

12. I.A. Campbel, A.Fert. Transport Properties of Ferromagnets» in Ferromagnetic Materials. Amsterdam, New York, Oxford.– 1982.–P.747–805.
13. Lippman, H. J. Der geometrieinflus auf den transversalen magnetischen widerstandseffekt bei rechteckformigen halbleiterplatten / H. J. Lippman, F. Kurt // Zs. Naturforsch.–1958.– Vol.13a.– № 6.– P.462–474.
14. Bergman, G. Weak Localization in thin films / G. Bergman // Phys. Rev. B.–1984. –Vol.107.–№1.– P.1–58.
15. Electron-magnon scattering and magnetic resistivity in 3d ferromagnets / B.Raquet [et al.] // Physical Review B.– 2002.– Vol.66.– №2.–P.024433.
16. Birss, R. R. The saturation magnetostriction of polycrystals / R.R. Birss // Pros. Roy. Sos.–1960.– Vol.75.–P.8–16.
17. Магнитная микроструктура и магниторезистивный эффект в диске корбино с магнитным упорядочением / В. И. Головчук, М.Г. Лукашевич // Журн. Белорус.гос. ун-та. Физика.– 2018.– № 2.–С.47–56.
18. Русанов, А.Ю. Изменение знака магниторезистивного эффекта в бислойных структурах сверхпроводник/ферромагнетик при смене типа доменной структуры в ферромагнетике / А. Ю. Русанов, Т. Е. Голикова, С. В. Егоров // Письма в ЖЭТФ.– 2008.–Т.87.– №3.–С. 204.
19. Казаков, В.Г. Тонкие магнитные пленки / В.Г. Казаков // Соросовский образовательный журнал.–1997.– №1.–С.107–114.

ФОРМИРОВАНИЕ ПОТОКА ИОНОВ НА ПОДЛОЖКУ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ НАНОПОКРЫТИЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ИНТЕНСИВНОСТЯХ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И УСКОРЯЮЩИХ ПОТЕНЦИАЛАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

**В. К. Гончаров, А. А. Горбачевич, Е. И. Козлова, Л. С. Лобановский,
Д. П. Прокопеня, М. В. Пузырёв, Н. И. Шульган**

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 получены ионные потоки в лазерно-плазменном источнике для осаждения нанопокровов на различных подложках. Показано, что поток ионов зависит от интенсивности воздействующего лазерного излучения и приложенного электрического поля. Экспериментально показано, что влияние вторичного фотоэффекта от лазерного излучения и эрозионного факела незначительно.

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

THE FORMATION OF THE ION FLUX TO THE SUBSTRATE FOR APPLICATION OF NANO-COATING AT DIFFERENT INTENSITIES OF LASER RADIATION AND THE ACCELERATION POTENTIALS OF THE ELECTRIC FIELD

**V. K. Goncharov, A. A. Harbatsevich, E. I. Kozlova, L. S. Lobanovsky,
D. P. Prakapenia, M. V. Puzyrev, N. I. Shulhan**

*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)*

Ion fluxes have been experimentally obtained from laser-plasma source for deposition of nanofilms on various substrates. It has been shown that the ion flux depends on the intensity of the laser radiation and the applied electric field. It has been experimentally shown that the effect of the secondary photoeffect from laser radiation and an erosion plume is insignificant.

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

ВВЕДЕНИЕ

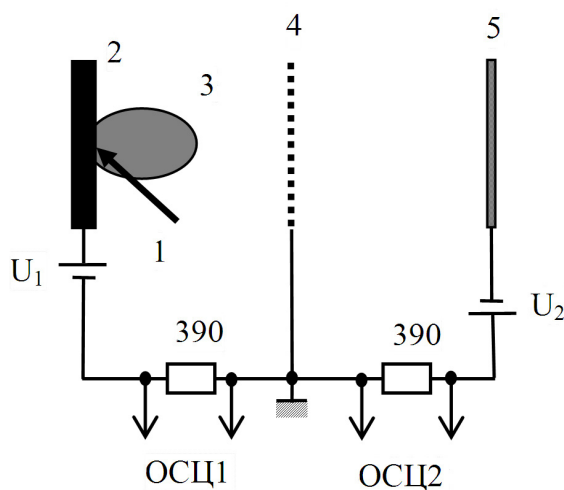


Рисунок 1. – Электрическая схема эксперимента:

1 – лазерное излучение; 2 – лазерная мишень;
3 – эрозионный плазменный факел; 4 – сетка;
5 – подложка; ОСЦ 1, ОСЦ 2 – сигналы, снимаемые на первый и второй канал осциллографа с сопротивлений нагрузки 390 Ом;

U_1 и U_2 – независимые источники питания

Метод лазерно-плазменного нанесения нанопокровов обладает рядом преимуществ по сравнению с другими. Это, прежде всего возможность получения плазмы из любого вещества в любом агрегатном состоянии и стерильность.

Однако при этом есть у этого метода недостатки. Это достаточно сложные устройства плавной регулировки параметров при автоматизации режимов нанесения наноплёнок.

С целью устранения этого в [1] было предложено получать из лазерной плазмы поток ионов и плавно регулировать энергию ионов и плотность ионного потока с помощью плавного изменения потенциала электрического поля. Электрическая схема таких экспериментов представлена на рис. 1.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Воздействие на мишень производилось излучением лазера YAG: Nd³⁺ LS-2137 фирмы Lotis – ТП. Измерения производились с помощью осциллографа Tektronix TDS 2022B. Воздействие излучения лазера производилось при различных плотностях мощности. При этом на промежутке мишень – сетка и сетка – подложка подавались различные потенциалы U_1 и U_2 . Так как в этих экспериментах присутствуют два источника питания, то немаловажно в какой точке производить заземление. Предварительно были проведены эксперименты с заземлением лазерной мишени и подложки. Оказалось, что в этих случаях источники питания через внутреннее сопротивление участков мишень – сетка и сетка – подложка влияют друг на друга. И только схема (см. рис. 1) с заземленной сеткой позволяет источникам питания U_1 и U_2 быть независимыми при любых режимах экспериментов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как показали эксперименты [1 - 3], при подаче отрицательного потенциала ~ 5 В на сетку по отношению к мишени после сетки формируется поток заряженных частиц, состоящий преимущественно из ионов. Управление энергией ионного потока легко осуществляется подачей на сетку по отношению к подложке положительного потенциала. В режиме лазерно-плазменного источника ионов с заземленной сеткой процессы, происходящие в промежутке сетка – подложка не влияют на процессы в промежутке мишень – сетка.

На рис. 2а изображен общий вид кривой тока в цепи сетка – подложка в режиме травления подложки потоком первичных ионов. Как видно из этого рисунка, на передней части импульса наблюдается несколько пиков, затем при появлении вторичной эмиссии за счет противоположного потока вторичных ионов наблюдается достаточно плоская вершина, а когда вторичная эмиссия пропадает импульс ионного тока в цепи сетка – подложка по экспоненте падает до нуля, следуя по временной форме за временной формой плазменного факела в промежутке мишень – сетка. На рис. 2б, в, г с высоким временным разрешением представлены передние фронты импульса тока в промежутке сетка – подложка при различных условиях.

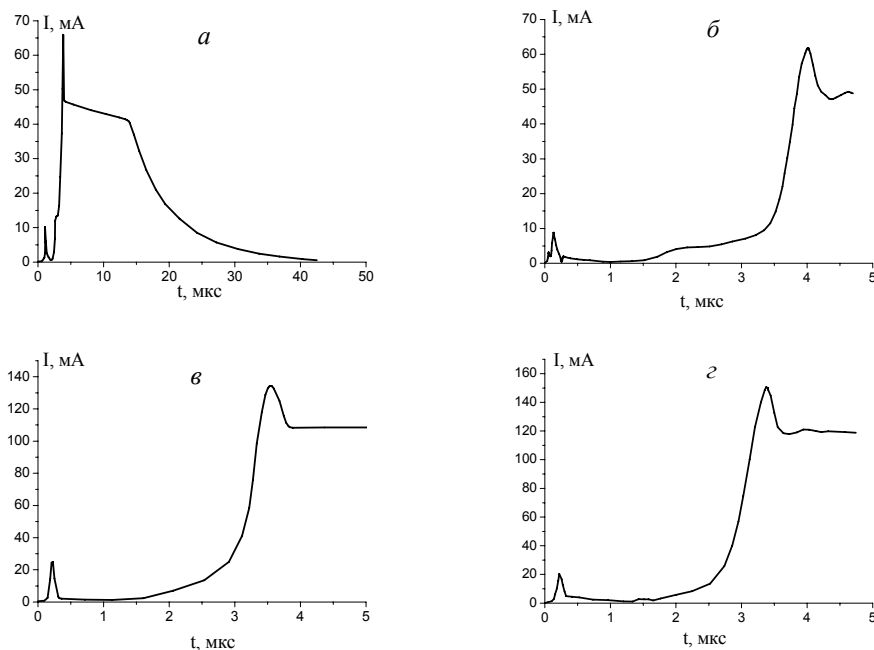


Рисунок 2. – Общий импульс тока и его передний фронт в цепи сетка - подложка в режиме вторичной ионной эмиссии при воздействии лазерного излучения на медную мишень при различных условиях эксперимента: *а, б* – плотность мощности лазерного излучения $5 \times 10^8 \text{ Вт/см}^2$, $U_2 = 30 \text{ В}$; *в* – плотность мощности лазерного излучения $5 \times 10^8 \text{ Вт/см}^2$, $U_2 = 50 \text{ В}$; *г* – плотность мощности лазерного излучения 10^9 Вт/см^2 , $U_2 = 50 \text{ В}$

Первый пик тока в промежутке сетка – подложка (см. рис. 2, б) обусловлен обратным током электронов с подложки за счет фотоэффекта при облучении поверхно-

сти подложки отраженной от лазерной мишени части воздействующего лазерного излучения. Через полторы микросекунды появляется второй пик в цепи сетка – подложка. Исходя из скоростей плазменного факела (~ 10 км/с) это можно объяснить появлением на сетке за счет воздействия на её материал лазерного излучения, отраженного от мишени, и излучения плазмы вблизи поверхности мишени вторичной плазмы из материала сетки. Однако, эти процессы незначительно влияют на основной ток в цепи сетка – подложка.

Через $\sim 3,8$ мкс появляется основной пик тока в промежутке сетка – подложка. Его длительность составляет ~ 250 нс по полувысоте и после чего наблюдается ограничение импульса за счет вторичной эмиссии (рис. 2, б).

При увеличении потенциала на промежутке сетка – подложка (см. рис. 4, в) этот максимум пика появляется раньше (3,5 мкс), что говорит об увеличении скорости потока заряженных частиц за счет ускорения электрическим полем. При увеличении плотности мощности воздействующего на мишень лазерного излучения скорость процессов в промежутке сетка – подложка растет и максимум пика появляется раньше (см. рис. 2, г) через 3,2 мкс.

Учитывая результаты экспериментов, представленных на рис. 2, в которых перед появлением ограничения импульс тока в промежутке сетка – подложка появляется короткий положительный импульс тока на подложку, можно объяснить следующим образом. В самом начале процесса поступления заряженных частиц на подложку поступают наиболее быстрые ионы и их энергии хватает для имплантации в материал подложки. С течением времени на подложку поступают всё более медленные ионы и наступает момент, когда механизм имплантации меняется на механизм травления, то есть вторичной эмиссии ионов. Однако при имплантации в приповерхностном слое подложки формируется (накапливается) положительный заряд за счет первичных ионов. Для компенсации этого заряда в цепи сетка – подложка за счет U_2 появляется обратный ток электронов, который должен иметь на осциллограмме положительный импульс. Частично этот импульс электронов компенсирует заряд, созданный внедренными ионами, а дальше появляется вторичная эмиссия, которая вследствие максимального значения вторичного ионного тока в это время является преобладающим процессом и в импульсе тока на подложку появляется ограничение в виде полки различной длительности в зависимости от условий эксперимента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Объяснена форма тока в промежутке сетка – подложка. Показано, что влияние фотоионизации и вторичной плазмы материала сетки незначительно.

Показано, что при травлении ионными потоками поверхности подложки появление короткого пика тока перед началом вторичной ионной эмиссии практически не сказывается на перенос массы материала мишени и подложки, так как он формируется за счет обратного тока электронов, компенсирующего положительный заряд ионов, имплантированных в поверхность подложки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Физические процессы в лазерном источнике ионов алюминия с управляемой энергией для нанесения нанопленок / Гончаров В.К., Пузырев М.В., Ступакевич В.Ю // Журнал Белорус. гос. ун-та. Физика. – 2017. – №3. – С. 79–87.
2. Лазерно-плазменный источник ионов с регулируемой энергией для нанесения наноплёнок. / В.К. Гончаров [и др.] // Электроника – инфо. 2016. – №11. – С. 54–57.

3. Управление потоками заряженных частиц в эрозионной лазерной плазме графитовой мишени в вакууме / Гончаров В.К., Пузырев М.В., Ступакевич В.Ю // ИФЖ. – т.91, №4, – С. 1–7.

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ИНДИЯ В ОКИСЛЕННЫЙ ПОРИСТЫЙ КРЕМНИЙ

Н. Л. Гревцов, В. П. Бондаренко

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, 220013 Минск, Беларусь,
e-mail: hrautsou@gmail.com*

Индий был осажден в пористый кремний путем электрохимической обработки в водном растворе сульфатов индия и натрия. Установлено, что предварительное окисление пористого кремния перед осаждением металла способно привести к преимущественному формированию металлических частиц индия на стенках пор в связи с преобладающим окислением верхней части пористого слоя. Дополнительное углубление индия в поры достигается при введении после осаждения индия стадии вакуумного отжига, обеспечивающего частичное оплавление осажденных металлических частиц.

Ключевые слова: пористый кремний; индий; окисление; электрохимическое осаждение.

SPECIFICS OF INDIUM ELECTROCHEMICAL DEPOSITION INTO OXIDIZED POROUS SILICON

N. L. Grevtsov, V. P. Bondarenko

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, P. Brovki Str., 6, 220013, Minsk, Belarus
Corresponding author: N. L. Grevtsov (hrautsou@gmail.com)*

Indium was deposited into the porous silicon via electrochemical plating using a water solution containing indium and sodium sulfates. The results would suggest that preemptive oxidation of porous silicon causes the metal to primarily be deposited deep within the pore channels, most likely due to preferential oxidation of the uppermost porous layer areas leading to locally reduced current flow. An additional increase in plating depth can be achieved by annealing the samples in vacuum after indium is deposited, causing the metal particles to partially melt.

Key words: porous silicon; indium; oxidation; electrochemical deposition.

ВВЕДЕНИЕ

Индий может быть осажден на кремниевые подложки различными методами, среди которых широко используется электрохимическое осаждение из водных растворов солей данного металла [1–4] и ионных жидкостей [5]. Интересным с точки зрения заполнения индием пор в кремниевых наноструктурах является его электрохимическое осаждение из растворов с содержанием сульфата индия.