

PACS numbers: 42.50.Wk, 42.25.Bs, 42.62.Cf

## ОСОБЛИВОСТІ ПОШИРЕННЯ СВІТЛА В ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛАХ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ ПІД ЧАС ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ

*С.Д. Точилін, С.П. Луцін, Д.С. Точилін*

Запорізький національний технічний університет,  
вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна,  
E-mail: [tochno@zsu.zp.ua](mailto:tochno@zsu.zp.ua)

*Проведено дослідження поширення світла в електроізоляційних матеріалах електронної техніки при випарному режимі лазерного впливу. У результаті аналізу експериментальних даних визначена швидкість формування наскрізних отворів та встановлені тимчасові особливості коефіцієнта поглинання в досліджених зразках.*

**Ключові слова:** АПРОКСИМАЦІЯ, ВИПРОМІНЮВАННЯ, ЛАЗЕР, ПЕРФОРАЦІЯ, ПОГЛИНАННЯ, СКЛОТЕКСТОЛІТ.

*(Одержано 02.02.2009, у відредагованій формі – 14.03.2009)*

### 1. ВСТУП

Лазерні технології знаходять широке застосування під час виробництва компонентів електронної техніки. За їх допомогою здійснюється підстроювання резисторів, створюються р-п- переходи та т.ін.

Останнім часом лазерна обробка заміняє механічні та хімічні технології при виробництві електронних плат високої щільності впакування. Основною технологічною операцією у цьому випадку є формування прецизійних отворів у матеріалі плати [1]. 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 у [2, 3]. 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 під час дії на матеріал лазерного випромінювання з параметрами:  $10^8 < P < 10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>,  $\tau \cong 10^{-8}$  с, де  $P$  - щільності потужності імпульсів лазерного випромінювання,  $\tau$  - тривалість імпульсів. Основною особливістю випарного режиму є можливість здійснення для різних матеріалів чистого прецизійного різання та високоо-якісної перфорації [2]. Однак у [2] під час вивчення випарного режиму ЛВ на матеріали (у тому числі неоднорідні та діелектричні) 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  $k$  [4, 5]. При цьому ініціювання росту об'ємного поглинання під час ЛВ на поверхню зразка може бути обумовлене проявом різного роду механізмів – напівпровідникового, термохімічного та ін.

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 електроізоляційних матеріалах електронної техніки - фольгованому склотекстоліті СФ-1 та шаруватому пластику РЕМ при випарному режимі ЛВ з урахуванням зміни поглинання лазерного випромінювання в оброблюваних зразках.

## 2. ТЕОРЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ

Для пояснення особливостей поширення світла в досліджених зразках нами використовувався ряд теоретичних моделей. Їхньою основою була модель зустрічних потоків, що описує поширення світла в дисперсних середовищах [6]. 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 [6]:

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

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 [7].

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) вирази (1) та (2) набирають вигляду

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

$$J = J_0 \exp[-k(x_0 - vt)] = J_1 \exp(kvt) \quad (4)$$

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 багаточленом ступеня  $n$ :

$$k = k_0 + k_1 t + k_2 t^2 + k_3 t^3 + k_4 t^4 + \dots + k_n t^n, \quad (5)$$

де  $k_0, k_1, k_2, k_3, k_4, k_n$  – сталий коефіцієнти.

Використання подібних багаточленів для відновлення функціональних особливостей фізичних величин широко застосовується при математичній апроксимації експериментальних даних [8].

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

$$J = J_2 \exp[k_0 vt - (k_1 t + k_2 t^2 + k_3 t^3 + k_4 t^4 + \dots + k_n t^n)(x_0 - vt)], \quad (6)$$

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

### 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Для вирішення поставленого завдання нами використовувався твердотільний лазер 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 тривалість імпульсів лазерного випромінювання в досліджених матеріалах мала величину порядку  $10^9$  Вт/см<sup>2</sup> та  $10^{-8}$  с відповідно, що забезпечувало реалізацію випарного режиму ЛВ на поверхню.

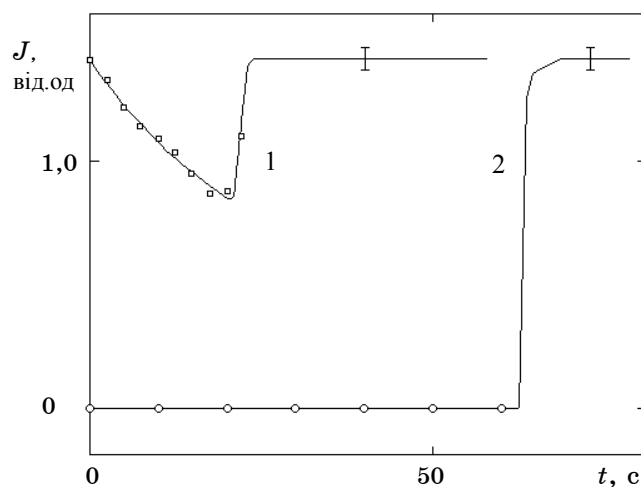
Процеси поширення світла в матеріалах електронної техніки при лазерній обробці вивчалися з використанням тимчасових залежностей інтенсивності випромінювання, що пройшло через зразки, з довжиною хвилі  $\lambda_2$ . Спостереження здійснювалося за допомогою подвійного монохроматора ДФС-12. Спектральна ширина щілини становила величину  $0,5$  см<sup>-1</sup>.

Нами використовувалася оптична схема "на просвіт". При цьому коліматор, що збирає випромінювання для аналізу, мав у центральній частині непрозорий екран із площею порядку  $1$  см<sup>2</sup>. Він повністю перекривав пучок лазерного випромінювання в площині коліматора за відсутності зразка дослідження. Екран захищав електронний фотопомножувач та спектральний прилад від впливу на них прямого лазерного пучка.

Зразки для досліджень являли собою тонкі пластини товщиною  $0,3$  мм та  $0,8$  мм, для РЕМ та СФ-1 відповідно. На рис. 1 зображено тимчасовий розвиток інтенсивності світла  $J$ , що пройшло через РЕМ та СФ-1, 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 РЕМ, мав три характерні інтервали. На першому з них спостерігалось монотонне спадання  $J$ . На другому –  $J$  різко зростала. Цей інтервал був обмежений часом  $t_1 = 23,0$  с, після досягнення якого інтенсивність світла плавно виходила на насичення (крива 1 на рис.1).

У той час у непрозорих для випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda_2$  зразках СФ-1 тимчасовий розвиток інтенсивності світла, що пройшло через них, мав спочатку інтервал з незмінним рівнем сигналу  $J \cong 0$ . Після його завершення інтенсивність світла також різко зростала. Потім, після досягнення часу  $t_2 = 63,7$  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  $\cong 1,304 \cdot 10^{-5}$  м/с та  $1,256 \cdot 10^{-5}$  м/с для РЕМ і СФ-1 відповідно.



**Рис. 1** – Часові залежності інтенсивності світла  $J$ , що пройшло через РЕМ та СФ-1, криві 1 та 2, відповідно. Точки на рисунку – теоретичні значення  $J$

Обробка експериментальних даних щодо поширення світла в РЕМ під час лазерної обробки, була виконана за допомогою математичної апроксимації. Для цих цілей нами була розроблена комп'ютерна програма на мові програмування Java. Ця програма реалізовувала один з найбільш ефективних методів нелінійного оцінювання параметрів, а саме квазіньютонівський метод змінної метрики (метод Девідона-Флетчера-Пауела) [9]. 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 РЕМ була виконана для 10 пар значень  $J$  і  $t$ , її початкові параметри дорівнювали  $10^{-3}$ .

Як з'ясувалося, у результаті математичної апроксимації даних експерименту в РЕМ, величина  $D$  мала значення 0,872, 0,853 та 0,995 відповідно для виразів (3), (4) та (6). Однак лише параметри формули (6) мали фізичний сенс. Для цієї моделі коефіцієнт поглинання  $k$  мав позитивне значення, для інших моделей – негативне ( $-6,935 \text{ см}^{-1}$  та  $-16,826 \text{ см}^{-1}$ , для формул (3) і (4) відповідно).

Обробка експериментальних даних щодо поширення світла в СФ-1 під час лазерної обробки здійснювалася з використанням співвідношення (4).

На рис. 1 у вигляді точок зображені теоретичні значення  $J$ , отримані нами для СФ-1 і РЕМ, з використанням співвідношень (4) та (6) відповідно.

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

При цьому коефіцієнти  $k_0$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  і  $k_4$ , що входять у (6) та характеризують поглинання світла в РЕМ, мали значення  $0,250 \text{ см}^{-1}$ ,  $4,14 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1} \text{с}^{-1}$ ,  $0,460 \text{ см}^{-1} \text{с}^{-2}$ ,  $-5,46 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1} \text{с}^{-3}$  та  $2,33 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1} \text{с}^{-4}$  відповідно. Відзначимо, що подання  $k$  у РЕМ у вигляді багаточлена (5) мало фізичний сенс тільки для  $n > 3$ . Саме починаючи з  $n = 4$ , теоретичні значення коефіцієнта поглинання, отримані при апроксимації експериментальних даних у РЕМ, набували позитивного значення у всьому тимчасовому інтервалі формування наскрізних отворів.

У той час теоретичні значення  $J(t)$  для СФ-1 були отримані для незмінного з перебігом часу значення коефіцієнта поглинання  $k = \infty \text{ см}^{-1}$ . Нескінченно велике значення коефіцієнта поглинання світла для фольгованого склотекстоліту пояснюється наявністю у зразку тонкого зовнішнього шару міді, який під час лазерної обробки віддалявся в останню чергу.

#### 4. ВИСНОВКИ

Таким чином, нами було проведено експериментальне дослідження поширення світла у фольгованому склотекстоліті СФ-1 та шаруватому діелектрику РЕМ при випарному режимі ЛВ на поверхню.

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

Установлена залежність від часу коефіцієнта поглинання в РЕМ. Зроблена оцінка значення коефіцієнта поглинання світла в СФ-1.

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

Дослідження особливостей поширення світла при випарному режимі ЛВ на поверхню можуть використовуватися для оптимізації та контролю процесів лазерної обробки матеріалів електронної техніки.

#### FEATURES OF LIGHT PROPAGATION IN INSULATING MATERIALS OF ELECTRONICS UNDER LASER PROCESSING

*S.D. Tochilin, S.P. Lushchin, D.S. Tochilin*

Zaporizhzhya National Technical University,  
64, Zhukovskogo Str., 69063, Zaporizhzhya, Ukraine  
E-mail: [tochno@zsu.zp.ua](mailto:tochno@zsu.zp.ua)

*The study of light propagation in insulating materials of electronics is carried out under evaporating mode of laser influence. As a result of experimental data analysis the rate of through hole formation is determined and the temporal features of the absorption coefficient in investigated samples are established.*

**Keywords:** LASER, PERFORATION, ABSORPTION, RADIATION, FIBERGLASS PLASTIC, THROUGH HOLE.

#### ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТА В ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ

*С.Д. Точилин, С.П. Лушчин, Д.С. Точилин*

Запорожский национальный технический университет,  
ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина,  
E-mail: [tochno@zsu.zp.ua](mailto:tochno@zsu.zp.ua)

*Проведено исследование распространения света в электроизоляционных материалах электронной техники при испарительном режиме лазерного воздействия. В результате анализа экспериментальных данных определена скорость формирования сквозных отверстий и установлены временные особенности коэффициента поглощения в исследованных образцах.*

**Ключевые слова:** АППРОКСИМАЦИЯ, ИЗЛУЧЕНИЕ, ЛАЗЕР, ПЕРФОРАЦИЯ, ПОГЛОЩЕНИЕ, СТЕКЛОТЕКСТОЛИТ.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. В.П. Вейко, *Опорный конспект лекций по курсу «Физико-технические основы лазерных технологий»*. Раздел: *Лазерная микрообработка* (СПб.: СПб. ГУ ИТМО: 2008).
2. А.Ю. Иванов, Г.Е. Скворцов, *Письма в ЖТФ* **26** № 15, 65 (2000) (A.Yu. Ivanov, G.E. Skvortsov, *Tech. Phys. Lett.* **26** No8, 675 (2000)).
3. С.Г. Горный, А.М. Григорьев, В.А. Лопота, Г.А. Туричин, *Физика и химия обработки материалов* №5, 23 (1998).
4. М.Н. Либенсон, *Лазерно-индуцированные оптические и термические процессы в конденсированных средах и их взаимное влияние* (СПб.: Наука: 2007.)
5. М.Н. Либенсон, Е.Б. Яковлев, Г.Д. Шандыбина, *Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Часть I. Поглощение лазерного излучения в веществе: Конспект лекций* (СПб.: СПб ГУ ИТМО: 2008).
6. М.М. Сущинский, *УФН* **154** №3, 353 (1988) (M.M. Sushchinskii, *Sov. Phys. Uspekhi* **31** No3, 181 (1988).)
7. Г.С. Ландсберг, *Оптика: учебное пособие для вузов* (М.: Физматгиз: 2003).
8. В.И. Бердышев Л.В. Петрак, *Аппроксимация функций, сжатие численной информации, приложения* (Екатеринбург: УрО РАН: 1999).
9. В.В. Носач, *Решение задач аппроксимации с помощью персональных компьютеров* (М.: МИКАП: 1994).