

## Формирование в вакууме композиционного слоя с островковыми наноструктурами

С. В. Сидорова<sup>1</sup>✉, И. Е. Пименов<sup>2</sup>, А. Д. Купцов<sup>1</sup>, А. А. Фельде<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие "НАМИ", Москва, Россия

✉ [sidorova@bmstu.ru](mailto:sidorova@bmstu.ru)

### Аннотация

**Введение.** В настоящее время тенденции развития электроники требуют от устройств увеличения производительности, повышения эффективности, миниатюризации, снижения себестоимости. Внедрение наноразмерных, в том числе и островковых, структур и слоев на их основе может стать перспективой развития многих отраслей электроники. Островковыми тонкими пленками и наноструктурами (ОНС) называются тонкопленочные структуры, формирование которых завершили на начальных стадиях. Размеры островков не превышают 100 нм в латеральном и вертикальном направлениях, благодаря чему в массивах ОНС проявляются размерные эффекты (электрические, магнитные, оптические, механические и т. д.). Интерес представляет формирование композиционного слоя диэлектрика и внедренных в него проводящих ОНС.

**Цель работы.** Разработка способа и отработка режимов формирования композиционного покрытия с ОНС.

**Материалы и методы.** Исследования проводятся на кафедре электронных технологий в машиностроении МГТУ им. Н. Э. Баумана. Материалы исследования – оксид алюминия и медь. Технологическое оборудование – вакуумная установка МВТУ-11-1МС, оснащенная магнетронным и ионным источниками. Исследования шероховатости поверхностей подложки и покрытий проводятся на атомно-силовом микроскопе Solver NEXT; геометрических параметров композиционного слоя – на сканирующем электронном микроскопе Crossbeam 550.

**Результаты.** Средние абсолютные значения скорости осаждения для меди и оксида алюминия – 25.9 и 0.3 нм/мин соответственно. Для формирования композиционной структуры с ОНС диаметром 100 нм и расстоянием между островками 3...5 нм проводящая вставка имеет размеры: диаметр 25 мм, ширина 0.46 мм. Для получения однородной структуры и качественного сцепления композиционного слоя с подложкой требуется предварительная ионная обработка подложки в течение 120 с.

**Заключение.** Разработанный способ формирования композиционного покрытия с островковыми наноструктурами предполагает использование комбинированной мишени. Практическое применение результатов работы: возможность формирования методом магнетронного распыления в вакууме композиционных тонкопленочных покрытий из диэлектрика и проводящих наноразмерных структур.

**Ключевые слова:** островковые тонкие пленки, магнетронное распыление, комбинированная мишень, вакуум, шероховатость, атомно-силовая микроскопия, сканирующая электронная микроскопия

**Для цитирования:** Формирование в вакууме композиционного слоя с островковыми наноструктурами / С. В. Сидорова, И. Е. Пименов, А. Д. Купцов, А. А. Фельде // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 2. С. 94–106.

doi: [10.32603/1993-8985-2025-28-2-94-106](https://doi.org/10.32603/1993-8985-2025-28-2-94-106)

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 06.07.2024; принята к публикации после рецензирования 25.11.2024; опубликована онлайн 30.04.2025

## Composite Layer Formation with Island Nanostructures in Vacuum

Svetlana V. Sidorova<sup>✉</sup>, Ilya E. Pimenov<sup>2</sup>, Alexey D. Kouptsov<sup>1</sup>, Anastasiya A. Felde<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Federal State Unitary Enterprise "NAMI", Moscow, Russia

✉ sidorova@bmstu.ru

### Abstract

**Introduction.** The current trends in the development of electronics require miniaturized devices with increased performance at affordable costs. The introduction of nanoscale structures and layers based thereon, including island structures, offers great opportunities for the development of various branches of electronics. Island thin films and nanostructures (INS) are thin-film structures whose formation has been completed at the initial stages. The size of the islands does not exceed 100 nm in the lateral and vertical directions, which makes the INS arrays to exhibit dimensional effects (electrical, magnetic, optical, mechanical, etc.). The formation of a composite dielectric layer with embedded conductive INS presents particular interest.

**Aim.** Development of a technique and testing of formation modes of a composite coating with INS.

**Materials and methods.** The research was carried out at the Department of Electronic Technologies in Mechanical Engineering of Bauman Moscow State Technical University. The research materials alumina and copper. A MVTU-11-1MC vacuum unit, equipped with magnetron and ion sources, was used as technological equipment. The roughness of the substrate and coating surfaces was studied using a Solver NEXT atomic force microscope; the geometric parameters of the composite layer were studied using a CROSSBEAM 550 scanning electron microscope.

**Results.** The average absolute deposition rates for copper and alumina were 25.9 and 0.3 nm/min, respectively. A conductive insert with a diameter of 25 mm and a width of 0.46 mm was used to form a composite structure with a diameter of 100 nm and a distance between the islands of 3...5 nm. To obtain a homogeneous structure and a high-quality adhesion of the composite layer to the substrate, preliminary ion treatment of the substrate for 120 s was required.

**Conclusion.** The developed method for forming a composite coating with INS involves the use of a combined target. The results obtained can be used when creating composite thin-film coatings from dielectric and conductive nanoscale structures by magnetron sputtering in vacuum.

**Keywords:** island thin films, magnetron sputtering, combined target, vacuum, roughness, atomic force microscopy, scanning electron microscopy

**For citation:** Sidorova S. V., Pimenov I. E., Kouptsov A. D., Felde A. A. Composite Layer Formation with Island Nanostructures in Vacuum. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 2, pp. 94–106. doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-2-94-106

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 06.07.2024; accepted 25.11.2024; published online 30.04.2025

**Введение.** Островковые наноструктуры (ОНС) находят применение в различных областях науки и техники от медицины и биологии до отраслей электроники, оптики и фотоники. Исследованием характеристик и свойств островковых наноструктур и их массивов занимаются ученые и исследователи как в России, так и за рубежом, начиная с 80-х гг. прошлого столетия. Однако в последние 15–20 лет актуальность разработки способов формирования ОНС и тонкопленочных покрытий возрастает год от года (рис. 1). Это связано с размерными эффектами в наноразмерных

структурах, которые наряду с миниатюризацией проявляются в нанометровом масштабе.

Быстрорастущая область промышленности – микроэлектроника требует от устройств помимо миниатюризации также увеличения производительности и эффективности, снижения себестоимости и нового функционала. Разработка новых технологических и конструктивных решений и их внедрение в устройства областей электроники в настоящее время приобретают большой интерес со стороны разработчиков и исследователей. Примером новых технологиче-

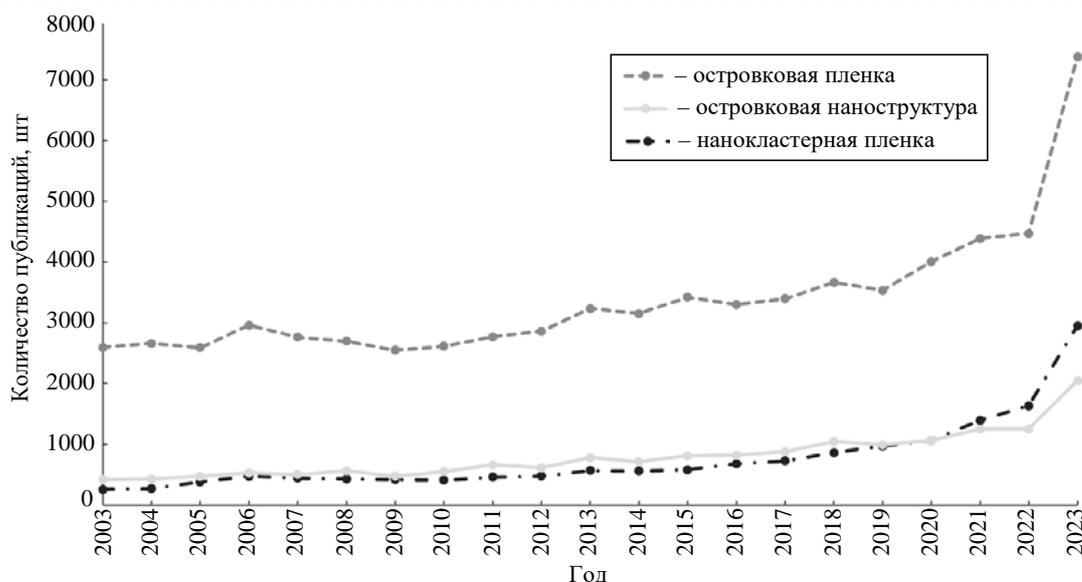


Рис. 1. Интерес научного сообщества к тематике "островковых тонких пленок и наноструктур" в период с 2003 по 2023 гг. по данным сайта sciencedirect.com

Fig. 1. Research interest in the topic of island thin films and nanostructures during 2003–2023 assessed according to the sciencedirect.com data

ских решений могут быть островковые наноструктуры [1], в том числе реализованные в композиционных слоях.

За счет внедрения многослойной островковой пленки ферромагнетиков и островковой тонкой пленки олова, серебра, алюминия можно достичь повышения чувствительности для датчиков слабых магнитных полей и газовых сенсоров соответственно [2]. Внедрение островкового слоя в конденсаторы позволяет увеличить их емкость в 2–20 раз. Такие конденсаторы находят свое применение в СВЧ-трактах, больших аккумуляторных батареях для транспорта и промышленных систем энергообеспечения [3–5].

Выбор метода получения островковых структур связан как с материалом формирования, так и с требованиями к функциональным и геометрическим параметрам островкового слоя [6]. При сравнении дорогостоящих и, безусловно, высокопроизводительных методов литографии с более доступными методами вакуумного нанесения покрытий выбор для формирования островкового слоя сделан в пользу методов вакуумного нанесения. Однако требуется тщательная отработка режимов формирования островкового слоя и поиск новых способов реализации процесса нанесения. Формирование в вакууме как однослойных островковых структур, так и комплекса многослойных островковых по-

крытий, чередующихся тонкопленочными слоями диэлектрика, является актуальной задачей.

Целью исследования являлась разработка способа и отработка режимов формирования композиционного покрытия с островковыми наноструктурами.

**Материалы, методы и методика исследований.** Исследования проводились на кафедре электронных технологий в машиностроении МГТУ им. Н. Э. Баумана. В качестве технологического оборудования применялась вакуумная установка МВТУ-11-1МС [7]. Предварительная подготовка подложек осуществлялась при помощи кольцевого источника ионов в едином вакуумном цикле с нанесением функциональных слоев. Очистка кремниевой подложки проводилась ионизированным потоком аргона. Известно о положительном влиянии ионной обработки на морфологию и шероховатость поверхности [8, 9], а также на качество последующего сцепления тонкопленочных покрытий с обработанной ионным источником подложкой [10, 11]. Для отработки режимов формирования тонкопленочных слоев Cu и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> проводилось осаждение магнетронным распылением. Мишени магнетронного источника имели заданный стехиометрический состав Cu и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Для формирования композиционного покрытия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Cu предложен метод магнетронного распыления в вакууме из комбинированной ми-

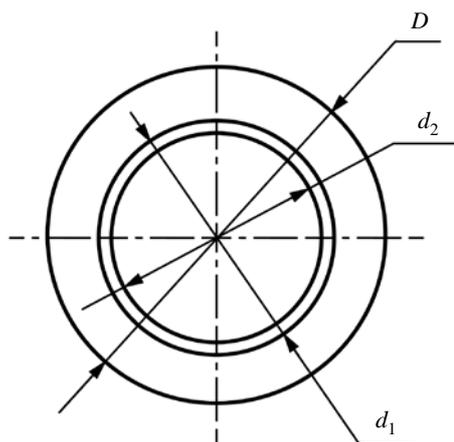


Рис. 2. Комбинированная мишень с кольцевой вставкой

Fig. 2. Combined target with annular insert

шени. Такая мишень представляет собой каркас из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и вставки из  $\text{Cu}$ . Для разработки была предложена вставка в форме кольца (рис. 2) с учетом заданного диаметра мишени  $D$  и расчетных параметров геометрии мишени  $d_1$ ,  $d_2$ .

Использование комбинированной мишени позволяет одновременно формировать островковое покрытие из  $\text{Cu}$  и заполнять пространство между проводящими островками материалом диэлектрика –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Также материал диэлектрика служит барьером для отдельных островков, так как срастание островков приводит к образованию лабиринтных пленок.

Методика формирования композиционного островкового покрытия включает в себя несколько этапов. Первым этапом является предварительная жидкостная очистка подложек в растворах щелочи, спирта и в деионизированной воде в ультразвуковой ванне. После очистки подложки устанавливаются в рабочую камеру и проводится откачка камеры до рабочего давления. Перед формированием покрытия подложки обрабатываются ионным источником. Проводится тренировка мишени и последующее формирование островковых тонких пленок методом магнетронного распыления из комбинированной мишени. После окончания процесса нанесения осуществляется остановка откачной системы, развакумирование и изъятие образцов для тестирования.

Формирование композиционного слоя с наноразмерными островковыми структурами по предложенной методике предполагает проведение предварительных исследований морфологии подложки и адгезии к ней наносимого материала.

Шероховатость подложки может влиять на формируемые островковые структуры, так как соизмерима с размерами островков.

Для оценки качества поверхности тонкопленочных покрытий используется атомно-силовой микроскоп (АСМ) Solver NEXT, с помощью которого измеряется шероховатость поверхностей. Оценка адгезионных свойств проверяется с помощью ручного скрайбера, который дефрагментирует слой пленки на отдельные зоны для отслоения. Степень адгезии покрытия к подложке оценивается качественным методом, при котором пленка разделяется скрайбером на фрагменты размером  $1 \times 1$  мм. На пленку наклеивается липкая лента, которая отрывается под углом  $90^\circ$  к подложке. Оценивается степень отслоения пленки от подложки. Геометрические параметры сформированных структур оцениваются с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) ZEISS Crossbeam 550.

**Результаты исследования морфологии подложки и покрытий.** Для оценки влияния ионной обработки на шероховатость поверхностей подложки и покрытий на основании предыдущих исследований определено время – 120 и 600 с [12]. Проведены измерения шероховатости поверхности подложки без воздействия ионного пучка. Покрытие  $\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной 150 нм наносится на все поверхности – без и после ионной обработки. На рис. 3 представлены АСМ-изображения подложки, тонкопленочных покрытий  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с разным временем предварительной обработки подложки.

На рис. 3 наблюдаются пики, исходящие из поверхности подложки или пленки. Высота пиков не превышает 3...5 нм. Количество и плотность расположения этих пиков варьируются в зависимости от времени предварительной ионной обработки, что может быть связано с характером роста пленки на поверхности подложки разной топологии. Следует отметить более равномерное распределение пиков на поверхности покрытия с предварительной ионной обработкой подложки.

На основании полученных после АСМ-исследования данных определены тренды изменения шероховатости подложки и покрытия после применения предварительной ионной

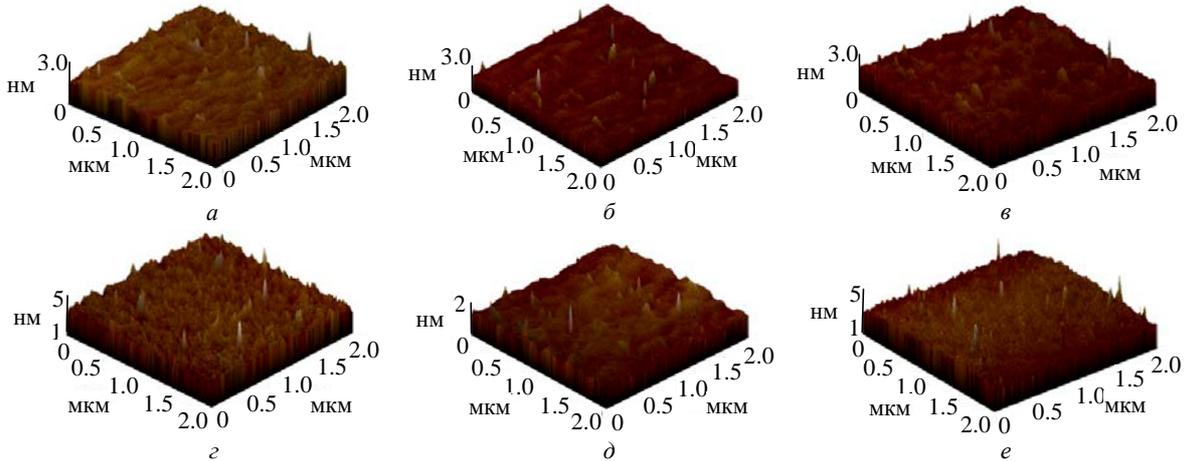


Рис. 3. АСМ-изображения поверхностей подложки до нанесения пленки при временах обработки 0, 120 и 600 с (а, б, в); пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной 150 нм при обработке 0, 120 и 600 с (з, д, е)

Fig. 3. AFM images of substrate surfaces before application at processing intervals of 0, 120 and 600 s (a, b, v); 150 nm thick  $\text{Al}_2\text{O}_3$  films at processing intervals of 0, 120 and 600 s (z, d, e)

обработки. На рис. 4 представлены зависимости шероховатости поверхности подложки и пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  от времени ионной обработки.

После осаждения покрытия оксида алюминия средняя шероховатость для всех времен предварительной ионной обработки поверхности превысила 2.0 нм, что несколько выше исходной шероховатости кремниевой подложки (1.8 нм). С увеличением времени предварительной ионной обработки наблюдается меньший разброс по величине шероховатости для подложки. Однако для покрытия оксида алюминия меньший разброс по шероховатости показан для предварительной ионной обработки при 120 с. Именно такое время предварительной ионной обработки выбирается для дальнейших исследований.

Оценка шероховатости пленки меди проводится для толщин 50 и 100 нм, так как необходимо соблюсти наноразмерные масштабы тонкопленочного композиционного слоя. Подложка монокристаллического кремния перед осаждением обрабатывается в течение 120 с. Приводятся результаты экспериментов шероховатости поверхности без обработки и с обработкой (рис. 5).

Во всех АСМ-изображениях есть небольшие пики с круглой вершиной. На подложке без предварительной ионной обработки диаметр включений составляет от 50 до 80 нм при высоте от 1.5 до 2.5 нм. Для пленки меди, сформированной на подложке с предварительной ионной обработкой, диаметр пиков имеет меньший разброс – от 70 до 80 нм при высоте пиков в пределах 1 нм. Плотность и количество

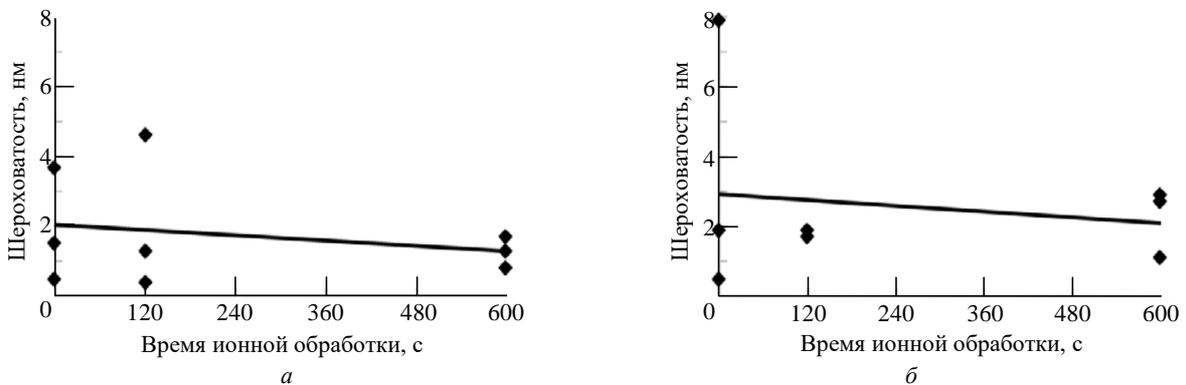


Рис. 4. Зависимость шероховатости поверхности подложки (а) и пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной 150 нм (б) от времени ионной обработки

Fig. 4. Dependence of the surface roughness of the substrate (a) and the film  $\text{Al}_2\text{O}_3$  with a thickness of 150 nm (b) on the duration of ion treatment

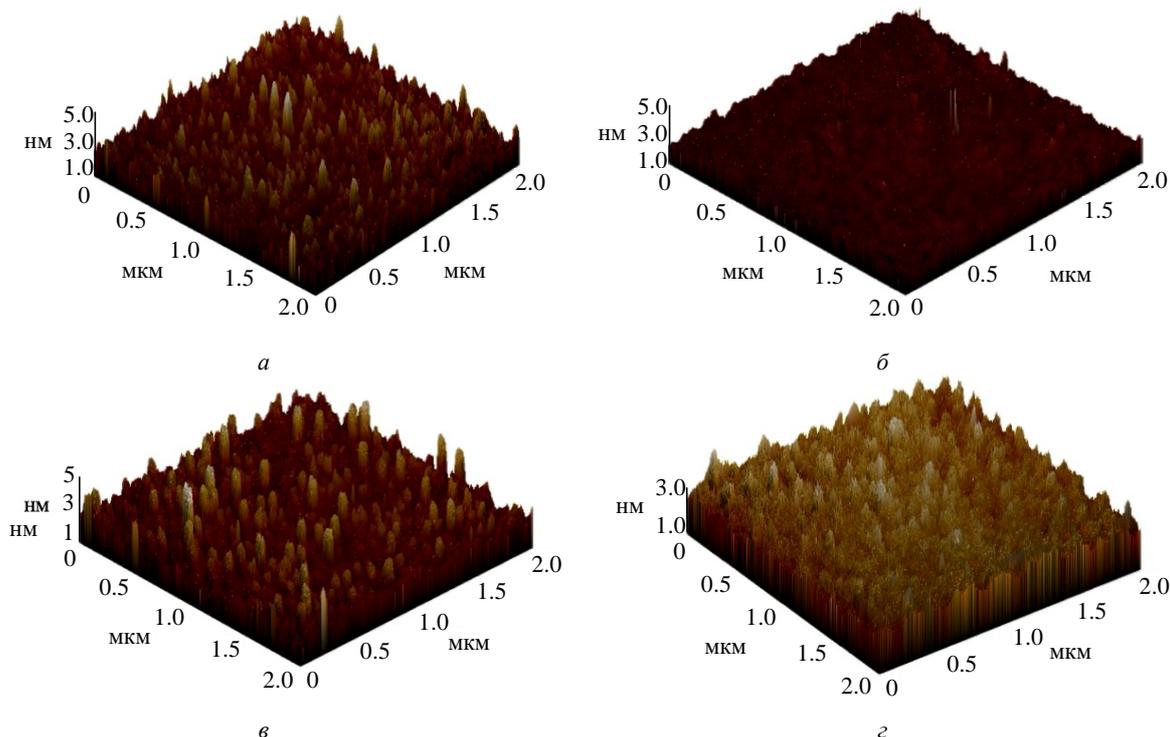


Рис. 5. АСМ-изображения поверхностей пленки Cu толщиной 50 нм после нанесения при времени обработки подложки 0 с (а), 120 с (б); и 100 нм при времени 0 с (в) и 120 с (г)

Fig. 5. AFM-images of Cu thin film 50 nm after treatment intervals of 0 s (a), 120 s (б); and 100 nm after treatment intervals of 0 s (в), 120 s (г)

столбчатых структур для обоих случаев обработки остается одинаково равномерным.

На рис. 6 приведена зависимость шероховатости поверхности пленки меди различной толщины от времени предварительной ионной обработки подложки.

Шероховатость поверхности с наноразмерным слоем меди без ионной обработки подложки больше шероховатости после ионной обработки подложки. Уровень шероховатости по-

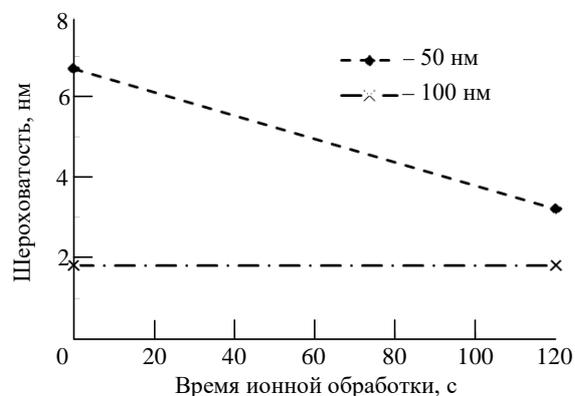


Рис. 6. Зависимость шероховатости пленки Cu от времени предварительной ионной обработки подложки

Fig. 6. Dependence of the Cu film roughness on the duration of ion pretreatment of the substrate

верхности пленки 100 нм сохраняется на значениях 1.8 нм. Для толщины пленки 50 нм параметр шероховатости практически в 2 раза выше – 3.2 нм, что может быть связано с наличием островковых кластеров, которые формируются при высокой скорости осаждения материала при низких температурах (не более 50 °С).

**Результаты исследования адгезии покрытий  $Al_2O_3$  и Cu к подложке из Si.** На рис. 7 приведено сравнение результатов качественной оценки адгезии пленки оксида алюминия к кремнию при разном времени ионной обработки подложки.

Ионная обработка влияет на качественный уровень степени адгезии пленки к подложке: 50 % образцов без предварительной ионной обработки подложки показали неудовлетворительный уровень адгезии – пленка отклеилась от подложки; для образцов с предварительной ионной обработкой подложки 100 % пленки оставалось на подложке при измерениях.

Из рис. 7, б и г видно, что предварительная ионная обработка подложки перед осаждением позволяет формировать оптически чистые слои без видимых разводов и иных дефектов.

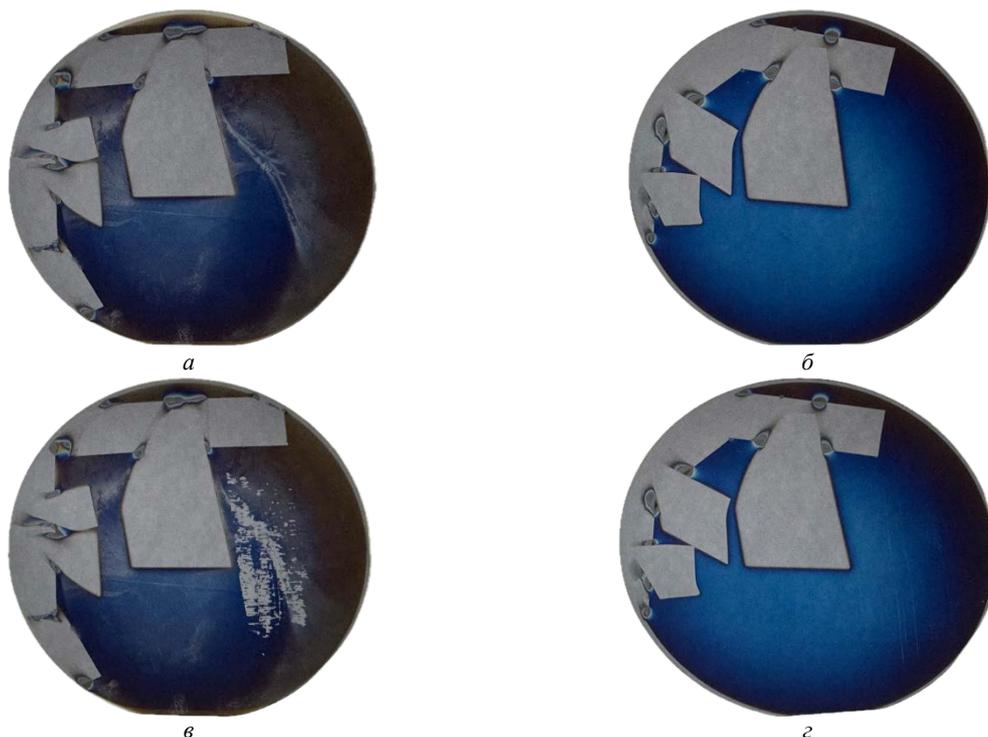


Рис. 7. Оценка адгезии пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  к подложке до (а, б) и после (в, г) скрайбирования без предварительной обработки подложки (а, в) и при обработке в течение 120 с (б, г)

Fig. 7. Assessment of the adhesion of the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  film to the substrate before (a, б) and after (в, г) scribing without pretreatment of the substrate (a, в) and during at a processing interval of 120 s (б, г)

Оценка адгезии металлической пленки к подложке кремния является важной операцией, поскольку скорость осаждения металлов по сравнению с оксидами выше, более чем на порядок, а также кристаллическая структура меди является более способной к адгезии по сравнению с аморфными пленками [12]. При выбранных режимах подготовки подложки, методе формирования пленок и технологических параметрах в данном исследовании степень адгезии пленки меди для толщин 50 и 100 нм без ионной обработки и при ионной обработке не показали различий на качественном уровне. Все тонкопленочные структуры остались на подложке, без дефектов при отклеивании скотча от пленки после скрайбирования.

**Результаты отработки скоростей осаждения  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и Cu.** Оценка скорости осаждения материала на подложку является фундаментальным требованием для формирования изделий с тонкопленочными слоями толщиной менее 500 нм. Существуют различные методики измерения толщины пленки, следовательно, пересчета этого параметра в скорость осаждения: опти-

ческие [13], энергетические [14], зондовые [15] и т. д. В данной статье толщина покрытий измеряется зондовым методом при разном времени осаждения меди и оксида алюминия.

На рис. 8, а представлены результаты измерения толщины пленок в зависимости от времени осаждения, на рис. 8, б – зависимости скорости осаждения от времени осаждения покрытий методом магнетронного распыления.

Средние абсолютные значения скорости осаждения для меди и оксида алюминия составили 25.6 и 0.3 нм/мин соответственно, что необходимо учитывать при последующем формировании тонких пленок с заданными параметрами по толщине слоя.

**Результаты расчета геометрии комбинированной мишени.** Было проведено моделирование островковой структуры (рис. 9) с характеристическим размером островков 100 нм, чтобы учесть граничные условия проявляющихся размерных эффектов.

Для формирования данной структуры необходимо рассчитать геометрические параметры мишени. Из проведенной отработки режимов фор-

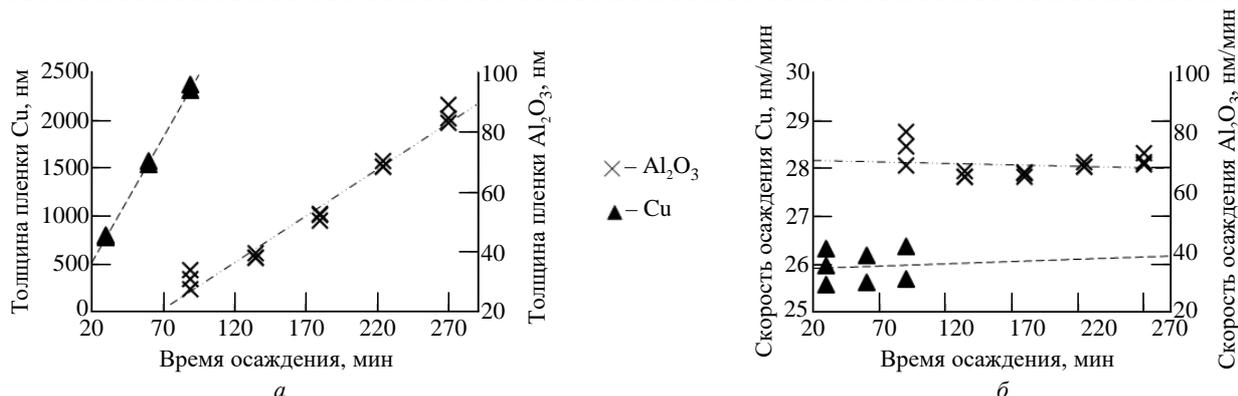


Рис. 8. Зависимости толщины пленки (а) и скорости осаждения (б) от времени работы магнетронного источника  
Fig. 8. Dependencies of film thickness (a) and deposition rate (б) on the operating time of the magnetron source

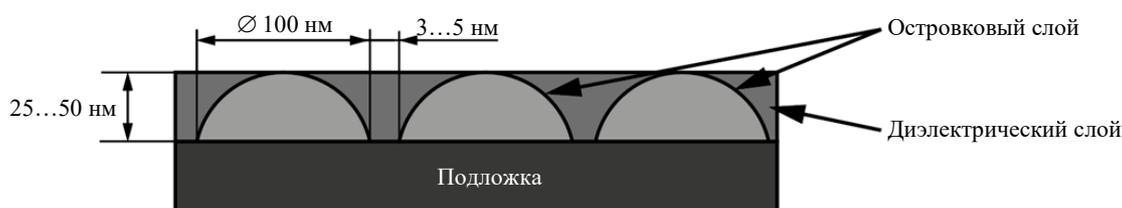


Рис. 9. Структура композиционного слоя диэлектрика с островковыми наноструктурами на подложке  
Fig. 9. Structure of a composite dielectric layer with island nanostructures on a substrate

мирования тонкопленочных покрытий видно, что скорость осаждения меди почти на два порядка выше скорости осаждения оксида алюминия.

Распыление происходит не со всей поверхности мишени, а только в зоне эрозии, поэтому для расчета используется площадь зоны эрозии мишени. Принимаем, что осаждение происходит равномерно по всей площади, тогда скорость роста на единицу площади (для удобства расчета используются квадратные миллиметры) будет равна объемной скорости роста. Наиболее плотное заполнение – это заполнение треугольником. Именно оно учитывается при расчете, так как плотность расположения островков является наиболее важным фактором для функциональных слоев устройств.

Объем одного островка:

$$V_{\text{ост}} = \frac{2}{3} \pi R^3 = \frac{2}{3} \pi 50^3 \approx 261\,799 \text{ нм}^3,$$

где  $R$  – радиус островка.

Площадь, занимаемая одним островком с учетом пространства между островками:

$$S_{\text{ост}} = 2\sqrt{3} \left( R + \frac{r}{2} \right)^2 = 2\sqrt{3} \left( 50 + \frac{3}{2} \right)^2 \approx 9188 \text{ нм}^2,$$

где  $r$  – расстояние между островками.

Объем области с одним островком (металла) и материалом матрицы (диэлектрика):

$$V_{\text{общ}} = S_{\text{ост}} R = 2\sqrt{3} \left( 50 + \frac{3}{2} \right)^2 50 \approx 459\,400 \text{ нм}^3.$$

Объем заполняющего материала (диэлектрика):

$$V_{\text{диэл}} = V_{\text{общ}} - V_{\text{ост}} = 459\,383 - 261\,799 \approx 197\,600 \text{ нм}^3.$$

Исходя из того, что объем осажденных материалов должен быть равен объему материала в структуре, получаем отношение площадей материала диэлектрика и проводника:

$$\frac{S_{\text{расп Cu}}}{S_{\text{расп Al}_2\text{O}_3}} = \frac{V_{\text{ост}} v_{\text{ос Al}_2\text{O}_3}}{V_{\text{диэл}} v_{\text{ос Cu}}} = \frac{261\,799 \cdot 0.3}{197\,600 \cdot 25.6} \approx 0.0155,$$

где  $S_{\text{расп Cu}}$  – площадь распыления меди;  $S_{\text{расп Al}_2\text{O}_3}$  – площадь распыления оксида алюминия;  $v_{\text{ос Al}_2\text{O}_3}$  – объемная скорость осаждения оксида алюминия;  $v_{\text{ос Cu}}$  – объемная скорость осаждения меди.

ждения оксида алюминия;  $v_{\text{ос Cu}}$  – объемная скорость осаждения меди.

Из конструкции магнетрона и экспериментальных данных [12] рассчитано, что площадь зоны эрозии составляет  $1178.1 \text{ мм}^2$ . Тогда площадь распыления меди должна составлять  $18 \text{ мм}^2$ . Центральный диаметр зоны эрозии составляет  $25 \text{ мм}$ . Центральный диаметр кольцевой вставки совпадает с центральным диаметром зоны эрозии ( $d_{\text{эр}}$ ), тогда площадь вставки равна:

$$S_{\text{расп Cu}} = \frac{\pi}{4} \left[ \left( d_{\text{эр}} + \frac{k}{2} \right)^2 - \left( d_{\text{эр}} - \frac{k}{2} \right)^2 \right],$$

где

$$k = \frac{4S_{\text{расп Cu}}}{\pi \cdot 2d_{\text{эр}}} = \frac{4 \cdot 18}{\pi \cdot 2 \cdot 25} = 0.46 \text{ мм}$$

– ширина кольцевой вставки.

Получаем, что кольцевая вставка должна иметь диаметр  $25 \text{ мм}$  и ширину кольца  $0.46 \text{ мм}$ .

Для определения времени осаждения композиционного покрытия необходимо найти суммарную скорость осаждения каждого материала. Скорость осаждения меди, распыленной из медной вставки:

$$\begin{aligned} v_{\text{ос. вст Cu}} &= v_{\text{ос Cu}} \frac{S_{\text{расп Cu}}}{S_{\text{эр}}} \\ &= 25.6 \frac{18}{1178.1} = 0.39 \text{ нм/мин}, \end{aligned}$$

где  $S_{\text{эр}}$  – площадь зоны эрозии.

Скорость осаждения оксида алюминия, распыленного с остаточной площади мишени:

$$\begin{aligned} v_{\text{ос. ост Al}_2\text{O}_3} &= v_{\text{ос Al}_2\text{O}_3} \frac{S_{\text{эр}} - S_{\text{расп Cu}}}{S_{\text{эр}}} \\ &= 0.3 \frac{1178.1 - 18}{1178.1} = 0.30 \text{ нм/мин}. \end{aligned}$$

Суммарная скорость осаждения композиционного слоя  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cu}$ :

$$\begin{aligned} v_{\text{сум}} &= v_{\text{ос. ост Al}_2\text{O}_3} + v_{\text{ос. вст Cu}} = \\ &= 0.39 + 0.30 = 0.69 \text{ нм/мин}. \end{aligned}$$

Тогда время формирования слоя толщиной  $50 \text{ нм}$  составляет:

$$t = \frac{50}{0.69} = 73 \text{ мин.}$$

**Результаты расчета и исследования геометрии композиционного слоя с островковыми наноструктурами.** По результатам расчета геометрических параметров мишени получаем, что объем островка зависит от скорости осаждения меди  $v_{\text{ос. вст Cu}}$  и времени осаждения  $t$ :

$$V_{\text{ост}} = v_{\text{ос. вст Cu}} t S_{\text{ост}}.$$

Выразив площадь островка через геометрические параметры, получим:

$$\frac{2}{3} \pi R^3 = v_{\text{ос. вст Cu}} t \cdot 2\sqrt{3} \left( R + \frac{r}{2} \right)^2. \quad (1)$$

Выразив из (1) радиус островка, получим:

$$R = \frac{0.26}{\pi} A - \frac{0.42B}{\pi A} + \frac{1.73v_{\text{ос Cu}}}{\pi}, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} A &= \\ &= \left\{ \left[ \left( 35\pi^3 r^2 v_{\text{ос Cu}} t + 243 \pi r v_{\text{ос Cu}}^2 + 4.4 r^6 v_{\text{ос Cu}}^3 \right)^2 + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + 4 \left( -15.6\pi r v_{\text{ос Cu}} - 27v_{\text{ос Cu}}^2 \right)^3 \right]^{1/2} + \right. \\ &\quad \left. + 35\pi^3 r^2 v_{\text{ос Cu}} t + 243\pi r v_{\text{ос Cu}}^2 + 4.4 r^6 v_{\text{ос Cu}}^3 \right\}^{1/3}; \\ B &= -15.6\pi r v_{\text{ос Cu}} - 27v_{\text{ос Cu}}^2. \end{aligned}$$

Для оценки расчетов были проведены эксперименты по формированию островкового покрытия из комбинированной мишени. Затем полученные образцы исследованы на СЭМ с целью получения информации о геометрических параметрах структуры. Полученные по СЭМ-изображениям размеры и расстояния сопоставлены с (2). На рис. 10 представлено СЭМ-изображение структуры, полученной при формировании из комбинированной мишени в течение  $600 \text{ с}$ . Как видно из рисунка, структура состоит из островков диаметром  $20 \dots 25 \text{ нм}$  (соответственно, радиусом  $10 \dots 12.5 \text{ нм}$ ) с расстоянием между островками  $8 \dots 15 \text{ нм}$ . Проведя расчет по (2), получим, что радиус островков с учетом технологических параметров процесса должен составлять  $11.6 \text{ нм}$ . Таким образом, экспериментально

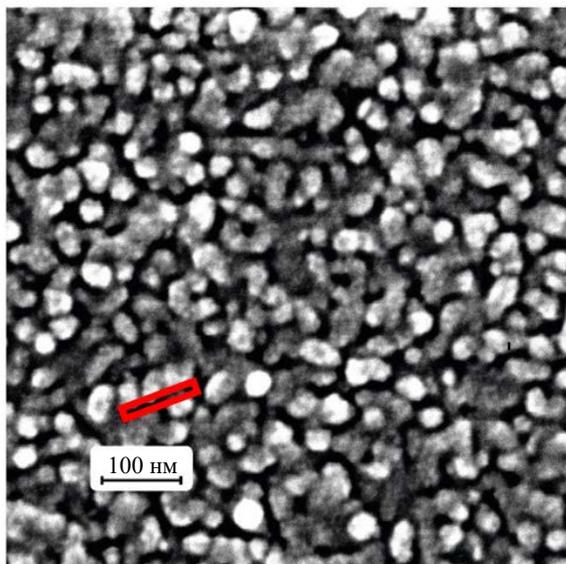


Рис. 10. СЭМ-изображение композиционной структуры  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cu}$  на Si, полученной распылением комбинированной мишени в течение 600 с

Fig. 10. SEM-image of  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cu}$  composite structure on Si obtained by spraying the combined target for 600 s

подтверждена правильность теоретического расчета геометрии островкового покрытия в зависимости от технологических параметров и параметров мишени.

**Заключение.** Предложен способ формирования композиционного покрытия методом магнетронного распыления из комбинированной мишени со вставками различной геометрии.

Исследовано влияние ионной обработки на поверхность подложки кремния с тонкопленочным покрытием: осаждение покрытия оксида алюминия увеличило среднюю шероховатость поверхности с 1.8 до 2.0 нм, но последующее увеличение времени обработки (120 и 600 с) подложки ионами привело к снижению шероховатости менее 2.0 нм и уменьшению разброса значений, что свидетельствует о более однородной поверхности.

#### Авторский вклад

**Сидорова Светлана Владимировна** – определение областей исследования и постановка задачи; обсуждение и анализ результатов; руководство научными исследованиями; подготовка статьи.

**Пименов Илья Евгеньевич** – расчет геометрических параметров мишени и технологических параметров формирования островковых тонких пленок и наноструктур; изготовление мишени и проведение базовых экспериментов по формированию островковых тонких пленок из комбинированной мишени.

**Купцов Алексей Дмитриевич** – отработка скорости осаждения покрытий  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и Cu; формирование тонкопленочных покрытий  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и обработка подложек ионным источником; измерение шероховатости поверхности на атомно-силовом микроскопе и адгезии пленок к подложке.

**Фельде Анастасия Александровна** – формирование тонкопленочных покрытий Cu и обработка подложек ионным источником; измерение шероховатости поверхности подложек с нанесенным покрытием на атомно-силовом микроскопе.

Для формирования качественной структуры диэлектрического слоя оксида алюминия с шероховатостью поверхности не более 2 нм рекомендуется предварительно обрабатывать подложку кремния источником ионов в течение 120 с. Предварительная ионная обработка подложки значительно повышает адгезию пленки, предотвращает образование дефектов и улучшает оптическую чистоту.

Исследованы параметры шероховатости металлической медной пленки нанометровой толщины. Шероховатость поверхности покрытия из меди толщиной 50 нм без ионной обработки подложки примерно в 2 раза больше, чем после предварительной ионной обработки (6.4 и 3.2 нм, соответственно). Шероховатость поверхности покрытия из меди толщиной 100 нм без ионной обработки подложки и после предварительной ионной обработки практически не изменяется и составляет 1.8 нм.

На основе экспериментальных данных о скорости роста покрытий из меди (25.9 нм/мин) и оксида алюминия (0.3 нм/мин) проведен расчет геометрии комбинированной мишени с кольцевой вставкой и времени формирования покрытия. Для формирования структуры с островками диаметром 100 нм и расстоянием между островками 3...5 нм кольцевая вставка должна иметь диаметр 25 мм и ширину 0.46 мм, формирование необходимо проводить в течение 73 мин.

Выведена зависимость радиуса островковой структуры от технологических параметров процесса формирования покрытия методом магнетронного распыления из комбинированной мишени с учетом плотной упаковки островковых структур меди в матрице оксида алюминия. Экспериментальные исследования и оценка геометрии полученных структур на СЭМ показали совпадение измеренных размеров с расчетными.

### Author's contribution

**Svetlana V. Sidorova**, definition of research scopes and problem statement; discussion and analysis of the results; management of scientific research; preparation of the paper text.

**Цыа Е. Pimenov**, the geometric parameters calculation of the target and the formation technological parameters of islet thin films and nanostructures; production of a target and conducting basic experiments on the formation of islet thin films from a combined target.

**Alexey D. Kouptsov**, testing modes the deposition rate of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and Cu coatings; formation of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  thin film coatings and treatment of substrates with an ion source; measurement of surface roughness on an atomic force microscope and films adhesion to the substrate.

**Anastasiya A. Felde**, formation of Cu thin film coatings and treatment of substrates with an ion source; measurement of surface roughness of coated substrates on an atomic force microscope.

### Список литературы

1. Пат. RU 200183 U1. Островковый тонкопленочный конденсатор / О. Г. Андреасян, С. В. Сидорова; опубл. 08.10.2020. Бюл. № 28.
2. Application of Island Thin Films for Microelectronics Devices / S. V. Kiryanov, N. O. Yurkin, A. D. Kouptsov, S. V. Sidorova // Proc. of the 5<sup>th</sup> Intern. Youth Conf. on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, Moscow, Russia, 16–18 March 2023. IEEE, 2023. P. 1–6.  
doi: 10.1109/REEPE57272.2023.10086877
3. An ultra-capacitor for frequency stability enhancement in small-isolated power systems: Models, simulation and field tests / I. Egido, L. Sigrist, E. Lobato, L. Rouco, A. Barrado // Applied Energy. 2015. Vol. 137. P. 670–676.  
doi: 10.1016/j.apenergy.2014.08.041
4. Nano-capacitor-like model using light trapping in plasmonic island embedded microring system / J. Ali, P. Youplao, N. Pornsuwancharoen, M. A. Jalil, S. Chiangga, I. S. Amiri, S. Punthawanunt, M. S. Aziz, G. Singh, P. Yupapin, K. T. V. Grattan // Results in Physics. 2018. Vol. 10. P. 727–730.  
doi: 10.1016/j.rinp.2018.07.013
5. Electron exchange between atomic particle and thin metal island films / E. R. Amanbaev, I. K. Gainullin, E. K. Zykova, I. F. Urazgildin // Thin Solid Films. 2011. Vol. 519, iss. 15. P. 4737–4741.  
doi: 10.1016/j.tsf.2011.01.026
6. Сидорова С. В. Методы формирования тонких пленок: начальная стадия формирования // Справочник. Инженерный журн. 2011. № 9. С. 13–17.
7. Design of a liquid-phase magnetron sputtering small-sized source for the vacuum coating system MVTU-11-1MS / A. D. Kouptsov, D. D. Vasilev, S. V. Sidorova, K. M. Moiseev // J. of Physics: Conf. Series. 2021. Vol. 1799, № 1. P. 012016.  
doi: 10.1088/1742-6596/1799/1/012016
8. Comparative study of plasma and ion-beam treatment to reduce the oxygen vacancies in  $\text{TiO}_2$  and recombination reactions in dye-sensitized solar cells / Md. Khaled Parvez, Gi Moon Yoo, Ju Ho Kim, Min Jae Ko, Sung Ryong Kim // Chemical Physics Letters. 2010. Vol. 495, iss. 1–3. P. 69–72.  
doi: 10.1016/j.cplett.2010.06.038
9. Donnelly V. M., Kornblit A. Plasma etching: Yesterday, today, and tomorrow // J. of Vacuum Science & Technology A. 2013. Vol. 31. P. 050825.  
doi: 10.1116/1.4819316
10. Комаровская В. М., Иващенко С. А. Оптимизация режимов ионной обработки поверхности неметаллических материалов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 3. С. 23–27.
11. Lin K. Y., Low G. H., Chuang I. L. Effects of electrode surface roughness on motional heating of trapped ions // Physical Review A. 2016. Vol. 94, № 1. P. 013418.  
doi: 10.1103/PhysRevA.94.013418
12. Kouptsov A., Maltsev V., Sidorova S. Reduction of Residual Stresses in Aluminum Oxide Films by Ion-Plasma Methods // 6<sup>th</sup> Intern. Youth Conf. on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, Moscow, Russia, 29 Feb.–02 March 2024. IEEE, 2024. P. 1–4.  
doi: 10.1109/REEPE60449.2024.10479846
13. Harrick N. J. Determination of refractive index and film thickness from interference fringes // Applied optics. 1971. Vol. 10, iss. 10. P. 2344–2349.  
doi: 10.1364/AO.10.002344
14. Синтез нанокристаллических пленок гидроксидатапата / В. М. Иевлев, Э. П. Домашевская, В. А. Терехов, В. М. Кашкаров, В. М. Вахтель, Ю. Д. Третьяков, В. И. Путляев, С. М. Баринов, В. В. Смирнов, Е. К. Белоногов, А. В. Костюченко // Конденсированные среды и межфазные границы. 2007. Т. 9, № 3. С. 209–215.
15. Дедкова А. А., Киреев В. Ю., Махиборода М. А. Возможности и ограничения метода контактной профилометрии при определении перепада высот для контроля топологических элементов и толщины слоев // Наноструктуры. Математическая физика и моделирование. 2020. Т. 20, № 2. С. 23–40.  
doi: 10.31145/2224-8412-2020-20—2-23-40

### Информация об авторах

**Сидорова Светлана Владимировна** – кандидат технических наук (2016), доцент кафедры электронных технологий в машиностроении Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баума-

на. Автор более 80 научных работ. Сфера научных интересов – микро- и нанозлектроника; тонкопленочные покрытия и наноразмерные структуры; вакуумные технологические процессы и оборудование.

Адрес: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, Москва, 105005, Россия

E-mail: sidorova@bmstu.ru

<http://orcid.org/0000-0002-3002-1246>

**Пименов Илья Евгеньевич** – инженер-конструктор силовой электроники, аспирант ФГУП "НАМИ". Автор 15 научных работ. Сфера научных интересов: микроэлектроника; СВЧ-электроника; накопители энергии; силовые установки транспортных средств; вакуумные технологические процессы и оборудование.

Адрес: ФГУП "НАМИ", ул. Автомоторная, д. 2, Москва, 125438, Россия

E-mail: iliya.pimenov@nami.ru

<https://orcid.org/0009-0004-9268-0206>

**Купцов Алексей Дмитриевич** – инженер, аспирант кафедры электронных технологий в машиностроении Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Автор 36 научных работ. Сфера научных интересов: микроэлектроника; атомно-силовая микроскопия; вакуумные технологические процессы и оборудование.

Адрес: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, Москва, 105005, Россия

E-mail: alex-kouptsov@bmstu.ru

<https://orcid.org/0009-0002-3997-9722>

**Фельде Анастасия Александровна** – магистрант 1-го года обучения кафедры электронных технологий в машиностроении Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Автор 20 научных работ. Сфера научных интересов: атомно-силовая микроскопия; вакуумные технологические процессы и оборудование.

Адрес: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, Москва, 105005, Россия

E-mail: feldeaa@student.bmstu.ru

<https://orcid.org/0009-0008-4051-4774>

## References

1. Sidorova S. V., Andreasyan O. G. Island Thin-Film Capacitor. Pat. RU 200183 U1. Publ. 08.10.2020. Bull. no. 28.
2. Kiryanov S. V., Yurkin N. O., Kouptsov A. D., Sidorova S. V. Application of Island Thin Films for Microelectronics Devices. Proc. of the 5<sup>th</sup> Intern. Youth Conf. on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, Moscow, Russia, 16–18 March 2023. IEEE, 2023, pp. 1–6. doi: 10.1109/REEPE57272.2023.10086877
3. Egido I., Sigrist L., Lobato E., Rouco L., Barrado A. An Ultra-Capacitor for Frequency Stability Enhancement in Small-Isolated Power Systems: Models, Simulation and Field Tests. Applied Energy. 2015, vol. 137, pp. 670–676. doi: 10.1016/j.apenergy.2014.08.041
4. Ali J., Youplao P., Pornsuwancharoen N., Jalil M. A., Chiangga S., Amiri I. S., Punthawanunt S., Aziz M. S., Singh G., Yupapin P., Grattan K. T. V. Nano-Capacitor-Like Model Using Light Trapping in Plasmonic Island Embedded Microring System. Results in Physics. 2018, vol. 10, pp. 727–730. doi: 10.1016/j.rinp.2018.07.013
5. Amanbaev E. R., Gainullin I. K., Zykova E. K., Urazgildin I. F. Electron Exchange between Atomic Particle and Thin Metal Island Films. Thin Solid Films. 2011, vol. 519, iss. 15, pp. 4737–4741. doi: 10.1016/j.tsf.2011.01.026
6. Sidorova S. V. Thin Films Producing Methods: The Initial Stage. Handbook. An Engineering J. 2011, no. 9, pp. 13–17.
7. Kouptsov A. D., Vasilev D. D., Sidorova S. V., Moiseev K. M. Design of a Liquid-Phase Magnetron Sputtering Small-Sized Source for the Vacuum Coating System MVTU-11-1MS. J. of Physics: Conf. Series. 2021, vol. 1799, no. 1, p. 012016. doi: 10.1088/1742-6596/1799/1/012016
8. Md. Khaled Parvez, Gi Moon Yoo, Ju Ho Kim, Min Jae Ko, Sung Ryong Kim. Comparative Study of Plasma and Ion-Beam Treatment to Reduce the Oxygen Vacancies in TiO<sub>2</sub> and Recombination Reactions in Dye-Sensitized Solar Cells. Chemical Physics Letters. 2010, vol. 495, iss. 1–3, pp. 69–72. doi: 10.1016/j.cplett.2010.06.038
9. Donnelly V. M., Kornblit A. Plasma Etching: Yesterday, Today, and Tomorrow. J. of Vacuum Science & Technology A. 2013, vol. 31, p. 050825. doi: 10.1116/1.4819316
10. Komarovskaya V. M., Ivashchenko S. A. Optimization of Ion Treatment Conditions for Non-Metal Surfaces. Hardening Technologies and Coatings. 2013, no. 3, pp. 23–27. (In Russ.)
11. Lin K. Y., Low G. H., Chuang I. L. Effects of Electrode Surface Roughness on Motional Heating of Trapped Ions. Physical Review A. 2016, vol. 94, no. 1, p. 013418. doi: 10.1103/PhysRevA.94.013418
12. Kouptsov A., Maltsev V., Sidorova S. Reduction of Residual Stresses in Aluminum Oxide Films by Ion-Plasma Methods. 6<sup>th</sup> Intern. Youth Conf. on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, Moscow, Russia, 29 Feb.–02 March 2024. IEEE, 2024, pp. 1–4. doi: 10.1109/REEPE60449.2024.10479846
13. Harrick N. J. Determination of Refractive In-

dex and Film Thickness from Interference Fringes. Applied optics. 1971, vol. 10, iss. 10, pp. 2344–2349.

14. Ievlev V. M., Domashevskaya E. P., Terekhov V. A., Kashkarov V. M., Vakhtel V. M., Tret'yakov Yu. D., Putlyaev V. I., Barinov S. M., Smirnov V. V., Belonogov E. K., Kostyuchenko A. V. Synthesis of Nanocrystalline Hydroxyapatite Films. Condensed Media and Interphase Boundaries. 2007, vol. 9, no. 3, pp. 209–215. (In Russ.)

15. Dedkova A. A., Kireev V. Yu., Makhboroda M. A. Possibilities and Limitations of the Contact Profilometry Method in Determining the Height Difference for Monitoring Topological Elements and Layer Thickness. Nanostructures. Mathematical Physics and Modeling. 2020, vol. 20, no. 2, pp. 23–40. (In Russ.)  
doi: 10.31145/2224-8412-2020-20—2-23-40

### Information about the authors

**Svetlana V. Sidorova**, Cand. Sci. (Eng.) (2016), Associate Professor of the Department of Electronic Technologies in Mechanical Engineering of Bauman Moscow State Technical University. The author of more than 80 scientific publications. Area of expertise: micro- and nanoelectronics; thin-film coatings and nanoscale structures; vacuum technological processes and equipment.

Address: Bauman Moscow State Technical University, 2<sup>nd</sup> Bauman St., 5, build. 1, Moscow 105005, Russia

E-mail: sidorova@bmstu.ru

<http://orcid.org/0000-0002-3002-1246>

**Илья Е. Пименов**, power electronics design engineer, postgraduate student at Federal State Unitary Enterprise "NAMI". The author of more than 15 scientific publications. Area of expertise: microelectronics; microwave electronics; energy storage; power plants of vehicles; vacuum technological processes and equipment.

Address: Federal State Unitary Enterprise "NAMI", Avtomotornaya St., 2, Moscow 125438, Russia

E-mail: iliya.pimenov@nami.ru

<https://orcid.org/0009-0004-9268-0206>

**Alexey D. Kouptsov**, Engineer, Postgraduate student of the Department of Electronic Technologies in Mechanical Engineering of Bauman Moscow State Technical University. The author of 36 scientific publications. Area of expertise: microelectronics; atomic force microscopy; vacuum technological processes and equipment.

Address: Bauman Moscow State Technical University, 2<sup>nd</sup> Bauman St., 5, build. 1, Moscow 105005, Russia

E-mail: alex-kouptsov@bmstu.ru

<https://orcid.org/0009-0002-3997-9722>

**Anastasiya A. Felde**, 1st year Master's degree of the Department of Electronic Technologies in Mechanical Engineering of Bauman Moscow State Technical University. The author of 20 scientific publications. Area of expertise: atomic force microscopy; vacuum technological processes and equipment.

Address: Bauman Moscow State Technical University, 2<sup>nd</sup> Bauman St., 5, build. 1, Moscow 105005, Russia

E-mail: feldeaa@student.bmstu.ru

<https://orcid.org/0009-0008-4051-4774>

---