

добное изменение состава следует из сравнения спектров РОР в режиме каналирования (спектры 1–3 и 4) и в случайном режиме (спектры I и II) в области каналов 270–300. Следует отметить, что по результатам обработки спектров РОР, полученных в случайном режиме, установлено, что заметное изменение состава по сравнению с исходным составом (спектры I и II, область каналов 270–300) характерно только для структуры, которая подвергалась облучению лазерными импульсами с максимальной плотностью энергии.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Импульсное наносекундное лазерное воздействие на монокристаллические слои Si/SiGe/Si<sub>0,85</sub>Ge<sub>0,15</sub> приводит к формированию наноразмерных островков на поверхности слоев Si<sub>0,85</sub>Ge<sub>0,15</sub>. Размер островков по основанию варьируется от 0,3 до 0,5 мкм в зависимости от его формы. Так, минимальный размер (около 0,3 мкм) наблюдается у островков с формой основания близкой к окружности. Можно предположить, что формирование островков происходит вследствие релаксации напряжений в структуре Si<sub>0,85</sub>Ge<sub>0,15</sub> при ее кристаллизации из расплава после лазерной обработки. При этом в области островков величина релаксации напряжений максимальна.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. SiGe Heterojunction Bipolar Transistors / Ed. by P. Ashburn. – New York: John Wiley & Sons, 2005. – 272 p.
2. Silicon-Germanium Heterojunction Bipolar Transistors for mm-Wave Systems: Technology, Modeling and Circuit Applications / Ed. by N. Rinaldi, M. Schröter. – Gistrup: River Publishers, 2018. – 378 p.
3. Subsecond Annealing of Advanced Materials: Annealing by Lasers, Flash Lamps and Swift Heavy Ions / Ed. by W. Skorupa, H. Schmidt. – Berlin: Springer Science & Business Media, 2013. – 321 p.
4. Semiconductor Nanotechnology: Advances in Information and Energy Processing and Storage / Ed. by S. M. Goodnick, A. Korkin, R. Nemanich. – Berlin: Springer, 2018. – 236 p.

### ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НА ПОДЛОЖКЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСКОРЯЮЩИХ ПОТЕНЦИАЛАХ ПРИ ОСАЖДЕНИИ НАНОПОКРЫТИЙ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ

**М. В. Пузырёв, В. К. Гончаров, А. А. Горбацевич**

*Научно-исследовательское учреждение "Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко" Белорусского государственного университета, ул. Курчатова 7, 220108 Минск, Республика Беларусь, e-mail: puzyrev@bsu.by*

Экспериментально изучены процессы, происходящие на поверхности подложки при осаждении нанопокровтий лазерно-плазменным методом при изменении электрического поля ускоряющего ионы. Показано, что сток заряда затруднен с подложки и осаждение нанопокровтий происходит с меньшим КПД при отсутствии электрического поля. Показано, что реализуются три режима взаимодействия ионов с поверхностью при увеличении потенциала электрического поля: травление за счет вторичной эмиссии, создание псевдодиффузионного слоя материала лазерной мишени в приповерхностной зоне и осаждение нанопокровтий.

**Ключевые слова:** лазерная плазма; лазерное излучение; ионные потоки; нанотехнологии.

# PHYSICAL PROCESSES ON A SUBSTRATE AT DIFFERENT ACCELERATING POTENTIALS DURING THE DEPOSITION OF NANOCOATINGS BY THE LASER-PLASMA METHOD

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

*A. N. Sevchenko Institute of Applied Physics Problems, Belarusian State University 7 Kurchatov St., 220045, Minsk, Belarus*

*Corresponding author: M. V. Puzyrev (puzyrev@bsu.by)*

The processes occurring on the surface of the substrate during the deposition of nanocoatings by the laser-plasma method with a change of the electric field accelerating ions are experimentally studied. It is shown that the charge drain is difficult from the surface from substrate and the deposition of nanocoatings occurs with a lower efficiency in the absence of an electric field. It is shown that three regimes of ions interaction with the surface are realized with an increase of the electric field potential: etching due to secondary emission, the creation of a pseudo-diffusial layer of the laser target material in the near-surface zone, and the deposition of nanocoatings.

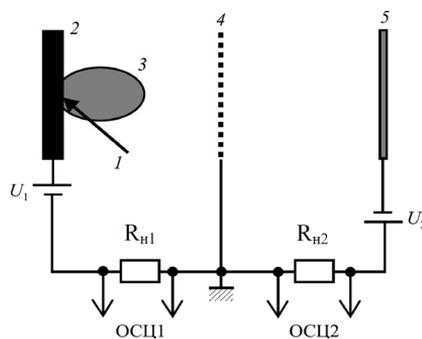
**Key words:** laser plasma; laser radiation; ion beams; nanotechnology.

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее перспективных методов нанесения нанопокрывтий является лазерно-плазменный. Он позволяет получать нанопокрывтия из практически любого материала, находящегося в любом агрегатном состоянии. Если осаждение осуществляется в вакууме, то это происходит в стерильных условиях.

Данный процесс достаточно прост. При воздействии лазерного излучения на материал мишени получается плазма, которая состоит из компонентов материала мишени. Эта плазма вследствие газокинетического давления движется в сторону подложки и формирует на ней нанопокрывтие [1, 2].

Регулировать режимы осаждения за счет изменения энергии лазерного импульса, а также фокусировки лазерного излучения довольно сложно. Для устранения этого в [3] было предложено между лазерной мишенью и подложкой установить сетку. Подавая на сетку по отношению к мишени отрицательный потенциал, можно получить после сетки поток заряженных частиц преимущественно состоящих из ионов. Подавая на сетку положительный потенциал по отношению к подложке можно плавно управлять энергией ионов, попа-



**Рисунок 1.** Схема управления электронными и ионными составляющими эрозивной лазерной плазмы: 1 – лазерное излучение; 2 – мишень 3 – эрозивный плазменный факел; 4 – сетка; 5 – подложка, ОСЦ1 и ОСЦ2 – сигналы, снимаемый осциллографом с нагрузок  $R_{n1}$  и  $R_{n2}$   $U_1$  – потенциал между сеткой и мишенью,  $U_2$  – потенциал между сеткой и подложкой

дающих на поверхность подложки. Электрическая схема такого источника представлена на рисунке 1.

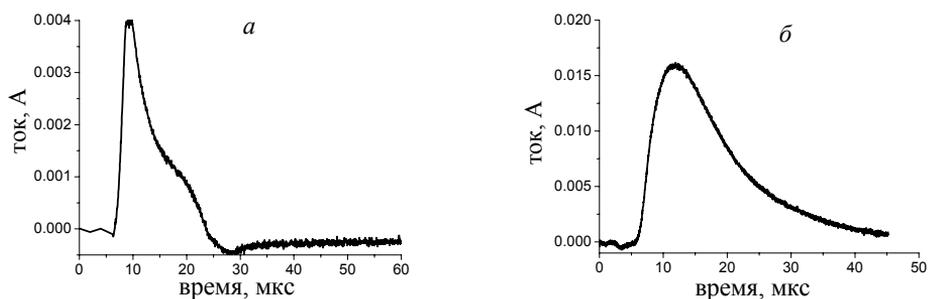
### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Для воздействия на мишень был использован импульсный YAG: Nd<sup>3+</sup> лазер LS-2137 фирмы Lotis – ТП (Беларусь-Япония) с длиной волны  $\lambda = 1064$  нм и длительностью импульса  $\tau \sim 20$  нс. Частота следования лазерных импульсов  $1 \div 10$  Гц, энергия в отдельном импульсе  $0,1 \div 0,5$  Дж.

Эксперименты проводились в вакууме при давлении остаточных газов  $10^{-3} \div 10^{-4}$  Па. Измерение временных параметров производились с помощью осциллографа Tektronix TDS 2022В (США). Мишень была изготовлена из технически чистого алюминия марки А7. В качестве подложки использовалась технически чистая медь. В промежутке мишень – сетка подавался потенциал  $U_1 = 30$  В ("+" на мишени, "-" на сетке). Для управления ионным потоком между сеткой и подложкой подавались различные потенциалы  $U_2$  ("+" на сетке, "-" на подложке).

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим процессы, происходящие на подложке, когда в промежутке сетка-подложка отсутствует электрическое поле. Кривая тока при плотности мощности воздействующего лазерного излучения  $3,6 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> представлена на рисунке 2, а. Следует заметить, что начало отсчета времени на всех графиках совпадает с началом лазерного воздействия. Как видно из этого рисунка через некоторое время после начала лазерного воздействия на подложке появляется ионный поток с некоторой задержкой. Первоначально он быстро нарастает. Через  $\sim 10$  мкс ионный ток в цепи сетка-подложка достигает максимума. За это время на поверхности подложки формируется положительный заряд, который замедляет скорость подлетающих ионов, и в результате ионный ток на подложку уменьшается, а через  $\sim 25$  мкс совсем прекращается. В дальнейшем ( $\sim 25-30$  мкс) наблюдается отражение падающих на поверхность ионов за счет заряда, сформированного предыдущими ионами. Это происходит из-за того, что в промежутке сетка-подложка отсутствует электрическое поле, и свободные электроны материала подложки недостаточно быстро компенсируют заряд ионного потока.

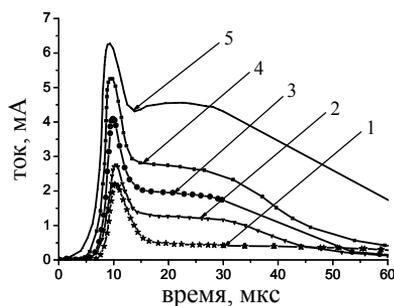


**Рисунок 2. Ионный поток на подложку от времени при различных потенциалах в промежутке сетка-подложка: а –  $U_2 = 0$ ; б –  $U_2 = 25$ В; плотность мощности лазерного излучения  $3,6 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>**

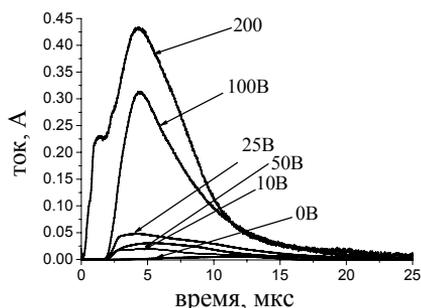
Достаточно подать на подложку по отношению к сетке отрицательный потенциал электроны подложки компенсируют заряд ионов. Кривая тока в промежутке сетка-подложка представляет собой несимметричный колокол по форме близкий к кривой свечения плазмы в зоне лазерного воздействия. При этом общий ток в промежутке сетка-подложка резко возрастает (рисунок 2, б). Общая картина при плавном изменении потенциала в промежутке сетка-подложка представлена на рисунке 3. При дальнейшем увеличении потенциала в промежутке сетка-подложка (рисунок 4) происходит дополнительное увеличение скорости ионов и ионного тока. Однако при достижении в промежутке сетка-подложка потенциала  $\sim 50$  В происходит замедление роста общего ионного тока и даже его уменьшение. Оценки кинетической энергии ионов в этом случае показывают, что этой энергии достаточно для появления вторичной эмиссии ионов с поверхности подложки. Коэффициент вторичной эмиссии оценивался по формуле, предложенной Зигмундом в [4]. Отношение числа вторичных ионов к падающим при отсутствии потенциала на подложке не превышает 3% (рисунок 2), а оценка при потенциале 50 В (рисунок 4) дает значение  $\sim 70\%$ . Таким образом, уменьшение общего ионного тока в цепи сетка-подложка происходит за счет вторичных ионов, движущихся в противоположную сторону. При увеличении потенциала в промежутке сетка-подложка до 100 В и более (рисунок 4) снова резко увеличивается общий ионный ток.

Это можно объяснить тем, что при увеличении скорости ионов за счет газокинетического давления и электрического поля приводит к уменьшению сечения столкновения падающих ионов с узлами кристаллической решетки материала подложки.

Такое физическое явление можно использовать для создания псевдодиффузного слоя материала лазерной мишени в приповерхностной области материала подложки. Это позволит получить более высокую адгезию нанопокрытия к материалу подложки.



**Рисунок 3.** Зависимость тока подложки от времени при различных положительных потенциалах сетки по отношению к подложке: 1 – 1,5 В, 2 – 2 В, 3 – 5 В, 4 – 10 В, 5 – 20 В. Плотность мощности воздействующего лазерного излучения  $2,86 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>



**Рисунок 4** Зависимость тока подложки от времени при различных положительных потенциалах сетки по отношению к подложке. Плотность мощности воздействующего лазерного излучения  $3,6 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что без внешнего электрического поля в промежутке сетка-подложка на поверхности подложки формируется заряд ионов, тормозящих дальнейшее поступление ионного потока. Такой режим

нанесения нанопокровтий малоэффективен. При подаче на сетку положительного потенциала относительно подложки этот эффект пропадает.

При различных потенциалах в промежутке сетка–подложка можно реализовать три режима получения нанопокровтий. Вторичная эмиссия позволяет очистить поверхность подложки, имплантация позволяет создать в приповерхностной области псевдодиффузионный слой материала лазерной мишени в материале подложки и, наконец, произвести напыление материала мишени на поверхность подложки. Это все можно сделать последовательно не разгерметизируя вакуумную камеру. В результате можно получить высокоадгезионное нанопокровтие в стерильных условиях.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Ievlev V.M. Absorption spectra of thin TiO<sub>2</sub> films synthesized by reactive high-frequency magnetron sputtering of titanium / V.M. Ievlev // Physics and technology of semiconductors. – 2014. – Vol. 48, №. 7. – P. 875–884.
2. Российский рынок диоксида титана: реалии и перспективы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vestkhimprom.ru/posts/rossijskij-rynok-dioksida-titana-realii-i-perspektivy>. – Дата доступа: 18.08.2020.
3. Ola O. Review of material design and reactor engineering on TiO<sub>2</sub> photocatalysis for CO<sub>2</sub> reduction / O. Ola, M.M. Maroto-Valer // Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews. – 2014. – Vol. 24. – P. 16–42.
4. Siefke T. Materials pushing the application limits of wire grid polarizers further into the deep ultraviolet spectral / T. Siefke [et al.] // Advanced Optical Materials. – 2016.

### ДВУМЕРНАЯ ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА НА ОСНОВЕ БИНАРНОЙ ОРИЕНТАЦИИ НЕМАТИЧЕСКОГО ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА

И. И. Рушнова, О. С. Кабанова, А. Л. Толстик

*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь,*

*e-mail: Rushnova@bsu.by*

*e-mail: Kabanova@bsu.by*

*e-mail: Tolstik@bsu.by*

Разработана и изготовлена двумерная фазовая дифракционная решетка на основе пространственно упорядоченного массива микроразмерных жидкокристаллических доменов с чередующейся планарной и закрученной (твист) ориентациями директора. Для формирования в тонкопленочном слое нематического жидкого кристалла доменов с бинарной ориентацией использовалась технология текстурированной фотоориентации азокрасителя AtA-2. Экспериментально продемонстрирована возможность применения двумерной жидкокристаллической структуры для пространственно-поляризационного управления световыми пучками.

**Ключевые слова:** нематический жидкий кристалл; фотоориентация; двумерная дифракционная решетка; азокраситель.