

# ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТИСКУ НАВКОЛИШНЬОГО ГАЗУ НА ГЕОМЕТРИЧНІ РОЗМІРИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ПОШИРЕННЯ ЛАЗЕРНОЇ ПЛАЗМИ АЛЮМІНІЮ

**Л.В. Месарош, М.П. Чучман, О.К. Шуаїбов, І.Е. Качер**

Ужгородський національний університет, вул. Підгірна, 46, Ужгород, 88000  
email: shuaibov@univ.uzhgorod.ua

Представлено результати дослідження інтенсивності свічення просторових ділянок лазерної плазми Al при різних віддальх від мішені, інтенсивностях лазерного випромінювання  $(4,4 - 4,8) \times 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> і залишкових тисках повітря у вакуумній камері (6,7 – 133,3) Па. Процес утворення ударної хвилі відображається на залежності інтенсивності випромінювання лазерної плазми від відстані до мішені при різних тисках в вакуумній камері у вигляді неоднорідностей. Зміна тиску суттєво впливає на такі параметри лазерної плазми, як розміри плазмового факела і густину частинок у ньому.

*Ключові слова:* лазерна плазма алюмінію, інтенсивність свічення, просторові характеристики.

## Вступ

Розробка приладів, призначених для використання в УФ області спектру, пов'язана із застосуванням широкозонних матеріалів, які працюють в режимах високої напруги і температур [1–2]. При їх виготовленні, зокрема сполук на основі нітридів алюмінію, широко використовується метод імпульсного лазерного напилення. Цей метод є перспективним для отримання тонких плівок такого складу [1, 3–6]. Отримання плівок із необхідними властивостями дозволяє покращити роботу приладів на їх основі, але вимагає вивчення процесів і властивостей лазерного факелу нітриду алюмінію. На сьогоднішній час плівки AlN використовуються у напівпровідникових приладах мікроелектроніки, наприклад, у надвисокочастотних транзисторах, де необхідні високі ізоляційні властивості плівкового елемента [7]. Основною областю застосування нітриду алюмінію є люмінесцентні джерела світла з високою ефективністю випромінювання в області ультрафіолету [8, 9]. Тому метою нашої роботи було вивчення впливу тиску азотвмісного газу у вакуумній камері на поведінку лазерної плазми алюмінію, що є необхідним технологічним елементом процесу одержання плівок AlN.

## Техніка та методика експерименту

В якості технологічного джерела випаровування використано імпульсно-періодичний неодимовий лазер “ЛТИ ПЧ-4”, який працював в режимі модульованої добротності. Частота повторення імпульсів генерації лазера складала 12 Гц, довжина хвилі генерації 1,06 мкм, тривалість лазерних імпульсів на половині висоти – 20 нс. Лазерне випромінювання фокусувалося лінзою  $F = 50$  см в пляму діаметром 0,4 – 0,5 мм, що дозволяло одержати густину потужності  $(3 - 5) \times 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Мішень з чистого алюмінію розміщувалася у вакуумній камері при тиску залишкових газів ( $P$ ) 6,7 – 133,3 Па.

Світлина лазерного факелу, який утворюється внаслідок дії одного лазерного імпульсу, зроблені за допомогою цифрової камери із розділенням  $1200 \times 1600$  пікселів. Експерименти з одержання світлин плазми проводилися для вивчення впливу зміни потужності лазерного випромінювання і тиску залишкових газів на інтенсивність випромінювання лазерної плазми Алюмінію, а також на її геометричні розміри. Умови експериментів більш повно описані в роботі [10].

Для пояснення отриманих результатів

виконано прості оцінки значень довжини вільного пробігу молекули азоту за допомогою співвідношення [11]:

$$l = \frac{1}{\sqrt{2\pi d^2 n}}, \quad (1)$$

де  $d$  – діаметр молекули азоту,  $d = 0,32$  нм [12],  $n_{азот}$  – концентрація частинок азоту,  $l$  – довжина вільного пробігу. Для формування ударної хвилі необхідно час  $t$ , на протязі якого гарячі пари металу будуть розширюватися до відстані, рівної  $\sim (5-10)$  довжинам вільного пробігу [11]. Якщо потужність лазерного випромінювання  $\sim 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>, то швидкість руху плазми складає  $v = 2 \times 10^6$  см/с. Час утворення ударної хвилі визначається так:

$$t = 10l/v. \quad (2)$$

### Просторові характеристики лазерної плазми

На основі отриманих результатів з одержання світлин плазми було побудовано залежність інтенсивності випромінювання лазерної плазми від відстані до мішені згідно з аналізом центральної ділянки факелу, яка поширюється по нормалі до мішені. Такі дані приведені на рис. 1.

На цих залежностях можна виділити дві ділянки з різним характером зміни інтенсивності. Пунктирними лініями вказано проєкції точок, при яких спосте-

рігається така зміна. Цим точкам відповідають наступні відстані від мішені: 0,27 см, 0,37 см, 0,52 см та 0,73 см. Ці зміни відповідають переходу від різкої до більш повільної зміни інтенсивності випромінювання, а, отже, і різній концентрації частинок, які випромінюють.

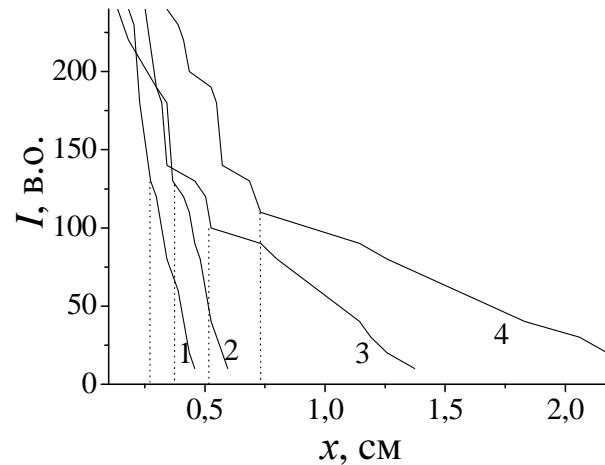


Рис. 1. Залежність інтенсивності випромінювання лазерної плазми алюмінію від відстані до мішені при різних тисках у вакумній камері 1 – 133 Па, 2 – 53 Па, 3 – 13 Па, 4 – 7 Па.

Найбільш імовірною причиною такої поведінки плазми може бути зміна характеру її розширення. Для підтвердження даної гіпотези нами було зроблено оцінки концентрації частинок, довжини вільного пробігу та часу формування ударної хвилі, які приведені в таблиці 1.

Таблиця 1

### Розрахунок відстані, на якій виникає ударна хвиля, та часу її виникнення

$P, \text{ Па}$	$n_{азот}, 10^{17} \text{ см}^{-3}$	$l, \text{ см}$	$t, 10^{-6} \text{ с}$
6,7	0,016	0,138	0,69
9	0,02	0,111	0,555
13,3	0,032	0,069	0,346
53	0,128	0,0173	0,0865
66,7	0,16	0,0139	0,069
133,3	0,32	0,0069	0,0345

З таблиці 1 випливає, що утворення ударної хвилі буде відбуватись протягом сотень наносекунд до тисків  $\sim 10$  Па, після чого вона зберігається протягом часів у десятки наносекунд. Ударна хвиля при тиску 7 Па змінюється в межах (0,69 –

1,38) см, для 13,3 Па відповідно (0,345 – 0,69) см. Застосовуючи ці судження до рис. 1, видно, що процес утворення ударної хвилі чітко відображається на залежності, і у вищенаведених інтервалах відстаней спостерігаються неоднорідності

на графіку.

Таким чином, можна стверджувати, що ми спостерігаємо перехід від вільного розширення до розширення в режимі ударної хвилі. Разом із збільшенням тиску можна побачити і зміну форми лазерного факела. Як показано на рис. 2, форма факелу при зміні тиску від десятків до сотень Па буде змінюватись від витягнутої до сферичної, оскільки значення довжини і ширини факела стають майже однаковими. Відповідно до цих даних, режиму тривимірного розширення передуює домінування одновимірного розширення плазми від мішені. Аналогічні результати описані ще у працях [2, 10].

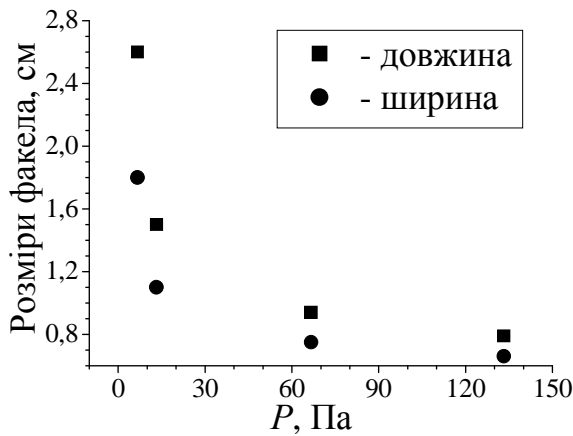


Рис. 2. Залежність характеристичних розмірів факелу від тиску.

Довжина вільного пробігу частинок лазерної плазми алюмінію при різних залишкових тисках навколишнього газу у вакуумній камері із збільшенням тиску зменшується за законом  $\sim e^{-P}$ . Найбільша довжина вільного пробігу частинок спостерігалась при тиску 6,7 Па, найменша – при 133,3 Па. Така залежність пояснюється тим, що при низьких тисках взаємодія лазерного факелу з газами проявляється менше. При тиску 7 Па порядок відстані між частинками навколишнього газу складає кілька міліметрів [13].

Оскільки основним процесом у лазерній плазмі є рекомбінація, а збільшення тиску приведе до зменшення кількості іонів, що рекомбінують, через взаємодію з молекулами оточуючого газу і передачу їм певної кількості енергії, тому, відповідно, інтенсивність випромінювання зменшується. Рекомбінаційні процеси також відбуваються інтенсивніше внаслідок збільшення ефективності обміну енергією між частинками всередині лазерного факелу.

Розміри характеристичних областей лазерного факелу, які відрізняються різною інтенсивністю випромінювання, наведені у таблиці 2, де також показано оцінки об'єму та концентрації частинок у лазерному факелі з використанням значень кількості абльованих частинок, розрахованих за даними роботи [14].

Таблиця 2

**Розрахунок концентрації частинок у лазерному факелі алюмінію при різних значеннях тиску**

P, Па	Потужн. Вт/см <sup>2</sup>	Загальні розміри		Об'єм, см <sup>3</sup>	Конц, $\times 10^{16}$ , 1/см <sup>3</sup>	Яскрава частина		Об'єм, см <sup>3</sup>	Конц, $\times 10^{16}$ , 1/см <sup>3</sup>
		x, см	y, см			x, см	y, см		
6,7	$4,4 \times 10^8$	2,6	1,8	5,57	0,25	0,94,	0,56	0,23	5,91
13,3	$4,4 \times 10^8$	1,5	1,1	1,15	1,18	0,72	0,4	0,09	15,11
133,3	$4,4 \times 10^8$	0,79	0,66	0,24	5,69	-	-	-	-
53	$4,8 \times 10^8$	1	1,14	0,47	2,89	0,64	0,54	1,46	9,5

Згідно з даними представленими у таблицях 1 та 2, можемо зробити висновок, що тривимірне розширення буде спостерігатись у випадку, коли концентрації частинок в лазерному факелі та концентрації частинок навколишнього

газу стануть порівняними. У випадку, коли концентрація частинок факелу є більшою, рух плазми можна розглядати як двовимірний, що відображає яскрава частина лазерного факелу. Також з таблиці 2 можна зробити висновок, що утворення

тривимірної ударної хвилі при тисках 6, 7 та 53 Па буде відбуватися на відстанях від мішені, більших від 5 мм.

Для з'ясування того, яким чином зміна зовнішніх умов (у цьому випадку зміна тиску), впливає на розміри лазерного факелу плазми алюмінію, на основі даних таблиці 1 побудовано залежність, яка представлена на рис. 3.

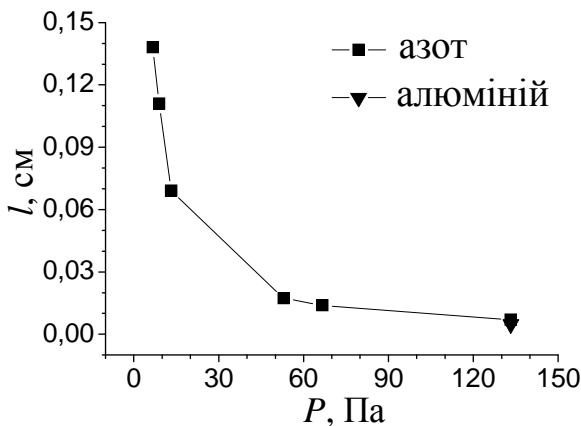


Рис. 3. Залежність довжини вільного пробігу від тиску у вакуумній камері.

Можна побачити, що видима частина лазерного факелу відповідає такому стану плазми, коли довжина вільного пробігу навколишнього газу і алюмінію стають порівняними. Залежності від тиску навколишнього газу, приведені на рис. 2 і рис. 3, подібні, що свідчить про те, що наявність зовнішнього газу сильно впливає на розширення лазерного факелу.

### Висновки

Досліджено інтенсивність свічення різних просторових ділянок лазерної плазми Al при зміні віддалі від мішені, густини інтенсивності лазерного випромінювання  $(4,4; 4,8) \times 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> і залишкового тиску повітря у вакуумній камері (6,7 – 133,3) Па.

Встановлено, що інтенсивність інтегрального за часом та довжинами хвиль випромінювання лазерної плазми зростає при зменшенні відстані від мішені. Процес утворення ударної хвилі відображається на залежності інтенсивності випромінювання лазерної плазми від відстані до мішені при різних тисках у вакуумній камері у вигляді неоднорідностей свічення. Таким змінам інтенсивності відповідають наступні відстані від мішені: 0,27 см, 0,37 см, 0,52 см та 0,73 см. Це добре узгоджується із теоретично розрахованими значеннями відстані на якій утворюється ударна хвиля. Зміна тиску суттєво впливає на такі параметри лазерної плазми, як розміри плазмового факела і густина частинок у факелі.

Взаємодія з навколишнім газом при певних відстанях і тисках сильно впливає на просторову і часову динаміку факела. У режимі ударної хвилі плазми, що розширюється при більших тисках навколишнього газу, притискується до мішені завдяки великій кількості зіткнень між атомами плазми і атомами навколишнього газу. У режимі утворення ударної хвилі наявність зовнішнього газу в основному діє на фронт факелу і може призвести до росту кількості збуджених частинок на краю факела при великих відстанях і великих значеннях часу.

Час утворення ударної хвилі змінювався у діапазоні  $(0,0345 - 0,69) \times 10^{-6}$  с, відповідно до тисків навколишнього газу (133,3 – 6,7) Па. З ростом тиску довжина вільного пробігу зменшується таким самим чином, як і загальні розміри плазмового факела, що вказує на взаємозв'язок відстані, на якій факел перестає рухатися зі зміною довжини вільного пробігу.

### Література

1. Ristocu C., Gyorgy E., Mihailescu I.N., Klini A., Zorba V., Fotakis C. Effects of pulse laser duration and ambient nitrogen pressure in PLD of AlN // Appl. Phys. - 2004. -Vol. 79. - P. 927–929.
2. Nica P., Vizureanu P., Agop M., Gurlui S., Focsa C. Experimental and Theoretical Aspects of Aluminium Expanding Laser

- Plasma // J.J. Appl. Phys. -2009. - Vol. 48. - P. 1-6.
3. Wood R. F., Chen K.R., Leboeuf J. N., Poretzky A.A., Geohegan D. B. Dynamics of Plume Propagation and Splitting during Pulsed-Laser Ablation // Physical Review Letters. -1997. -Vol 79. -N 8. -P. 1571-1574.
  4. Ang L. K., Lau Y.Y., Gilgenbach R. M., Lash J. S. Surface instability of multipulse laser ablation on metallic target // J. Appl. Phys. -1998. -Vol. 83. -N.8. - P. 4466-4471.
  5. Itina T., Hermann J., Delaporte P., Sentis M. Laser-generated plasma plume expansion: Combined continuous-microscopic modeling // Physical Review. - 2002. E 66. - P. 1-12.
  6. Xiangtai Wang, Baoyuan Man. Laser-Induced Plasma on the Surface of Aluminum Target in Air // Journal of the Korean Physical Society. -1998. - Vol. 32. -No. 3. -P. 373-379.
  7. Сукач Г.О., Кідалов В.В., Ревенко А.С., Чобанюк В.М., Фреїк Д.М. Фізико-хімічні аспекти матеріалів підкладок для епітаксійного вирощування плівок GaN // Фізика і хімія твердого тіла - 2007. - Т. 8. -№ 2. -С. 227-239.
  8. Grzegory I., Wockowski M., Lucynik B. Direct evidence of tensile strain in wurtzite structure n-GaN layers on n-Si (111) using AlN buffer layers // J. Mater. Sci. Semicond. Process. -2001. -V.4. - P. 535-539.
  9. Danylyk Y., Romanov D., McCullen E. Optical properties of contrrollable self-assembled lateral nanostructures on InN, InAlN, and AlN thin films // Mat. Res. Soc. Proc. -2003. -V. 743 - P. 1-6.
  10. Месарош Л.В., Чучман М.П., Шуайбов О.К., Качер І.Е., Ласлов Г.Е. Дослідження випромінювання лазерної плазми алюмінію при різних тисках повітря // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика. -2009. - Т. 25. - С. 126-130.
  11. Сухов Л.Т. Лазерний спектральний аналіз. -Н: Наука, 1990. -143 с.
  12. Мищенко К. П., Равделя А.А. Краткий справочник физико-химических величин. – Л: Химия, 1974. - 200 с.
  13. Amoruso S., Toftmann B., Schou J., Velotta R., Wang X. Diagnostics of laser ablated plasma plumes // Thin solid films. - 2004. V. 453-454. -P. 562-572.
  14. Чучман М.П., Шуайбов А.К. Эмиссионные характеристики и параметры лазерного факела на основе германия // Физика плазмы. -2008. - Т. 34. -№ 4. - С. 340-346.

## **ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF SURROUNDING GAS PRESSURE ON THE GEOMETRIC SIZES AND FEATURES OF EXPANSION OF THE ALUMINIUM LASER PLASMA**

**L.V. Mesarosh, M.P. Chuchman, A.K. Shuaibov, I.E. Kacher**

Uzhhorod National University, Pidhirna Str., 46, Uzhhorod, 88000  
e-mail: shuaibov@univ.uzhgorod.ua

The results of the studies on the intensity of luminescence of different spatial areas of the laser plasma of Al are presented at different distances from the target. The intensity of the laser radiation was  $(4,4 - 4,8) \times 10^8$  W/cm<sup>2</sup> at the gas pressures in a vacuum chamber at (6,7 – 133,3) Pa. The process of the shock waves formation is reflected on the dependence of the intensity of radiation of the laser plasma on the distance to the target at different pressures in a vacuum chamber as heterogeneities. The change of the pressure substantially influences such parameters of the laser plasma, as the size of the plasma plume and the concentrations of the particles in the plume.

*Key words:* aluminium laser plasma, intensity of radiation, spatial characteristics.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕГО ГАЗА НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ РАЗМЕРЫ И ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ АЛЮМИНИЯ

**Л.В. Месарош, М.П. Чучман, А.К. Шуаибов, И.Э. Качер**

Ужгородский национальный университет, ул. Пидгирна, 46, Ужгород, 88000  
e-mail: shuaibov @univ.uzhgorod.ua

Представлены результаты исследования интенсивности свечения пространственных участков лазерной плазмы Al при разных расстояниях от мишени, интенсивностях лазерного излучения  $(4,4 - 4,8) \times 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> и остаточных давлениях воздуха в вакуумной камере (6,7 – 133,3) Па. Процесс образования ударной волны отображается в виде неоднородности на зависимости интенсивности излучения лазерной плазмы от расстояния до мишени при разных давлениях в вакуумной камере. Изменение давления существенно влияет на такие параметры лазерной плазмы, как размеры плазменного факела и плотность частиц в нем.

*Ключевые слова:* лазерная плазма алюминия, интенсивность свечения, пространственные характеристики.