

## МЕТОД КОНТРОЛЯ ТОКА ПЕРВИЧНЫХ И ВТОРИЧНЫХ ИОНОВ В ЛАЗЕРНОПЛАЗМЕННОМ ИСТОЧНИКЕ НАНЕСЕНИЯ НАНОПЛОНОК

В.К. Гончаров, А.А. Пехота, М.В. Пузырев

Белорусский государственный университет, Институт прикладных физических проблем имени  
Севченко, ул. Курчатова 7, 220045 Минск, Беларусь, [puzyrev.bsu.by](mailto:puzyrev.bsu.by)

В лазерноплазменном источнике экспериментально получены ионные потоки, в которых регулируются как энергия ионов, так и плотность ионного потока. Рассмотрены режимы травления и нанесения покрытий на подложку ионными потоками. Предложен метод контроля параметров первичного ионного потока, падающего на подложку, и параметров вторичного ионного потока с подложки.

**Ключевые слова:** лазерная плазма; ионные пучки; эмиссия ионов.

## CONTROL METHOD OF THE PRIMARY AND SECONDARY IONS CURRENT FROM THE SUBSTRATE IN THE LASER PLASMA SOURCE OF A DEPOSITION NANOFILMS

V.K. Goncharov, A.A. Pehota, M.V. Puzyrev

Sevchenko Institute of Applied Physics Problems, Belarussian State University,  
7 Kurchatov Str., 220045 Minsk, Belarus, [puzyrev@bsu.by](mailto:puzyrev@bsu.by)

Ion fluxes experimentally are obtained in a laser-plasma source. The ion energy and the ion density are controlled in this flux. The regime of etching and deposition on the substrate by fluxes streams are considered. A method is proposed for controlling the parameters of the primary ion flux, which is fed to the substrate, and the parameters of the secondary ion flux from the substrate.

**Keywords:** laser plasma; ion beams; ion emission.

### Введение

Одним из методов нанесения нанопленок на различные материалы (подложки) является лазерно-плазменный. Он имеет несколько преимуществ перед другими методами. Это возможность получать плазму практически из любого вещества, стерильность, то есть при нанесении пленок в вакууме лазерное излучение не вносит дополнительных примесей в осаждаемое покрытие. Кроме того, лазерно-плазменный метод позволяет относительно легко автоматизировать процесс нанесения пленок.

### Экспериментальное оборудование

Для воздействия на мишень был использован 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 была изготовлена из технически чистого серебра и 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 поверхности мишени, что может сказаться на пространственной форме эрозионного факела. Контроль временных характеристик проводился с помощью осциллографа Tektronix TDS 2022B.

### Результаты и их обсуждение

Лазерно-плазменный источник представляет собой лазерную мишень и подложку, между которыми располагалась сетка. При подаче отрицательного напряжения на сетку по отношению к мишени из лазерной плазмы после сетки формирует-

ся поток ионов. Энергия ионов регулируется положительным потенциалом на подложке по отношению к сетке. Сетка была заземлена (рис. 1).

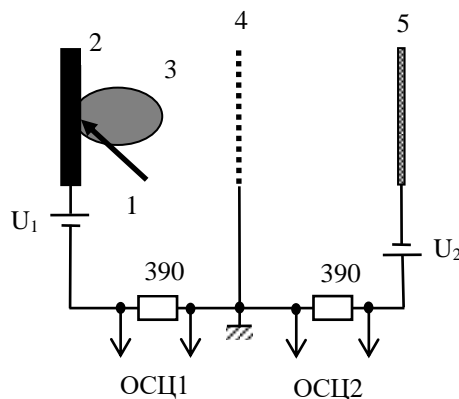


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – лазерное излучение; 2 – мишень; 3 – эрозионный факел; 4 – сетка; 5 – подложка

Fig. 1. The scheme of the experiment: 1 – laser radiation; 2 – target; 3 – erosion flump; 4 – grid; 5 – substrate

Для различных энергий лазерного излучения были экспериментально получены импульсы тока ионов на подложку (рис. 2). Из этих кривых можно получить скорость ионов, приходящих на подложку в различные времена и тем самым найти распределение ионов по скоростям во времени.

Учитывая, что  $I = q_0 N v$ , где  $I$  – ток ионов на подложку;  $q_0$  – заряд электрона;  $N$  – число ионов;  $v$  – скорость ионов, из соотношения  $N = I/q_0 v$  можно получить распределение количества ионов во времени.

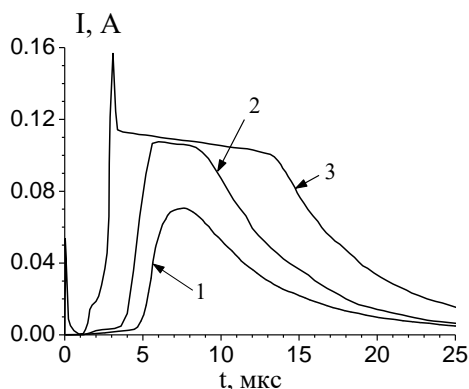


Рис. 2. Общий ток в цепи сетка-подложка: при потенциалах сетка-мишень 20 В и сетка-подложка 50 В при различных плотностях мощности воздействующего лазерного излучения: 1 –  $8.9 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>; 2 –  $1.0 \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>; 3 –  $1.8 \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>

Fig. 2. Total current in the grid-substrate circuit: at potentials the target grid of 20 V and the grid-substrate of 50 V at various intensity of the laser radiation: 1 –  $8.9 \cdot 10^8$  W/cm<sup>2</sup>; 2 –  $1.0 \cdot 10^9$  W/cm<sup>2</sup>; 3 –  $1.8 \cdot 10^9$  W/cm<sup>2</sup>

На рисунке 3 представлены такие кривые, полученные на основе результатов рисунка 2(1).

При минимальных токах и энергиях ионов в наших экспериментах можно теоретически вычислить число вторичных ионов, выбитых из подложки в режиме первичного выбивания [1]. В этом случае:

$$Y \approx \frac{3}{4\pi^2} \alpha \frac{\gamma E}{U_0}$$

где  $Y$  – коэффициент распыления, определяемый как отношение числа вторичных ионов к первичным ( $N_{вт}/N_0$ );

$\alpha$  – коэффициент, зависящий от соотношения  $M_2/M_1$ ,

$E$  – энергия падающего иона ( $M_1$ );

$U_0$  – поверхностный потенциальный барьер;

$$\gamma = \frac{4M_1M_2}{(M_1 + M_2)^2}.$$

Таким образом:

$$Y \approx \frac{3}{4\pi^2} \alpha \frac{4M_1M_2}{(M_1 + M_2)^2} \frac{E}{U_0}$$

где  $\alpha$  были взяты из [2], а для кремния  $U_0 = 7.8$  эВ взяты из [3].

Учитывая, что  $Y = \frac{N_{вт}}{N_0}$  и определенное из эксперимента  $N_0$  (рис. 2 (кривая 2)) было получено распределение числа вторичных ионов во времени при воздействии ионного потока серебра на кремниевую подложку КДБ 0.3 в условиях рисунка 2 (кривая 1).

Кроме теоретического предлагается другой метод контроля потока вторичных ионов. Кривая тока первичных ионов отображалась по форме рис. 2 с помощью функции:

$$y = y_0 + A \cdot \left( 1 - e^{-\frac{x-x_0}{t_1}} \right)^p e^{-\frac{x-x_0}{t_2}}$$

под названием Пульс (Pulse) из библиотеки исходных базовых функций (Origin Basic Functions) программы OriginPro 8.5, где  $y_0$  – смещение графика по оси Y,  $x_0$  – центр (смещение по оси X),  $A$  – амплитуда,  $p$  – интенсивность,  $t_1$  и  $t_2$  – коэффициенты ширины переднего и заднего фронта функции.

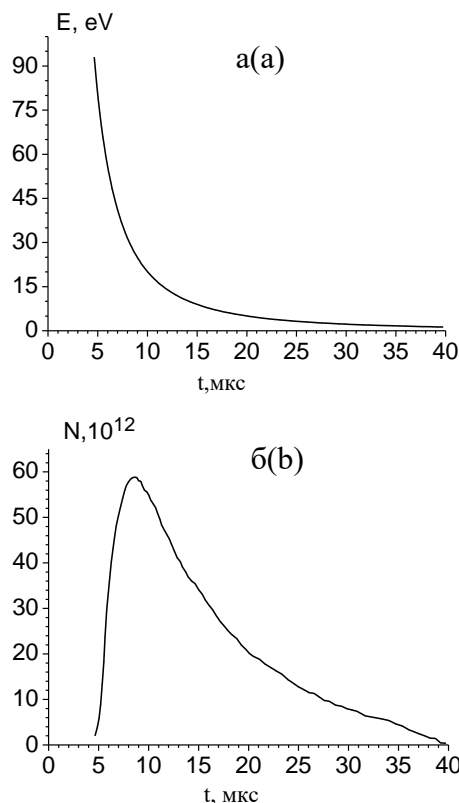


Рис. 3. Распределение энергии (а) и концентрации (б) ионов, падающих на подложку

Fig. 3. Energy distribution (a) and concentration (b) of ions incident on the substrate

На рис. 4 представлены результаты эксперимента и теоретических расчетов, которые подтверждают справедливость предложенного нами полуэмпирического метода контроля первичного и вторичного ионных потоков при плотности мощности воздействующего на мишень лазерного излучения  $10^9$  Вт/см<sup>2</sup> (рис. 4, а). На этом рисунке представлены кривые распределений падающих на мишень ионов во времени при потенциалах сетка-мишень 20 В, сетка-подложка 50 В, плотности мощности  $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>: 1 – определенное из эксперимента; 2 – определенное с учетом вторичной эмиссии по теории первичного выбивания; 3 – определенное с учетом вторичной эмиссии по нашей методике. А при увеличении плотности до  $1.8 \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup> происходит рост ионизации в эрозионном лазерном факеле, увеличение кинетической энергии ионов, падающих на подложку и увеличение плотности ионного потока (рис. 4, б), на котором представлены токи подложки при потенциалах сетка-мишень 20 В, сетка-подложка 50 В, плотности мощности лазерного излучения  $1.8 \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>: 1 – ток ионов, зарегистрированный в эксперименте; 2 – ток ионов, па-

дающих на мишень с учетом поправки по нашему методу; 3 – ток ионов с поверхности подложки.

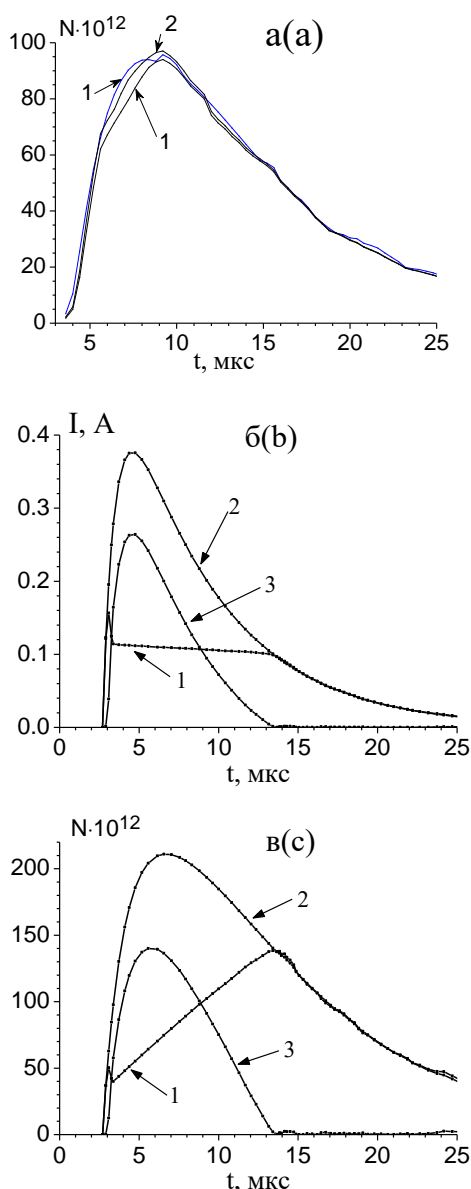


Рис. 4. Токи и распределение частиц у подложки

Fig. 4. The currents and the distribution of particles at the substrate

При этом, как показано на рис. 4, в, восстановление формы распределения ионов во времени и их тока с точки зрения теории первичного выбивания не соответствует реальному распределению и

току ионов, падающих на поверхность мишени, так как в реальности временная форма плазменного факела представляет собой несимметричный колокол. На рисунке 4, в представлены кривые распределения ионов у поверхности подложки при потенциале сетка-мишень 20 В, сетка-подложка 50 В, плотности мощности лазерного излучения  $1.8 \cdot 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>: 1 – экспериментально измерено с учетом вторичной эмиссии по теории первичного выбивания; 2 – распределение ионов, падающих на подложку с учетом поправки вторичной эмиссии по нашему методу; 3 – распределение ионов вторичной эмиссии, определенную по нашему методу. Предложенная нами методика позволяет получить более достоверные результаты по восстановлению формы первичного ионного потока, а также и форму вторичного ионного потока.

### Заключение

В работе изучены режимы лазерно-плазменного источника напыления нанопленок при различных плотностях мощности воздействующего лазерного излучения. Определены режимы без вторичной ионной эмиссии и с эмиссией с подложки вторичных ионов. При этом обратный ток вторичных ионов искажает экспериментально измеряемый ток первичных ионов, падающих на подложку.

Предложен метод восстановления реального ионного потока, падающего на мишень.

Предложен метод контроля потока вторичных ионов, который эффективен даже в условиях больших коэффициентов травления.

### Библиографические ссылки

1. Зигмунд П. Распыление ионной бомбардировкой. Сб. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой, под ред. Р. Бериша. Москва: Мир; 1984. 75 с.
2. Зигмунд П. Распыление ионной бомбардировкой. Сб. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой, под ред. Р. Бериша. Москва: Мир; 1984. 55 с.
3. Комаров Ф.Ф., Комаров А.Ф. Физические процессы при ионной имплантации в твердые тела. Минск: УП «Технопринт»; 2001. 176 с.

### References

1. Zigmund P. Sputtering ion bombardment. Comp. «Sputtering of solids by ion bombardment» edited by R. Berisha. Moscow: Mir; 1984. 75 s. (In Russian).
2. Zigmund P. Sputtering ion bombardment. Comp. «Sputtering of solids by ion bombardment» edited by R. Berisha. Moscow: Mir; 1984. 55 s. (In Russian).
3. Komarov F.F., Komarov A.F. Physical processes during ion implantation in solids. Minsk. UP «Tekhnoprint»; 2001. 176 s. (In Russian).