://doi.org/10.1002/lpor.201200017).
2. Laser-Induced Periodic Surface Structures – A Scientific Evergreen / J. Bonse, J. Krüger, S. Höhm, A. Rosenfeld // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. — 2012. — Vol. 19, no. 3. — P. 9000617. — DOI: [10.1109/JSTQE.2012.2208468](https://doi.org/10.1109/JSTQE.2012.2208468).
3. Applications of Laser-Induced Periodic Surface Structures (LIPSS) / A. Neto, J. Bonse, [et al.] // *Proc. SPIE 10092, Laser-based Micro- and Nanoprocessing XI*. — 2017. — 100920B. — DOI: [10.1117/12.2250911](https://doi.org/10.1117/12.2250911).
4. Analysis of Models of Formation of Laser-Induced Periodic Surface Structures (LIPSS) / B. O. Aleksenko, S. S. Dobrotvorskiy, Y. V. Basova, D. V. Trubin, P. Zawadzki, M. Kościński // *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The Series: Mechanization and Automation of Production Processes*. — 2025. — No. 4. — P. 183–190. — DOI: [10.32782/msnau.2025.4.26](https://doi.org/10.32782/msnau.2025.4.26).
5. Ten Open Questions about Laser-Induced Periodic Surface Structures / J. Bonse, J. Epperlein, D. Spaltmann, [et al.] // *Nanomaterials*. — 2021. — Vol. 11, no. 12. — P. 3326. — DOI: [10.3390/nano11123326](https://doi.org/10.3390/nano11123326).
6. Laser-Induced Periodic Surface Structure. I. Theory / J. E. Sipe, J. F. Young, J. S. Preston, H. M. van Driel // *Physical Review B*. — 1983. — Vol. 27, no. 2. — P. 1141–1154. — DOI: [10.1103/PhysRevB.27.1141](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.27.1141).
7. Gurevich E. L., Gurevich S. V. Laser-Induced Periodic Surface Structures as a Manifestation of Self-Organization Processes // *Applied Surface Science*. — 2016. — Vol. 374. — P. 56–60. — DOI: [10.1016/j.apsusc.2015.08.127](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.08.127).
8. Liquid-Assisted Laser Nanotexturing of Silicon: Onset of Hydrodynamic Processes Regulated by Laser-Induced Periodic Surface Structures / Y. Bordaenko [et al.]. — 2023. — arXiv: [2308.15778](https://arxiv.org/abs/2308.15778) [[physics.optics](https://arxiv.org/abs/2308.15778)].