ЗЕЛЕНСЬКА КАТЕРИНА СЕРГІЇВНА. Назва дисертаційної роботи: "ТЕПЛОВЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ СВІТЛОПОГЛИНАЛЬНИХ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ПРИ ІМПУЛЬСНОМУ ЛАЗЕРНОМУ ЗБУДЖЕННІ"

Міністерство освіти і науки України

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

На правах рукопису

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

Дисертація на здобуття наукового ступеня

кандидата фізико-математичних наук

Науковий керівник:

Поперенко Леонід Володимирович

доктор фізико-математичних наук,

професор

Київ – 2016

2

ЗМІСТ

ВСТУП 4

РОЗДІЛ 1. ОПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВУГЛЕЦЮ ТА ТЕПЛОВЕ

ВИПРОМІНЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ МІКРОЧАСТИНОК 11

1.1. Оптичні властивості вуглецю 11

1.2. Індуковане лазером теплове випромінювання вуглецевих мікрочастинок

в аерозолях 14

1.3. Індуковане лазером теплове випромінювання світлопоглинальних

мікрочастинок у конденсованих середовищах 19

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1 ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ 29

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТІВ І РОЗРАХУНКІВ 31

2.1. Виготовлення досліджуваних зразків 31

2.1.1. Морфологія поверхні та внутрішня структура поверхневих шарів 31

2.1.2. Суспензії світлопоглинальних мікрочастинок у полістиролі 34

2.2. Експериментальні методи досліджень 35

2.3. Методика коригування осцилограм 42

2.4. Методика розрахунків 44

2.4.1. Модель лазерного нагрівання та індукованого лазером теплового

випромінювання вуглецевої поверхні 45

2.4.2. Метод оцінювання температури вуглецевої поверхні при

лазерному опроміненні 49

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2 54

РОЗДІЛ 3. ВЛАСТИВОСТІ ІНДУКОВАНОГО ЛАЗЕРОМ ТЕПЛОВОГО

ВИПРОМІНЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ПОВЕРХОНЬ 56

3.1. Тривалість імпульсу та спектральний склад індукованого лазером

теплового випромінювання вуглецевих поверхонь 56

3.2. Відгук теплового випромінювання вуглецевих поверхонь на зміни

густини потужності лазерних імпульсів 62

3.3. Розподіл температур при лазерному опроміненні шорсткої вуглецевої

поверхні 65

3

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3 68

РОЗДІЛ 4. ІНДУКОВАНІ ЛАЗЕРОМ ТРАНСФОРМАЦІЇ ПОВЕРХНЕВИХ

ШАРІВ ВУГЛЕЦЕВИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ТЕПЛОВЕ

ВИПРОМІНЮВАННЯ 69

4.1. Залежність інтегральної (по поверхні зразка) енергії та тривалості

імпульсу індукованого лазером теплового випромінювання від дози

лазерного опромінення 69

4.2. Залежість інтегральної (по поверхні зразка) енергії імпульсу

індукованого лазером теплового випромінювання від випаровування

нерівностей на вуглецевій поверхні при наборі дози лазерного

опромінення 73

4.3. Залежність характеристик індукованого лазером теплового

випромінювання від трансформацій пористої структури вуглецевих

матеріалів при лазерному опроміненні 76

4.4. Залежність характеристик індукованого лазером теплового

випромінювання полірованої вуглецевої поверхні від тиску

навколишнього повітря 82

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4 88

РОЗДІЛ 5. ПРИКЛАДИ ЗАСТОСУВАННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ 89

5.1. Застосування методу оцінювання температури розігрітої лазером

поверхні вимірюванням інтегральної (по поверхні зразка) енергії

імпульсу індукованого лазером теплового випромінювання на

фіксованій довжині хвилі 89

5.2. Розрахунок розподілу температур всередині тришарової структури

напівпровідник-метал-вода при імпульсному лазерному опроміненні 93

5.3. Термічні механізми лазерного маркування у полістиролі, активованому

світлопоглинальними мікрочастинками 97

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 5 104

ВИСНОВКИ 105

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 107

4

ВСТУП

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, LII). 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

неозброєним оком) випромінювання із суцільним спектром у видимому

діапазоні довжин хвиль. Найбільша увага науковців приділяється індукованому

5

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

6

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.

7

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

8

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

9

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 мікрочастинками, 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

th, 10th Kharkiv Young Scientists Conference on Electromagnetic, Photonics

and Biophysics (Kharkiv, UKRAINE, 2009, 2011).

2. 11th, 12th, 14th 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. 12th Int. Conference on Global Research and Education: Inter-Academia 2013

(Sofia, BULGARIA, 2013).

10

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 14th International Conference on Global Research and Education: InterAcademia 2015 (Hamamatsu, JAPAN, 2015).

12. The 22nd International Symposium on Room-Temperature Semiconductor XRay 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 (з яких 4 роботи у наукових виданнях, що

входять до бібліографічної і реферативної бази даних Scopus), 4 статті у

реферованих збірниках наукових праць (з яких 4 роботи у наукових виданнях,

що входять до бібліографічної і реферативної бази даних Scopus) 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.

ВИСНОВКИ

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щозначноперевищуєвідповіднізначеннядля

дрібнодисперсноговуглецюваерозоляхісуспензіяхщозумовлено

кінетикоюпроцесівтеплообмінууповерхневомушаріприпоглинанні

лазерноговипромінювання

Результатикомп’ютерногомоделюваннякінетикитемпературногополяу

приповерхневомушаріприімпульсномулазерномуопроміненні

показуютьщошорсткістьповерхнівисотавиступівнаповерхні

впливаєнаінтегральнупоповерхнізразкаенергіюімпульсу

індукованоголазеромтепловоговипромінюванняатакожщопри

опроміненнішорсткоїповерхнілазернимиімпульсамипереважне

випаровуванняматеріалувідбуваєтьсязвершинвиступів

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

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

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

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

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