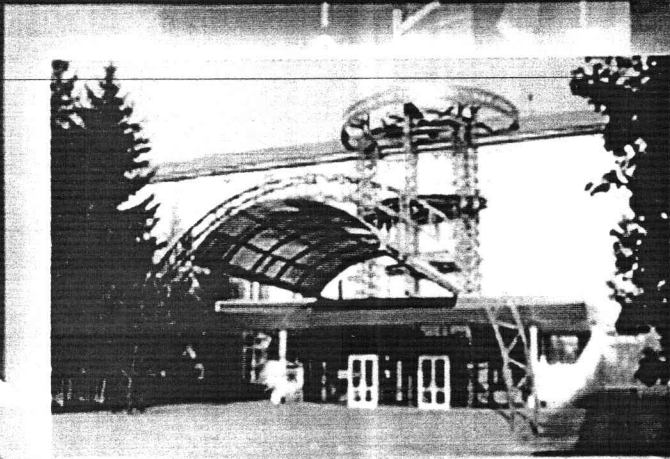


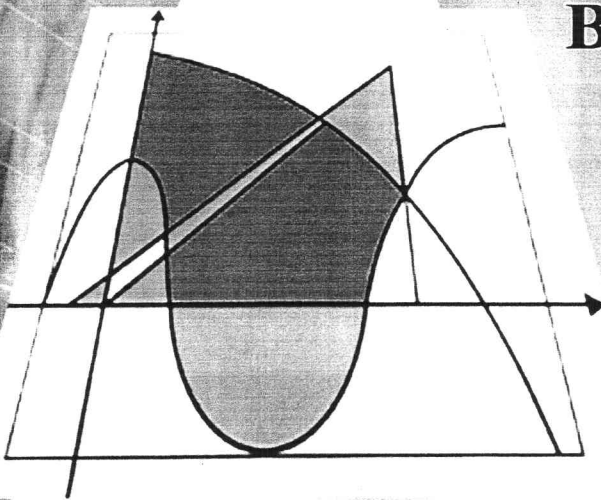
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



ЛУЦЬКИЙ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ  
ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ

# НАУКОВІ НОТАТКИ

Випуск 59



ЛУЦЬК - 2017

Хом'як Б. Я.

# **НАУКОВІ ПОТАТКИ**

**Міжвузівський збірник  
(за галузями знань «Технічні науки»)**

**Випуск 59  
2017**

**Луцьк 2017**

## РЕДАКЦІЙНА РАДА

Пустюльга С.І., декан МБФ, Луцький НТУ, д.т.н., професор; Рудь В.Д., зав. кафедри, Луцький НТУ, д.т.н., професор; Савчук П.П., ректор, Луцький НТУ, д.т.н., професор; Шваб'юк В.І., Луцький НТУ, д.т.н., професор; Заболотний О.В., проректор, Луцький НТУ, к.т.н., доцент.

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Рудь В.Д., д.т.н., професор, Луцький НТУ (відповідальний редактор); Пустюльга С.І., д.т.н., професор, Луцький НТУ (заступник відповідального редактора); Заболотний О.В., к.т.н., доц., Луцький НТУ (заступник відповідального редактора); Савіюк І.В., асистент, Луцький НТУ (відповідальний секретар); Бобир М.І., д.т.н., професор, НТУ України "КПІ"; Гевко Б.М., д.т.н., професор, Тернопільський НТУ; Дядюра К.О., д.т.н., професор, Сумський державний університет; Жигуц Ю.Ю., д.т.н., професор, ДВНЗ Ужгородський національний університет; Кіндрачук М.В., д.т.н., професор, Національний Авіаційний університет; Лотиш В.В., к.т.н., доц., Луцький НТУ; Майстренко А.Л., д.т.н., член-кореспондент НАН України, Інститут надтвердих матеріалів; Максимович В.М., д.ф.-м.н., професор, Луцький НТУ; Пальчевський Б.О., д.т.н., професор, Луцький НТУ; Петраков Ю.В., д.т.н., професор, НТУ України "КПІ"; Петровський В.Я., д.т.н., професор, інститут проблем матеріалознавства НАН України; Повстяной О.Ю., к.т.н., доц., Луцький НТУ; Савчук П.П., д.т.н., професор, Луцький НТУ; Струтинський В.Б., д.т.н., професор, НТУ України "КПІ"; Студеняк І.П., д.т.н., професор, ДВНЗ Ужгородський національний університет; Шваб'юк В.І., д.т.н., професор, Луцький НТУ; Штери М.Б., д.т.н., професор, Інститут проблем матеріалознавства НАН України; Ярошевич М.П., д.т.н., професор, Луцький НТУ; Allison Macmillan, професор, доктор PhD, Глїндворський університет (Уельс, Великобританія); Драган О.В., к.т.н., доцент, Брестський державний технічний університет (Білорусь); Патер Збігнев, д.т.н., професор, Люблінська політехніка (Польща); Геворк Петросян, д.т.н., професор, Вірменський державний університет (Вірменія); Дімітер Ставнев, д.т.н., професор, Технічний університет м. Варни (Болгарія); Дешка Маркова, д.т.н., професор, Технічний університет м. Габрово (Болгарія)

Рекомендовано до друку Вченою радою Луцького національного технічного університету, протокол № 10 від 26.05.2017 р.

Свідоцтво Міністерства юстиції України про державну реєстрацію:

Серія КВ №15901-4373ПР від 13.11.2009 р.

Включено до Переліку наукових фахових видань України наказ МОН України № 528 від 12.05.2015 року та в наукометричну базу РИНЦ.

ISSN: 24-15-39-66

© Луцький національний технічний університет, 2017 р.

## ШАНОВНІ ДОПИСУВАЧІ, КОЛЕГИ!

Згідно наказу МОН України № 528 від 12.02.2015 р. затверджено Міжвузівський збірник наукових праць «НАУКОВІ НОТАТКИ», що видається Луцьким національним технічним університетом, як наукове фахове видання України.

В збірнику публікуються результати теоретичних та експериментальних досліджень, які раніше не висвітлювались в друці. Враховуючи, що збірник є фаховим виданням, в ньому корисно друкувати результати дисертаційних досліджень на здобуття наукового ступеня кандидата та доктора технічних наук за галузями знань "Технічні науки".

В даному збірнику надруковані розгорнуті доповіді, що були представлені на Міжнародній науково-практичній конференції «*Матеріали і покриття в екстремальних умовах: теоретичні і експериментальні основи технологій виготовлення*» і рекомендовані до друку організаційним комітетом конференції.

Довідки за тел. (0332) 26-25-19 e-mail: [notatki@ukr.net](mailto:notatki@ukr.net)

Наша адреса:

43018, м. Луцьк, вул. Потебні, 56

Луцький національний технічний університет,  
редакція міжвузівського збірника "Наукові нотатки"

Веб-сайт збірника: <http://notatki.com.ua>

*З повагою,*

*Відповідальний редактор,  
професор Луцького НТУ*

*В.Д. Рудь*

ЗМІСТ	
Зміст.....	4
Абеліхіна О.В., Чернега С.М. Прогнозування швидкості розвитку корозійних пошкоджень на крилах літаків з сплавів В93Т1 і Д16Т.....	9
Бабій Л.О. Особливості повзучості сталі 2.25 Cr-1Mo, деградованої за жорстких температурно-силових умов експлуатації.....	15
Барсуков В.З., Сеник І.В., Куринтя Я.А., Савченко Б.М. Дослідження електрофізичних характеристик композитів «ПВХ-вуглець» для захисту від електромагнітного випромінювання.....	22
Білошицький М.В., Татарченко Г.О., Білошицька Н.І., Уваров П.Є. Технологія отримання порошку міді з відходів промисловості.....	27
Василів Х.Б., Винар В.А., Широков В.В., Рацька Н.Б., Арендар Л.А., Хлопик О.П. Трибологічна поведінка залізвуглецевих сплавів за впливу дифузійного і залишкового водню.....	32
Вдовиченко В.О. Структура оцінки ефективності міського громадського пасажирського транспорту з позицій сталого розвитку.....	38
Вишняков Л.Р., Морозова В.М., Варченко В.Т., Мороз В.П., Тульженкова О.С., Сичкарь Т.Г. Про властивості «вторинних» епоксиполімерів з наповнювачами з відходів вуглецьпластиків.....	45
Войтік Т.Г., Полстасв Г.С. Лівосторонні матричні рівняння з двома трикутними невідомими.....	51
Ганулів Б.К. Вплив покриття анодного типу на основі цинку та алюмінію на корозійно-втомну міцність сталі 28Х2МФБД.....	58
Гарост О.І. Макро- і мікро склад та структура економнолегованих зносостійких чавунів та особливості їх зміни в процесі термічної обробки.....	61
Гасан Ю.Г., Дроздова О.В. Хімічний розчин для гідрофобізації будівельних матеріалів на основі гіпсової в'язучої речовини. спосіб обробки таких виробів.....	69
Гребенок Т.П., Бродніковський Д.М., Іценко А.І., Ковальченко М.С. Дослідження мікроструктури та випробування на біаксіальний вигин карбідної системи TiC-VC-Mo <sub>2</sub> C-NbC.....	71
Грудецький Р.Я. Електронний журнал як засіб обліку навчальних занять і успішності студентів у ВНЗ.....	76
Грудецький Р.Я. Методика оптимізації лінії зв'язку за допомогою моделювання в пакеті OPNET.....	80
Грудецький Р.Я., Маркіна Л.М., Сомов Д.О. Комп'ютерна модель розрахунку освітлення приміщень.....	85
Дмитріюк М.В., Гусачук Д.А., Парфентьева І.О. Еволюція структури шарів тертя при зношуванні мідистого чавуну.....	91
Дубок А.В., Лаїшева В.В., Шинкарук О.В. Багатошарові біокерамічні покриття як спосіб підвищення якості та довговічності ендопротеза кульшового суглоба.....	96
Єніфанцева Т.О. Вплив кількості включень жорсткої фази вольфрамового сплаву у складу композиційного матеріалу на основі міді на формування структури неспечених порошкових облицьовок кумулятивних зарядів.....	104
Жигуц Ю.Ю., Опачко І.І., Хомяк Б.Я., Лазар В.Ф. Особливості ефективного напилення шаруватих структур періодичним лазерними імпульсами.....	112
Зайцев Р.В., М.В. Кириченко, Зайцева Л.В., Веселова Н.В. Підвищення ефективності промислових кремнієвих фотоелектричних перетворювачів для гібридного фотоенергетичного модуля.....	119
Зайцев Р.В. Розробка теплопровідного діелектричного контакту для сонячних елементів фотоенергетичної установки.....	126
Каверинський В.В., Троїцян А.І., Баглок Г.А., Сухенко З.П. Моделювання процесу розпаду аустеніту в об'ємі матеріалу.....	132
Калюженій В.Л., Потятиник А.М. Аналіз схем холодного видавлювання вісесиметричних порожнистих виробів.....	137

## ONTENTS

<i>Contents</i> .....	4
<i>Abolikhina E.V., Chernega S.M.</i> Prediction of progression rate corrosion damages on the wings of aircraft from V93T1 and D16T alloys.....	9
<i>Babiy L.O.</i> The creep features of steel 2.25 Cr-1Mo degraded at hard temperature-loading operation conditions.....	15
<i>Barsukov V.Z., Senyk I.V., Kuryptia Ya.A., Savchenko B.M.</i> Investigation of electrophysical characteristics of the PVC-carbon composites for electromagnetic shielding.....	22
<i>Beloshitskiy N., Tatarchenko H., Beloshitska N., Uvarov P.</i> Technology of obtaining copper powder from waste industry.....	27
<i>Vasylyv Kh., Vynar V., Shyrovov V., Ratska N., Arendar L., Khlopyk O.</i> Tribological behavior of iron-carbon alloys under the influence of diffusion and residual hydrogen.....	32
<i>Vdovychenko V.</i> Structure of the evaluation of the efficiency of urban public passenger transport from the standpoint of sustainable development.....	38
<i>Vishnyakov L., Morozova V., Varchenko V., Moroz V., Tulzhenkova A., Sichkar G.</i> Properties of "secondary" epoxy polymers with fillers from wastes of carbon fibre reinforced plastic.....	45
<i>Voytik T., Poletaev G.</i> Left-sided matrix equations with two triangular unknowns.....	51
<i>Ganulich B.K.</i> Influence of coverage of anodic type on the basis of zink and aluminum 28X2MФБД became oncorrosive-tireless durability.....	58
<i>Harast A.I.</i> Macro- and microcomposition and structure of sparingly alloyed wear-resistant cast iron and especially their changes during thermal treatment.....	61
<i>Hasan Y.G., Drozdova O.V.</i> Chemical solution for the hydrophobization of building materials based on gypsum binders, method for processing of such equipment.....	69
<i>Hrebenok T.P., Brodnikovskij D.N., Itsenko A.I., Kovalchenko M.S.</i> Investigation of the microstructure and test on biaxial bending of the TiC-VC-Mo <sub>2</sub> C-NbC carbide system.....	71
<i>Hrudetsky R.</i> Electronic journal as a means of accounting classes and success of students in universities.....	76
<i>Hrudetsky R.</i> Method optimization communications line through modeling in OPNET package.....	80
<i>Hrudetsky R., Msrkina L., Somov D.</i> Computer model calculation lighting.....	85
<i>Dmytryuk N., Husachuk D., Parfentyeva I.</i> Evolution of the structure of the friction layers in the wear of copper cast iron.....	91
<i>Dubok A., Lashneva V., Shynkaruk A.</i> Multilayered bioactive ceramic coatings – a way to improve quality and service life of total hip endoprosthesis.....	96
<i>Epifantseva T.A.</i> Influence of quantity of inclusions of hard phase of tungsten alloy in composition of copper composite material for the formation of structure of unbeated powder clocks of cumulative charges.....	104
<i>Zhiguts Yu., Opachko I., Hom'ak B., Lazar V.</i> The features of effective lining of layer structures by periodic laser pulses.....	112
<i>Zaytsev R.V., Kirichenko M.V., Zaytseva L.V., Veselova N.V.</i> Increasing of the effectiveness of the industrial silicon photo-electric transformers for the hybrid photo-power module.....	119
<i>Zaitsev R.V.</i> Development of thermal conducting dielectric contact for solar cells of photoenergy system.....	126
<i>Kaverinskiy V.V., Trotsan A.I., Bagiluk G.A., Sukhenko Z.P.</i> Simulation of volumetric austenite transformation.....	132
<i>Kaljuzhny V., Potjatynyk A.</i> Shema analysis of cold extruding of the axismetric hollow articles.....	137
<i>Koval I.V., Bodrova L.H., Kramar H.M., Marynenko S.Yu., Kovalchuk Ya.O.</i> Investigation of the polycarbide hard alloys fracture nature under thermo-cycle addings.....	144
<i>Krestyanpol O.A.</i> The influence of packaging with composite materials on food products.....	149
<i>Krechkovska H., Student O., Svirska L.</i> Heterogeneity of carbide distribution in the structure of the operated 12X1MF steel from different zones of the bending bypass of the main steam pipeline of HPP.....	154
<i>Krechkovska H.V.</i> Fractodiagnosics of the 15X1M1Φ steel state after service on the steam pipelines of hpp with account of the shut-down processes effect.....	159
<i>Kud I., Vasytkivska M., Ieremenko L., Lichodid L., Uvarova I., Zyatkevich N.</i> Peculiarities of formation of silicides of transition metals at mehanosynthesis.....	165
<i>Laptiev A.V., Tolochyn O.I., Yevych Ya.I., Ocun I.Yu., Mystlyvchenko O.M.</i> The Cr <sub>20</sub> Ni <sub>80</sub> -32.5% TiC composite obtained from powders by impact sintering.....	175

УДК: 620.22: 669.017

Ю.Ю. Жигуц<sup>1</sup>, І.І. Опачко<sup>1</sup>, Б.Я. Хомяк<sup>2</sup>, В.Ф. Лазар<sup>2</sup>ДВНЗ «Ужгородський національний університет»<sup>1</sup>Мукачівський державний університет<sup>2</sup>ОСОБЛИВОСТІ ЕФЕКТИВНОГО НАПИЛЕННЯ ШАРУВАТИХ СТРУКТУР  
ПЕРІОДИЧНИМ ЛАЗЕРНИМИ ІМПУЛЬСАМИ

*З метою оптимізації технологічного процесу ефективного застосування ексимерних лазерів для потреб плівкових технологій необхідна інформація про основні параметри пари, що конденсується на підкладку. Однак, властивості плівок, отриманих розпиленням мішені наносекундними лазерними імпульсами і властивості парової фази практично не досліджувались. В той же час, мас-спектрометричні та зондові дослідження парової фази дають змогу визначити ряд важливих параметрів конденсації, оптимізувати сам процес осадження, внести ясність в розуміння фізики випаровування складних мішеней. Результатом проведених робіт стало розроблення способу формування періодичних структур при опроміненні цугом лазерних імпульсів, що забезпечує отримання якісних гетерогених та надграткових структур. Експериментальні і теоретичні дослідження вказують на можливість отримання періодичних структур при опроміненні цугом лазерних імпульсів при дотриманні встановлених у роботі умов.*

*Ключові слова:* цуги, лазерні імпульси, мішень, фаза, напилення, періодичні структури.

Ю.Ю. Жигуц, І.І. Опачко, Б.Я. Хомяк, В.Ф. Лазар  
ОСОБЕННОСТИ ЭФФЕКТИВНОГО НАПЫЛЕНИЯ СЛОИСТЫХ СТРУКТУР  
ПЕРИОДИЧЕСКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

*С целью оптимизации технологического процесса эффективного применения эксимерных лазеров для нужд пленочных технологий необходима информация об основных параметрах пара, который конденсируется на подложку. Однако, свойства пленок, полученных распылением мишени наносекундными лазерными импульсами и свойства паровой фазы практически не исследовались. В то же время, масс-спектрометрические и зондовые исследования паровой фазы позволяют определить ряд важных параметров конденсации, оптимизировать сам процесс осаднения, внести ясность в понимание физики испарения сложных мишеней. Результатом проведенных работ стала разработка способа формирования периодических структур при облучении цугом лазерных импульсов, который обеспечивает получение качественных гетерогенных и субрешеточных структур. Экспериментальные и теоретические исследования указывают на возможность получения периодических структур при облучении цугом лазерных импульсов при соблюдении установленных в работе условий.*

*Ключевые слова:* цуги, лазерные импульсы, мишень, фаза, напиление, периодические структуры

Yu. Zhiguts, I. Opachko, B. Hom'ak, V. Lazar  
THE FEATURES OF EFFECTIVE LINING OF LAYER STRUCTURES BY PERIODIC LASER  
PULSES

*In order to optimize the technological process of efficient use of excimer lasers for the needs of film technologies, information is needed on the main parameters of the vapour, which condenses on the substrate. However, the properties of films obtained by sputtering the target with nanosecond laser pulses and the properties of the vapour phase have not been studied in practice. At the same time, mass-spectrometric and probe studies of the vapour phase make it possible to determine a number of important condensation parameters, optimize the deposition process itself, and clarify the understanding of the physics of evaporation of complex targets. The work resulted in the development of a method for the formation of periodic structures upon irradiation by a train of laser pulses, which ensures the production of qualitative heterogeneous and sublattice structures. Experimental and theoretical studies indicate the possibility of obtaining periodic structures upon irradiation by a train of laser pulses, provided that the conditions established in the work are observed.*

*Keywords:* pulse group, laser pulses, target, phase, sputtering, periodic structures.

**Постановка проблеми.** Створення в 1962 році лазера з модульованою добротністю [1, 2], який генерував відтворювані гігантські імпульси тривалістю 10-40 нс, дало поштовх до вивчення процесів, що проходять при взаємодії лазерного випромінювання з різного роду об'єктами. Такі унікальні властивості лазерного випромінювання, як когерентність, висока імпульсна потужність, мала кутова розбіжність дають можливість порівняно легко фокусувати його оптичними системами, отримуючи при цьому надзвичайно високі густини потужності. Перші ж дослідження дії такого лазера на поверхню дали несподіваний результат – електронвольтна енергія емітованих при потужностях лазера  $10^6$  Вт компонент зростала більш ніж в  $10^3$  разів при незначному збільшенні імпульсної потужності. Ця надлінійна залежність є результатом багатьох процесів, що протікають в ядрі плазмового згустку.

Зрештою виявилось, що більшість параметрів лазерної плазми нелінійним чином залежать від густини потужності лазерного випромінювання. З іншого боку, ідея розігрівання речовини до термоядерних температур за допомогою лазерного випромінювання [3], стимулювала низку

подальших досліджень плазми, яка утворюється при опроміненні конденсованих речовин потоками високоінтенсивного випромінювання ( $\sim 10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup>).

Внаслідок залучення значної кількості дослідницьких колективів були створені унікальні лазерні установки з діапазоном густин потужності  $10^{11}$ - $10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>. Подальша увага значної кількості праць звернена саме до термоядерних аспектів лазерної плазми.

У зв'язку із цим, питома вага досліджень, присвячених емісійним процесам при цих густинах потужності набагато менша. Хоча результати досліджень дії лазерного випромінювання густиною потужності  $10^8$ - $10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup> на поверхню вже застосовуються в напівпровідниковій технології, при обробці металів і стекел, в мас-спектрометрії, лазерному напиленні плівок. З другого боку, значна кількість технологічних та аналітичних аспектів застосування процесу емісії під дією лазерного випромінювання вимагає більш детального знання основних параметрів плазми, створеної лазерним випромінюванням саме помірної густини ( $10^7$ - $10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>) ультрафіолетового діапазону.

Поява ефективних ексімерних лазерів [3] та лазерів на самообмежених переходах з високою частотою слідування імпульсів вносять свої особливості і процес їх взаємодії з поверхнею. На даний час ексімерні лазери вже застосовують в мікроелектронній технології [4], а лазери на самообмежених переходах, зокрема лазер на парах міді – в лазерних проекційних мікроскопах та пристроях для обробки і контролю поверхні [5]. З другого боку можливості застосування цих лазерів далеко не вичерпані, особливо в аналітичній техніці та технології отримання плівок.

Якщо в області застосування лазерного випромінювання для елементного аналізу є ряд праць [6], то можливості лазерної мас-спектрометрії для дослідження структури поверхні твердого тіла ще повністю не розкриті. Застосування для цих цілей крім неодимового лазера, ексімерного або ЛПМ може покращити аналітичні можливості мас-спектрометрії, а унікальні підсилювальні властивості активного середовища ЛПМ дають змогу створити комплексний аналітичний прилад – лазерний проекційний мікроскоп-мас-спектрометр. Останній дає змогу візуалізувати на екрані із збільшенням до  $\times 10^4$  область дії лазерного випромінювання на поверхню з одночасним її мас-спектрометричним аналізом.

При цьому висока частота слідування імпульсів ЛПМ вносять свої особливості в характер йонної емісії, які необхідно детально дослідити і враховувати в лазерній мас-спектрометрії.

Внаслідок збільшеного (в порівнянні з лазерами інфрачервоного, видимого діапазонів) початкового поглинання ультрафіолетового випромінювання ексімерного лазера поверхнею і зменшеною оптичною товщиною утворюваного при її випаровуванні плазмового згустку, сам процес випаровування проходить більш ефективно, а енергії емітованих компонент нижчі. Це сприяє більш ефективному застосуванню ексімерних лазерів для потреб плівкових технологій.

Для оптимізації такого технологічного процесу необхідна інформація про основні параметри пари, що конденсується на підкладку. Однак, в небагатьох попередніх працях, в яких досліджувались властивості плівок, отриманих розпиленням мішені наносекундними лазерними імпульсами, властивості парової фази практично не досліджувались. В той же час, мас-спектрометричні та зондові дослідження парової фази дають змогу визначити ряд важливих параметрів конденсації, оптимізувати сам процес осадження, внести ясність в розуміння фізики випаровування складних мішеней. Після аналізу стану перерахованих вище проблем була сформульована мета даної роботи.

**Мета дослідження.** Розробити спосіб формування періодичних структур при опроміненні цюгом лазерних імпульсів, що забезпечує отримання якісних гетерогенних та надіраткових структур.

У сучасній мікроелектроніці важливе місце займають методи отримання періодичних тонкоплівкових структур, засновані рідкофазній, газофазній, молекулярно-пучковій епітекстії. Отримані періодичні структури (дзеркала м'якого рентгенівського діапазону) при багатостадійному лазерному осадженні плівок з швидкістю 5-10  $\mu$ /імпульс. При цьому структури утворюються за тривалий час, що накладає досить жорсткі вимоги до вакууму в робочих установках  $p \leq 10^{-7}$ - $10^{-8}$  тсрр. Для підвищення технологічності процесу отримання багат шарових структур, зниження вимог до вакуумних умов нами запропонований і реалізований спосіб створення таких періодичних структур за допомогою цуга лазерних імпульсів.

Спосіб можна реалізувати при виконанні двох основних вимог: забезпечення ідентичних умов вибухового випаровування в матеріалі з імпульсів в цузі та забезпечення почергового поступлення пари на підкладку, що характеризується геометрією розміщення мішеней і режимом випаровування з чітко обмеженими енергетичними спектрами емітованих компонент.



**Опис методів дослідження.** Найбільш прийнятною практичною реалізацією запропонованого способу є напilenня періодичної структури цугом імпульсів наносекундної тривалості з міжімпульсним інтервалом  $10^{-5}$ - $10^{-4}$  с. Для досягнення цієї мети можуть застосовуватися як модифіковані серійні твердотільні лазери (рубінові, неодимові), що працюють в автоколівальному режимі, так і ЛПМ з середньою потужністю  $P_{\text{сер}}=100$  Вт (в останньому випадку для забезпечення умови (1) необхідно виділяти обмежений пакет імпульсів затвором).

Для запропонованого способу напilenня завдяки його швидкоплинності різко знижуються вимоги до вакуумних умов. Дійсно, при надлишковому тиску в вакуумній камері  $p \approx 10^{-5}$  торр, за час осадження шарів  $\Delta t = 10^{-5}$ - $10^{-4}$  с на  $1 \text{ см}^2$  поверхні мішені осяде кількість молекул остаточного газу не більше, ніж

$$\sigma = \frac{1}{4} n V \Delta t = \frac{p \Delta t}{\sqrt{2 \pi m k T}} = 4 \cdot 10^7 - 4 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}, \quad (1)$$

що складає  $10^7$ - $10^6$  моношару, а вимоги до вакууму визначаються тільки умовами прольоту плазовими згустками відстані мішень-підкладка без зіткнень з молекулами остаточного газу. Умову (1) можна записати в зручному для практичного користування виді

$$\gamma = P \Delta t \leq 2,5 \cdot 10^{-9} \text{ (торр} \cdot \text{с)}. \quad (2)$$

Таким чином запропонований спосіб може реалізуватися за допомогою серійних лазерів і технологічних вакуумних камер.

Цей спосіб був реалізований при напilenні двокомпонентної періодичної структури Si-SiC. Для напilenня застосовувався лазер на неодимовому склі, що працював в режимі регулярних пульсацій з  $\tau=30$  нс і міжімпульсним інтервалом  $t=9$ - $11$  мкс (5-6 імпульсів в цузі з енергією 0,5 Дж), а також лазер ЛТИПЧ-7 з частотою слідування 12,5 Гц.

Мішені (Si, SiC), а також підкладка (скол КС1) розміщувались у високовакуумній камері, з'єднаній з часово-пролітним мас-спектрометром (залишковий тиск в системі  $5 \cdot 10^{-6}$ - $10^{-5}$  торр).

**Теоретичні дослідження.** Розглянемо дію цугу періодичних лазерних імпульсів на поверхню. Відомо, що в твердотільних лазерах спеціальними методами (застосуванням сферичних дзеркал, підбором концентрації барвника у фототропних затворах, періодичною модуляцією добротності та ін.) можна добитись генерації цугу (до  $10^2$ ) еквідистантних імпульсів тривалістю  $10^{-8}$ - $10^{-6}$  с та міжімпульсним інтервалом  $\leq 10^{-5}$  с з загальною тривалістю цуга  $10^{-3}$  с. Цей режим можна вважати проміжковим між режимом генерації наносекундних та мілісекундних імпульсів. Розглянемо дію такого випромінювання на мішень.

Відомо, що вибухове випаровування мішені одиночними наносекундними лазерними імпульсами, що характеризуються пороговою густиною потоку  $q$ , дає більш відтворені і інтерпретовані результати, але сам процес випаровування менш ефективний у порівнянні з випаровуванням мілісекундними лазерними імпульсами, хоча при цьому практично відсутні ефекти, викликані термічним випаровуванням поверхні.

У зв'язку з цим цікавою є реалізація вибухового механізму випаровування, що відповідає кожному з еквідистантних у часі ідентичних імпульсів в цузі. Це дає змогу зберегти переваги вибухового випаровування однократними наносекундними імпульсами при випаровуванні цугом ідентичних імпульсів з загальною субмілісекундною тривалістю цуга. При цьому розширюються можливості нанесення плівок речовин компонентами лазерної плазми, і зокрема, одержання багатощарових структур, підвищується ефективність лазерної мас-спектрометрії.

Вважаючи, що опромінення ділянки поверхні площею  $S$  з коефіцієнтами тепло- і температуропровідності  $k$  і  $k$  відповідно проводиться лазером із загальною тривалістю цуга  $T$ ; тривалістю окремого імпульсу  $\tau$ ; міжімпульсним інтервалом  $t$ ; імпульсною густиною потоку на мішені  $q$ . При цьому на протязі цугу імпульсів реалізується одномірний режим теплопередачі тепла до масивної мішені, який відповідає умові

$$T < \frac{S}{k}. \quad (3)$$

При дії на мішень прямокутного однократного імпульсу густиною потоку  $q_0$ , кінцевий приріст температури поверхні  $T_k$ :

$$T_k = \frac{2q_0\sqrt{k}}{k\sqrt{\pi}}\sqrt{\tau}, \quad (4)$$

після  $t > \tau$  релаксує по закону

$$T(t) = \frac{2q_0\sqrt{k}}{k\sqrt{\pi}}(\sqrt{t} - \sqrt{t-\tau}) \approx \frac{2q_0\sqrt{k}}{k\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\tau}{2\sqrt{t}}, \quad (5)$$

$$T(t) = T_k \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\tau}{t}}. \quad (6)$$

У загальному випадку (5), (6) справедливі при нагріві та охолодженні без зміни фазового стану. Але, навіть якщо досягаються значення  $q^*$ , що відповідають вибуховому випаровуванню і протягом  $\tau$  відбувається зміна фазового стану речовини згідно газодинамічної моделі, що передбачає зовсім інші значення  $T_k$  ніж (4), то все ж при встановленні в кінці проміжку часу  $\tau$  температури, що відповідає однофазному стану речовини, "передісторія" процесів при дії нагрівального імпульсу не має суттєвого значення, і в цілому справедливе більш загальне, ніж (5) і (6), співвідношення (6).

З врахуванням вищесказаного, після дії цугу з  $N$  імпульсів приріст температури  $T_k$  перед початком дії  $N+1$  імпульсу буде дорівнювати:

$$T_N = T_k \sqrt{\frac{\tau}{t}} + T_k \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\tau}{2t}} + \dots + T_k \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\tau}{N \cdot t}} = \frac{T_k}{2} \sqrt{\frac{\tau}{t}} \cdot \sum_{n=1}^N \frac{1}{\sqrt{n}} = \frac{T_k}{2\sqrt{Q}} \sqrt{\frac{\tau}{t}} \cdot \sum_{n=1}^N \frac{1}{\sqrt{n}}. \quad (7)$$

$Q = \frac{t}{\tau}$  шпаруватість імпульсів в цузі.

Визначимо кількість  $N_k$  імпульсів в нескінченному цузі, які викликають суто вибухове випаровування, з умови

$$T_{N_k} = T_k, \quad (8)$$

необхідної для досягнення після імпульсної температури, що відповідає початку зміни фазового стану речовини перед початком  $N_k+1$  імпульсу.

Отже одержимо рівняння для визначення  $N_k$

$$\sum_{n=1}^{N_k} \frac{1}{\sqrt{n}} = 2\sqrt{Q}. \quad (9)$$

Для великих  $N$  асимптотичний розв'язок

$$N_k = Q \quad (10)$$

Для значень  $Q=10-20$ , що легко реалізуються в твердотільних лазерах розв'язок (9) дає значення  $N_k=15-26$ .

Визначимо умову реалізації вибухового випаровування всіма  $N_0$  імпульсами в цузі, представляючи значення шпаруватості в цузі

$$Q = \frac{t}{N_0 \cdot \tau}, \quad (11)$$

в рівнянні (11) одержимо рівняння для визначення  $N_0$ :

$$\sum_{n=1}^{N_0} \frac{1}{\sqrt{n}} = 2 \sqrt{\frac{T}{N_0 \cdot \tau}} = 2 \sqrt{\frac{P}{N_0}}, \quad (12)$$

де  $P = \frac{T}{\tau}$ .

Для великих  $N$  асимптотичний розв'язок (12) перетворюється в

$$N_0 = \sqrt{\frac{T}{\tau}} = \sqrt{P}. \quad (13)$$

При використанні твердотільних лазерів з реалізованими зараз параметрами  $T=5 \cdot 10^{-4}$  с,  $\tau \approx 5 \cdot 10^{-8}$  с одержимо  $N_0=100$ . Очевидно, верхньою межею кількості "вибухових" імпульсів в одному цузі, які можна реалізувати при опроміненні мішені найбільш поширеними твердотільними лазерами. Це значення, зокрема, визначає максимально можливу кількість шарів в багатшарових структурах (дзеркала, надгратки, фільтри та ін.), які можна одержати з компонент плазми, створеної цугом лазерних імпульсів.

Розглянемо варіант реалізації способу отримання періодичних структур при дії на мішені цуга лазерних імпульсів. На рис. 1 схематично показано як випромінювання лазера 8 розділюється на два пучки світлоподільним клином 7 та фокусується на мішенях 1, 2 за допомогою лінз 6.

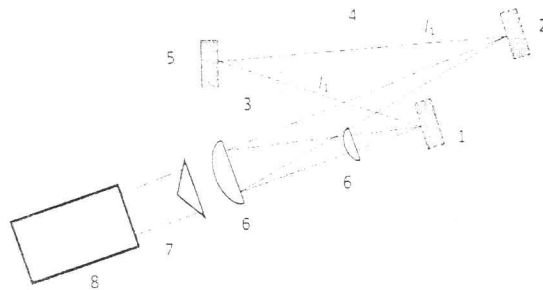


Рис. 1. - Схема розташування елементів для наповнення шаруватих структур: 1, 2 – мішені; 3, 4 – плазмові згустки; 5 – підкладка; 6 – фокуруючі лінзи; 7 – світлоподільний клин; 8 – лазер

Поставлена мета досягається тим, що після одночасного створення плазмових згустків біля поверхонь мішеней ці згустки попадають на підкладку не одночасно, а з почерговістю, яка залежить від швидкостей згустків і відстаней мішені-підкладка. При цьому кількість чередованих шарів взагалі залежить від кількості мішеней, а максимальна кількість шарів – від кількості імпульсів в цузі.

Застосування лазерного випромінювання тривалістю  $\tau \leq 10^{-7}$  с з імпульсною густиною потужності  $q \geq 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> дає змогу отримати плазмові згустки з різко обмеженими енергетичними інтервалами  $E_{\min}, E_{\max}$ .

При виконанні умови

$$\frac{l_1}{V_{1\min}} = \frac{l_1 \sqrt{m_1}}{\sqrt{2E_{1\min}}} \leq \frac{l_2 \sqrt{m_2}}{\sqrt{2E_{2\max}}} = \frac{l_2}{V_{2\max}}, \quad (14)$$

або

$$K = \frac{l_1}{l_2} \leq \sqrt{\frac{m_2}{m_1}} \cdot \sqrt{\frac{E_{1\min}}{E_{2\max}}}, \quad (15)$$

задній фронт (повільна компонента) плазмового згустку 3 з менш віддаленої мішені 1 сконденсується на підкладці 5 раніше поступлення на неї атомів з переднього фронту (швидка

компонента) плазмового згустку 4 з більш віддаленої мішені 2. При цьому виключається взаємодія плазмових згустків з різних мішеней в процесі їх прольоту до підкладки, що забезпечує черговість осадження шарів з різкими границями. Виникаючі при цьому високі напірні тиски, енергетична активація підкладки і, як наслідок, зниження температури орієнтованого росту, зменшує процес дифузії між шарами, що також сприяє отриманню різких границь між шарами. При наявності більше двох мішеней умова (14) має виконуватись для кожної з пар відстаней  $(l_1, l_2); (l_2, l_3); (l_3, l_4)$   $l_1 < l_2 < l_3 < l_4$ .

**Експериментальні дослідження.** Авторами за допомогою мас-спектрометра були визначені мінімальні і максимальні значення енергій компонент плазми для обох мішеней (на рівні  $10^{-3}$  від максимумів енергетичних розподілів).

При робочих густинах потужності лазерного випромінювання  $q = 1,5 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>  $E_{1min} = E_{2min} = 10$  еВ,  $E_{1max} = E_{2max} = 200$  еВ.

В наших експериментах (для оптимального режиму) згідно (14) відстань підкладка-мішень складала  $l_1 = 16$  мм, а відстань підкладка-SiC-мішень –  $l_2 = 50$  мм. Випромінювання за допомогою світлоподібного клину ділилось так, що на Si-мішень попадало 0,1 загальної енергії лазерного пучку, і 0,9 – на SiC-мішень. Площі фокальних плям на мішенях складали відповідно  $10^{-2}$  та  $10^{-3}$  см<sup>2</sup>, і таким чином, густини потужності на обох мішенях досягали  $q_1 = q_2 = 1,5 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Крім цього виконувався критерій чистоти періодичної структури (15).

Були поставлені експерименти по перевірці можливості отримання періодичних структур як при дотриманні оптимальних умов, так і з їх порушенням. Результати зведені у табл. 1.

Таблиця 1.

Результати експериментального наплення

№ з/п	$K = \frac{l_1}{l_2}$	p, торр	$\Delta t$ , с	$\gamma = p \cdot \Delta t$ $\gamma_{opt} = 2,5 \cdot 10^{-9}$ , торр·с	Наявність позитивного ефекту	Примітка
1	0,32 (оптимум)	$10^{-5}$	$10^{-5}$	$10^{-10}$ $\gamma < \gamma_{opt}$	+	рис. 2
2	1 $K > K_{opt}$	$10^{-5}$	$10^{-5}$	$10^{-10}$ $\gamma < \gamma_{opt}$	-	перекривання плазмових згустків
3	0,32 (оптимум)	$10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-2}$	$10^{-6}$ $\gamma > \gamma_{opt}$	-	вкорінення домішок залишкового газу в спектрі наявні лінії N, C, O

Результати реалізації, розглянутих способів лазерного наплення плівок з синхронних факелів є розроблені пристрої для отримання гетерогенних та надграткових структур.

Якість періодичної структури контролювалась методом іон-фотонної спектроскопії. Отримані структури бомбардувались іонами  $Ar^+$ , а їх травлення та чистота наплених шарів контролювалась по свіченню спектральної лінії  $Si\lambda 288,2$  нм (рис. 2) і наявності в спектрі ліній домішок.

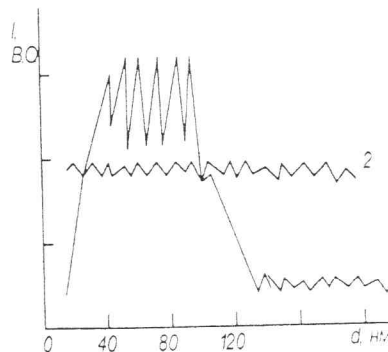


Рис. 2. - Залежність інтенсивності лінії  $Si\lambda 288,2$  нм, яка відповідає поверхні Si, від товщини зтравленої іонами  $Ar^+$  поверхні отриманої періодичної структури: 1 – оптимальний режим наплення; 2 – режим з перекриттям плазмових згустків

Результати реалізації, розглянутих способів лазерного напилення плівок з синхронних факелів є розроблені пристрої для отримання гетерогенних та надграткових структур.

При дотриманні критеріїв (14) та (15), що показано в табл. 1 №1, отримана періодична структура з 6 шарів Si та 6 шарів SiC (рис. 2 оптимальний режим напилення 1). Недотримання умови (14), що показано і табл. 1 № 2, призводить до перекривання плазмових згустків і, як наслідок, розмивання періодичної структури (рис. 2 режим з перекриттям плазмових згустків 2).

**Висновки.** Результати експериментальних досліджень вказують на можливість отримання періодичних структур при опроміненні цугом лазерних імпульсів при дотриманні умов (14) та (15), порушення яких (рядки №2 та №3 табл. 1) призводить до відсутності позитивного ефекту.

Одним з варіантів реалізації вказаних теоретичних і експериментальних досліджень в області напилення плівок з синхронних факелів в розроблені пристроїв для отримання надграткових структур.

#### Список використаних джерел:

1. McClung, F.G. Giant optical pulsations from ruby / F.G. McClung, R.W. Hellward // J. Appl. Phys. 1962. – V. 33. P. 828 – 830.
2. Басов, Н.Г. Условия разогрева плазмы излучением оптического генератора / Н.Г. Басов, О.Н. Крохин // ЖЭТФ. 1964. – Т. 46. – С. 171 – 174.
3. Попов, В.К. Мощные эксимерные лазеры и новые источники когерентного излучения в вакуумном ультрафиолете / В.К. Попов, // УФН. 1985. – Т. 147. – Вып. 3. – С. 587 – 604.
4. Канцырев, В.Л. Имплантация в кремний излучением мощного KrF лазера / В.Л. Канцырев, Н.В. Морозов, Б.А. Ольшвангер и др. // Письма в ЖТФ. – 1991. – Т. 17, Вып. 2. – С.56. - 61.
5. Земсков, К.И. Усилители яркости изображений в оптических системах / К.И. Земсков, М.А. Казарян, Г.Г. Петраш // Труды ФИАН. – 1991. – Т. 206. – С. 1-62.
6. Nutt, K.W. Laser initiated electron avalanches observed in a laser microprobe mass spectrometer / K.W. Nutt, E.R. Wallach // J. Appl. Phys. – 1989. № 66 (5), P. 127 -130.

#### Рецензент

Козубовський Володимир Ростиславович, проф., док. техн. наук, провідний науковий співробітник науково-дослідного інституту засобів аналітичної техніки ДВНЗ «Ужгородський національний університет», лауреат державної премії у галузі науки і техніки

Стаття надійшла до редакції 29.04.2017