

PACS numbers: 41.60.Cr, 42.55.-e, 42.55.Px, 42.55.Zz, 42.55.Tv, 42.55.Ah, 42.60.Jf

Форми отоплення поверхні твердого тіла під дією імпульсного лазерного випромінювання

Л. В. Породько, А. Б. Демчишин*

*Институт хімії поверхні ім. О. О. Чуйка НАН України,
вул. Генерала Наумова, 17,
03164, Київ, Україна*

**Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
фізичний факультет, кафедра фізики металів,
просп. Акад. Глушкова, 4,
03187, Київ, Україна*

Розглянуто уявлення про взаємодію інтенсивних імпульсних потоків світлової енергії з поверхнею речовини, в тому числі з руйнуванням поверхні. Задача полягає в прогнозуванні критичних параметрів впливу лазерного випромінювання на властивості приповерхневих твердих матеріалів (модифікація поверхні, топлення, випарування, зварювання, різання та ін.), що працюють в широкому діапазоні, — від низькоенергетичних та тривалих до високоенергетичних та коротких, — радіаційної дії.

Considered the idea of the interaction of intensive impulsive streams of light energy with the surface of substance including with destruction of surface. A task consists in prognostication of critical parameters of influence of laser radiation on property of solid materials materials (modification of surface, drown, evaporation, welding, cutting and other) that work in a wide range, from low energy and protracted to high energy and short, radiation action.

Рассмотрены представления о взаимодействии интенсивных импульсных потоков световой энергии с поверхностью вещества, в том числе с разрушением поверхности. Задача заключается в прогнозировании критических параметров воздействия лазерного излучения на свойства приповерхностных твердых материалов (модификация поверхности, плавление, испарения, сварки, резки и др.), которые работают в широком диапазоне, — от низкоэнергетических и длительных до высокоэнергетических и коротких, — радиационного воздействия.

Ключові слова: низькоенергетичні та високоенергетичні, імпульси фемтосекундної тривалості, наносекундний імпульс, кратери.

(Отримано 6 жовтня 2011 р.)

1. ВСТУП

Розробки лазерних технологій обробки матеріалів в умовах вакууму та газових середовищ (модифікація поверхні, топлення, випарування, зварювання, різання та ін.) призвели до появи потужних лазерів, що працюють у широкому діапазоні — від низькоенергетичних та тривалих (в медицині) до високоенергетичних та коротких (10^{16} Вт/см² з довжиною імпульсу 10–1000 фемтосекунд (1 фс = 10^{-15} с)) [1, 2, 3]. Технології спрямовують свої дослідження в область усе більш високих лазерних потужностей та все більш коротких імпульсів. Тому постає задача, що пов'язана з теоретичним прогнозуванням наслідків потужного лазерного випромінювання на поверхню речовини, і, перш за все, задача визначення критичних параметрів впливу випромінювання на властивості твердих матеріалів. Задача такого прогнозування і визначення критичних параметрів є актуальною для уникнення незворотніх змін властивостей матеріалів — руйнування оптичних елементів (дзеркал, оптичних покриттів тощо), що перебувають тривалий час під впливом потужного лазерного випромінювання (особливо імпульсно-періодичного). Для вибору оптимальних режимів лазерної обробки матеріалів і створення стійких до впливу лазерного випромінювання оптичних елементів існує необхідність у знанні механізмів, що викликають незворотні зміни під впливом лазерного опромінення [4, 6].

За допомогою дзеркальних оптичних систем лазерний промінь можна спрямовувати у важкодоступні місця, передавати на значні відстані без втрат енергії. Слід мати на увазі, що з підвищенням температури у твердому тілі активізується ряд процесів, які призводять до зміни його фізичних властивостей, зокрема, теплоємності, густини та ін.

Основними характеристиками імпульсного лазерного випромінювання, що використовуються для визначення стійкості матеріалів до імпульсного впливу, є інтенсивність, тривалість і форма імпульсу. В неперервному режимі лазерна стійкість визначається як сукупність двох характеристик: інтенсивності випромінювання та тривалості опромінення до виникнення пошкоджень.

Пошкодження поверхні досліджуваного елемента відбувається внаслідок комплексного впливу принаймні трьох факторів: власне лазерного випромінювання, плазми, що утворюється при руйнуванні матеріалу, та безпосереднього контакту як твердого тіла, так і ударних хвиль плазмового факела з імпульсом випромінювання [2, 5].

2. МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження процесів, що супроводжують вплив лазерного випромінювання на поверхню речовини, виконуються в багатьох напрямках. Але загалом досліджуються (в основному експериментально) особливості або окремих речовин, що опромінюються (кремній [10], алюміній [2], сталь [3], графіт [11], титан [12], срібло [13], мідь [14], алмаз [15]), або імпульсний вплив, обмежений по енергії імпульсів різної тривалості [2, 3]. Велику кількість робіт присвячено дослідженням наслідків впливу імпульсів різної тривалості [10]. В результаті розрахунків одержано деякі закономірності, що дають певне підґрунтя для теоретичних досліджень, які змогли б, з одного боку, об'єднати відомі результати, а з іншого, допомогти зрозуміти від чого ж саме залежить поведінка речовини в екстремальних умовах, які саме імпульси (їх потужність і довжина) більш вигідні в кожному окремому випадку та які характеристики речовини є вирішальними в процесі руйнування.

Дуже багато робіт виконуються для виявлення закономірностей поведінки оптичних матеріалів [6]. У результаті експериментального дослідження міцності матеріалів силової ІЧ-оптики видалено кореляцію порогів пошкодження матеріалів по інтенсивності випромінювання з коефіцієнтами заломлення та відбиття [6]. Встановлено, що такі пороги пошкодження матеріалів пропорційні $(n + 1)^2 / 4n^2$ або $\sim (1 + \sqrt{R})^{-2}$, де n , R — коефіцієнти заломлення та відбиття на гранях. Такі результати для оптичних кристалів узгоджуються з експериментальними значеннями порогів пошкодження поверхні іонних і напівпровідникових кристалів та металодзеркал в області високих значень коефіцієнтів відбиття $> 0,1$ і заломлення $> 1,5$ [6]. Матеріали з величинами коефіцієнтів відбиття $< 0,1$ і заломлення $< 1,5$ тобто, досить прозорі для даного випромінювання, мають пороги пошкодження поверхні тим вищі, чим більшою є величина ширини забороненої зони.

В 60-х роках минулого століття в оптиці оперували імпульсами наносекундної тривалості (10^{-9} с), що дозволяло досліджувати процеси з характерною тривалістю в десятки й сотні наносекунд. В наступні десятиліття були розвинені способи генерувати пікосекундні (10^{-12} с) й фемтосекундні (10^{-15} с) імпульси. Це відкрило можливості вивчати коливний і обертальний внутрішньомолекулярні рухи, динаміку носіїв у напівпровідниках (і напівпровідникових наноструктурах), фазові переходи у твердих тілах, формування й розрив хемічних зв'язків тощо. Стало можливим за допомогою імпульсів малої тривалості вивчати динаміку швидких процесів, що відбуваються з атомами в молекулах і твердих тілах.

До кінця 1990-х років було відпрацьовано техніку генерації гранично коротких фемтосекундних імпульсів (тривалістю порядку 5 фс)

[8]. Одержання ще більш коротких імпульсів аттосекундної тривалості (10^{-18} с) в силу фундаментальних обмежень лінійної фізики вже не дозволяє залишатися в ближньому інфрачервоному або оптичному діапазонах хвиль. Для цього виникає потреба використання жорсткого ультрафіолету — м'якого рентгенового випромінювання.

3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Сучасне покоління лазерів і лазерних систем дозволяє одержувати імпульси фемтосекундної тривалості. Фокусування світлового імпульсу з тривалістю 10–1000 фс дає можливість одержати інтенсивність у діапазоні від 10^{14} до 10^{21} Вт/см² [1].

Для з'ясування основних якісних рис процесу оптичного нагрівання речовини в багатьох випадках виявляється достатнім змодельювати неперервне лазерне випромінювання ступінчатою функцією Хевісайда:

$$f\left(\frac{t}{\tau_p}\right) = H(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

а імпульсне — прямокутною обвідною інтенсивності:

$$f\left(\frac{t}{t_p}\right) = \frac{H(t) - H(t - t_p)}{t_p}. \quad (2)$$

У граничному випадку, коли $t_p \rightarrow \infty$, одержуємо миттєвий імпульс, який звичайно задають за допомогою δ -функції, тобто $f(t/t_p) = \delta(t)$. Цікавим з практичної точки зору є імпульс, інтенсивність якого швидко зростає до моменту часу t_p , а потім повільно спадає. Такі імпульси генерують з метою уникнення швидкого охолодження тіла, і їх можна задати, наприклад, формулою

$$f\left(\frac{t}{t_p}\right) = \begin{cases} \left(\frac{t}{t_p}\right)^n, & t < t_p \\ \exp[-b(t - t_p)], & t > t_p \end{cases}. \quad (3)$$

Імпульси високої інтенсивності і відповідної тривалості, потрапляючи на поверхню твердої речовини, призводять до суттєвих змін цієї поверхні, що викликає особливу зацікавленість [5]. На рис. 1 наведено приклад такої обробки. Як видно, кратери, створені лазерним імпульсом, відрізняються за своєю формою.

Суттєво те, що руйнування поверхні може відбуватися як з отопленням країв кратера, так і без отоплення. В [3] стверджується, що

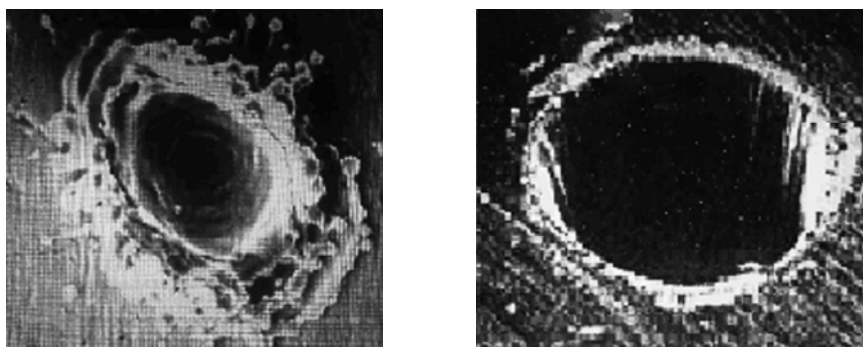


Рис. 1. Кратер діаметром 100 мікрметрів, просвердлений у сталі лазерним імпульсом (наносекундним зліва та фемтосекундним праворуч) [3].

існує прямо пропорційна залежність між тривалістю імпульсу та виглядом кратера, а саме, мірою отоплення його країв. З рис. 1 видно, що кратер, створений наносекундним імпульсом, має більш отоплені краї, ніж кратер, просвердлений фемтосекундним імпульсом (10^{-15} с).

У роботі [7] наведено результати (рис. 2), з яких видно, що не все залежить від тривалості імпульсу.

Результати цих експериментів указують на те, що наявність або відсутність отоплення кратера суттєво залежить не тільки від тривалості падаючого на поверхню імпульсу, але й від його інтенсивності.

Не зважаючи на різницю між кратерами видно, що в обох випадках (як для рис. 1, так і для рис. 2) імпульси фемтосекундної тривалості не дають отоплених країв.

Проте, виходячи з експериментальних досліджень, виконаних у роботі [8], можна бачити (рис. 3), що, хоча отоплених країв у випадку обробки матеріялу фемтосекундними імпульсами немає, на сті-

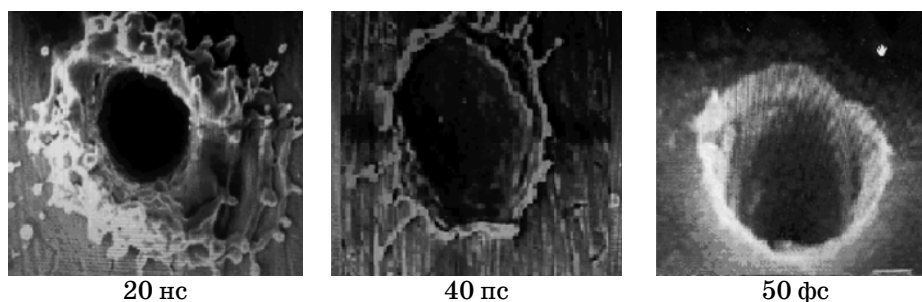


Рис. 2. Кратери, що просвердлені імпульсами з довжинами 20 нс, 40 пс та 50 фс в алюмінієвих зразках. Енергія імпульсу — 2,7 мкДж/імпульс. Для обробки використовувалися «пакети» по 3 імпульси [7].

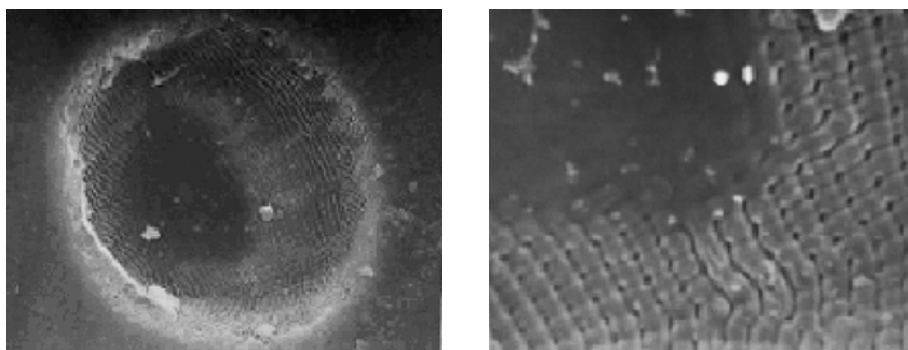


Рис. 3. Структура граней кратера, утвореного дією 25 імпульсів випромінювання з довжиною в 5 фс та енергією $6,9 \text{ Дж/см}^2$ у кварці [8].

нках свердловини отоплення має місце навіть при дуже коротких довжинах імпульсів у 5 фс. Цей факт говорить про те, що процеси, які відбуваються при руйнуванні поверхні над короткими лазерними імпульсами, все ж таки можна розглядати на основі уявлень про суцільне середовище.

4. ВИСНОВКИ

Питанням, що пов'язані з руйнуванням поверхні короткими лазерними імпульсами великої інтенсивності, присвячено велику кількість експериментальних та теоретичних досліджень. В останні роки зростає інтерес до використання дуже коротких імпульсів [7]. У зв'язку із цим виникає необхідність дослідження процесів, що відбуваються при взаємодії коротких лазерних імпульсів із плазмою, яка виникає при опроміненні матеріялу. На формування плазми, в свою чергу, істотно впливає структура та властивості поверхневого шару мішені. Факторами, що можуть впливати на розвинення процесу можуть бути гладкість або шорсткість поверхні [9], поруватість [2], поглинальна здатність речовини.

Не зважаючи на велику кількість експериментальних робіт у цій області, фізика процесів, що відбуваються при опромінюванні речовини, залишається незрозумілою [3]. Як правило, роботи, які присвячені вивченню впливу лазерного випромінювання на речовину, є експериментальними. Роботи теоретичного напрямку стосуються здебільш не поведінки речовини, що опромінюється, а вивчення властивостей плазми, яка виникає при руйнуванні поверхні, причому роботи з дослідження процесів руйнування поверхні — це роботи переважно обчислювального характеру.

Отже, теоретичні моделі, що використовуються для інтерпретації поведінки речовини в екстремальному стані, базуються на при-

пущенні, що фазовий стан досліджуваного матеріалу не змінюється впродовж усього процесу лазерної обробки, а можливість швидких якісних змін ігнорується. Урахування кінетики подібних змін, тобто льокальних фазових перетворень, є суттєвим.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Р. В. Волков, В. М. Гордиенко, Д. М. Голишников, *Письма ЖЭТФ*, № 77: 568 (2003).
2. А. Б. Савельев-Трофимов, *Управление свойствами плотной плазмы фемтосекундного лазерного импульса и иницирование низкоэнергетических ядерных процессов* (Диссертация ... д. физ.-мат. н.; 01.04.21) (Москва: МГУ: 2003).
3. D. Hulin, *Rapport sur la Science et la Technologie No. 09 l'Academie des Sciences 'Sciences aux Temps Ultracourts (de l'Attoseconde aux Petawatts)'* (Londres-Paris-New York: 2000), p. 197.
4. С. Г. Казанцев, *Оптика атмосферы и океана*, **16**, № 4: 390 (2003).
5. J. C. Gauthier, *Rapport sur la Science et la Technologie No. 09 l'Academie des Sciences 'Sciences aux Temps Ultracourts (de l'Attoseconde aux Petawatts)'* (Londres-Paris-New York: 2000), p. 225.
6. С. Г. Казанцев, *Перспективные материалы проходной оптики мощных ИК лазеров*, <http://www.uniphys.ru/journal/N1-05/toparticle/toparticle.htm>
7. X. Zhu, A. Yu. Naumov, and D. M. Villeneuve, *Appl. Phys. A.*, **69** (Suppl.), 367 (1999).
8. M. Lenzner, *Int. J. Mod. Phys. B.*, **13**, № 13: 1559 (1999).
9. J. Tadano, H. Kumakura, and Y. Ito, *Appl. Phys. A.*, **79**, No. 4-6: 1031 (2004).
10. Y. C. Lam, D. V. Tran, and H. Y. Zheng, *Surf. Rev. Lett.*, **11**, No. 2: 217 (2004).
11. M. B. Agranat, S. I. Ashitkov, and V. E. Fortov, *J. Exp. Theor. Phys.*, **88**, No. 2: 370 (1999).
12. H. Reimer, J. Gold, B. Kasemo, and D. Chakarov, *Appl. Phys. A.*, **77**, 491 (2003).
13. B. Toftmann, J. Schou, and N. B. Larsen, *Appl. Phys. A*, **69**, 811 (1999).
14. A. I. Boriskin, V. M. Eremenko, and P. A. Pavlenko, *Tech. Phys.*, **49**, No. 6: 770 (2004).
15. H. Park, Y. K. Hong, and J. S. Kim, *Appl. Phys. Lett.*, **69**, No. 6: 779 (1996).