

На правах рукописи

УДК 621.793.14

Сидорова Светлана Владимировна

**РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ И  
ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ  
ОСТРОВКОВЫХ ТОНКИХ ПЛЕНОК В ВАКУУМЕ**

Специальность 05.27.06 – «Технология и оборудование для производства  
полупроводников, материалов и приборов электронной техники»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва – 2016

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Панфилов Юрий Васильевич**

Официальные оппоненты: **Семёнов Эрнст Иванович**,  
доктор технических наук, профессор, ведущий  
технолог Научно-производственного  
предприятия «ЛАМА»

**Лямин Андрей Николаевич**,  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Радиоэлектроника, телекоммуникации и  
нанотехнологии» ФГБОУ ВО «Московский  
авиационный институт (национальный  
исследовательский университет)»

Ведущая организация: Открытое Акционерное Общество Научно-  
исследовательский институт точного  
машиностроения (**ОАО НИИТМ**)

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г. в \_\_\_\_\_ часов на  
заседании диссертационного совета Д212.141.18 при Московском  
государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана по адресу:  
105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке  
Московского государственного технического университета имени Н.  
Э. Баумана, на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Отзывы в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью организации,  
просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5,  
стр. 1.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д212.141.18,  
доктор технических наук, профессор



Ю.Б. Цветков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность диссертационной работы

Развитие электроники диктует основы перехода к совершенно новым принципам базовых элементов, которые включают использование одноэлектронных и спиновых эффектов, эффектов электронной интерференции, бестоковых переключающих устройств, а также к разработке квантовых технологий создания вычислительных устройств и защищенных систем связи. В России, несмотря на сложности, сопровождающие развитие электронной промышленности в рыночных условиях, имеется значительная база для развития электроники, включающая технологические линии ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, ФГУП «ФНПЦ НИИС им. Ю.Е. Седакова», ОАО «НИИМЭ и МИКРОН», ФГУП «НИИ физических проблем им. Ф.В. Лукина», ОАО НИИТМ, АО «НПП «Исток» им. Шокина», АО «ГЗ «Пульсар», АО «Ангстрем-Т» и др.

Бурное развитие полупроводниковой микро- и нанoeлектроники характеризуется непрекращающимся уменьшением размеров базовых элементов интегральных схем, а также поиском новых возможностей для увеличения степени интеграции и быстродействия полупроводниковых устройств в рамках имеющихся технологий. Островковые тонкие пленки, образующиеся на подложке при гетероэпитаксии в режиме Странского–Крастанова, представляют собой пример структур, уникальные электронные и оптоэлектронные свойства которых делают перспективным их использование при изготовлении полупроводниковых устройств с улучшенными и качественно новыми функциональными свойствами.

Свойства ансамблей осажденных частиц сильно зависят от характера их распределения по подложке. Этому вопросу в последнее время уделяют большое внимание. Особый интерес вызывает возможность осаждения упорядоченных структур, построенных из наночастиц, которые могут служить миниатюрными электронными и/или оптоэлектронными устройствами: элементами памяти, светодиодами, транзисторами и др.

В монографиях Л. С. Палатника и его соавторов представлены механизмы образования и исследования структур тонких пленок, сконденсированных в вакууме. Особое внимание уделено тонким пленкам полупроводников. В работах и исследованиях В. Ф. Бочкарёва, А. А. Горячева, В. В. Наумова рассмотрены механизмы роста тонких пленок в вакууме. В работах Л. К. Ковалёва уделено внимание вариантам конструкции оборудования и технологической оснастки для управления энергомассопереносом в процессах вакуумного нанесения тонких пленок. В работе П. Г. Борзяка и Ю. А. Кулюпина рассмотрены электронные процессы в островковых металлических пленках. В работе Я. Е. Гегузина и Ю. С. Кагановского приведен обзор возможных моделей массопереноса в островковых пленках, формирующихся как на гладких, так и на шероховатых подложках.

Но в настоящее время остаются нерешенными вопросы обоснованных доказательств возможности получения островковых тонких пленок методом

термического испарения и другими методами нанесения тонких пленок в вакууме и возможных способов контроля роста островковых наноструктур.

Таким образом, возникла необходимость в создании научных основ выбора методов и режимов формирования островковых тонких пленок и измерения их электрических и оптических характеристик для выявления взаимосвязей между геометрическими параметрами полученных наноструктур, а также для определения граничных условий формирования островковых тонких пленок с необходимыми функциональными и геометрическими характеристиками.

**Целью диссертационной работы** является обоснование возможности и целесообразности получения островковых тонких пленок методами и средствами технологии нанесения тонких пленок в вакууме.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Выбор метода нанесения тонких пленок в вакууме и разработка специального технологического оборудования для формирования островковых тонких пленок в вакууме.
2. Анализ моделей начальной стадии процесса нанесения тонких пленок в вакууме и разработка методики расчета режимов формирования островковых наноструктур.
3. Разработка методики проведения экспериментальных исследований и изучение процесса формирования островковых тонких пленок в вакууме.
4. Создание функционирующего в режиме удаленного доступа специального вакуумного оборудования модульного типа для обучения и проведения лабораторных и производственных исследований формирования островковых тонких пленок.

#### **Методы исследования**

Для решения поставленных задач в работе использовались теории роста тонких пленок в вакууме, методы дисперсионного анализа и планирования эксперимента.

#### **Научная новизна**

1. В результате моделирования начальной стадии образования на поверхности подложки тонкой пленки впервые получены феноменологические зависимости, объясняющие характер влияния скорости поступления на подложку и энергии пленкообразующих частиц, температуры подложки и геометрических параметров вакуумного технологического оборудования на процесс формирования островковых тонких пленок.
2. Проведенные экспериментальные исследования впервые позволили установить, что критерием появления на подложке островковой тонкой пленки является малый, наноамперный, ток, протекающий по островковой пленке и определяющий размеры и количество формируемых островков.

3. Впервые установлена взаимосвязь между характером изменения туннельного тока, протекающего по островковой пленке, увеличением размеров островков и их коалесценцией.

### **Практическая значимость**

1. Методы расчета технологических режимов и выбор параметров оборудования для формирования островковых тонких пленок могут базироваться на полученных феноменологических зависимостях времени роста островковых пленок от скоростей осаждения в диапазоне от  $10^{-4}$  до  $10^0$  нм/с, энергии пленкообразующих частиц от 0,14 до 4 эВ и температуры подложки от 290 до 1275 К.
2. Создана экспериментальная установка для формирования островковых наноструктур с системой автоматического управления, позволяющей управлять количеством и размерами островков.
3. Разработаны метод интерактивного обучения операторов вакуумного технологического оборудования, студентов и аспирантов высших учебных заведений, проведения профориентации школьников, а также методика выполнения лабораторных и производственных исследований формирования тонкопленочных островковых наноструктур на созданной установке модульного типа с управлением технологическим процессом через глобальную сеть Интернет.

### **На защиту выносятся**

1. Установленные феноменологические зависимости, объясняющие характер влияния скорости поступления на подложку и энергии пленкообразующих частиц, температуры подложки и геометрических параметров вакуумного технологического оборудования на процесс формирования островковых наноструктур.
2. Установленные закономерности между характером изменения туннельного тока, протекающего по островковой пленке, увеличением размеров островков и их коалесценцией.
3. Критерий оценки геометрических характеристик островковых наноструктур – малый, наноамперный, ток, протекающий по островковой пленке.

### **Апробация работы**

Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены на конференциях и выставках: VII, IX Всероссийская выставка научно-технического творчества молодежи (НТТМ). Москва, 2007, 2009; II, VI Всероссийская инновационная молодежная научно-инженерная выставка «Политехника». Москва, 2007, 2011; V, IX международная научно-техническая конференция «Вакуумная техника, материалы, технология». Москва, 2010, 2014; XVI, XVII международная научно-техническая конференция «Высокие технологии в промышленности России». Москва, 2010, 2012; XV, XVI, международная научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника». Сочи, 2008, 2009; XVII, XIX

международная научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника». Судак (Украина), 2010, 2012; III Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». Москва, 2010; II, III Всероссийская школа-семинар студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Наноинженерия». Москва, 2009, 2010; X международная научная конференция «Наноструктурные материалы» (NANO-2010). Рим (Италия), 2010; X, XI, XIII молодежная научно-техническая конференция «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы». Москва, 2008, 2009, 2011.

Положенные в основу диссертации разработки удостоены медали «За успехи в научно-техническом творчестве» (выставка НТТМ, 2007), Диплома лауреата I степени (Студенческая весна, 2008), Диплома I степени (выставка НТТМ, 2009), отмечены стипендией Президента РФ (2010) и Дипломом Министерства образования и науки РФ (2010).

### **Внедрение результатов работы**

Материалы диссертационной работы и полученные результаты использованы в учебном процессе кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Результаты диссертационной работы реализованы в рамках Государственных контрактов №16.647.12.2018 от 25 ноября 2010 г. и №16.647.12.2034 от 16 июня 2011 г.

Предложенная методика контроля роста островковых тонких пленок в вакууме передана в ОАО НИИТМ.

### **Публикации по теме диссертации**

По теме диссертации опубликовано 23 работы общим объемом 2,7 п.л., в том числе, 8 работ в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ (1,1 п.л.); 15 тезисов докладов в сборниках трудов Всероссийских и международных научно-технических конференций (1,6 п.л.).

### **Достоверность полученных результатов**

В работе использованы эмпирические и теоретические методы исследования. Решения задач базируются на экспериментальных данных и известных теоретических положениях технологии тонких пленок в вакууме и математического моделирования. Достоверность полученных результатов подтверждается адекватностью разработанных математических моделей по известным критериям оценки изучаемых процессов, использованием известных положений фундаментальных наук, сходимостью полученных теоретических результатов с данными эксперимента и результатами эксплуатации созданного технологического оборудования.

### **Личный вклад автора**

Диссертация является законченной работой, в которой обобщены результаты исследований, полученные лично автором и в соавторстве. Основная роль в получении и обработке экспериментальных данных, анализе и

обобщении результатов принадлежит автору работы. Обсуждение и интерпретация полученных результатов проводились совместно с научным руководителем и соавторами публикаций. Основные положения и выводы диссертационной работы сформулированы автором.

### **Структура и объем диссертации**

Работа состоит из введения, 5 глав, основных результатов и выводов, списка литературы из 118 наименований и приложения.

Работа содержит 170 страниц, 82 рисунка, 13 таблиц и приложения на 20 страницах.

Во **введении** показана актуальность темы диссертационной работы, изложена суть поставленной научной задачи, сформулированы цель и задачи исследований, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведены аналитический обзор тенденций развития и перспективы применения *островковых тонких пленок* (ОТП) в различных областях науки и техники, в том числе и для электронной техники. Рассмотрены области применения ОТП, приведены примеры приборов и устройств электронной техники на *островковых наноструктурах* (ОНС).

Составлена классификация, по результатам которой выделены три группы методов получения ОТП: использование рельефных поверхностей, методы литографии, методы самоорганизации. Для исследований были выбраны и проанализированы методы из группы самоорганизации атомов и молекул при их осаждении на поверхность подложки в вакууме, как наиболее простые и доступные, позволяющие обеспечивать необходимые латеральные размеры островковых наноструктур.

В качестве методов формирования ОТП в вакууме были выбраны наиболее распространенные и доступные методы термического испарения и магнетронного распыления. Оба метода позволяют выполнять операцию нанесения тонкой пленки с широким диапазоном варьирования технологическими режимами и конструктивными параметрами оборудования, включая технологическую оснастку. Все это позволило добиться требуемого результата в формировании ОНС.

Во **второй главе** рассмотрены математические и физические модели формирования ОТП, предложена методика проведения исследований.

Вопросам изучения и моделирования этапов роста островковых тонких пленок посвящено много работ, из которых следует, что существуют две основные теории начальной стадии образования тонких пленок, описывающие этапы зародышеобразования. Основой для существующих теорий служат модели роста тонкой пленки: капиллярная (Хирс и Паунд) и атомная (Уолтон и Родин). Обе модели в общем виде описывают зависимость скорости  $v$  (шт./ $(\text{м}^2\text{с})$ ) образования зародышей критического размера от энергетических параметров.

Капиллярная модель является наиболее простой, но не всегда дает информацию о размерах критических зародышей и об изменении скорости зародышеобразования. В атомной модели делается акцент на образование зародышей маленького размера (несколько атомов). Для дальнейшего изучения выбрана атомная модель роста, так как она учитывает изменение скорости образования зародышей даже при изменении размера зародыша только на один атом.

Для того, чтобы определить начальное время образования островков, необходимо знать, когда подложка будет «заполнена» максимально возможным количеством зародышей критического размера  $N_{\max}$ , шт./м<sup>2</sup>.

После заполнения подложки максимальным количеством зародышей критического размера начинается рост островков. Таким образом, можно определить время  $t$  образования максимального количества зародышей критического размера, с:

$$t = \frac{N_{\max}}{v} = \frac{\sqrt{\frac{N_0 v}{v_1} \exp\left(\frac{E_d}{kT}\right)}}{a_0 y N_0 \left(\frac{v}{v_1 N_0}\right)^{i^*} v \exp\left(\frac{(i^* + 1)E_a + E_i^* - E_d}{kT}\right)}, \quad (1)$$

где  $N_0$  – плотность мест, на которые могут адсорбироваться атомы, шт./м<sup>2</sup>;  $v$  – скорость осаждения атомов или молекул, шт./(м<sup>2</sup>с);  $v_1$  – частота десорбции адсорбированного атома или молекулы, 1/с;  $a_0$  – длина диффузионного перескока адсорбированного атома (приблизительно равна постоянной решетки подложки, для расчетов выбран кремний), м;  $y$  – длина окружности, ограничивающая поверхность зародыша, на которую возможно поступление атомов из паровой фазы, м;  $i^*$  – число атомов в критическом зародыше, шт.;  $E_i^*$  – энергия диссоциации критического зародыша на адсорбированные атомы, Дж;  $E_d$  – энергия активации поверхностной диффузии адсорбированных атомов, Дж;  $E_a$  – энергия активации десорбции адсорбированного атома, Дж;  $k$  – постоянная Больцмана, Дж/К;  $T$  – температура подложки, К.

В результате анализа литературных данных были выбраны значения необходимых для расчета параметров и по выражению (1) построены графики взаимосвязи времени образования максимального количества зародышей критического размера и температуры подложки (Рисунок 1). Для расчетов была принята типичная скорость осаждения меди на кремний  $10^{-5}$  кг/(м<sup>2</sup>с).

Из зависимостей, представленных на Рисунке 1, видно, что время образования максимального количества критических зародышей очень мало ( $\ll 10^{-16}$  с) и на него сильное влияние оказывают энергетические параметры, в том числе температура подложки.

По результатам моделирования было установлено, что при большей скорости осаждения для образования максимального количества зародышей критического размера достаточно меньшей примерно от 100 до 200 К температуры подложки. Оценочный расчет показал, что устойчивые зародыши

меди размерами от 3 до 7 атомов в зародыше способны образоваться на кремниевой подложке при температурах подложки от 290 до 1275 К для скорости осаждения  $10^{-5}$  кг/(м<sup>2</sup>с). Для меньшей ( $10^{-9}$  кг/(м<sup>2</sup>с)) скорости осаждения меди на кремний был проведен подобный расчет, который подтвердил температурный диапазон.

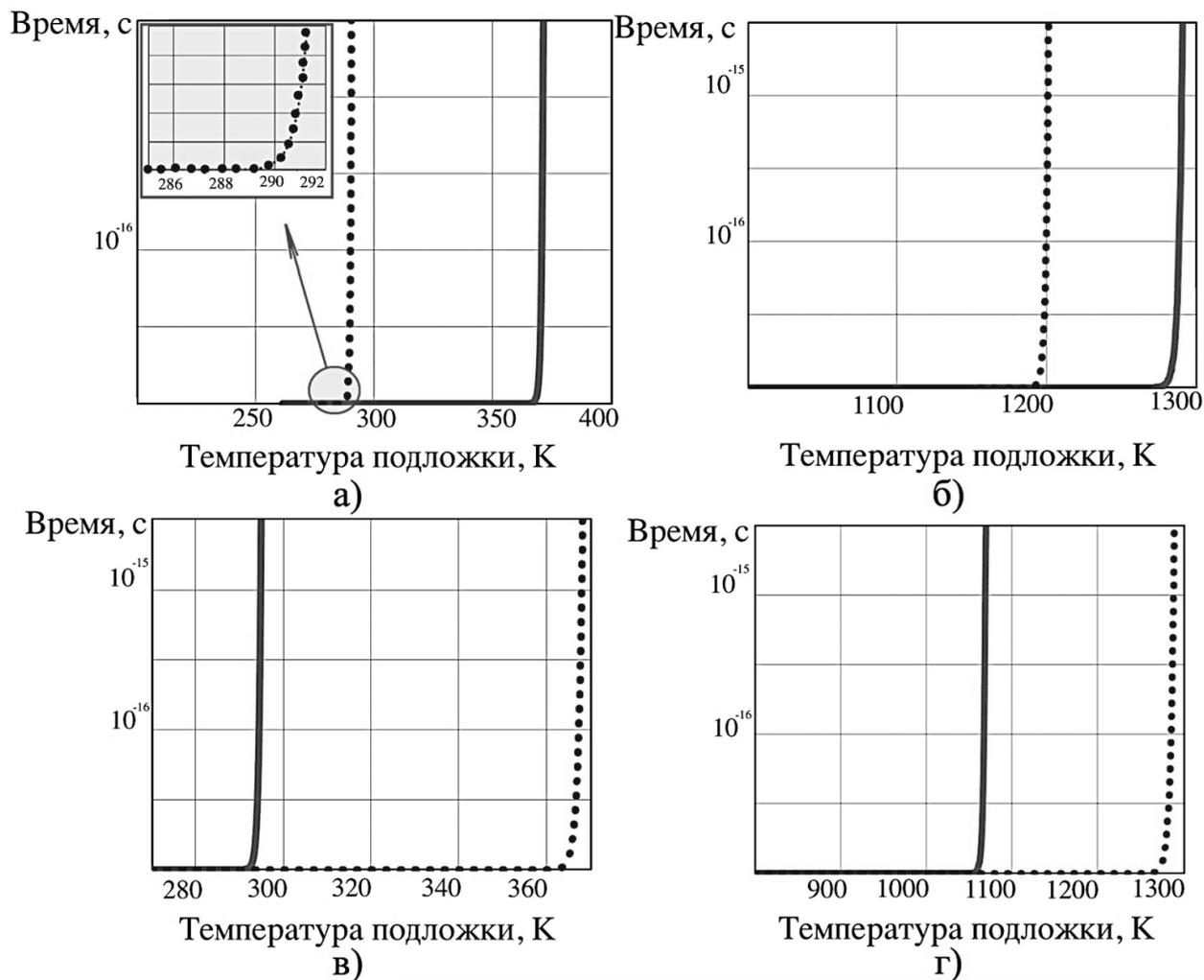


Рисунок 1. Взаимосвязь времени осаждения меди на кремний и температуры подложки при  $E_d > E_a$  (а, в)  $E_d < E_a$  (б, г) для количества атомов в критическом зародыше, шт.:  
а, б – 5 (линия) и 7 (точки); в, г – 5 (линия) и 3 (точки)

Проведенные теоретические исследования показали, что при приемлемом для измерения в лабораторных условиях времени формирования островковых тонких пленок не возможно точно выбрать режимы нанесения пленки и параметры оборудования. Для определения размеров ОНС и расстояний между ними время максимального образования зародышей критического размера не имеет значения в сравнении со временем роста островков. А время увеличения размеров островков можно оценить лишь экспериментально. Поэтому была предложена методика контроля роста островков в процессе формирования островковой тонкой пленки.

Разработанная методика исследования процесса самоорганизации ОНС заключается в измерении силы туннельного тока в процессе формирования тонкой пленки (Рисунок 2) на подложке с предварительно нанесенными на нее (подложку) контактными площадками. В рабочую камеру подложка устанавливается на нагреваемый подложкодержатель; контактные площадки соединены с токовводом.

Также в главе 2 рассмотрены существующие функциональные модели островковых тонких пленок, в которых ток между двумя металлическими островками определяется так же, как между двумя потенциальными ямами, разделенными потенциальным барьером. Показано, что перенос зарядов между островками может осуществляться термоэлектронной (зазор  $\sim 10$  нм) или автоэлектронной эмиссией в вакуум или подложку, а также туннелированием (зазор  $\sim 2-3$  нм) электронов через барьер, возникающий в системе металл–вакуум–металл.

В третьей главе рассмотрено технологическое (Рисунок 3) и измерительное оборудование для формирования и контроля роста островковых тонких пленок.

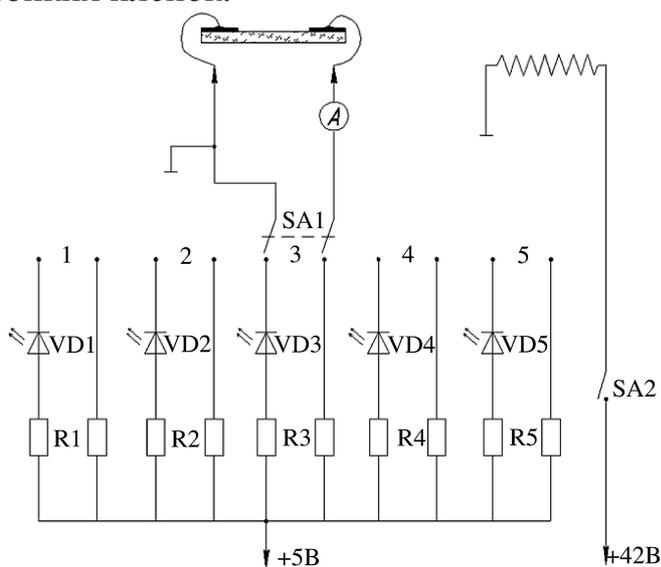


Рисунок 2. Электрическая схема контроля туннельного тока



Рисунок 3. Модернизированная малогабаритная вакуумная установка модульного типа

В качестве основных критериев обзора и анализа оборудования для нанесения тонких пленок в вакууме, потенциально пригодного для реализации технологии формирования ОТП, выбраны следующие:

- малогабаритность оборудования (эксплуатация в лаборатории);
- наглядность метода нанесения (легкость наблюдения за выполнением технологического процесса);
- модульность (возможность быстрой смены модулей позволяет выполнять различные технологические процессы при сохранении компактных габаритов);
- низкая стоимость.

По приведенным критериям были проанализированы установки вакуумного нанесения тонкопленочных покрытий таких компаний, как Oerlikon AG (Leybold), ООО «ЭСТО-Вакуум», ОАО НИИТМ, ЗАО «НТО» (SemiTEq). Однако, в наибольшей степени приведенным выше критериям соответствует вакуумная установка модульного типа, разработанная на кафедре «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н. Э. Баумана. Для проведения исследований и отработки технологического процесса формирования ОТП эта установка была модернизирована и оснащена современной измерительной техникой.

Модernизированная установка УВН-1М (Рисунок 3) позволяет проводить нанесение пленок в вакууме четырьмя наиболее распространенными методами: термическое испарение, магнетронное распыление, дуговой разряд и плазмохимическое осаждение.

Для контроля процесса роста ОНС по туннельному току между островками выбран пикоамперметр Keithley 6485, который позволяет измерять токи малой величины, начиная от 20 фА.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований формирования ОТП и статистическая обработка полученных результатов.

По разработанной методике в процессе формирования ОТП фиксировали изменение силы туннельного тока во времени. При увеличении размеров ОТП расстояние между отдельными островками уменьшалось, что приводило к возрастанию силы туннельного тока.

В результате проведенных экспериментов была получена серия кривых, аналогичных представленной на Рисунке 4 зависимости  $I(t)$ . На кривой  $I(t)$  можно выделить три зоны, первая из которых – зона «а» – иллюстрирует подготовку к процессу осаждения, когда заслонка закрыта и испаряемый материал не поступает на подложку. Приведен скан поверхности ситалла без покрытия, полученный с помощью сканирующего зондового микроскопа Солвер NEXТ (NT-MDT). Сопротивление ситалловой подложки без пленки велико – пикоамперметр зафиксировал фоновый ток  $10^{-10}$  А.

Зона «б» иллюстрирует непосредственно процесс осаждения пленки и разделена на два характерных фрагмента для времени осаждения 20 и 40 с. Полученные сканы поверхности демонстрируют рост размеров ОНС на ситалловой подложке в указанные моменты времени до размеров 20 и 60 нм, соответственно. Туннельный ток в этом случае достигает величин, порядка  $10^{-7}$  А.

Для зоны «в» процесс осаждения меди прекращен, заслонка закрыта. Полученная пленка имеет сплошную структуру, о чем свидетельствует сопротивление, близкое к нулю.

Резкое падение («провисание») силы тока в процессе нанесения может быть связано с процессом коалесценции островков, когда происходит слияние зародышей критического размера, сами островки по размеру растут, соединяясь с соседними островками, и расстояние между ними увеличивается, а сила тока

уменьшается. На графике зависимости силы тока от времени об этом свидетельствуют точки при 20 и 40 с. Интервал между этими значениями времени указывает на этап коалесценции островков. Этот процесс хорошо проиллюстрирован в работах В. Ф. Бочкарёва и других авторов.

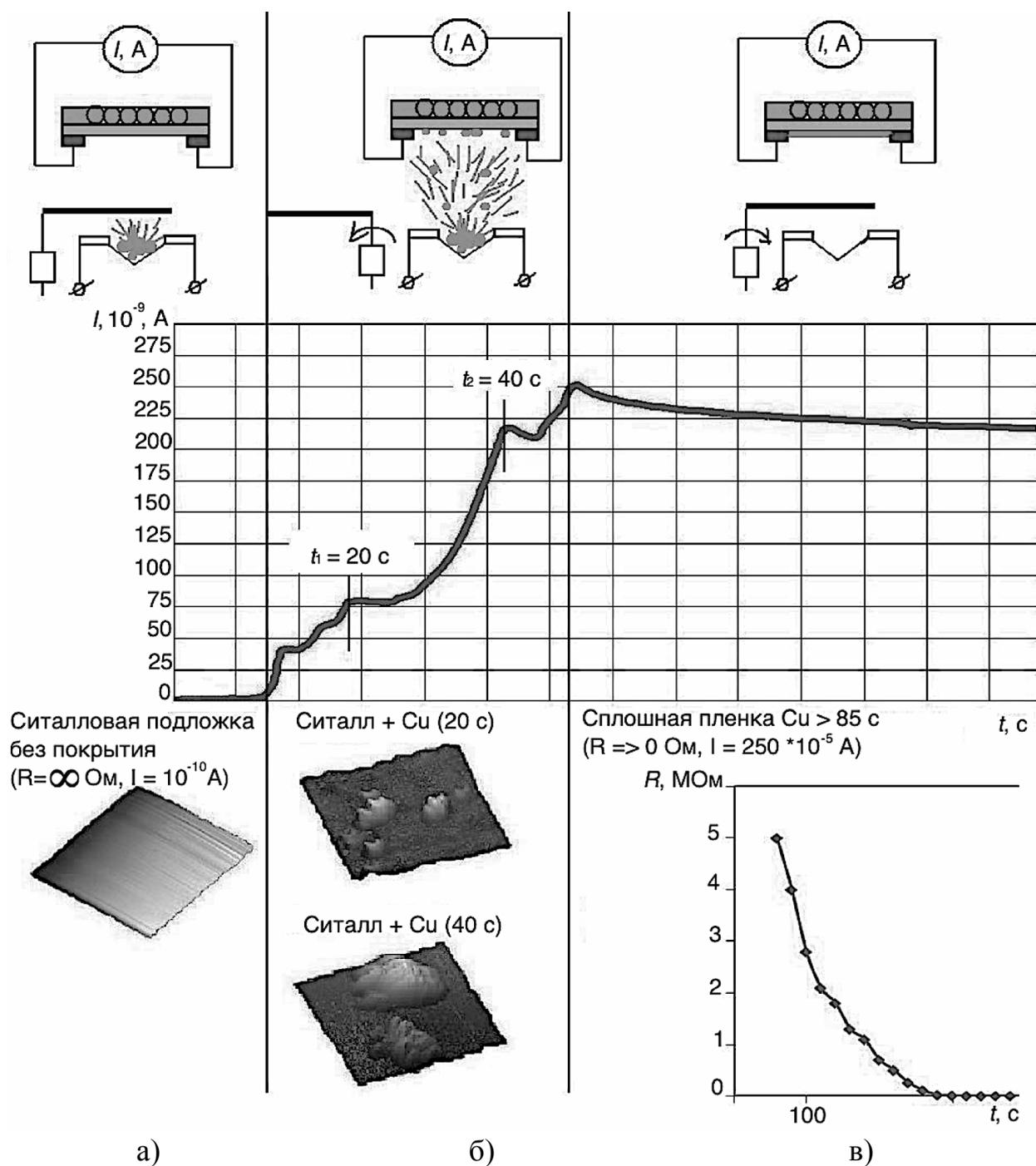


Рисунок 4. Характерная кривая зависимости туннельного тока ОТП от времени

Из полученных результатов следует, что при времени нанесения пленки меди 20 с расстояние между островками меньше, чем при времени нанесения 25 с, но больше, чем при 40 с (Рисунок 4, б), а «провисание» графика в интервале времени от 20 до 40 с свидетельствует об изменении расстояния между островками – одного из параметров исследований.

Таким образом, можно утверждать, что разработанная методика позволяет отслеживать этапы формирования ОТП, отражающие процесс многократной коалесценции островков, и оценить предполагаемые размеры островковой пленки в зависимости от времени нанесения по критерию «сила туннельного тока».

В результате проведения экспериментальных исследований стало ясно, что на размер островков ( $D$ , нм) оказывают влияние технологические параметры: время формирования ( $t$ , с), расстояние испаритель–подложка ( $h$ , мм), температура подложки ( $T$ , К). Полученные экспериментальные зависимости размера островка от технологических параметров представлены на Рисунке 5.

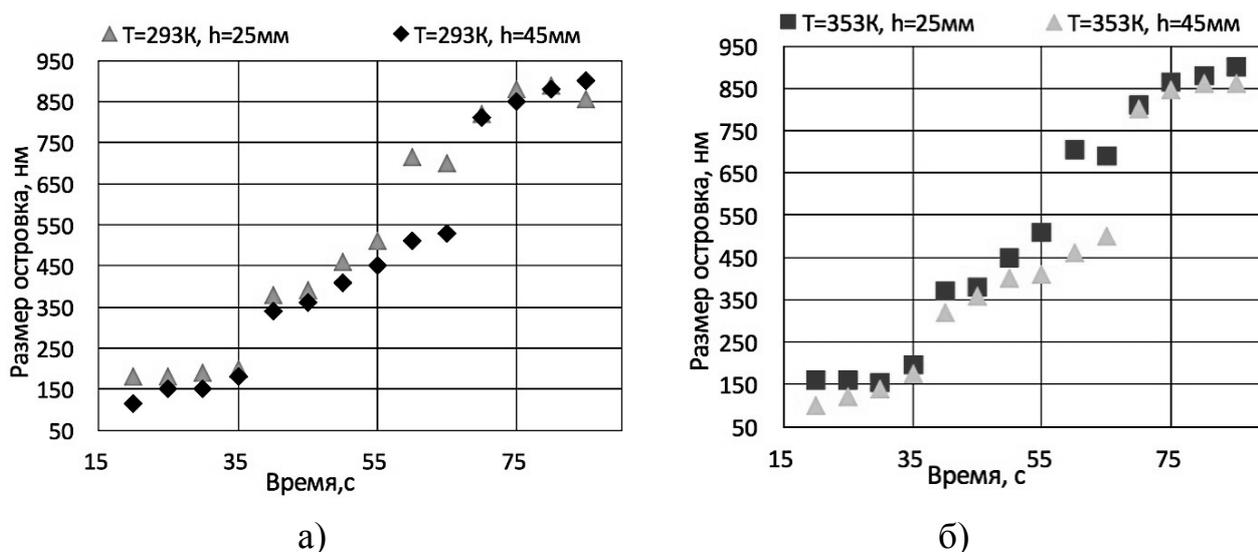


Рисунок 5. Экспериментальные результаты зависимости размера ОТП от времени при  $T = 293\text{ K}$  (а) и  $T = 353\text{ K}$  (б)

Для того, чтобы можно было оценить размер  $D$  островка в зависимости от параметров формирования ОТП, был проведен полный факторный эксперимент и на основе полученных статистических данных построена математическая модель – система уравнений регрессии:

$$D = \begin{cases} 175 + 27x_1 - 22x_2 - 8x_3 + 10x_1x_2 & \text{для } t \in [20; 35]; \\ 498 + 134x_1 - 59x_2 - 8x_3 - 36x_1x_2 & \text{для } t \in [40; 65]; \\ 880 + 41x_1 - 14x_2 & \text{для } t \in [70; 85], \end{cases} \quad (2)$$

где  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  – безразмерные значения факторов времени нанесения, расстояния испаритель–подложка и температуры подложки, соответственно.

Интересно, что выбранные временные интервалы характеризуются различными физическими процессами, происходящими на подложке, с точки зрения количества ( $N$ , шт./мкм<sup>2</sup>) островков и их размера ( $D$ , нм): от 20 до 35 с –  $N$  и  $D$  увеличиваются; от 40 до 65 с –  $N$  стабилизировано,  $D$  растет; от 70 до 85 с –  $N$  уменьшается,  $D$  растет.

Полученные по модели результаты были сопоставлены с экспериментальными и представлены в виде серии зависимостей размера

островка от времени формирования ОТП при разных температурах подложки и расстояниях испаритель–подложка.

На Рисунке 6 приведены экспериментальные данные и полученные по модели зависимости размера островка от времени формирования ОТП при разных температурах (293 и 353 К) подложки и расстояниях испаритель–подложка (25 и 45 мм). Как видно из графиков, на первом промежутке расчетная и экспериментальная зависимости практически совпадают, а для остальных промежутков времени расхождение данных эксперимента и результатов моделирования незначимы, что подтверждается проведенными проверками адекватности. Из построенных зависимостей видно, что для получения островков размерами не более 200 нм целесообразно проводить нанесение при условии минимизации температуры подложки и увеличения расстояния испаритель–подложка.

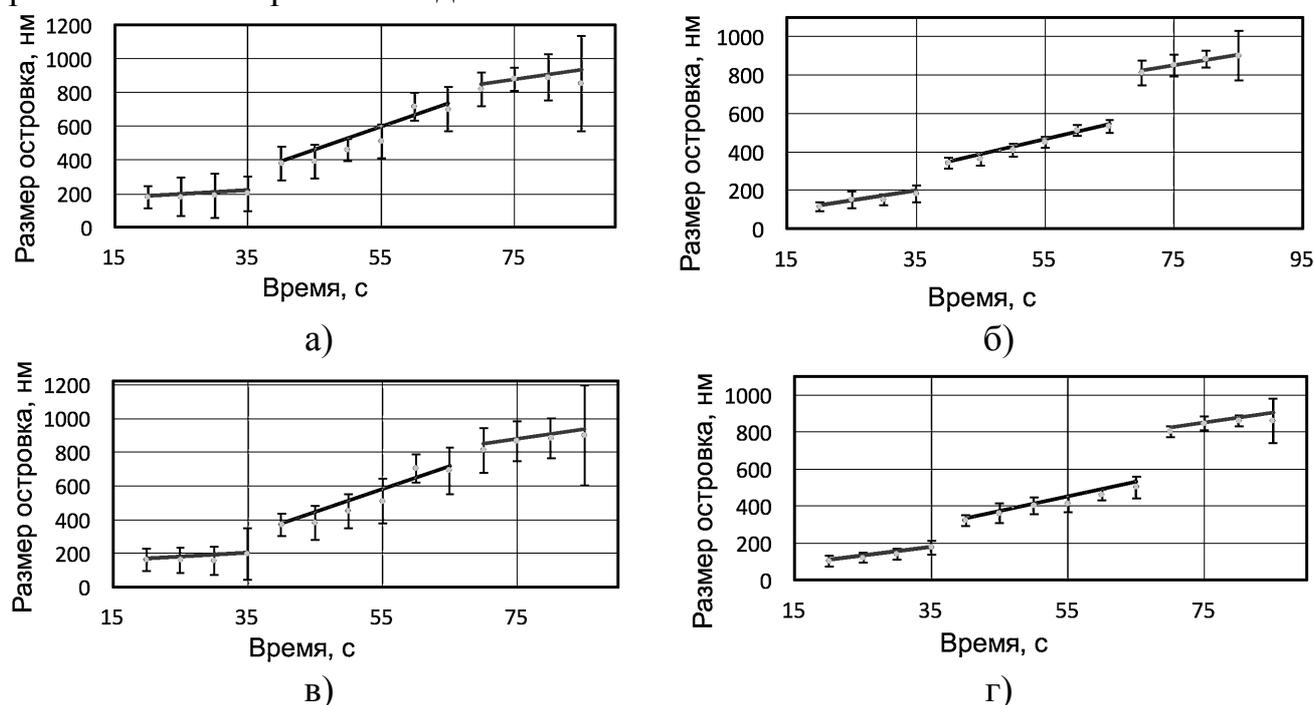


Рисунок 6. Экспериментальные результаты (точки) и полученные по моделям зависимости (линии) размера ОТП от времени при:

а)  $T = 293$  К,  $h = 25$  мм; б)  $T = 293$  К,  $h = 45$  мм;

в)  $T = 353$  К,  $h = 25$  мм; г)  $T = 353$  К,  $h = 45$  мм

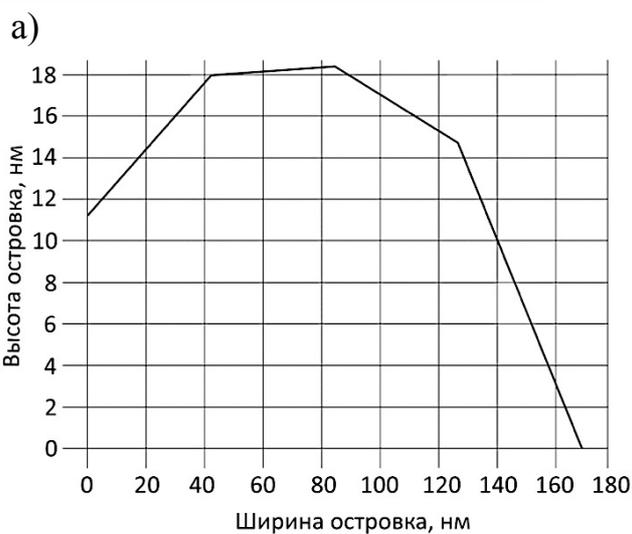
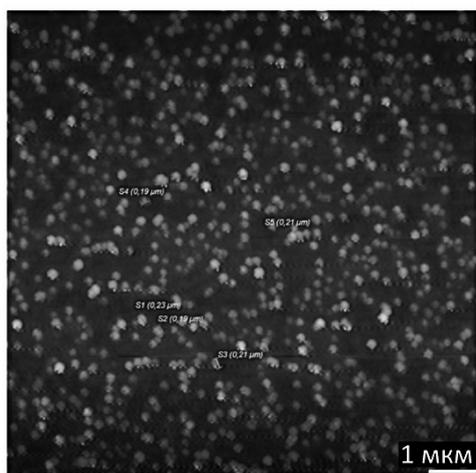
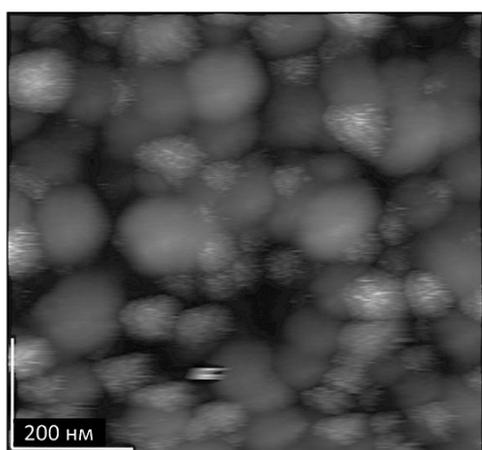
Линейный характер полученных зависимостей выявлен и подтвержден статистическими обработками, как для общего интервала времени от 20 до 85 с, так и для рассмотренных промежутков от 20 до 35 с, от 40 до 65 с и от 70 до 85 с.

Наибольшее влияние на размер ОТП для всех рассмотренных промежутков времени оказывает время формирования островков, немного меньшую значимость для размера ОТП проявляет параметр расстояние испаритель–подложка. Однако, для 3-го промежутка ( $> 70$  с) не оказывающим влияние фактором является температура подложки, что может быть обусловлено изменением механизма роста пленки (пар–кристалл или пар–

жидкость–кристалл). А также незначимость фактора температуры может быть связана с малым интервалом варьирования для этого промежутка времени.

Характер наклона зависимости размера ОТП от времени для расстояния 45 мм на всех интервалах практически одинаков, что говорит о равномерном росте ОТП, регулярной структуре островков. Однако, для более близкого расстояния (25 мм) изменение размера ОТП происходит не так равномерно: до 35 с отмечается более «плавный» рост размеров ОТП (при этом количество островков на подложке увеличивается); с 40 до 65 с размеры островков растут быстрее (при этом их количество на подложке стабилизировано); после 70 с рост замедляется (количество отдельных островков уменьшается). Это может быть связано с процессом коалесценции островков на 2-ом временном промежутке, тогда как на 3-ем промежутке рост «крупных» островков уже не происходит так быстро из-за образования в каналах новых зародышей и многократной коалесценции.

Вместе с результатами экспериментов получения ОТП меди на ситалле в главе 4 представлены результаты исследования ОТП меди на кремнии и алюминия и олова на ситалле (Рисунок 7).



б)

Рисунок 7. Характерные АСМ-изображения образцов ОТП и профиль островков из меди на кремнии (а) и алюминия на ситалле (б)

Исследования полученных образцов из меди на кремнии (Рисунок 7, а) подтвердили результаты экспериментальных исследований формирования ОТП из меди на ситалле по контролю тока. Были получены образцы с размерами ОНС: высота островка от 8 до 12 нм, диаметр островка от 60 до 180 нм.

Анализ топологии поверхности полученных образцов алюминия (Рисунок 7, б) и олова показал, что для получения островковых наноструктур размером до 200 нм методом термовакуумного испарения необходимо соблюдать режимы формирования: время процесса 40 с, расстояние испаритель–подложка 80 мм (максимально увеличено, исходя из технологических возможностей конструкции). При этом высота ОТП будет находиться в пределах до 20 нм для алюминия и до 100 нм для олова.

Для образцов из меди на ситалле было проведено измерение оптических характеристик. Анализ полученных спектров отражения показывает, что сплошное медное покрытие имеет схожий с ситаллом без покрытия коэффициент отражения (2,5 %) в видимом диапазоне длин волн. Подогрев подложки способствует увеличению коэффициента отражения до 25–35 % в зависимости от времени осаждения. Металлические ОНС, повышая развитость поверхности, увеличивают коэффициент отражения.

**В пятой главе** предложена реализация разработанной методики исследования процесса самоорганизации при росте островковых тонких пленок в режиме удаленного доступа.

Разработанный в рамках выполнения Государственного контракта №16.647.12.2018 от 25 ноября 2010 г. по теме «Создание функционирующего в режиме удаленного доступа интерактивного учебно-научного комплекса для выполнения работ по формированию наноструктурированных тонкопленочных покрытий с использованием современного высоковакуумного оборудования модульного типа и его виртуального симулятора» аппаратно-программный комплекс предназначен для реализации образовательных программ подготовки бакалавров и магистров по направлению «Наноинженерия» и «Электроника и наноэлектроника», выполнения научно-исследовательских работ в области нанесения тонкопленочных наноструктурированных покрытий с последующей обработкой результатов и формированием библиотеки экспериментов.

Учебно-методический комплекс состоит из модернизированной установки для формирования наноструктурированных тонкопленочных покрытий, системы автоматического управления и информационного модуля, обеспечивающего информационную среду для проведения обучения через каналы удаленного доступа.

Входящие в состав учебно-методического комплекса оборудование и доступные методики (в частности – разработанная методика контроля роста островковых тонких пленок) обеспечивают реализацию максимально возможной совокупности методов и методик, предусмотренных образовательными стандартами в области «Электроники и наноэлектроники» и «Наноинженерии».

Практическая ценность работы состоит в том, что удаленный доступ к уникальному оборудованию позволяет пользователю, не имеющему больших вычислительных мощностей и технических возможностей, проводить эксперименты непосредственно с любого компьютера, имеющего доступ в сеть Интернет.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Для изучения процесса формирования островковой тонкой пленки в вакууме наиболее эффективными являются хорошо отработанные и простые в эксплуатации методы термического испарения и магнетронного распыления.
2. Моделирование начальной стадии процесса нанесения тонких пленок в вакууме и получение феноменологической зависимости позволили установить, что островковые наноструктуры формируются в диапазоне скоростей осаждения от  $10^{-4}$  до  $10^0$  нм/с, при энергии атомов от 0,14 до 4 эВ и температуре подложки от 290 до 1275 К, причем с повышением температуры подложки размеры островков увеличивается.
3. Предложен критерий оценки геометрических характеристик островковых наноструктур – малый, наноамперный, ток, протекающий по островковой пленке, и установлена взаимосвязь между характером изменения туннельного тока, увеличением размеров островков и их коалесценцией.
4. Для получения островковых наноструктур из меди диаметром  $< 50$  нм рекомендуется задать пороговое значение тока 25 нА, а диаметром  $> 50$  нм – 250 нА.
5. Для получения островковых наноструктур диаметром до 200 нм из олова и алюминия на ситалле методом термовакуумного испарения необходимо соблюдать режимы формирования: время процесса 40 с, расстояние испаритель–подложка 80 мм. При этом высота островков для олова достигает 100 нм, для алюминия – 20 нм.
6. Показано, что характер спектра отражения для островковой пленки отличается от спектра отражения сплошной пленки или материала основы (ситалл). Коэффициент отражения островковой пленки превышает коэффициент отражения сплошной металлической пленки на длинах волн от 400 до 700 нм в 5–6 раз.
7. В результате проведения полного факторного эксперимента построена математическая модель зависимости размера островка от времени нанесения, расстояния испаритель–подложка и температуры подложки. Линейность модели статистически обоснована. Для получения островков размерами не более 200 нм целесообразно проводить нанесение при условии минимизации температуры подложки и увеличения расстояния испаритель–подложка.
8. Показана применимость и проведена апробация разработанного интерактивного учебно-методического нанотехнологического комплекса, функционирующего в режиме удаленного доступа, для практического изучения процесса самоорганизации островковых наноструктур, с использованием разработанной методики, и выбора метода и режимов их формирования.

## **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ**

1. Формирование наноразмерных пленок титана на кремнии / С. В. Сидорова [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана: «Наноинженерия». 2010. С. 169–177. (0,563 п.л./0,188 п.л.)
2. Сидорова С. В., Юрченко П. И. Исследования формирования островковых наноструктур в вакууме // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 5. С. 9–11. (0,188 п.л./0,095 п.л.)
3. Сидорова С. В., Юрченко П. И. Формирование островковых наноструктур в вакууме // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2011. № 10. С. 5. (0,063 п.л./0,061 п.л.)
4. Сидорова С. В. Методы формирования тонких пленок: начальная стадия формирования // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2011. № 9. С. 13–17. (0,25 п.л./0,25 п.л.)
5. Научная работа студентов в лаборатории ионно-плазменных процессов и нанотехнологии / С. В. Сидорова [и др.] // Наноинженерия. 2012. № 2. С. 44–48. (0,313 п.л./0,104 п.л.)
6. Интерактивный учебно-научный комплекс для выполнения работ по формированию наноструктурированных тонкопленочных покрытий / С. В. Сидорова [и др.] // Наноинженерия. 2012. № 3. С. 31–37. (0,5 п.л./0,167 п.л.)
7. Сидорова С. В., Панфилов Ю. В. Контроль роста островковых наноструктур в вакууме // Наноинженерия. 2012. № 9. С. 8–12. (0,313 п.л./0,157 п.л.)
8. Сидорова С. В., Панфилов Ю. В., Рябов В. Т. Нанотехнологическая вакуумная установка модульного типа // Наноинженерия. 2014. № 8. С. 14–18. (0,25 п.л./0,083 п.л.)

### **Другие статьи и материалы конференций**

9. Sidorova S. V. Island nanostructures forming methods // X International Conference on «Nanostructured Materials» (NANO–2010) Roma, Italy. P. 167. (0,063 п.л./0,063 п.л.)
10. Сидорова С. В. Островковые наноструктуры: моделирование процесса роста в вакууме // Сб. трудов III Всеросс. школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по напр. «Наноинженерия». М., 2010. С. 396–400. (0,313 п.л./0,313 п.л.)
11. Сидорова С. В. Обзор методов формирования и моделирование роста островковых наноструктур в вакууме // Сб. трудов III Всеросс. конф. молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». М., 2010. С. 142. (0,063 п.л./0,063 п.л.)
12. Сидорова С. В., Аветисян А. М., Юрченко П. И. Проведение экспериментальных исследований формирования островковых наноструктур в вакууме // Сб. трудов III Всеросс. конф. молодых ученых и специалистов

- «Будущее машиностроения России». М., 2010. С. 142–143. (0,125 п.л./0,042 п.л.)
13. Сидорова С. В., Куликов И. Н., Тетерук Д. В. Установка вакуумного напыления модульного типа // Мат. V МНТК «Вакуумная техника, материалы, технология». М.: МГИЭиМ(ТУ), 2010. С. 137–139. (0,188 п.л./0,065 п.л.)
14. Сидорова С. В., Аветисян А. М., Юрченко П. И. Экспериментальные исследования островковых наноструктур в вакууме // Сб. трудов III Всеросс. школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по напр. «Наноинженерия». М., 2010. С. 126–129. (0,25 п.л./0,085 п.л.)
15. Сидорова С. В., Куликов И. Н., Тетерук Д. В. Определение зависимости размеров островковых наноструктур от режимов нанесения // Мат. XVI МНТК «Высокие технологии в промышленности России». М., 2010. С. 425–428. (0,25 п.л./0,085 п.л.)
16. Сидорова С. В., Панфилов Ю. В. Методики расчета и исследования формирования островковых наноструктур // Мат. XVI МНТК «Высокие технологии в промышленности России». М., 2010. С. 417–420. (0,25 п.л./0,125 п.л.)
17. Сидорова С. В., Куликов И. Н., Тетерук Д. В. Исследование влияния технологических режимов на размеры островковых наноструктур // Мат. XVII НТК с уч. зарубеж. спец. «Вакуумная наука и техника». М.: МГИЭиМ(ТУ), 2010. С. 211–215. (0,313 п.л./0,105 п.л.)
18. Сидорова С. В., Юрченко П. И. Начальная стадия роста пленки: Формирование островковых наноструктур // Сб. трудов XIII молодежной НТК «Научно-технологические технологии и интеллектуальные системы». М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. С. 293–296. (0,25 п.л./0,125 п.л.)
19. Сидорова С. В., Юрченко П. И. Нанотехнологическая вакуумная установка модульного типа // Сб. трудов V Всеросс. студенческой НТК «Вакуумная техника и технология». Казань. 2011. С. 128–129. (0,125 п.л./0,065 п.л.)
20. Сидорова С. В., Панфилов Ю. В. Контроль роста островковых наноструктур в вакууме // Мат. XIX НТК с уч. зарубеж. спец. «Вакуумная наука и техника». М.: МГИЭиМ(ТУ), 2012. С. 157–159. (0,188 п.л./0,095 п.л.)
21. Вакуумная установка настольного типа для обучения студентов и проведения научных исследований / С. В. Сидорова [и др.] // Вакуумная наука и техника. Т. 22. № 2. 2012. С. 119–122. (0,188 п.л./0,063 п.л.)
22. Сидорова С. В., Панфилов Ю. В. Рост островковых наноструктур в вакууме // Мат. XVIII НТК «Высокие технологии в промышленности России». М., 2012. С. 259–263. (0,313 п.л./0,16 п.л.)
23. Лабораторная база наноинженерии на кафедре «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана / С. В. Сидорова [и др.] // Мат. IX МНТК «Вакуумная техника, материалы, технология». М., 2014. С. 212–216. (0,313 п.л./0,104 п.л.)