

Міністерство освіти і науки України  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка

**ЗЕЛЕНСЬКА КАТЕРИНА СЕРГІЇВНА**



УДК 53.082.534, 53.096, 53.092

**ТЕПЛОВЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ  
СВІТЛОПОГЛИНАЛЬНИХ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ  
ПРИ ІМПУЛЬСНОМУ ЛАЗЕРНОМУ ЗБУДЖЕННІ**

01.04.05 – оптика, лазерна фізика

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі оптики фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка МОН України, м. Київ.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор  
**Поперенко Леонід Володимирович**,  
Київський національний університет  
імені Тараса Шевченка,  
завідувач кафедри оптики.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,  
член-кореспондент НАН України, професор  
**Валах Михайло Якович**,  
Інститут фізики напівпровідників  
ім. В.Є. Лашкарьова НАН України,  
головний науковий співробітник  
відділу оптики і спектроскопії;

доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Бондар Михайло Віталійович**,  
Інститут фізики НАН України,  
завідувач відділу фотоактивності.

Захист відбудеться «29» червня 2016 р. о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.001.23 при Київському національному університеті імені Тараса Шевченка за адресою: 03127, м. Київ, проспект Академіка Глушкова, 4, фізичний факультет, ауд. 500.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці ім. М. Максимовича Київського національного університету імені Тараса Шевченка за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 58, зал № 12.

Автореферат розісланий «26» травня 2016 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.001.23  
доктор фізико-математичних наук, професор



Семенько М.П.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

### Актуальність теми.

У сучасних дослідженнях у галузі оптики та лазерної фізики значну увагу приділяють процесам взаємодії потужного лазерного випромінювання з речовиною. Важливе місце в таких дослідженнях займають роботи, присвячені вивченню теплових механізмів впливу лазерного випромінювання на трансформації структури матеріалу та пов'язані з цим зміни макроскопічних характеристик речовини (на коефіцієнти поглинання і заломлення, густину, теплопровідність, електропровідність, тощо). Нагрівання матеріалів потужним лазерним випромінюванням широко застосовується у різних галузях науки та промисловості, зокрема, для нанесення міток на вироби з полімерів, абляції та розпилення матеріалів, лазерного зварювання, лазерної обробки поверхонь (полірування, підвищення мікротвердості, упорядкування кристалічної структури поверхонь після травлення, очищення поверхонь), легування напівпровідників атомами металів для створення *p-n* переходів тощо. Одне з явищ, яке супроводжує лазерне нагрівання матеріалів і яке вивчається та обговорюється в останні роки, – це індуковане лазером теплове випромінювання (*laser-induced incandescence*, ЛІІ). Як правило, для спостереження індукованого лазером теплового випромінювання використовують лазерні джерела з тривалістю імпульсів порядку  $10^{-8}$  с. Значна кількість наукових робіт присвячена експериментальним та теоретичним дослідженням даного типу випромінювання на об'єктах, які представляють собою аерозолі чи суспензії, тобто ансамблі світлопоглинальних (зазвичай – вуглецевих) мікрочастинок, підвішених у прозорій матриці. У таких об'єктах індуковане лазером теплове випромінювання генерується у формі імпульсів з субмікросекундним чи наносекундним згасанням внаслідок нагрівання вуглецевих мікрочастинок потужними лазерними імпульсами до температур порядку кількох тисяч Кельвін. За таких температур спостерігається (навіть незброєним оком) випромінювання із суцільним спектром у видимому діапазоні довжин хвиль. Найбільша увага науковців приділяється індукованому лазером тепловому випромінюванню частинок сажі у полум'ях та вихлопах двигунів, що знаходить своє застосування для контролю якості роботи двигунів внутрішнього згорання, ракетних двигунів тощо. Реєстрація випромінювання розігрітих лазером мікрочастинок дозволяє визначити їх розміри та концентрацію, які є важливими параметрами якості роботи двигуна. Зустрічається також незначна кількість робіт, які розглядають особливості теплового випромінювання вуглецевих мікрочастинок у рідинах (вода, органічні розчинники), твердих тілах (боратне скло) та у в'язких полімерних матрицях (желатин, епоксидні смоли, полістирол). На властивості теплового випромінювання мікрочастинок, розміщених у різних середовищах, впливають не тільки їх розміри і концентрація, але й навколишні умови та індуковані лазерним нагріванням процеси у речовині поблизу мікрочастинок. Наприклад, при лазерному опроміненні мікрочастинок у рідинах та полімерах має місце явище оптичного обмеження (*optical limiting*), яке полягає у самонаведеному падінні пропускання суспензії мікрочастинок на довжині хвилі лазерного випромінювання. Цей ефект може бути застосований для захисту очей людини або оптичного обладнання від пошкодження в разі раптового підвищення інтенсивності

лазерного випромінювання. Індуковане лазером теплове випромінювання шорстких світлопоглинальних поверхонь практично не досліджено і в літературі представлені тільки кількома роботами з вивчення індукованого лазером теплового випромінювання напівпровідникових матеріалів.

*Актуальність теми* даної роботи визначається потребами розв'язання фундаментальної проблеми взаємодії потужного лазерного випромінювання з речовиною, а також з потребами сучасних технологій лазерної обробки поверхонь. Зокрема, такі дослідження дозволяють визначати фізичні характеристики речовин в екстремальних умовах (високі температури, тиски, освітленості, тощо), які важко реалізувати у лабораторній практиці традиційними методами. Враховуючи розповсюдженість методів лазерної обробки поверхні та чутливість індукованого лазером теплового випромінювання до змін характеристик випромінюючого об'єкту, а також до стану навколишнього середовища, дослідження даного типу випромінювання світлопоглинальних поверхонь є *актуальним напрямом* з перспективою застосування для моніторингу при обробці поверхонь та для вивчення внутрішньої структури масивних світлопоглинальних матеріалів, в тому числі прихованої структури.

#### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконана на кафедрі оптики фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка в рамках науково-дослідної теми «Фундаментальні дослідження в галузі фізики конденсованого стану і елементарних частинок, астрономії і матеріалознавства для створення основ новітніх технологій» (2011-2015 рр., № д/р 00111U009115).

#### **Мета і завдання дослідження.**

*Метою роботи* є встановлення закономірностей термічних процесів, що відбуваються при імпульсному лазерному опроміненні світлопоглинальних поверхневих шарів, визначення характеристик індукованого лазером теплового випромінювання та розробка фізичних моделей для пояснення особливостей цього випромінювання в залежності від морфології поверхні, приповерхневої структури та зовнішніх умов.

Для досягнення мети були поставлені такі *завдання*:

1. Визначити основні характеристики індукованого лазером теплового випромінювання світлопоглинальних поверхневих шарів.
2. Дослідити процеси лазерного нагрівання та індуковане лазером теплове випромінювання світлопоглинальних поверхневих шарів в залежності від параметрів лазера та режимів опромінення.
3. З'ясувати механізми впливу морфології поверхонь та підповерхневої структури, а також навколишнього середовища (температури, тиску, оточення конденсованими середовищами), на перебіг термічних процесів та теплового випромінювання при імпульсному лазерному збудженні.

*Об'єкт дослідження.* Теплове випромінювання світлопоглинальних поверхневих шарів при імпульсному лазерному збудженні.

*Предмет дослідження.* Механізми лазерного нагрівання та індукованого лазером теплового випромінювання.

### **Методи дослідження:**

- метод реєстрації інтегральної (по поверхні) енергії імпульсу світіння в залежності від кількості та густини потужності лазерних імпульсів;
- метод спектральних досліджень індукованого лазером теплового випромінювання;
- осцилографічні дослідження форми імпульсів індукованого лазером теплового випромінювання методом прямого осцилографування;
- дослідження оптичного пропускання суспензій світлопоглинальних мікрочастинок у полістиролі на довжині хвилі лазерного випромінювання;
- метод оптичної та сканувальної тунельної мікроскопії;
- теоретичні розрахунки кінетики температурного поля та індукованого лазером теплового випромінювання світлопоглинальної поверхні при лазерному опроміненні на основі класичного рівняння теплопровідності.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

- Вперше виявлено ефект зростання інтегральної (по поверхні) енергії імпульсу індукованого лазером теплового випромінювання вуглецевих поверхонь при опроміненні послідовністю лазерних імпульсів, що викликано зменшенням висоти виступів на шорсткій поверхні;
- Вперше зареєстровано значення параметру нелінійності відгуку індукованого лазером теплового випромінювання на зміни густини потужності лазерного збудження порядку 10, яке є характерним для індукованого лазером теплового випромінювання поверхневих шарів на довжинах хвиль близько 500 нм;
- Запропоновано інтерпретацію закономірностей індукованого лазером теплового випромінювання, що спостерігались в експерименті, на основі фізичних механізмів, які передбачають нерівномірний розподіл температури у шорсткому поверхневому шарі, випаровування матеріалу зі зменшенням нерівностей на шорсткій вуглецевій поверхні та трансформацію структури поверхневого шару пористих матеріалів;
- Запропоновано новий експрес-метод оцінювання температури поверхні при лазерному опроміненні шляхом вимірювання інтегральної (по поверхні) енергії імпульсу теплового випромінювання на фіксованій довжині хвилі при зміні початкової температури поверхневого шару.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

Практичне значення результатів роботи полягає в можливості застосування отриманих в роботі результатів для лазерної обробки матеріалів, при проведенні досліджень морфології шорстких поверхонь та пористих структур, розробці методів лазерного маркування пластиків та індукованого лазером легування напівпровідників. Серед результатів даної дисертаційної роботи найбільш перспективними для практичних застосувань є: (1) експрес метод оцінювання температури поверхні при лазерному опроміненні, (2) створення світлих та темних міток у полімерах та (3) методика розрахунку розподілу температур при індукованому лазером легуванні всередині структури напівпровідник-метал у зовнішньому середовищі.

### **Особистий внесок здобувача.**

У роботах [1-3] дисертантка виготовляла зразки світлопоглинальних шарів на основі суспензій вуглецевих мікрочастинок у желатині, агарі та полістиролі, брала участь у вимірюваннях залежності інтегральної (по поверхні) енергії імпульсу теплового випромінювання від кількості лазерних імпульсів, кінетичної залежності оптичного пропускання і залежності оптичного пропускання від кількості лазерних імпульсів суспензій мікрочастинок на основі желатину, а також кінетичної залежності інтенсивності розсіяного світла на бульбашках, що утворювались у полімерах при лазерному опроміненні.

У роботах [5, 7-9, 11-19, 21, 22, 24, 27] дисертантка брала участь у постановці експериментів, здійснювала виготовлення та підготовку зразків вуглецевих поверхневих шарів, брала участь в експериментальних та теоретичних дослідженнях, а також в обговоренні та інтерпретації одержаних результатів, підготовці статей і тез до публікації та доповідала результати на наукових конференціях.

У роботах [4, 10, 20, 23, 26] дисертантка здійснювала виготовлення зразків полістиролу, активованого світлопоглинальними мікрочастинами, брала участь у проведенні досліджень лазерного маркування даних зразків.

У роботах [6, 25, 28] брала участь у виготовленні зразків діодних структур на основі CdTe, проведенні експерименту та обробки даних, а також проводила розрахунки.

Доповіді на конференціях [11-17, 19, 21, 22, 24, 27] виконані особисто дисертанткою. Дисертантка брала участь у підготовці матеріалів (презентацій та постерів) для доповідей [18, 20, 23, 25, 26, 28].

### **Апробація результатів дисертації.**

Результати дисертаційної роботи були представлені як стендові та усні доповіді на таких міжнародних конференціях:

1. 9<sup>th</sup>, 10<sup>th</sup> Kharkiv Young Scientists Conference on Electromagnetic, Photonics and Biophysics (Kharkiv, UKRAINE, 2009, 2011).
2. 11<sup>th</sup>, 12<sup>th</sup>, 14<sup>th</sup> Int. Young Scientists Conference “Optics and High Technology Material Science” SPO (Kyiv, UKRAINE, 2010, 2011, 2013).
3. XXI Int. School-Seminar of Galyna Puchkovska “Spectroscopy of Molecules and Crystals” (village Beregove, Bakhchisaray region, the Crimea, UKRAINE, 2013).
4. SPIE Photonics Europe (Brussels, BELGIUM, 2012).
5. 15th Int. Conference on Laser Optics "LO - 2012" (St. Petersburg, RUSSIA, 2012).
6. SPIE Optics and Optoelectronics (Prague, CZECH REPUBLIC, 2013).
7. 12<sup>th</sup> Int. Conference on Global Research and Education: Inter-Academia 2013 (Sofia, BULGARIA, 2013).
8. FOTONICA 2014 Convegno Italiano delle Tecnologie Fotoniche 16a edizione (Naples, ITALY, 2014).
9. The 7th International Symposium on Surface Science ISSS-7 (Matsue, Shimane, JAPAN, 2014).
10. The 7 International Congress on Laser Advanced Materials Processing LAMP 2015 (Kitakyushu, Fukuoka, JAPAN, 2015).
11. The 14<sup>th</sup> International Conference on Global Research and Education: Inter-Academia 2015 (Hamamatsu, JAPAN, 2015).

12. The 22<sup>nd</sup> International Symposium on Room-Temperature Semiconductor X-Ray and Gamma-Ray Detectors RTSD 2015 (San Diego, CA, USA, 2015).

**Публікації.**

За матеріалами дисертації опубліковано 28 наукових робіт, у тому числі 6 статей у наукових фахових виданнях, 4 статті у реферованих збірниках наукових праць та 18 тез доповідей на наукових конференціях.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів основного тексту, висновків та списку використаних джерел (116 посилань). Повний обсяг роботи становить 119 сторінок, 50 рисунків та 2 таблиці.

**ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтована актуальність обраної теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та задачі досліджень, визначені об'єкт та предмет досліджень, зазначені наукова новизна, практичне значення одержаних результатів та особистий внесок здобувача, наведені відомості стосовно апробації результатів дисертації та публікацій статей і тез доповідей на конференціях.

У **першому розділі** наведено огляд літератури за темою дисертаційної роботи, який показав, що індуковане лазером теплове випромінювання світлопоглинальних мікрочастинок в аерозолях або поміщених у конденсовані середовища є актуальним науковим напрямком в оптиці та лазерній фізиці. Інформативність сигналу індукованого лазерного випромінювання стосовно розміру та концентрації мікрочастинок дозволяє застосування вимірювань даного типу випромінювання до контролю полум'я і вихлопних газів двигунів. Чутливість відгуку випромінювання до оточуючого конденсованого середовища дає можливість опосередковано вивчати та контролювати процеси, що супроводжують локальне нагрівання різних речовин. Аналіз літературних даних спонукає до розгляду методів лазерної обробки матеріалів, що супроводжуватимуться індукованим лазером тепловим випромінюванням, з метою пошуку нових знань щодо взаємодії потужного лазерного випромінювання з речовиною та нових методів аналізу та контролю.

У **другому розділі** викладено методику проведення експериментальних досліджень та моделі для теоретичних розрахунків.

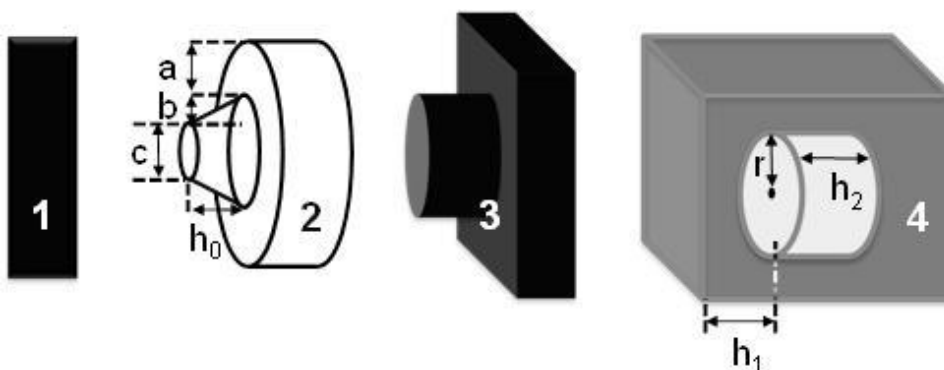


Рис. 1. Модель вуглецевої поверхні.

Для моделювання індукованого лазером теплового випромінювання вуглецевої поверхні були використані три моделі поверхневої структури вуглецю і одна модель приповерхневої структури. Розглядалася плоска

поверхня (1), шорстка поверхня з конусоподібними виступами (2) та шорстка поверхня з циліндричними виступами (3) (рис. 1). Пори у поверхневому шарі моделювались як циліндричні порожнини із заданими тепловими характеристиками повітря (рис. 1, 4).

Для опису лазерного нагрівання вуглецевої поверхні було використано класичне рівняння теплопровідності:

$$\operatorname{div}(k \operatorname{grad} T(\vec{r}, t)) + W(\vec{r}, t) = C_p \frac{dT(\vec{r}, t)}{dt}, \quad (1)$$

де  $T(\vec{r}, t)$  – локальна температура у точці з координатою  $\vec{r}$  всередині зразка в момент часу  $t$ ,  $W(\vec{r}, t) = \alpha F(\vec{r}, t)$  – функція джерела тепла (поглинута лазерна потужність в одиницю об'єму),  $\alpha = 10^5 \text{ см}^{-1}$  – коефіцієнт оптичного поглинання вуглецю на довжині хвилі лазерного випромінювання 1064 нм,  $F(\vec{r}, t)$  – локальна інтенсивність лазерного випромінювання.

Форма лазерного імпульсу була задана як функція Гауса за часом:

$$F = F_0 e^{-4 \ln 2 \left(\frac{t}{\tau_i}\right)^2}, \quad (2)$$

де  $F_0$  – пікова інтенсивність падаючого лазерного випромінювання,  $\tau_i = 20 \text{ нс}$  – тривалість лазерного імпульсу.

Інтенсивність лазерного випромінювання зменшувалась вздовж осі пучка згідно з наступним рівнянням

$$\frac{dF}{F} = -\alpha dz. \quad (3)$$

Інтегральна інтенсивність індукованого лазером теплового випромінювання розраховувалась шляхом інтегрування функції Планка, що описує випромінювання абсолютно чорного тіла:

$$i_\lambda = \frac{\text{const} \cdot \lambda^{-5}}{e^{\frac{\xi}{\lambda T}} - 1}, \quad (4)$$

де  $\xi = hc/k_B = 1.4388 \text{ нм К}$ ,  $h$  – стала Планка,  $c$  – швидкість світла,  $k_B$  – стала Больцмана.

Значення інтегральної енергії імпульсу теплового випромінювання (за часом  $I_S$  та по опроміненій поверхні зразка  $I_t$ , а значення за часом та по поверхні  $I_{LII}$ ) отримувались з наступних співвідношень:

$$I_{LII} = \iint_S I_S dS, \quad (5)$$

$$I_S = \int_{-2\tau_i}^{10\tau_i} i_\lambda dt, \quad (6)$$

$$I_t = \iint_S i_\lambda dS. \quad (7)$$

Основні методи експериментальних досліджень реалізовувались на автоматизованому лазерному спектрометрі з використанням лазера ІАГ:Nd<sup>3+</sup> (довжина хвилі 1064 нм, тривалість імпульсу 20 нс, густина потужності 2-50 МВт/см<sup>2</sup>), який працював у режимі з модуляцією добротності. Для досліджень, пов'язаних із впливом зовнішніх умов, схема доповнювалась відповідними елементами, такими, як система зовнішнього нагрівання зразка або камера, з'єднана з насосом для відкачування повітря.

У **третьому розділі** для дослідження властивостей індукованого лазером теплового випромінювання вуглецевих поверхонь вимірювання проводились за умов практичної відсутності випаровування матеріалу зразка. Було встановлено спектральний склад теплового випромінювання у видимому діапазоні довжин хвиль, тривалість та форма імпульсу, а також залежність інтегральної (по поверхні) енергії імпульсу світіння від незначної варіації густини потужності лазерного випромінювання.

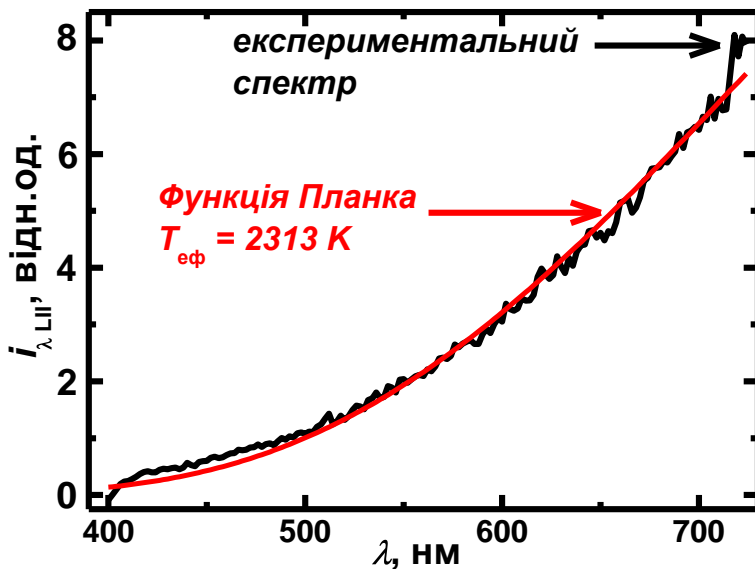


Рис. 2. Фрагмент спектру індукованого лазером теплового випромінювання шорсткої вуглецевої поверхні у видимому діапазоні довжин хвиль. Густина потужності лазерного випромінювання  $F = 11 \text{ МВт/см}^2$ .

десятьки наносекунд, що за порядком величин відповідає тривалості імпульсу лазерного збудження.

На рис. 3 представлена типова кінетична залежність індукованого лазером теплового випромінювання поверхні сколу вуглецевого зразка. Тривалість імпульсу світіння поверхні сколу вуглецевого зразка становить  $\tau_{\text{ЛІІ}} = 14 \text{ нс}$  (рис. 3), в той час, як для полірованої вуглецевої поверхні тривалість становить близько 16 нс.

Отримана відмінність у тривалості імпульсу індукованого лазером теплового випромінювання поверхні сколу та полірованої поверхні зумовлена різними значеннями теплопровідності приповерхневих шарів, що підтверджено відповідними розрахунками кінетичних залежностей.

Наближення експериментального спектру функцією Планка з температурою  $T_{\text{еф}} = 2313 \text{ К}$  показано на рис. 2. Таким чином, деякою мірою вуглецеву поверхню можна розглядати як абсолютно чорне тіло, а спостережуване індуковане лазером теплове випромінювання можна характеризувати ефективною температурою  $T_{\text{еф}}$ , яка відповідає максимальному значенню температури при лазерному нагріванні.

Як показали осцилографічні вимірювання, тривалість імпульсів теплового випромінювання  $\tau_{\text{ЛІІ}}$  становить

Для характеристики нелінійності відгуку теплового випромінювання на варіації потужності лазерного збудження (рис. 4) введено безрозмірний показник нелінійності ( $\gamma$ -параметр), що визначається за співвідношенням:

$$\gamma = \frac{d(\ln I_{LII})}{d(\ln F)}. \quad (8)$$

Суттєво нелінійна залежність інтегральної (по поверхні зразка) енергії імпульсу теплового випромінювання вуглецевої поверхні від густини потужності імпульсів лазерного збудження характеризується параметром нелінійності порядку 10, що значно перевищує раніше отримані значення для аналогічних досліджень інших об'єктів.

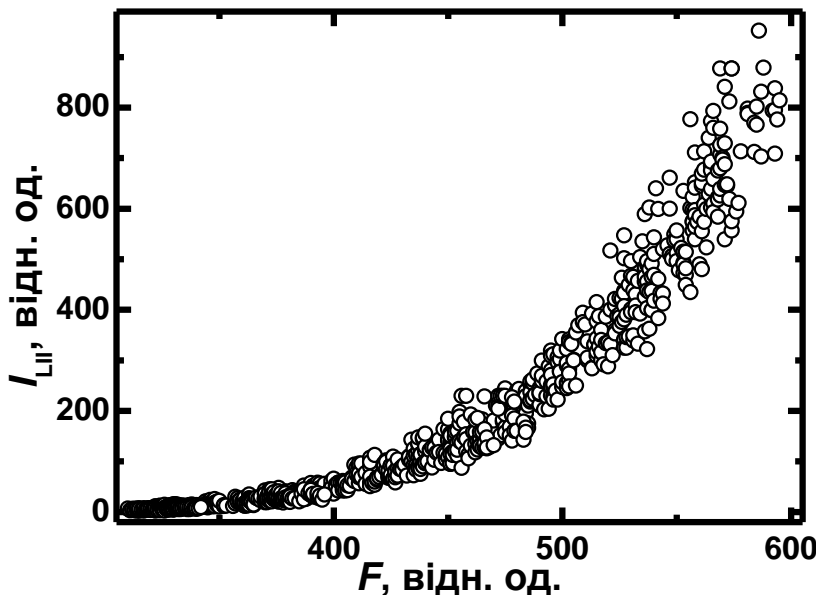


Рис. 4. Залежність інтегральної (по поверхні зразка) енергії імпульсу індукованого лазером теплового випромінювання вуглецевої поверхні  $I_{LII}$  від густини потужності лазерних імпульсів  $F$ .

теплового випромінювання по поверхні.

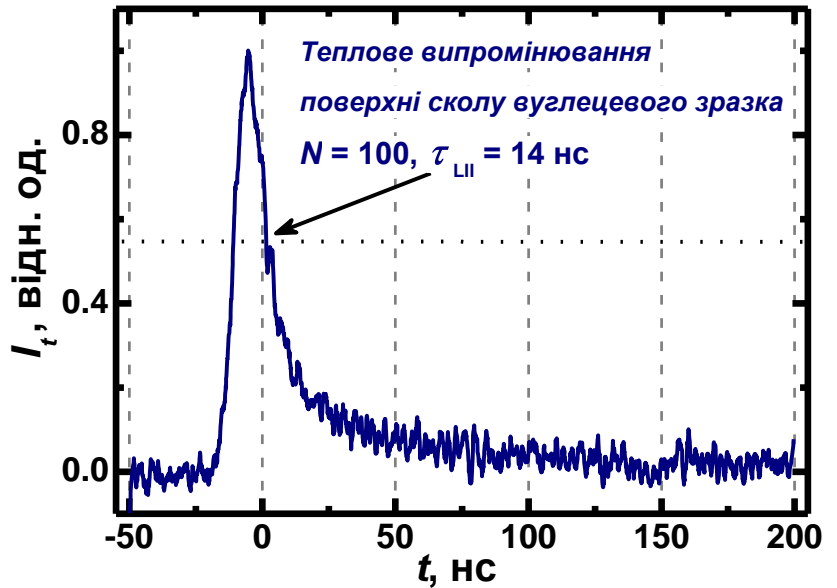


Рис. 3. Кінетична залежність індукованого лазером теплового випромінювання поверхні сколу вуглецевого зразка при дії  $N$ -го ( $N = 100$ ) імпульсу лазерного випромінювання з густиною потужності  $F = 8 \text{ МВт/см}^2$ .

За розрахунковими даними було визначено залежність температури  $T$  від відстані вздовж координатної осі, напрямленої вздовж поверхні зразка,  $x$ . Температура на боковій поверхні конусоподібного виступу змінюється немонотонно, як і у долинах між виступами.

Нерівномірне нагрівання виступів на шорсткій поверхні призведе до: (1) переважного випаровування вуглецю з вершин виступів та до (2) нерівномірного розподілу інтегральної енергії імпульсу індукованого лазером

З метою дослідити вплив шорсткості на параметри індукованого лазером теплового випромінювання, а також приповерхневої структури світлопоглинального шару, необхідно провести аналіз змін характеристик теплового випромінювання при збільшенні дози опромінення зразків послідовністю лазерних імпульсів.

У четвертому розділі визначено, що при опроміненні вуглецевої поверхні послідовністю лазерних імпульсів тривалість імпульсу індукованого лазером теплового випромінювання скорочується на 30 % переважно за рахунок заднього фронту.

Виявлено зростання інтегральної (по поверхні зразка) енергії імпульсу індукованого лазером теплового випромінювання при дії послідовності лазерних імпульсів на поліровану вуглецеву поверхню та на високопористий зразок деревного вугілля (рис. 5).

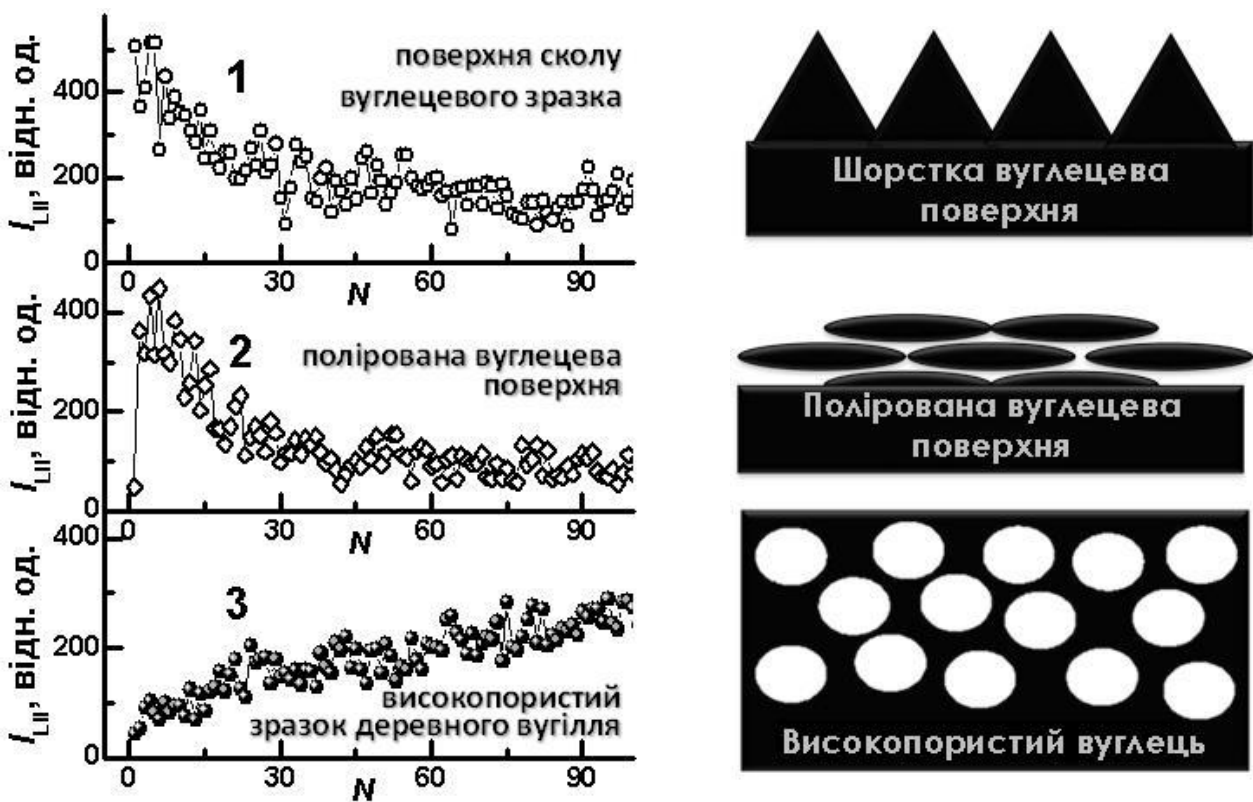


Рис. 5. Інтегральна (по поверхні зразка) енергія імпульсу індукованого лазером теплового випромінювання різних вуглецевих поверхонь  $I_{\text{ЛП}}$  як функція номера лазерного імпульсу опромінення  $N$  з густиною потужності  $F = 9 \text{ МВт/см}^2$ .

Лазерне опромінення поверхні внаслідок нагрівання буде призводити до (1) розширення приповерхневих пор та до (2) випаровування шару матеріалу над порою. Як видно з рис. 6, збільшення висоти приповерхневої порожнини  $h_2$  зумовлює зростання інтегральної (по поверхні зразка) енергії імпульсу теплового випромінювання  $I_{\text{ЛП}}$ .

На рис. 7 показано розраховану залежність інтегральної (по поверхні зразка) енергії імпульсу теплового випромінювання вуглецевої поверхні  $I_{\text{ЛП}}$  від висоти поверхневого шару над приповерхневою порожниною  $h_1$ . При зменшенні товщини стінки пори  $h_1$ , що покриває її зі сторони лазерного опромінення, інтегральна (по

поверхні зразка) енергія імпульсу теплового випромінювання  $I_{\text{ЛП}}$  зростає. Моделюючи розрив пори, як  $h_1 \rightarrow 0$ , виявлено, що значення інтегральної (по поверхні) енергії імпульсу теплового випромінювання при цьому зменшується на 4-5 порядків.

Для пояснення спостережуваних ефектів (рис. 5) була запропонована модель, яка враховує (1) нерівномірний розподіл температур та інтенсивності індукованого лазером теплового випромінювання, (2) випаровування матеріалу шорсткої поверхні переважно з вершин виступів та (3) розширення та розрив пор у приповерхневому шарі з пористою структурою.

Встановлено, що зниження тиску навколишнього середовища призводить до підвищення інтегральної (по поверхні зразка) енергії імпульсу індукованого лазером теплового випромінювання внаслідок реалізації умови вакууму для молекул повітря у зазорах між лусками на полірованій вуглецевій поверхні.

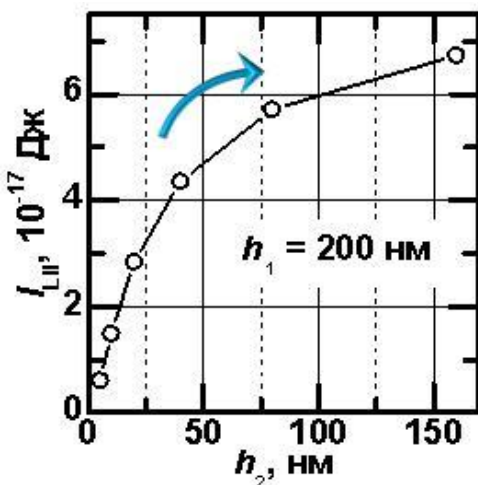


Рис. 6. Розрахована залежність інтегральної (по поверхні зразка) енергії імпульсу теплового випромінювання вуглецевої поверхні  $I_{\text{ЛП}}$  від висоти приповерхневої порожнини  $h_2$ .

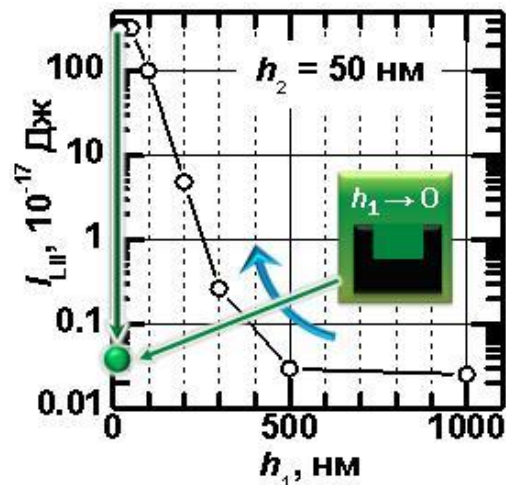


Рис. 7. Розрахована залежність інтегральної (по поверхні зразка) енергії імпульсу теплового випромінювання вуглецевої поверхні  $I_{\text{ЛП}}$  від висоти поверхневого шару над приповерхневою порожниною  $h_1$ .

У п'ятому розділі наведено приклади застосувань одержаних результатів досліджень. Зокрема, запропоновано метод оцінювання температури вуглецевої поверхні при опроміненні лазерними імпульсами шляхом вимірювання інтегральної (по поверхні зразка) енергії імпульсу індукованого лазером теплового випромінювання за незначної зміни початкової температури зразка. Застосовано модель лазерного нагрівання для розрахунку кінетики температури на межах поділу напівпровідник-метал та метал-вода при лазерному опроміненні тришарової структури напівпровідник-метал-вода з метою знаходження оптимальних режимів індукованого лазером легування тонких поверхневих шарів CdTe такими домішками, як In чи Al. Висвітлено термічні механізми лазерного маркування пластиків, активованих світлопоглинальними мікрочастинками, а також досліджено процес утворення темних та світлих міток.

## ВИСНОВКИ

1. Залежність енергії імпульсу теплового випромінювання (на фіксованій довжині хвилі) вуглецевої поверхні від густини потужності імпульсів лазерного збудження є суттєво нелінійною і характеризується параметром нелінійності порядку 10, що значно перевищує відповідні значення для дрібнодисперсного вуглецю в аерозолях і суспензіях, що зумовлено кінетикою процесів теплообміну у поверхневому шарі при поглинанні лазерного випромінювання.
2. Результати комп'ютерного моделювання кінетики температурного поля у приповерхневому шарі при імпульсному лазерному опроміненні показують, що (1) шорсткість поверхні (висота виступів на поверхні) впливає на інтегральну (по поверхні зразка) енергію імпульсу індукованого лазером теплового випромінювання, а також, що (2) при опроміненні шорсткої поверхні лазерними імпульсами переважне випаровування матеріалу відбувається з вершин виступів.
3. На тривалість імпульсу індукованого лазером теплового випромінювання впливають теплопровідність поверхневого шару і шорсткість поверхні. Зокрема, при вищих значеннях теплопровідності, а також при меншій шорсткості поверхні, відбувається скорочення тривалості імпульсу світіння.
4. Інтегральна (по поверхні зразка) енергія імпульсу індукованого лазером теплового випромінювання (на фіксованій довжині хвилі) при зростанні дози лазерного опромінення змінюється внаслідок процесів випаровування виступів на шорсткій поверхні, розширення порожнин у приповерхневому шарі та випаровування шару речовини над порожнинами. Зокрема, для поверхні сколу вуглецевого зразка при зростанні дози лазерного опромінення енергія імпульсу світіння зменшується; для поверхні полірованого вуглецевого зразка – спочатку зростає, а потім спадає; для поверхні деревного вугілля – монотонно зростає.
5. Залежність коефіцієнта теплопровідності повітря від тиску у порожнинах між лусками на полірованій вуглецевій поверхні призводить до підвищення інтегральної (по поверхні зразка) енергії імпульсу індукованого лазером теплового випромінювання при зменшенні тиску навколишнього повітря.
6. Запропоновано новий оптичний метод експрес-оцінювання максимальної температури поверхневого шару, нагрітого імпульсним лазерним випромінюванням, який ґрунтується на залежності інтегральної (по поверхні зразка) енергії імпульсу індукованого лазером теплового випромінювання (на фіксованій довжині хвилі і при фіксованій густині потужності лазерного випромінювання) від початкової температури поверхні.
7. У прозорих полімерах, активованих світлопоглинальними мікрочастинками, можливе утворення світлих (бульбашки, наповнені піролітичними газами) та темних (продукти карбонізації) індукованих лазером міток залежно від густини потужності лазерних імпульсів та в'язкості полімеру.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Статті у наукових фахових виданнях:*

1. Thermal emission of carbon microparticles in polymer matrixes under pulsed laser excitation / S. Zelensky, A. Kolesnik, A. Kopyshinsky, V. Garashchenko, K. Zelenska, V. Stadnytsky, E. Shinkarenko // Ukr. J. Phys. – 2009. – Vol.54, N.10 – P. 983-988.
2. Optical transmittance of carbon suspensions in polymer matrixes under powerful pulsed laser irradiation / S. Zelensky, O. Kopyshinsky, V. Garashchenko, A. Kolesnik, V. Stadnytskyi, K. Zelenska, Ye. Shynkarenko // Semicond. Phys., Quant. Electron. and Opto-Electron. – 2010. – Vol. 13, N. 1. – P. 070-073.
3. Kinetics of light scattering in carbon microparticles suspension in epoxy resin / S. Zelensky, O. Kopyshinsky, V. Garashchenko, A. Kolesnik, K. Zelenska, V. Stadnytskyi, E. Shinkarenko // J. Appl. Spectrosc. – 2011. – Vol. 78, N 3. – P. 389-395.
4. Thermal mechanisms of laser marking in transparent polymers with light-absorbing microparticles / K. Zelenska, S. Zelensky, L. Poperenko, K. Kanev, V. Mizeikis, V. Gnatyuk // Optics & Laser Technology. – 2016. – Vol. 76. – P. 96-100.
5. Laser-induced incandescence of rough carbon surfaces / K. Zelenska, S. Zelensky, A. Kopyshinsky, S. Rozouvan, T. Aoki // Japanese Journal of Applied Physics. – 2016. – Vol. 4. – P. 011106-1-6.
6. Modification of the CdTe-In Interface by Irradiation with Nanosecond Laser Pulses through the CdTe Crystal / K. Zelenska, D. Gnatyuk, T. Aoki // Journal of Laser Micro/Nanoengineering. – 2015. – Vol. 10, N. 3. – P. 298-303.

### *Статті у реферованих збірниках наукових праць:*

7. Nonlinear characteristics of laser-induced incandescence of rough carbon surfaces / S. Zelensky, L. Poperenko, A. Kopyshinsky, K. Zelenska // Nonlinear Optics and Applications VI, Proceedings of SPIE. – 2012. – Vol. 8434. – 84341H-1-6.
8. Laser-induced incandescence of carbon surface: a method for temperature estimation / S. Zelensky, K. Zelenska // Nonlinear Optics and Applications VII, Proceedings of SPIE. – 2013. – Vol. 8772. – 87721P-1-8.
9. Laser-induced incandescence of carbon surface at various values of ambient air pressure / K. Zelenska, A. Kopyshinsky, L. Poperenko // Photonics Technologies, 2014 Fotonica AEIT It. Conf.– 2014. – P. 1-3.
10. Laser marking in transparent materials and mechanisms of laser-induced defect formation / V. Gnatyuk, O. Vlasenko, S. Levytskyi, S. Gagarsky; K. Zelenska, L. Poperenko, T. Aoki // Photonics Technologies, 2014 Fotonica AEIT It. Conf. – 2014. – P. 1-4.

*Тези доповідей на конференціях за темою дисертації:*

11. Kinetics of laser-induced microbubbles in viscous suspensions of carbon particles / K. Zelenska, E. Shinkarenko // 9<sup>th</sup> Kharkiv Young Scientists Conference on Electromagnetic, Photonics and Biophysics, Book of Abstracts, 1-3 December, Kharkiv (Ukraine). – 2009. – P. 85.
12. Laser induced incandescence of carbon surface / S. Zelensky, K. Zelenska // 11<sup>th</sup> Int. Young Scientists Conference “Optics and High Technology Material Science” SPO 2010, Scientific Works, 21-24 October, Kyiv (Ukraine). – 2010. – Abstract No BP.11. – P. 137.
13. Laser-induced incandescence of rough carbon surfaces / K. Zelenska, O. Kopyshynsky, S. Zelensky // 12<sup>th</sup> Int. Young Scientists Conference “Optics and High Technology Material Science” SPO 2011, Scientific Works, 27-30 October, Kyiv (Ukraine). – 2011. – Abstract No BP.13. – P. 183.
14. Thermal emission of carbon surface under nanosecond laser excitation / S. Zelensky, O. Kopyshynsky, K. Zelenska // 10<sup>th</sup> Kharkiv Young Scientists Conference on Electromagnetic, Photonics and Biophysics, Book of Abstracts, 28 November - 2 December, Kharkiv (Ukraine). – 2011. – P. 79.
15. Nonlinear characteristics of laser-induced incandescence of rough carbon surfaces / S. Zelensky, L. Poperenko, A. Kopyshinsky, K. Zelenska // SPIE Photonics Europe 2012, Technical Summaries, 16-19 April, Brussels (Belgium). – 2012. – Abstract No 8434-51. – P. 276.
16. Effect of thermal conductivity of environment in the laser-induced incandescence of carbon surface / S. Zelensky, L. Poperenko, O. Kopyshinsky, M. Galushchak, K. Zelenska // 15<sup>th</sup> Int. Conference on Laser Optics "LO - 2012", Technical Program, 26-30 June, St. Petersburg (Russia). – 2012. – Abstract No ThR7-20. – P. 52.
17. Laser-induced incandescence of carbon surface: a method for temperature estimation / S. Zelensky, K. Zelenska // SPIE Optics and Optoelectronics 2013, Technical Summaries, 15-18 April, Prague (Czech Republic). – 2013. – Abstract No 8772-63. – P. 35.
18. Carbon surface temperature estimation by single-wavelength laser-induced incandescence measurements / S. Zelensky, K. Zelenska // XXI Int. School-Seminar of Galyna Puchkovska “Spectroscopy of Molecules and Crystals”, Book of Abstracts, 22-29 September, village Beregove, Bakhchisaray region, the Crimea (Ukraine). – 2013. – P. 286.
19. Thermal mechanisms of laser marking in transparent polymers with light-absorbing microparticles / K. Zelenska, S. Zelensky, L. Poperenko, S. Rozouvan, K. Kanev, V. Mizeikis, V. Gnatyuk // 12<sup>th</sup> Int. Conference on Global Research and Education: Inter-Academia 2013, Programme and Abstracts, 23-27 September, Sofia (Bulgaria). – 2013. – P. 37-38.
20. Features of laser-induced damage and creation of marking centers in digital material processing / V. Gnatyuk, O. Vlasenko, S. Levytskyi, K. Kanev, V. Mizeikis, T. Aoki, S. Gagarsky, L. Poperenko, K. Zelenska, A. Statsenko // 12<sup>th</sup> Int. Conference on Global Research and Education: Inter-Academia 2013, Programme and Abstracts, 23-27 September, Sofia (Bulgaria). – 2013. – P. 48.

21. Laser-induced incandescence of carbon surface: nonlinear properties and applications / K. Zelenska, S. Zelensky, S. Rozouvan, L. Poperenko // 14<sup>th</sup> Int. Young Scientists Conference “Optics and High Technology Material Science” SPO 2013, Scientific Works, 24-27 October, Kyiv (Ukraine). – 2013. – Abstract No BP.10. – P. 168-169.
22. Laser-induced incandescence of carbon surface at various values of ambient air pressure / K. Zelenska, A. Kopyshinsky, L. Poperenko // FOTONICA 2014 Convegno Italiano delle Tecnologie Fotoniche 16a edizione, Programma tecnico, 12-14 May, Naples (Italy). – 2014. – Abstract No P1\_34.
23. Laser marking in transparent materials and mechanisms of laser-induced defect formation / V. Gnatyuk, O. Vlasenko, S. Levytskyi, K. Zelenska, L. Poperenko, S. Gagarsky // FOTONICA 2014 Convegno Italiano delle Tecnologie Fotoniche 16a edizione, Programma tecnico, 12-14 May, Naples (Italy). – 2014. – Abstract No P1\_35.
24. Effect of ambient air pressure and initial temperature of carbon surface on laser-induced incandescence / K. Zelenska, S. Zelensky, A. Kopyshinsky, T. Aoki // The 7<sup>th</sup> International Symposium on Surface Science ISSS-7, Abstract Book, 2-6 November, Matsue, Shimane (Japan). – 2014. – Abstract No 3PA-65. – P. 10.
25. Modification of the CdTe-In interface by irradiation with nanosecond laser pulses through the CdTe crystal / K. Zelenska, D. Gnatyuk, T. Aoki // The 7<sup>th</sup> International Congress on Laser Advanced Materials Processing LAMP 2015, Technical digest, 26-29 May, Kitakyushu, Fukuoka (Japan). – 2015. – Abstract No Th2-LO-16.
26. Laser-induced creation of marks as information carriers for digital recording / V. Gnatyuk, O. Vlasenko, S. Levytskyi, T. Aoki, V. Mizeikis, S. Gagarsky, K. Zelenska, D. Gnatyuk // The 7<sup>th</sup> International Congress on Laser Advanced Materials Processing LAMP 2015, Technical digest, 26-29 May, Kitakyushu, Fukuoka (Japan). – 2015. – Abstract No Th2-LO-17.
27. Laser-induced incandescence of rough carbon surfaces / K. Zelenska, S. Zelensky, A. Kopyshinsky, T. Aoki // The 14<sup>th</sup> International Conference on Global Research and Education: Inter-Academia 2015, Abstracts, 28-30 September, Hamamatsu (Japan). – 2015. – P. 140-141.
28. Formation of diode detectors by laser irradiation of CdTe-In interface from the semiconductor side / K. Zelenska, D. Gnatyuk, T. Aoki // The 22<sup>nd</sup> International Symposium on Room-Temperature Semiconductor X-Ray and Gamma-Ray Detectors (RTSD 2015), 2015 IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference (2015 NSS/MIC), Conference Program Book, 31 October – 7 November, San Diego, CA (USA). – 2015. – Abstract No R3A-40.

## АНОТАЦІЯ

**Зеленська К. С. Теплове випромінювання світлопоглинальних поверхневих шарів при імпульсному лазерному збудженні – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.05 – оптика, лазерна фізика. – Київський національний університет імені Тараса Шевченка, МОН України, Київ, 2016.

Дисертація присвячена дослідженню термічних процесів, що відбуваються при імпульсному лазерному опроміненні світлопоглинальних поверхневих шарів, та визначенню характеристик індукованого лазером теплового випромінювання. Індуковане лазером теплове випромінювання поверхневого шару пресованого графіту характеризується показником нелінійності (на фіксованій довжині хвилі випромінювання у видимій спектральній області), величина якого порядку 10, що суттєво перевищує відповідні значення для дрібнодисперсного вуглецю в аерозолях і суспензіях. Вперше показано, що при опроміненні послідовністю імпульсів потужного лазерного випромінювання ( $\tau = 20$  нс, густина потужності  $5 \dots 25$  МВт/см<sup>2</sup>) інтенсивність індукованого лазером теплового випромінювання вуглецевих поверхонь підвищується при збільшенні дози лазерного опромінення, а тривалість імпульсу теплового випромінювання при цьому скорочується на 30...50 %.

Спостережувані закономірності пояснюються змінами структури поверхневого шару внаслідок: (1) неоднорідного нагрівання поверхневого шару та (2) випаровування досліджуваного матеріалу під дією потужного лазерного випромінювання. Важливими при цьому є такі фактори: (1) зменшення висоти виступів на шорсткій поверхні; (2) зменшення товщини шару речовини над порами, які граничать з поверхнею; (3) розширення приповерхневих пор.

Запропоновано новий оптичний метод експрес-оцінки максимальної температури поверхневого шару, нагрітого імпульсним лазерним випромінюванням, який ґрунтується на вимірюванні залежності інтегральної (по поверхні зразка) енергії імпульсу індукованого лазером теплового випромінювання (на фіксованій довжині хвилі і при фіксованій густині потужності лазерного випромінювання) від початкової температури поверхні.

**Ключові слова:** індуковане лазером теплове випромінювання, шорстка вуглецева поверхня, пористий вуглець, світлопоглинальні мікрочастинки, температура поверхні, оцінювання температури, лазерне нагрівання.

## АННОТАЦИЯ

**Зеленская Е. С. Тепловое излучение светопоглощающих поверхностных слоев при импульсном лазерном возбуждении – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика, лазерная физика. – Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, МОН Украины, Киев, 2016.

Диссертация посвящена изучению термических процессов, которые происходят при лазерном облучении светопоглощающих поверхностных слоев, и определению характеристик индуцированного лазером теплового излучения. Индуцированное лазером тепловое излучение поверхностного слоя пресованного графита характеризуется показателем нелинейности (при фиксированной длине волны излучения в видимой спектральной области), величина которого порядка 10, существенно превышает соответствующие значения для мелкодисперсного углерода в аэрозолях и суспензиях. Впервые показано, что при облучении

последовательностью импульсов мощного лазерного излучения ( $\tau = 20$  нс, плотность мощности  $5...25$  МВт/см<sup>2</sup>) интегральная (по поверхности) энергия импульса индуцированного лазером теплового излучения углеродных поверхностей возрастает при увеличении дозы лазерного облучения, а длительность импульса теплового излучения при этом сокращается на 30...50 %.

Наблюдаемые закономерности объясняются изменениями структуры поверхностного слоя вследствие: (1) неоднородного нагрева поверхностного слоя и (2) испарения исследуемого материала под действием мощного лазерного излучения. Важны при этом следующие факторы: (1) уменьшение высоты выступов на шероховатой поверхности; (2) уменьшение толщины слоя вещества над порами, которые граничат с поверхностью; (3) расширение пор у поверхности.

Предложен новый оптический метод экспресс-оценки максимальной температуры поверхностного слоя, нагретого импульсным лазерным излучением, который основан на измерении зависимости интегральной (по поверхности образца) энергии импульса индуцированного лазером теплового излучения (на фиксированной длине волны и при фиксированной плотности мощности лазерного излучения) от начальной температуры поверхности.

**Ключевые слова:** индуцированное лазером тепловое излучение, шероховатая углеродная поверхность, пористый углерод, светопоглощающие микрочастицы, температура поверхности, оценка температуры, лазерный нагрев.

## ABSTRACT

**Zelenska K. S. Thermal emission of light-absorbing surface layers under pulsed laser excitation – Manuscript.**

Thesis for a Doctor of Philosophy degree (Candidate of science in Physics and Mathematics) by specialty 01.04.05 – optics, laser physics. – Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2016.

In this work laser-induced incandescence (LII) of light-absorbing surface layers was studied under the Q-switched YAG:Nd laser excitation. For the surfaces irradiated by a sequence of laser pulses, the non-monotonic behavior of LII intensity with the increase of number of irradiating laser pulses was observed. Computer simulation of pulsed laser heating of rough carbon surfaces revealed essential non-uniformity of the temperature field on the irradiated surface hence the surface relief is affected by the laser irradiation due to the processes of evaporation of the peaks on the irradiated surface. The intensity of LII was calculated as a function of height of the surface roughness. The results of calculations explain the observed features of LII of carbon surfaces.

Significant nonlinearity in the dependence of LII intensity on the laser pulse power density was observed. For LII signals integrated over the surface the non-dimensional rate of the surface emission non-linearity  $\gamma$  was also calculated. The obtained values of  $\gamma$  are within the margins of 7...10 that indicate significant nonlinearity of LII.

LII of polished carbon surface at different values of ambient air pressure was studied. A decrease in ambient air pressure led to an increase of the LII intensity in about 1.5 times and extension of LII pulse fall time by about 70 percent due to changes in the thermal

conditions inside the sample material. The model of the porous carbon bulk is proposed for explanation of the observed effect.

The effect of laser-induced pore expansion on thermal emission with an increase in laser irradiation dose has been studied. The experimental results and calculation data demonstrate a significant impact of undersurface pore expansion on the LII behavior. Besides, LII strongly depends on the thickness of carbon layer covering a cavity which decreases under laser irradiation because of carbon evaporation.

The experiments show that the intensity of LII of carbon surface depends on the initial temperature of the investigated sample. A method is proposed for estimation of temperature of laser-heated surfaces. The method requires measurement of LII at a fixed wavelength with a moderate variation of initial sample temperature.

The observed phenomena are explained by changes in the morphology (structure) of the surface layer as a result of

- (i) Non-uniform heating of the surface layer and
- (ii) Evaporation of the material under the action of powerful laser radiation.

In particular, the following factors are important:

- (i) Reduction of the height of irregularities on the rough surface;
- (ii) Decrease in substance thickness above the pores, which border on the surface;
- (iii) Expansion of subsurface pore.

**Keywords:** laser-induced incandescence, rough carbon surface, porous carbon, light-absorbing microparticles, surface temperature, temperature estimation, laser heating.