

## ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭРОЗИОННОГО ЛАЗЕРНОГО ФАКЕЛА НА ГРАФИТОВОЙ МИШЕНИ В ВАКУУМЕ

В. К. ГОНЧАРОВ<sup>1</sup>, М. В. ПУЗЫРЕВ<sup>1</sup>, В. Ю. СТУПАКЕВИЧ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко»  
Белорусского государственного университета, ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы»,  
ул. Ожешко, 22, 230023, г. Гродно, Республика Беларусь

Исследованы пространственные и временные характеристики эрозионной лазерной плазмы графитовой мишени. Облучение мишени производилось лазером с длиной волны  $\lambda = 1064$  нм и длительностью импульса по полуширине  $\tau = 20$  нс в вакууме. Оценена температура плазмы в приповерхностной области лазерной мишени, которая составляет  $\sim 9800$  К. Эксперименты показали, что существует задержка начала свечения плазмы относительно излучения лазера  $\sim 25$  нс. Определен интегральный спектр по времени свечения графитовой плазмы на разных расстояниях от поверхности мишени. Спектр свечения плазмы имеет три типа ионизованных атомов углерода:  $C^+$ ,  $C^{++}$ ,  $C^{+++}$ . Обнаружены две зоны свечения: первая неподвижна и расположена вблизи поверхности мишени, вторая движется со скоростью  $\sim 10$  км/с от поверхности мишени.

**Ключевые слова:** эрозионная лазерная плазма; графитовая мишень; спектральные свойства плазмы.

## SPATIAL AND TEMPORAL CHARACTERISTICS OF THE GRAPHITE-TARGET EROSIIVE LASER PLUME IN THE VACUUM

V. K. GONCHAROV<sup>a</sup>, M. V. PUZYREV<sup>a</sup>, V. Y. STUPAKEVICH<sup>b</sup>

<sup>a</sup> A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University,  
Kurchatova street, 7, 220045, Minsk, Republic of Belarus

<sup>b</sup> Yanka Kupala State University, Ozheshko street, 22, 230023, Grodno, Republic of Belarus

The spatial and temporal characteristics of the erosive graphite-target laser plasma have been investigated. The target was irradiated by a laser with the wavelength  $\lambda = 1064$  nm and with the pulse duration  $\tau = 20$  ns in the vacuum. A temperature of the plasma in the laser-target surface area was estimated as  $\sim 9800$  K. By the experiments it has been demonstrated that a delay of the plasma luminescence initiation relative to laser radiation was 25 ns. The integrated spectrum on time for the graphite plasma luminescence at different distances from the target surface was determined. The luminescence spectrum revealed three types of ionized carbon atoms:  $C^+$ ,  $C^{++}$ , and  $C^{+++}$ . Two luminescence zones have been found: the static zone located near the target surface and another zone moving from the target surface at the rate of about 10 km/s.

**Key words:** erosive laser plasma; graphite target; spectral properties of plasma.

### Образец цитирования:

Гончаров В. К., Пузырев М. В., Ступакевич В. Ю. Пространственные и временные характеристики эрозионного лазерного факела на графитовой мишени в вакууме // Вестн. БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. 2016. № 1. С. 79–83.

### For citation:

Goncharov V. K., Puzyrev M. V., Stupakevich V. Y. Spatial and temporal characteristics of the graphite-target erosive laser plume in the vacuum. *Vestnik BGU. Ser. 1, Fiz. Mat. Inform.* 2016. No. 1. P. 79–83 (in Russ.).

### Авторы:

**Виктор Константинович Гончаров** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией лазерной плазмодинамики.

**Михаил Валентинович Пузырев** – кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории лазерной плазмодинамики.

**Валерий Юзефович Ступакевич** – старший преподаватель кафедры информационных систем и технологий физико-технического факультета.

### Authors:

**Viktor Goncharov**, doctor habilitatus of physics and mathematics, full professor; head of the laboratory of laser plasma dynamics.

**Mikhail Puzyrev**, doctor of physics and mathematics, docent; leading researcher of the laboratory of laser plasma dynamics.  
[puzyrev@bsu.by](mailto:puzyrev@bsu.by)

**Valery Stupakevich**, senior lecturer at the department of information system and technology, school of physics and technology.  
[tv\\_sad@grsu.by](mailto:tv_sad@grsu.by)

Одним из методов осаждения нанопленок на различные материалы (подложки) является лазерно-плазменный [1, 2]. Он имеет несколько преимуществ перед другими методами: во-первых, возможность получения плазмы из любого вещества, во-вторых, при нанесении наноструктурированных пленок в вакууме лазерное излучение не вносит дополнительных примесей в осаждаемое покрытие. Кроме того, лазерно-плазменный метод позволяет контролировать состав осаждаемых покрытий.

Для получения требуемых характеристик нанопленок необходимо изучить особенности разрушения материала лазерной мишени в вакууме, определить количество ионизированных и возбужденных атомов в плазме, динамику параметров эрозионного лазерного факела и его пространственные характеристики. Таким образом, изменяя условия осаждения, материал мишени и подложки, можно влиять на свойства осаждаемых покрытий.

Тем не менее до сих пор отсутствует целостная модель, описывающая процессы, происходящие при лазерно-плазменном осаждении углеродных пленок (например, в работах [3, 4] приведена неполная модель напыления пленок).

Цель настоящей работы – определение пространственных и спектральных характеристик эрозионных лазерных факелов графитовой мишени.

### Экспериментальное оборудование

Для воздействия на мишень был использован импульсный YAG : Nd<sup>3+</sup>-лазер LS-2137 фирмы *Lotis-TII* с длиной волны  $\lambda = 1064$  нм и длительностью импульса по полуширине  $\tau = 20$  нс. Мишень, изготовленная из высокоориентированного пиролитического графита марки УПВ1, устанавливалась под углом 45° к оси лазерного пучка. Измерение проводилось в вакууме при давлении остаточных газов  $\sim 10^{-3}$  Па. Мишень вращалась со скоростью 2 об/мин, чтобы предотвратить образование глубокого кратера на ее поверхности, что может сказаться на пространственной форме эрозионного факела.

Измерение временных параметров свечения факела производилось с помощью датчика Silicon Photomultiplier Detectors (SPM 10020) и осциллографа Tektronix TDS2022B. Спектральные свойства плазмы изучались с помощью спектрометра S100-2048 фирмы *SOLAR Laser Systems*.

### Результаты эксперимента и их обсуждение

Снимок интегрального во времени свечения эрозионного лазерного факела графитовой мишени в вакууме при плотности мощности воздействующего лазерного излучения  $5,6 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> приведен на рис. 1.

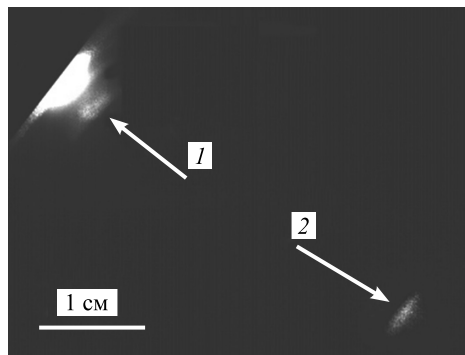


Рис. 1. Пространственное свечение эрозионного лазерного факела графитовой мишени:  
1 – свечение вблизи поверхности мишени; 2 – свечение на расстоянии  $\sim 4,5$  см от поверхности мишени

Существуют две зоны интенсивного свечения (см. рис. 1), одна из них расположена у поверхности мишени (1), вторая – на расстоянии 4÷5 см от нее (2). Временные характеристики интенсивности (I) свечения вблизи поверхности графитовой мишени и временной формы лазерного импульса представлены на рис. 2.

Имеет место, как видно из рис. 2, задержка начала свечения плазмы по отношению к излучению лазера. Она составляет  $\sim 25$  нс. Свечение плазмы происходит значительно дольше ( $\sim 2$  мкс), чем длительность лазерного излучения.

Измерялась также временная интенсивность свечения плазмы на различных расстояниях от поверхности мишени (см. рис. 3). Кривая интенсивности свечения эрозионного лазерного факела во времени, как видно из рис. 3, имеет два максимума. Первый максимум объясняется свечением продуктов излучения в зоне лазерного воздействия на мишень, которая заканчивается через 2 мкс. Вторым максимумом может быть связан с двойным зарядным слоем, где на переднем фронте движутся электроны, а за ними ионы и происходит частичная рекомбинация, в результате которой высвечиваются отдельные линии ионов углерода (см. рис. 4).

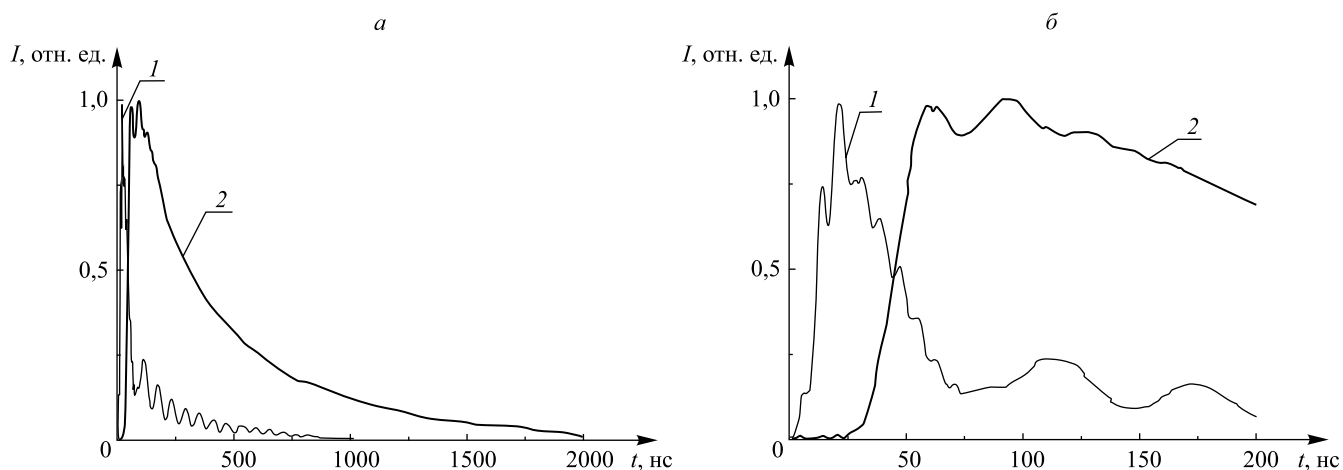


Рис. 2. Свечение плазмы у поверхности мишени:  
*а* – полное время свечения; *б* – передний фронт свечения; 1 – лазерный импульс; 2 – свечение плазмы

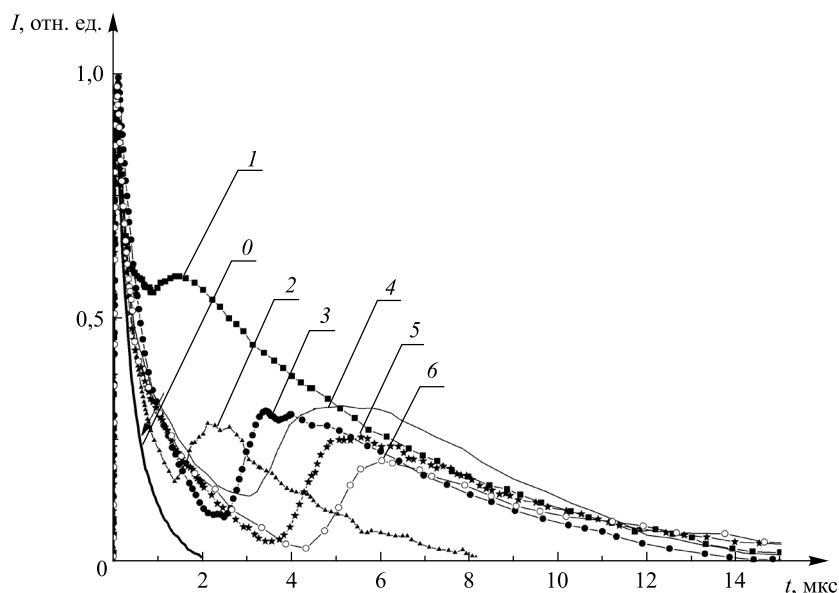


Рис. 3. Свечение плазмы во времени на различных расстояниях (см) от поверхности мишени:  
 0 – 0,1–0,3; 1 – 1; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4; 5 – 5; 6 – 6

По результатам экспериментов (см. рис. 3) была определена скорость движения двойного слоя, которая составляет  $\sim 10$  км/с.

Следует заметить, что при регистрации кривых 1–6 (см. рис. 3) для определения начала свечения плазмы использовалось ее излучение у поверхности мишени, отраженное стенками вакуумной камеры.

Кроме временных измерений свечения плазмы, проводились измерения интегральных по времени спектров свечения на различных расстояниях от поверхности мишени, результаты которых представлены на рис. 4.

Вблизи поверхности мишени, как видно из рис. 4, наблюдается свечение нескольких ионных линий углерода на фоне непрерывного излучения, по спектру которого были проведены измерения яркостной температуры вблизи поверхности мишени. Усреднение спектральной кривой непрерывного излучения проводилось с помощью эллиптического фильтра с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ). Особенности фильтра является неравномерный сдвиг фаз для разных частот, обуславливающий некоторые погрешности в обработанном сигнале, в то же время он убирает высокие частоты, за счет чего получается наиболее плавная кривая. Итоговый сдвиг был подобран так, чтобы получившийся сигнал наилучшим образом соответствовал исходному. Для соответствия отфильтрованного сигнала неотфильтрованному

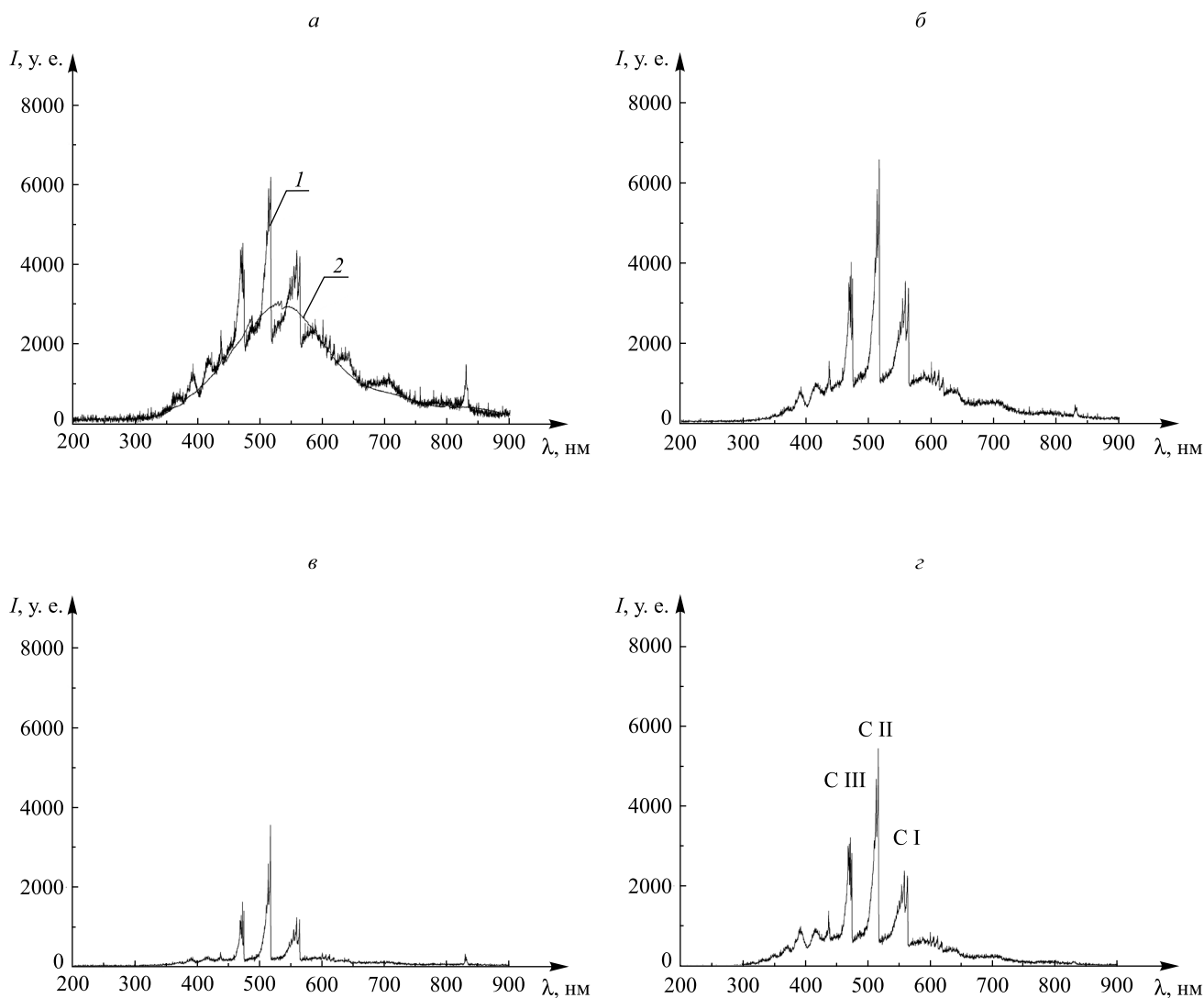


Рис. 4. Интегральный по времени спектр свечения графитовой плазмы на разных расстояниях (см) от поверхности мишени: а – вблизи поверхности мишени: 1 – спектр, 2 – фон, обработанный БИХ-фильтром; б – 1; в – 3; г – 4

производился сдвиг по времени в 30 нс. Получены значения яркостной температуры, которая составляет ~9800 К. В работе [5] показано, что появление четкого линейчатого спектра свидетельствует о присутствии остывшей плазмы с достаточно низкой электронной плотностью и температурой. Однако эти результаты были получены при воздействии лазерного излучения на металлы в воздухе.

В нашем случае разлет плазмы может существенно отличаться от приведенного в [5]. Как видно из рис. 3, при удалении от поверхности мишени интенсивность непрерывного излучения уменьшается, а соотношение излучения линейчатого спектра и непрерывного излучения увеличивается. Это происходит в указанных условиях на расстояниях вплоть до 3 см от поверхности мишени, а на расстоянии 4 см интенсивность излучения непрерывного спектра снова значительно увеличивается. При дальнейшем увеличении расстояния от поверхности мишени интенсивность спектра существенно уменьшается и зарегистрировать его не удается. Из рис. 3 и 4 видно, результаты экспериментов согласуются. Похожая картина наблюдается и на общем снимке эрозионного лазерного факела (см. рис. 1).

Временная зависимость свечения эрозионного факела из зон, расположенных на различных расстояниях от поверхности мишени, схематически изображена на рис. 3. При этом видно, что происходит пространственное смещение второго максимума свечения плазмы. Однако из рис. 1 видно, что вторая зона свечения сосредоточена на расстоянии 4÷5 см от поверхности мишени. Проинтегрировав свечение лазерного факела из зон, расположенных на различных расстояниях от поверхности мишени, получаем зависимость, которая изображена на рис. 5.

Учитывая скорость движения второй светящейся зоны, которая составляет ~10 км/с, и время максимума свечения (см. рис. 5), получаем ~4,5 см от поверхности мишени. Это хорошо согласуется с результатами, представленными на рис. 1 и 4.

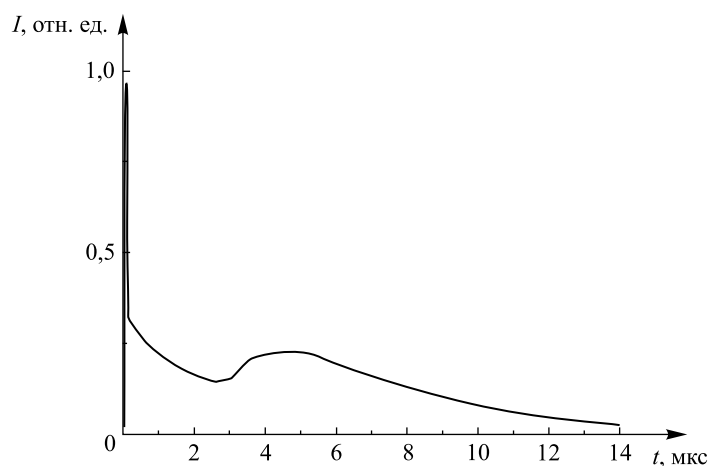


Рис. 5. Зависимость интегрального по пространству свечения эрозионного факела графитовой мишени от времени

В проведенных экспериментах по воздействию наносекундного лазерного излучения на графитовую мишень в вакууме обнаружены две зоны свечения: первая неподвижна и расположена вблизи мишени, а вторая движется со скоростью  $\sim 10$  км/с от ее поверхности.

Оценена температура плазмы в приповерхностной области лазерной мишени, которая составляет  $\sim 9800$  К.

В наших условиях максимум интегрального свечения из различных зон эрозионного лазерного факела расположен на расстоянии 4,5 см от поверхности мишени.

Таким образом, эксперименты показали, что эрозионный лазерный факел в вакууме имеет сложную структуру с различными параметрами частиц и может влиять на режимы осаждения углеродных нанопленок.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК (*REFERENCES*)

1. *Chrisey D. B., Hubler G. K.* Pulsed Laser Deposition of Thin Films. New York, 1994.
2. *Bonelli M., Miotello A., Mosaner P.* Pulsed laser deposition of diamondlike carbon films on polycarbonate // *J. Appl. Phys.* 2003. Vol. 93. P. 859–865 [Bonelli M., Miotello A., Mosaner P. Pulsed laser deposition of diamondlike carbon films on polycarbonate. *J. Appl. Phys.* 2003. Vol. 93. P. 859–865 (in Engl.)].
3. *Lifshitz Y.* Hydrogen-free amorphous carbon films: correlation between growth conditions and properties // *Diam. and Relat. Mater.* 1996. Vol. 5. P. 388–400 [Lifshitz Y. Hydrogen-free amorphous carbon films: correlation between growth conditions and properties. *Diam. and Relat. Mater.* 1996. Vol. 5. P. 388–400 (in Engl.)].
4. *Voevodin A. A., Donley M. S.* Preparation of amorphous diamond-like carbon by pulsed laser deposition : a critical review // *Surf. and Coatings Technol.* 1996. Vol. 82, No. 3. P. 199–213 [Voevodin A. A., Donley M. S. Preparation of amorphous diamond-like carbon by pulsed laser deposition : a critical review. *Surf. and Coatings Technol.* 1996. Vol. 82, No. 3. P. 199–213 (in Engl.)].
5. *Гончаров В. К., Козадаев К. В., Щегрикович Д. В.* Динамика оптических характеристик эрозионных лазерных факелов металлов при воздействии интенсивных наносекундных импульсов в атмосферных условиях // *Журн. прикл. спектроскопии.* 2013. Т. 80, № 3. С. 409–413 [Goncharov V. K., Kozadaev K. V., Shchegrikovich D. V. Dynamics of the optical characteristics of erosion laser pulses under atmospheric conditions. *Zhurnal prikl. spektrosk. = J. Appl. Spectrosc.* 2013. Vol. 80, No. 3. P. 409–413 (in Russ.)].

Статья поступила в редколлегию 10.11.2015.  
Received by editorial board 10.11.2015.