

ЗАЛЕЖНІСТЬ КОНЦЕНТРАЦІЇ ТА ТЕМПЕРАТУРИ ЕЛЕКТРОНІВ ВІД ЧАСУ В ЛАЗЕРНІЙ ПЛАЗМІ АЛЮМІНІЮ

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

Ужгородський національний університет, Ужгород, Україна

(Отримано 02 квітня 2012 р.; в остаточному вигляді — 21 січня 2013 р.)

Методом емісійної спектроскопії досліджено лазерну плазму алюмінію. Визначено температуру електронів на відстані 1 мм від мішені, яка змінювалася впродовж часу 160 нс в межах 24360–5800 К, а відповідні межі зміни концентрації електронів: 3.4×10^{17} – 4.7×10^{15} см⁻³.

Ключові слова: температура електронів, концентрація електронів, лазерна плазма, алюміній.

PACS number(s): 52.70.–m

ВСТУП

Лазерна плазма твердотільної мішені має численні застосування. Це наплення тонких плівок, випаровування матеріалу мішені для спектрального аналізу, формування кластерних пучків. Для оптимізації використання плазми дуже важливо розуміти основні фізичні та хімічні процеси, що відбуваються на різних етапах її еволюції [1,2].

Особливу вагу має знання таких параметрів лазерної плазми, як швидкість руху, температура та концентрація електронів, оскільки вони визначають якість плівки [3–5]. Метою нашої роботи було дослідити поведінку лазерної плазми алюмінію й визначити її параметри.

ТЕХНІКА ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Як джерело випромінювання використано імпульсно-періодичний неодимовий лазер “ЛТИПЧ-5”, що працював у режимі модульованої добротності. Частота повторення імпульсів генерації лазера становила 12 Гц, довжина хвилі генерації — 1.06 мкм, тривалість лазерних імпульсів на половині висоти — 20 нс. Лазерне випромінювання фокусувалося лінзою $F = 50$ см у пляму діаметром 0.4–0.5 мм, що давало змогу одержати густину потужності 4×10^8 Вт/см². Мішень з чистого алюмінію розміщувалася у вакуумній камері при тиску залишкових газів (N_2 , O_2) 7 Па.

Випромінювання аналізували за допомогою монохроматора “МДР-2” (із дифракційною ґраткою на 1200 штр./мм у спектральній області 200–600 нм), фотопомножувача “ФЭУ-106”, електронного потенціометра “КСП-4”, електронного лінійного помножувача “ЭЛУ-14ФС” та імпульсного осцилографа “БЛОР-04”. Похибка вимірювання інтенсивності не перевищувала 10%. Ототожнення спектрів випромінювання плазми проводили з використанням довідників [6,7].

Використовуючи залежності від часу для інтенсивностей випромінювання спектральних ліній алюмінію, одержали вихідні дані для розрахунків температури та концентрації електронів.

В умовах локальної термодинамічної рівноваги маємо таке співвідношення між заселеністю рівня (N) та інтенсивністю спектральної лінії (I) при переході $m \rightarrow i$, що передбачає однаковий вплив зовнішніх факторів на заселеності рівнів, які підлягають розподілу Больцмана:

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

де A_{m_i} — імовірність переходу, h — стала Планка, ν_{m_i} — частота переходу. Зі згаданого розподілу Больцмана випливає співвідношення для визначення температури електронів (T_e):

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

де E — енергія рівня, g — статистична вага, k — стала Больцмана.

У лазерній плазмі після припинення дії лазерного випромінювання переважаючим чинником утворення атомів та йонів у високоезбуджених станах є тричастинкова рекомбінація. Тому зі співвідношення між часом рекомбінації та коефіцієнтом рекомбінації можна оцінити концентрацію електронів (n_e) за відомою температурою електронів і часом рекомбінації (t_r) йонів із зарядом z [8]:

$$n_e = (8.75 \times 10^{-27} z^3 t_r T_e^{-9/2})^{-1/2}. \quad (3)$$

Докладніше з методикою визначення параметрів плазми можна ознайомитися в роботі [9].

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На рис. 1 зображено часові залежності температури та концентрації електронів в лазерній плазмі алюмінію. Перші 25 нс характеризують нагрівання плазми, що зумовлено формою лазерного імпульсу. На відстані 1 мм від мішені температура електронів досягала максимуму при часі $t \sim 25$ нс і становила 24360 К.

До $t \sim 40$ нс відбувається різке зниження електронної температури, а в межах часового проміжку (45–90) нс вона змінювалася незначно від 10440 до 8120 К. Далі спостерігали спад температури електронів до 5800 К при часі $t \sim 160$ нс.

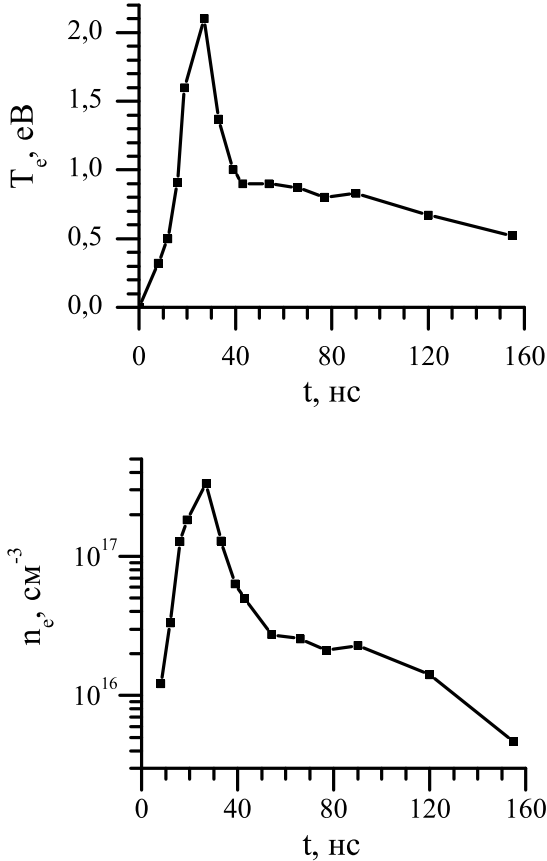


Рис. 1. Залежність температури та концентрації електронів від часу в лазерній плазмі алюмінію.

Максимум концентрації електронів досягався також при часі $t \sim 25$ нс і становив $3.4 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Протягом наступних 25 нс концентрація електронів спадала до $2.8 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, а в часовому проміжку (55–90) нс змінювалася в межах $(2\text{--}2.8) \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Зміна концентрації електронів указує на те, що в околі 80 нс можливе її повторне збільшення, імовірно відбудеться стиснення плазми, після чого розширення стане відчутнішим і приведе до зменшення концентрації електронів майже на порядок — до величини $4.7 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ при часі 160 нс.

Максимуми температури та концентрації електронів спостерігаємо при однакових часах. Наступний період еволюції цих параметрів характеризується невеликою флуктуацією, що відбувається майже однаково в час (до 80 нс). Температура та концентрація електронів після часу спостереження 80 нс зазнають повільного спаду. У роботі [10] помітили швидкий спад кожного з цих параметрів за перші 60–80 нс, а після 80 нс значення обох повільно зменшувалися. Таку поведінку пояснюють одновимірним розширенням на ранніх часах формування лазерної плазми.

Концентрація нейтральних атомів алюмінію вища

на холодній периферії плазми порівняно з її центральною частиною. У центральній області більшість атомів алюмінію перебувають у йонізованому стані, а плазмове ядро містить найвищу концентрацію багатозарядово йонізованих атомів алюмінію. Найвища концентрація двозарядних йонів алюмінію є саме там і спадає до нуля на краю плазмового струменя. Зовнішня частина плазми, в основному, складається з нейтральних атомів й однозарядних йонів алюмінію [10].

Для порівняння наших результатів з експериментальними даними [2, 10–12] виконано їх аналіз.

Так, при атмосферному тиску та потужності лазерного променя 1 ГВт/см^2 за час $t \sim 30\text{--}60$ нс концентрація електронів змінилася від 5×10^{19} до $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, температура електронів від 80040 до 53360 К , а при 200 нс ці параметри становили $1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ і 16240 К відповідно. При потужності 8 ГВт/см^2 за час $t \sim 30\text{--}60$ нс концентрація електронів змінювалася в межах $(0.5 \times 10^{21}\text{--}5 \times 10^{19}) \text{ см}^{-3}$, а температура електронів ($87000\text{--}60320$) К, а при 200 нс — $9 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ та 40020 К відповідно [10].

У [2] плазма генерувалась абляцією чистої алюмінієвої мішені з використанням ексимерного лазера KrF (248 нм, 30 нс, 400 мДж). Концентрація електронів спадала, зі зростанням відстані від мішені (0.1–0.8) см, як $(5.5\text{--}1) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, а температура від 20300 до 13920 К.

Автори [11] плазму алюмінію створювали за допомогою Nd:YAG лазера (1064 нм, 10 нс, $5 \times 10^8 \text{ Вт/см}^2$ на відстані 0.5 мм від мішені при тиску повітря 0.133 Па. Виміряні величини параметрів плазми становили: $n_e = (1.4 \times 10^{18}\text{--}1.5 \times 10^{17}) \text{ см}^{-3}$ до часу 2 мкс; $T_e = (18560\text{--}9280) \text{ К}$ до 1.2 мкс.

У роботі [12] описано параметри плазми алюмінію, яка утворювалася у вакуумі ($1.33 \times 10^{-3} \text{ Па}$) з використанням Nd:YAG лазера (1.06 мкм, 8 нс, $4 \times 10^{10} \text{ Вт/см}^2$). Показано, що при зміні відстані від мішені 1–12 мм, температура електронів становила 32480–10440 К, а концентрація $(9.1\text{--}5) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Із аналізу результатів видно, що збільшення значення тиску у вакуумній камері (0,1–7 Па) приводить до підвищення температури та спаду концентрації електронів. Унаслідок взаємодії з зовнішнім газом хаотичність руху частинок плазми зростає, що разом із просторовим обмеженням розширення плазми сприяє поліпшенню рекомбінації йонів. Порівняння результатів нашої роботи з результатами праць [11, 12] указує на наявність екстремумів залежності концентрації електронів плазмового факела алюмінію від тиску в межах $10^{-3}\text{--}10^5 \text{ Па}$. Зменшення довжини хвилі лазерного випромінювання приводить до збільшення концентрації електронів. Це ймовірно викликано специфікою внесення енергії в мішень та плазми при дії лазера, а також різними режимами взаємодії плазмового факела із зовнішнім газом різного тиску. Значення потужності, яку вносили в мішень, теж має визначальне значення: при подібних умовах експерименту збільшення потужності приводить до зростання значень температури та концентрації електронів.

ВИСНОВКИ

На основі наведених даних та наших результатів установлено, що в різних часових інтервалах існування плазми присутня специфіка її поширення у різних просторових областях залежно від тиску газу та потужності лазерного випромінювання, що відображає відповідна зміна температури та концентрації електронів. Показано, що дія імпульсного інфрачервоного лазерного випромінювання потужністю 4×10^8 Вт/см²

на мішень із чистого алюмінію при тиску залишкових газів (N₂, O₂) 7 Па приводить до утворення лазерного факела, в якому зміна температури електронів на відстані 1 мм від мішені при часі до 160 нс відбувається в межах 24360–5800 К, а концентрації електронів відповідно як 3.4×10^{17} – 4.7×10^{15} см⁻³. Отримані параметри дають змогу оцінити динаміку зміни фундаментальних характеристик джерел лазерної плазми та робити висновки про фізику процесів, які їх супроводжують.

-
- [1] F. Claeysens, S. J. Henley, M. N. Ashfold, *J. Appl. Phys.* **94**, 2203 (2003).
 [2] E. Pérez-Tijerina, J. Bohigas, R. Machorro, *Rev. Mex. Fis.* **51**, 153 (2005).
 [3] E. Millon *et al.*, *J. Appl. Phys.* **88**, 6937 (2000).
 [4] S. S. Chu, C. P. Grigoropoulos, *J. Heat Trans.* **122**, 771 (2000).
 [5] S. R. Pearce *et al.*, *Diamond Relat. Mater.* **12**, 979 (2003).
 [6] А. Н. Зайдель, В. К. Прокофьев, С. М. Райський, В. А. Славный, Е. Я. Шрейдер, *Таблицы спектральных линий* (Наука, Москва, 1969).
 [7] P. L. Smith, C. Heise, J. R. Esmond, R. L. Kurucz, *Atomic spectral line database* (Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, 1995).
 [8] Л. Т. Сухов, *Лазерный спектральный анализ* (Наука, Новосибирск, 1990).
 [9] О. К. Шуайбов, І. І. Опачко, І. Е. Качер, М. П. Чучман, *Лазерні джерела випромінювання та їх застосування в мікроелектроніці* (Говерла, Ужгород, 2008).
 [10] H. R. Pakhal, R. P. Lucht, N. M. Laurendeau, *Appl. Phys. B* **90**, 15 (2008).
 [11] N. V. Tarasenko, *Fusion Plasma Phys.* **22**, 1647 (1998).
 [12] S. S. Harilal, M. S. Tillack, B. O'Shay, C. V. Bindhu, F. Najmabadi, *Phys. Rev. E* **69**, 026413 (2004).

TIME DEPENDENCIES OF ELECTRON TEMPERATURE AND DENSITY
 IN ALUMINIUM LASER PLASMA

M. P. Chuchman, L. V. Mesarosh, A. K. Shuaibov
Uzhgorod National University, Uzhgorod, Ukraine
e-mail: chuchman@univ.uzhgorod.ua

The aluminium laser plasma was investigated by the method of emission spectroscopy. The temperature of electrons is changed within the limits of 24360–5800 K, and concentration of electrons of 3.4×10^{17} – 4.7×10^{15} cm⁻³, to 160 ns time in the distance of 1 mm from the target.