### Влияние интенсивности лазерного излучения, воздействующего на мишень, на скорость ионного потока к подложке в лазерноплазменном источнике для нанесения нанопокрытий

В. К. Гончаров, Г. А. Гусаков, М. В. Пузырев

## Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко Белорусского государственного университета, Минск; e-mail: Puzyrev@bsu.by

Рассмотрены процессы в лазерно-плазменном источнике для нанесения нанопленок. Экспериментально измерены скорости заряженных частиц в промежутке мишень-сетка и скорости потоков ионов углерода различной кратности в промежутке сетка- подложка. Показана возможность регулировки энергии наносимых на подложку частиц изменением плотности мощности лазерного излучения, воздействующего на мишень.

Ключевые слова: лазерное излучение, ионные потоки, нанесение нанопокрытий.

#### Введение

Одним из наиболее перспективных методов осаждения нанопокрытий является лазерно-плазменный метод. Он обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами осаждения. Это стерильность, возможность получения плазмы из веществ, находящихся в любом агрегатном состоянии, в том числе тугоплавких металлов.

Лазерно-плазменный метод осаждения нанопленок заключается в том, что при воздействии лазерного излучения на мишень образуется эрозионный факел, который разлетается в полупространство и часть его попадает на поверхность подложки.

Для достижения плавной регулировки энергии наносимых частиц в [1, 2] было предложено поместить между лазерной мишенью и подложкой сетку. При подаче на сетку отрицательного потенциала по отношению к мишени после сетки формируется поток заряженных частиц, состоящий преимущественно из ионов. Подавая на сетку положительный потенциал по отношению к подложке можно плавно изменять кинетическую энергию ионов. Это позволяет изменять режим осаждения нанопокрытий.

#### 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 на полувысоте  $\tau = 20$  нс. Мишень, изготовленная из высокоориентированного пиролитического графита марки УПВ-1, устанавливалась под углом 45° к оси лазерного луча. Исследования проводились в вакууме при давлении остаточных газов ~10<sup>-3</sup> Па. Мишень вращалась со скоростью 2 об/мин., чтобы предотвратить образование глубокого кратера на её поверхности, что может сказаться на пространственной форме эрозионного факела. В качестве подложки использовалась пластина из меди. Измерение токовых и потенциальных характеристик во времени производились с помощью осциллографа Tektronix TDS 2022B.

#### Результаты экспериментов и их обсуждение

Схема эксперимента изображена на рис. 1. Расстояние между мишенью и сеткой составляет 2,5 см, расстояние между мишенью и подложкой 12 см. Как было показано в [3], при таких условиях достаточно приложить к сетке отрицательный потенциал по отношению к мишени 2,5 В и после сетки из лазерной плазмы формируется поток зараженных частиц, состоящий преимущественно из ионов. Для ускорения сформированного ионного потока к сетке по отношению к подложке прикладывался

положительный потенциал 100 В. В всех экспериментах эти потенциалы были постоянными, изменялась только плотность мощности воздействующего лазерного излучения.



Рис. 1. – Электрическая схема эксперимента: 1 – лазерное излучение; 2 – лазерная мишень; 3 – эрозионный плаз-менный факел; 4 – сетка; 5 – подложка; ОСЦ 1, ОСЦ 2 – сигналы, снимаемые на первый и второй канал осциллографа с сопротивлений нагрузки 390 Ом; U<sub>1</sub> и U<sub>2</sub> – независимые источники питания.



Рис.2. – Токи в промежутке мишеньсетка (1) и сетка-положка (2) при плотности мощности воздействующего лазерного излучения 3,82·10<sup>8</sup> Bт/см<sup>2</sup>.

Первый канал осциллографа регистрировал импульс тока в промежутке мишень-сетка, а второй канал в промежутке сетка-подложка. За начало координат взято начало воздействия импульса лазерного излучения на мишень. В качестве на рис. 2 приве-дены примера характерные осциллограммы токов возлействии при на мишень лазерного излучения плотностью мощности 3,82·10<sup>8</sup> Вт/см<sup>2</sup>.

Кривые на рис. 2 можно объяснить следующим образом. В промежутке мишень-сетка под воздействием лазерного импульса образуется плазма. При этом продукты разрушения мишень ускоряются под воздействием плазмодинамического давления. Впереди должны лететь наиболее легкие электроны, а за ними ионы. электрическое Однако поле ионы заставляет ускоряться, а электроны сначала замедляться, а затем двигаться в противоположном направлении, в сторону мишени. (см. рис. 2). На рис. 2 ток в промежутке мишень-сетка первоначально определяется потоком ионов, ускоренных плазмодинамическим давлением и электрическим полем электронов, ускоренных Поток плазмодинамическм давлением, сначала останавливается электрическим полем. А через некоторое время это поле заставляет их двигаться в сторону мишени. Так как поток отрицательных частиц в про-

тивоположную сторону выглядит как положительный сигнал, то после ионного тока на осциллограмме через некоторое время наблюдается рост амплитуды импульса общего тока в промежутке мишень-сетка (см. рис. 2).

Кривая (2) на рис. 2 изображает временные изменения ионного тока в промежутке сетка-подложка. На этой кривой наблюдается несколько подъемов. Один из них происходит через 10 мкс после воздействия лазерного импульса на мишень. Это можно объяснить появлением скоростных ионов второй кратности. Следующий

максимум наблюдается через 25 мкс и его появление можно объяснить появлением основного потока однократно ионизованных ионов углерода. А в самом начале импульса (рис. 3) наблюдаются самые скоростные ионы третьей кратности и возможно четвертой.



Рис.3. – Ток в промежутке сетка-положка при плотности мощности воздействующего лазерного излучения 3,82.10<sup>8</sup> Вт/см<sup>2</sup>.

Таким образом, в начале ионного импульса потока появляются более скоростные ионы высокой кратности. Затем мере остывания лазерной по плазмы появляются ионы второй кратности И наконец ионы первой кратности ионизации [4].

Были проведены эксперименты с регистрацией токов в промежутке мишень-сетка и сетка-подложка при различных плотностях мощности воздействующего лазерного излучения на графитовую мишень. По этим экспериментам были получены скорости различных компонент эрозионного лазерного факела

углерода, которые представлены на рис. 4. Как видно из рисунка различные компоненты лазерной плазмы имеют различные скорости. Скорость тем больше, чем выше ионизация ионов. Это обусловлено тем, что в промежутке сетка-подложка они ускоряются электрическим полем.



Рис.4. – Скорость перемещения отдельных компонент лазерной плазмы в зависимости от плотности мощности воздействующего лазерного излучения: 1– средняя скорость движения максимума тока ионов первой кратности; 2 – средняя скорость движения максимума тока ионов второй кратности; 3 – скорость движения самых быстрых ионов в промежутке сетка-подложка; 4 – средняя скорость движения в промежутке мишень-сетка.

Особо следует остановиться на кривой 4. Так как ток в промежутке мишень-сетка состоит из потока ионов различной кратности и потока электронов. Эта кривая отражает скорость переноса зарядов в промежутке мишень-сетка. Как видно из рис. 3, при увеличении плотности мощности лазерного излучении скорость всех компонент из-за увеличения плазмодинамического давления растет нелинейно.

#### Заключение

В лазерно-плазменном источнике для нанесения нанопокрытий с использованием ионных потоков, благодаря сепарации ионов в промежутке мишень-сетка, в промежутке сетка-подложка формируется ионный поток на подложку, за счет которого можно наносить нанопокрытия.

Различные компоненты лазерной плазмы имеют различные скорости при достижении поверхности подложки. Скорость тем больше, чем больше кратность ионизации. Это обусловлено тем, что в промежутке сетка-подложка они ускоряются электрическим полем. При увеличении плотности мощности лазерного излучения скорость всех компонент плазмы нелинейно растет. Это необходимо учитывать при выборе режимов в лазерно-плазменном источнике для нанесения нанопокрытий с использованием ионных потоков.

#### Литература

- 1. Гончаров В.К. Пузырев М.В., Ступакевич В.Ю. Физические процессы в лазерном источнике ионов алюминия с управляемой энергией для нанесения нанопленок. Журнал Белорусского государственного университета. Физика. 2017. № 3. С. 79–87.
- Устройство управления параметрами эрозионного лазерного факела в вакууме для осаждения наноструктурированных покрытий на различные материалы пат. 12575 Респ. Беларусь МПК С 23С 14/00 (2006.01), С 23С 28/00 (2006.01) /Гончаров В.К., Пузырев М.В.. Ступакевич В.Ю., заявитель Научно-исследовательское учреждение "Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко" Белорусского государственного университета заявл. 16.01.2020; опубл. 30.04.2021 // Афіцыйны бюл. Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2021. № 2. С. 72.
- 3. Goncharov V.K., Puzyrev M.V., Stupakevich V.Yu. Controlling particles fluxes in the erosive laser plasma of a graphite target in vacuum. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2018. Vol. 91, No. 4. P. 1056–1062
- Goncharov V., Puzyrev M., Stupakevich V. Temporary dependences of carbon spectral lines in vacuum laser plasma. Proc.29th Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases (SPIG – 2018) Belgrade, 2018. P. 162–165.

# Influence of the intensity of laser radiation acting on the target on the velocity of the ion flow to the substrate in a laser-plasma source for nanocoating

#### V. K. Goncharov, G. A. Gusakov, M. V. Puzyrev

#### A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University, Minsk; e-mail: Puzyrev@bsu.by

The processes in a laser-plasma source for deposition nanofilms are considered. The charge particle velocity transfer in the target-grid space and the flow velocity of carbon ions of various multiplicities in the grid - substrate space were experimentally measured. The possibility of adjusting the energy of the particles deposited on the substrate by changing the power density of the laser radiation acting on the target is shown.

Keywords: laser radiation, ion fluxes, nanocoating.