

ОСОБЛИВОСТІ ПОШИРЕННЯ СВІТЛА В ЕЛЕМЕНТАРНИХ НАПІВПРОВІДНИКАХ ПІД ЧАС ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ

С.Д. Точилін

Запорізький національний технічний університет

Україна

Надійшла до редакції 04.03.2011

Проведено дослідження поширення світла в германії та сірці при випарному режимі лазерного впливу на поверхню матеріалів. У результаті аналізу експериментальних даних визначена швидкість формування наскрізних отворів та встановлені тимчасові особливості поглинання світла в досліджених зразках.

Ключові слова: лазер, випромінювання, поглинання, перфорація, германій, сірка.

Проведено изучение распространения света в германии и сере при испарительном режиме лазерного воздействия на поверхность материалов. В результате анализа экспериментальных данных определена скорость формирования сквозных отверстий и установлены временные особенности поглощения света в исследованных образцах.

Ключевые слова: лазер, излучение, поглощение, перфорация, германий, сера.

The study of light propagation in germanium and sulfur is carried out at evaporating mode of laser influence on a surface of materials. As a result of the analysis of experimental data the speed of formation of through apertures is determined and the temporary features of absorption factor in the investigated samples are established.

Keywords: laser, emission, absorption, perforation, germanium, sulphur.

Сучасний етап розвитку електронної техніки стимулює використання нових матеріалів та технологій. До таких технологій варто віднести, зокрема, лазерну обробку матеріалів, яка останнім часом широко використовується при виробництві компонентів електронної техніки. За її допомогою створюються *p-n*-переходи, здійснюється підстроювання резисторів, формуються отвори в електронних платах високої щільності монтажу [1] і т. ін.

У цьому зв'язку актуальним є вивчення різних режимів лазерного впливу (ЛВ) на матеріали, а також фізичних явищ у них, які збуджуються випромінюванням технологічного лазера, для контролю та оптимізації лазерної обробки.

Дослідження подібного роду були виконані в ряді робіт, зокрема, в [2 – 4]. Так у роботі [2], було розглянуто ряд режимів ЛВ на поверхню матеріалів. При цьому особлива роль в [2] приділялася дослідженню випарного режиму ЛВ на поверхню. Він виникає при дії на матеріал лазерного випромінювання з параметрами: $10^8 < P < 10^{10}$ Вт/см², $\tau \approx 10^{-8}$ с, де *P* – щільність потужності імпульсів лазер-

ного випромінювання, τ – тривалість імпульсів. Основною особливістю випарного режиму є можливість здійснення для різних матеріалів чистого прецизійного різання та високоякісної перфорації [2]. Однак в [2] під час вивчення випарного режиму ЛВ на матеріали не враховувалися особливості поглинання світла в зразках під час лазерної обробки.

У той час відомо, що під час лазерної обробки матеріалу відбувається збільшення значення його коефіцієнта поглинання *k* [5, 6]. При цьому ініціювання росту об'ємного поглинання під час ЛВ на поверхню зразка може бути обумовлено проявом різного роду механізмів – напівпровідникового, термохімічного та ін.

Крім того, причиною зміни *k* можуть бути структурні фазові переходи [4], що відбуваються в оброблюваному матеріалі при підвищенні температури. Наприклад, сірка, що останнім часом широко використовується при створенні нових композитних наноматеріалів на основі пористого вуглецю, синтетичних опалів та напівпровідників A^{III}B^V [7 – 9], при нагріванні від кімнатної температури зазнає фазовий перехід з ромбічної в моно-

клінну фазу при 368,8 К та плавиться при 392,5 К [10].

Тобто, для найбільш повного опису ЛВ на матеріали у випарному режимі доцільно розглядати й питання, пов'язане зі зміною поглинання лазерного випромінювання в оброблюваних зразках.

У даній роботі було поставлене завдання дослідження особливостей поширення світла в елементарних напівпровідниках електронної техніки – германії та сірці [11] при випарному режимі ЛВ на поверхню матеріалів. При цьому передбачалося враховувати зміну поглинання лазерного випромінювання в оброблюваних зразках.

Теоретичні та експериментальні дослідження, пов'язані з особливостями поширення світла в різноманітних середовищах, були проведені в багатьох роботах, зокрема, в [12, 13].

Нами для пояснення особливостей поширення світла в досліджених зразках використовувався ряд теоретичних моделей, їхньою основою була модель зустрічних потоків, що описує поширення світла в дисперсних середовищах [12]. При цьому, дисперсне середовище характеризується коефіцієнтом поглинання k та коефіцієнтом розсіювання s , що визначає світловий потік відбитий нескінченно тонким шаром.

Відповідно до моделі зустрічних потоків, інтенсивність J світлового пучка, що пройшов через шар середовища, може бути записана у вигляді [12]:

$$J = J_0 \frac{(1 - R^2) \exp(-Lx)}{1 - R^2 \exp(-2Lx)}, \quad (1)$$

де J_0 – інтенсивність первинного пучка, x – товщина шару середовища, $L = (k^2 + 2ks)^{1/2}$ – ефективний показник ослаблення, $R = (s + k - L)/s$ – коефіцієнт відбиття від нескінченно товстого шару середовища, x – товщина шару середовища.

У випадку, якщо ослаблення світла в середовищі відбувається в основному внаслідок поглинання ($k \gg s$), вираз (1) набирає вигляду

$$J = J_0 \exp(-kx), \quad (2)$$

Формула (2) являє математичний запис закону Бугера [14].

Припустивши, що товщина зразка зменшується лінійно з часом $x = x_0 - vt$ (v – швидкість формування наскрізного отвору, x_0 – початкова товщина шару середовища, t – час впливу лазерного випромінювання) вирази (1) та (2) набувають вигляду

$$J = J_0 \frac{\left[1 - \left(\frac{s + k - \sqrt{k^2 + 2ks}}{s} \right)^2 \right]}{1 - \left(\frac{s + k - \sqrt{k^2 + 2ks}}{s} \right)^2} \times \frac{\exp \left[-\left(\sqrt{k^2 + 2ks} \right) (x_0 - vt) \right]}{\exp \left[-2 \left(\sqrt{k^2 + 2ks} \right) (x_0 - vt) \right]}, \quad (3)$$

$J = J_0 \exp[-k(x_0 - vt)] = J_1 \exp(kvt)$, (4) відповідно, де $J_1 = J_0 \exp(-kx_0)$ – інтенсивність світла, що пройшло через зразок у початковий момент часу.

Для урахування зміни коефіцієнта поглинання при ЛВ на зразок передбачалося, що тимчасова залежність k є багаточлен ступеня m :

$$k = \sum_{n=0}^m k_n t^n, \quad (5)$$

де k_0, k_1, \dots, k_m – постійні коефіцієнти.

Використання подібних багаточленів для визначення функціональних особливостей фізичних величин широко застосовується при математичній апроксимації експериментальних даних [15].

Із використанням залежності (5) вираз (4) набирає вигляду

$$J = J_2 \exp \left[k_0 vt - (x_0 - vt) \sum_{n=1}^m k_n t^n \right], \quad (6)$$

де $J_2 = J_0 \exp(-k_0 x_0)$ – інтенсивність світла, що пройшло через зразок у початковий момент часу.

Особливості поширення світла в сірці та германії під час лазерної обробки вивчалися нами за допомогою твердотілого лазера на ітрієво-алюмінієвому гранаті з домішкою неодиму та лініями генерації $\lambda_1 = 1,064$ мкм і $\lambda_2 = 532$ нм. Лазер працював у режимі з модульованою добротністю, із частотою імпульсів лазерного випромінювання, що дорівнює 25 Гц. Щільність потужності та трива-

лість імпульсів лазерного випромінювання в досліджених матеріалах мала величину порядку 10^9 Вт/см² та 10^{-8} с, відповідно, що забезпечувало реалізацію випарного режиму ЛВ на поверхню.

Процеси поширення світла в матеріалах електронної техніки при лазерній обробці вивчалися з використанням тимчасових залежностей інтенсивності випромінювання, що пройшло через зразки, з довжиною хвилі λ_2 . Спостереження здійснювалося за допомогою промислового оптичного устаткування – спектрометра ДФС-12 та фотоелектричної системи реєстрації. Спектральна ширина щілини подвійного монохроматора становила величину $0,5$ см⁻¹.

Нами використовувалася оптична схема “на провіт”. При цьому коліматор, що збирає випромінювання для аналізу, мав у центральній частині непрозорий екран із площею порядку 1 см². Він повністю перекривав пучок лазерного випромінювання в площині коліматора за відсутності зразка дослідження. Екран захищав фотопомножувач та спектральний прилад від впливу на них прямого лазерного пучка.

Зразки для досліджень являли собою тонкі пластини товщиною $0,3$ мм та $0,9$ мм, для германія та сірки, відповідно.

На рис. 1 зображено тимчасовий розвиток інтенсивності світла J , що пройшло через сірку та германій, криві 1 та 2, відповідно. Як бачимо із цього рисунка, інтенсивність світла J , що пройшло через досліджені зразки, випробувала істотні зміни.

Так, тимчасовий розвиток інтенсивності світла, що пройшло через сірку, мав три характерних інтервали. На першому з них спостерігалася незначне монотонне зростання величини J . На другому – J різко зростала. Цей інтервал був обмежений часом $t_1 = 45,7$ с, після досягнення якого інтенсивність світла виходила на насичення (крива 1 на рис. 1).

У той час, у непрозорих для випромінювання з довжиною хвилі λ_2 зразках германія тимчасовий розвиток інтенсивності світла, що пройшло через них, мав спочатку інтервал з незмінним рівнем сигналу $J \approx 0$. Після його завершення інтенсивність світла також різко зростала. Потім, після досягненні значення

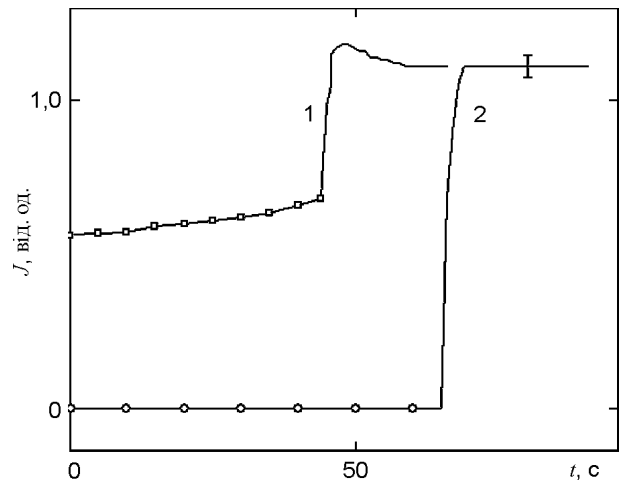


Рис.1. Тимчасові залежності інтенсивності світла J , що пройшло через сірку та германій під час лазерної обробки, криві 1 і 2, відповідно. Точки на рисунку – теоретичні значення J .

часу $t_2 = 67,1$ с, інтенсивність світла плавно виходила на насичення (крива 2 на рис. 1).

Відзначимо, що в досліджених зразках за час t_1 та t_2 відбувалося формування наскрізних отворів з діаметром порядку 100 мкм.

Даний експериментальний факт дозволив визначити швидкість формування наскрізних отворів у досліджених матеріалах. Як з'ясувалося, вона мала значення $\approx 4,47 \cdot 10^{-6}$ м/с та $1,97 \cdot 10^{-5}$ м/с, для германія і сірки, відповідно.

Обробка експериментальних даних щодо поширення світла в сірці під час лазерної обробки була виконана за допомогою математичної апроксимації. Для цих цілей нами була розроблена комп'ютерна програма мовою програмування Java. Ця програма реалізувала один з найбільш ефективних методів нелінійного оцінювання параметрів, а саме квазіньютонівський метод змінної метрики (метод Девідона-Флетчера-Пауела) [16]. При цьому, розроблена Java-програма, дозволяла оцінити як параметри математичної моделі (формули (3), (4) та (6)), так і коефіцієнт детермінації D моделі при апроксимації експериментальних даних.

Математична апроксимація експериментальних даних щодо поширення світла в сірці була виконана для 10 пар значень J і t , її початкові параметри дорівнювали 10^{-3} .

Як з'ясувалося в результаті математичної апроксимації даних експерименту в сірці, величина D мала значення $0,965$; $0,940$ та $0,993$, відповідно для виразів (3), (4) і (6) з $m = 1$.

Однак у нашому випадку параметри формули (3) не мали фізичного сенсу $-s > 1,0$. У той час найбільш точно описує експеримент у сірці формула (6), що враховує найбільш простий випадок зміни поглинання лазерного випромінювання в оброблюваному зразку в процесі досліджень. При цьому величини k_0 та k_1 , що входять в (6) та характеризують лінійне зростання коефіцієнта поглинання світла в сірці, мали значення $2,135 \text{ см}^{-1}$ та $2,97 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, відповідно.

Обробка експериментальних даних по поширенню світла в германії під час лазерної обробки здійснювалася з використанням співвідношення (4). У цьому випадку, теоретичні значення $J(t)$ для Ge були отримані для незмінного з перебігом часу значення коефіцієнта $k = \infty \text{ см}^{-1}$. Нескінченно велике значення коефіцієнта поглинання світла для германія пояснюється непрозорістю зразка для лазерного випромінювання з довжиною хвилі λ_2 .

На рис. 1 у вигляді точок зображені теоретичні значення J , отримані нами для германія та сірки, з використанням співвідношень (4) та (6) з $m = 1$, відповідно.

Як бачимо з рис. 1, спостерігається задовільне узгодження між теорією та експериментом у досліджених зразках у тимчасовому інтервалі формування наскрізних отворів.

Таким чином, нами було проведено експериментальне дослідження поширення світла в елементарних напівпровідниках електронної техніки – германії та сірці при випарному режимі ЛВ на поверхню.

Визначена величина швидкості перфорації наскрізних отворів у досліджених зразках під час їхньої обробки лазерним випромінюванням.

Установлено залежність від часу коефіцієнта поглинання в сірці. Зроблена оцінка значення коефіцієнта поглинання світла в германії.

Отримані результати вказують на необхідність урахування зміни поглинання випромінювання для детального опису процесу поширення світла в елементарних напівпровідниках під час лазерної обробки.

Дослідження особливостей поширення світла при випарному режимі ЛВ на повер-

хню можуть використовуватися для оптимізації та контролю процесів лазерної обробки матеріалів електронної техніки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вейко В.П. Опорный конспект лекций по курсу “Физико-технические основы лазерных технологий”. Раздел: Лазерная микрообработка. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2008. – 141 с.
2. Иванов А.Ю., Скворцов Г.Е. Испарительный режим лазерного воздействия на поверхность//Письма в ЖТФ. – 2000. – Т. 26, Вып. 15. – С. 65-71.
3. Горный С.Г., Григорьев А.М., Лопота В.А., Туричин Г.А. Особенности получения отверстий в металлических материалах модулированным лазерным излучением//Физика и химия обработки материалов. –1998. – № 5. – С. 23-26.
4. Гуреев Д.М., Камашев А.В., Ямщиков С.В. Механизмы фазовых превращений в железе и сталях при лазерном нагреве. – Самара: Самарский университет, 1999. – 164 с.
5. Либенсон М.Н. Лазерно-индуцированные оптические и термические процессы в конденсированных средах и их взаимное влияние. – СПб.: Наука, 2007. – 423 с.
6. Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Конспект лекций. Часть I. Поглощение лазерного излучения в веществе. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2008. – 141 с.
7. Сморгонская Э.А., Кютт Р.Н., Шуман В.Б., Данишевский А.М., Гордеев С.К., Гречинская А.В. Малоугловое рентгеновское рассеяние в нанокompозите углерод-сера, полученном на основе объемного нанопористого углерода//Физика твердого тела. – 2002. – Т. 44, Вып. 10. – С. 1908-1914.
8. Горелик В.С., Точилин С.Д. Комбинационное рассеяние света в композите опал/сера// Неорганические материалы. – 2007. – Т. 47, № 7. – С. 846-847.
9. Лебедев М.В., Shimomura M., Fukuda Y. Реконструкция поверхности InSb(111)A при адсорбции серы// Физика и техника полупроводников. – 2007. – Т. 41, Вып. 5. – С. 539-543.
10. Физическая энциклопедия/Гл. ред. Прохоров А.М. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1994, Т. 4. – 704 с.
11. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. – СПб.: Лань, 2001. – 368 с.

12. Сушинский М.М. Резонансное неупругое рассеяние света в кристаллах//УФН. – 1988. – Т. 154, Вып. 3. – С. 353-379.
13. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. – М.: Мир, 1986. – 664 с.
14. Ландсберг Г.С. Оптика: учебное пособие для вузов. – М.: Физматгиз, 2003. – 848 с.
15. Бердышев В.И., Петрак Л.В. Аппроксимация функций, сжатие численной информации, приложения. – Екатеринбург: УрО РАН, 1999. – 297 с.
16. Носач В.В. Решение задач аппроксимации с помощью персональных компьютеров. – М.: МИКАП, 1994. – 382 с.
7. Smorgonskaya E.A., Kyutt R.N., Shuman V.B., Danishevskiy A.M., Gordeyev S.K., Grechinskaya A.V. Malouglovoye rentgenovskoye rasseyaniye v nanokompozite uglerod-sera, poluchennom na osnove obyemnogo nanoporistogo ugleroda//Fizika tverdogo tela. – 2002. – Т. 44, Vyp. 10. – S. 1908-1914.
8. Gorelik V.S., Tochilin S.D. Kombinatsion-noye rasseyaniye sveta v kompozite opal/sera// Neorganicheskiye materialy. – 2007. – Т. 47, № 7. – S. 846-847.
9. Lebedev M.V., Shimomura M., Fukuda Y. Rekonstruktsiya poverkhnosti InSb(111)A pri adsorbtsii sery// Fizika i tekhnika poluprovodnikov. – 2007. – Т. 41, Vyp. 5. – S. 539-543.
10. Fizicheskaya entsiklopediya/Gl. red. Prokhorov A.M. – М.: Bolshaya Rossiyskaya entsiklopediya, 1994, Т. 4. – 704 s.
11. Pasyukov V.V., Sorokin V.S. Materialy elektronnoy tekhniki. – SPb.: Lan, 2001. – 368 s.
12. Sushchinskiy M.M. Rezonansnoye neuprugoye rasseyaniye sveta v kristallakh//UFN. – 1988. – Т. 154, Vyp. 3. – С. 353-379.
13. Boren K., Khafmen D. Pogloshcheniye i rasseyaniye sveta malymi chastitsami. – М.: Mir, 1986. – 664 s.
14. Landsberg G.S. Optika: uchebnoye posobiye dlya vuzov. – М.: Fizmatgiz, 2003. – 848 s.
15. Berdyshev V.I., Petrak L.V. Approksimatsiya funktsiy, szhatiye chislennoy informatsii, prilozheniya. – Yekaterinburg: UrO RAN, 1999. – 297 s.
16. Nosach V.V. Resheniye zadach approksimatsii s pomoshchyu personalnykh kompyuterov. – М.: МИКАП, 1994. – 382 s.

ЛИТЕРАТУРА

1. Veyko V.P. Opornyy konspekt lektsiy po kursu "Fiziko-tekhnicheskiye osnovy lazernykh tekhnologiy". Razdel: Lazernaya mikroobrabotka. – SPb: SPb GU ITMO, 2008. – 141 s.
2. Ivanov A.Yu., Skvortsov G.E. Isparitelnnyy rezhim lazernogo vozdeystviya na poverkhnost //Pisma v ZhTF. – 2000. – Т. 26, Vyp. 15. – S. 65-71.
3. Gornyy S.G., Grigoryev A.M., Lopota V.A., Turichin G.A. Osobennosti polucheniya otverstiy v metallicheskikh materialakh modulirovannym lazernym izlucheniym//Fizika i khimiya obrabotki materialov. – 1998. – № 5. – S. 23-26.
4. Gureyev D.M., Kamashev A.V., Yamshchikov S.V. Mekhanizmy fazovykh prevrashcheniy v zheleze i stalyakh pri lazernom nagreve. – Samara: Samarskiy universitet, 1999. – 164 s.
5. Libenson M.N. Lazerno-indutsirovannyye opticheskiye i termicheskiye protsessy v kondensirovannykh sredakh i ikh vzaimnoye vliyaniye. – SPb.: Nauka, 2007. – 423 s.
6. Libenson M.N., Yakovlev Ye.B., Shandybina G.D. Vzaimodeystviye lazernogo izlucheniya s