

ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ І ЧАСОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНОЇ ПЛАЗМИ ОЛОВА

Л.В. Месарош, М.П. Чучман, І.Е. Качер

Ужгородський національний університет, вул. Підгірна, 46, Ужгород, 88000
e-mail: chuchman@univ.uzhgorod.ua

Представлено результати дослідження спектрів випромінювання лазерного факела олова, зареєстрованих на відстанях 1 мм і 7 мм від мішені. Найбільш інтенсивними були спектральні лінії з довжинами хвиль 283,9 нм, 303,4 нм, 317,5 нм, 326,2 нм, 380,1 нм, що відповідали атомарним переходам, та іонні лінії на довжинах хвиль 328,6 нм та 335,1 нм. Одержано осцилограми свічення лазерної плазми олова. Встановлено, що час рекомбінації однозарядних іонів, складав 116 нс і 151 нс, двозарядних іонів 27 нс та 79 нс для відстаней 1 мм та 7 мм від мішені, відповідно.

Ключові слова: лазерна плазма олова, спектри та осцилограми випромінювання, час рекомбінації іонів.

Вступ

Олово – хімічний елемент IV групи періодичної таблиці Менделєєва. Воно використовується переважно як безпечне, нетоксичне, корозійностійке покриття в чистому вигляді або в сплавах з іншими металами. Олово є найважливішим легуючим компонентом при отриманні конструкційних сплавів титану. Двоокис олова - дуже ефективний абразивний матеріал, вживаний при "доведенні" поверхні оптичного скла. Олово застосовується також в хімічних джерелах струму як анодний матеріал. Перспективне використання олова у свинцево-олов'яному акумуляторі [1-4].

Лазерна плазма олова, є джерелом м'якого рентгенівського випромінювання, перспективним у фотолітографії наступного покоління [5, 6]. Внаслідок екстремальної температури, щільності, і швидкісних градієнтів в межах лазерної плазми, характеристики абльованих частинок значно змінюються в межах коротких часових і просторових масштабів [7]. Мало уваги звернено на вивчення динаміки і еволюції лазерно індукованої плазми олова, що особливо важливо для розуміння еволюції збуджених, нейтральних та іонізованих частинок у джерелах УФ літографії [8].

На теперішній час нітриди металів використовуються у різних галузях техні-

ки. Серед них і нітрид олова, який є недостатньо вивченим напівпровідником з шириною забороненої зони 1,5 еВ [3].

Sn_3N_4 викликає інтерес через особливі фізичні і хімічні властивості. Різні методи утворення порошків та тонких плівок нітридів олова змінюються від хімічних процедур до фізичних методів включаючи реактивне розпилення. Більшість наукових праць описують в основному кристалічні форми нітридів олова, отримані різними методами [9-11].

Нестехіометричні сполуки SnN_x та Sn_xN_y в тонких плівках привертають велику увагу через потенціальну перспективність застосування цих матеріалів, через їх напівпровідникові та електрохімічні властивості, для оптичного запису інформації [12, 13].

Оксид олова (SnO_2) – напівпровідник *n*-типу, який володіє унікальними фізичними властивостями, хімічною стабільністю і низькою вартістю. Всі ці властивості стимулюють його використання в електронних приладах [14-15]. Ширина забороненої зони такої сполуки – 3,6 еВ. Матеріал змінює свій опір при наявності окислювача. Тонкі плівки мають високу оптичну прозорість (> 80 %) у видимій області. Такі властивості використовуються для газових сенсорів [16]. Електронні газові сенсорні чутливі до електричних та магнітних полів на відміну від

оптичних. Основний інтерес у використанні тонких плівок SnO_2 для цих сенсорів. Автори роботи [17] описують отримання наночастинок нітриду олова контрольованих розмірів при атмосферному тиску на різних відстанях мішень – підкладка при лазерних методах синтезу.

Метою даної роботи є дослідження спектрального складу випромінювання та часових характеристик лазерної плазми олова, для встановлення закономірностей, які в подальшому можна застосувати для розробки методик напilenня тонких плівок та технологічних процесів пов'язаних із лазерною плазмою.

Техніка та методика експерименту

Для одержання плазми використовувався імпульсно-періодичний неодимовий лазер “ЛТИПЧ-5”, який працював в 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) у 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 1200 штр/мм у спектральній області 200-600 нм. Розділення монохроматора за довжинами хвиль складало 0,2 нм. Вхідною щілиною монохроматора відбирається випромінювання з поперечного перерізу факела шириною 0,3 мм. Переміщенням лінзи відбирається випромінювання з ділянок лазерного факела віддалених на різну відстань від мішені.

Реєстрація оптичних та часових характеристик випромінювання лазерної плазми проводилася за допомогою: монохроматора “МДР-2”, фотопомножувача “ФЕУ-106”, електронного потенціометра “КСП-4” та фотопомножувача “ФОТОН”, осцилографа “С1-99”. Точність вимірювання інтенсивності була не гірша 10 %. Розшифровка спектрів проводилася

за даними довідників [18, 19].

Із залежності інтенсивності спектральної лінії іона з зарядом Z від часу можна визначити час рекомбінації (t_r) іонів заряду $Z+1$. При цьому, час рекомбінації рівний тангенсу кута нахилу прямої, яка одержується при побудові залежності логарифма інтенсивності (I) від часу (t): $t_r = \Delta t / (\Delta \ln(I/I_m))$, де I_m - максимальне значення інтенсивності. Методичні прийоми такого аналізу описані в роботі [20].

Спектральні та часові характеристики лазерної плазми

Спектри випромінювання лазерного факела олова, які були зафіксовані на відстанях 1 мм і 7 мм від мішені представлені на рис. 1, 2. У таблиці 1 наведені найбільш інтенсивні спектральні лінії випромінювання ерозійної плазми олова, відносні інтенсивності випромінювання на 1 мм від мішені (I_1/I_m) та на 7 мм від мішені (I_7/I_m). Найбільш інтенсивними були спектральні лінії з довжинами хвиль 283,9 нм, 303,4 нм, 317,5 нм, 326,2 нм, 380,1 нм, що відповідають атомарним переходам та спектральні лінії однозарядних іонів на довжинах хвиль 328,6 нм і 335,1 нм.

Із збільшенням відстані від мішені зменшується інтенсивність випромінювання іонів. Діапазон інтенсивного випромінювання спостерігається на відстані 1 мм при довжинах хвиль 280-380 нм, а для 7 мм діапазон складав 220-340 нм.

Основним механізмом заселення верхніх збуджених станів атомів в лазерній плазмі, що розширюється у вакуум є механізм рекомбінації електронів з іонами [21]. Ймовірно подібний механізм має місце і у випадку елемента четвертої групи – олова. На рис. 3 наведено осцилограми випромінювання ядра лазерної плазми олова на відстанях 1 мм та 7 мм від мішені. Рис. 3 показує, що тривалість свічення плазми олова на відстанях 1 мм та 7 мм від мішені у середньому є величина порядку 600 нс та 1500 нс, відповідно. Максимум для найбільш інтенсивної спектральної лінії на відстані 1 мм від мішені спостерігається

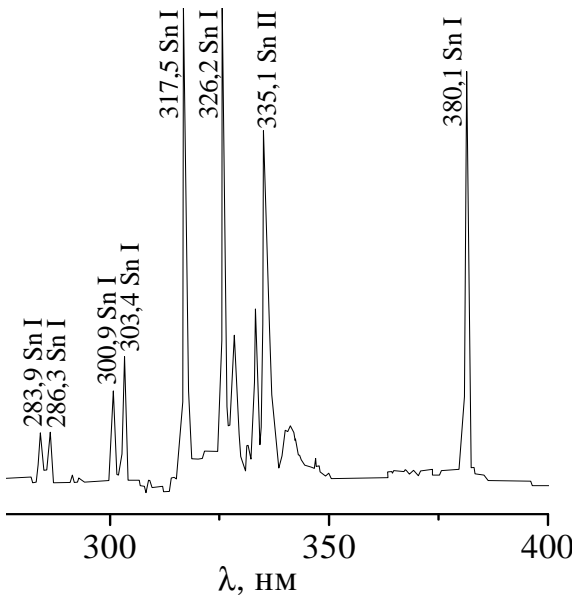


Рис. 1. Спектр випромінювання лазерного факела олова на відстані 1 мм від мішені.

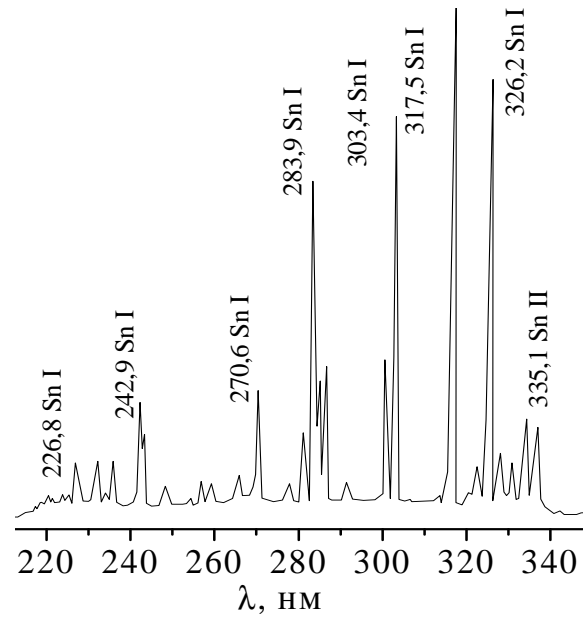


Рис. 2. Спектр випромінювання лазерної плазми олова на відстані 7 мм від мішені.

Таблиця 1

Розшифровка спектру випромінювання лазерної плазми на основі олова на відстані 1 та 7 мм від мішені

λ , нм	$I7/I_M$, в. о.	$I1/I_M$, в. о.	Атом, іон	E_B , eV	Терм _B
226,8	0,21	-	Sn I	5,88	5p5d ³ F ₃
242,9	0,39	-	Sn I	5,52	p5d ³ D ₃
270,6	0,26	-	Sn I	4,78	p6s ³ P ₂
283,9	0,69	0,12	Sn I	4,78	p6s ³ P ₂
286,3	0,30	0,13	Sn I	4,32	p6s ³ P ₁
300,9	0,31	0,21	Sn I	4,32	p6s ³ P ₁
303,4	0,81	0,30	Sn I	4,29	p6s ³ P ₀
317,5	1,00	1,00	Sn I	4,32	p6s ³ P ₁
326,2	0,81	0,99	Sn I	4,86	p6s ¹ P ₁
335,1	0,13	0,69	Sn II	11,07	5s ² 4f ² F _{7/2}
380,1	0,47	0,72	Sn I	4,32	p6s ³ P ₁

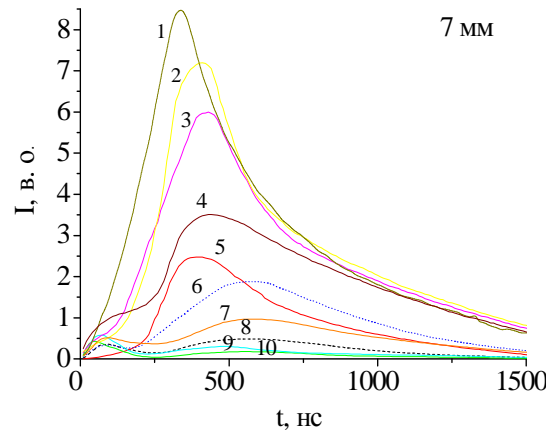
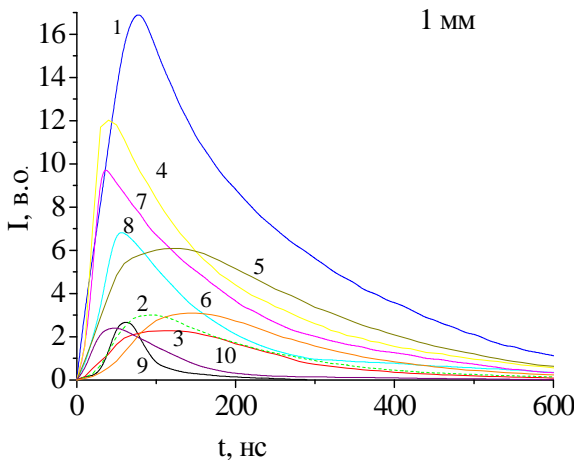


Рис. 3. Осцилограми спектральних ліній із лазерної плазми олова: 1 - 303,4 Sn I; 2 - 317,5 Sn I; 3 - 326,2 Sn I; 4 - 283,9 Sn I; 5 - 380,1 Sn I; 6 - 333 Sn I; 7 - 270,6 Sn I; 8 - 242,9 Sn I; 9 - 328,3 Sn II; 10 - 335,1 Sn II.

при 50 нс, а на відстані 7 мм від мішені, спостерігається від 335 нс до 548 нс.

У роботі [8] максимум випромінювання однозарядних іонів на довжині хвилі 556,2 нм, під дією випромінювання потужністю 2 ГВт/см² у вакуумі на відстані 1 мм та 3 мм від мішені спостерігається при 100-150 нс та 200-250 нс, відповідно. Після 600 нс випромінювання спостерігається слабо.

На рис. 4 представлено час рекомбінації іонів в лазерній плазмі.

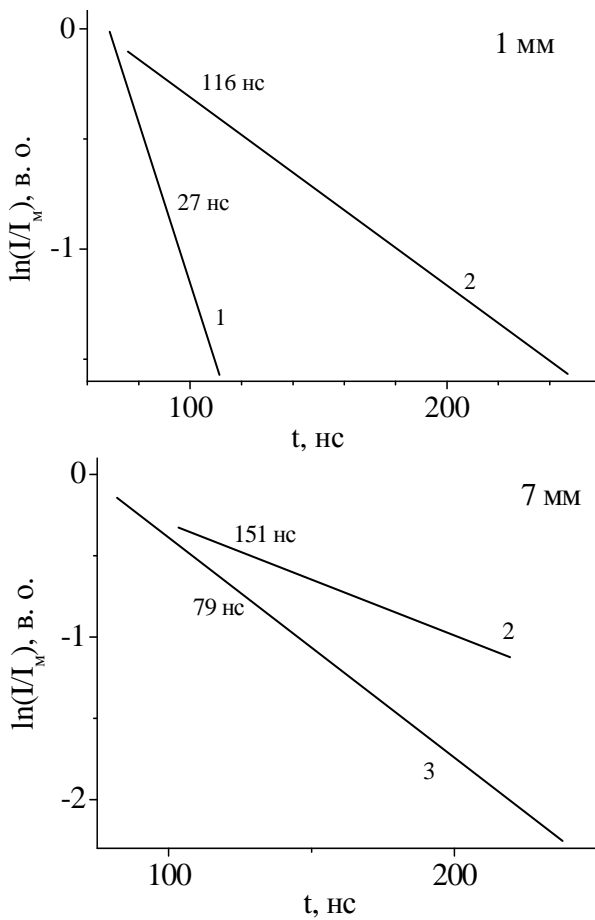


Рис. 4. Час рекомбінації іонів в лазерній плазмі та особливості часової зміни інтенсивності: 1 – 328,3 нм Sn II, $E_b = 11,07$ еВ; 2 - 242,9 нм Sn I, $E_b = 5,52$ еВ; 3 – 335,1 нм Sn II, $E_b = 11,07$ еВ.

Час рекомбінації однозарядних та двозарядних іонів на відстані 1 мм від мішені 116 нс і 27 нс, відповідно. У випадку, коли відстань від мішені складала 7 мм, часи рекомбінації становили 151 нс

та 79 нс відповідно для однозарядних та двозарядних іонів. З рис. 4 випливає, що часи рекомбінації двозарядних іонів збільшуються з відстанню суттєво, у 2,7 рази, в той час, коли для однозарядних іонів ця зміна становить 1,3 рази.

Висновки

Показано, що при дії на мішень з чистого олова імпульсним випромінюванням неодимового лазера потужністю 4×10^8 Вт/см² утворювалася лазерна ерозійна плазма, у випромінюванні якої найбільш інтенсивними були спектральні лінії з довжинами хвиль 283,9 нм, 303,4 нм, 317,5 нм, 326,2 нм, 380,1 нм, що відповідають атомарним переходам, та іонні лінії на довжинах хвиль 328,6 нм та 335,1 нм.

Одержано осцилограми свічення лазерної плазми олова. Встановлено, що тривалість свічення лазерної плазми складає 600 нс та 1500 нс для відстаней 1 мм та 7 мм від мішені. Максимальна інтенсивність свічення, для найбільш інтенсивних спектральних ліній, спостерігається при 50 нс, та від 335 нс до 548 нс, відповідно для відстаней 1 мм та 7 мм від мішені.

Визначено час рекомбінації однозарядних та двозарядних іонів на відстані 1 мм та 7 мм від мішені. Час рекомбінації однозарядних іонів на відстані 1 мм від мішені 116 нс, а у випадку двозарядних іонів 27 нс. Коли відстань від мішені складала 7 мм, часи рекомбінації становили 151 нс та 79 нс, відповідно, для однозарядних та двозарядних іонів.

Отримані результати можуть бути використані для емісійної діагностики багатокомпонентної лазерної плазми на основі олова.

Виявлено два піки свічення на осцилограмах в УФ області спектру, максимуми яких знаходяться в області 80 нс і 500-600 нс при 7 мм від мішені. На відстані 1 мм від мішені спостерігається тільки один пік.

Література

1. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. Л.: Химия, 1977. – 88 с.
2. Химическая энциклопедия: в 5 т. Под редакцией Кнунянц И. Л. – Москва: Советская энциклопедия, 1992. – Т. 3. – 639 с.
3. Zervos M., Othonos A. Synthesis of Tin Nitride Sn_xN_y Nanowires by Chemical Vapour Deposition // *Nanoscale Res Lett.* – 2009. – Vol. 4. – P. 1103–1109.
4. Neudecker B.J., Zuhr R.A. Li-Ion Thin-Film Batteries With Tin and Indium Nitride and Subnitride Anodes MeN_x (Me = Sn, In) // *Proceedings of the Electrochemical Society.* – 1999. – Vol. 24. – P. 295 – 306.
5. 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. – Vol. 99. – P. 1–11.
6. 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.
7. O'Shay B., Najmabadi F., Harilal S.S., Tillack M. Nanosecond spectroscopy of expanding laser-produced tin plasma // *Journal of Physics: Conference.* – 2007. – Vol. 59. – P. 773–777.
8. Harilal S.S., O'Shay B., Tillack S.M. Spectroscopic characterization of laser-induced tin plasma // *Journal of Applied Physics.* – 2005. – Vol. 98. – P. 1–7.
9. Takahashi N., Takekawa M., Takahashi T., Nakamura T., Yoshioka M., Inami W., Kawata Y. Optical recording characteristics of tin nitride thin films prepared by an atmospheric pressure halide chemical vapor deposition // *Solid State Sciences.* – 2003. – Vol. 5. – P. 587–589.
10. Takahashi N., Terada K., Takahashi T., Nakamura T., Inami W., Kawata Y. Structure of reactively sputter deposited tin-nitride thin films // *J. Electron. Mater.* – 2003. – Vol. 32. – P. 268–272.
11. Shemkunas M.P., Wolf G.H., Leinenweber K., Petuskey W.T. Theoretical prediction of the structure and properties of Sn_3N_4 // *J. Am. Ceram. Soc.* – 2002. – Vol. 85. – N. 101. – P. 1–17.
12. Odeh I. M. Optical Characteristics of Amorphous Tin Nitride Thin Films Prepared by Ion Beam Assisted DC Magnetron Reactive Sputtering // *Jordan Journal of Physics.* – 2008. – Vol. 1. – N.1. – P. 19–29.
13. Takahashi N., Terada K., Nakamura T. Growth of tin nitride thin films by atmospheric pressure chemical vapour deposition using a halide source // *Journal of Materials Science Letters.* – 2001. – Vol. 20. – P. 227– 228.
14. Stanimirova T.J., Atanasov P.A., Dimitrov I.G., Dikovska A.O. Investigation on the structural and optical properties of tin oxide films grown by pulsed laser deposition // *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials.* – 2005. – Vol. 7 – N.3. – P. 1335 – 1340.
15. Ristoscu C., Cultrera L., Dima A., Perrone A., Cutting R., Du H.L., Busiakiewicz A., Klusek Z., Datta P.K. SnO_2 nanostructured films obtained by pulsed laser ablation deposition // *Applied Surface Science.* – 2005. – Vol. 247. – P. 95–100.
16. Петрук В.Г., Кравець А.Г. Сенсоры угарного газа CO на основе наночастиц SnO_x // *ЖТФ.* – 2007. – Т. 77. – Вып 2. – С. 86–90.
17. Singh Vidya Nand, Khare Ankur, Kumar Brijesh, Mehta Bodh Raj. Synthesis of single phase cubic tin nitride nanoparticles by atmospheric pressure-halide vapor phase epitaxy // *Solid State Sciences.* – 2008. – Vol. 10. – N .5. – P. 569–572.
18. Зайдель А.Н., Прокофьев В.К., Райский С.М., Славный В.А., Шрейдер Е.Я. Таблицы спектральных линий. – Москва: Наука, 1969. – 782 с.

19. Smith P.L., Heise C., Esmond J.R., Kurucz R.L. Atomic spectral line database from CD-ROM 23 of Kurucz R. L. – Cambridge: Smithsonian astrophysical observatory, 1995. www.cfa.harvard.edu/
20. Чучман М.П., Шуайбов А.К. Рекомбинация ионов и энергобаланс в лазерной зрозійній плазмі свинця и галля. Фізика плазми. – 2007. – Т. 33. – № 2. – С. 168–175.
21. Сухов Л.Т. Лазерний спектральний аналіз. – Н: Наука, 1990. –143 с.

ANALYSIS OF SPECTRAL AND SPATIAL CHARACTERISTICS OF TIN LASER PLASMA

L.V. Mesarosh, M.P. Chuchman, I.E. Kacher

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

The results of research of tin laser plasma, are presented at different distances from a target: 1 mm and 7 mm. Most intensive atomic spectral lines were at waves lengths of 283,9 nm, 303,4 nm, 317,5 nm, 326,2 nm, 380,1 nm, and ionic line at the wave-length of 328,6 nm and 335,1 nm. The oscillograms of radiation of tin laser plasma were also presented. Times of recombination of single charged ions were 116 ns and 151 ns, for doubly charged ions were 27 ns and 79 ns, for 1 mm and 7 mm from a target, accordingly.

Key words: laser plasma of tin, spectrum and oscillograms of radiation, time of recombination of ions.

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ И ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ОЛОВА

Л.В. Месарош, М.П. Чучман, И.Э. Качер

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

Представлены результаты исследования спектров излучения лазерного факела олова, которые были зафиксированы на расстояниях 1 мм и 7 мм от мишени. Наиболее интенсивными были спектральные линии с длинами волн 283,9 нм, 303,4 нм, 317,5 нм, 326,2 нм, 380,1 нм, которые отвечают атомарным переходам, и ионные линии на длинах волн 328,6 нм и 335,1 нм. Получены осциллограммы свечения лазерной плазмы олова. Установлено, что времена рекомбинации однозарядных ионов составляли 116 нс и 151 нс, двухзарядных ионов 27 нс и 79 нс для расстояния 1 мм и 7 мм от мишени, соответственно.

Ключевые слова: лазерная плазма олова, спектры и осциллограммы излучения, время рекомбинации ионов.