



# ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК ИОНОВ С РЕГУЛИРУЕМОЙ ЭНЕРГИЕЙ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ НАНОПЛЕНОК

УДК 533.9:621.373

<sup>1</sup>В.К. Гончаров, <sup>2</sup>А.Е. Василевич, <sup>2</sup>В.Ю. Ступакевич, <sup>1</sup>М.В. Пузырев,  
<sup>1</sup>Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических  
проблем им. А.Н.Севченко» Белорусского государственного университета,  
<sup>2</sup>Гродненский государственный университет имени Янки Купалы

## Аннотация

Эксперименты показали, что в эрозионном лазерном факеле графитовой мишени в вакууме формируется двойной электрический слой. Эрозионный лазерный факел формировался при облучении мишени импульсами YAG:Nd<sup>3+</sup> лазера с длиной волны  $\lambda = 1064$  нм длительностью импульса  $\tau = 20$  нс.

В эксперименте использовались две управляющие сетки. С помощью величины потенциала первой сетки можно регулировать соотношение электронов и ионов, попадающих на подложку. Найден отрицательный потенциал сетки по отношению к мишени (-2,5 В), при котором на подложку поступают только ионы. Используя вторую сетку, можно управлять энергией ионов, а также плотностью потока ионного тока на подложке.

## Введение

Одним из методов осаждения нанопленок на различные материалы (подложки) является лазерно-плазменный [1, 2]. Он имеет несколько преимуществ перед другими методами. Во-первых, это возможность получить плазму практически из любого вещества, во-вторых, стерильность, то есть при нанесении пленок в вакууме лазерное излучение не вносит дополнительных примесей в осаждаемое покрытие. Кроме того, лазерно-плазменный метод позволяет легко автоматизировать процесс нанесения пленок.

Однако в настоящее время процесс контроля режимов нанесения покрытий лазерно-плазменным методом определяется в основном изменением плотности мощности взаимодействующего лазерного излучения и расстояния от подложки до лазерной мишени [3]. При этом следует учесть, что эрозионный лазерный факел в вакууме имеет достаточно сложную пространственную структуру: формирование двойного электрического слоя, достаточно сложного взаимодействия электронных и ионных потоков на фоне плазмодинамических процессов [4]. Настоящая работа посвящена получению из лазерной плазмы потока ионов, энергию которых легко регулировать, изменяя скорость ионов с помощью электрического поля.

## Экспериментальное оборудование

Для воздействия на мишень был использован импульсный YAG:Nd<sup>3+</sup> – лазер LS-2137 фирмы Лотис-ТИИ

с длиной волны  $\lambda = 1064$  нм и длительностью импульса на полувысоте  $\tau = 20$  нс. Мишень, изготовленная из высокотемпературного пиролитического графита марки УПВ-1, устанавливалась под углом 45° к оси лазерного луча. Эксперименты проводились 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. Все эксперименты проводились при одной и той же плотности мощности воздействующего лазерного излучения  $5,6 \times 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Как было показано в [5], при такой плотности мощности наблюдается истечение плазменного факела с минимальным содержанием твердых микрочастиц материала мишени, что позволяет наносить более качественные покрытия.

Измерения токовых характеристик эрозионной плазмы материала мишени проводились с помощью осциллографа Tektronix TDS2022.

## Результаты экспериментов и их обсуждение

Как было показано в [4], эрозионный лазерный факел графитовой мишени в вакууме имеет сложную структуру. Для изучения динамики такой структуры производился контроль электронных и ионных токов из плазменной области, расположенной вблизи поверхности мишени, на подложку и вспомогательную сетку. На рисунке 1 представлен ток подложки в отсутствие сетки (а) и ток сетки при подаче на сетку небольшого отрицательного потенциала по отношению к мишени (б). На рисунках 2а, 2б, 2в, 2г схематически представлено расположение мишени, сетки, подложки, положительных и отрицательных зарядов, формирующихся из эрозионной лазерной плазмы.

В эксперименте без сетки и подачи потенциалов первоначально из эрозионной плазмы на подложку попадают более быстрые электроны двойного электрического слоя, формирующиеся за счет плазмодинамических процессов в эрозионном лазерном факеле. Затем на подложку поступает поток более медленных по сравнению с электронами ионов (рисунок 1).

В конце процесса наблюдается небольшой сигнал отрицательной полярности. Этот сигнал может формироваться остаточным потоком заряженных частиц в конечной стадии распада эрозионного плазменного

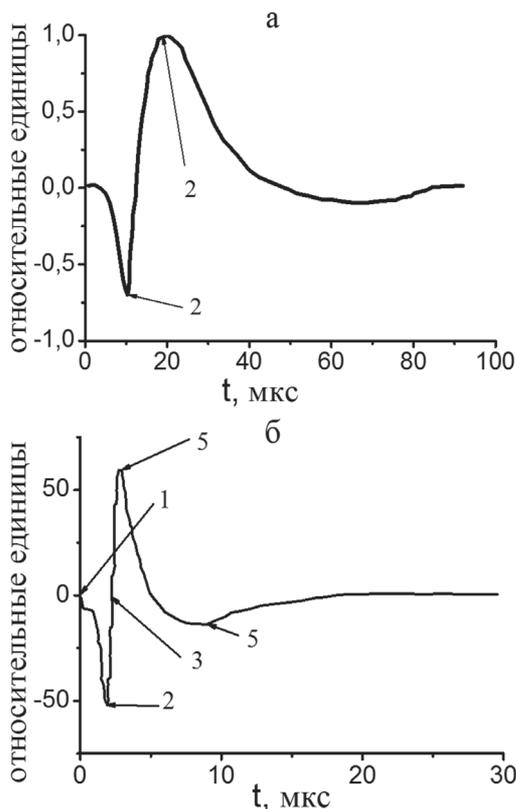


Рисунок 1 – Временное распределение токов в пространстве: а) ток подложки: 1 – ток электронов, 2 – ток ионов; б) ток сетки: 1 – плазма отсутствует, 2 – максимальный ток электронов на сетке, 3 – баланс токов электронов и ионов, 4 – обратный ток электронов и прямой ток ионов 5 – обратный ток ионов в направлении «подложка-сетка»

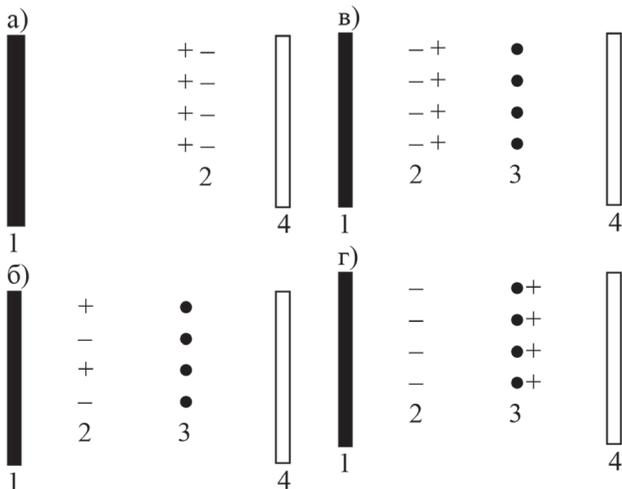


Рисунок 2 – Схематическое расположение мишени, сетки, подложки, положительных и отрицательных зарядов, формирующихся из эрозионной лазерной плазмы: а) расположение зарядов между мишенью и подложкой без сетки; б) расположение зарядов плазмы между мишенью и сеткой при балансе зарядов плазмы (рисунок 1б (3)); в) расположение ионов между мишенью и сеткой при подаче отрицательного потенциала на сетку 2,5 В по отношению к подложке; г) расположение ионов между мишенью и сеткой при подаче отрицательного потенциала на сетку 2,5 В по отношению к подложке в конце процесса. 1 – мишень, 2 – слой электрических частиц, 3 – сетка; 4 – подложка

факеда. Отрицательный знак сигнала можно объяснить большей подвижностью электронов (рисунок 1а), а также обратным током ионов, подлетающих на малых скоростях к положительно заряженной ионами подложке.

При установлении сетки на расстоянии 2,5 см от мишени и 10 см до подложки без подачи потенциалов на сетку и подложку наблюдается похожая на предыдущий случай картина. Однако в этом случае есть небольшое отличие. На подложке в конце процесса не наблюдается отрицательного значения тока. Это можно объяснить перезарядными ион-электронными потоками сетки (рисунок 3а).

При подаче на сетку небольшого отрицательного потенциала по отношению к мишени (0,4 В) сигнал на сетке приобретает сложную форму (рисунки 1б и 3б), которую можно объяснить следующим образом. Первоначально на сетку приходят наиболее скоростные электроны и проходят сетку, а далее попадают на подложку. Часть электронов попадает непосредственно на сетку. Через некоторое время электроны задерживаются отрицательным потенциалом сетки, сформировавшись за счет заряда электронным потоком, попадающим непосредственно на сетку, и начинают двигаться в противоположную от сетки сторону, а ионы ускоряются отрицательным потенциалом сетки и движутся в сторону сетки, и направление сигнала на сетке изменяется в противоположную сторону (рисунок 1б, 3б). Сеточный ток в это время определяется обратным током электронов и прямым током ионов. В нулевой точке под действием потенциала на сетке электронный слой встречается с ионным, формируя в промежутке мишень-сетка квазинейтральный слой плазмы (рисунок 2б и рисунок 3б). После этого электроны под действием потенциала на сетке продолжают двигаться к мишени, а ионы к сетке (рисунок 2в) вплоть до достижения максимального электронно-ионного тока. После того, как основные заряженные частицы уходят из промежутка мишень-сетка, сигнал на сетке достигает нулевого уровня. Сигнал на подложке определяется прошедшим через сетку электронным потоком, а после него потоком ионов, прошедших через сетку (рисунок 3б). Следует заметить, что после прохождения электронов и ионов через сетку на последней регистрируется некоторый потенциал отрицательной формы. Это можно объяснить тем, что самые медленные ионы могут притягиваться сеткой и формируется обратный ток ионов (рисунок 2г и рисунок 3б).

При увеличении отрицательного потенциала на сетке минимальная скорость ионов увеличивается, они пролетают через сетку и направляются к подложке (рисунки 3в и 3г).

При подаче на сетку небольшого отрицательного потенциала, как видно из рисунков 3б, 3в, 3г, наиболее быстрые электроны преодолевают потенциальный барьер сетки и достигают подложки. Для устранения

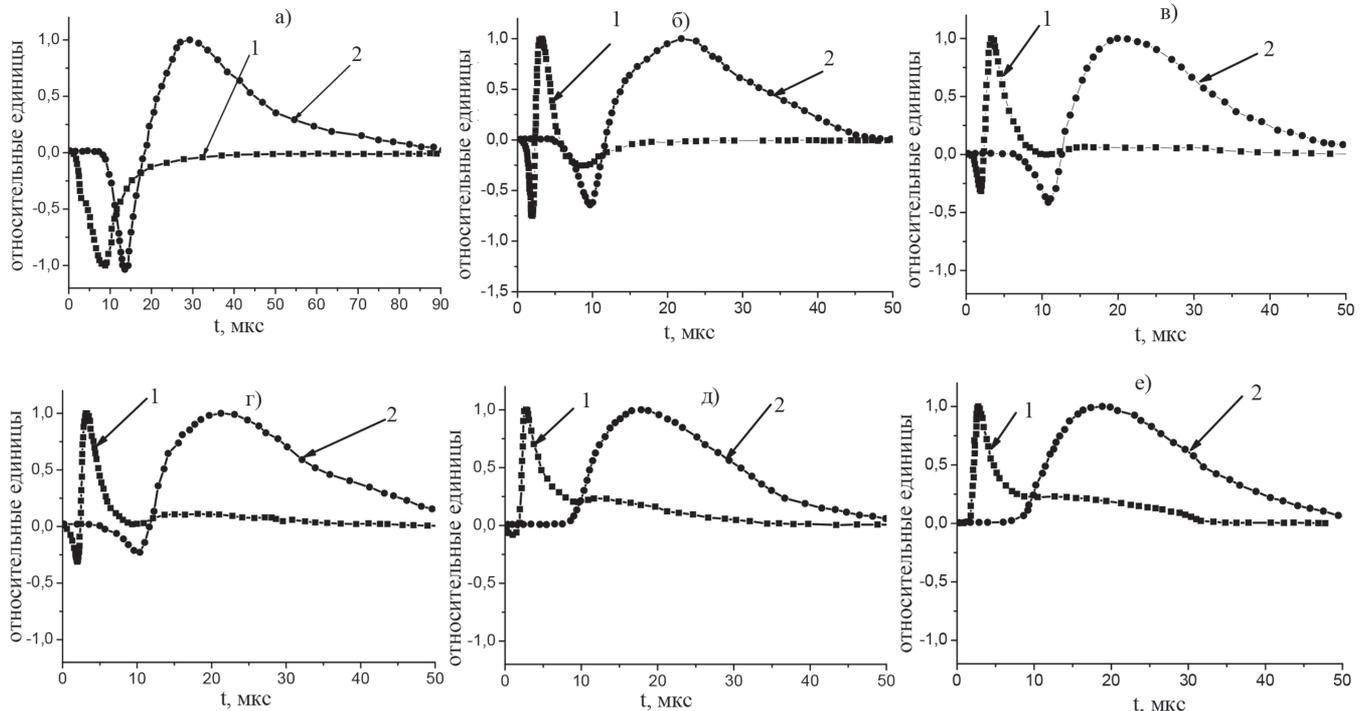


Рисунок 3 – Зависимость интенсивности электронной и ионной компонент эрозионного лазерного факела графитовой мишени на управляющей сетке (1) и подложке (2) для различных отрицательных потенциалов сетки по отношению к мишени: а) – 0 В; б) – 0,4 В; в) – 0,5 В; г) – 0,6 В; д) – 2 В; е) – 2,5 В

этого необходимо увеличить отрицательный потенциал сетки по отношению к мишени. При отрицательном потенциале сетки 2–2,5 В в наших условиях на подложку попадают преимущественно ионы, а электроны задерживаются сеткой (рисунки 3д, 3е).

В дальнейшем можно подавать от независимого источника на сетку положительный по отношению к подложке потенциал, регулируя при этом только энергию ионного потока.

На рисунке 4 представлены результаты изменения тока ионов на подложке при различных потенциалах сетки по отношению к подложке. При этом на сетку по отношению к мишени подавался отрицательный потенциал 2,5 В.

Как видно из рисунка 4, с увеличением ускоряющего ионы отрицательного потенциала подложки по отношению к сетке происходит увеличение тока ионов, кроме того, происходит сужение импульса тока за счет ускорения более медленной компоненты потока ионов. Это можно объяснить следующим. Первоначальная скорость ионов определяется плазменными процессами в эрозионном факеле (~ 10 км/с) [4]. Ионы разлетаются по всем направлениям (в полуплоскости) с достаточно одинаковой скоростью по модулю. Однако средняя скорость (по модулю), определяемая нами, наиболее точно соответствует скорости переднего фронта (рисунок 3), так как эта скорость вычисляется по минимальному пути, пройденному ионами, равному расстоянию от мишени до

подложки. Но достаточно большой поток ионов от мишени до подложки летит по траектории под некоторыми углами к подложке, и расстояние, которое они пролетают от мишени до подложки, может быть больше. В условиях наших экспериментов это расстояние может быть увеличено до 1,4 раза. Таким образом, на импульсах тока (рисунок 3) появляется длинный «хвост более медленных ионов», хотя модули их скорости близки. При увеличении положительного потенциала сетки по отношению к подложке происходит изменение траектории ионов, которые летели под большими углами по отношению к оси «мишень-подложка», таким образом, что путь их сокращается, и получается эффект большего ускорения медленных ионов, а временной импульс ионного потока на подложке сужается. В результате при увеличении положительного потенциала на сетке по отношению к подложке происходит увеличение ионного потока не только за счет потенциального ускорения ионов, но и за счет пространственного сужения ионного потока на подложку (подфокусировки) и увеличения плотности ионного потока.

### Заключение

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что в эрозионном лазерном факеле в вакууме формируется двойной электрический слой. На его переднем фронте движутся электроны, а за ним более инерционные ионы.

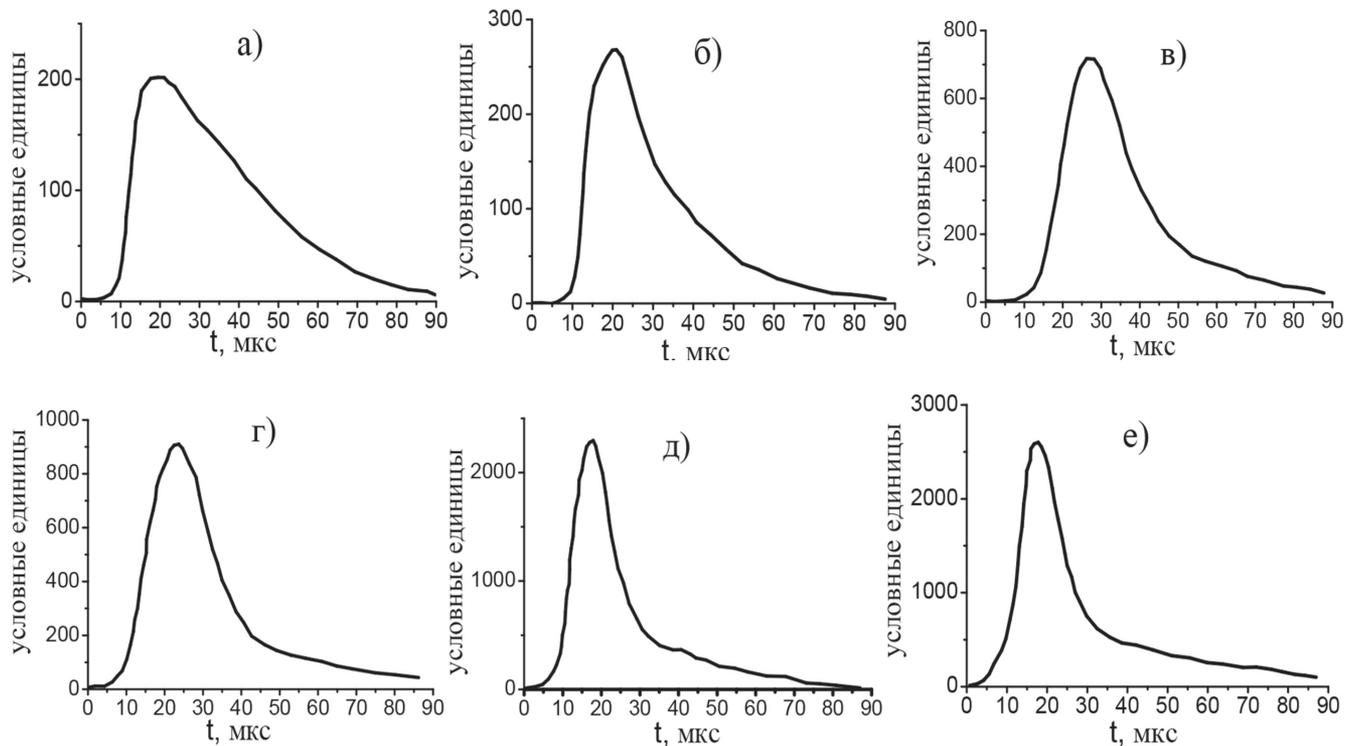


Рисунок 4 – Зависимость во времени тока ионной компоненты на подложке при различных положительных потенциалах сетки по отношению к подложке: а) – 5 В; б) – 10 В; в) – 30 В; г) – 50 В; д) – 200 В; е) – 400 В. На управляющей сетке отрицательный потенциал по отношению к мишени 2,5 В

При размещении между лазерной мишенью и подложкой сетки, на которую по отношению к лазерной мишени подается отрицательный потенциал, с помощью величины потенциала можно регулировать соотношение электронов и ионов, попадающих на подложку.

Для конкретного эксперимента найден отрицательный потенциал сетки по отношению к мишени (-2,5 В), при котором на подложку поступают только ионы.

Подавая на сетку положительный потенциал по отношению к подложке, можно управлять энергией ионов. При этом происходит не только увеличение энергии ионов, но и с увеличением положительного потенциала на сетке по отношению к подложке происходит увеличение плотности ионного потока (фокусировка).

Источник ионов из лазерной плазмы с регулируемой энергией ионов перспективно использовать для нанесения нанопленок соответствующего состава на подложки из различных материалов с достаточно простой автоматизацией процесса нанесения.

#### Литература:

1. Chrisey, D.B. Pulsed Laser Deposition of Thin Films [Текст] / D.B. Chrisey, Hubler G.K. – New York: John Wiley & Sons Inc., 1994.
2. Bonelli, M. Pulsed laser deposition of diamondlike carbon films on polycarbonate [Текст] / M. Bonelli, A. Miotello, P. Mosaner // J. Appl. Phys. – 2003. – V. 93 – P. 859-865.

3. Ferrari, A.C. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon [Текст] / A.C. Ferrari, J. Robertson // Physical review. 2000. – V. 61. – No. 20. – P. 14 095–14 105.

4. Гончаров, В.К. Пространственные и временные характеристики эрозионного лазерного факела на графитовой мишени в вакууме [Текст] / В.К. Гончаров, М.В. Пузырев, В.Ю. Ступакевич // Вестник БГУ. – 2016. – Сер. 1. № 1. – С. 79-83.

5. Goncharov, V.K. Deposition of zinc films by laser method [Текст] / V.K. Goncharov, G.A. Gusakov, M.V. Puzyrev // Quantum Electronics. – 2015. – V. 45, № 4. – P. 339 – 344.

#### Abstract

Experiments showed that the double electric layer is formed in an erosive laser plume of a graphite target in vacuum. The erosion laser plume was formed at irradiation of the target by the YAG:Nd<sup>3+</sup> laser pulses with a wavelength 1064 nm and a duration of 20 ns.

Two controlling grid were used in an experiment. Using the potential of first grid we can control by a ratio of the electrons and ions arrive at a substrate. The negative potential of a first grid in relation to a target (-2.5 В) is found at which only ions arrive at a substrate. Using the second grid it is possible to control ions energy, and also density of the ionic current on a substrate.

*Поступила в редакцию 5.09.2016 г..*