

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОСТРОВКОВЫХ ТОНКИХ ПЛЕНОК ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ИЗДЕЛИЯХ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

С.В. Кирьянов, Н.О. Юркин, В.С. Журавлева, П.С. Гуляева, С.В. Сидорова

АННОТАЦИЯ

Представлены стадии формирования тонкопленочных покрытий, основы физических процессов, магнитные и электрические эффекты, наблюдаемые в островковых тонких пленках. Проанализирована зависимость тока от времени формирования пленки и теория образования вторичного островкового слоя.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

ОСТРОВКОВЫЕ ПЛЕНКИ, ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ПОКРЫТИЯ, МНОГОСЛОЙНЫЕ ОСТРОВКОВЫЕ СТРУКТУРЫ, МАГНИТНЫЕ ДАТЧИКИ, МАГНЕТСОПРОТИВЛЕНИЕ, ПРЫЖКОВАЯ ПРОВОДИМОСТЬ, ТУННЕЛИРОВАНИЕ

STUDIES OF METALLIC INSULAR THIN FILMS PROPERTIES FOR USE IN NANOELECTRONICS PRODUCTS

S.V. Kiryanov, N.O. Yurkin, V.S. Zhuravleva, P.S. Gulyaeva, S.V. Sidorova

ABSTRACT

The stages of formation of thin-film coatings, the basics of physical processes, magnetic and electrical effects observed in insular thin films are presented. The dependence of the current on the time of film formation and the theory of secondary island layer formation are analyzed.

KEYWORDS

INSULAR FILMS, THIN-FILM COATINGS, MULTILAYER INSULAR STRUCTURES, MAGNETIC SENSORS, MAGNETORESISTANCE, HOPPING CONDUCTIVITY, TUNNELING

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие электронных технологий требует новых подходов к реализации свойств наноструктур с сохранением размеров. Таким запросам отвечают тонкие пленки на этапе формирования островков. Островковые тонкие пленки (ОТП) и наноструктуры (ОНС) привлекают к себе внимание как исследователей, так и разработчиков приборов и устройств различного назначения. ОТП и ОНС обладают рядом уникальных свойств, что позволяет применять их в различных приборах наноэлектроники, таких как: системы контроля слабых магнитных полей, транзисторы, резистивная и магнитная оперативная память и др.

Для того, чтобы пленка обладала свойствами, применимыми для вышеперечисленных устройств, необходима отработка режимов их нанесения. При разных методах нанесения наблюдаются разные свойства. Свойства ОТП существенно зависят от метода формирования, температуры подложки, энергии осаждаемых частиц и других параметров процесса.

Островковая тонкая пленка – одна из стадий роста сплошных тонкопленочных покрытий, при которой наблюдаются ярко-выраженные островковые наноструктуры. Выделяют 6 этапов роста тонких покрытий (рис. 1):

- А: появление одиночных атомов наносимого материала (из-за маленьких размеров, их нельзя увидеть в микроскоп);
- Б: слияние атомов в субкритические кластеры (процесс происходит под действием сил взаимного притяжения частиц друг к другу);
- В: образование зародышей при слиянии кластеров с последующим ростом до критического размера (размеры зародышей на этом этапе колеблются в диапазоне от 20 до 30 Å);
- Г: срастание зародышей критического размера в островки – коалесценция (размеры и форма островков зависят от наносимого материала и реализуемого механизма роста);
- Д: срастание островков в лабиринты и каналы (образование лабиринтной пленки);
- Е: заполнение пустых областей за счет вторичного образования зародышей.

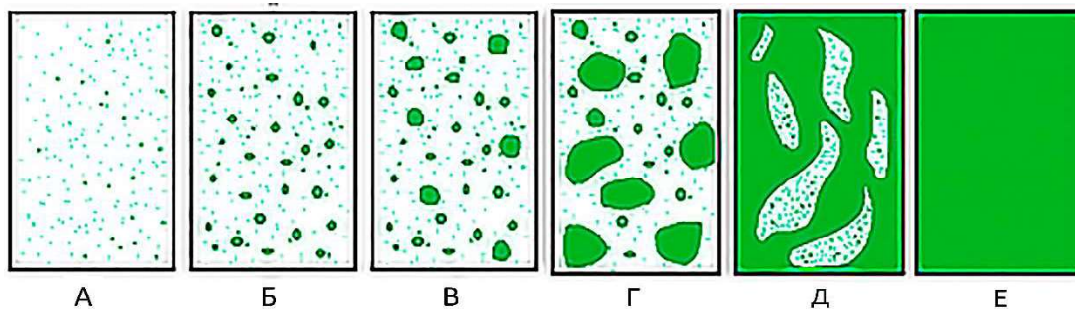


Рис.1. Этапы роста островковой пленки

Островковые пленки металлов обладают уникальными особенностями в области электропроводности и магнетизма. Физические процессы, происходящие в таких покрытиях, отличаются от процессов в объемных материалах, благодаря размерным эффектам, которые демонстрируют влияние характерного размера наноструктур на их термодинамические, физические, механические и другие свойства.

Целью данной работы является апробация способа получения и исследование свойств островковых тонкопленочных покрытий металлов.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОТП МЕТАЛЛОВ

В настоящее время кратно увеличиваются объемы данных, нуждающихся в энерго-независимом хранении. Эффективной заменой существующей памяти на транзисторах является резистивная память, где бит 0 и 1 характеризуется низкорезистивным и высокорезистивным состоянием ячейки. Главное преимущество замены типа памяти заключается в снижении рабочих токов и напряжений. Для увеличения быстродействия и ресурса работы резистивной памяти предлагается в переключающий сопротивление диэлектрический слой внедрить лабиринтную пленку (см. рис.1, д), которая также обладает свойством переключения электропроводности.

При подключении ОТП к источнику постоянного напряжения начинает протекать ток. Проводимость реализуется сразу по двум механизмам:

1. Классическая проводимость (электроны перемещаются внутри островков как в объемных металлах).

2. Прыжковая проводимость (переход электрона между островками при помощи квантовых и тепловых перескоков).

Из-за такой особенности ВАХ ОТП (рис.2) представляет сложную, нелинейную зависимость. Эффекты проводимости обуславливают наличие у пленки двух режимов: высокоомный и низкоомный.

При высокоомном режиме (см. рис.2, участок 1) пленка имеет гигантское электрическое сопротивление $R_{в}=10^7 \dots 10^9$ Ом.

При низкоомном состоянии (см. рис.3, участок 3) наблюдается большая проводимость. Электрические свойства приближены к свойствам объемных металлов.

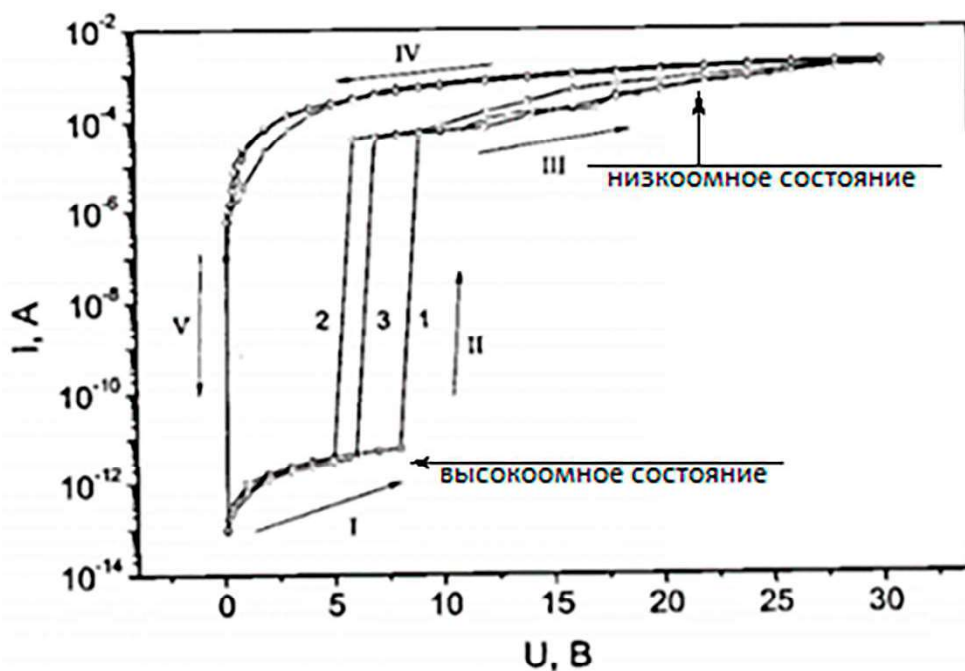


Рис.2. ВАХ островковой пленки [1]

Так, внедрение тонких несплошных пленок в мемристор имеет высокий потенциал для снижения его энергопотребления при программировании. Мемристор — это энергонезависимое запоминающее устройство, основанное на переключении сопротивления. Он представляет из себя два слоя металлов, разделенных слоем диэлектрика, такие как оксиды или высшие халькогениды. Первый слой металла является инертным металлом, второй — электрохимически активным металлом.

При подаче отрицательного напряжения на инертный металл образуется филамент (проводящая нить), это приводит к переходу мемристора в низкоомное состояние. При подаче напряжения с обратным знаком нить разрушается, переводя мемристор в высокоомное состояние. При отключении напряжения мемристор остается в установившемся состоянии. Эти состояния можно интерпретировать как логический ноль и единицу.

Следует отметить, что высота ОТП лежит в наноразмерном диапазоне и латеральный размер островков зачастую тоже, поэтому электрон, находящийся внутри островка, ведет себя подобно тому, как электрон ведет себя внутри трехмерной потенциальной ямы.

Проникновение сквозь потенциальный барьер носит вероятностный характер. Частица с энергией меньшей глубины ямы ($E < U_0$), натолкнувшись на барьер, может либо пройти сквозь него, либо отразиться. Суммарная вероятность этих двух возможностей

равна 1. Если же выполняется неравенство $E > U_0$, что говорит о том, что энергия частицы больше глубины барьера, то частица должна беспрепятственно проходить над барьером, но опять же существует вероятность того, что она отразится от него и не преодолеет барьер [3].

Поэтому необходимо найти возможность фиксировать ток наноразмерной величины, протекающий между островками при их формировании, потому как по его значению станет возможным определение времени перехода пленки из островковой в лабиринтообразную, а далее в сплошную. Для решения этой задачи был организован лабораторный стенд контроля начальных стадий роста тонкопленочных покрытий.

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ОТП МЕТАЛЛОВ

Магнетосопротивление – способность материала менять свое электрическое сопротивление при приложении внешнего магнитного поля. Подобный эффект заключается в искривлении траектории электрона под действием силы Лоренца.

Из двух типов проводимости вытекают два механизма реализации магнетосопротивления (рис.3).



Рис.3. Магнитные эффекты в островковых пленках

Классическое магнетосопротивление можно обнаружить в тех зонах, где электрон ведет себя как свободная частица, например, в островках островковой пленки. В этом случае происходит изменение траектории движения электрона под действием сил Лоренца. Это заметно, когда путь электрона достаточно большой (например, при движении его в сплошных пленках).

Если речь идет об ОТП, то область, где электрон ведет себя как свободная частица очень мала, поэтому эффект классического магнетосопротивления привносит

пренебрежимо маленький эффект в общих характер поведения электрона. Связано это с маленьким размером островков.

Прыжковое магнетосопротивление наблюдается в основном в гранулированных и островковых пленках [2]. Краткая суть заключается в сокращении волновых функций электрона. Наличие или отсутствие магнитного поля определяет вероятность туннелирования электрона между островками из-за перекрытия волновой функции электрона.

Эффективная масса электрона в металлах достаточно велика, значит, изменение энергии электрона в магнитном поле по сравнению с диэлектрическим барьером очень мала. Об этом говорят многие исследования в этой области, поэтому данный эффект представляет лишь теоретический интерес.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что островковые пленки практически не реагируют на слабые магнитные поля (или реагируют на очень сильные). Такой слабый эффект наблюдается из-за их небольших толщин.

Значит, для практической реализации данного эффекта необходимо увеличивать их толщину, оставляя их главную особенность – островковую структуру. Многослойные магнитные пленки решают эту задачу. Они состоят из несмешивающихся материалов, которые наносят последовательно слой за слоем. Режимы подбираются таким образом, чтобы каждый слой представлял из себя островковую пленку. Таким образом, пространство, в котором электрон ведет себя, как свободная частица, значительно увеличивается, и, как следствие, увеличивается чувствительность к магнитным полям, что отмечается в работе [2].

Многослойные островковые структуры и реализуемые в них магнитные эффекты активно используются в датчиках слабых магнитных полей (рис. 4). Многослойная пленка состоит из чередующихся сплошных или островковых слоев ферромагнитного и неферромагнитного материала.

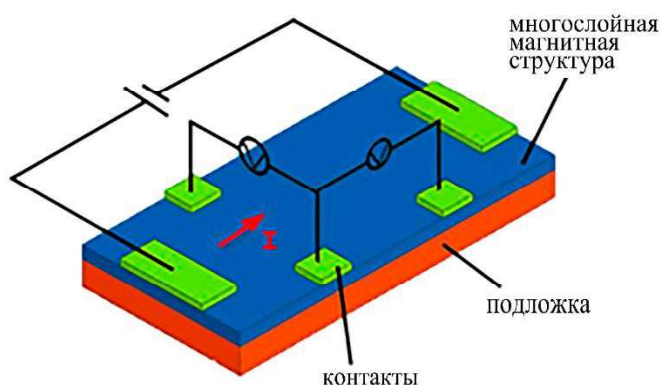


Рис.4. Модель магнитного датчика

При отсутствии внешнего магнитного поля намагниченность двух слоев ориентирована перпендикулярно (антипараллельно), покрытие находится в состоянии с повышенным сопротивлением.

При появлении магнитного поля наблюдается магнитное упорядочение ферромагнетика, его магнитная ориентация становится параллельна ориентации неферромагнитного материала. После этого происходит резкое падение электрического сопротивления пленки, это можно зарегистрировать при помощи чувствительных вольтметров.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ряде работ [1–3] показано, что островковые металлические пленки обладают нелинейной проводимостью в слабых, напряженностью порядка 50 В/см, электрических полях. А нелинейная проводимость связана с туннелированием электронов между металлическими ОНС. Вероятность такого туннелирования нелинейно зависит от приложенного к ОТП электрического поля и растет в зависимости от увеличения емкости контактов, подводимых к ОТП при контроле тока.

Нанесение островковых пленок будет осуществляться методом термического испарения на организованном на базе установки МВТУ-11-1МС лабораторном стенде контроля начальных стадий роста тонкопленочных покрытий в вакууме. Данный стенд находится на кафедре «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им.Н.Э.Баумана. Лабораторный стенд предназначен для измерения туннельного тока во время нанесения покрытия. По значению тока определяется стадия роста пленки. Для возможности контроля туннелирования электронов в процессе формирования покрытия предусмотрены заранее сформированные контактные площадки на каждом образце из ситалла (рис. 5).

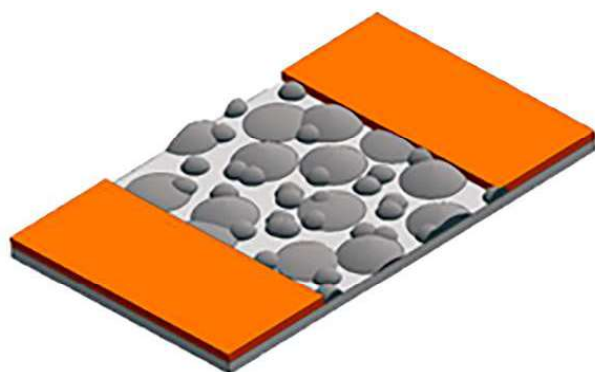


Рис.5. Модель островковой тонкой пленки на образце с контактными площадками

В оснащение стенда входит пикоамперметр Keithley 6485, источник питания постоянного тока Б5-44 и соединительные провода и измерительными обкладками. Схема подключения представлена на рис. 6.

Рабочая камера вакуумной установки МВТУ-11-1МС откачивается до рабочего давления $p_{\text{раб}} = 2 \cdot 10^{-4}$ Па. Откачка осуществляется при помощи спирального насоса XDS10i Edwards до давления $p = 1 \cdot 10^1$ Па что соответствует давлению запуска турбомолекулярного насоса nEXT240D Edwards, который откачивает камеру до рабочего давления.

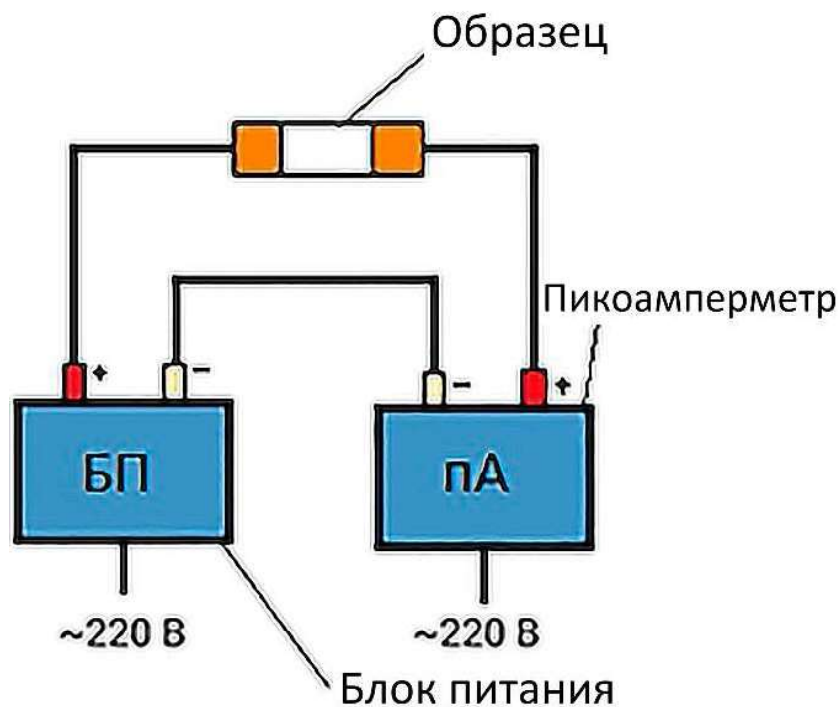


Рис.6. Схема подключения пикоамперметра

Измерение значений электропроводности покрытия в процессе формирования будут проводиться на режиме Slow, что соответствует 50 измерениям в секунду. Данные будут выгружаться сначала в буфер памяти пикоамперметра, а затем – в таблицу Excel при помощи сборки Excel Linx. Чувствительность пикоамперметра Keithley 6485 позволяет фиксировать токи порядка до 10^{-12} А, что характерно для начальных стадий роста островковых тонких пленок.

При использовании блока термического испарения была выбрана стабилизация по току. Для этого выставлялось максимальное напряжение $U_{max} = 40$ В и максимальная мощность $P_{max} = 800$ Вт, ток $I=5-6$ А.

После выхода на режим открывается заслонка между подложкодержателем и источником термического испарения. С этого момента идет отсчет времени и запись значений тока.

Время нанесения пленки до сплошного слоя варьируется в зависимости от материала составляло от 80 до 150 с.

Материал нанесения – Cu, Al, Ni. Материалы выбраны из соображений возможного применения в рассматриваемых в данной работе устройствах: элементах памяти и магнитных датчиках.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные зависимости туннельного тока от времени формирования пленки меди имеют вид (рис. 7) и повторяют полученные ранее исследования научной группы.

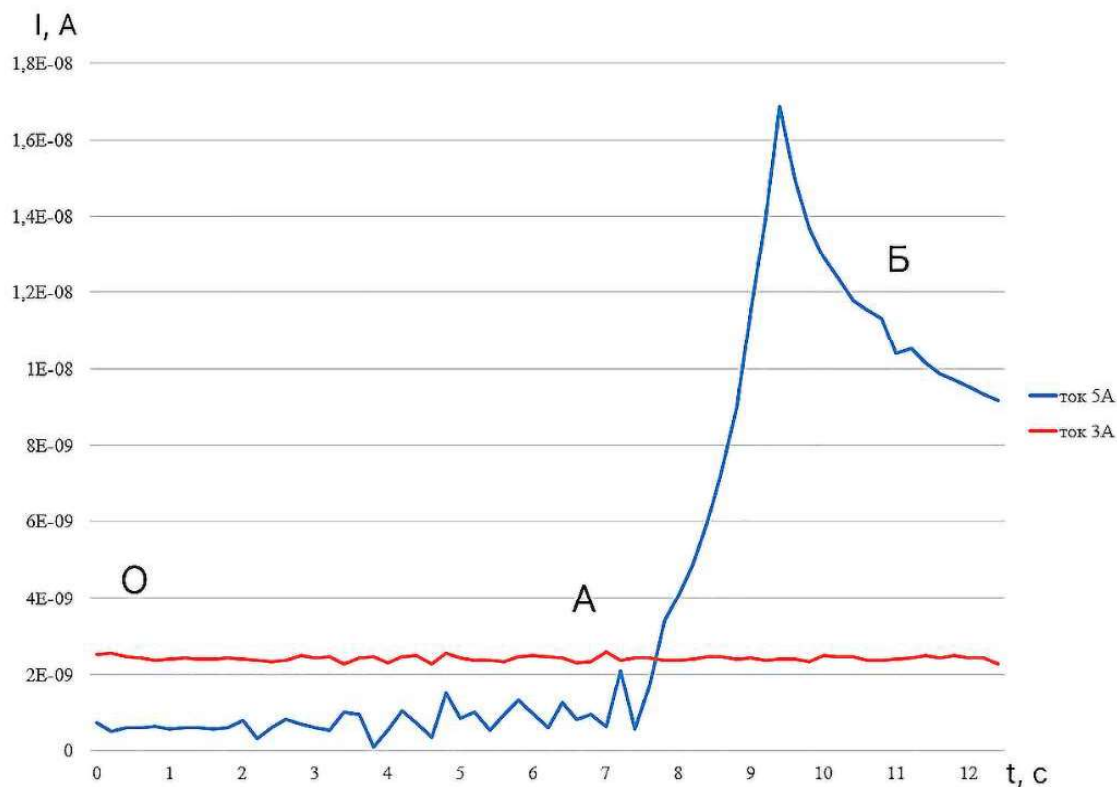


Рис. 7 – Зависимости туннельного тока от времени формирования пленки Си на ситалловой подложке при разных значениях тока на испарителе

На полученной зависимости виден переход от островковой структуры к сплошной, начиная с 10 секунды (рис. 7, точка Б). Островковая пленка находится между точками А и Б. Колебания соответствуют процессу коалесценции, во время которой происходит слияние отдельных островков в единый, так как возможность туннелирования электронов резко падает. Точкой “О” отмечен момент открытия заслонки.

Переход от островковой структуры к лабиринтной происходит значительно позже при токе 3А – около 30с. Так как ток между контактами резко начинает расти после 10с при токе в 5А, подаваемом на токовводы источника испарения, во избежание ошибок оператора и неравномерности образования островков из-за множества случайных факторов, в то время как, ток между контактами при подаваемом токе от источника в 3А начинает расти значительно позже (25с), было принято решение наносить несплошную структуру при токе 3А, в течение 15с, так как при таких режимах процесс осаждения будет более контролируемым и управляемым.

Полученные зависимости туннельного тока от времени формирования пленки алюминия имеют вид (рис. 8).



Рис. 8 – Зависимости туннельного тока от времени формирования пленки Al на ситалловой подложке при разных значениях тока на испарителе

Наблюдаем три основных этапа роста тонкой пленки алюминия в соответствии с её сопротивлением.

Этап 1 – Отсутствие нанесения – $I_T=2 \text{ нА}$, $R=\infty$. Начало процесса, рост островков еще не начался, поскольку подводимая мощность расходуется на нагрев резистивной спирали и плавление гранулы алюминия, заслонка закрыта.

Этап 2 – Образование, рост и слияние островков – $2 < I_T < 143 \text{ нА}$, $0 < R < \infty$. Первые пиковые значения туннельного тока (50 с и 58 с для экспериментов №1 и 2 соответственно) свидетельствуют об образовании и росте зародышей островковой тонкой пленки алюминия. Далее островки растут – туннельный ток повышается. После наступает стадия активной коалесценции – слияния островков. На графике коалесценция отображается в виде длительных горизонтальных полочек, обозначающих снижение туннельного тока. Туннельный ток понижается, так как в ходе слияния островков в группы сопротивление пленки повышается: расстояние между вновь сформировавшимися группами становится больше, чем расстояние между отдельно расположенными островками-зародышами.

Этап 3 – Образование сплошной пленки – $I_T > 78 \text{ нА}$, $R \rightarrow 0$. Дальнейшее увеличение тока и снижение сопротивления тонкой пленки алюминия осуществляется за счет роста слоев друг на друге.

Полученные зависимости туннельного тока от времени формирования пленки никеля имеют вид (рис. 9). На рисунке представлены зоны I–III ввиду того, что в этих промежутках наблюдаются разные процессы. Туннельный ток на промежутке I практически не меняет своего значения, что связано с тем, что на подложку только начинает поступать

испаряемый материал, образуются отдельные островки-зародыши, разнесенные друг от друга на значительные расстояния и токопроводность еще не осуществляется по поверхности подложки. На II промежутке наблюдаются скачки тока, значения которого периодически возвращаются к исходным. В этом интервале начинает происходить многократная коалесценция, с чем и связано такое поведение тока. А для III промежутка значение тока растет несмотря на то, что коалесценция продолжается, об этом свидетельствуют спады значений тока, но спады происходят не до исходных значений. Это говорит о переходе пленки из островковой в лабиринтообразную, то есть пленка преимущественно состоит из каналов между островков.

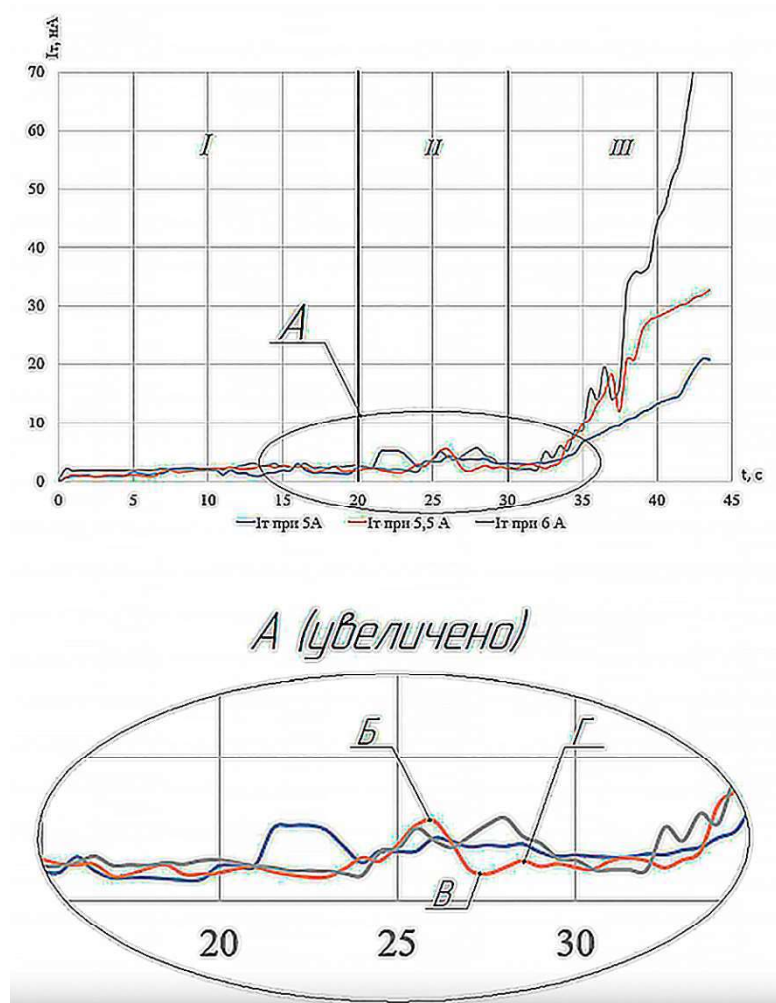


Рис. 9 – Зависимости туннельного тока от времени формирования пленки Ni на ситалловой подложке при разных значениях тока на испарителе

При сравнении графиков видно, что все они носят похожий характер, вне зависимости от величины подаваемого тока на испаритель. Только зона активной коалесценции немного смещается во времени, так как зависит от потока интенсивности поступающего вещества.

Также можно отметить, что кривая в интервале от 20 до 30 с имеет немного другой характер зависимости, в отличие от всей остальной кривой. Кривая, начиная с 30 с, начинает плавно расти и изменять более однообразно. Это свидетельствует о том, что на данном

этапе преимущественно островки растут в диаметре с незначительным увеличением количества зародышей между ними, постепенно переходя в лабиринтообразную пленку. А вот в интервале от 20 до 30 с происходит рост как самих островков, так и островков-зародышей, что уменьшает промежутки протекания тока и его значение повышается.

Для оценки возможности формирования многослойной островковой структуры при проведении экспериментальных исследований было увеличено количество материала на и тока испарителе. Оказалось, что характеристическая кривая зависимости тока немного меняла свой вид (рис. 10).

Все так же наблюдается нелинейность, но ярко выражены зоны перегибов. С первого взгляда может показаться, что это происходит из-за слияния островков и образования лабиринтов, однако ток для данной стадии роста очень большой. Выдвинуто предположение об образовании нескольких слоев последовательно друг за другом. Таким образом, поверх первого сформировавшегося слоя образовывается новый слой островковой пленки никеля, который допускает туннелирование и вносит свои коррективы в значения туннельного тока. Это и является причиной нелинейного роста тока. Происходит слияние островков и туннелирование постепенно исчезает, переходя в классическую проводимость.

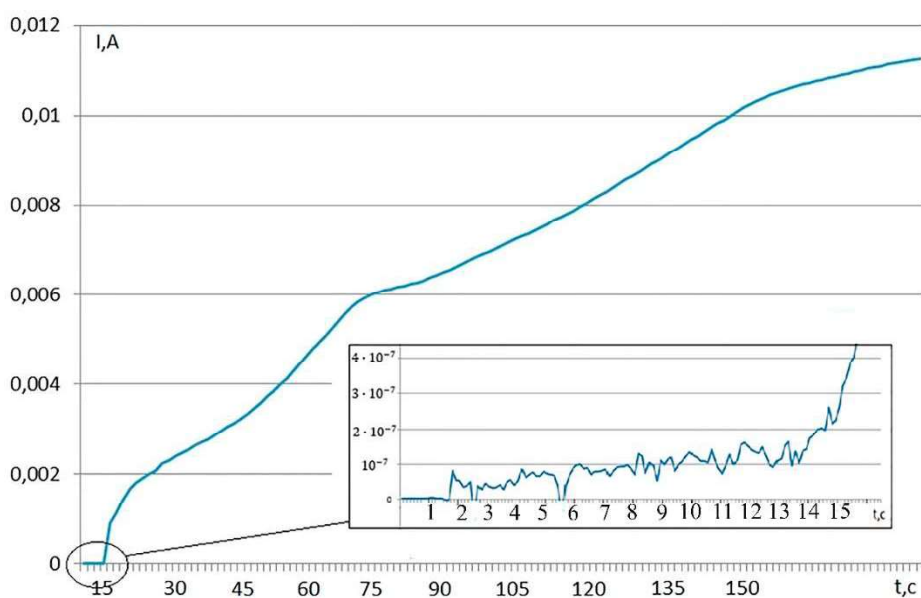


Рис. 10. Зависимость тока от времени после увеличения количества материала и тока на испарителе

На основной характеристической зависимости сложно увидеть интересующий нас этап роста ОТП. Связано это с малой точностью замеров и слишком высокой скоростью образования пленки, высокой интенсивностью испарения. Было принято решение увеличить количество измерений в секунду у пикоамперметра, а режимы нанесения оставить теми же. Результатом данного решения является зависимость, представленная на вставке рисунка 8. Флуктуации объясняются туннельным типом проводимости. После 14 секунд значение тока резко возрастает, что соответствует этапу коалесценции. Островковая пленка переходит в лабиринтную, а затем – в сплошную. В дальнейшем можно наблюдать только классический тип протекания тока. Ускорение времени образования островкового слоя связано с повышением интенсивности испарения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате апробации методики формирования тонкопленочных покрытий меди, алюминия и никеля с контролем начальных стадий роста были получены зависимости электропроводности от времени процесса нанесения. По характеру изменения тока и его значениям сделаны рекомендации о формировании островковых и лабиринтных тонких пленок, в том числе и многослойных.

Следует отметить, что переход от островковой структуры к лабиринтной происходит значительно позже при меньшем токе на испарителе (3 А для меди, 5 А для алюминия и никеля).

Для формирования ОТП с возможностью более точного контроля и управления процессом рекомендованы режимы: медь – 3 А, 15...20 с; алюминий – 5 А, 25...45 с; никель – 5 А, время 20...30 с.

На основании анализа зависимостей туннельного тока от времени формирования тонкопленочного покрытия выбраны временные интервалы образования лабиринтной пленки: меди – от 40 до 60 с; алюминия – от 55 до 80 с; никеля – от 35 до 65 с.

В настоящее время проводятся исследования геометрических параметров полученных покрытий: размеры, высота ОНС и расстояния между ними. Эти параметры напрямую коррелируют со значениями туннельного тока, фиксируемого в процессе формирования покрытия и отвечают за свойства получаемых ОТП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оптические и фотоэлектрические свойства самоорганизованных плазмонных наноструктур. И.А. Гладских, Автореферат, 2014.
2. Optical and photoelectric properties of self-organized plasmon nanostructures. I.A. Gladskikh, Abstract, 2014.
3. Шерстнев И.А. Электронный транспорт и магнитная структура систем nanoостровов из ферромагнитных материалов: автореф. дис. ... канд. физико-математических наук, 2014, 112 с.
4. Sherstnev I.A. Electronic transport and magnetic structure of nanostructure systems made of ferromagnetic materials: abstract. Dis. ... candidate of Physical and Mathematical Sciences, 2014, 112 p.
5. Сидорова С.В. Расчёт технологических режимов и выбор параметров оборудования для формирования островковых тонких плёнок в вакууме: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.27.06. М., 2016, 16 с.
6. Sidorova S.V. Calculation of technological modes and selection of equipment parameters for the formation of insular thin films in vacuum: abstract. Dis.... Candidate of Technical Sciences: 05.27.06. М., 2016, 16 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

С.В. Кирьянов – студент 3 курса бакалавриата кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва; e-mail: makdrin@mail.ru

Н.О. Юркин – студент 3 курса бакалавриата кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва; e-mail: yurkin.nik18@mail.ru

В.С. Журавлева – студентка 4 курса бакалавриата кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва; e-mail: zhuravleva.vlada@list.ru

П.С. Гуляева – студентка 1 курса магистратуры кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва; e-mail: gulyaeva.polina1@gmail.com

С.В. Сидорова – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва; e-mail: sidorova@bmstu.ru