



# Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

А. К. Шуайбов, Л. Л. Шимон, А. И. Дащенко, М. П. Чучман, Оптические характеристики и параметры плазмы лазерного факела с поверхности цинка, *ТВТ*, 2001, том 39, выпуск 4, 665–667

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением  
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.9.168

26 марта 2025 г., 14:01:59



УДК 539.9:621.375.826

ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ  
ЛАЗЕРНОГО ФАКЕЛА С ПОВЕРХНОСТИ ЦИНКА

© 2001 г. А. К. Шуаибов, Л. Л. Шимон, А. И. Дащенко, М. П. Чучман

Ужгородский национальный университет, Украина

Поступило в редакцию 10.07.2000 г.

## ВВЕДЕНИЕ

Цинк и кадмий являются важными составными частями кристаллов ( $ZnGa_2S_4$ ,  $CdGa_2S_4$  и других галатов цинка и кадмия), которые широко применяются для получения тонких пленок сложного состава методами лазерного напыления [1]. Лазерная плазма цинка также используется в ряде технологических процессов, где необходимо знание ее оптических характеристик [2]. Спектры излучения многокомпонентной лазерной плазмы на основе кристаллов достаточно сложны [3], поэтому важное значение имеют результаты спектроскопической диагностики отдельных составляющих кристалла при умеренной мощности ( $\leq 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>) воздействия на поверхность мишени. Систематические исследования оптических характеристик лазерной плазмы цинка представляют интерес также для проверки теоретических моделей взаимодействия импульсного лазерного излучения умеренной мощности с поверхностью металла. Количественные данные по исследованию излучения и параметров лазерной плазмы цинка, формируемой под действием неодимового лазера умеренной мощности, отсутствуют.

В данной работе представлены результаты исследования характеристик и параметров лазерной плазмы цинка при умеренной мощности излучения YAG : Nd<sup>3+</sup>-лазера, действующего на поверхность металла в вакууме.

**1. Условия эксперимента.** Лазерный факел формировался при помощи импульсно-периодического неодимового лазера ( $\lambda = 1.06$  мкм,  $f = 12$  Гц), работающего в режиме модулированной добротности ( $\tau = 20$  нс) [4]. Пластина из особо чистого цинка помещалась в вакуумную камеру, которая откачивалась до остаточного давления воздуха 3–7 Па. Излучение лазерной плазмы анализировалось при помощи системы регистрации, описанной в [5, 6].

**2. Характеристики и параметры лазерной плазмы.** Спектр излучения лазерного факела цинка приведен на рис. 1. Он включал линии только ZnI, которые наблюдались на фоне слабого непрерывного излучения. Результаты иденти-

фикации спектральных линий и их относительные интенсивности ( $J/k_\lambda$ , где  $k_\lambda$  – относительная спектральная чувствительность системы “монокроматор + фотоумножитель”) представлены в таблице. Там также приведены значения  $\Delta J/k_\lambda$ , которые являются отношениями интенсивности отдельной спектральной линии к суммарной интенсивности линейчатого излучения в диапазоне 200–600 нм. Наиболее интенсивными были следующие линии ZnI: 481.1, 472.2, 468.0 нм с уровня  $5^3S_1$  ( $E_{ур} = 6.66$  эВ) и 330.29(25) нм с уровней  $4^3D_{2,1}$  ( $E_{ур} = 7.78$  эВ). Интенсивность интеркомбинационного перехода ZnI (линия  $\lambda = 307.6$  нм,  $E_{ур} = 4.03$  эВ) была низкой, хотя эта линия излучается из наиболее низкорасположенного энергетического состояния ZnI. Сравнительно малая интенсивность излучения резонансной линии ZnI ( $\lambda = 213.9$  нм) указывает на наличие значительного самопоглощения в плазме лазерного факела.

Основным механизмом заселения возбужденных состояний атомов металлов в лазерной плазме является электрон-ионная рекомбинация [7, 8]. По данным таблицы было определено узкое место для рекомбинационного потока в системе уровней ZnI (или наиболее высокорасположенное

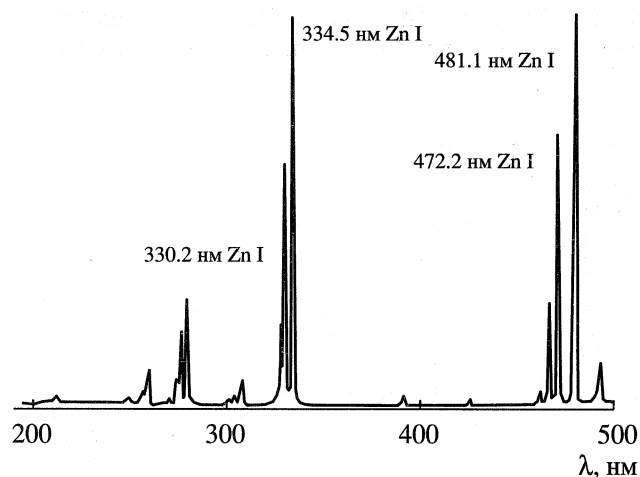


Рис. 1. Спектр излучения плазмы лазерного факела с поверхности цинка ( $r = 7$  мм).

## Спектр излучения лазерной плазмы цинка

№	$\lambda$ , нм ZnI	Переход	$E_{up}$ , эВ	$J/k_\lambda$ , отн. ед.	$\Delta J/k_\lambda$ , %
1	481.1	$4^3P_2-5^3S_1$	6.66	1.00	24
2	472.2	$4^3P_1-5^3S_1$	6.66	0.60	15
3	468.0	$4^3P_0-5^3S_1$	6.66	0.40	10
4	463.0	$4^1P_1-5^1D_2$	8.47	0.05	<2
5	334.6	$4^3P_2-4^3D_{3,2}$	7.78	0.60	15
6	330.3	$4^3P_1-4^3D_{2,1}$	7.78	0.40	10
7	328.2	$4^3P_0-4^3D_1$	7.78	0.20	<5
8	307.6	$4^1S_0-4^3P_1$	4.03	0.05	<2
9	303.6	$4^3P_1-6^3S_1$	8.11	0.05	<2
10	280.1	$4^3P_2-5^3D_{2,1}$	8.50	0.20	5
11	277.1	$4^3P_1-5^3D_{2,1}$	8.50	0.10	<5
12	275.7	$4^3P_0-5^3D_1$	8.50	0.10	<5
13	260.9	$4^3P_2-6^3D_{3,2}$	8.83	0.10	<5
14	258.2	$4^3P_1-6^3D_2$	8.83	0.10	2
15	256.8	$4^3P_2-8^3S_1$	8.90	0.10	<5
16	251.6	$4^3P_2-7^3D_3$	9.00	0.10	2
17	213.9	$4^1S_0-4^1P_1$	5.80	0.20	5

энергетическое состояние ZnI, с которого наблюдается излучение спектральных линий [8]). В рекомбинирующей плазме лазерного факела цинка оно приходится на состояние  $7^3D_3$  ZnI с  $E_{up} = 9.0$  эВ. По  $J/k_\lambda$  методом отношения интенсивностей спектральных линий [9] определена средняя температура электронов  $T_e$  в плазме лазерного факела ( $r = 7$  мм). Вероятности спонтанного излучения линий ZnI отбирались по данным [10, 11]. Так как разброс значений  $E_{up}$  для спектральных линий ZnI был небольшим ( $\Delta E < 2.0$  эВ), то для увеличения точности определения температуры электронов

ее величина рассчитывалась по углу наклона зависимости логарифма отношения интенсивностей линий ZnI от разности энергий их верхних уровней (рис. 2). Удовлетворительный разброс точек на рис. 2 получался при исключении из рассмотрения резонансной линии ZnI, интенсивность которой, по-видимому, была сильно занижена из-за самопоглощения. Величина  $T_e$  в плазме лазерного факела оказалась равной 0.62 эВ. Оценка температуры по положению узкого места  $T_e = 2/3(E_i - E_1)$ , где  $E_i$  – энергия ионизации,  $E_1$  – энергия, соответствующая положению узкого места, дает значение 0.26 эВ. Основной причиной расхождения между значениями  $T_e$ , полученными разными методами, является малая величина разброса энергий верхних уровней [9] для соответствующих спектральных линий ZnI ( $\Delta E = 1.5$  эВ). Поэтому более предпочтительным является значение  $T_e = 0.26$  эВ.

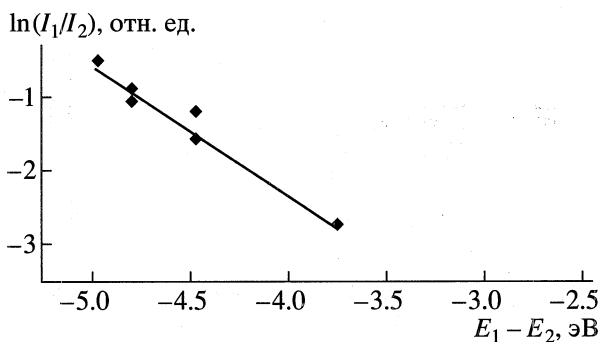


Рис. 2. Зависимость логарифма отношения интенсивностей спектральных линий атома цинка от разности энергий верхних уровней ZnI.

На рис. 3 приведены осциллограммы излучения наиболее интенсивных линий ZnI из плазмы ядра лазерного факела цинка ( $r = 1$  мм). Осциллограммы излучения имели короткий передний фронт  $\tau \leq 20$  нс, а длительность заднего фронта находилась в диапазоне 100–500 нс. С уменьшением величины  $E_{up}$  для переходов в системе уровней ZnI длительность заднего фронта возрастала. Все нижние энергетические состояния для наиболее

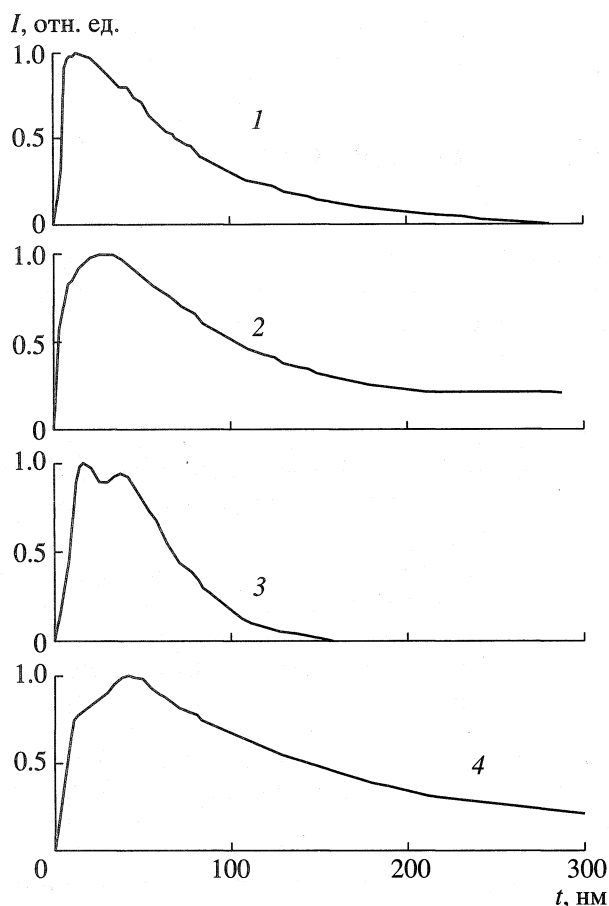


Рис. 3. Осциллограммы излучения спектральных линий ZnI из плазмы ядра лазерного факела цинка ( $r = 1$  мм): 1 – 468.0, 2 – 334.5, 3 – 280.1, 4 – 481.5 нм.

интенсивных линий ZnI являлись долгоживущими [10, 11], поэтому разная длительность задних фронтов на осциллограммах излучения линий ZnI определяется в основном различными временами электрон-ионной рекомбинации, заселяющей верхние энергетические состояния ZnI. Времена рекомбинации  $\tau_r$  ионов ZnII с электронами в плазме ядра лазерного факела определялись по формуле [8]

$$\ln J(t)/J(0) = -t/\tau_r. \quad (1)$$

Здесь  $J$  – относительная интенсивность излучения;  $t$  – время. Величина  $\tau_r$  рассчитывалась по тангенсу угла наклона зависимости  $\ln J(t)/J(0)$  от времени. Так, время рекомбинации ионов ZnII с электронами, в результате которой заселяется  $5^3S_1$ -уровень ZnI ( $\lambda = 468.0$  нм), составляло 75 нс, а  $\tau_r$  для  $5^3D_{2,1}$  ZnI, определенное по  $\lambda = 280.1$  нм, равнялось 25 нс.

### ВЫВОДЫ

Исследование оптических характеристик и параметров лазерной плазмы цинка, формируемой при помощи YAG : Nd<sup>3+</sup>-лазера с умеренной мощ-

ностью генерации ( $W \leq 2 \times 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>), показало, что наиболее интенсивными в спектре излучения являются линии ZnI, испускаемые с  $5^3S_1$ - и  $4^3D_{1,2,3}$ -состояний. Узким местом реакции  $Zn^+ + 2e \rightarrow Zn + e$  является уровень  $7^3D_3$  с  $E_{ур} = 9.0$  эВ. Рекомбинационное заселение  $5^3S_1$ -состояния ZnI в ядре лазерной плазмы ( $r = 1$  мм) происходит за 75 нс, а состояний  $5^3D_{2,1}$  – за 25 нс. Полученные результаты используются для диагностики плазмы галатов цинка методами нестационарной спектроскопии излучения и поглощения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качер И.Э., Опачко И.И., Риган М.Ю. Испарение тройных соединений  $CdGa_2S(Se)_4$  под действием импульсного лазерного излучения // УФЖ. 1989. Т. 34. № 11. С. 1728.
2. Першин С.М., Табарес Р.Х., Нунес Р.А. Нормировка спектральных линий лазерной плазмы для измерения профиля слоистых материалов по глубине абляционного кратера // Квантовая электроника. 1999г. Т. 29. № 1. С. 24.
3. Котлярчук Б.К., Попович Д.И., Пентко В.Я. Исследование характеристик эрозионного плазменного факела, формирующегося при лазерном напылении тонких пленок теллурида кадмия-ртути // ЖТФ. 1987. Т. 5. Вып. 9. С. 1824.
4. Шуаибов А.К., Шимон Л.Л., Дащенко А.Й., Семенов Я.Н. Оптические характеристики лазерной эрозионной плазмы галлия. Проблемы экономического и социального развития региона и практика научного эксперимента. Киев–Ужгород–Ниредьгаза: Карпаты, 2000. С. 192.
5. Шуаибов А.К., Дащенко А.И., Шевера И.В. Спектроскопическая диагностика лазерной плазмы алюминия и индия при умеренной мощности воздействия на преграду // ТВТ. 2000. Т. 38. № 3. С. 365.
6. Шуаибов А.К. Диагностика плазмы импульсно-периодического излучателя на молекулах  $KrCl/KrF/Cl_2$  // ТВТ. 1999. Т. 37. № 2. С. 188.
7. Держиев В.И., Жидков А.Г., Яковленко С.И. Излучение ионов в неравновесной плотной плазме. М.: Энергоатомиздат, 1986. 160 с.
8. Сухой Л.Т. Лазерный спектральный анализ. Новосибирск: Наука, 1990. 141 с.
9. Методы исследования плазмы / Под ред. Лохте-Хольтгревена В. М.: Мир, 1971. 552 с.
10. Wise W.L., Martin G.A. Wavelength and Transition Probabilities for Atoms and Atomic Ions. Transition Probabilities. Washington. U.S. Dep. Commer. Nat. Bur. Stand. Ref. Data Ser. 1980. № 68. P. 359.
11. Радциг А.А., Смирнов Б.М. Параметры атомов и атомарных ионов. Спр. М.: Энергоатомиздат, 1986. 344 с.