

4. Дубинин С. А., Баклыков Д. А. Формирование тонкопленочных покрытий на установке PLATIT π 80. [Электронный ресурс] // Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии»: материалы конференции, 4 – 7 апреля, 2017, Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана. – М.: ООО «КванторФорм», 2017.– № гос. регистрации 0321701287.– URL: studvesna.ru?go=articles&id=1896 (дата обращения: 30.05.2017).– Загл. с экрана.

Стенд контроля начальных стадий роста металлических островковых тонких пленок и наноструктур и отработка режимов их формирования

А. А. Исаева, М. А. Пронин, С. В. Сидорова
Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2-я Бауманская, 5, кафедра МТ-11
E-mail: sidorova_bmstu@mail.ru

Приведены области применения и преимущества использования островковых тонких пленок и наноструктур для областей науки и техники. Для контроля начальных стадий роста тонкопленочных покрытий организован стенд, представлены базовые экспериментальные исследования. Проведена отработка режимов формирования тонкопленочных покрытий. Построена математическая модель зависимости геометрических параметров пленки от параметров процесса.

RND tool for investigation of initial phases of metal island thin films and nanostructures growth and their formation modes testing. A.A. Isaeva, M. A. Pronin, S. V. Sidorova. The application and advantages fields of the island thin films use and nanostructures for science and technology are presented. RND tool for investigation of initial phases of metal island thin films and nanostructures growth is created, basic experimental studies are presented. Thin-film coatings formation mode testing was carried out. The math model of film geometrical parameters dependence on process parameters is constructed.

Введение

В условиях непрекращающейся гонки за размерами полупроводниковых устройств мы приближаемся к технологическому пределу, необходимы новые методы, конструкции миниатюрных устройств, которые будут функционировать на основе квантовых эффектов, эффектов интерференции [1].

Одним из способов реализации новейших устройств являются островковые тонкие пленки (ОТП) и наноструктуры (ОНС). Островковые наноструктуры, предназначенные для применения в качестве элементов электронных устройств, должны быть в конечном итоге размещены на подложке. 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, лазерами и светодиодами в ближнем ИК-диапазоне, фотоприемниками для среднего ИК-диапазона, однофотонными приемниками, однофотонными генераторами, одноэлектронными транзисторами, экранами, переключателями др. [1].

Отличие свойств малых частиц (наноструктур) от свойств массивных образцов было замечено уже давно и используется в самых разнообразных технических приложениях. Размерные эффекты, которые проявляются в материалах и структурах на нанометровом уровне, в отличие от массивных образцов до сих пор не все обнаружены, но очень широк спектр

применения. По нескольким примерам можно судить насколько обширны приложения свойств наноразмерных частиц.

Например, ОТП увеличивают прозрачность поверхностей стекол оптических приборов космических аппаратов [2]. Используются ОНС для создания экранов цифровых и буквенно-цифровых индикаторов; производства элементов памяти [3]. Кроме того, тонкопленочные покрытия используются в газовых сенсорах для увеличения чувствительности. А изменяя газочувствительный слой и рабочую температуру, можно управлять селективностью и чувствительностью сенсора к различным компонентам [4, 5]. Перспективное направление применения ОНС в микроэлектронике получили элементы памяти. К основным достоинствам такой памяти можно отнести энергонезависимость, высокое быстродействие, малые размеры ячейки записи информации, низкое энергопотребление [6, 7].

Также ОТП используются в качестве каталитических затравок для направленного выращивания углеродных нанотрубок (УНТ) [8].

Благодаря применению ОТП и ОНС для создания приборов и устройств микро- и нанoeлектроники, увеличивается быстродействие, уменьшается энергопотребление. К преимуществам приборов и устройств на основе ОТП следует отнести миниатюризацию, снижение энергопотребления и увеличение быстродействия.

Для создания приборов и устройств на основе массива островковых структур необходимо знать латеральные размеры островка, так как от размера и формы зависят свойства прибора. Способом контроля островковых наноструктур во время их роста является контроль туннельного тока между островками, возникающего при росте.

Описание стенда контроля начальных стадий роста островковых тонкопленочных покрытий

Для проведения эксперимента по измерению тока во время нанесения тонкой пленки необходимо сформировать на подложке контактные площадки из меди. Контактные площадки формируются при помощи метода термического испарения. На подложку, на которой надо их сформировать, кладется маска в виде кусочка такого же ситалла зеркальной поверхностью к зеркальной с требуемыми размерами. Контактные площадки могут быть сформированы любым методом нанесения, однако площадки, полученные методом магнетронного распыления, имеют лучшую адгезию к поверхности подложки, и меньше истираются в случае повторного использования образцов.

После нанесения контактных площадок, подложка устанавливается на подложкодержатель и к медным контактам крепятся электроды. Электроды представляют собой медные провода с маленькими медными пластинками на концах. Пластинки припаяны к проводам. Пластинки вырезаны из листа меди толщиной 1 мм, отшлифованы.

Пластинки прижимаются к площадкам при помощи зажимов типа «крабик». Во избежание замыкания подложкодержателя и электродов через зажимы, «губки» зажимов прокладывают полиимидным скотчем.

Осаждение меди на ситалловые подложки проводили методом термического испарения в вакууме. Для проведения эксперимента необходимо подключить пикоамперметр к диэлектрической подложке через токовводы, установленные в верхнем фланце, собранном ранее. Схема подключения представлена на рис. 1. Блок питания позволяет ограничивать максимальное значение тока (ток короткого замыкания), что оберегает пикоамперметр от возможной поломки.

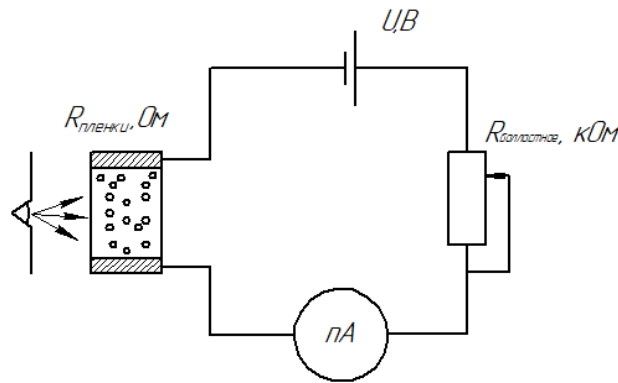


Рис. 1. Схема контроля тока в процессе нанесения ОТП.

Стенд (рис. 2) контроля роста начальных стадий формирования тонкопленочных покрытий в вакууме был организован на базе малогабаритной модульной установки УВН-1М.



Рис. 2. Стенд контроля начальных стадий роста ОТП.

Проведя подготовительные работы, производят запуск установки. Откачка вакуумной камеры происходит до давления $6,3 \cdot 10^{-5}$ мбар. Включается блок питания модуля термического испарения, медь в молибденовом испарителе конденсируется в капельку. Через какое-то время начинает происходить интенсивное испарение меди. Оператор может это понять по яркому свету в камере, резкому повышению давления (на $0,5 \cdot 10^{-5}$ мбар).

После начала интенсивного испарения оператор открывает заслонку и одновременно с этим включает запись пикоамперметра. В случае достижения тока короткого замыкания, блок питания начинает автоматически снижать напряжение, оставляя ток неизменным. Заслонка закрывается, остатки меди выпариваются. Пока камера разгерметизируется, данные с

пикоамперметра передаются на ПК в программу ExceLINX согласно инструкции. После открытия камеры подложка с нанесенной пленкой извлекается для дальнейшего исследования топологии (рис. 3) на атомно-силовом микроскопе (АСМ).

Данные в программе обрабатываются, строится диаграмма в координатах количество измерений-значение (рис. 4).

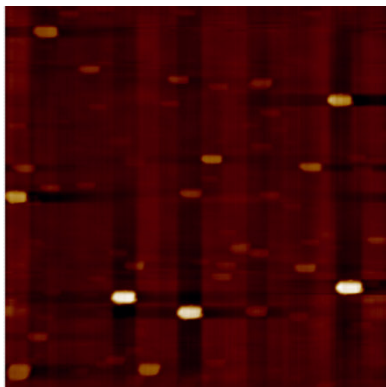


Рис. 3. АСМ-изображение структуры ОТП (размер скана 50x50 мкм).

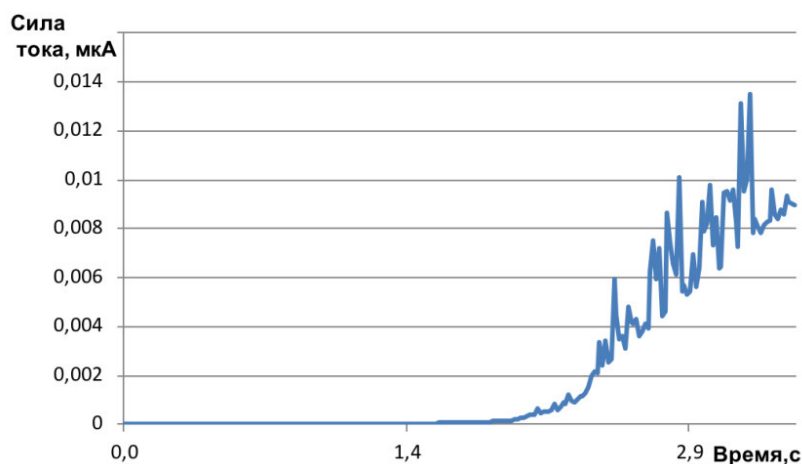


Рис.. 4. Диаграмма изменения силы тока во времени в процессе нанесения покрытия из меди.

Особый интерес вызывают характерные пики на зависимости тока от времени процесса. Измерение тока начинается с момента открытия заслонки. Пикоамперметр фиксирует первые сигналы, спустя 1,5 секунды с момента нанесения покрытия. Очевидно, что чем ближе находится испаритель к подложке, тем быстрее происходит процесс роста пленки, а значит, и раньше начинается фиксирование изменения значений тока. Пики на диаграмме свидетельствуют от множественных этапах коалесценции островков в начальных стадиях роста тонкопленочного покрытия.

Для проведения экспериментальных исследований были выбраны технологические параметры, которые влияют на выходную характеристику покрытия – толщина (для сплошного покрытия) или латеральный размер (для несплошной, островковой, пленки). Такими параметрами являются время процесса и расстояние испаритель–подложка.

Проведение экспериментов и обработка результатов

В вакуумной камере 1 (рис. 5) происходит напыление тонкой пленки. К подложкодержателю 2 прикреплена подложка 3, на которую будет осаждаться испаряемый материал 4 (в данном случае – медь). Этот материал находится на испарителе 5, который нагревается посредством резистивного нагрева через токовводы 6, находящиеся на расстоянии

h (мм) от подложкодержателя. Процесс нанесения происходит в течение времени t (с) и под давлением P (Па).

Проведены 4 эксперимента (рис. 6) со следующими входными параметрами, представленными в таблице.

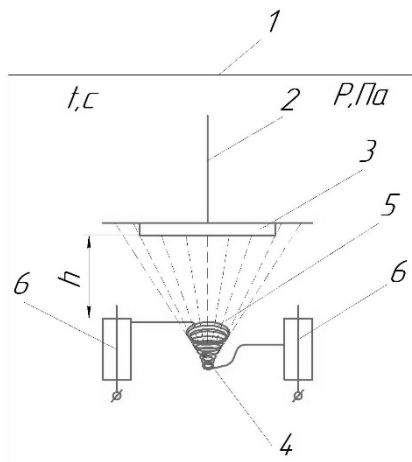


Рис. 5. Схема эксперимента.



Рис. 6. Образцы ситалла с медным покрытием (от 1 до 4 слева-направо).

Для того, чтобы измерить толщины пленок, необходимо было измерить «ступеньку», то есть границу между сформированным покрытием и подложкой. В каждом образце сделаны три измерения: внизу, в центре, вверху сканируемой области (90x90 мкм). В результате были получены АСМ-изображения, которые потом были исследованы с помощью специального программного обеспечения (рис. 7). В результате анализа топологий и измерения толщины были получены следующие данные, представленные в таблице.

Значения толщины покрытия от параметров процесса

№ образца	Расстояние от источника до подложки h , мм	Время процесса нанесения t , с	Высота ступеньки внизу $Y1$, нм	Высота ступеньки в центре $Y2$, нм	Высота ступеньки вверху $Y3$, нм
1	35	30	20	40	60
2	35	60	750	800	850
3	65	30	150	180	200
4	65	60	550	600	600

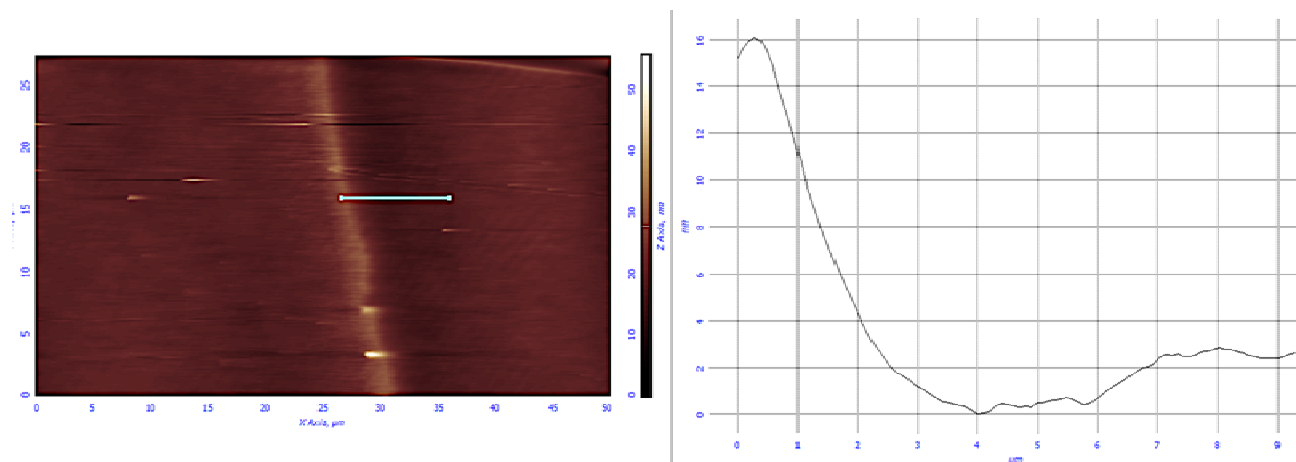


Рис. 7. АСМ-изображение «ступеньки» и график измерения толщины покрытия (высоты «ступеньки»).

В результате проведения и обработки результатов экспериментов получена математическая модель: $Y = 400 + 292X_2 - 89X_1X_2$, где X_1 - расстояние от источника до подложки, X_2 – время процесса.

В результате анализа полученных данных эксперименты оказались воспроизводимы, адекватность модели подтвердилась.

Отметим, что фактор расстояния оказался незначимым, вероятно, из-за малого интервала варьирования. Необходимо понизить нижнюю границу. Существенное влияние оказал фактор времени: при его увеличении толщина пленки увеличивается, что сходится с физической стороной рассмотрения полученной математической модели. Влияние взаимодействия факторов также значимо, так как варьируя двумя параметрами, можно оказать влияние на выходной параметр – толщину пленки.

Заключение

В ходе проделанной работы проведен обзор областей применения и преимуществ островковых тонких пленок и наноструктур.

Подготовлен и налажен стенд контроля начальных стадий роста тонкопленочных покрытий в вакууме, проведены базовые экспериментальные исследования, получены зависимости изменения силы тока в процессе нанесения медной тонкой пленки на ситалловые подложки.

Полученные образцы исследованы на атомно-силовом микроскопе, измерены их геометрические характеристики.

В целях отработки режимов построена математическая модель зависимости толщины покрытия от параметров процесса нанесения – время и расстояние испаритель-подложка.

В дальнейшей работе планируется получение взаимосвязей геометрических и структурных характеристик островковых наноструктур и параметров процесса.

Литература

1. Сидорова, С.В. Расчет технологических режимов и выбор параметров оборудования для формирования островковых тонких пленок в вакууме: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.27.06: защищена 27.10.2016/Сидорова Светлана Владимировна. – Москва, 2016. – 16 с.
2. Логунов А.Е. Оптические методы исследования металлических наночастиц на поверхности прозрачных диэлектриков. Дисс. канд. физ.-мат. наук. Санкт-Петербург, 2009.
3. Чиров А.А., Белякова Н.Г. Изменение прозрачности тонких пленок цезия на поверхности стекла оптических приборов космического аппарата // Поверхность. Рентгеновские, синхронные и нейтронные исследования. 2013. No. 12. С.98.
4. FindPatent.ru [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/231/2312421.html>. – Катодолюминесцентный экран. – (дата обращения: 09.03.2018).
5. Кабанов Д.Г., Поляков Ю.А. Повышение чувствительности химических сенсоров контроля оксида углерода в воздухе // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2014. No. 2. С. 11-17.
6. Microfor.ru: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.microfor.ru/publications/doklad_gurz_97.htm. – Интегральный металлооксидный газовый сенсор. – (дата обращения: 09.03.2018).
7. Смирнов В.А. Нанолитография элементов наноэлектроники на основе оксида титана // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2016. С. 27-40.
8. Пилипец И.В., Нагайчук С.Г. Элемент памяти мемористорного типа на основе пленок TiO₂ нанометровой толщины. // Электронные средства и системы управления. 2014. No 1. С. 107-110.