

ISSN - 1561-5405

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

Электроника

Том 21

№ 6

2016

ноябрь - декабрь



Известия высших учебных заведений ЭЛЕКТРОНИКА

Том 21 № 6

2016 ноябрь–декабрь

Учредители:

Министерство
образования и науки
Российской Федерации

Национальный
исследовательский
университет «МИЭТ»

Главный редактор

Чаплыгин Ю.А., академик РАН,
д.т.н., проф.

Зам. главного редактора

Гаврилов С.А., д.т.н., проф.

Редакционная коллегия:

Бархоткин В.А., д.т.н., проф.

Бахтин А.А., канд. т. н., доц.

Быков Д.В., д.т.н., проф.

Горбачевич А.А., чл.-корр. РАН,
д.ф.-м.н., проф.

Грибов Б.Г., чл.-корр. РАН,
д.х.н., проф.

Казённов Г.Г., д.т.н., проф.

Коноплев Б.Г., д.т.н., проф.

Коркишко Ю.Н., д.ф.-м.н., проф.

Королёв М.А., д.т.н., проф.

Красников Г.Я., акад. РАН,
д.т.н., проф.

Кубарев Ю.В., д.ф.-м.н., проф.

Лабунов В.А., акад. НАН Беларуси,
акад. РАН, д.т.н., проф.

Максимов И.А., PhD, проф.
Лундского университета
(Швеция)

Меликян В.Ш., чл.-корр. НАН Армении,
д.т.н., проф.

Неволин В.К., д.ф.-м.н., проф.

Неволин В.Н., д.ф.-м.н., проф.

Петросянц К.О., д.т.н., проф.

Сазонов А.Ю., PhD, проф.
Университета Ватерлоо
(Канада)

Сауров А.Н., акад. РАН, д.т.н., проф.

Селищев С.В., д.ф.-м.н., проф.

Сигов А.С., акад. РАН,
д.ф.-м.н., проф.

Таиров Ю.М., д.т.н., проф.

Телец В.А., д.т.н., проф.

Тимошенков С.П., д.т.н., проф.

Тихонов А.Н., д.т.н., проф.

Усанов Д.А., д.ф.-м.н., проф.

Научно-технический журнал

Издается с 1996 г.

Выходит 6 раз в год

СОДЕРЖАНИЕ

Фундаментальные исследования

Мороча А.К., Рожков А.С. О новых типах волн Стоунли и возможности их использования в интегральной акустоэлектронике 493

Материалы электронной техники

Вигдорovich Е.Н., Ермошин И.Г. Влияние структурно-го совершенства слоев квантовых ям гетероструктур на основе нитрида галлия на их излучательные характеристики 503

Костишко Б.Б., Светухин В.В., Явтушенко И.О. Модификация поверхности никеля фемтосекундными лазерными импульсами 510

Неустроев С.А. Влияние упаковки на воспроизводство сингонии кристалла кубического углерода 515

Технология микро- и нанозлектроники

Солнышкин А.В., Кислова И.Л., Белов А.Н., Сыса А.В., Строганов А.А., Шевяков В.И., Силибин М.В., Михалчан А.А., Лысенко А.А. Электропроводность пленочных композитов на основе поливинилиденфторида с углеродными нанотрубками 520

Лисицын С.А., Коломийцев А.С., Ильин О.И., Ильина М.В., Коноплев Б.Г., Быков Ал.В., Азеев О.А. Исследование режимов ионно-стимулированного осаждения наноразмерных структур платины методом фокусированных ионных пучков 529

Заведующая редакцией
С.Г. Зверева

Редактор
А.В. Тихонова

Научный редактор
С.Г. Зверева

Корректор
И.В. Проскуракова

Верстка
А.Ю. Рыжков
С.Ю. Рыжков

Адрес редакции: 124498,
г. Москва, г. Зеленоград,
пл. Шокина, д. 1, МИЭТ
Тел.: 8-499-734-6205
E-mail: magazine@miec.ru
http://www.miet.ru

Подписано в печать 09.12.2016.
Формат бумаги 60×84 1/8.
Цифровая печать.
Объем 13,48 усл.печ.л.,
12,372 уч.-изд.л.
Заказ 92.

Отпечатано
в типографии ИПК МИЭТ
124498, г. Москва, г. Зеленоград,
пл. Шокина, д. 1, МИЭТ

Свидетельство о регистрации
№ 014134
выдано Комитетом РФ по печати
12.10.95.

Включен в Перечень рецензируе-
мых научных изданий, в которых
должны быть опубликованы основ-
ные научные результаты диссертаций
на соискание ученой степени канди-
дата наук, на соискание ученой степени
доктора наук.

Включен в Российский индекс
научного цитирования и в Рейтинг
Science Index.

Включен в Russian Science Citation
Index на базе Web of Science.

*Кольцов В.Б., Ларионов Н.М., Слесарев С.А.,
Баркинхоева Т.А.* Выделение галлия из многокомпо-
нентной эвтектики при утилизации технологических от-
ходов 537

Северюкова Е.А. Исследование механизмов образова-
ния и переноса поверхностных молекулярных загрязне-
ний 543

Микроэлектронные приборы и системы

Морозова Е.В., Шулежко В.В. Моделирование пере-
ходного тока в неоднородных органических полупро-
водниковых системах 551

Информационные технологии

Матюшкин И.В., Жемерикин А.В., Заплетина М.А.
Клеточно-автоматные алгоритмы сортировки строк и
умножения целых чисел по схеме Агрубина 557

Зо Вин Хтет, Колдаев В.Д. Агломеративные алгорит-
мы выделения инвариантных характеристик изображе-
ний 566

Интегральные радиоэлектронные устройства

Широ Г.Э., Романов С.П. Проектирование COS/SIN-
преобразователей в цифровых вычислительных устрой-
ствах синтеза радиолокационных сигналов 574

Краткие сообщения

Соловьев А.В., Крупкина Т.Ю., Романов А.А. Повы-
шение пробивного напряжения *n*-МОП-транзисторов
для радиационно стойких КНС КМОП БИС 583

Карташёв С.С., Лосев В.В. Моделирование элемента
памяти с учетом дискретного зарядового состояния пла-
вающего затвора МОП-транзистора 586

Жаднов В.В., Иванов И.А., Королев П.С., Полесский С.Н.
Оценка уточненного ресурса оптических кабелей с уче-
том условий эксплуатации 589

От Российской академии наук 593

Юбилеи

Таирову Юрию Михайловичу – 85 лет 594

Асееву Александру Леонидовичу – 70 лет 596

Конференции

2017 IEEE Conference of Russia Young Researchers
in Electrical and Electronic Engineering 3 стр. обложки

Тематический указатель статей, опубликованных в
2016 году 598

К сведению авторов 603

Proceedings of Universities. ELECTRONICS

Volume 21 N 6

2016 November–December

Founders:

The Ministry
of Education and Science
of the Russian Federation

The National
Research University
of Electronic Technology

Editor-in-Chief

Chaplygin Yu.A., Dr. Sci. (Tech.),
Prof., Acad. RAS

Deputy Editor-in-Chief

Gavrilov S.A., Dr. Sci. (Tech.),
Prof.

Editorial Board:

Barkhotkin V.A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Bahtin A.A., Cand. Sci. (Tech.)

Bykov D.V., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Gorbatsevich A.A., Dr. Sci. (Phys.-Math.),
Prof., Cor. Mem. RAS

Gribov B. G., Dr. Sci. (Chem.), Prof.

Kazennov G.G., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Konoplev B.G., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Korkishko Yu.N., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.

Korolev M.A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Krasnikov G.Ya., Dr. Sci. (Tech.), Prof.,
Acad. RAS

Kubarev Yu.V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.

Labunov V.A. (Belorussia),

Dr. Sci. (Tech.), Prof.,

Acad. NAS, Acad. RAS

Maksimov I.A. (Sweden), PhD, Prof.

of Lund University

Melikyan V.Sh. (Armenia), Dr. Sci. (Tech.),

Prof., Cor. Mem. NAS

Nevolin V.K., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.

Nevolin V.N., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.

Petrosyantz K.O., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Sazonov A.Yu. (Canada), PhD,

Prof. of University of Waterloo

Saurov A.N., Dr. Sci. (Tech.), Prof.,

Acad. RAS

Selishchev S.V., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.

Sigov A.S., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.,

Acad. RAS

Tairov Yu.M., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Telets V.A., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Timoshenkov S.P., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Tikhonov A.N., Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Usanov D.A., Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.

The scientific-technical journal

Published since 1996

Published 6 times per year

CONTENTS

Fundamental reseaches

Morocho A.K., Rozhkov A.C. On New Types of Stonely Waves and Opportunity to Apply Them in Integrated Electronics 493

Electronic engineering materials

Vigdorovich E.N., Ermoshin I.G. Impact of Structural Perfection of Layers of Quantum Wells of Heterostructures Based on Gallium Nitride on Their Radiative Characteristics 503

Kostishko B.B., Svetukhin V.V., Yavtushenko I.O. Modification of Nickel Surface Due to Femtosecond Laser Pulses 510

Neoustroev S.A. Influence of Packing on Reproduction of Singonia of c-C Crystal 515

Micro- and nanoelectronics technology

Solnyshkin A.V., Kislova I.L., Belov A.N., Sysa A.V., Stroganov A.A., Shevjakov V.I., Silibin M.V., Mihalchan A.A., Lysenko A.A. Electrical Conductivity of the Composite Films Based on Polyvinylidene Fluoride and Carbon Nanotubes 520

Lisitsyn S.A., Kolomiytsev A.S., Ilin O.I., Ilina M.V., Konoplev B.G., Bykov A.V., Ageev O.A. Research of Modes of Ion Beam Included Deposition of Platinum Nanostructures Using the Method of Focused Ion Beams 529

Head of editorial staff
Zvereva S.G.

Chief editors
Tikhonova A.V.,
Proskuryakova I.V.

Make-up
Ryzhkov S.Yu.
Ryzhkov A.Yu.

Address: 124498, Moscow, Zelenograd,
Bld. 1, Shokin Square, MIET, editorial
office of the Journal «Proceedings
of universities. Electronics»
Tel.: +7-499-734-62-05
E-mail: magazine@micee.ru
http://www.miet.ru

The journal is printed at the printing
workshop of the MIET
124498, Moscow, Zelenograd,
Bld. 1, Shokin Square, MIET

The registration certificate No.014134
was given by RF Press Committee
on 12.10.95.

The journal is included into the List
of reviewed scientific publications,
in which the main scientific results
of thesis for candidate of science and
doctor degrees must be published.

The journal is included into the Rus-
sian index of scientific citing and into the
Rating Science Index.

The journal is included into the Rus-
sian Science Citation Index on the Web
of Science basis.

Koltsov V.B., Larionov N.M., Slesarev S.A.,
Barkinkhoeva T.A. Allocation of Gallium from a Multi-
component Eutectic Disposal Recycle of Technological 537
Sevryukova E.A. Investigation of Mechanisms of Forma-
tion and Transport of Surface Molecular Contamination..... 543

Microelectronic devices and systems

Morozova E.V., Shulezhko V.V. Simulation of Transient
Current in Nonhomogeneous Organic Semiconductor Sys-
tems 551

Information technologies

Matushkin I.V., Zhemerikin A.V., Zapletina M.A. Cellu-
lar Automata Algorithms for String Sorting
and Integer Multiplication by Atrubin's Scheme 557

Zaw Win Htet, Koldaev V.D. Agglomerative Algorithm of
Invariant Characteristics of Images 566

Integrated radioelectronic devices

Shiro G.E., Romanov S.P. Design of COS/SIN Generators
in Digital Computing Devices of Synthesis of Radar
Signals..... 574

Brief reports

Solovev A.V., Krupkina T.U., Romanov A.A. Increasing
Breakdown Voltage of N-MOS Transistors for Radiation-
Resistant CMOS LSI..... 583

Kartashev S.S., Losev V.V. Modeling of Memory Element
with Account of discrete State of MOS Transistors Floating
Gate 586

Zhadnov V.V., Ivanov I.A., Korolev P.S., Polesskiy S.N.
Estimation of specified operating life of fiber cables taking
into account operation conditions 589

Исследование режимов ионно-стимулированного осаждения наноразмерных структур платины методом фокусированных ионных пучков

С.А. Лисицын, А.С. Коломийцев, О.И. Ильин, М.В. Ильина,
Б.Г. Коноплев, Ал.В. Быков, О.А. Агеев

*Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения
Южного федерального университета (г. Таганрог)*

Research of Modes of Ion Beam Included Deposition of Platinum Nanostructures Using the Method of Focused Ion Beams

S.A. Lisitsyn, A.S. Kolomyitsev, O.I. Ilin, M.V. Ilina,
B.G. Konoplev, Al.V. Bykov, O.A. Ageev

*Southern Federal University, Institute of Nanotechnologies,
Electronics and Electronic Equipment Engineering*

Представлены результаты экспериментальных исследований режимов ионно-стимулированного осаждения структур Pt толщиной от $(0,48 \pm 0,1)$ до $(24,38 \pm 0,1)$ нм методом фокусированных ионных пучков. Экспериментально определена скорость ионно-стимулированного осаждения Pt, которая в зависимости от режимов изменяется от $(0,28 \pm 0,02)$ до $(6,7 \pm 0,5)$ нм/с. Отклонение латеральных размеров структур Pt от заданных шаблоном уменьшается от $(29,3 \pm 0,07)$ % до $(2,4 \pm 0,2)$ % в зависимости от времени осаждения. При толщинах наноразмерных структур Pt более 3 нм их удельное сопротивление составляет $(23,4 \pm 1,8)$ Ом·см и слабо зависит от толщины. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологических процессов формирования структур микроэлектронной сенсорики, нанoeлектроники, нано- и микросистемной техники.

Ключевые слова: нанотехнология; фокусированные ионные пучки; ионно-стимулированное осаждение; платина; атомно-силовая микроскопия.

The results of experimental studies of modes of ion beam included deposition of Pt with thickness from (0.48 ± 0.1) to (17.38 ± 0.1) nm by focused ion beams have been represented. The experimentally determined rate of ion-induced deposition of Pt, which, depending on process parameters of the focused ion beam is changed from (0.28 ± 0.02) to (6.7 ± 0.5) nm/s. It has been found that the deviation of the lateral dimensions of Pt nanostructures from the designed pattern decreases from (29.3 ± 0.07) % to (2.4 ± 0.2) % for the various modes of deposition time. It has been shown that at the thicknesses of Pt nanostructures over 3 nm their resistivity is (23.4 ± 1.8) Ohm·cm and weakly depends on the thickness of the structure. The results can be used to develop processes of formation of nanostructures for microelectronics, nano- and microsystems technology on the basis of the focused ion beams method.

Keywords: nanotechnology, focused ion beams, ion-induced deposition, platinum, atomic-force microscopy.

Введение. Разработка перспективной элементной базы наноэлектроники и наносистемной техники зависит от развития методов формирования наноразмерных структур [1, 2]. Микроминиатюризация геометрических размеров элементов, а также необходимость использования новых материалов при формировании активных элементов структур интегральных микросхем существенно ограничивают возможности применения традиционных технологических процессов микроэлектроники, которые не обеспечивают требуемую разрешающую способность и точность [3–5]. В настоящее время активно применяются такие методы локального структурирования поверхности, как электронно-лучевая литография и метод фокусированных ионных пучков (ФИП) [6–10].

Метод ФИП позволяет проводить ионно-лучевое травление, сверхлокальное ионно-стимулированное осаждение наноразмерных структур проводящих материалов (Pt, W, Au, C и др.) с высоким пространственным разрешением без использования резистов, масок и травителей, воздействуя на поверхность подложки сфокусированным пучком ионов Ga^+ в атмосфере химически активного газа осаждаемого материала [7, 9–12]. Проводящие структуры на основе платины, сформированные методом ионно-стимулированного осаждения ФИП, применяются при формировании и модификации элементов МЭМС и НЭМС, создании электрических межсоединений при реконструкции СБИС, формировании проводящих зондов для сканирующей зондовой микроскопии и т.д. [1, 4, 5, 8, 9]. При этом необходимо обеспечить минимальное отклонение размеров от заданных шаблоном и контролируемые электрофизические параметры. Актуально применение наноразмерных структур на основе платины в чувствительных элементах сенсоров водорода [13]. Для этого наряду с контролируемыми электрофизическими параметрами необходимо обеспечить высокую интегральную чувствительность, что возможно, если использовать наноразмерные структуры платины толщиной несколько десятков нанометров и площадью несколько квадратных микрометров [13].

Особенности формирования проводящих наноструктур методом ФИП связаны с использованием в качестве источника осаждаемого материала летучих металлоорганических соединений. При этом в состав сформированных наноструктур, помимо осаждаемого материала, будут входить компоненты органических соединений, атомы и ионы галлия, а также переосажденные атомы материала подложки [11]. Таким образом, на электрические параметры проводящих структур, сформированных методом ионно-стимулированного осаждения ФИП, существенное влияние оказывают состав газаносителя осаждаемого материала, размеры структур, режимы ионно-стимулированного осаждения (ионный ток, время осаждения, степень перекрытия ионного пучка при его пошаговом перемещении и др.) [1, 11, 12]. Эти факторы затрудняют прогнозирование электрических параметров структур [6, 7], поэтому для определения закономерностей их влияния необходимо проведение комплексных экспериментальных исследований.

Цель настоящей работы – выявление закономерностей влияния тока ионного пучка и времени ионно-стимулированного осаждения методом ФИП на геометрические и электрические параметры сформированных структур платины.

Методика эксперимента. Массив тестовых структур Pt формировался методом ионно-стимулированного осаждения на модуле FIB CVD кластерного нанотехнологического комплекса НАНОФАБ НТК–9 (ЗАО «НТ-МДТ», Россия), оснащенного ионными пушками Canon 31U (Orsay Physics, Франция), которые позволяют формировать пучок ионов Ga^+ с минимальным диаметром около 7 нм, энергией до 30 кэВ, током ионного пучка от 1 до 500 пА. В качестве подложки использовалась окисленная пластина кремния *n*-типа проводимости с удельным

сопротивлением 4,5 Ом·см. В качестве газа-носителя использовался триметил (метилциклопентадиенил) платины (IV) $C_5H_4CH_3Pt(CH_3)_3$ [1, 6].

Для ионно-стимулированного осаждения структур Pt разработана методика, согласно которой в программе управления модулем FIB CVD с помощью встроенных средств графического проектирования формировался шаблон из 24 структур размером 2×2 мкм при области перекрытия ФИП 0 %. Диапазон технологических параметров (таблица) выбран на основе анализа результатов, представленных в [11]. При этом число проходов при постоянном значении области перекрытия и учете диаметра ФИП позволяет определить соответствующее время осаждения. Размер и число структур выбирались для последующей статистической обработки результатов, а также для предотвращения влияния флуктуаций латеральных размеров наноструктур на результаты. В отличие от [11] ионно-стимулированное осаждение структур Pt проводилось в режиме дискретного воздействия ФИП в каждой точке графического шаблона (режим Dwell Time).

Технологические параметры ионно-стимулированного осаждения структур Pt методом ФИП

Номер ряда (см. рис.2)	Число проходов	Шаг изменения	Время осаждения, с	Шаг изменения времени осаждения, с
I	10 – 80	10	0,075 – 0,6	0,075
II	100 – 800	100	0,75 – 6	0,75
III	1000 – 8000	1000	7,5 – 60	7,5

Геометрические параметры (толщина и латеральные размеры) сформированных структур Pt определялись по АСМ-профилограмме по точкам, находящимся на 5 % выше усредненного уровня поверхности подложки. При этом осуществлялась статистическая обработка АСМ-изображений, полученных в полуконтактном режиме на зондовой нанолaborатории Ntegra (ЗАО «НТ-МДТ»).

Отклонение латеральных размеров сформированных структур от заданных шаблоном определяется выражением

$$\Delta = \frac{L_m - L_a}{L_a} \cdot 100,$$

где L_m – измеренный размер; L_a – заданный размер.

Электрические параметры структур измерялись методом АСМ в режиме отображения тока растекания при напряжении 5 В и комнатной температуре. В качестве верхнего контакта использовался зонд с платиновым покрытием марки NSG11/Pt. Схематическое изображение измерения сопротивления структур Pt методом АСМ в режиме отображения тока растекания представлено на рис.1,а.

Определяемое методом АСМ общее сопротивление $R_{общ}$ структуры платины представляет собой сумму последовательно соединенных сопротивлений (рис.1,б) [14, 15]:

$$R_{общ} = R_0 + R_{з.с} + R_c + R_{с.п},$$

где R_0 – сумма сопротивлений зонда АСМ R_z , подложки $R_{п.к}$, контакта подложки с контактной площадкой $R_{п.к}$ и контактной площадки $R_{к.к}$; $R_{з.с}$ – сопротивление контакта острия зонда со структурой платины; R_c – сопротивление структуры; $R_{с.п}$ – сопротивление контакта структуры платины с кремниевой подложкой.

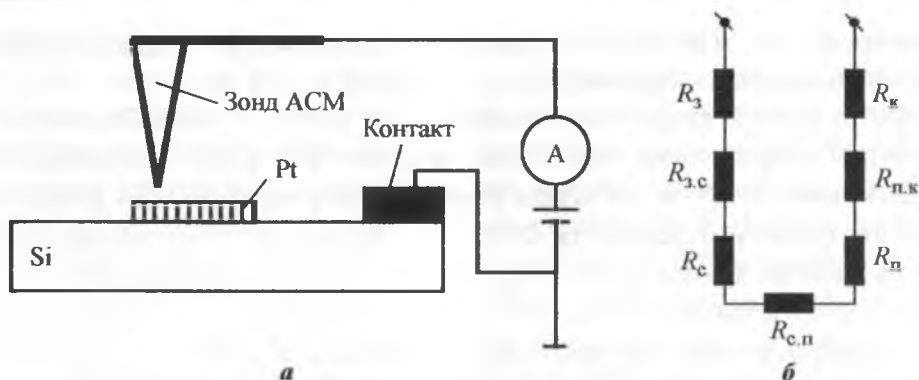


Рис.1. Схематическое изображение (а) и эквивалентная схема (б) измерения сопротивления структур платины методом АСМ

При условии, что сопротивления $R_3, R_к, R_{п.к}, R_{п}$ не вносят существенный вклад в значение $R_{общ}$, можно принять, что $R_0 \ll R_{общ}$. Тогда удельное сопротивление структур платины и контактов к ним определяется как

$$\rho = R_{общ} \pi r^2 / d, \quad (1)$$

где r – радиус зонда АСМ (10 нм); d – толщина структуры.

Анализ результатов. На рис.2 приведены АСМ-изображения морфологии и распределения токов растекания поверхности образца со структурами платины, сформированными при токе 3,6 пА и времени осаждения, приведенном в таблице. Анализ АСМ-изображений показал, что при токе ФИП 3,6 пА толщина сформированных структур изменяется от $(0,48 \pm 0,1)$ до $(17,38 \pm 0,1)$ нм, при токе ФИП 7,9 пА – от $(0,506 \pm 0,11)$ до $(24,38 \pm 0,08)$ нм в зависимости от технологических параметров (см. таблицу).

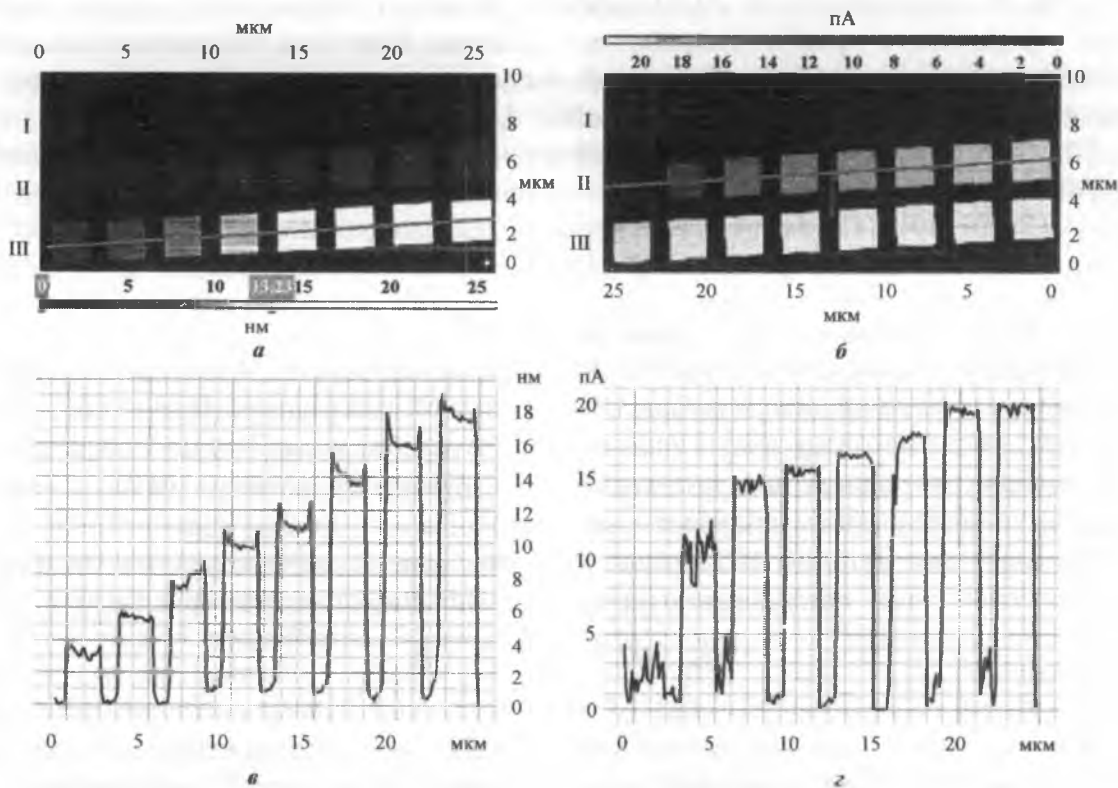


Рис.2. АСМ-изображения структур платины, сформированных при токе ФИП 3,6 пА: а – морфология; б – распределение тока растекания; в, г – профилограммы вдоль линий соответственно

На основе анализа полученных экспериментальных результатов построены зависимости толщины сформированных структур и скорости ионно-стимулированного осаждения от времени осаждения (рис.3) при различных токах ФИП. Эти зависимости практически одинаковые из-за близких значений токов, используемых при осаждении. Нелинейный характер зависимости толщины структур платины от времени осаждения, а также уменьшение скорости ионно-стимулированного осаждения отражают влияние конкурирующих процессов ионно-стимулированного осаждения и ионно-лучевого травления структуры [11]. Сравнение полученных результатов с данными, представленными в [11], показывает, что дискретное воздействие ФИП в каждой точке графического шаблона обеспечивает более прецизионное и воспроизводимое получение структур платины толщиной до 100 нм, с меньшим доверительным интервалом.

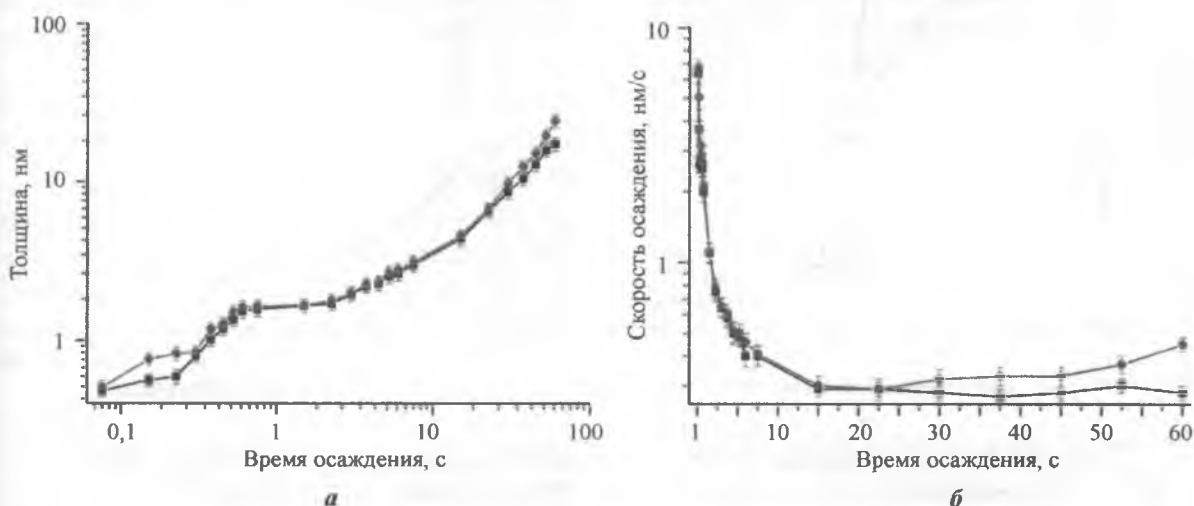


Рис.3. Зависимости толщины (а) и скорости ионно-стимулированного осаждения (б) структур платины от времени осаждения при различных токах ФИП: ■ — 3,6 пА; ● — 7,9 пА

На основе анализа полученных экспериментальных результатов построены зависимости отклонения латеральных размеров структур платины от времени осаждения при различных токах ФИП (рис.4). Анализ зависимостей показывает, что размер сформированных структур больше размера заданного шаблоном, причем размер структур, сформированных при токе ФИП 7,9 пА, значительно больше, чем при токе 3,6 пА. Поскольку зависимость интенсивности ФИП от его радиуса описывается гауссовым распределением, то увеличение размеров сформированных элементов при росте тока связано с увеличением диаметра ФИП и повышением интенсивности ионно-стимулированного осаждения на периферийных областях ионного пучка. Также рост тока ФИП сопровождается усилением влияния эффекта переосаждения [8, 12], особенно на краях графического шаблона, что приводит к дополнительному увеличению латеральных размеров формируемых структур.

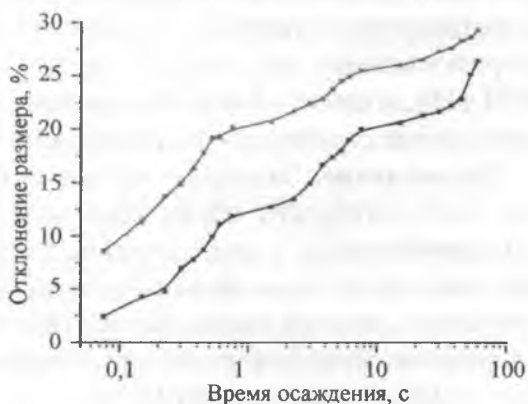


Рис.4. Зависимость отклонения латеральных размеров структур платины от времени осаждения при различных токах ФИП: ■ — 3,6 пА; ● — 7,9 пА

Зависимости сопротивления $R_{\text{общ}}$ от толщины наноразмерных структур платины, полученные на основе результатов исследования методом АСМ в режиме тока растекания, представлены на рис.5,а. Анализ показал, что зависимость сопротивления структур от их толщины носит перколяционный характер. При толщинах менее 1 нм структуры состоят из нанокластеров, не контактирующих друг с другом, при этом сопротивление структуры определяется сопротивлением SiO_2 . При увеличении толщины структур от 1 до 3 нм размеры и плотность нанокластеров увеличивается и они начинают формировать проводящие цепочки, при этом сопротивление структуры снижается до $(19,26 \pm 5,08)$ МОм.

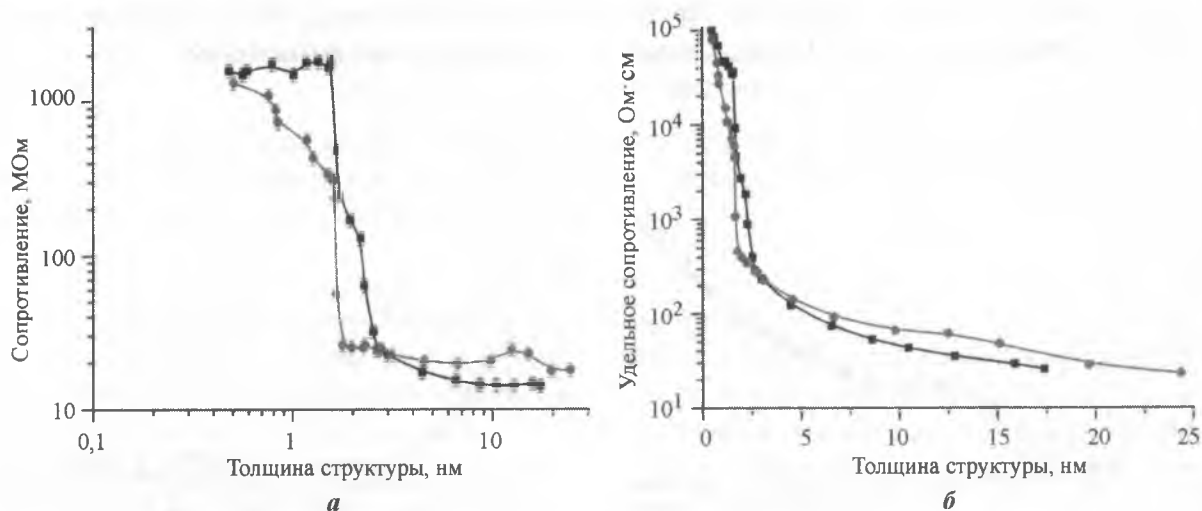


Рис.5. Зависимости сопротивления (а) и удельного сопротивления (б) структур платины, сформированных при различных токах ФИП, от толщины: ■ — 3,6 пА; ● — 7,9 пА

Таким образом, толщина наноразмерных структур около 1–3 нм является пороговым значением, при превышении которого размерные эффекты перестают оказывать существенное влияние на проводимость.

Рассчитанное согласно (1) удельное сопротивление наноразмерных структур платины уменьшается от $(103,4 \pm 3,2)$ кОм·см до $(23,4 \pm 1,8)$ Ом·см при увеличении их толщины от $(0,48 \pm 0,1)$ до $(24,38 \pm 0,08)$ нм (рис.5,б). При этом минимальное значение удельного сопротивления сформированной структуры превышает объемное удельное сопротивление платины (~ 10 мкОм·см), что, вероятно, связано с включением в состав сформированных структур атомов газа-прекурсора и кремния, вследствие воздействия ФИП [15], а также с влиянием на токопрохождение аморфизации границы раздела наноразмерная структура – подложка в процессе ионно-стимулированного осаждения.

Заключение. Экспериментальные исследования закономерностей влияния основных технологических параметров ионно-стимулированного осаждения методом ФИП на геометрические и электрические параметры структур платины показали следующее. При увеличении времени ионно-стимулированного осаждения с 75 мс до 60 с скорость осаждения платины уменьшается с $(6,7 \pm 0,5)$ до $(0,28 \pm 0,02)$ нм/с, при этом отклонение латеральных размеров структур от заданных шаблоном увеличивается с $(2,4 \pm 0,2)$ до $(26,4 \pm 0,08)$ % для тока ФИП 3,6 пА и с $(8,6 \pm 0,22)$ до $(29,3 \pm 0,07)$ % для тока ФИП 7,9 пА. Установлено, что при толщинах сформированных наноразмерных структур более 3 нм их удельное сопротивление уменьшается до $(23,4 \pm 1,8)$ Ом·см и в дальнейшем слабо зависит от толщины структуры.

Полученные результаты подтверждают влияние неравномерности распределения интенсивности ионов в пучке, конкурирующих процессов ионно-стимулированного осаждения и ионно-лучевого травления, переосаждения материала и размерных эффектов на геометрические и электрические параметры структур Pt, сформированных ионно-стимулированным осаждением методом ФИП. Для формирования 1D- и 0D-структур этим методом использование меньших токов ФИП позволяет уменьшить отклонение размеров от заданных графическим шаблоном при сохранении скорости осаждения, что обеспечивает формирование массивов наноразмерных структур с большой плотностью компоновки, а также туннельных контактов.

Метод ионно-стимулированного осаждения позволяет получать наноразмерные структуры платины с контролируруемыми параметрами, что делает его перспективным для использования при разработке технологических процессов изготовления элементной базы микроэлектронной сенсорики, наноэлектроники и наносистемной техники.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности (задание №16.1154.2014/К) и гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук (проект № МК-6163.2016.8) с использованием оборудования Научно-образовательного центра и Центра коллективного пользования «Нанотехнологии» Южного федерального университета (г. Таганрог).

Литература

1. **Giannuzzi L.A., Stevie F.A.** Introduction to focused ion beams: instrumentation, theory, techniques and practice. – N.Y.: Springer, 2004. – 357 p.
2. Silicon-based nanostructures formed by plasma etching through a mask formed by a focused beam of a Ga⁺ ions / **I.I. Bobrinetskiy, A.V. Volkova, A.A. Zaitsev et al.** // Russian Microelectronics. – 2015. – Vol.7. – Iss. 44. – P. 482–486.
3. Development of new metamaterials for advanced element base of micro- and nanoelectronics, and microsystem devices. Chapter In: Advanced Materials – Manufacturing, Physics, Mechanics and Applications / **O.A. Ageev, S.V. Balakirev, Al.V. Bykov et al.** / Eds. **Parinov, Chang, Topolov.** – Springer International Publishing Switzerland, 2016. – P. 563–580.
4. **Лучинин В.В.** Нанотехнологии: физика, процессы, диагностика, приборы. – М.: Физматлит, 2006. – 552 с.
5. Formation of a memristor matrix based on titanium oxide and investigation by probe-nanotechnology methods / **V.I. Avilov, O.A. Ageev, A.S. Kolomiitsev et al.** // Semiconductors. – 2014. – Vol. 48. – N 13. – P. 1757–1762.
6. **Utke I., Hoffmann P., Melngailis J.** Gas-assisted focused electron beam and ion beam processing and fabrication / Journal of Vacuum Science & Technology B. – 2008. – Vol. 26. – P. 1197–1276.
7. **Fu Y., Bryan N., Shing O., Hung N.** Influence of the redeposition effect for focused ion beam 3D micromachining in silicon // International Journal of Advance Manufacturing Technology. – 2000. – №16. – P. 877–880.
8. **Konoplev B.G., Ageev O.A., Kolomiitsev A.S.** Formation of Nanosize Structures on a Silicon Substrate by Method of Focused Ion Beams // Semiconductors. – 2011. – Vol. 45. – No 13. – P. 1709–1712.
9. Fabrication of advanced probes for atomic force microscopy using focused ion beam / **O.A. Ageev, A.S. Kolomiitsev, A.V. Bykov et al.** // Microelectronics Reliability. – 2015. – №55. – P. 2131–2134.
10. Формирование наноразмерных элементов затворов СВЧ-транзисторов методом ионно-лучевой литографии / **К.К. Лаврентьев, В.К. Неволин, Р.Ю. Розанов и др.** // Изв. вузов. Электроника. – Т. 20. – №6. – 2015. – С. 591–597.
11. Analysis of modes nanoscale profiling during ion-stimulated deposition of W and Pt using the method of focused ion beams / **O.A. Ageev, A.V. Vnukova, A.L. Gromov et al.** // Nanotechnologies in Russia. – 2014. – Vol. 9. – Iss. 3–4. P. 145–150.

12. Studying the resolving power of nanosized profiling using focused ion beam / **O.A. Ageev, A.M. Alekseev, A.V. Vnukova et al.** // Nanotechnologies in Russia. – 2014. – Vol. 9. – Iss. 1–2. – P. 26–30.
13. **Bochenkov V.E., Sergeev G.B.** Sensitivity, Selectivity, and Stability of Gas-Sensitive Metal-Oxide Nanostructures // Metal Oxide Nanostructures and Their application. – 2010. – Vol. 3 – P. 31–52.
14. **Kalinin S., Gruverman A.** Electrical and electromechanical phenomena at the nanoscale // Handbook of Nanotechnology. – Springer, 2007. – P. 31–49
15. **E.S. Sadki, S. Ooi, K. Hirata.** Focused-ion-beam-induced deposition of superconducting nanowires // Appl. Phys. Lett. – 2004. – Vol. 85. – N 25. – P. 6206–6208.

Статья поступила после доработки
5 октября 2016 г.

Лисицын Сергей Андреевич – аспирант кафедры нанотехнологий и микросистемной техники (НТ МСТ) Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета, г. Таганрог (ИНЭП ЮФУ). *Область научных интересов:* микро- и наноэлектроника, метод фокусированных ионных пучков, растровая электронная микроскопия, ионно-стимулированное осаждение материалов из газовой фазы, наносенсорика, МЭМС- и НЭМС-технология. **E-mail:** lisitsynsa@sfnu.ru

Коломийцев Алексей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора ИНЭП ЮФУ по науке. *Область научных интересов:* электронная микроскопия, фокусированные ионные пучки, взаимодействие ионов с твердым телом, методы диагностики и анализа наноструктур, разработка и исследование технологических процессов изготовления элементной базы приборов микро- и наноэлектроники.

Ильин Олег Игоревич – кандидат технических наук, ассистент кафедры НТ МСТ ИНЭП ЮФУ. *Область научных интересов:* растровая электронная микроскопия, метод фокусированных ионных пучков, углеродные нанотрубки и сенсоры на их основе.

Ильина Марина Владимировна – кандидат технических наук, ассистент кафедры НТ МСТ ИНЭП ЮФУ. *Область научных интересов:* сканирующая зондовая микроскопия, атомно-силовая микроскопия, нанотехнологии, углеродные нанотрубки.

Коноплев Борис Георгиевич – доктор технических наук, профессор кафедры конструирования электронных средств ИНЭП ЮФУ, заслуженный деятель науки РФ. *Область научных интересов:* нанотехнологии, микро- и наноэлектроника, микро- и наносистемная техника.

Быков Александр Викторович – кандидат экономических наук, докторант кафедры НТ МСТ ИНЭП ЮФУ. *Область научных интересов:* МЭМС, атомно-силовая микроскопия, нанотехнологии, зондовые нанотехнологии.

Агеев Олег Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры НТ МСТ ИНЭП ЮФУ, директор НОЦ «Нанотехнологии» ЮФУ. *Область научных интересов:* стимулированные фотонным, ионно- и электронно-лучевым воздействием физико-химические процессы технологии микро- и наноэлектроники; разработка и исследование технологических процессов изготовления элементной базы приборов наноэлектроники; твердофазные процессы в полупроводниках и диэлектриках при импульсной термообработке некогерентным излучением и электронно-лучевыми потоками; разработка и исследование технологических процессов формирования контактов к активным элементам приборов экстремальной электроники.