

УДК: 537.5

КОНТРОЛЬ ФОРМОВКИ МДМ-СТРУКТУР НАНОЭЛЕКТРОНИКИ В СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

П.Ю.Гуляев, В.И.Зеленский, Ю.В.Сахаров, П.Е.Троян

Рассмотрены вопросы контроля и измерения вольтамперных характеристик с участком отрицательного дифференциального сопротивления N-типа в процессе формирования тонкопленочных структур металл-диэлектрик-металл. Показан механизм электрической формовки в аморфных диэлектрических пленках.

Ключевые слова: наноструктуры, металл-диэлектрик-металл, вольтамперная характеристика

Исследование процесса электрической формовки тонкопленочных структур металл-диэлектрик-металл представляет несомненный научный и практический интерес, поскольку дает информацию о физических явлениях, которые могут быть использованы для создания элементов памяти, датчиков давления и других элементов нанoeлектроники [1]. Электрической формовка конденсаторных МДМ-структур сопровождается необратимыми изменениями и процессами самоорганизации, в результате которых полученная наноструктура приобретает такие уникальные свойства, как: вольтамперная характеристика с участком отрицательного дифференциального сопротивления N -типа, эмиссия электронов в вакуум, световая эмиссия, способность к переключению в различные состояния, сохраняющие информацию о предшествующих значениях температуры и давления [2,3].

Цель настоящей работы – проведение комплексного контроля технологического процесса формовки МДМ-структуры в сильных электрических полях для решения проблемы обеспечения надежного электрического контакта к тонкопленочным электродам.

На рисунке 1 схематично представлена конструкция технологической установки для формовки экспериментального образца.

Тонкопленочная структура наносится на торцевую обработанную поверхность системы. Электрический контакт к нижнему электроду осуществляется через ввод 1, к тонкопленочному верхнему электроду 6 – через цилиндрическую поверхность 2 и проводящий слой металла 7 толщиной 0,5 – 0,6 мкм. При необходимости на торец ввода 1 производится напыление нижнего электрода.

Процесс электрической формовки возникает в локальных участках в области микроострий нижнего электрода. При этом для увеличения электрической прочности диэлектрика и рабочего напряжения МДМ-структуры

требуется нижний электрод с минимальными микронеровностями, а для создания эффективной формованной МДМ-структуры необходима развитая система микроострий на поверхности нижнего электрода

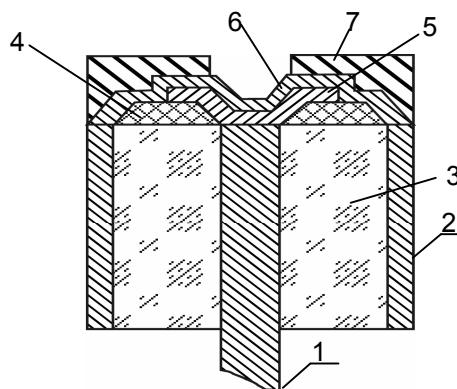


Рисунок 1. Схема экспериментального образца

- 1 — центральный металлический ввод;
- 2 — внешний металлический цилиндр;
- 3 — стекло;
- 4 — защитный диэлектрик;
- 5 — рабочий диэлектрик;
- 6 — верхний электрод;
- 7 — контакт к верхнему электроду.

В результате проведенных экспериментов установлено три характерных типа поверхностной структуры металлических пленок, полученных различными методами. Так например пленки алюминия нанесенные методом катодного распыления, обладают мелкозернистой поверхностью (рисунок 2а), а пленки, полученные методом термического испарения при температуре подложки 300 К, характеризуются системой микроострий конусообразной формы высотой 10–50 нм (рисунок 2б). Исследования структуры пленок из алюминия, полученных методом термического испарения в вакууме при различных температурах подложки (300–700 К), показали, что при температуре подложки 550–600 К

РАЗДЕЛ II. ИЗМЕРЕНИЯ В ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУКАХ И ТЕХНИКЕ

формируется крупноблочная структура пленки, показанная на рисунке 2в.

Использование такой пленки в качестве нижнего электрода обеспечивает эффективное протекание процесса электрической формовки одновременно с достаточной электрической прочностью МДМ-структуры.

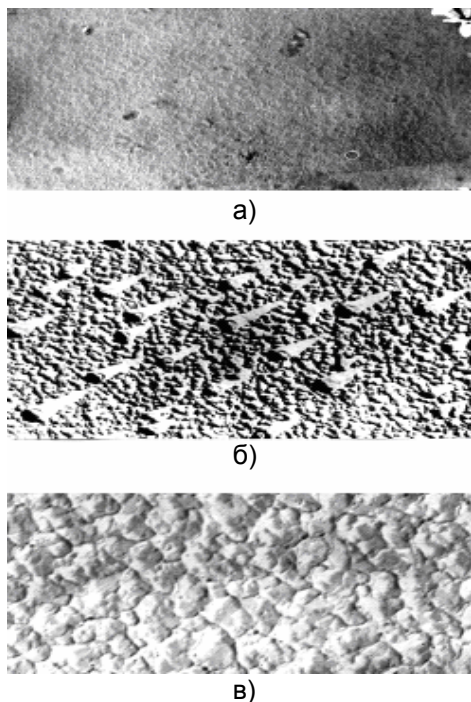


Рисунок 2 - Морфология поверхности пленок алюминия нанесенных

На основании исследования большого количества диэлектрических пленок (SnO_2 , Al_2O_3 , Si_3N_4 , $\text{Si}_x\text{N}_y\text{O}_z$, SiO_2 , SiO , AlN , $\text{La}_x\text{B}_y\text{O}_z$, Ta_2O_5), полученных различными способами (гидролиз, термическое испарение в вакууме, ионно-плазменное напыление, катодное и магнетронное распыление), установлено, что для процесса электрической формовки оптимальными являются пленки оксинитрида кремния, полученные методом ионно-реактивного распыления. В этом методе пленка диэлектрика осаждается на подложку при давлении $10^{-5} \div 10^{-4}$ мм. рт. ст. в результате распыления кремниевой мишени сформированным в смеси газов ($\text{O}_2 + \text{N}_2$) ионным пучком. Достоинство метода заключается в том, что область осаждения диэлектрической пленки отделена от области формирования ионного пучка, что позволяет получать пленки с высокой (до 10^7 В/см) электрической прочностью.

Для контроля технология получения

верхнего электрода МДМ-структуры было проведено исследование зависимости свойств пленки алюминия от скорости ее осаждения при термическом испарении в вакууме. Установлено, что при скорости осаждения $0,8 \text{ нм/с}$ пленки имеют мелкозернистую поликристаллическую структуру. Увеличение скорости осаждения до 4 нм/с приводит к значительному укрупнению кристаллов и появлению упорядоченной структуры пленки. Использование такого режима обеспечивает необходимые для электрической формовки характеристики МДМ-структур

Общие закономерности электрической формовки проявляются в том, что при приложении напряжения $U \geq U_\phi$ между верхним и нижним электродами МДМ-структуры, находящейся в вакууме при давлении $p \leq 10^{-2}$ мм. рт.ст., в структуре возникают процессы, приводящие к росту тока сквозной проводимости.

Увеличение силы тока через МДМ-структуру начинается спустя некоторое время после приложения разности потенциалов к электродам МДМ-структуры. После окончания процесса формовки ток через структуру относительно стабилизируется, имея тенденцию к небольшому увеличению. Вольтамперная характеристика на различных этапах формовки приведена на рисунке 3. Начиная с некоторого момента, на ВАХ возникает участок отрицательного дифференциального сопротивления N -типа.

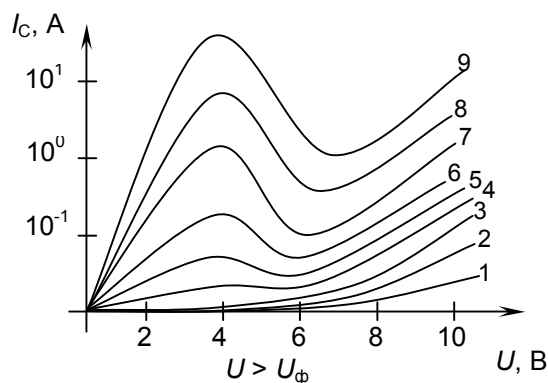
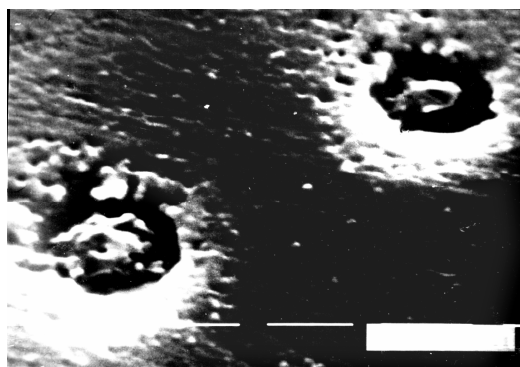


Рисунок 3. ВАХ структуры $\text{Mo} - \text{Si}_x\text{N}_y\text{O}_z - \text{Al}$

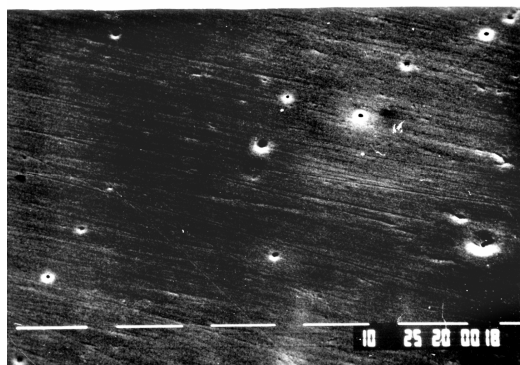
После завершения процесса электрической формовки МДМ-структуры наблюдается эмиссия электронов в вакуум. Доказано, что центры эмиссии и свечения совпадают, что дает основание по картине свечения судить об эмиссионной поверхности. Электронно-микроскопические исследования показали

наличие на поверхности формованной структуры следов образований двух типов: каналов электрического пробоя и формованных каналов (рисунок 4). Диаметр каналов пробоя имеет размеры $1 \div 20$ мкм, а диаметр формованных каналов составляет сотые доли микрометра. Поверхностная плотность распределение данных образований МДМ-структуры характеризуется величиной: $10^2 \div 10^3 \text{ см}^{-2}$ для каналов пробоя и $10^2 \div 10^7 \text{ см}^{-2}$ для формованных каналов.

Эксперименты по формовке МДМ-структур с различными материалами электродов показали, что наибольшей скоростью и степенью электрической формовки обладают структуры с электродами из *Au*, *Ag*, *Cu*. Гораздо медленнее протекает электрическая формовка в структурах с *Al*, *Mg*, *Ba*.



а)



б)

Рисунок 4. Поверхность МДМ - структуры: а – каналы пробоя; б – формованные каналы.

Эксперименты по электрической формовке с диэлектрическими пленками с различной кристаллической структурой показали, что если пленка имеет преимущественную ориентацию кристаллов, то электрическая формовка не происходит в отличие от структур с аморфными пленками.

В упрощенной модели процесса электрической формовки можно выделить три этапа.

На первом этапе в результате эмиссии по закону Фаулера–Нордгейма электронов из микроострий и их ускорения в электрическом поле в слое диэлектрика происходит образования дефектов за счет разрыва горячими электронами ослабленных или деформированных связей $Si-O$, $Si-H$, $Si-OH$. Несвязанные атомы кремния приобретают положительный заряд и усиливают напряженность электрического поля, что приводит к увеличению силы тока. Длительность данного этапа достигает нескольких минут.

С ростом концентрации дефектов в диэлектрике начинается второй этап электрической формовки. При этом происходит резкое возрастание тока и за время $10^{-6} - 10^{-8}$ с осуществляется плавление или испарение участка металлической пленки электрода с образованием микроотверстия.

Третий этап электрической формовки заключается в процессе адсорбции газов остаточной атмосферы в область формованного канала. Адсорбция паров воды и углеводородов способствует росту проводимости МДМ-структуры и изменению вольтамперной характеристики МДМ-структуры.

Выводы.

В данной работе проведены исследования влияния материала, толщины, плотности диэлектрической пленки, окружающей атмосферы и температуры на процесс электрической формовки.

На основе экспериментальных данных сделан важный научный вывод о том, что электрическая формовка возможна только в аморфных диэлектрических пленках.

Полученные результаты контроля технологических режимов позволяют предположить, что процесс электрической формовки определяется локальной напряженностью электрического поля и возможен при напряженности порядка 10^6 В/см^{-1} . Такая величина может быть достигнута вблизи микроострий нижнего электрода МДМ-структуры.

Анализ данных измерений показал отсутствие корреляции между значениями температуры плавления и теплопроводности материала верхнего электрода с основными параметрами процесса электрической формовки.

В то же время установлено, что материал верхнего электрода влияет на размеры и поверхностную плотность формованных каналов.

РАЗДЕЛ II. ИЗМЕРЕНИЯ В ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУКАХ И ТЕХНИКЕ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дирнлей, Дж. Электрические явления в аморфных пленках окислов / Дж. Дирнлей, А. Стоунхэм, Д. Морган. - УФН, 1974.- т.112, вып. 1.- С. 83-128.
2. Валиев, К.А. Электроформовка как процесс самоорганизации нанометрового зазора в углеродной среде // К.А. Валиев, В.М. Мордвинцев, В.Л. Левин.- ЖТФ, 1997.- т.67, № 1.- С. 39-44.
3. Мордвинцев, В.М. Процессы самоорганизации наноструктур в углеродной среде, активирова-

мой потоком электронов в сильных электрических полях / В.М. Мордвинцев - Дисс. ... д.ф.м.н. - М.: Институт микроэлектроники и информатики РАН, 2000.- 240 с.

Д.т.н., проф. Гуляев П.Ю., к.ф.м.н., доцент Зеленский В.И. - (3467) 35-75-95, shs_lab@ugrasu.ru - Югорский государственный университет; к.т.н. Сахаров Ю.В., д.т.н., проф. Троян П.Е., тел. (3822) 53-25-57, onir@main.tusur.ru Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

УДК 621.793: 531.7:004.42

ОПИСАНИЕ И ОЦЕНКА ШЕРОХОВАТОСТИ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДАМИ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ

В. А. Каладзе, В. Н. Шапошников

В работе решены задачи формирования исходной информации для расчёта значений ГОСТ-овских характеристик, используемых в программном обеспечении станков с ЧПУ, и статистического описания результатов обработки поверхности изделия. Описание и обработка данных проведена с использованием динамической предикторной модели, как способа математического описания нестационарных случайных процессов. Результаты позволяют проводить оперативный прогноз результатов станочной обработки для корректировки качества изделия.

Ключевые слова: шероховатость, профиль, каскадный фильтр, предиктор, динамическая модель, вычислительный эксперимент

Шероховатость поверхности [1] является одной из основных геометрических характеристик качества поверхности деталей и оказывает влияние на эксплуатационные показатели изделий. Термины и определения основных понятий по шероховатости поверхности, используемые в данной работе, соответствуют ГОСТ 25142-82.

Требования, предъявляемые со стороны стандартов к характеристикам классов шероховатости поверхности, в практических руководствах и ТУ устанавливаются исходя из дальнейшего функционального назначения поверхности и связанного с ним обеспечения заданного качества изделий. К этим условиям ГОСТ 2789-73 добавляет [2] требования к состоянию поверхности изделий независимо от способа ее получения или обработки. Это дает возможность применять требования стандарта к поверхностям, обработанным резанием и другими методами, например литьем, прессованием, электрофизическими и электрохимическими методами и, тем самым, исключить второстепенные данные из допустимого множества возможных вариаций исследуемых параметров.

Нормированные параметры шероховатости поверхности оцениваются по не-

ровностям поперечного профиля, получаемого путем сечения реальной поверхности плоскостью в нормальном сечении (перпендикулярно направлению неровностей). С целью отделения характеристик шероховатости от других неровностей поверхности с относительно большими шагами, таких как отклонения формы и волнистости, их рассматривают в пределах ограниченного участка (рисунок 1), длина которого определяется как базовая длина l , на которой основными показателями являются искомые численные характеристики шероховатости. При этом шероховатость изделия определяется как совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами, выделенная на участке профиля базовой длины. Эта информация позволяет описывать поведение траектории профиля шероховатости методами локального прогнозирования

Длина интервала используемых измерений может содержать один или несколько интервалов базовой длины l .

Профиль определяется как линия пересечения исследуемой поверхности с секущей плоскостью. Под понятие случайный профиль подпадает апериодический профиль, который рассматривается как траектория реализации