

02;04;07;12

## Оптическая диагностика лазерной плазмы индия

© А.К. Шуаибов, А.И. Дашченко, И.В. Шевера

Ужгородский государственный университет

Поступило в Редакцию 21 апреля 2000 г.

Приводятся результаты излучения плазмы лазерного факела, формирующегося под воздействием лазерного излучения с  $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$  и мощностью  $(3-5) \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$  на поверхность индия. Исследованы обзорные спектры излучения в области 200 . . . 600 nm, распределение относительной интенсивности линейчатого излучения индия (In I, In II) и динамика излучения плазмы ядра эрозионного факела. Показано, что спектр излучения плазмы состоит из континуума, на фоне которого наблюдались спектральные линии In I и In II. Наиболее интенсивные линии: 451,1, 410,2, 325,8, 271.0 (4) nm In I имеют энергию верхнего возбужденного состояния в диапазоне 3.02–4.84 eV. Основным механизмом заселения возбужденных состояний атомов и ионов индия в лазерной плазме является диэлектронная рекомбинация. Длительность излучения на переходах In II в плазме ядра лазерного факела не превышает 80 . . . 100 ns, а на переходах In I 400 . . . 700 ns. Верхний предел времен рекомбинации ионов In III и In II при этом составляет 50 и 500 ns соответственно.

Индий является важным составляющим элементом слоистых кристаллов  $\text{CuInS}_2$ ,  $\text{CuInSe}_2$  и др., широко используемых при лазерном напылении тонких пленок. Для исследования механизмов и параметров лазерной плазмы на основе таких соединений оптическими методами важно детальное исследование их отдельных составляющих при умеренной мощности генерации неодимового лазера. Из элементов третьей группы периодической системы элементов Д.И. Менделеева наиболее детально исследованы оптические характеристики лазерной плазмы алюминия [1–3]. Оптические характеристики эрозионной лазерной плазмы индия (формируемой при помощи короткоимпульсного неодимового лазера с энергией в импульсе  $\leq 10 \dots 20 \text{ mJ}$ ), полученные с применением современных фотоэлектрических систем регистрации, не исследовались.

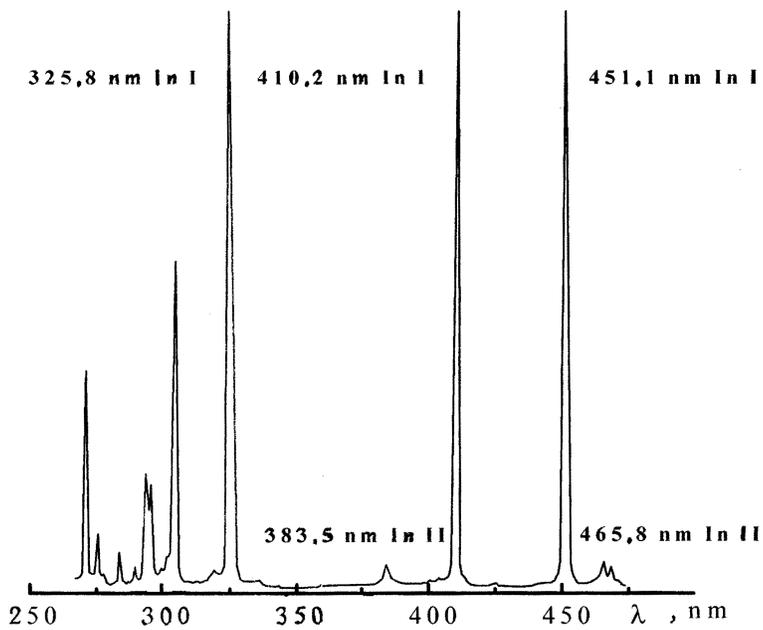
Наиболее интенсивные спектральные линии InI в спектре излучения лазерной плазмы

$\lambda$ , nm	Переход	$E_{ур}$ , eV	$I/k_\lambda$ , а.е.	$Q_{max}$ , $\times 10^{18}$ cm <sup>2</sup> [7]
451.1	$5^3P_{3/2} - 6^2S_{1/2}$	3.02	1.00	172
410.2	$5^2P_{1/2} - 6^2S_{1/2}$	3.02	0.75	69
325.8	$5^2P_{3/2} - 5^2D_{5/2}$	4.08	0.85	55
303.9	$5^2P_{1/2} - 5^2D_{3/2}$	4.08	0.50	83
271.1	$5^2P_{3/2} - 6^2D_{5/2}$	4.84	0.25	9

В данной работе приводятся результаты спектроскопической диагностики лазерной плазмы индия, получаемой при помощи YAG: Nd<sup>3+</sup>-лазера с умеренной мощностью генерации.

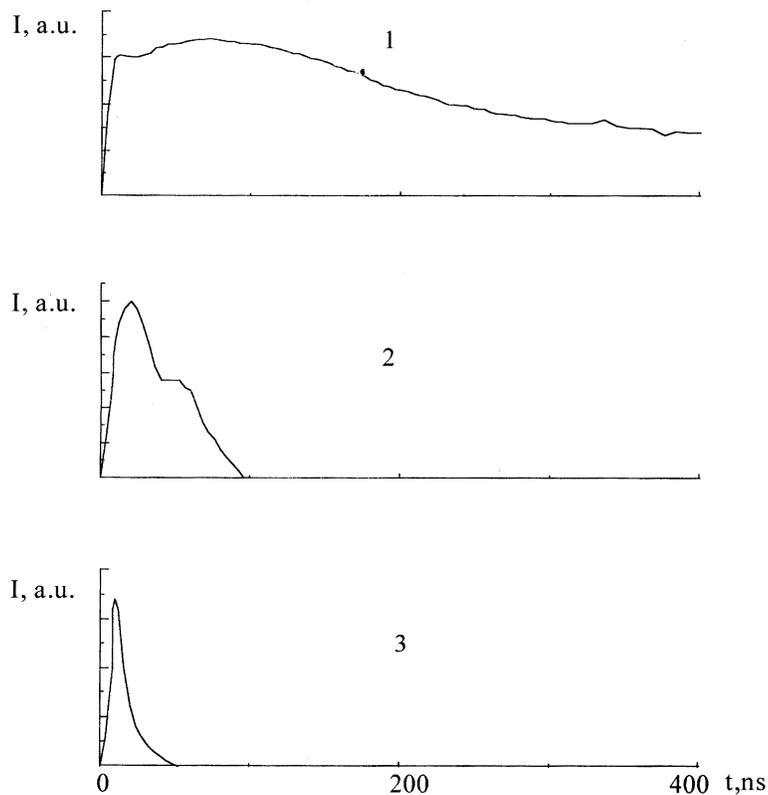
В эксперименте использовался импульсно-периодический лазер на  $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ , позволяющий получать (при фокусировке в пятно диаметром 0.3 . . . 0.5 mm) на поверхности индия мощность  $(1-5) \cdot 10^8 \text{ W/cm}^2$ . Пластина из индия особой чистоты устанавливалась в вакуумную камеру с остаточным давлением воздуха 3 . . . 12 Pa. Регистрация излучения плазмы лазерного факела проводилась при помощи системы: монохроматор МДР-2, фотоэлектронный умножитель ФЭУ-106 и самописец КСП-4, откалиброванный в области 200 . . . 600 nm. Импульсы излучения регистрировались с применением электронного линейного умножителя ЭЛУ-14ФС и скоростного осциллографа 6 ЛОР-04. Более детально система регистрации излучения описана в [5]. Излучение отбиралось линзой с оси лазерного факела. Исследование излучения плазмы ядра эрозионного факела выполнялось при расстоянии от точки наблюдения до поверхности индия  $d = 1 \text{ mm}$ . Линии в спектре отождествлялись по данным работ [6,7].

На рис. 1 представлен обзорный спектр излучения плазмы лазерного факела индия. В таблице приведены относительные интенсивности излучения ( $I/k_\lambda$ , где  $k_\lambda$  — относительная спектральная чувствительность системы регистрации) основных спектральных линий атома индия. Линейчатое излучение на переходах InI и InII наблюдалось на фоне непрерывного излучения, интенсивность которого была максимальной вблизи поверхности преграды. В спектре линейчатого излучения лазерной плазмы наиболее интенсивными были линии атома индия: 451.1,



**Рис. 1.** Обзорный спектр излучения плазмы лазерного факела индия при  $d = 7$  mm.

410.2, 325.8 (6), 271.1 (4) nm. Сравнение распределения относительной интенсивности излучения плазмы ядра эрозионного факела с распределением эффективных сечений возбуждения спектральных линий InI и InII электронами [7] показало, что они в целом не коррелируют между собой. Поэтому более вероятным механизмом заселения возбужденных состояний InI и InII, как и для лазерной алюминия [4], является процесс диэлектронной рекомбинации ионов InII и InIII. Наиболее высоколежащий уровень InI, с которого наблюдалось излучение, имел энергию 5.37 eV и может рассматриваться как узкое место рекомбинационного потока. Для более детального изучения механизмов возбуждения уровней InI и InII в лазерной плазме проводилось исследование временных характеристик излучения ядра эрозионного факела (рис. 2). Начало



**Рис. 2.** Осциллограммы излучения плазмы ядра лазерного факела: 451.1 nm InI (1), 383.5 nm InII (2), 360 nm континуум (3).

развертки для осциллограмм соответствует переднему фронту импульса генерации YAG:Nd<sup>3</sup>-лазера. Минимальная длительность, зафиксированная для излучения континуума (20 ns), была равной длительности генерации неодимового лазера. Длительность излучения на переходах возбужденных ионов индия не превышала 80...100 ns, а излучения атомов индия — 500...700 ns. Такая иерархия длительности излучения на переходах InII и InI, как и для длительностей излучения линий

АIII и АII [4], подтверждает рекомбинационный механизм заселения возбужденных уровней InII и InI. Длительность излучения спектральных линий InI возрастала с понижением энергии верхнего состояния (от 5.37 eV до 3.02 eV) от 400 до 700 ns, что может быть связано с каскадным заселением  $6^2S_{1/2}$  состояния InI и самим процессом рекомбинационного заселения. На осциллограммах излучения спектральных линий InII и InI наблюдались два максимума, которые связаны с двумя фазами поверхностного испарения преграды: сначала испарение происходит под действием падающего лазерного излучения, а в дальнейшем испарение индия осуществляется от излучения ядра лазерного факела [4]. Максимальная длительность процесса рекомбинации ионов InIII с электронами (оцененная по осциллограмме линии 383.5 nm InII, рис. 2) не превышает 50 ns, а соответствующее время рекомбинации InII (задний фронт осциллограммы на  $\lambda = 451.1$  nm InI)  $\leq 500$  ns.

Таким образом, показано, что при взаимодействии импульсного излучения YAG: Nd<sup>3+</sup>-лазера умеренной мощности с поверхностью индия в вакууме основной вклад в излучение лазерного факела вносят линии 452.1, 410.2, 325.8 (6), 271.1 (4) nm InI; основным механизмом заселения возбужденных состояний InII и InI в лазерной плазме является реакция диэлектронной рекомбинации ионов InIII и InII; узкое место рекомбинационного потока, заселяющего возбужденные уровни InI, находится при  $E_{ур} = 5.37$  eV; верхний предел времен рекомбинации ионов InIII в ядре факела не превышает 50 ns, а для ионов InII — 500 ns; наиболее интенсивные линии InII и InI могут использоваться для оптической диагностики в технологиях лазерного напыления тонких пленок из индийсодержащих соединений.

## Список литературы

- [1] Ананьин О.Б., Быковский Ю.А., Млынский В.В., Ступицкий Е.Л. // Квантовая электроника. 1989. Т. 16. № 11. С. 2267–2270.
- [2] Минько Л.Я., Чумаков А.Н., Ефремов В.В. и др. // ЖПС. 1989. Т. 51. № 5. С. 746–752.
- [3] Гайдаренко Д.В., Летохов А.Г., Чехов Д.И. // Физика плазмы. 1991. Т. 17. В. 8. С. 918–923.
- [4] Сухов Л.Т. // Лазерный спектральный анализ (физические принципы). Н., 1991. 140 с.

- [5] *Suaibov A.K., Shimon L.L., Shevera I.V., Minja A.J.* // Journal of Physical Studies. 1999. V. 3. N 2. P. 157–163.
- [6] *Зайдель А.Н., Прокофьев В.К., Райский С.М.* и др. // Таблицы спектральных линий. М., 1969. 782 с.
- [7] *Шимон Л.Л., Непийнов Э.И.* // УФЖ. 1974. Т. 19. № 4. С. 626–629.