

УДК 533.93;533.95

Л.В. Месарош, М.П. Чучман, О.К. Шуаїбов

Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, вул. Волошина, 54

e-mail: shuaibov@univ.uzhgorod.ua

ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ТА ТЕМПЕРАТУРИ ЕЛЕКТРОНІВ У ЛАЗЕРНІЙ ПЛАЗМІ ОЛОВА

Визначено концентрацію та температуру електронів в лазерній плазмі олова на відстані 1 та 7 мм від мішені при вкладуваній питомій потужності лазерного випромінювання на мішені 4×10^8 Вт/см² і залишковому тиску повітря 6 Па. Встановлено, що значення в максимумі на часовій залежності для електронної температури складає 0,42 еВ та 0,48 еВ, а для концентрації електронів $8,6 \times 10^{15}$ см⁻³ та 1×10^{16} см⁻³ для відстані 1 та 7 мм від мішені, відповідно.

Ключові слова: лазерна ерозійна плазма, олово, температура та концентрація електронів.

Вступ

Відразу після появи потужних лазерів широкі можливості їх практичного використання привели до експериментальних та теоретичних досліджень взаємодії випромінювання з речовиною [1, 2]. Характер впливу на речовину, параметри, структура та розліт утвореної плазми сильно залежать від властивостей матеріалу і стану його поверхні, а також характеристик лазерного випромінювання.

Дослідження просторового складу і процесів в лазерному ерозійному факелі є важливим також з огляду на перспективність одержання тонких плівок методом імпульсного лазерного напилення. Таким чином, можливо одержувати плівки з наперед заданими властивостями шляхом підбору умов напилення, матеріалу мішені та підставки.

Особливу вагу має знання таких параметрів лазерної плазми, як швидкість руху плазми, температура та густина електронів, оскільки вони визначають якість плівок [3-5]. У роботах [6, 7] визначено температуру та концентрацію електронів на відстані 1 мм від мішені для лазерної плазми олова з метою пояснення комплексних фізичних процесів, які мають місце при взаємодії лазерного випромінювання з мішенню та при еволюції лазерного факелу.

Метою нашої роботи було дослідити часову залежність температури та концентрації електронів лазерної плазми

олова на двох відстанях - 1 та 7 мм від мішені у припороговому режимі формування лазерного факелу.

Техніка та методика експерименту

Для одержання плазми використовувався імпульсно-періодичний лазер "ЛТИПЧ-5", який працював у режимі модульованої добротності. Частота повторення імпульсів генерації лазера складала 12 Гц, довжина хвилі генерації 1,06 мкм, тривалість імпульсів генерації на половині висоти - 20 нс. Лазерне випромінювання фокусувалось лінзою (F=50 см) в пляму діаметром 0,45 мм, що дозволяло одержати густину потужності 4×10^8 Вт/см². Мішень з чистого олова розміщувалася у вакуумній камері при тиску залишкових газів 6 Па. Випромінювання аналізувалося за допомогою монохроматора МДР-2 з дифракційною ґраткою на 1200 штр./мм в спектральній області 200-600 нм. Розділення монохроматора за довжинами хвиль складало 0,2 нм. Вхідною щілиною монохроматора відбиралося випромінювання з поперечного перерізу факела шириною 0,3 мм. Переміщенням лінзи відбиралося випромінювання з ділянок лазерного факела віддалених на різну відстань від мішені.

Похибка вимірювання інтенсивності не перевищувала 10%. Ототожнення спектрів випромінювання плазми проводилось з використанням довідника [8].

В умовах локальної термодинамічної рівноваги має місце наступне співвід-

ношення між заселеністю рівня (N) та інтенсивністю спектральної лінії (I) при переході з рівня m на рівень i , що передбачає однаковий вплив зовнішніх факторів на заселеності рівнів, які підлягають розподілу Больцмана:

$$N_m = \sum_i I_{mi}/A_{mi}h\nu_{mi}, \quad (1)$$

де A - ймовірність переходу, h - стала Планка, ν - частота випромінювання переходу.

Із згаданого розподілу Больцмана випливає співвідношення для температури електронів (T_e):

$$kT_e = (E_m - E_n)/\ln(N_n g_m / N_m g_n), \quad (2)$$

де k - стала Больцмана, g - статистична вага, E - енергія рівнів.

Часовий хід інтенсивності рекомбінаційного випромінювання іона з зарядом Z задається швидкістю рекомбінації іонів з зарядом $Z+1$.

З вимірювань часового ходу інтенсивності спектральної лінії іона з зарядом Z можна визначити час рекомбінації (t_r) іонів заряду $Z+1$. При цьому час рекомбінації рівний тангенсу кута нахилу прямої, яка одержується при побудові залежності логарифму інтенсивності від часу t :

$$t_r = \frac{\Delta t}{\Delta \ln(I(t)/I(0))}. \quad (3)$$

З співвідношень часу рекомбінації та коефіцієнта рекомбінації можна оцінити концентрацію електронів n_e за відомою температурою електронів та часом рекомбінації іонів з зарядом z [9]:

$$n_e = (8,75 \cdot 10^{-27} z^3 t_r T_e^{-9/2})^{-1/2}. \quad (4)$$

Визначення температури електронів та концентрації електронів лазерної плазми олова

Зміна температури електронів характеризується двома максимумами в часі. Перший максимум температури електронів спостерігається на передньому фронті плазми при часі $t = 30-50$ нс. Максимальне значення температури електронів на часовій залежності складає для 1 та 7 мм від мішені, відповідно, 0,42 еВ і 0,48 еВ.

Другий максимум дуже добре виражений на відстані 7 мм від мішені. Він спостерігається при часі від 300 до 1800 нс. Максимальне значення температури у другому максимумі складає 0,3 еВ при часі 700 нс. На 1 мм від мішені другий максимум менш виражений, спостерігається при часі 500 нс і його величина досягає значення 0,34 еВ.

Загальний діапазон зміни температури електронів на відстані 1 мм від мішені складає 0,42-0,3 еВ протягом часу 650 нс. У випадку 7 мм від мішені 0,48-0,17 еВ протягом 1800 нс. На різних відстанях від мішені об'єми плазми різні при менших значеннях об'єму більша температура згідно адіабатичної моделі. Спад температури після досягнення першого максимуму на 7 мм від мішені є більш стрімким. Автори [8] показують, що при невеликих відстанях від мішені < 4 мм часовий розподіл випромінювання лазерного факела характеризується одним максимумом, а другий з'являється лише на більших відстанях. Нами в статті [9] показано, що таким відстаням від мішені відповідає формування ударної хвилі. Отже, перший максимум на наших залежностях характеризує плазму до початку впливу на неї газодинамічних ефектів, другий максимум, ймовірно, є наслідком формування ударної хвилі.

Розглядаючи часову зміну концентрації електронів (n_e) видно, що на відстані 1 мм від мішені максимум спостерігається при 49 нс і складає $8,6 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, а на відстані 7 мм від мішені спостерігаються два максимума: перший при часі 38 нс і $1 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, після чого густина частинок плавно спадає до $5,3 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$, що спостерігається при часі 467 нс; другий максимум спостерігається при 1072 нс, йому відповідає електронна густина $7,1 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$, яка в подальшому спадає до $2,9 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ при 1727 нс.

На відміну від [6, 7] в наших експериментах була використана значно менша потужність лазерного випромінювання, що відображається на величині температури електронів та концентрації електронів. У роботі [6] плазма генерувалась фокусуванням випроміню-

вання Nd:YAG лазера (тривалість імпульсів генерації на половині висоти 10 нс) на довжині хвилі 1,06 мкм на чисту 98,8%, 2 мм товщини мішень із олова. Енергія лазера складала 100 мДж, питома потужність випромінювання складала $3,8 \times 10^{11}$ Вт/см². Концентрація електронів на 1 мм від мішені в інтервалі часу 80-200 нс спадає $(2,5-1) \times 10^{17}$ см⁻³. Температура електронів на цій самій відстані змінюється в діапазоні 0,9-1,4 еВ за час 80-300 нс.

$0,13 \times 10^{-3}$ Па) і повідомляють, що початкова температура електронів була вищою за 3,2 еВ і густина електронів складає $7,7 \times 10^{17}$ см⁻³ на відстані 1 мм від мішені. При 1 мм від мішені за час 200 нс концентрація електронів спадає в межах $7,7 \times 10^{17} - 1,6 \times 10^{17}$ см⁻³, а температура, відповідно, становить 3,2 – 0,5 еВ.

Висновки

Максимальне значення температури електронів на часовій залежності складає для 1 та 7 мм від мішені величини 0,42 еВ і 0,48 еВ, відповідно.

Загальний діапазон зміни температури електронів на відстані 1 мм від мішені складає 0,42-0,3 еВ на протязі часу 650 нс. У випадку 7 мм від мішені 0,48-0,17 еВ на протязі 1800 нс.

При дослідженні електронної температури спостерігаємо два максимуми: перший при часі 30-50 нс, він характеризує плазму до початку впливу на неї газодинамічних ефектів, це величини 0,42 еВ для 1 мм та 0,48 еВ для 7 мм від мішені, відповідно; другий максимум є наслідком впливу газодинамічних ефектів на плазму, він особливо добре спостерігається при часі 300-600 нс на відстані 7 мм від мішені, йому відповідає максимальне значення електронної температури 0,3 еВ.

Розглядаючи часову зміну концентрації електронів видно, що на відстані 1 мм від мішені максимум спостерігається при 49 нс, йому відповідає концентрація електронів $8,6 \times 10^{15}$ см⁻³, а на відстані 7 мм від мішені спостерігається максимум при часі 38 нс, електронна концентрація тут складає 1×10^{16} см⁻³, після чого густина частинок плавно спадає. Збільшення електронної концентрації на відстані 7 мм від мішені спостерігається в діапазоні часу 450-1000 нс, при повторному зростанні електронної концентрації її максимальне значення складає $7,1 \times 10^{14}$ см⁻³, яка в подальшому спадає до $2,9 \times 10^{14}$ см⁻³ при 1727 нс.

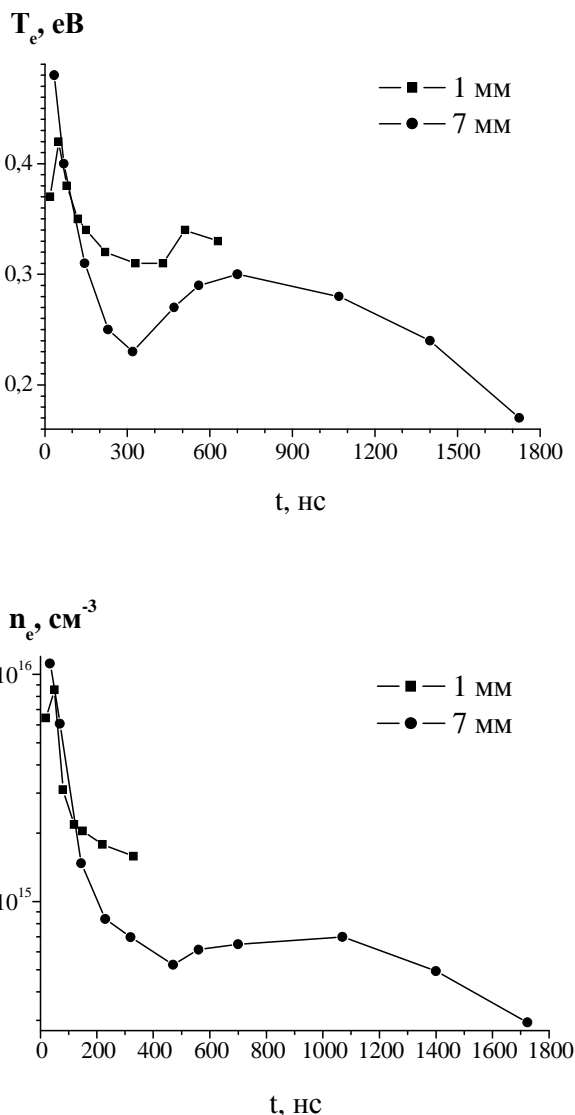


Рис. 1. Часові залежності температури та концентрації електронів в лазерній плазмі олова.

Автори [7] використовували твердотільний лазер (10 Гц, 8 нс, 1064 нм, 2 ГВт/см², тиск у вакуумній камері складав

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Анисимов С.И., Лукьянчук Б.С. Избранные задачи теории лазерной абляции // УФН. -2002. -Т. 172, № 3. - С. 301-333.
2. Itina T.E., Hermann J., Delaporte P., Sentis M. Laser-generated plasma plume expansion: Combined continuous-microscopic modeling // Physical Review E. -2002. -Vol. 66. - P. 066406: 1-12.
3. Millon E., Albert O., Loulergue J.C., Etchepare J., Hulin D., Seiler W., Perriere J. Growth of heteroepitaxial ZnO thin films by femtosecond pulsed-laser deposition // Journal Of Applied Physics. - 2000. - Vol. 88, № 11. - P. 6937-6939.
4. Chu S.S., Grigoropoulos C.P. Determination of Kinetic Energy distribution in a Laser-Ablated Titanium Plume by Emission and Laser-Induced Fluorescence Spectroscopy // Journal of Heat Transfer. - 2000. - Vol. 122. - P. 771-776.
5. Pearce S.R.J., Filik J., May P.W., Wild R.K., Hallam K.R., Heard P.J. The effect of ion energy on the deposition of amorphous carbon phosphide films // Diamond and Related Materials. - 2003. - Vol. 12. - P. 979-982.
6. O'Shay B., Najmabadi F., Harilal S.S., Tillack M.S. Nanosecond spectroscopy of expanding laser-produced tin plasma // Journal of Physics: Conference Series. - 2007. - V. 59. - P. 773-777.
7. Harilal S.S., O'Shay B., Tillack M.S. Spectroscopic characterization of laser-induced tin plasma // Journal of applied physics. - 2005. - V. 98. – P. 013306.
8. Wiese W.L., Martin G.A. Wavelengths and transition probabilities for atoms and atomic ions: Part II. Transition probabilities // U. S. Dep. Commer. Nat. Bur. Stand. Nat. Stand. Ref. Data Ser. - 1980. - №68(IV). 406 p.
9. Сухов Л.Т. Лазерный спектральный анализ. - 1990. -Новосибирск: Наука. - 143 с.
10. Harilal S.S., O'Shay B., Tao Y., Tillack M.S. Ambient gas effects on the dynamics of laser-produced tin plume expansion // Journal Of Applied Physics. - 2006. – V. 99. – P. 083303.
11. Месарош Л.В., Чучман М.П., Шуайбов О.К., Качер І.Е. Вивчення впливу тиску навколишнього газу на геометричні розміри та особливості поширення лазерної плазми алюмінію // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика. - 2010 - №.27. - С. 60-65.

Стаття надійшла до редакції 3.03.2011

L.V. Mesarosh, M.P. Chuchman, A.K. Shuaibov
Uzhhorod National University, 88000, Uzhhorod, Voloshin Str., 54

DETERMINATION OF CONCENTRATION AND TEMPERATURE OF ELECTRONS IN LASER PLASMA OF TIN

A concentration and temperature of electrons is determined in laser plasma of tin on the distance of 1 and 7 mm from target at the action of laser radiation specific power of 4×10^8 W/cm² and at the background air pressure of 6 Pa. It is found that value in a maximum on time dependence makes 0,42 eV and 0,48 eV for electronic temperature, and for the concentration of electrons is $8,6 \times 10^{15}$ cm⁻³ and 1×10^{16} cm⁻³ for distances of 1 and 7 mm from a target accordingly.

Key words: laser erosion plasma, tin, temperature and concentration of electrons.

Л.В. Месарош, М.П. Чучман, А.К. Шуайбов

Ужгородский национальный университет, 88000, Ужгород, ул. Волошина, 54

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОНОВ В ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ ОЛОВА

Определено концентрацию и температуру электронов в лазерной плазме олова на расстоянии 1 и 7 мм от мишени при вносимой удельной мощности лазерного излучения 4×10^8 Вт/см² и остаточном давлении воздуха 6 Па. Установлено, что значение в максимуме на зависимости от времени для электронной температуры составляет 0,42 эВ и 0,48 эВ, а для концентрации электронов $8,6 \times 10^{15}$ см⁻³ и 1×10^{16} см⁻³ для расстояния 1 и 7 мм от мишени, соответственно.

Ключевые слова: лазерная эрозионная плазма, олово, температура и концентрация электронов.