

Оптимизация потенциала ускоряющего электрического поля в лазерно-плазменном источнике ионов для формирования наноструктур при повышенных плотностях мощности лазерного излучения

В. К. Гончаров, М. В. Пузырев

*Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь,
e-mail: puzyrev@bsu.by*

Проведено экспериментальное исследование эрозионного лазерного факела при воздействии лазерного излучения плотностью мощности $1,5 \cdot 10^9$ Вт/см² на оловянную мишень. Показано, что с помощью разработанной схемы можно получать ионные потоки из эрозионной лазерной плазмы, а также плавно управлять их энергией с помощью электрического поля. Показано, что для увеличения КПД наносимых нанопокровов с помощью ионных потоков целесообразно использовать ускоряющие электрические потенциалы от 30 В и выше.

Ключевые слова: лазерная плазма, ионные потоки, наноструктуры

Optimization of the accelerating electric field potential in a laser-plasma ion source for the nanostructures formation at increased laser radiation power densities

V. K. Goncharov, M. V. Puzyrev

*A. N. Sevchenko Institute of Applied Physics Problems of Belarusian State University,
Minsk, Belarus, e-mail: puzyrev@bsu.by*

The erosive laser plume have been experimentally studied at acting laser radiation with a power density of $1.5 \cdot 10^9$ W/cm² on a tin target. It was shown that the developed scheme can generate ion beams from the erosive laser plasma and smoothly control their energy using an electric field. It was shown that accelerating electric potentials of 30 V or higher are beneficial for increasing the efficiency of nanocoatings deposited using ion beams.

Keywords: laser plasma; ion beams; nanostructures.

Введение

В настоящее время лазерно-плазменный метод формирования наноструктур является наиболее перспективным. Преимущество этого метода состоит в том, что лазерное излучение не вносит в сформированные наноструктуры дополнительных примесей и позволяет получать плазму из любого вещества. Особенно это важно когда в качестве мишеней используются тугоплавкие материалы. Лазерно-плазменный метод формирования наноструктур достаточно прост. При воздействии лазерного излучения на мишень формируется эрозионный лазерный факел, который за счет газокINETического давления движется от мишени ортогонально ее поверхности. Для изменения условий формирования наноструктур из различных материалов необходимо плавно изменять плотность мощности воздействующего

лазерного излучения. Однако в современных технологических лазерах изменение энергии имеет небольшой динамический диапазон.

В [1] предложен лазерно-плазменный источник ионов для формирования наноструктур, который позволяет в большом динамическом диапазоне плавно регулировать режимы нанесения нанопокровов в стерильных условиях с более высокими адгезионными свойствами. На рис. 1 представлена электрическая схема этого источника. Подавая на сетку отрицательный потенциал по отношению к мишени, можно после сетки получать поток заряженных частиц, состоящий преимущественно из ионов, а подавая на сетку плавно изменяющийся положительный потенциал по отношению к подложке, можно плавно изменять энергию ионов, падающих на подложку. Для того, чтобы источники питания в цепи мишень-сетка и сетка-подложка были независимыми, сетку необходимо заземлить.

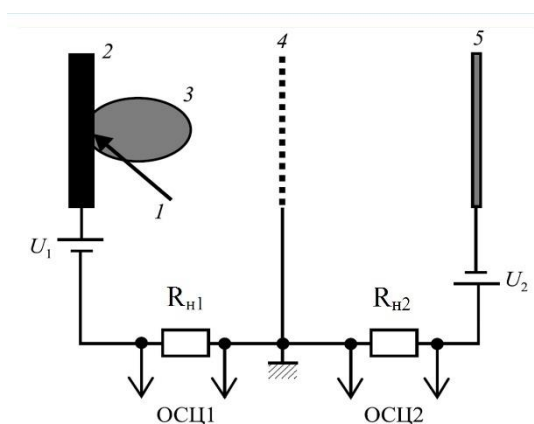


Рис. 1. Электрическая схема эксперимента:

1 – лазерное излучение; 2 – мишень; 3 – эрозионный плазменный факел; 4 – сетка; 5 – подложка; ОСЦ1 и ОСЦ2 — сигналы, снимаемые осциллографом с нагрузок $R_{н1}$ и $R_{н2}$; U_1 – потенциал между сеткой и мишенью; U_2 – потенциал между сеткой и подложкой

Экспериментальное оборудование.

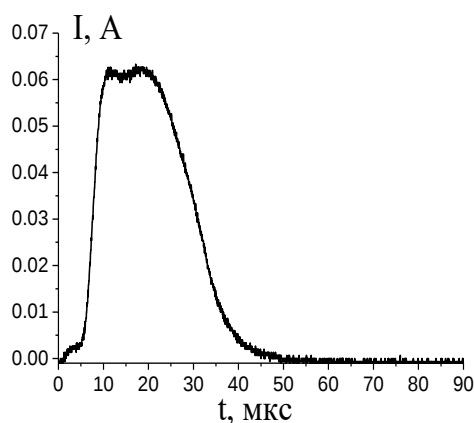
Воздействие на мишень производилось излучением лазера YAG: Nd³⁺ LS-2137 фирмы Lotis – ТП (Беларусь) с длиной волны $\lambda = 1064$ нм, длительностью импульса по полувысоте ~ 20 нс и частотой следования лазерных импульсов 5 Гц. Энергия в отдельном импульсе составляла $0,1 \div 0,5$ Дж. Эксперименты проводились в вакууме при давлении остаточных газов 10^{-3} Па. Измерения временных характеристик производились с помощью осциллографа Tektronix TDS 2022В. Плотность мощности воздействующего лазерного излучения на мишень составляла $\sim 1,5 \cdot 10^9$ Вт/см².

Результаты эксперимента и их обсуждение

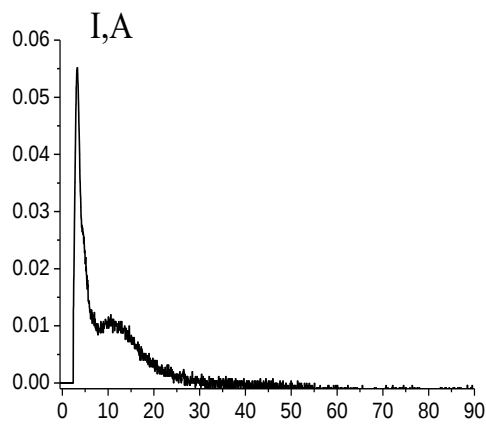
При плотности мощности лазерного излучения, воздействующего на оловянную мишень $\sim 1,5 \cdot 10^9$ Вт/см² эрозионный лазерный факел имеет достаточно высокие параметры (температуру, давление, ионизацию). С целью надежного

разделения электронных и ионных потоков в этом случае потенциал в промежутке сетка-подложка был увеличен до 30 В.

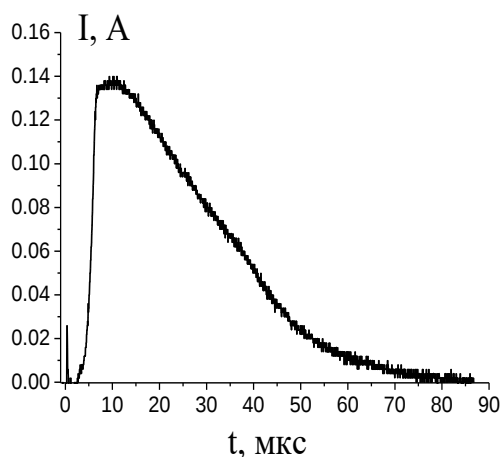
На рис. 2, *а* представлена кривая общего электронного и ионного тока в промежутке мишень - сетка. На переднем фронте кривая формируется за счет обратного тока электронов в сторону мишени, а затем появляется поток ионов в направлении сетки.



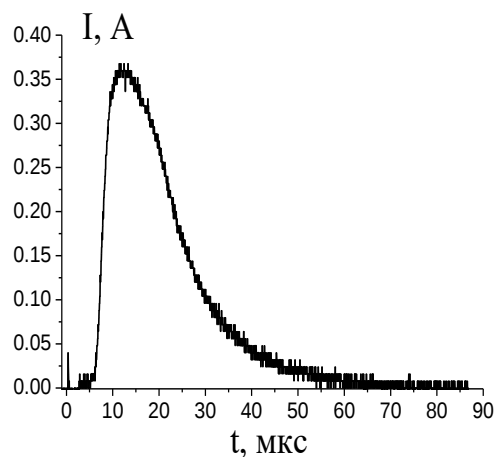
а



б



в



г

Рис. 2. Изменение тока во времени при воздействии на оловянную мишень лазерного излучения с плотностью мощности $1,5 \cdot 10^9$ Вт/см² при различных потенциалах между сеткой и подложкой:

а – на сетке; *б* – на подложке при 0 В; *в* – на подложке при 30 В; *г* – на подложке при 75 В.
Потенциал мишень-сетка 30 В

При нулевом потенциале кривая ионного тока в промежутке сетка-подложка представлена на рис. 2, *б*. Первоначально наблюдается большой рост ионного тока на подложку, но через несколько микросекунд он резко уменьшается. Это объясняется тем, что без внешнего потенциала в промежутке сетка-подложка на поверхности подложки скапливается слой ионов, и их заряд начинает отражать

последующий поток ионов и ионный ток в промежутке сетка -подложка резко уменьшается, а затем медленно уменьшается до нуля. Небольшой провал в центре импульса ионного тока объясняется соотношением заряда общего ионного потока и заряда на поверхности подложки. Такой эффект существенно снижает КПД процесса нанесения. При подаче на подложку электрического потенциала 30 В, отрицательного по отношению к сетке, накопление ионов на поверхности не происходит. Он компенсируется внешним источником питания. Поэтому форма импульса ионного тока на подложку представляет собой ассиметричный колокол, так же, как и интенсивность свечения эрозионного факела (см. рис. 2, в). Это приводит к существенному увеличению КПД нанесения нанопокрывтия. При увеличении потенциала в промежутке сетка-подложка до 50 В импульс ионного тока увеличивается по амплитуде и сокращается его длительность. Сокращение длительности импульса ионного тока на подложку объясняется тем, что при увеличении потенциала на подложке увеличивается скорость ионов и происходит подфокусировка ионного потока [2]. При дальнейшем увеличении потенциала в промежутке сетка подложка происходит только увеличение ионного тока и увеличивается скорость формирования наноструктур с помощью лазерно-плазменного источника ионов.

Заключение

Таким образом, в лазерно-плазменном источнике ионов для формирования наноструктур существуют пределы для потенциала в промежутке сетка-подложка, ускоряющего ионы, для осуществления надежного управления ионным потоком на подложку. Для оловянной мишени при плотности мощности воздействующего на нее лазерного излучения $\sim 1,5 \cdot 10^9$ Вт/см² целесообразно использовать ускоряющие электрические потенциалы от 30 В и выше.

Библиографические ссылки

1. Устройство управления параметрами эрозионного лазерного факела в вакууме для осаждения наноструктурированных покрытий на различные материалы: пат. ВУ 12575 / В. К. Гончаров, М. В. Пузырев, В. Ю. Ступакевич. –Опубл. 30.04.2021.
2. Лазерно-плазменный источник ионов с регулируемой энергией для нанесения наноплёнок // В. К. Гончаров [и др.] // Электроника инфо. 2016. № 11. С. 55–57.