

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра физической электроники (ФЭ)

Субботина Анастасия Евгеньевна

**ВЛИЯНИЕ ПОЛЯРНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ
ПРОЧНОСТЬ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ**

по направлению 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника»

Магистерская программа «Твердотельная электроника»

Диссертация на соискание
степени магистра

Руководитель
д-р техн. наук,
профессор каф.ФЭ ТУСУР
_____ Ю.В. Сахаров

Томск 2020

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра физической электроники (ФЭ)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой ФЭ

д-р техн. наук, профессор

_____ П.Е. Троян

«__» _____ 2020 г.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

на магистерскую диссертацию

Выдано студенту группы 318-М факультета электронной техники

Субботиной Анастасии Евгеньевне

1. Тема: Влияние полярности напряжения на электрическую прочность тонкопленочных конденсаторов.

Утверждена приказом по ВУЗу № _____ ст. от « _____ »2020 г.

2. Исходные данные: стеклянная подложка, материалы для получения МДМ–структур.

3. Содержание (перечень подлежащих разработке вопросов):

3.1 Изучение литературного обзора по материалам для изготовления МДМ–конденсаторов, предварительной очистки подложек и пробую тонкопленочных МДМ–систем;

3.2 Проведение предварительной очистки подложек перед напылением нижнего электрода МДМ–конденсатора для улучшения адгезии;

3.3. Получение и анализ МДМ–конденсаторов с различными диэлектриками (исследование состава, структуры, используемых диэлектриков);

3.4 Проведение пробоя МДМ–конденсаторов для исследования зависимости электрической прочности от числа пробоев при смене полярности верхнего электрода;

3.5 Вывод и анализ полученных результатов.

4. Заключение к диссертационной работе и формулировка рекомендаций.

ЗАДАНИЕ СОГЛАСОВАНО

Консультант по нормам и требованиям ЕСКД

Каранский В.В., старший преподаватель каф. ФЭ

«____» _____ 2020 г.

Подпись: _____

Руководитель работы

Сахаров Ю.В., профессор каф. ФЭ, д-р техн. наук.

«____» _____ 2020 г.

Подпись: _____

Задание принято к исполнению

Суботина А.Е., студент гр. 318–М

«____» _____ 2020 г.

Подпись: _____

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР.....	10
1.1 Тонкопленочные конденсаторы	10
1.2 Материалы для тонкопленочных конденсаторов (ТПК).....	14
1.3 Методы очистки поверхности подложки перед напылением пленок	17
1.4 Технология получения МДМ-систем.....	26
1.5 Пробой тонкопленочных конденсаторов	31
Вывод к главе 1	37
ГЛАВА 2 ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБРАЗЦОВ. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК. КОНТРОЛЬ СТРУКТУРЫ, СОСТАВА И ПОВЕРХНОСТИ	38
2.1 Технология изготовления МДМ-структур.....	38
2.2 Методы контроля толщины и электрических свойств полученных МДМ- структур	42
2.3 Состав диэлектрических пленок.....	45
2.4 Метод получения рельефа поверхности образца.....	47
Вывод к главе 2	49
ГЛАВА 3 ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ПРОБОЮ. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ОТ ЧИСЛА ПРОБОЕВ ПРИ СМЕНЕ ПОЛЯРНОСТИ ВЕРХНЕГО ЭЛЕКТРОДА .	51
3.1 Измерение электрических характеристик тонкопленочных конденсаторов.....	51
3.2 Исследование состава диэлектрических пленок для тонкопленочных конденсаторов	59
3.3 Исследование электрической прочности от числа пробоев при смене полярности.....	65
3.4 Моделирование электрического поля в процессе пробоя тонкопленочного конденсатора.....	77
Вывод к главе 3	84

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ	86
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	88

Актуальность работы

Тонкие диэлектрические пленки (ТДП) в связи с развитием микроэлектроники получили самое широкое распространение. Они применяются для создания емкостных элементов, межслойной изоляции, пассивизации поверхности, изготовления контактных масок и т.д.

Диэлектрические пленки диоксида кремния (SiO_2) и диоксида титана (TiO_2) нашли обширное использование в микроэлектронной индустрии в качестве диэлектрических слоев в МДМ (металл-диэлектрик-металл)– и МДП (металл-диэлектрик-полупроводник)–структурах. В силу присутствия оригинального сочетания параметров данные диэлектрические пленки являются обязательной частью тонкопленочных МДМ–конденсаторов [1].

Одним из факторов понижения надежности микроэлектронных приборов считается пробой диэлектрической пленки. Пробой диэлектрических пленок имеет весомое прикладное значение, потому что в значимой степени определяет долговечность и функциональность тонкопленочных устройств микроэлектронных приборов [1].

Известен факт, что при пробое тонкопленочных конденсаторов (ТПК) замечается эффект «самозалечивания», заключающийся в том, что разрушение верхнего электрода совершается на площади большей, чем площадь диаметра канала пробоя в диэлектрике, канал пробоя изолируется от электрического поля и ТПС имеет возможность работать далее.

Поскольку ТПК впоследствии пробоя не закорачиваются, а продолжают действовать, то на одном ТПК возможно производить десятки замечается увеличение пробивного напряжения $U_{пр}$ при увеличении количества пробоев на одном ТПК. Это связано с тем, что пробой случается в преимущественно слабом месте и с наращиванием числа пробоев эти слабые места выбиваются. Но такая зависимость замечается исключительно при одинаковой полярности, например, верхнего электрода [2].

Цель работы – отработка технологии изготовления МДМ–конденсаторов и исследование влияния полярности напряжения на электрическую прочность тонкопленочных конденсаторов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. провести анализ современных литературных источников, в которых освещена рассматриваемая проблематика;
2. исследовать методы очистки подложек для последующего напыления МДМ–структур, в целях улучшения адгезий нижнего электрода;
3. исследовать режимы для напыления МДМ–структур, для получения нестехиометрического состава диэлектриков;
4. исследовать состав, структуру используемых диэлектриков в получаемых МДМ–структурах;
5. исследовать зависимость электрической прочности от числа пробоев при смене полярности верхнего электрода и сделать выводы о поведении данной зависимости.
6. смоделировать распределение электрического поля в процессе пробоя, для подтверждения экспериментальных данных.

Практическая значимость

1. Установлено уменьшение напряжения первого пробоя после смены полярности на электродах тонкопленочного конденсатора. Данный эффект наблюдается в конденсаторных структурах $Al - SiO_2 - Al$ и $Al - TiO_2 - Al$, что позволяет предположить его универсальность и распространить на весь спектр диэлектрических пленок, используемых в микроэлектронике.

2. Выявлено, что отжиг диэлектрика не оказывает влияния на тенденцию снижения напряжения первого пробоя, возникающего в тонкопленочном конденсаторе при смене полярности верхнего электрода, хотя и приводят к общему его увеличению.

3. Моделирование процесса пробоя в тонкопленочном конденсаторе показало увеличение электрического поля в диэлектрическом слое при смене

полярности приложенного напряжения, что объясняется разным радиусом закругления микроострий на верхнем и нижнем электродах.

Полученные данные могут найти практическое применение в микроэлектронной промышленности и служить основой для корректировки толщин диэлектрических слоев, работающих в условиях смены полярности на электродах.

Научная новизна

1. Выявлены фундаментальные особенности протекания процесса пробоя в тонкопленочном конденсаторе при смене полярности напряжения на его обкладках.

2. Установленные особенности протекания процесса пробоя в тонкопленочном конденсаторе при смене полярности напряжения на его обкладках имеют универсальный характер.

Положения, выносимые на защиту:

1. Смена полярности напряжения на обкладках тонкопленочного конденсатора приводит к снижению на 5-8% напряжения первого пробоя.

2. Предварительный отжиг пленки диэлектрика не влияет на уменьшение напряжения каждого первого пробоя при смене полярности на обкладках тонкопленочного конденсатора.

3. Смена полярности на обкладках конденсатора приводит к изменению электрического поля в диэлектрическом слое.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 92 страницы машинного текста, включая 49 рисунков, 6 формул, 11 таблиц и списка литературы из 57 наименований. В соответствии с поставленными задачами вся диссертационная работа разделена на три главы.

Первая глава посвящена обзору литературы, в котором рассмотрены основные способы получения МДМ–конденсаторов, а в частности получение диэлектриков нестехиометрического состава, материалы, принимаемые для тонкопленочных конденсаторов. Еще в предоставленной главе рассмотрены

главные механизмы пробоя и его зависимости. Исследована физика процесса пробоя тонкопленочных систем, а также найдены способы очистки подложек. В итоге анализа литературы сформированы цели и задачи диссертационной работы.

Во **второй** главе рассмотрены способы получения тонкопленочных конденсаторов $\text{Al-SiO}_2\text{-Al}$ и $\text{Al-TiO}_2\text{-Al}$. Для изготовления опытных образцов использовалось технологическое оснащение на основе вакуумной напылительной установке *УВМ-2*. Также рассмотрены методы контроля полученных ТПК, а именно для контроля толщины полученных пленок рассмотрена установка микроинтерферометр Линника *МИИИ-4*. Для измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь МДМ-конденсаторов применяется анализатор иммитанса широкополосный *E7-20*. Элементный состав изучался с помощью ИК спектрометра Фурье *Infracum FT-801* с приставкой на пропускание и растрового электронного микроскопа *Hitachi TM-1000* с микроанализатором *Bruker Quantax 50 EDX*. Так же проводился анализ для определения наличия микроострий на верхнем электроде и в диэлектрике применялся сканирующий зондовый микроскоп СЗМ *NT-MDT «Nanoeducator 1»*. Применяя данное оборудование, будут проводиться последующие эксперименты.

В **основной части** диссертации приводятся экспериментальные данные очистки стеклянных подложек для улучшения адгезии нижнего электрода к стеклянным подложкам, чтобы не происходило отрыва нижнего электрода. Также в предоставленной главе рассматривается отработка режимов напыления диэлектриков нестехиометрического состава для МДМ-конденсаторов. Впоследствии получения МДМ-конденсаторов была исследована зависимость электрической прочности от количества пробоев при смене полярности верхнего электрода. Проведено моделирование распределения электрического поля в процессе пробоя, для подтверждения экспериментальных данных.

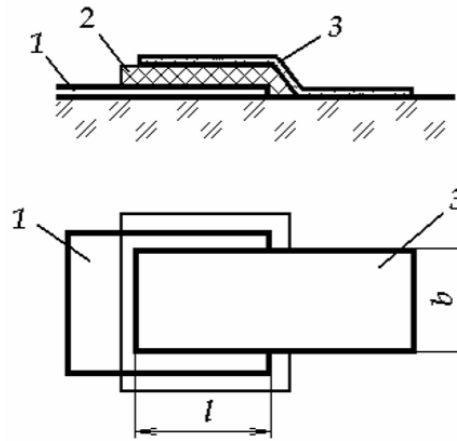
Тонкие пленки металлов, диэлектриков и полупроводников находят широкое использование во множестве областях техники и, прежде всего в микро– и нанoeлектронике. Физические процессы в тонких пленках проходят по-другому, чем в массивных материалах. В результате пленочные элементы имеют свойства, отличные от характеристик массивных образцов и дают возможность замечать эффекты не присущие массивным образцам. Удельное сопротивление резистивных пленок значительно выше, а температурный коэффициент сопротивления может отличаться не лишь только по величине, но и по знаку. В пленках нанометрового диапазона обнаруживаются размерные и квантовые эффекты. Эти отличительные качества обуславливаются структурой пленки, которая формируется на этапах зарождения и роста пленок [2].

В устройствах микроэлектроники в основном находят использование две тонкопленочные системы с диэлектрической пленкой: металл–диэлектрик–металл (МДМ), к которой относятся, к примеру, тонкопленочные конденсаторы (ТПК), и металл–диэлектрик–полупроводник (МДП), которую представляют полевые транзисторы. Основная масса данных по структуре и пробою тонкопленочных систем причисляется к системе МДМ [2].

Одним из оснований снижения надежности микроэлектронных приборов считается пробой диэлектрической пленки. Согласно ГОСТ 21515–76, пробой – это явление образования в диэлектрике проводящего канала под воздействием электрического поля [3].

1.1 Тонкопленочные конденсаторы

Тонкопленочный конденсатор (ТПК) конструктивно представляет собой многослойную структуру, в простейшем случае состоящую из двух металлических обкладок, разделенных слоем диэлектрика (рисунок 1.1) [3].



1 – нижняя обкладка; 2 – диэлектрик; 3 – верхняя обкладка; l и b – длина и ширина перекрытий верхней и нижней обкладок конденсатора.

Рисунок 1.1 – Тонкопленочный конденсатор

Главные электрические характеристики ТПК: емкость C , рабочее напряжение $U_{\text{раб}}$, тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) и эксплуатационные параметры определяются многочисленными причинами, в том числе материалами, методами напыления, толщиной пленок и др. Конструкция и технология изготовления конденсаторов имеют ряд индивидуальностей [4]. Емкость конденсатора определяется как

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S}{d}, \quad (1.1)$$

где ε_0 – электрическая постоянная;

ε – диэлектрическая постоянная материала;

S – поперечное сечение обкладок конденсатора (активная площадь);

d – толщина диэлектрической пленки.

Поскольку свойства материалов, полученных в виде тонких пленок, могут значительно отличаться от свойств массивных образцов, при проектировании конденсаторов и разработке технологии их изготовления используют понятие об удельной емкости C_0 , как одной из характеристик диэлектрического слоя

$$C_0 = \frac{C}{S} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon}{d}$$

Чем больше C_0 , тем наименьшую площадь занимает конденсатор на подложке. Надо выбирать материалы с большим ε или же создавать очень тонкую диэлектрическую пленку. Использование очень тонких пленок для увеличения емкости конденсаторов исключается, так как пленки менее 0,005–0,01 мкм являются не сплошными и содержат большое количество дефектов [4].

Второй параметр, характеризующий свойства ТПК, — электрическая прочность E_{np} , которая характеризуется величиной пробивного напряжения или же величиной пробивной напряженности поля – это значение электрического поля, при котором случается пробой и диэлектрическая пленка утрачивает собственные изолирующие свойства. Электрическая прочность определяется экспериментально по напряжению пробоя U_{np} как $E_{np} = U_{np}/d$. Электрическая прочность зависит от вещества диэлектрика и технологии получения, но для определенных условий, в среднем, возможно считать величиной неизменной [4].

Очевидно, что рабочее напряжение конденсатора должно быть меньше напряжения пробоя, т.е.

$$U_{paб} = \frac{U_{np}}{K_3} = \frac{E_{np} \cdot d}{K_3},$$

где K_3 – коэффициент запаса ($K_3 = 2 - 4$).

Из последнего соотношения можно сформулировать условие выбора минимальной толщины диэлектрика

$$d \geq \frac{U_{paб} \cdot K_3}{E_{np}}.$$

Если из этого условия толщина диэлектрической пленки выходит менее 100 нм, то надо выбирать толщину, исходя из технологических суждений, в диапазоне 100–200 нм [4].

Ещё одним параметром, характеризующим ТПК, являются потери в диэлектрических пленках. Потерями называют энергию, рассеиваемую в единицу времени в пленочной структуре при воздействии на нее

электрического поля и вызывающую нагрев всей структуры, при этом суммарные потери всей структуры складываются из потерь в отдельных ее элементах. Потери в диэлектрических пленках связаны с поляризацией, сквозной проводимостью и структурными неоднородностями материала пленки. Величину диэлектрических потерь на практике как правило характеризуют тангенсом угла диэлектрических потерь ($tg\delta$) [5].

Исследование диэлектрических потерь в пленках проводят на готовых конденсаторах. Поэтому необходимо при оценке величины потерь в пленке принимать во внимание потери в проводящих обкладках (электродах)

$$tg\delta = tg\delta' + \frac{2 \cdot \omega \cdot C \cdot \rho_v \cdot l}{3 \cdot b \cdot d_1},$$

где $tg\delta$ – измеряемый тангенс угла диэлектрических потерь;

$tg\delta'$ – частотно-независимый вклад диэлектрика;

C – емкость конденсатора;

ω – угловая частота;

ρ_v – удельное объемное сопротивление материала электродов;

d_1 – толщина электродов;

l, b – длина и ширина площади перекрытия верхнего и нижнего электродов.

Из этого уравнения видно, что собственно ρ_v, d_1 и их соотношение сильно воздействуют на работу ТПК при высоких частотах. Ограничения по частоте для высокочастотных конденсаторов могут быть уменьшены увеличением толщины и проводимости металлических электродов [5].

В заключение следует отметить, что потери являются объемным свойством диэлектрика и не зависят от толщины пленки. Впрочем, при конкретной толщине поверхность пленки начинает влиять на переориентацию диполей и, значит, на величину потерь, которые также зависят от структурных дефектов, возникших в процессе изготовления пленки [5].

1.2 Материалы для тонкопленочных конденсаторов (ТПК)

Конденсаторы являются широко распространенными элементами пленочных микросхем. Большинство характеристик конденсаторов (величина номинала, стабильность, рабочее напряжение, температурная и временная стабильность, частотные свойства, добротность, полярность, надежность и др.) зависят от выбранных материалов и технологии изготовления.

Материал, использующийся для изготовления диэлектрических слоев, должен иметь хорошую адгезию к материалам подложки и обкладок, не вступать с ними в химические реакции. Так же диэлектрические материалы должны обладать минимальной гигроскопичностью, высокой механической прочностью при повторяющихся изменениях температуры. Диэлектрическая пленка должна быть довольно непроницаемой, иметь высокую электрическую прочность, малые диэлектрические потери, незначительную величину температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР), сравнимую с ТКЛР подложки, иметь высокую диэлектрическую проницаемость и не разлагаться при нагревании. Лучше других этим требованиям удовлетворяют характеристики диэлектриков, приведенных в таблице 1.1 [6].

Таблица 1.1 – Основные характеристики диэлектрических материалов тонкопленочных конденсаторов

Наименование материала	Материал обкладок	Удельная емкость $C_0, \frac{nФ}{см^2}$	Электрическая прочность $E_{пр}$, В/см	Диэлектрическая проницаемость ϵ на частоте $f=1$ кГц
Моноокись кремния	Алюминий А99	5000-10000	$(2 - 3) \cdot 10^6$	5-6
Моноокись германия		5000-15000	$1 \cdot 10^6$	11-12
Боросиликатное стекло (БСС)		2500-15000	$(3 - 4) \cdot 10^6$	4

Продолжение таблицы 1.1

Наименование материала	Материал обкладок	Удельная емкость $C_0, \frac{nФ}{см^2}$	Электрическая прочность $E_{пр}$, В/см	Диэлектрическая проницаемость ϵ на частоте $f=1$ кГц
Стекло электровакуумное С41-1	Алюминий А99	15000-40000	$(3 - 4) \cdot 10^6$	5,2
Пятиокись тантала	Тантал ТВЧ	60000-100000	$2 \cdot 10^6$	23

Не считая материалов, приведенных в данной таблице, для изготовления тонкопленочных конденсаторов могут использоваться двуокись кремния, окислы тантала, двуокись титана, титанат бария и др [6].

Плѐнки диоксида кремния (SiO_2) занимают сейчас ведущее место в номенклатуре диэлектрических материалов, используемых в микро– и нанoeлектронике. В первую очередь это БИС на кремнии, МДП транзисторы, межуровневая изоляция, технологические маски на промежуточных стадиях изготовления полупроводниковых устройств и др. Данные диэлектрические пленки имеют ряд преимуществ: являются термически стойкими, химически инертными в широком диапазоне температур, имеют сравнительно высокую электрическую прочность, низкий температурный коэффициент расширения и технологически совместимы с большинством полупроводников [7].

Рассмотрим свойства некоторых наиболее часто применяемых диэлектрических материалов в научно-исследовательских целях и производстве.

Моноокись кремния (SiO), как правило получаемая термическим испарением, имеет диэлектрическую постоянную от 3,5 до 6, что соответствует изменению состава от двуокиси кремния SiO_2 до чистой SiO , формирует малодефектную и гладкую пленку [7].

Пленки окиси тантала (Ta_2O_5) получают ионно-плазменным распылением (реактивное, высокочастотное) или же анодным окислением. Эти пленки характеризуются диэлектрической проницаемостью, изменяющейся в диапазоне 16–25, и малой дефектностью для анодноокисляемых пленок. Электрическая прочность конденсаторов с использованием диэлектрика Ta_2O_5 сильно зависит от материалов электродов и способов их получения [7].

Пленки окиси алюминия (Al_2O_3) с $\varepsilon = 8 - 10$ получают ионно-плазменным распылением, электронной бомбардировкой, анодным окислением. При испарении исходного вещества Al_2O_3 с помощью электронного луча пленки на подложке получаются нестехиометрического состава с недостатком кислорода, собственно что приводит к ухудшению свойств пленок [7].

При испарении **окислов титана** (TiO_2) и **циркония** (ZrO_2) получают соответственно пленки с $\varepsilon = 30 - 40$ и $\varepsilon = 20 - 22$. Электрическая прочность и другие характеристики ТПК зависят от способов получения диэлектрических пленок и материала обкладок [7].

В процессе конструирования ТПК материал и технология диэлектрической пленки выбирается со свойствами, обеспечивающими заданные характеристики ТПК. К примеру, в случае если в схеме требуется конденсатор с большой стабильностью емкости, то лучше использовать пленки из окиси тантала. В случае если потребуются конденсаторы с малыми значениями емкости, то в качестве диэлектрика применяют двухслойную пленку из окиси тантала и двуокиси кремния, а также используют пленки на основе боросиликатного стекла (80 % SiO_2 и 20 % B_2O_3) [7].

Для обеспечения наименьших потерь на высоких частотах, обкладки конденсаторов чаще всего изготавливают из материалов с низким электрическим сопротивлением. Материал обкладок должен легко испаряться, иметь невысокую подвижность атомов при образовании пленки и невысокую энергию испаренных частиц (во избежание диффузии и внедрения атомов металла в диэлектрик). Добротность ТПК в основном определяется

сопротивление металлических электродов, которое зависит в большой степени от их толщины [8].

Практика показала, что для нанесения обкладок лучшим материалом считается алюминий, использование которого обеспечивает более высокий процент выхода годных тонкопленочных конденсаторов по сравнению с другими металлами. Это объясняется относительно низкой температурой испарения алюминия и малой подвижностью его атомов на поверхности, благодаря окислительным процессам. Но нужно обязательно исключить разбрызгивание, то есть попадание крупных капель и прожигание диэлектрика при нанесении верхнего электрода. Удельное поверхностное сопротивление алюминиевой пленки достаточно мало и при ее толщине 2500–5000 Å находится в интервале 0,2–0,06 Ом/□. Это обеспечивает высокую добротность тонкопленочных конденсаторов [8].

1.3 Методы очистки поверхности подложки перед напылением пленок

Чистота поверхности подложки считается важным фактором, определяющим структурную однородность пленки. Посторонние примеси имеют все шансы вызвать разрывы в пленке и кристаллизацию в локализованных областях. Подтверждено, что загрязнения поверхности является причиной быстрого травления дефектов и образования проколов. Также считается, что посторонние примеси на поверхности подложки способствуют созданию высокой плотности поверхностных состояний на границе раздела подложка–пленка. Очистка поверхности проводится для удаления загрязнений с поверхности, так как загрязнения воздействуют на равномерность пленки и адгезию, собственно, что в последующем плохо воздействует на воспроизводимость полученных пленок [9].

Вакуумно-плазменные технологии применяются для нанесения тонких функциональных покрытий на различные материалы (металлы, стекло,

полимеры и др.). Свойства этих покрытий зависят как от параметров нанесения, так и от состояния поверхности подложки. Перед тем как приступить к операциям очистки поверхности, необходимо знать природу, характер и источник загрязнений.

Поверхностные атомы пластин (подложек) по сопоставлению с объемными имеют большое количество ненасыщенных химических связей, чем объясняется высокая адсорбционная способность, приводящая к загрязнениям. В зависимости от типа взаимодействия загрязняющего вещества с поверхностью различают физическую и химическую адсорбцию [9].

Физическая адсорбция является результатом межмолекулярного (силы Ван дер Ваальса) электростатического кулоновского взаимодействия. Адсорбированные частицы, совершая тепловые движения, могут преодолеть силы связи и оторваться (десорбция) от поверхности, то есть адсорбция — процесс обратимый. Физически адсорбированные загрязнения размещаются на поверхности в некоторое количество слоев и относительно просто удаляются чистым растворителем, отжигом (испарением) в вакууме [10].

Химическая адсорбция является необратимым процессом, так как между загрязнениями и поверхностью образуются прочные химические связи. Загрязнения закрепляются только одним слоем (монослой), удалить их более сложно. Источники загрязнения представлены на рисунке 1.2 и в таблице 1.2 [10].

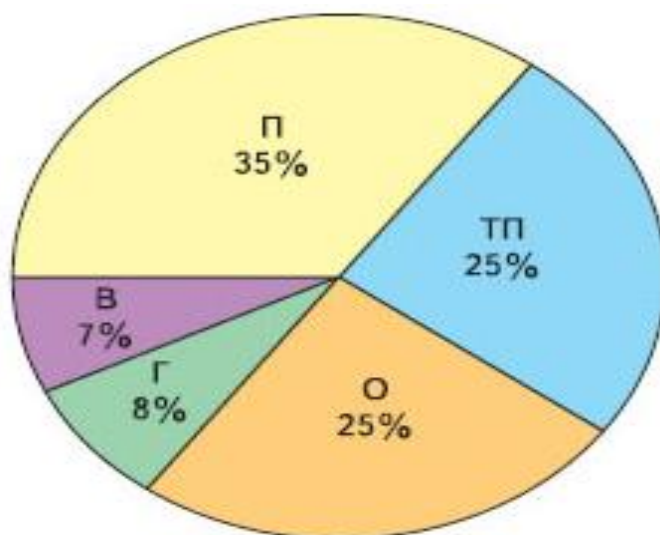


Рисунок 1.2 – Основные источники микрочастиц пыли: П – обслуживающий персонал, ТП – технологический прогресс, О – оборудование, Г – газы и химикаты, В – воздушная среда.

Таблица 1.2 – Типичные загрязнения полупроводниковых пластин и их источники

Загрязнения	Возможные источники
Волокна	Одежда, ткани, бумажные изделия
Силикаты	Горные породы, песок, почва, пепел
Окислы и окалина	Продукты окисления некоторых металлов
Масла и жиры	Масла от машинной обработки, отпечатки пальцев, жиры с открытых участков тела, средства для волос, мази
Силиконы	Аэрозоли для волос, кремы, мыло
Металлы	Частицы из металлических банок для хранения

Продолжение таблицы 1.2

Загрязнения	Возможные источники
Ионные примеси	Продукты дыхания, отпечатки пальцев (хлорид натрия), примеси от предварительной химической операции
Растворимые примеси	Очищающие растворы

Степень и состав загрязнений различны при различных обработках. На поверхности пластин и подложек одновременно могут присутствовать почти все виды загрязнений. Наиболее трудноудаляемыми считаются органические и кое-какие химически связанные с поверхностью загрязнения. Из физических загрязнений наиболее сложно удаляются мелкие зерна абразива, внедренные в поверхностный слой. Из растворимых в воде полярных загрязнений удаляются подвижные ионы металлов, изменяющие электропроводность поверхности. В то же время получить безупречно чистую поверхность (без посторонних примесей) буквально невозможно. Вследствие этого используемое в технике понятие «чистая поверхность» имеет относительный характер [10].

В соответствии с используемыми способами, очистку разделяют на жидкостную и сухую. Классификация методов очистки приведена на рисунке 1.3 [11].

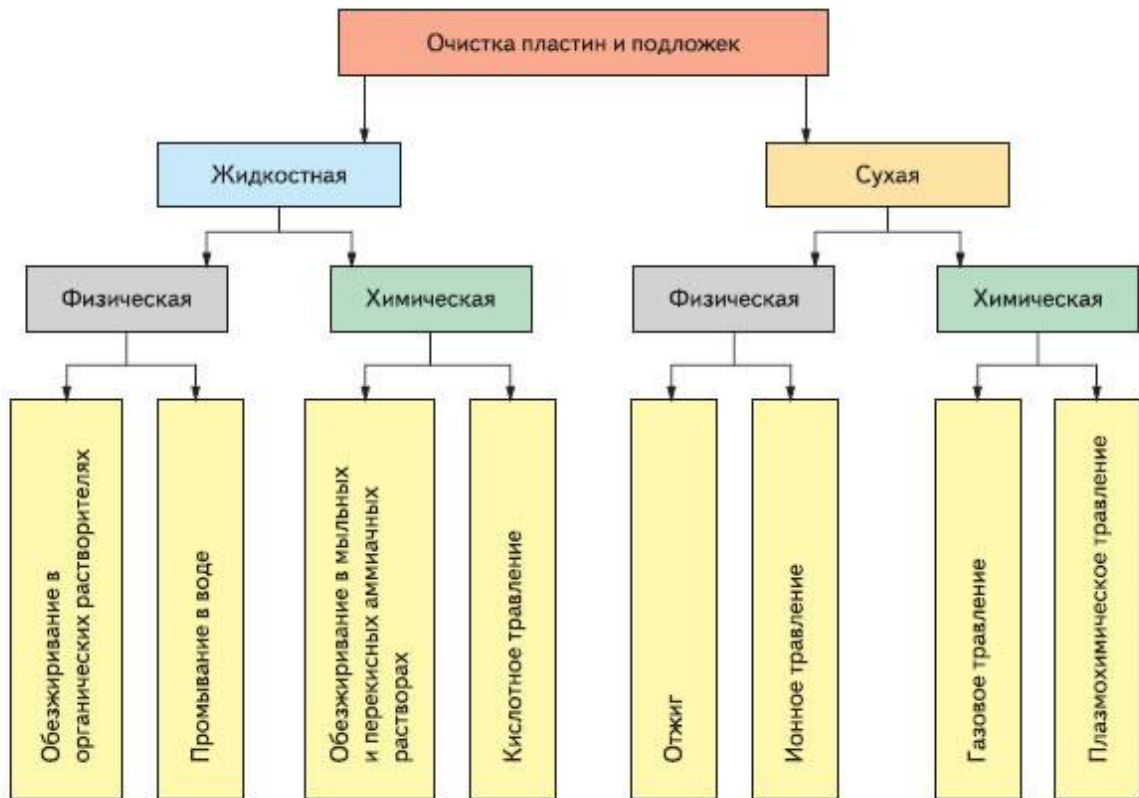


Рисунок 1.3 – Классификация методов очистки пластин и подложек

Жидкостная очистка (ЖО) производится органическими растворителями; различными составами, содержащими щелочи, кислоты, пероксид и иные реактивы, водой. Подобрать жидкое средство, одновременно удаляющее все возможные поверхностные загрязнения, практически нельзя, поэтому ЖО включает ряд последовательных операций. Нерастворимые в воде органические жировые загрязнения делают поверхность гидрофобной, то есть плохо смачиваемой водой и большинством растворов. Для равномерной очистки поверхность подложек (пластин) необходимо перевести в гидрофильное, то есть хорошо смачиваемое водой, состояние. Операция удаления жировых загрязнений, сопровождаемая переводом поверхности из гидрофобного в гидрофильное состояние, называется обезжириванием (обезжиривание — первая операция при ЖО) [11].

Физическая очистка. При очистке в первую очередь нужно удалить молекулярные, органические и химически связанные с поверхностью

загрязнения, а вслед за тем – остаточные ионные и атомарные. При физической ЖО происходит десорбция адсорбированных поверхностью загрязнений без изменения их состава, то есть без химических реакций, путем простого растворения. Поскольку вполне вероятно обратное загрязнение поверхности из очищаемой жидкости, необходимо следовать принципу ее непрерывного обновления (освежения) [11].

Химическая очистка: этот вид обработки учитывает разрушение загрязнений или поверхностного слоя очищаемого объекта в результате химических реакций.

Также состояние поверхности подложки в свою очередь зависит от условий ее предварительной обработки. Для повышения качества наносимых покрытий необходимо удалить имеющуюся на подложке пленку загрязнений, то есть очистить поверхность [12]. Вид очистки зависит от материала подложки, количества и состава поверхностных загрязнений. В соответствии с последовательностью и характером проведения очистки различают: грубую и деликатную механическую очистку; грубую и тонкую химическую очистку; термическую обработку на воздухе и в вакууме; тонкую очистку и активацию поверхности в вакууме с помощью всевозможных физических воздействий [13].

Механическая очистка. Механическая очистка заключается в удалении механических загрязнений: остатков окалины и ржавчины, крупных скоплений смазочного материала. Она состоит в обработке поверхности металлическими щетками, наждачной бумагой и протирании ветошью. Эту очистку в основном используют при обработке поверхности металлических элементов вакуумной камеры, внутрикамерных устройств и приспособлений [14].

Химическая очистка. Грубая химическая очистка состоит в удалении с поверхности видимых слоев органических загрязнений: остатков масел, смазочных материалов, красителей, отпечатков пальцев и жировых пятен.

Для удаления продуктов очистки с поверхности обрабатываемых деталей и обеспечения высококачественного состояния поверхности после

грубой химической очистки рекомендовано использовать мягкие ткани на подобии бязи и др.

Тонкую химическую очистку в растворах неорганических кислот и щелочах (например, в растворе 25мл HCl + 25мл H₂O₂ + 125H₂O), а также в парах органических растворителей используют для обеспечения качественной подготовки поверхности перед нанесением покрытия. Для интенсификации процесса очистки используют ультразвуковые ванны; процесс очистки ведут, как правило, при повышенной температуре раствора [15].

Нагрев деталей в вакууме и электрофизическая обработка. Нагрев деталей и электрофизическая обработка используются после помещения подложки в вакуумную камеру. Термическая обработка представляет собой процесс нагрева поверхности подложки до температуры, при которой не случается деформация подложки, выдержку при данной температуре, вслед за тем остывание до температуры конденсации распыленных частиц. В процессе нагрева и выдержки происходит обезгаживание поверхности. Однако не все материалы, возможно, подвергать термической обработке из-за их ограниченной термической устойчивости, к примеру, полимеры, полупроводниковые структуры, нетермостойкие композиции, а также изделия сложной геометрической формы [15].

Термическая обработка может ухудшить свойства поверхности данных материалов. Для обработки поверхности подложки перед осаждением покрытия используют электрофизические способы. К примеру, очистка поверхности излучением импульсных ламп в высоком вакууме и очистка поверхности в тлеющем разряде на этапе откачки системы механическим насосом. При очистке полимерных материалов излучением импульсных ламп типа ИФП происходит отрыв адсорбированных молекул с поверхности подложки. При этом не случается заметного разогрева поверхности подложек, и адгезия пленок металлов значимо возрастает. Достигается сочетание высокотемпературного нагрева поверхности с невысокой температурой в объеме подложки. Реализуется термическая обработка только при поверхностной области [15].

При нагреве в вакууме происходят активное обезгаживание поверхности и перевод остаточных жировых загрязнений в летучие продукты с дальнейшей откачкой их из вакуумной камеры. Однако повышенное газовыделение может привести к нарушению режима работы откачных устройств вакуумной системы [15].

Термическая обработка поверхности подложки в вакууме позволяет удалить с ее поверхности буквально все летучие продукты, остающиеся впоследствии механической и химической обработки. Данный вид подготовки поверхности более длительный процесс из всех других видов, однако, в ряде случаев считается единственным возможным способом получения качественных покрытий и обеспечения стабильного процесса нанесения покрытий [15].

Перечисленные методы очистки поверхности подложек и некоторые технологические приемы дают возможность получать пленки с высокой адгезией, собственно, что исключает отслаивание пленки за счет возникновения в ней больших внутренних напряжений.

1.4 Технология получения МДМ-систем

Известно, что свойства тонких пленок существенно отличаются от свойств массивного материала, тем более, в случае если толщина пленки мала. Эти отличительные свойства пленок обусловлены спецификой ее структуры, которая является следствием особенностей процессов зарождения и роста пленок. Чаще всего тонкие пленки получают методом осаждения атомарного потока вещества на подложку атом за атомом [16].

Изготовление диэлектрических пленок может быть осуществлено разными технологическими способами. Более распространенными и обширно используемыми в интегральной технологии являются следующие: термическое испарение в вакууме, ионное распыление, реактивное катодное распыление, термическое окисление, анодирование осаждаемых на подложку

металлических пленок, химическое осаждение из паровой фазы. Для изготовления металлических пленок в качестве электродов в основном используют термическое испарение в вакууме [16].

Выбор метода изготовления диэлектрической пленки зависит от природы осаждаемого материала, предназначения пленки, от технологической совместимости метода с процессом изготовления остальных элементов ИС.

Ионное распыление

Ионно-плазменное распыление – это процесс распыления мишени, выполненной из требуемого материала, высокоэнергетическими ионами инертных газов. Распыленные ионами атомы материала мишени, осаждаясь на подложке, формируют пленку материала [16].

Данный метод позволяет получать пленки буквально всех материалов, испаряющихся инконгруэнтно: проводников, полупроводников и диэлектриков без нарушения исходного состава и структуры. Однако коэффициент использования материала при ионно-плазменном распылении в несколько раз больше, чем при термическом испарении.

При формировании пленок ионным распылением осаждение атомов на подложку происходит в итоге распыления мишени (катода) при бомбардировке ее быстрыми частицами (чаще положительными ионами) (рисунок 1.4) [16].

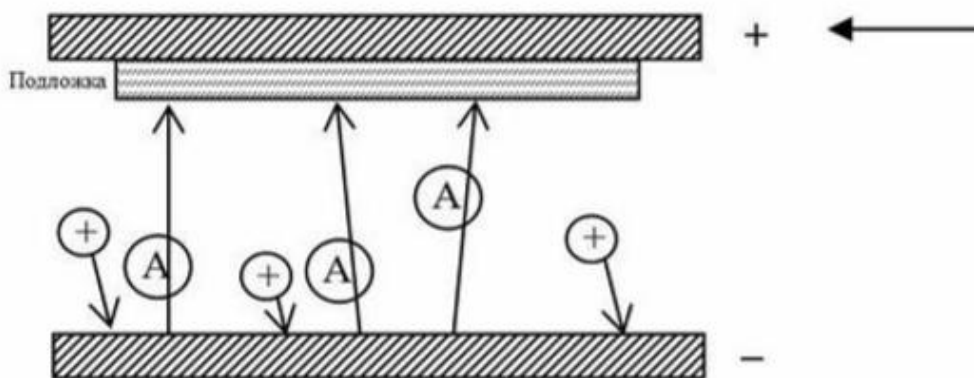
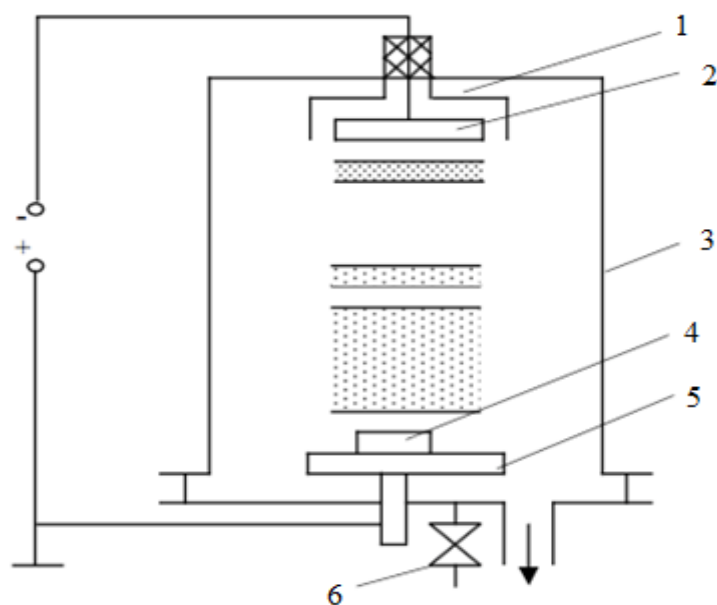


Рисунок 1.4 – Схема осаждения пленки ионным распылением

В случае если энергия, получаемая атомом мишени при соударении с ионом, оказывается больше энергии связи в кристаллической решетке, атом

отрывается от поверхности. Распыленные атомы, достигнув подложки, конденсируются на ней. Частицы, попадая на подложку, конденсируются на ней, образуя небольшие скопления, состоящие из нескольких атомов. Скопления по мере их роста переходят в зародыши, которые, разрастаясь, образуют сплошную пленку [17].

Катодное распыление основано на явлении разрушения катода при бомбардировке его ионизированными молекулами разряженного газа. Схема процесса катодного распыления изображена на рисунке 1.5 [18].



1 – экран; 2 – катод; 3 – рабочая камера; 4 – подложка; 5 – анод;
6 – натекаТЕЛЬ.

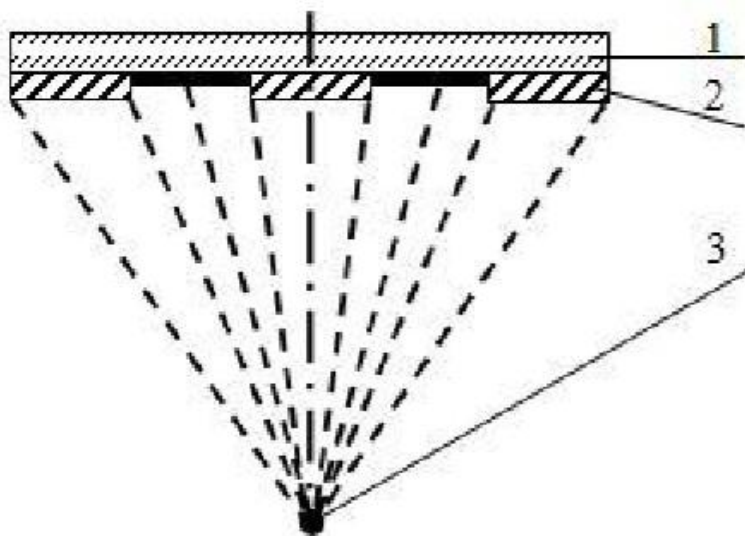
Рисунок 1.5 – Схема процесса катодного распыления

В рабочей камере 1 установлена двухэлектродная система, состоящая из «холодного» катода 2, изготовленного из материала, подвергаемого распылению, и анода 4, на котором располагается подложка 5. Из рабочей камеры откачивается воздух, впоследствии чего в камеру напускается рабочий газ, давление которого устанавливается равным 1–10 Па [18].

Затем между катодом и анодом подается высокое напряжение, порядка нескольких киловольт, которое вызывает пробой газового промежутка и поддержание разряда для загорания плазмы [18].

Термическое испарение

Сущность метода термического испарения состоит в том, что материал, из которого надо получить пленку, нагревается в вакууме до высокой температуры. Испарившиеся атомы в условиях высокого вакуума летят по прямолинейным траекториям, не испытывая столкновений. При ударе атомов испарившегося вещества о какую-либо поверхность, они конденсируются на ней, образуя пленку (рисунок 1.6) [19].



1 – подложка; 2 – экран; 3 – испаряемое вещество.

Рисунок 1.6 – Схема осаждения термическим испарением

Для обеспечения перемещения атомов испаряемого вещества без столкновений их средняя длина свободного пробега должна быть больше расстояния от испаряемого вещества до подложки. При давлении 10^{-2} Па средняя длина свободного пробега равна 50 см, собственно, что превышает реальное расстояние от испаряемого вещества до подложки (обычно не более 20 см). Поэтому при термическом испарении в вакууме давление остаточных газов составляет 10^{-2} – 10^{-3} Па. Нагрев вещества в вакууме осуществляется до температуры, при которой возрастающая с нагревом кинетическая энергия атомов и молекул вещества становится необходимой для отрыва их от поверхности и распространения в окружающем пространстве. Это происходит при такой температуре, при которой давление собственных паров вещества

превышает на несколько порядков давление остаточных газов. При этом атомарный поток распространяется прямолинейно и при столкновении с поверхностью испаряемые атомы и молекулы конденсируются на ней [19].

Процесс испарения осуществляется по обычной схеме: твердая фаза–жидкая фаза–газообразное состояние. Некоторые вещества (магний, кадмий, цинк и др.) переходят в газообразное состояние, минуя жидкую фазу. Такой процесс называется сублимацией.

Для формирования молекулярного потока условия в пролетном пространстве между испарителем и подложкой должны быть такими, чтобы молекулы испаренного вещества без столкновений с молекулами остаточных газов достигали подложки. В случае если столкновения часты, то будет мала скорость осаждения пленок, велико подпыление (рисунок 1.7 (а)). Направленное движение молекул вещества к подложке может быть создано за счет достаточно высокого вакуума и путем соответствующей конфигурации испарителей (рисунок 1.7 (б)) [19].

Для определения условий существования молекулярного потока удобнее охарактеризовать степень вакуума не давлением остаточных газов p_r , а средней длиной свободного пробега молекул $\bar{\lambda}$:

$$\bar{\lambda} = \frac{k \cdot T_r}{p_r \cdot \pi \cdot \sigma^2 \cdot \sqrt{2}},$$

где k – постоянная Больцмана;

T_r – температура газа;

p_r – давление газа;

σ – диаметр молекул испаряемого вещества.

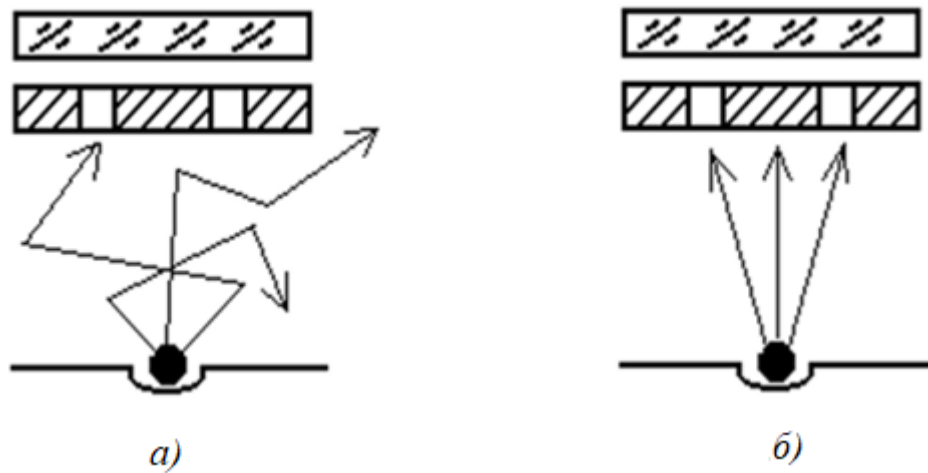


Рисунок 1.7 – Осаждение пленок в условиях низкого (а) и высокого (б) вакуума

Исследование процесса образования и роста пленок показали, что в начальный момент на подложке возникает большое количество зародышей, причем появление их является внезапным и практически одновременным, а дальнейшая поверхностная плотность частиц изменяется незначительно. С увеличением размера частиц при образовании контактов между ними возникает взаимодействие между зародышами, приводящее к их слиянию. Последующее увеличение количества сконденсированного материала приводит к образованию единой сетки из срастающихся частиц. Между частицами сохраняются каналы равной ширины, образующие разветвленную систему просветов между частицами. Заращение данных каналов приводит к образованию сплошной пленки. Образование сплошной пленки определяется механизмом зарождения центров (зародышей) и последующим ростом [19].

1.5 Пробой тонкопленочных конденсаторов

Тонкие диэлектрические пленки (ТДП) играют весомую роль в любой интегральной схеме и в качестве изолятора (например, в МОП–транзисторах), и диэлектрика в тонкопленочных конденсаторах (ТПК). Вследствие этого исследование пробоя ТДП является необходимой не только научной, но и

практической задачей. Исследование пробоя ТДП проводится в тонкопленочной системе металл-диэлектрик-металл (МДМ–системе) [20].

Поскольку сопротивление электродов (металлической пленки) много меньше сопротивления диэлектрика, прикладываемое к МДМ–системе напряжение (U) равно напряжению, прикладываемому непосредственно к диэлектрику [20].

Уже из механизма роста металлических пленок понятно, что нижний электрод (Me–пленка осаждается непосредственно на подложку) будет не гладким, а представлять собой холмистую поверхность. Это подтверждается экспериментально, на рисунке 1.8 показана поверхность пленки Al: ясно видны микроострия шарообразной и конусообразной формы [20].

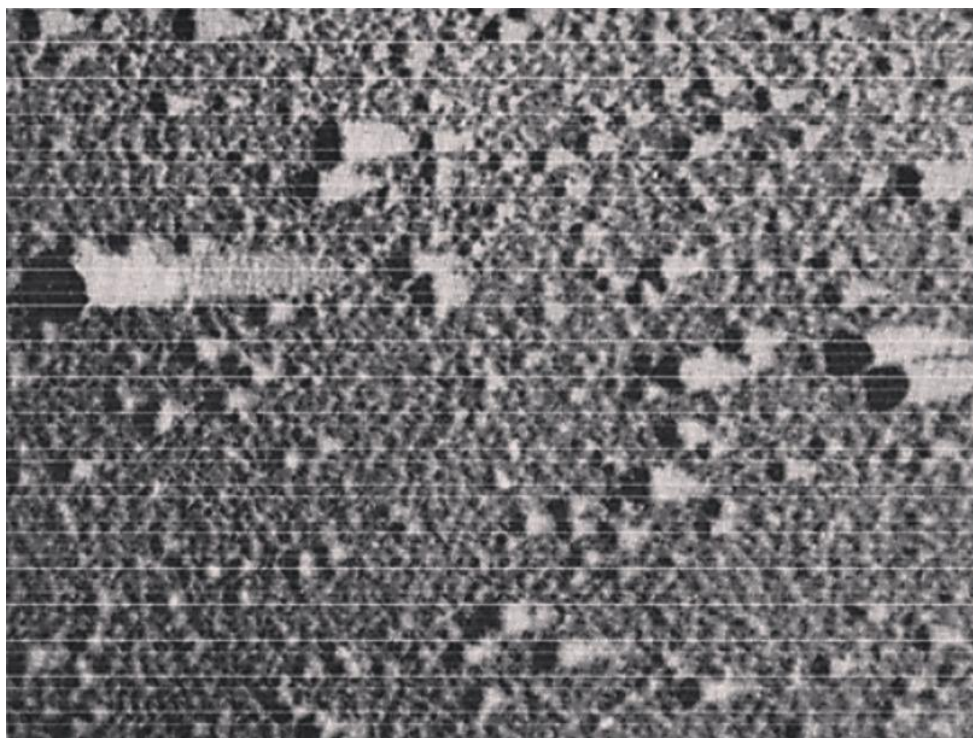


Рисунок 1.8 – Микрофотография угольно-платиновой реплики с поверхности нижнего электрода ($\times 26000$)

На рисунке 1.9 показана зависимость радиуса закругления (r) от высоты микроострия (H).

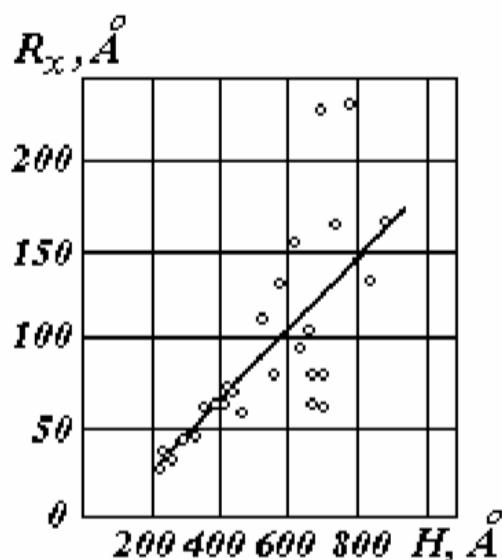


Рисунок 1.9 – Зависимость радиуса закругления микроострий от высоты

При напылении диэлектрика (D) на такую поверхность пленка диэлектрика сглаживает невысокие микроострия (загрунтовывает), но в основном, повторяет рельеф нижнего электрода. Кроме того, сама пленка диэлектрика вносит собственные неоднородности в рельеф системы: микротрещины (из-за разницы в коэффициенте линейного расширения металлического электрода и диэлектрика) поры, образовавшиеся при ударе растущей пленки диэлектрика крупными частицами, прилетевшими из испарителя. Верхний электрод, в случае если он не вносит дополнительных (своих) дефектов структуры, повторяет рельеф поверхности диэлектрика [20].

Таким образом, пробой диэлектрика в МДМ-системе происходит в неоднородном электрическом поле (рисунок 1.10), что существенно усложняет сопоставление эксперимента с количественными расчетами, проводимыми, как правило, для однородного электрического поля [21].

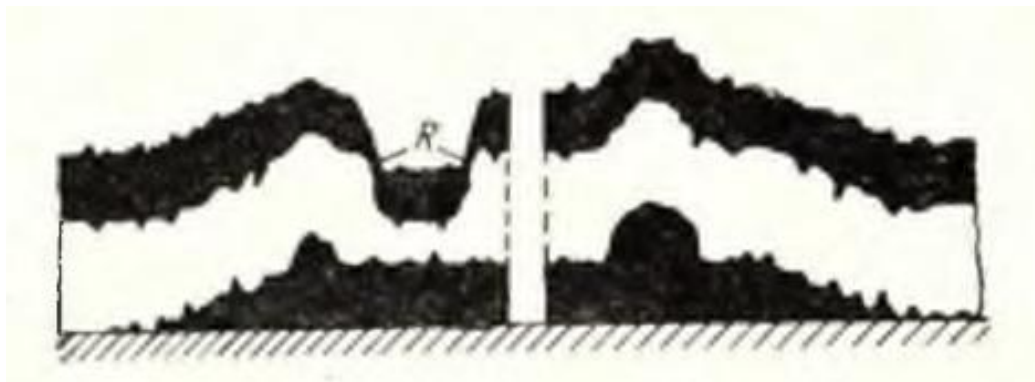


Рисунок 1.10 – Схематическое изображение структуры тонкопленочного конденсатора Al-SiO-Al

Из строения тонкопленочной системы видно, что место пробоя не равновероятно по всей площади, а определяется наиболее «слабым» местом.

При пробое тонкопленочных МДМ-систем наблюдается эффект «самозалечивания». Эффект «самозалечивания» связан с тем, что энергия, выделяющаяся при пробое, разрушает верхний электрод (ВЭ) на площади большей, чем канал пробоя в диэлектрике (рисунок 1.11) [21].

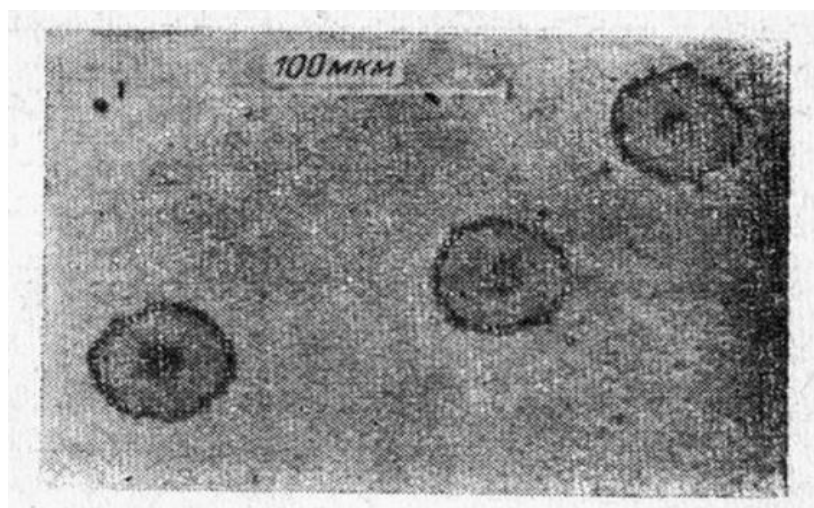
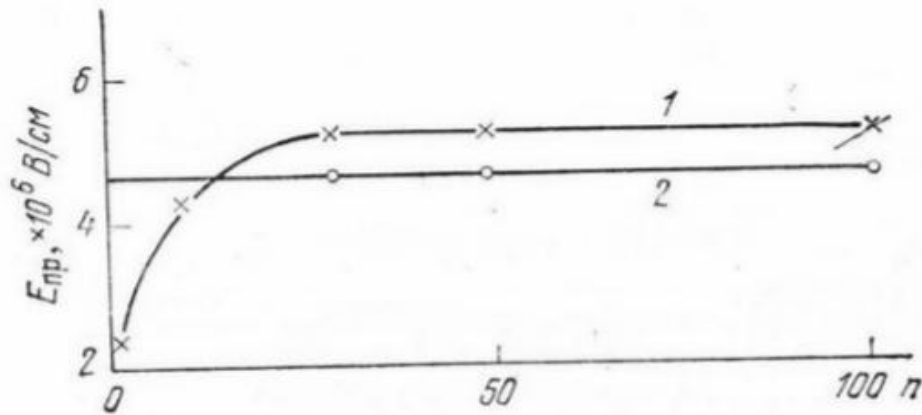


Рисунок 1.11 – Микрофотография пробоев ТПК Al-PbTiO₂-Al

Канал пробоя в диэлектрике оказывается изолированным и это позволяет производить на одном ТПК несколько десятков пробоев (рисунок 1.12). Поскольку ТПК впоследствии пробоя не закорачиваются, а продолжают функционировать, то на одном ТПК возможно производить десятки и даже

сотни пробоев. При этом в большинстве случаев наблюдается увеличение пробивного напряжения U_{np} при увеличении количества пробоев на одном ТПК. Но такая зависимость наблюдается только при одинаковой полярности, к примеру, верхнего электрода [21].



1 – толщина диэлектрика 0,3 мкм; 2 – 0,03 мкм.

Рисунок 1.12 – Зависимость E_{np} ТПК Al-Si₃N₄-Al от числа пробоев при различной толщине диэлектрика

Многие исследователи считают, что именно напряжение пробоя на «полке» характеризует E_{np} самого диэлектрика: увеличенное E_{np} с увеличением количества пробоев связано с «выбиванием» дефектных мест в структуре ТПК, не характеризующим материал диэлектрика. Однако было замечено, что при дальнейших пробоях довольно нередко разряд случается по местам предыдущих пробоев. Пробой при этом инициируется с края отверстия в верхнем электроде либо по воздуху, либо по поверхности диэлектрика. Эти пробойи абсолютно не охарактеризовывают механизм пробоя диэлектрической пленки [22].

Известно, что ТПК после пробоя не закорачиваются, а продолжают функционировать; мало того, в большинстве случаев наблюдается увеличение пробивного напряжения U_{np} при увеличении количества пробоев на одном ТПК (рисунок 1.13) [22].

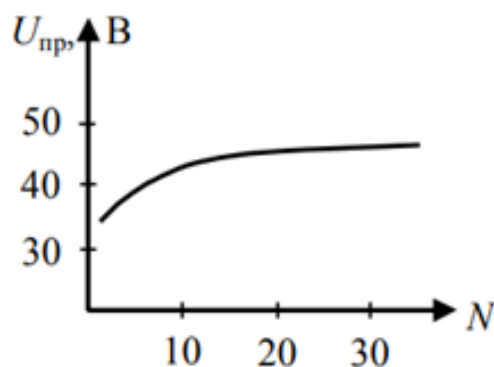
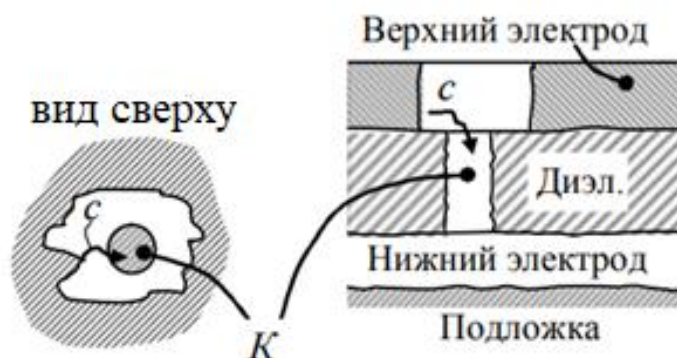


Рисунок 1.13 – Зависимость $U_{пр}$ от числа пробоев N

Это связано с тем, что пробой происходит в наиболее слабом месте и с увеличением количества пробоев эти слабые места выбиваются. Именно такую методику определения $U_{пр}$ приняли многие ученые: считалось, что, выйдя на «полку» в зависимости $U_{пр}(N)$, изучается пробой в диэлектрике, лишенном грубых дефектов [22].

Но с увеличением количества пробоев увеличивается вероятность пробоя по месту предыдущего пробоя (рисунок 1.14). И вероятность такого процесса возрастает с ростом толщины диэлектрика. К примеру, в системе Al–SiO–Al при $d \geq 4000 \text{ \AA}$ уже второй пробой мог происходить по месту предыдущего пробоя. А это уже абсолютно иные обстоятельства пробоя: не в диэлектрике, а по поверхности диэлектрика или даже в воздухе [22].



K – канал пробоя в диэлектрике; c – возможная траектория пробоя по месту предыдущего пробоя.

Рисунок 1.14 – Схематическое изображение места пробоя в ТПК

Вследствие этого при исследовании механизма пробоя за напряжение пробоя следует брать именно напряжение первого пробоя, а слабые места, не свойственные для исследуемого диэлектрика, нужно ликвидировать совершенствованием технологии.

Достоинством данной методики считается то, что пробой при любой толщине диэлектрической пленки происходит изнутри ее и, следовательно, пробивное напряжение характеризует эту ТПС. Полученные при этом зависимости $U_{пр}$ от какого-либо фактора могут быть использованы в практике конструирования ИС, так как для них опасен и первый пробой [22].

Недостатком данной методики является то, что первый пробой определяется наиболее слабым местом, природа которого, может быть, и не связана с исследуемой ТПС. Для устранения этого недостатка следует применять статистику, т.е. пробивать некоторое количество ТПК при одних и тех же условиях и использовать ТПК малой площади [22].

Значимость как раз первого пробоя имеет и практическое значение. В интегральной схеме не всегда в результате пробоя диэлектрической пленки происходит «самозалечивание», т.е. выгорание верхнего слоя металлизации на большой площади. В случае если толщина верхнего электрода (слоя металлизации) велика, то изоляции канала пробоя в диэлектрике от электрического поля не будет и в результате пробоя произойдет короткое замыкание – схема выйдет из строя.

Вывод к главе 1

В данной главе были рассмотрены основные характеристики и конструкция тонкопленочных конденсаторов и материалы, используемые для их изготовления. Исходя из данных исследований, были выбраны материалы для изготовления МДМ-систем и способы их получения. В данной диссертационной работе в качестве диэлектриков применялись диоксид кремния (SiO_2) и диоксид титана (TiO_2), полученные ионно-плазменным

распыление. В качестве электродов использовался Al, полученный термическим испарением в вакууме.

Рассмотрены основные способы очистки подложки перед напылением нижнего электрода, с целью улучшения адгезии к подложке. На базе изученного материала был выбран оптимальный (подходящий) режим очистки.

Изучена физика процесса пробоя тонкопленочных конденсаторов. Основные подходы к пониманию данного процесса. На основании литературных данных была выбрана методика определения напряжения пробоя. А также на основании множества экспериментальных данных из литературного обзора были сделаны выводы о том, собственно, что нужно использовать для экспериментов.

ГЛАВА 2 ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБРАЗЦОВ. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК. КОНТРОЛЬ СТРУКТУРЫ, СОСТАВА И ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ

В данной главе рассмотрены способы получения тонкопленочных конденсаторов $\text{Al-SiO}_2\text{-Al}$ и $\text{Al-TiO}_2\text{-Al}$. Для изготовления экспериментальных образцов использовалось технологическое оснащение на основе вакуумной напылительной установке *УВМ-2*. Вакуумная система установки *УВН-2М* состоит из механического насоса и паромасляного высоковакуумного насоса.

Также рассмотрены способы контроля полученных ТПК, а именно для контроля толщины полученных пленок рассмотрен микроинтерферометр Линника *МИИ-4*, предназначенный для визуальной оценки, измерения и фотографирования высоты микронеровностей тонко обработанных поверхностей. Для измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь МДМ-конденсаторов используется анализатор иммитанса широкополосный *Е7-20*.

Элементный состав изучался с помощью ИК-спектрометра Фурье *Infracum FT-801* с приставкой на пропускание и растрового электронного микроскопа *Hitachi TM-1000* с микроанализатором *Bruker Quantax 50 EDX*. Так же для определения наличия микроострий в МДМ-структуре использовался сканирующий зондовый микроскоп СЗМ *NT-MDT «Nanoeducator 1»*. Применяя данное оборудование, будут проводиться последующие эксперименты.

2.1 Технология изготовления МДМ-структур

Исследование электрических свойств диэлектрических пленок велись на тонкопленочных структурах $\text{Al-SiO}_2\text{-Al}$ и $\text{Al-TiO}_2\text{-Al}$, нанесенных на стеклянные подложки размером 26×76 мм.

Конденсаторные структуры изготавливались в матричном исполнении с активной площадью каждого конденсатора 1×1 мм.

Перед нанесением МДМ-структуры, а именно нижнего электрода на стеклянную подложку проводилась тщательная очистка для улучшения адгезии к подложке, так же очистка нужна для удаления загрязнений с поверхности, так как загрязнения воздействуют на равномерность пленки, что в последующем плохо влияет на воспроизводимость полученных пленок [23].

Очистку поверхности подложки проводили непосредственно перед помещением в вакуумную камеру, так как именно свежеччищенные поверхности обеспечивают лучшее качество осаждаемой пленки [23].

Химическая очистка проводилась при влажности 12% (в зимнее время года) и 39% (в летнее время года), и температуре $21,9^\circ\text{C}$. Для подбора оптимального результата исследовали 2 вида химической очистки [23]:

- В течение 20 минут стекло выдерживали в растворе:
25мл NH_3 H_2O_2 (25мл)+100 H_2O в соотношении 1:1:4 соответственно.
- В течение 15 минут стекло выдерживали в растворе:
25мл HCl 25мл H_2O_2 +125 H_2O в соотношении 1:1:5 соответственно.

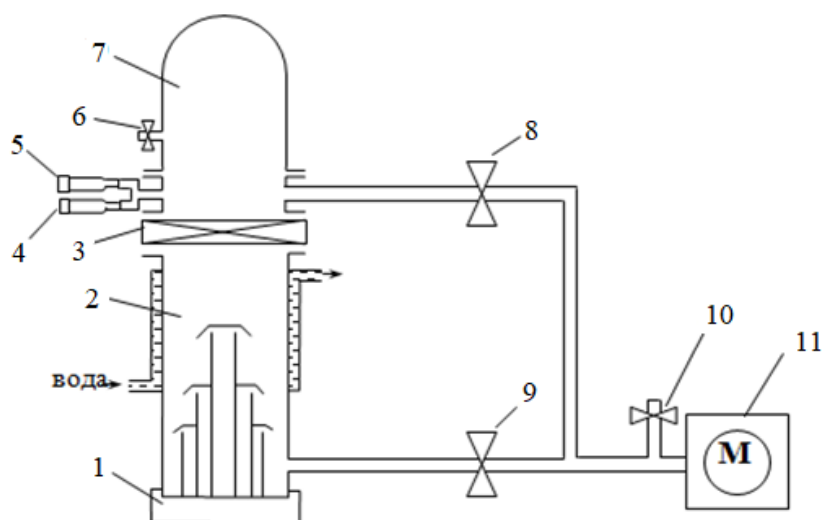
После обработки стеклянных подложек в данных растворах они подверглись промывке в дистиллированной воде, что производилось для устранения остатков химических реагентов, так как посторонние вещества могут плохо сказаться на адгезии пленок. Индикатором качества отмывки являлась лакмусовая бумага, то есть брали стеклянную подложку, опускали ее в дистиллированную воду, полоскали, вынимали стеклышко, в воду опускали индикатор, в случае если индикатор поменял цвет – в воде есть остатки химии, меняли воду, повторяли до тех пор, пока в воде практически не будет химии, в идеале – совсем [23].

Дальше осуществлялась сушка стекол сжатым воздухом на установке *DG-10*. После напыления пленок на стекло, можно было сделать вывод что, оба способа химической очистки зарекомендовали хорошие результаты и их возможно использовать для последующей очистки подложек перед

напылением. Вследствие этого был выбран для будущего напыления второй рецепт, а точнее $25\text{мл HCl} + 25\text{мл H}_2\text{O}_2 + 125\text{ H}_2\text{O}$.

Затем подложки загружались в вакуумную камеру. При этом было вполне вероятно повторное загрязнение поверхности подложек вследствие адсорбции молекул всевозможных веществ из окружающего воздуха, в особенности воды. Для их удаления применяли вакуумный отжиг при температуре $250\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 40 минут, после чего подложки остывали в вакууме до комнатной температуры в течение 1 часа.

Для получения МДМ-структуры использовалась вакуумная установка *УВН-2М* (рисунок 2.1).



1 – нагреватель диффузионного насоса; 2 – диффузионный насос; 3 – вакуумный затвор; 4 – термопарный вакуумметр; 5 – ионизационный вакуумметр; 6 – натекатель; 7 – вакуумная камера (колпак); 8 – вентиль вспомогательной линии откачки; 9 – вентиль основной линии откачки; 10 – клапан напуска атмосферы; 11 – механический (форвакуумный) насос).

Рисунок 2.1 – Схема вакуумной установки *УВН-2М*

Установка *УВН-2М* предназначена для откачки газа из вакуумной камеры до предельного давления ($10^{-3} - 10^{-4}$) Па с целью напыления металлических и диэлектрических покрытий [24].

Для нижней обкладки конденсатора учитывали, что ее толщина должна быть значительно меньше толщины диэлектрика, так как это позволит

исключить вероятность обрывов пленки диэлектрика в местах ступенек, образованных пленками нижнего электрода [24]. В качестве нижнего и верхнего электрода использовались пленки алюминия (так как он считается отлично проводящим материалом и имеет низкий коэффициент температурного расширения), нанесенные методом термического испарения в вакууме. Внешний вид маски для нанесения электродов представлен на рисунке 2.2.

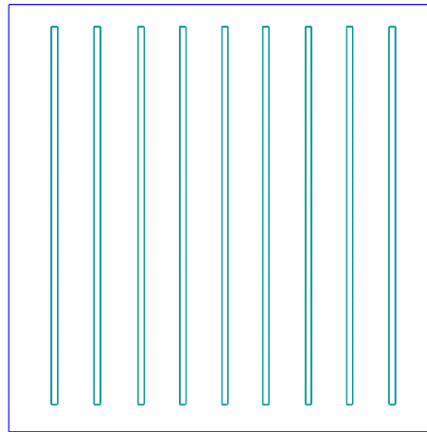


Рисунок 2.2 – Маска для нанесения электродов

После отжига процесс осаждения верхнего и нижнего электрода происходил в течение 5 секунд методом термического испарения при давлении в вакуумной камере 10^{-5} мм рт. ст. и токе испарителя 35–40 А. Толщина нижней и верхней обкладки составляла ~ 100 нм. Формирование рисунка в виде длинных полос шириной 1 мм производилось масочными методами, температура подложки в процессе нанесения была близка к комнатной.

Толщину диэлектрика выбирали из критерия сплошности и электрической прочности (с обязательным запасом не менее чем в 2–4 раза) при напряжениях 5–12 В, это напряжение может быть на клеммах измерительного устройства [24]. В качестве диэлектрика применялись пленки SiO_2 и TiO_2 , нанесенные методом реактивного магнетронного распыления. Распыление проводилось в атмосфере кислорода при парциальном давлении $5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., токе разряда 200 мА и напряжении 280 В. Внешний вид подложки с защитным стеклом представлен на рисунке 2.3.

Толщина диэлектрических пленок в процессе нанесения контролировалась по времени, а после нанесения определялась с помощью микроинтерферометра *МИИ-4М*.



Рисунок 2.3 – Подложка с защитным стеклом

После нанесения диэлектрической пленки на образец накладывалась маска для нанесения верхних электродов: та же маска, но повернутая на 90 градусов относительно нижних электродов. По аналогии с нанесением нижних электродов, наносятся верхние электроды. В результате получалась матрица конденсаторов, состоящая из 6 строк и 7 столбцов. Внешний вид получаемой матрицы конденсаторов МДМ-структуры представлен на рисунке 2.4.



Рисунок.2.4 – Матрица конденсаторов

Из рисунка 2.4 видно, что, разделяя, верхние электроды с помощью скальпеля получаем подложку, содержащую 42 ТПК структуры. Разделение проводим для устранения токов утечки по всей площади, полученных ТПК.

2.2 Методы контроля толщины диэлектрика и электрических свойств полученных МДМ–структур

Для контроля толщины полученных МДМ–структур, а именно толщины диэлектриков использовали микроинтерферометр *МИИ–4М*, предназначенный для визуальной оценки, измерения и фотографирования высоты микронеровностей (рисунок 2.5) [25].



Рисунок 2.5 – Микроинтерферометра *МИИ–4М*

Для определения толщины на поверхности пленки наносится царапина и над этой областью устанавливается микроинтерферометр. При верной настройке микроинтерферометра в его поле зрения обязаны быть видны одновременно исследуемая поверхность и интерференционные полосы, изогнутые в местах, где проходят канавки или же царапины, при этом интерференционные полосы должны быть ориентированы перпендикулярно к направлению царапин [25]. На рисунке 2.6 представлен сдвиг интерференционных полос, образующийся при разности толщины пленки.

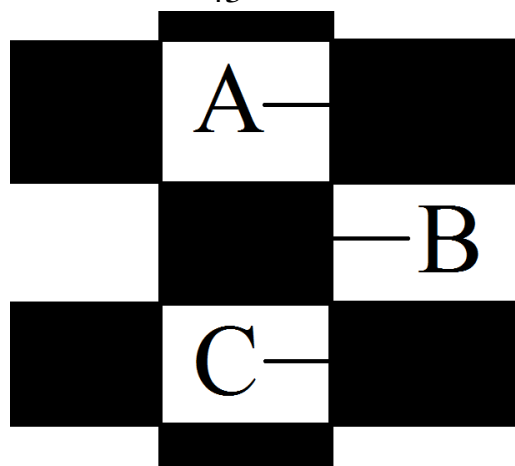


Рисунок 2.6 – Интерференционные полосы

При измерении глубины царапины или риски следует определить, на какую долю интервала между полосами или на сколько интервалов изгибается полоса в месте прохождения царапины. Глубина царапин определяется по формуле:

$$d = 0,27 \cdot \frac{A-B}{A-C}, \quad (2.1)$$

где d – толщина пленки, мкм;

A, B, C – значения координат интерференционных полос на шкале прибора.

Из данной формулы были получены толщины пленок, представленные в основной (третьей) главе.

Для измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь ТПК использовался анализатор иммитанса широкополосный $E7-20$. Технические характеристики устройства представлены в таблице 2.1 [26].

Таблица 2.1 – Технические характеристики иммитанса широкополосного $E7-20$

Измеряемая величина	Диапазон измеряемых величин
Емкость, Ф	10^{-15} -1
Индуктивность, Гн	10^{-11} - 10^4
Активное сопротивление, Ом	10^{-5} - 10^9
Проводимость, См	10^{-11} -10

Продолжение таблицы 2.1

Измеряемая величина	Диапазон измеряемых величин
Модуль комплексного сопротивления, Ом	10^{-5} - 10^9
Реактивное сопротивление, Ом	10^{-5} - 10^9
Добротность, фактор потерь	10^{-4} - 10^4
Ток утечки, мА	10^{-8} - 10^{-2}
Базовая погрешность L,R,C D,G	$\pm 0,1\%$ $\pm 0,001\%$
Рабочие частоты	25 Гц-1 МГц (Свыше 1975 фиксированных частот)
Время одного измерения	Быстро-40 м, Норма-400 мс
Уровни измерительного сигнала	0,04-1 В
Напряжение смещения	Внутреннее (0-40) В, внешнее (0-120) В

Прибор иммитанс *E7-20* специализирован для измерения на частотах от 25 Гц до 1 МГц, напряжение измерительного сигнала 1 В.

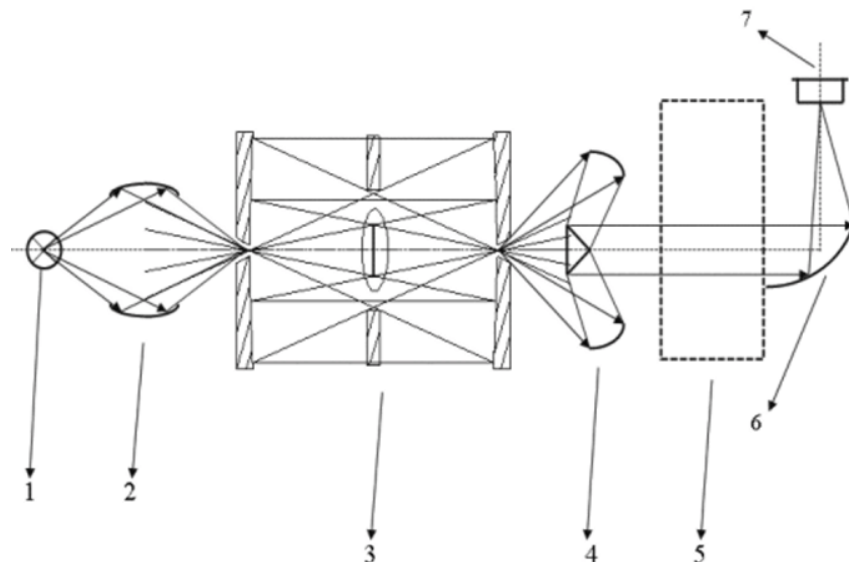
Базовая погрешность индуктивности, емкости и сопротивления составляет $\pm 0,1\%$. Низкая погрешность при измерении, надежность, удобство прибора при применении выделяют данное устройство в ряд незаменимых [26]. Измерения, снятые на иммитансе *E7-20* представлены в основной (третьей) главе.

2.3 Состав диэлектрических пленок

Элементный состав пленок исследовался с помощью ИК–спектрометра Фурье *Infracum FT–801* (рисунок 2.7) с приставкой на пропускание и растрового электронного микроскопа *Hitachi TM–1000* с микроанализатором *Bruker Quantax 50 EDX*.

В настоящее время среди спектральных способов исследования химических структур колебательная спектроскопия занимает одно из основных мест. Это связано с особенной спецификацией представленного метода исследования, проявляющейся в его избирательности, чувствительности и, что принципиально доступно. Основным методом колебательной спектроскопии считается ИК–спектроскопия (инфракрасные спектры) [27].

ИК–спектроскопия предназначена для регистрации спектров поглощения твердых, жидких и газообразных веществ в ближней и средней ИК–области с их дальнейшей идентификацией, а также для качественного и количественного анализа смесей, содержащих несколько компонентов [28].



- 1 – источник; 2 – входная фокусирующая система зеркал; 3 – интерферометр;
 4 – коллиматор; 5 – кюветное отделение; 6 – параболическое зеркало;
 7 – фотоприемник.

Рисунок 2.7 – ИК-спектрометр Фурье *Infracum FT–801*: принципиальная оптическая схема ИК–канала

Исследования велись на системе пленка-подложка без нанесения нижнего и верхнего электродов. В качестве подложек использовали кремниевые пластины, при исследовании пленок SiO_2 использовали арсенид-галлиевые подложки. Толщина исследуемых пленок составляла 0,2 мкм.

Атомарный состав пленок был получен с помощью растрового электронного микроскопа *Hitachi TM-1000* с микроанализатором *Bruker Quantax 50 EDX*. Технические характеристики представлены в таблице 2.2 [29].

Таблица 2.2 – Технические характеристики растрового электронного микроскопа *Hitachi TM-1000*

Характеристика	Величина
Разрешение	30 нм
Ускоряющее напряжение	15 кВ (неизменное)
Увеличение	От 20 до 10000
Максимальный размер образца	70 мм (диаметр)
Максимальная толщина образца	20 мм
Максимальная просматриваемая область	3,5 мм (квадратная)
Диапазон перемещений столика	По оси X-15 мм, по оси Y-18 мм (перемещение только по осям X и Y)
Размер запоминания кадра	1280×960, 640×480

Растровый электронный микроскоп *Hitachi TM-1000* специализирован для определения химического состава образца. Рентгеновский микроанализатор позволяет получить информацию о составе приповерхностного слоя толщиной несколько микрометров, что значительно превышает толщину пленки. Поэтому результатом является некий усредненный атомный состав по всей глубине пленки, включая подложку [30].

2.4 Метод получения рельефа поверхности образца

Для определения наличия микроострий на верхнем электроде и в диэлектрике применялся сканирующий зондовый микроскоп *C3M NT-MDT «Nanoeducator 1»*. Технические характеристики представлены в таблице 2.3 [31].

Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) – один из мощных передовых способов изучения морфологии и локальных свойств поверхности твердого тела с высоким пространственным разрешением [31].

Таблица 2.3 – Технические характеристики сканирующего зондового микроскопа *C3M NT-MDT «Nanoeducator 1»*.

Характеристика	Величина
Поле сканирования	Режим высокого напряжения: 100x100x12 мкм Режим низкого напряжения: 3x3x3 мкм
Тип сканера	Метрологический пьезокерамический XYZ сканер с сенсорами обратной связи.
Контроль напряжения на XYZ сканере	Выход высокого напряжения: X, -X, Y, -Y, Z, -Z на -150 В +150 В Выход низкого напряжения XY ± 10 В
Максимальный ток на XY усилителях	1.5 мА
Максимальный ток на Z усилителях	8 мА
Полоса пропускания системы детектирования	170 Гц-5 МГц

Nanoeducator 1 состоит из измерительной головки, электронного блока, соединительных кабелей и управляющего компьютера. Сигнал от датчика взаимодействия после преобразования в предусилителе поступает в электронный блок. Управляющие сигналы от электронного блока поступают в измерительную головку. Управление электронным блоком выполняется от компьютера через контроллер связи. Принцип сканирования СЗМ *Nanoeducator 1* представлен на рисунке 2.8 [32].

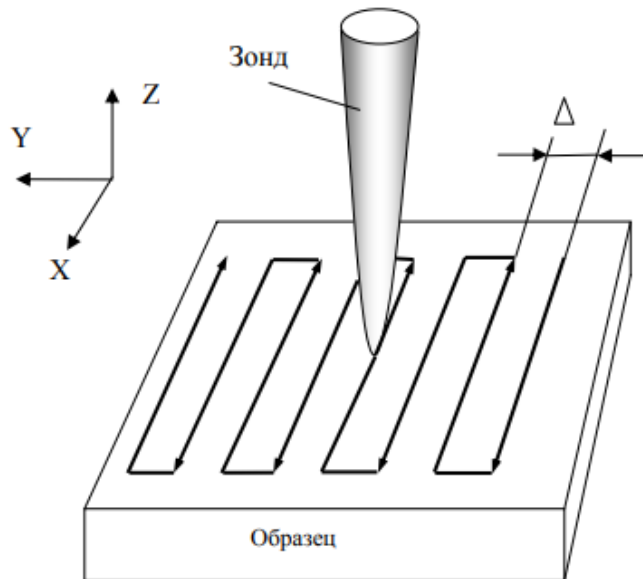


Рисунок 2.8 – Принцип сканирования

Nanoeducator 1 – это сканирующий зондовый микроскоп, способный работать в качестве атомно-силового и сканирующего туннельного микроскопов (АСМ и СТМ). Характерной особенностью СЗМ *Nanoeducator 1* является использование проволочных (вольфрамовых, в частности) зондов для применения как в СТМ, так и в АСМ. *Nanoeducator 1* сочетает в себе простоту в использовании, невысокую стоимость эксплуатации и высокое пространственное разрешение при исследовании рельефа объектов и определении их физико-химических свойств [32].

Вывод к главе 2

В данной главе были рассмотрены установки для получения и исследования тонкопленочных конденсаторов. Для последующего формирования ТПК и изучения их свойств были выбраны следующие установки:

1. Для получения тонкопленочных конденсаторов использовали установку для вакуумного напыления *УВН-2М*. В данной установке для получения верхнего и нижнего электродов на стеклянных подложках использовалось термическое испарение в вакууме, а для получения диэлектрика ионно-плазменное распыление.

2. Для контроля толщины полученных диэлектриков использовали установку микроинтерферометр *МИИ-4М*, предназначенный для визуальной оценки, измерения и фотографирования высоты неровностей тонко обработанных поверхностей.

3. Для измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь ТПК применялся анализатор иммитанса широкополосный *E7-20*.

4. Для определения элементного состава пленок исследование проводили с помощью ИК-спектрометра Фурье *Infracum FT-801*.

5. Атомарный состав пленок был получен с помощью растрового электронного микроскопа *Hitachi TM-1000* с микроанализатором *Bruker Quantax 50 EDX*.

6. Для определения наличия микроострий на верхнем электроде и в диэлектрике применялся сканирующий зондовый микроскоп *C3M NT-MDT «Nanoeducator 1»*.

ГЛАВА 3 ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ПРОБОЮ. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ОТ ЧИСЛА ПРОБОВ ПРИ СМЕНЕ ПОЛЯРНОСТИ ВЕРХНЕГО ЭЛЕКТРОДА

3.1 Измерение электрических характеристик тонкопленочных конденсаторов

С помощью измерителя анализатора иммитанс *E7-20* были измерены параметры полученных структур (рисунок 3.1), в частности, емкость *C* и тангенс угла диэлектрических потерь *tgδ*.

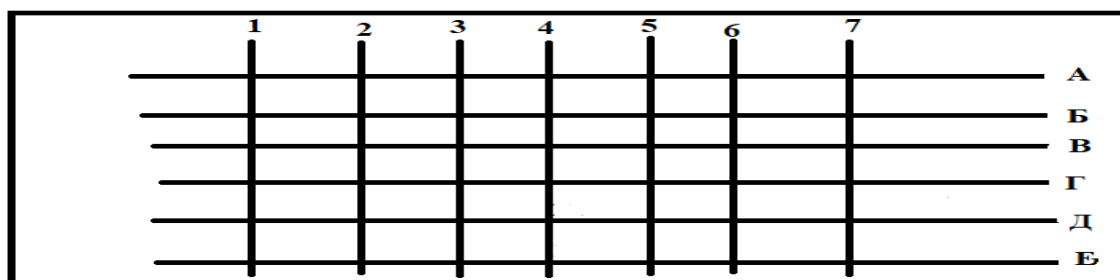


Рисунок 3.1 – Расположение на подложке ТПК $\text{Al-SiO}_2\text{-Al}$ и $\text{Al-TiO}_2\text{-Al}$ для измерения на анализаторе иммитанс *E7-20*

Анализатор иммитанс *E7-20* специализирован для измерения на частотах от 25 Гц до 1 МГц, напряжение измерительного сигнала 1 В. В нашем случае измерения *C* и *tgδ* проводились на низких частотах 1 кГц [33].

Характеристики ТПК, снятые на анализаторе иммитанс *E7-20*, представлены в таблице 3.1 (для $\text{Al-SiO}_2\text{-Al}$) и в таблице 3.2 (для $\text{Al-TiO}_2\text{-Al}$). В таблице приведены ТПК, тангенс угла диэлектрических потерь, которых меньше 0,01, так как для последующих исследований необходимы ТПК с хорошими изоляционными характеристиками.

Таблица 3.1 – Экспериментальные значения емкости и тангенса угла
диэлектрических потерь для Al–SiO₂–Al

Номер структуры	C, пФ	tgδ
Дорожка Б		
1	255	0,008
2	240	0,0046
3	242	0,0027
4	251	0,0028
5	252	0,0032
6	254	0,0028
7	287	0,0066
Дорожка В		
1	248	0,009
2	235	0,0049
3	237	0,0049
4	254	0,003
5	247	0,0031
6	222	0,0037
Дорожка Г		
2	227	0,0097
4	246	0,0051
5	235	0,0049

Продолжение таблицы 3.1

Номер структуры	C, пФ	tg δ
Дорожка Г		
6	225	0,0042
7	242	0,0041
Дорожка Д		
4	219	0,0058
6	192	0,0037
7	209	0,0034
Дорожка Е		
3	217	0,0052
5	223	0,0083
6	196	0,0039

Таблица 3.2 – Экспериментальные значения емкости и тангенса угла
диэлектрических потерь для Al–TiO₂–Al

Номер структуры	C, пФ	tg δ
Дорожка Б		
1	1008	0,008
2	1013	0,0086
3	1007	0,0067
4	1011	0,0088
5	1001	0,0062

Продолжение таблицы 3.2

Номер структуры	С, пФ	$tg\delta$
Дорожка Б		
6	1013	0,0078
7	1014	0,0056
Дорожка В		
1	1019	0,009
2	1028	0,0069
3	1005	0,0059
5	1011	0,0059
6	1008	0,0049
Дорожка Г		
2	1018	0,0097
4	1019	0,0051
5	1024	0,0049
6	1023	0,0042
7	1017	0,0053
Дорожка Д		
4	1005	0,0058
5	1018	0,0047
7	1021	0,0079
8	1011	0,0056

Продолжение таблицы 3.2

Номер структуры	С, пФ	tgδ
Дорожка Е		
3	1019	0,0052
5	1012	0,0083
6	1016	0,0042

В таблицах 3.1 и 3.2 приведены рабочие структуры, так как некоторое количество структур имели «закоротки», это контролировалось по большой величине тангенса угла диэлектрических потерь и низкого электрического сопротивления.

Далее с помощью микроинтерферометра Линника *МИИ-4* были измерены толщины диэлектрика SiO_2 и TiO_2 в нескольких точках (для более точного вычисления средней толщины диэлектрика) и построения профиля распределения толщины.

Максимальная систематическая погрешность прибора *МИИ-4* [34]:

$$\delta_{сист} = \frac{\Delta d}{d} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

Толщина пленок верхнего электрода измерялась на *МИИ - 4*. Абсолютная погрешность прибора равна $\Delta d = 0,027$ мкм.

Тогда максимальная систематическая погрешность, вычисленная по формуле 3.1 равна

$$\delta_{сист} = \frac{0,027}{0,2} \cdot 100\% = 13,5 \%$$

Так же с помощью микроскопа *МБС-9* была измерена площадь каждого ТПК структуры $Al-SiO_2-Al$ и $Al-TiO_2-Al$. При измерении площади конденсаторов было выявлено, что ширина верхнего электрода равна приблизительно ширине нижнего и площадь составляет в среднем 1 мм^2 .

В таблице 3.3 и таблице 3.4 представлены площади ТПК и толщины экспериментально снятые и расчетные, в нескольких местах измерения (рисунок 3.2).

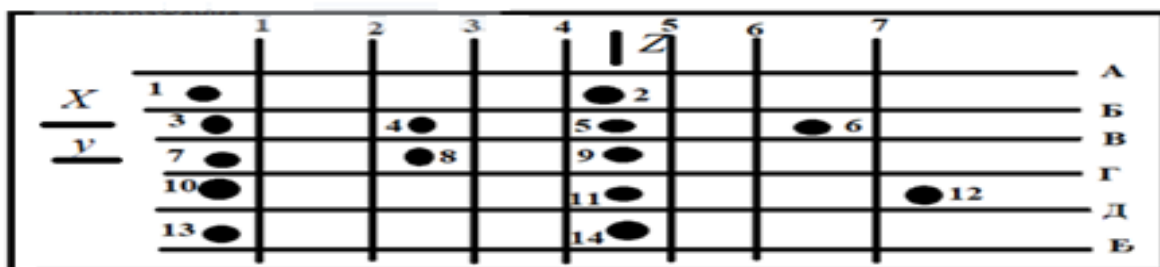


Рисунок 3.2 – Расположение на подложке ТПК Al–SiO₂–Al и Al–TiO₂–Al и с нанесенными каплями туши для измерения толщины диэлектрика

Таблица 3.3 – Экспериментальные и расчетные значения площадей ТПК и толщины диэлектрика SiO₂

№ места измерения толщины диэлектрика	Площадь ТПК вблизи точки экспериментального измерения толщины на МИИ-4		d _{SiO₂} (расчетное при ε =5), нм	d _{SiO₂} (экспериментальное на МИИ-4), нм
	№ ТПК	S, мм ²		
3	3В	0,91	170	168
5	5В	0,98	176	180
6	6В	0,91	181	176
10	1Д	0,93	175	179
14	5Е	0,96	190	186

Из приведенных данных в таблице 3.3 можно сделать вывод о том, что средняя толщина диэлектрика SiO₂ получилась, равна около 180 нм. На рисунке 3.3 представлено объемное распределение толщины пленки диэлектрика.

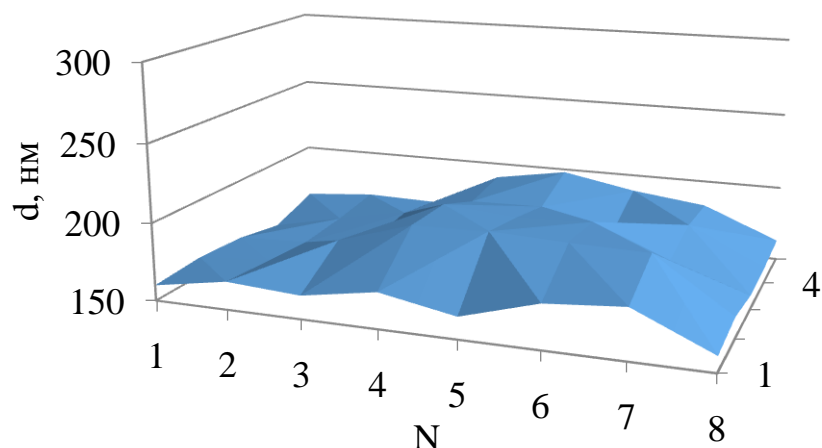


Рисунок 3.3 – Объемное распределение толщины SiO_2 по всей поверхности

Пленка диэлектрика SiO_2 практически по всей площади подложки распределяется довольно равномерно, без значительных изменений толщины.

Таблица 3.4 – Экспериментальные и расчетные значения площадей ТПК и толщины диэлектрика TiO_2

№ места измерения толщины диэлектрика	Площадь ТПК вблизи точки экспериментального измерения толщины на МИИ-4		d_{TiO_2} (расчетное при $\varepsilon = 30$), нм	d_{TiO_2} (экспериментальное на МИИ-4), нм
	№ ТПК	$S, \text{мм}^2$		
2	2Б	0,89	233	240
3	3В	0,91	240	243
5	5В	0,93	244	240
9	5Г	0,91	236	241
11	5Д	0,93	243	238

Из приведенных данных в таблице 3.4 можно сделать вывод о том, что средняя толщина диэлектрика TiO_2 получилась, равна около 240 нм. На рисунке 3.4 представлено объемное распределение толщины пленки диэлектрика.

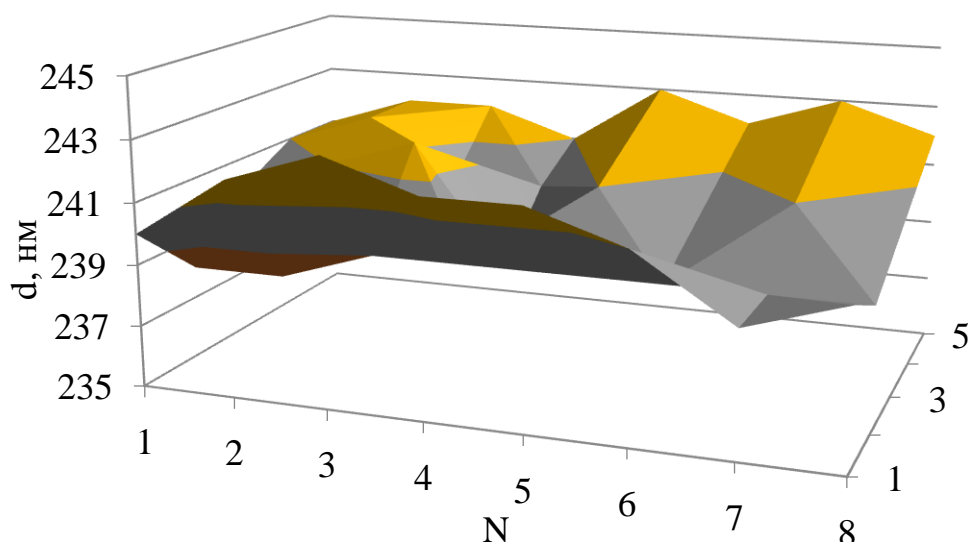


Рисунок 3.4 – Объемное распределение толщины TiO₂ по всей поверхности

Пленка диэлектрика TiO₂ практически по всей площади подложки распределяется достаточно равномерно, без значительных изменений толщины.

Можно сделать выводы, что расчетные значения и экспериментальные данные практически совпадают, это означает, что экспериментальные данные получены достоверно.

Для расчетов диаметра канала пробоя нам необходимо знать диэлектрическую проницаемость SiO₂ и TiO₂, которая, исходя из литературных данных, равна для SiO₂ 4, а для TiO₂ 30-40, но все зависит от метода получения необходимой пленки.

Поэтому, исходя из экспериментальных данных, была рассчитана ε для ионно-плазменного метода получения SiO₂ (аналогично и для TiO₂).

Из емкости плоского конденсатора выразим диэлектрическую проницаемость [35]:

$$\varepsilon = \frac{C \cdot d}{\varepsilon_0 \cdot S} \quad (3.2)$$

Расчет проводился по формуле 3.2 для нескольких ТПК, результаты приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Расчетные данные диэлектрической проницаемости SiO₂

Место ТПК	C, пФ	d, нм	S, мм ²	ϵ
1Б	255	160	0,9	5,12
1В	248	162	0,93	4,88
3В	237	184	0,95	5,2
5В	253	171	0,91	5,3
2Д	237	184	0,95	5,03

Из результатов таблицы видно, что среднее значение диэлектрической проницаемости равно $\langle \epsilon \rangle = 5,106$, поэтому для удобства расчетов примем $\epsilon = 5$, поскольку погрешность округления 2% значительно меньше погрешности измерения площади ТПК и толщины SiO₂. Аналогично была рассчитана диэлектрической проницаемости для TiO₂ равно $\langle \epsilon \rangle = 33,019$, поэтому для удобства расчетов примем $\epsilon = 33$.

3.2 Исследование состава диэлектрических пленок для тонкопленочных конденсаторов

Элементный состав пленок исследовался с помощью ИК спектрометра Фурье *Infracum FT-801* с приставкой на пропускание и растрового электронного микроскопа *Hitachi TM-1000* с микроанализатором *Bruker Quantax 50 EDX*.

Исследования проводились на системе пленка–подложка без нанесения нижнего и верхнего электродов. В качестве подложек для TiO₂ использовали нелегированные кремниевые пластины, а при исследовании пленок SiO₂ использовали арсенид-галлиевые подложки. Толщина исследуемых пленок составляла 0,2 мкм.

Был исследован атомный состав пленок SiO₂ и TiO₂ с помощью рентгеновского микроанализатора *Bruker Quantax 50 EDX*. Рентгеновский

микроанализатор разрешает получить информацию о составе приповерхностного слоя толщиной несколько микрометров, что значительно превышает толщину пленки [36]. Поэтому результатом является некий усредненный атомный состав по всей глубине пленки, включая подложку. На рисунке 3.5 представлен энергодисперсионный рентгеновский спектр пленок SiO_2 на подложке из GaAs, а на рисунке 3.6 представлен атомарный состав пленок SiO_2 на подложке из GaAs.

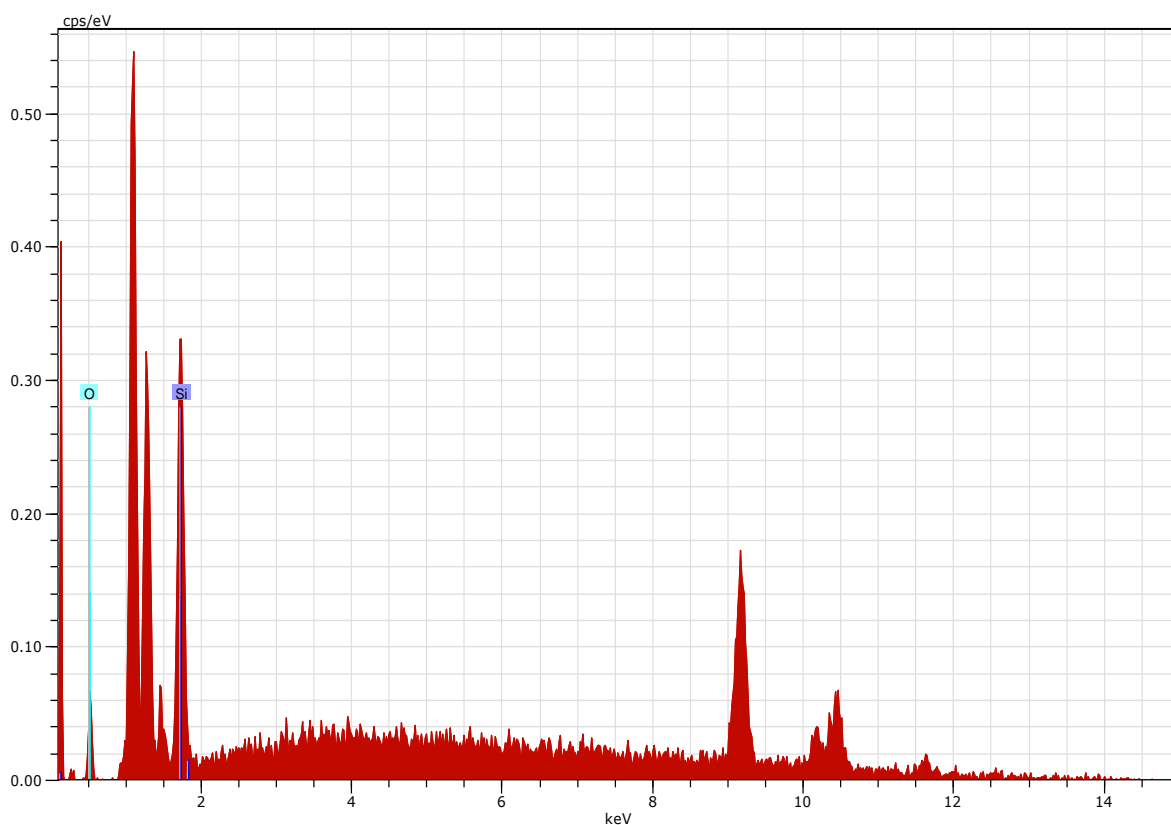


Рисунок 3.5 – Энергодисперсионный рентгеновский спектр пленок SiO_2 на подложке из GaAs

Из рисунка 3.5 видно, что кремний вступает в химическую реакцию, поскольку происходит химический сдвиг в область больших энергий.

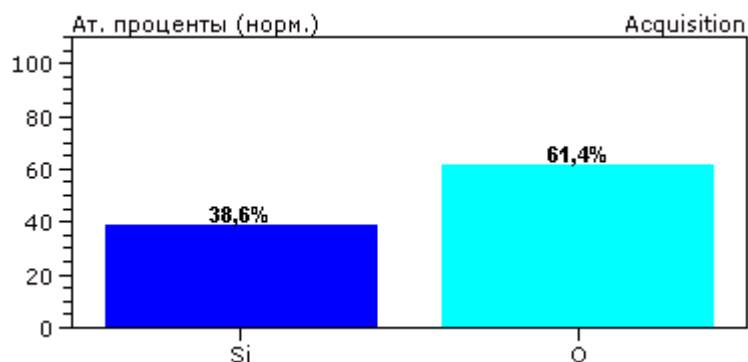


Рисунок 3.6 – Атомарный состав пленок SiO₂ на подложке из GaAs

Из рисунка 3.6 собственно видно, что на подложке получена пленка нестехиометрического состава SiO₂ это видно по процентному соотношению. Так же в атомарном составе присутствовал углерод. Вероятно, его присутствие связано с физической адсорбцией на поверхности пленки [37].

Для выявления полной картины необходимо провести анализ соединений, присутствующих в пленках SiO₂. Наиболее простым в данном случае является метод ИК–спектроскопии, позволяющий регистрировать поглощение инфракрасного излучения веществом за счет колебаний атомов в молекулах [38]. Исследования проводились на пленках толщиной 0,2 мкм с помощью ИК спектрометра Фурье *Infracum FT-801* с приставкой на пропускание. Для корректной оценки спектра пропускания пленки предварительно снимался опорный спектр. Все спектры исследовались при нормальных условиях. ИК–спектр пленки SiO₂ представлен на рисунке 3.7.

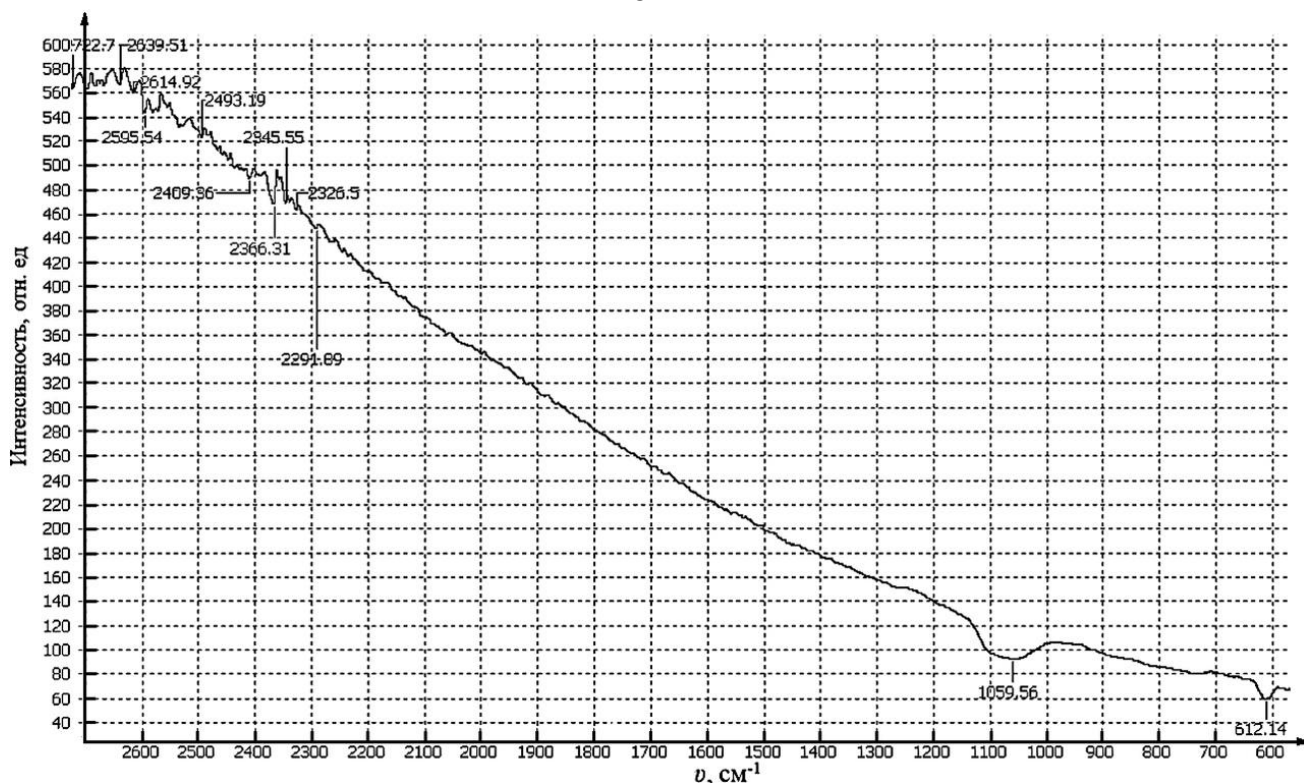


Рисунок 3.7 – ИК–спектр пленки SiO_2 толщиной 0,2 мкм на подложке из GaAs

ИК–спектры исследуемых пленок демонстрируют резкое увеличение поглощения на длине волны $\nu = 2366 \text{ cm}^{-1}$, соответствующее колебаниям связей С–О. Положение основного пика $\nu = 1059 \text{ cm}^{-1}$ относится к связям Si–O (согласно литературным сведениям [39] основной пик связи Si–O приходится на $850\text{--}1100 \text{ cm}^{-1}$), что свидетельствует об отсутствии избыточного кремния в пленке SiO_2 . Сдвиг происходит в большую сторону, что говорит об аморфности пленок, так как в пленке содержится больше кислорода.

Так же был исследован атомный состав пленок TiO_2 с помощью рентгеновского микроанализатора *Bruker Quantax 50 EDX*. На рисунке 3.8 представлен энергодисперсионный рентгеновский спектр пленок TiO_2 на подложке нелегированного кремния, а на рисунке 3.9 представлен атомарный состав пленок TiO_2 .

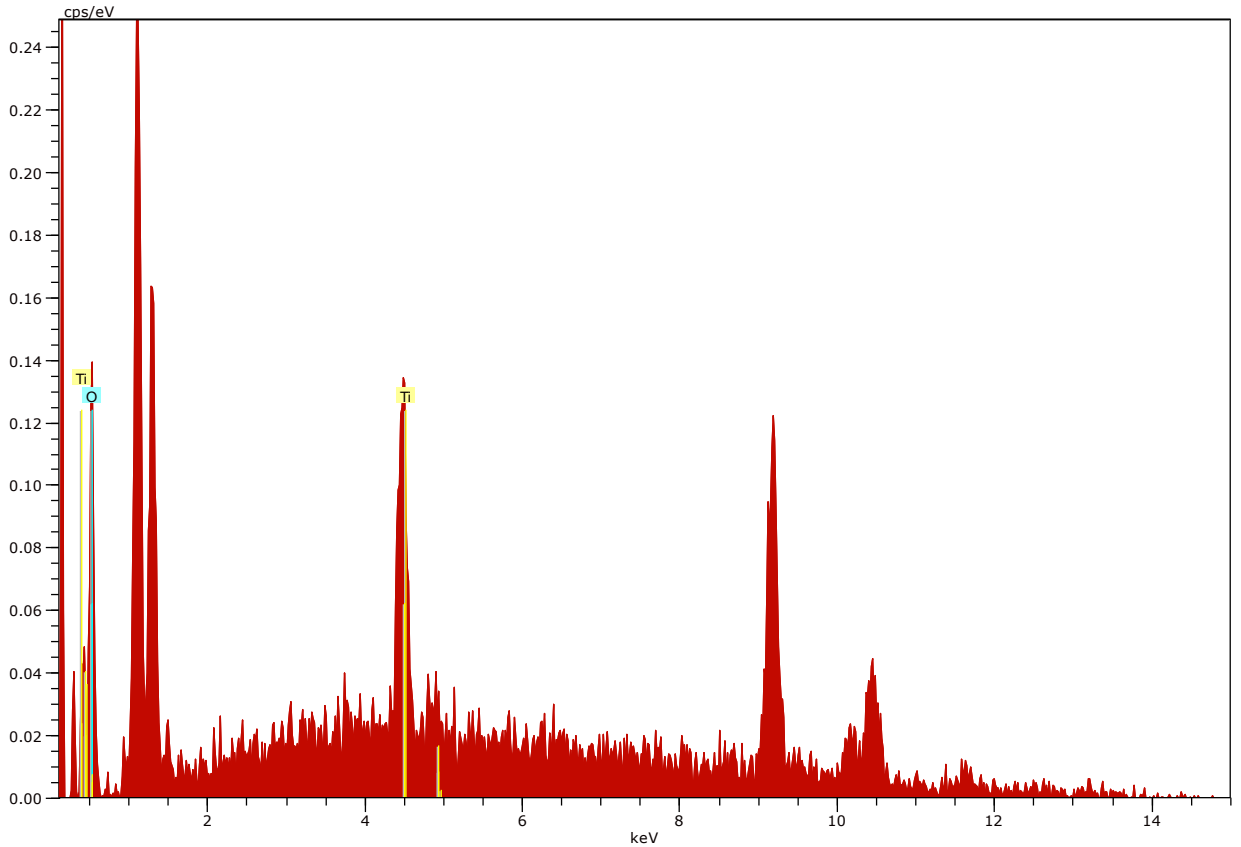


Рисунок 3.8 – Энергодисперсионный рентгеновский спектр пленок TiO_2 на подложке нелегированного кремния

Из рисунка 3.8 видно, что титан вступает в химическую реакцию, так как происходит химический сдвиг в область больших энергий.

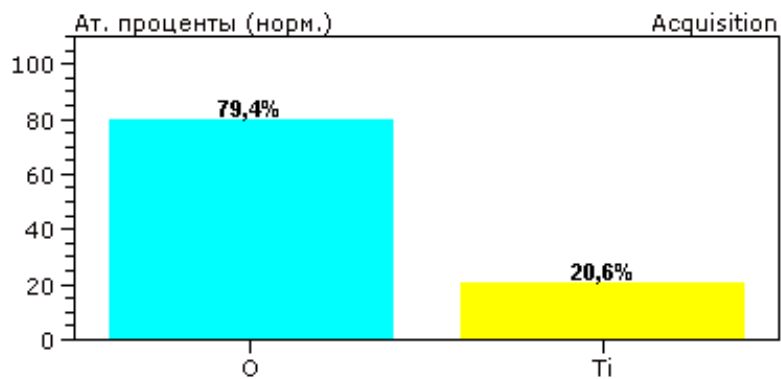


Рисунок 3.9 – Атомарный состав пленок TiO_2 на подложке нелегированного кремния

Из рисунка 3.9 видно, что на подложке получена пленка нестехиометрического состава TiO_2 на подложке нелегированного кремния это

видно по процентному соотношению. Так же как и на пленках SiO_2 в атомарном составе присутствовал углерод.

Далее был так же, проведен анализ соединений, присутствующих в пленках TiO_2 . Исследования проводились на пленках толщиной 0,2 мкм с помощью ИК спектрометра Фурье *Infracum FT-801* с приставкой на пропускание. Все спектры исследовались при нормальных условиях. ИК-спектр пленки TiO_2 представлен на рисунке 3.10.

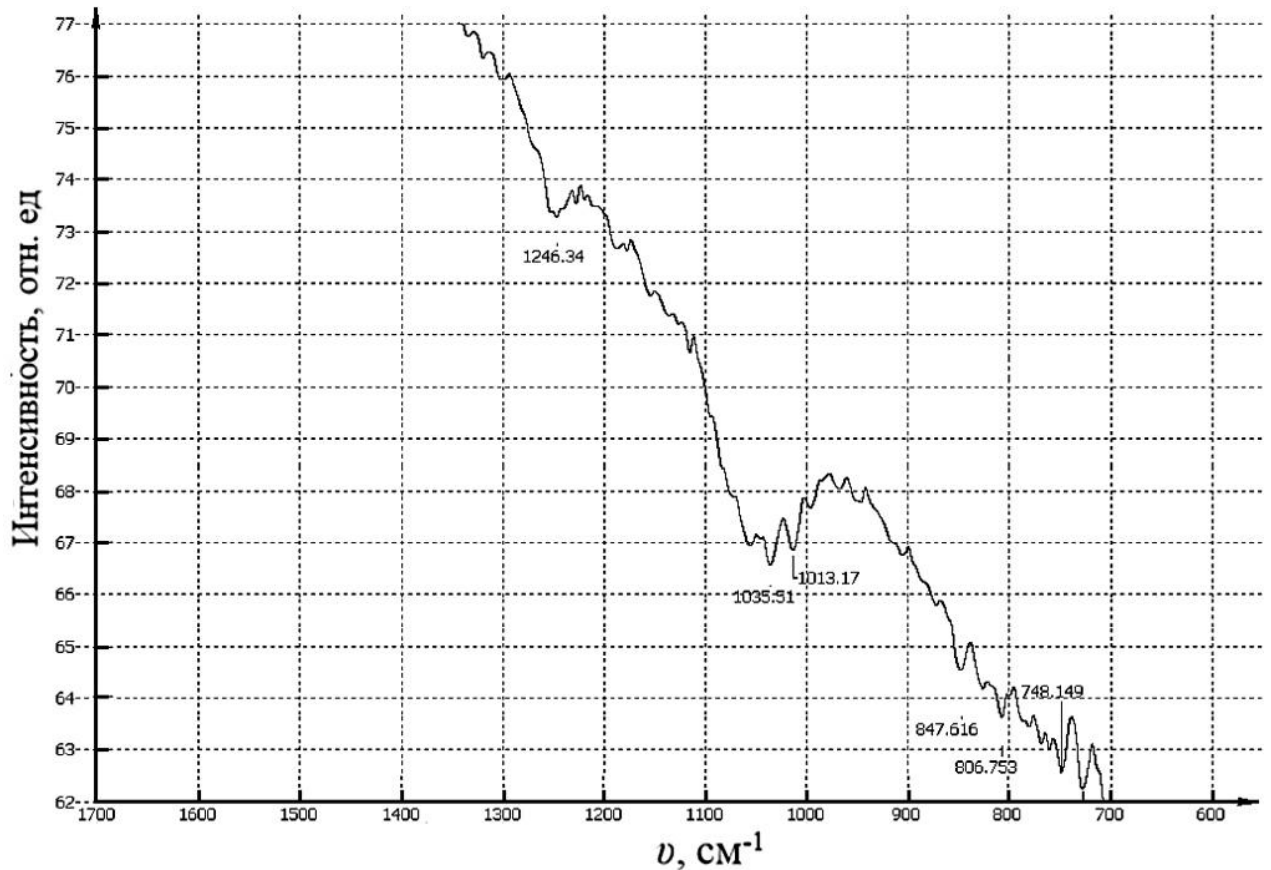


Рисунок 3.10 – ИК-спектр пленки TiO_2 толщиной 0,2 мкм на подложке нелегированного кремния

ИК-спектры исследуемой пленки демонстрируют изменения в области $\nu_1 = 1246 \text{ см}^{-1}$ и $\nu_2 = 1035 \text{ см}^{-1}$, относящиеся к ОН-группам и молекулам H_2O . Положение основного пика $\nu = 847 \text{ см}^{-1}$ относится к связям Ti–O (согласно литературным данным [39] основной пик связи Ti–O приходится на 800–650 см^{-1}), сдвиг происходит в большую сторону, что говорит об аморфности пленок, так как в пленке содержится больше кислорода.

3.3 Исследование электрической прочности от числа пробоев при смене полярности

Поскольку ТПК после пробоя не закорачиваются, а продолжают функционировать, то на одном ТПК возможно производить десятки и даже сотни пробоев. При этом в большинстве случаев наблюдается увеличение пробивного напряжения $U_{пр}$ при увеличении количества пробоев на одном ТПК. Но такая зависимость наблюдается при одинаковой полярности, к примеру, верхнего электрода [40].

В ходе исследований были изучены подложки с различной толщиной диэлектриков TiO_2 и SiO_2 . Были исследованы МДМ-структуры $Al-SiO_2-Al$ и $Al-TiO_2-Al$ при толщине диэлектрика 180, 200 и 350 нм.

В данной работе для изучения пробоя и исследования зависимости электрической прочности от количества пробоев, а также для многократного пробоя было применено устройство, созданное на кафедре физической электроники (ФЭ) и характер пробоя контролировался визуально с помощью микроскопа. Данный прибор обеспечивает генерацию линейно нарастающего напряжения от 1 до 250 В с коэффициентом нелинейности ниже 1 % и скоростью 0,1–100 В/с. В момент резкого увеличения тока, проходящего сквозь структуру (пробоя) устройство фиксирует значение напряжения, при котором произошел пробой. Через фиксированный временной промежуток (3–5 с.) измерение повторяется вновь [41].

На рисунках 3.11–3.13 представлены результаты пробоя МДМ-структуры $Al-SiO_2-Al$ при смене полярности.

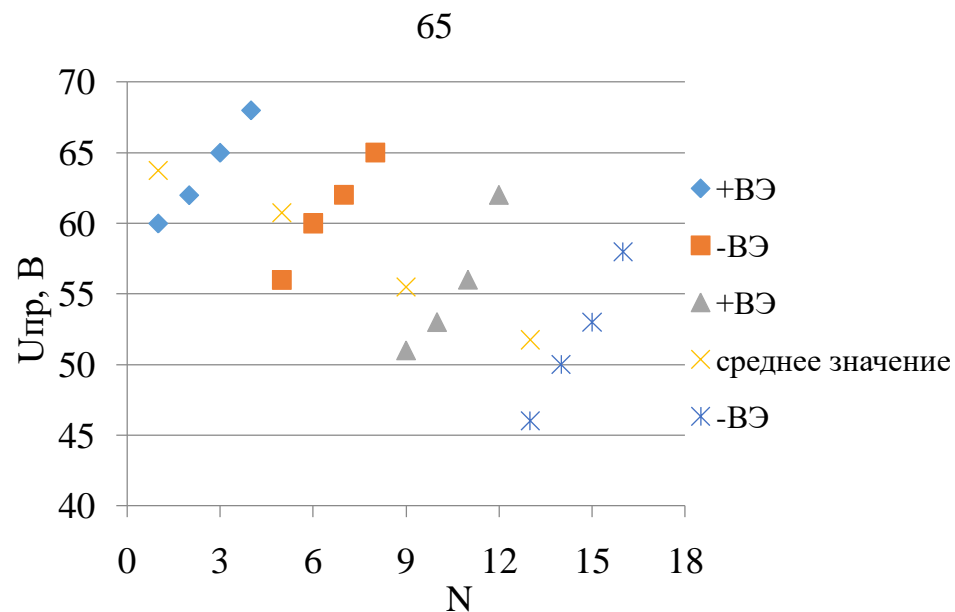


Рисунок 3.11 – Зависимость электрической прочности МДМ–структуры Al–SiO₂–Al от числа пробоев при смене полярности при толщине диэлектрика 180

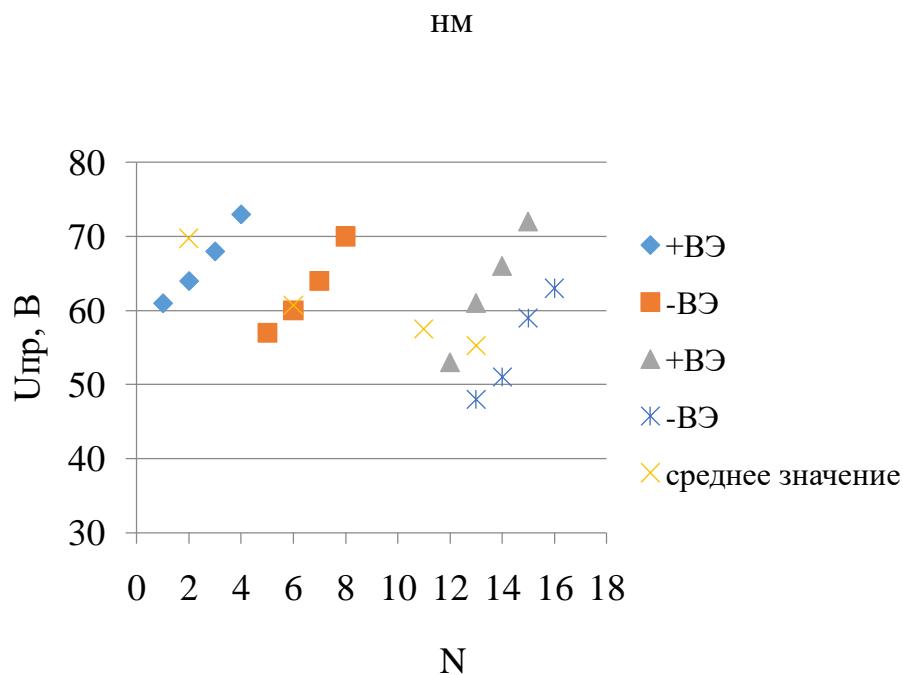


Рисунок 3.12 – Зависимость электрической прочности МДМ–структуры Al–SiO₂–Al от числа пробоев при смене полярности при толщине диэлектрика 200

нм

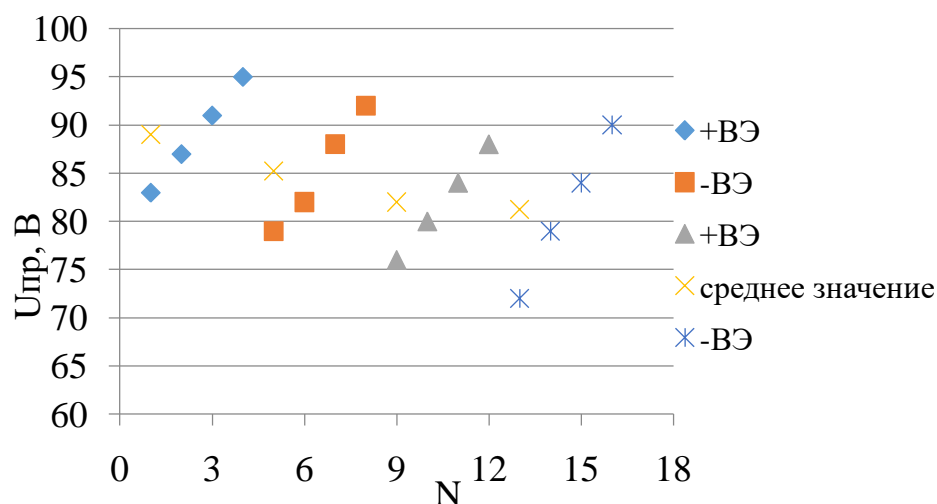


Рисунок 3.13 – Зависимость электрической прочности МДМ–структуры Al–SiO₂–Al от числа пробоев при смене полярности при толщине диэлектрика 350 нм

Анализ зависимостей показывает, что при смене полярности уменьшается напряжение каждого первого пробоя, это связано с тем, что каждый предшествующий пробой – новые «слабые» места, с новыми эмиссионными центрами.

На рисунках 3.14–3.16 представлены результаты пробоя МДМ–структуры Al–TiO₂–Al при смене полярности.

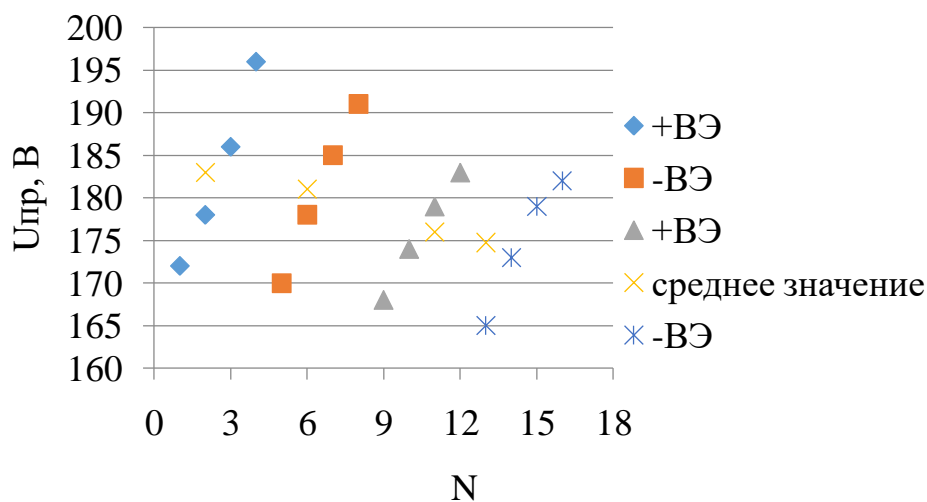


Рисунок 3.14 – Зависимость электрической прочности МДМ–структуры Al–TiO₂–Al от числа пробоев при смене полярности при толщине диэлектрика 180 нм

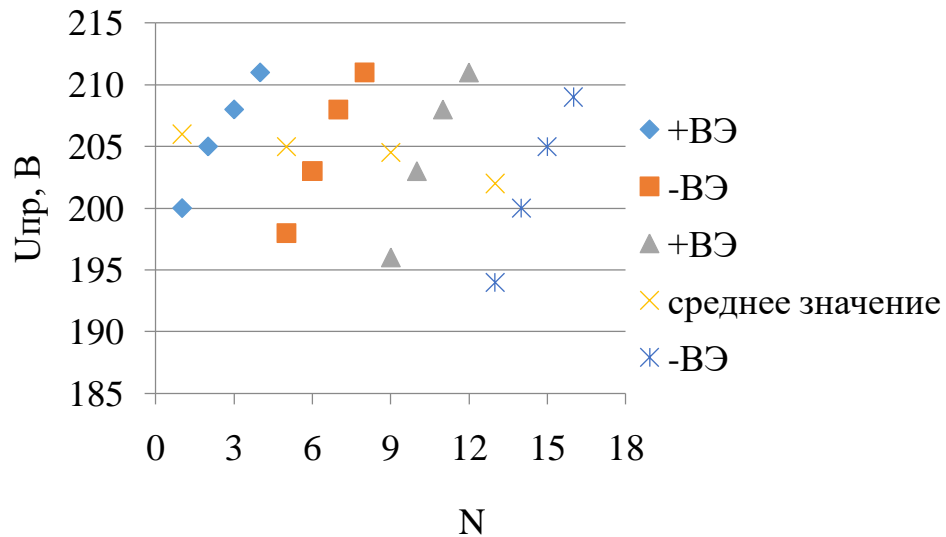


Рисунок 3.15 – Зависимость электрической прочности МДМ–структуры Al–TiO₂–Al от числа пробоев при смене полярности при толщине диэлектрика 200

нм

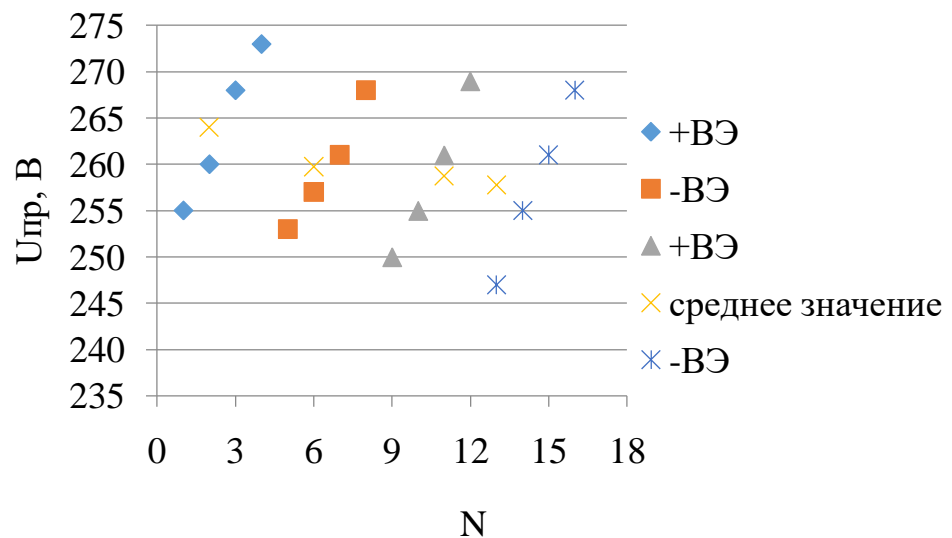


Рисунок 3.16 – Зависимость электрической прочности МДМ–структуры Al–TiO₂–Al от числа пробоев при смене полярности при толщине диэлектрика 350

нм

Из данных зависимостей (рисунки 3.11–3.16) видно, что при смене полярности уменьшается напряжение каждого первого пробоя.

Следует сказать, что количественная теория пробоя диэлектрических пленок отсутствует. Однако качественные представления о механизме пробоя диэлектрической пленки имеются, и картина пробоя в первом приближении ясна. При этом учитываются следующие особенности структуры тонкопленочной системы: наличие микроострий на катоде, из которых происходит эмиссия электронов в диэлектрик; наличие потенциального барьера на границе электрод–диэлектрик; наличие электронных ловушек в диэлектрической пленке, которые захватывают электроны, и при этом образуется отрицательный объемный заряд (ООЗ). Исследования показали, что ООЗ сосредоточен в прикатодном слое толщиной не более 10^{-5} см. Это связано с тем, что эмитированные из катода электроны обладают малой энергией и легко захватываются ловушками [42].

На основании изложенного предложена причина, объясняющая этот момент. Причина связана с поведением отрицательного объемного заряда (ООЗ), возникающего вблизи микроострия, находящегося под отрицательным потенциалом (рисунок 3.17). ООЗ уменьшает напряженность электрического поля на вершине отрицательного острия и увеличивает E_{np} (рисунок 3.17 (а)). При смене полярности наблюдается скачок тока, связанный с образованием нового ООЗ (время образования ООЗ $\tau \approx 10^{-7}$ с), и разрушением ООЗ вблизи бывшего отрицательного острия (рисунок 3.17 (б)).

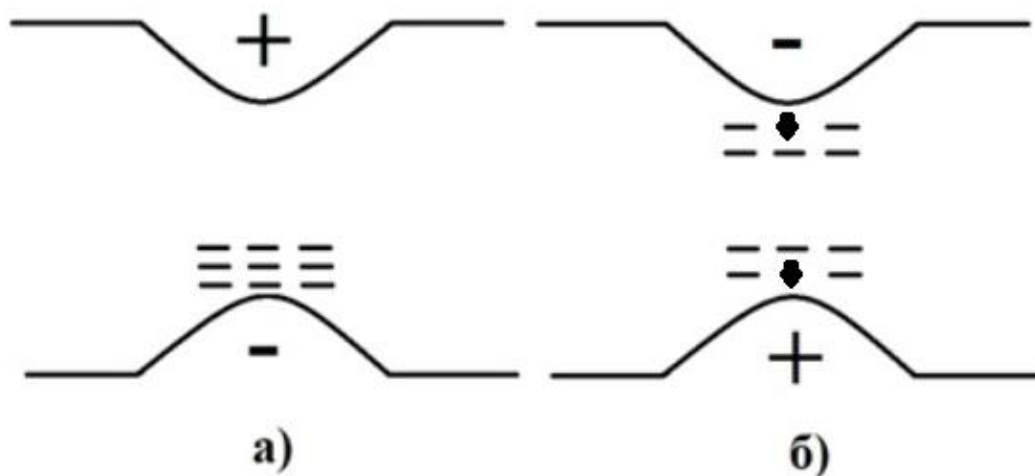


Рисунок 3.17 – Схематическое изображение образования и разрушения ООЗ: а) до смены полярности напряжения; б) сразу после смены полярности

На рисунке 3.17, стрелками показано направление эмиссионных токов при смене полярности. В дальнейшем зависимость U_{np} от числа пробоев стандартна: происходит увеличение U_{np} при увеличении числа пробоев. Так же стоит отметить, что электрическая прочность пленок уменьшается с ростом толщины, что объясняется большим количеством неоднородностей структуры в толстых пленках, возникающих в процессе их синтезирования [42].

В предыдущих исследованиях было выявлено, что при смене полярности верхнего электрода (ВЭ) напряжение каждого первого пробоя на одном тонкопленочном конденсаторе (ТПК) при смене полярности уменьшается. Была предложена главная причина такого поведения зависимости, связанная с поведением отрицательного объемного заряда (ООЗ), образующегося вблизи микроострия, находящегося под отрицательным потенциалом.

Для уточнения основной причины поведения зависимости были исследованы 2 МДМ–структуры Al–SiO₂–Al при толщине диэлектрика 180 и 250 нм с удалением с поверхности ТПК воды.

Решение удалить с поверхности ТПК воду было сделано на основании выводов Воробьев Г.А и Мухачева В.А из книги «Пробой тонких диэлектрических пленок» из температурной зависимости, представленной на рисунке 3.18 [43].

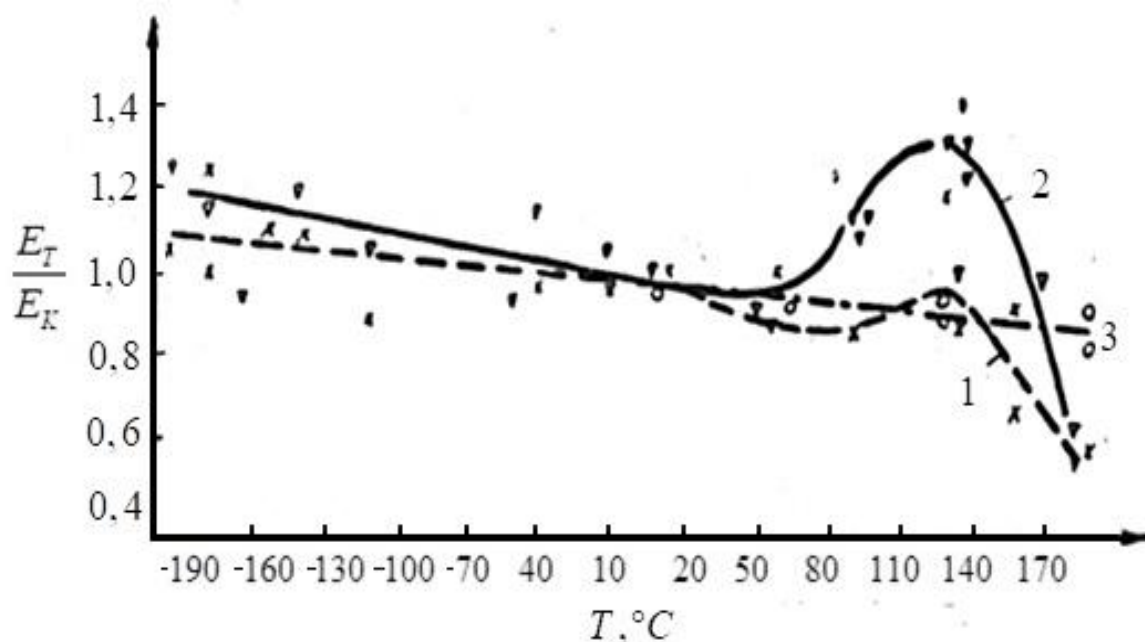


Рисунок 3.18 – Температурная зависимость E_{np} ТПК $Al-SiO-Al$: 1 – при пробое на постоянном напряжении и положительной полярности верхнего электрода; 2 – при пробое на постоянном напряжении и отрицательной полярности верхнего электрода; 3 – при пробое на фронте импульса напряжения, $\tau_{\phi} = 2 \cdot 10^{-8}$ с, и отрицательной полярности верхнего электрода

Из данной зависимости видно наличие максимума, который обусловлен присутствием абсорбированных молекул воды в пленке диэлектрика. Поэтому для исключения влияния молекул воды было принято решение о нагреве ТПК перед проведением пробоя.

Удаление воды с поверхности проводилось с помощью нагрева МДМ-системы после напыления нижнего электрода (НЭ) и диэлектрика в вакуумной камере при температуре 120°C и времени 20 минут, после чего напылялся верхний электрод (ВЭ). Далее проводился пробой при смене полярности. Результаты данных экспериментов представлены в таблице 3.6, на основании которой построены графики, представленные на рисунке 3.19–3.20.

Таблица 3.6 – Экспериментальные данные по пробою МДМ–структуры Al–SiO₂–Al с удалением воды с поверхности ТПК

№ подложки	Толщина диэлектрика, нм	Порядковый номер пробы на одном конденсаторе	Полярность ВЭ	U _{пр} , В
1	180	1	+ВЭ	60
		2		62
		3		65
		4		68
		5	-ВЭ	56
		6		60
		7		62
		8		65
		9	+ВЭ	51
		10		53
		11		56
		12		62
		13	-ВЭ	46
		14		50
		15		53
		16		58
2	250	1	+ВЭ	61
		2		64
		3		68
		4		73
		5	-ВЭ	57
		6		60
		7		64

Продолжение таблицы 3.6

№ подложки	Толщина диэлектрика, нм	Порядковый номер пробоа на одном конденсаторе	Полярность ВЭ	$U_{пр}, В$
2	250	8	-ВЭ	70
		9	+ВЭ	53
		10		61
		11		66
		12		72
		13	-ВЭ	48
		14		51
		15		59
		16		63

На основании данной таблицы, были построены графики зависимости (рисунок 3.19–3.20) электрической прочности МДМ–структуры Al–SiO₂–Al от числа пробоев при смене полярности с исключением паров воды с поверхности ТПК.

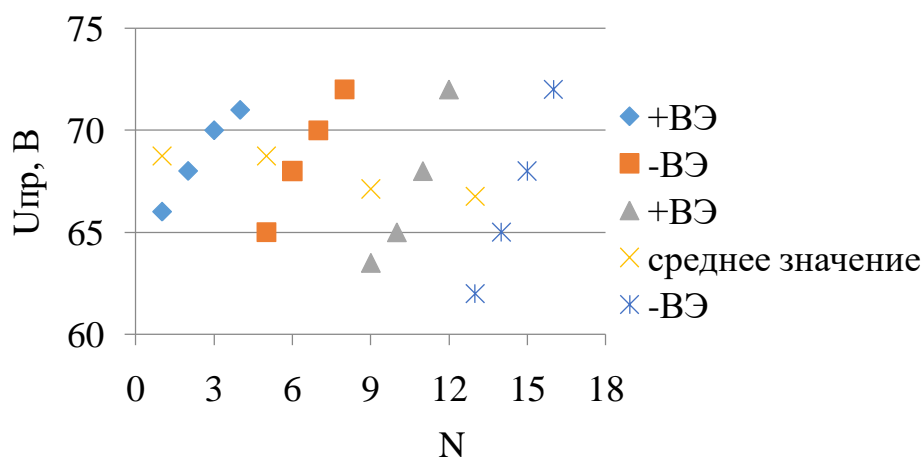


Рисунок 3.19 – Зависимость электрической прочности МДМ–структуры Al–SiO₂–Al с исключением паров воды с поверхности ТПК от числа пробоев при смене полярности при толщине диэлектрика 180 нм

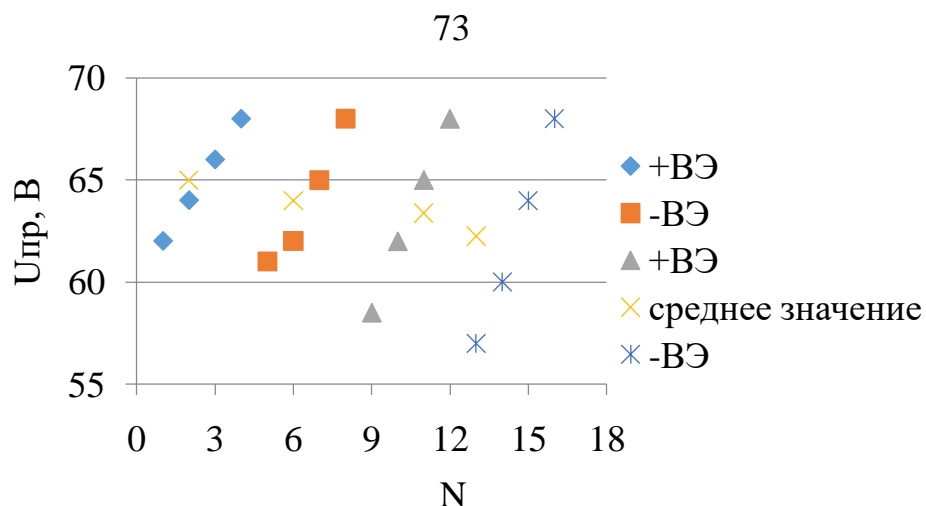


Рисунок 3.20 – Зависимость электрической прочности МДМ–структуры Al–SiO₂–Al с исключением паров воды с поверхности ТПК от числа пробоев при смене полярности при толщине диэлектрика 250 нм

Из данных зависимостей видно, что с исключением паров воды с поверхности ТПК значение напряжения пробоя возрастает, а зависимость ведет себя так же, как и с парами воды, т.е. происходит уменьшение каждого первого пробоя при смене полярности. Значит можно сказать, что пары воды не влияют на уменьшение напряжения пробоя.

Предположение о микроостриях было сделано на основании того, что тонкопленочные системы нельзя рассматривать состоящими из однородного тонкого слоя диэлектрика и прилегающих к нему электродов с безупречно ровными поверхностями [44]. При толщине диэлектрической пленки, равной 10^{-6} – 10^{-4} см, размеры внутренних неоднородностей этой пленки и неровностей на поверхности электродов сравнимы с указанной толщиной и оказывают существенное влияние на пробой диэлектрической пленки. Рост пленки начинается с образования центров конденсации, которые превращаются в отдельные островки, сливающиеся при определенной толщине в сплошную пленку. Такой механизм роста пленки приводит к тому, что напыленные пленки никогда не обладают идеально ровными поверхностями [45].

Поэтому из механизма роста пленок ясно, что нижний электрод будет не гладким, а представлять собой холмистую поверхность (микроострия

шарообразной и конусообразной формы), данные были доказаны и описаны в первой главе диссертационной работы. Далее при напылении диэлектрика на такую поверхность пленка диэлектрика сглаживает невысокие микроострия (загрунтовывает), но в основном, повторяет рельеф нижнего электрода [46]. Кроме того, сама пленка диэлектрика вносит собственные неоднородности в рельеф системы: микротрещины из-за разницы в коэффициенте линейного расширения металлического электрода и диэлектрика. Верхний электрод, даже если он не вносит дополнительных дефектов структуры, повторяет рельеф поверхности диэлектрика. Но также в процессе осаждения верхнего электрода могут возникнуть локальные разогревы, приводящие к появлению трещин в диэлектрической пленке [47].

Для подтверждения наличия микроострий на поверхности верхнего электрода и присутствия их в диэлектрике были проведены исследования на сканирующем зондовом микроскопе *C3M NT-MDT «Nanoeducator 1»*. На рисунке 3.21 представлено изображение поверхности диэлектрической пленки SiO_2 .

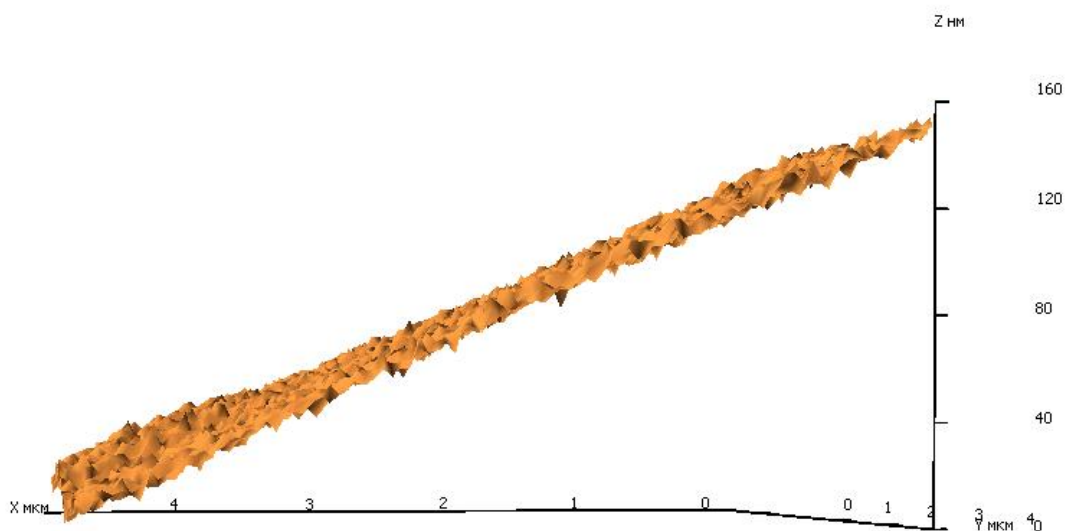


Рисунок 3.21 – Модель поверхности диэлектрической пленки SiO_2

Из данных приведенных на рисунке 5.23 уже можно сказать, что в диэлектрической пленке присутствуют конусообразные выступы, выступающие в качестве микроострий. Данные неоднородности возникают в результате

ударной ионизации, бомбардировки частицами материала, поступающего из источника, либо в результате различной скорости роста по поверхности пленки. Эти углубления при образовании верхнего электрода заполняются металлом и определяют, по всей вероятности, места «закороток» в конденсаторе [48]. Так же по данному графику была высчитана высота микроострий, которая равна 32–37 нм, в зависимости от места нахождения ТПК на структуре. Из литературных данных известно, что микронеровности высотой более 25 нм влияют в первую очередь на пробой тонкопленочного конденсатора. А вот микронеровности менее 25 нм, как правило, не являются центром пробоя при толщине диэлектрической пленки более 100 нм [49].

На рисунке 3.21 представлено изображение поверхности верхнего электрода, в нашем случае Al.

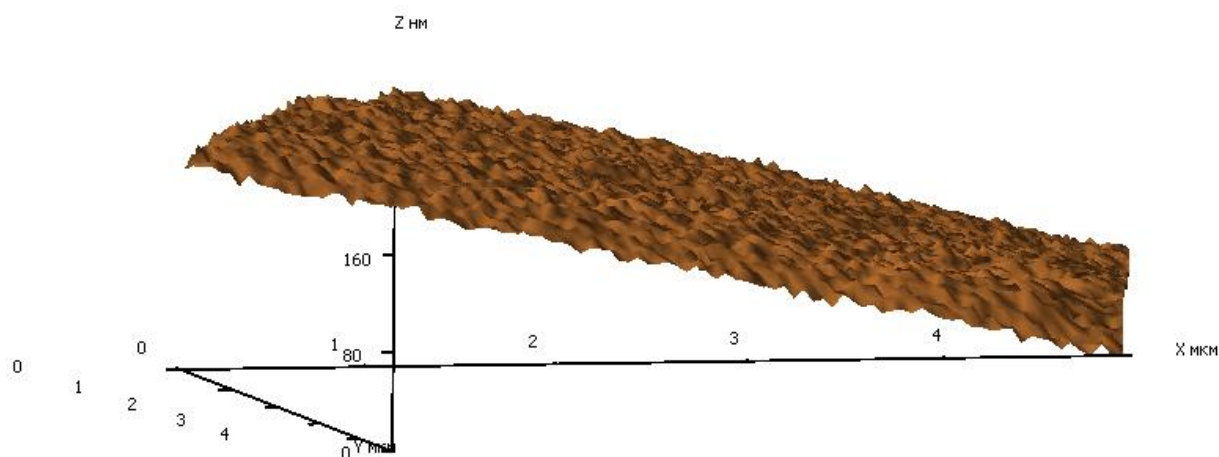


Рисунок 3.21 – 3D–модель поверхности верхнего электрода Al

Из рисунка 3.21 видно, что на верхнем электроде так же находятся микроострия конусообразной сферической формы. Из предыдущих выводов следует предполагать, что конденсирующийся металл не только заполняет микронеровности на поверхности диэлектрической пленки, но и частично внедряется в нее, образуя микроотверстия, проникающие вглубь диэлектрической пленки [50].

Диэлектрические пленки TiO_2 при исследовании показали такие же результаты, данные представлены на рисунке 3.22.

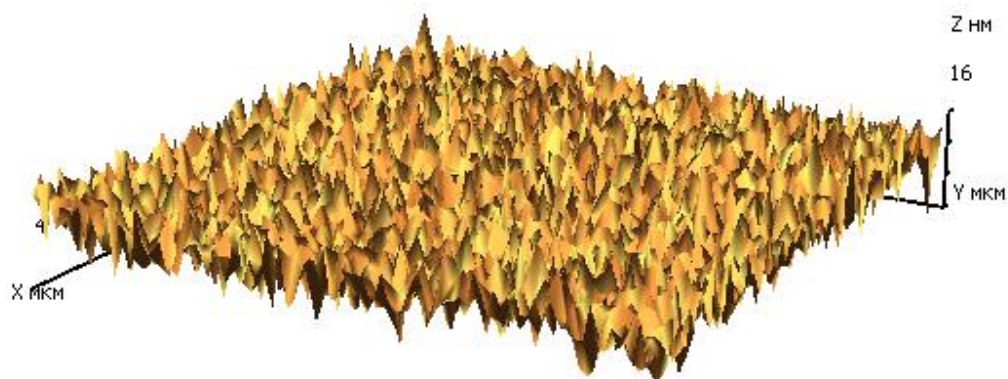


Рисунок 3.22 – 3D–модель поверхности с диэлектриком TiO_2 и верхним электродом Al

На основании всех полученных результатов можно сказать, что резкое уменьшение первого пробоя после смены полярности можно объяснить более сильным увеличением плотности тока за счет разрушения старого ООЗ (оставшегося, когда это острие было под отрицательным потенциалом) и за счет большей плотности тока из острия, ставшем «критическим». Последний фактор объясняет и уменьшение напряжения пробоя для последующих пробоев при одной полярности: например, пятый пробой (первый пробой после смены полярности, напряжение пробоя №6 меньше напряжения третьего и четвертого пробоя при предыдущей полярности). Это свидетельствует в пользу факта «удлинения» микроострия при большей плотности тока. Так же было доказано наличие микроострий и их влияние на пробой тонкопленочного конденсатора.

3.4 Моделирование электрического поля в процессе пробоя тонкопленочного конденсатора

Моделирование электрического поля проводилось в программе COMSOL Multiphysics. Основной особенностью программного комплекса COMSOL Multiphysics является его широкие мультифизические возможности, позволяющие одновременно исследовать в одной модели тепловые, электрические, электромагнитные и многие другие процессы [51].

Программный комплекс позволяет моделировать одномерные, двумерные и трехмерные физические поля, строить осесимметричные модели. Комплекс состоит из модулей, в которых заложены необходимые для моделирования дифференциальные уравнения и физические константы для тех или иных физических процессов [52].

Моделирование электрического поля в процессе пробоя тонкопленочного конденсатора проводилось в модуле Electrostatics. Функционал позволяет моделировать электрические поля в статических и низкочастотных системах. Типовые случаи включают расчеты конденсаторов, изоляторов, сенсоров с применением граничных условий для задания тонких слоев с высокой или низкой диэлектрической проницаемостью и специализированных инструментов [53].

Для моделирования нам необходимо было знать диэлектрическую проницаемость, вычисленную в основной (третьей) главе, геометрию структуры, напряжения, подаваемые на структуру и площади разрушения в верхнем электроде.

Для расчета диаметра канала пробоя в диэлектрике и верхнем электроде из [54] была взята формула энергии, запасенной в емкости тонкопленочной системы:

$$W_{\text{пр}} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S}{2 \cdot d} \cdot (U_{\text{пр}}^2 - U_{\text{ост}}^2) = \pi \cdot r^2 \cdot d \cdot H \cdot \rho, \quad (3.2)$$

где ε_0 – электрическая постоянная;

ε – диэлектрическая проницаемость;

S – площадь ТПК;

r – радиус канала пробоя в диэлектрике;

H – теплота сублимации;

ρ – плотность диэлектрика.

Отсюда

$$r^2 = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S \cdot (U_{\text{пр}}^2 - U_{\text{ост}}^2)}{2 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot H \cdot \rho}. \quad (3.3)$$

Пропорциональность между r^2 и $W_{пр}$ подтверждается экспериментально [55]. Аналогичные рассуждения приводят к пропорциональности между $W_{пр}$ и размером отверстия в верхнем электроде, также подтверждаемой экспериментально [56].

Но формула, представленная в [54] не отражает энергию, идущую на разрушение в верхнем электроде.

В данной работе будет учитываться более точная формула баланса энергии при пробое ТПК:

$$\frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S \cdot U_{np}^2}{h_1 \cdot 2} = \pi \cdot r_1^2 \cdot h_1 \cdot \rho_1 \cdot H_1 + \pi \cdot r_2^2 \cdot h_2 \cdot \rho_2 \cdot H_2.$$

В этом равенстве не учитывается $U_{ост}$, так как для оценки используется не конкретное значение U_{np} , а некоторая константа, близкая к реальному значению U_{np} исследуемых ТПК.

Расчет радиуса канала пробоя верхнего электрода производился по формуле:

$$r^2 = \frac{E - \pi \cdot r_1^2 \cdot h_1 \cdot \rho_1 \cdot H_1}{\pi \cdot h_2 \cdot \rho_2 \cdot H_2}, \quad (3.4)$$

где E – выделенная энергия в канале пробоя, $E = \frac{C \cdot U^2}{2} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S \cdot U_{np}^2}{h_1 \cdot 2}$;

U_{np} – напряжение пробоя ($U_{np} = 60$ В);

ε_0 – электрическая постоянная ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м);

ε – диэлектрическая проницаемость для SiO_2 ($\varepsilon = 5$);

S – площадь ТПК ($S = 1$ мм²);

r_1 – радиус канала пробоя диэлектрика (величина будет изменяться);

h_1 – толщина диэлектрика SiO_2 ($h_1 = 200$ нм);

h_2 – толщина верхнего электрода Al ($h_2 = 80$ нм);

H_1 – теплота сублимации SiO_2 ; ($H_1 = 135 \pm 5 \frac{\text{ккал}}{\text{г-атом}}$)

H_2 – теплота сублимации Al ; ($H_2 = 75,5 \pm 1,5 \frac{\text{ккал}}{\text{г-атом}}$)

ρ_2 – плотность Al ($\rho_2 = 2,7 \cdot 10^3$ кг/м³);

ρ_1 – плотность SiO_2 ($\rho_1 = 2,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$).

Был проведен расчет радиуса отверстия в верхнем электроде при изменении радиуса канала диэлектрика при диэлектрической проницаемости равной 5 и напряжении пробоя 60 В. Данные этого расчета можно увидеть из зависимости, приведенной на рисунке 3.22.

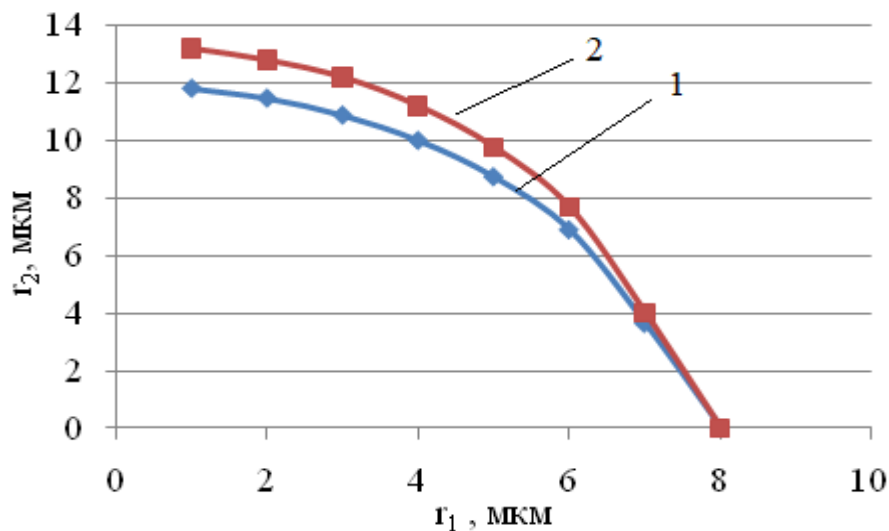


Рисунок 3.22 – Зависимость радиуса отверстия в ВЭ от радиуса канала диэлектрика: 1 – толщина ВЭ 90 нм; 2 – толщина ВЭ 80 нм.

Так же были рассчитаны и экспериментально построены зависимость диаметра канала пробоя ВЭ от $U_{пр}$ и зависимость квадрата радиуса канала пробоя ВЭ от выделенной энергии в канале пробоя, результаты представлены на рисунках 3.23 – 3.24.

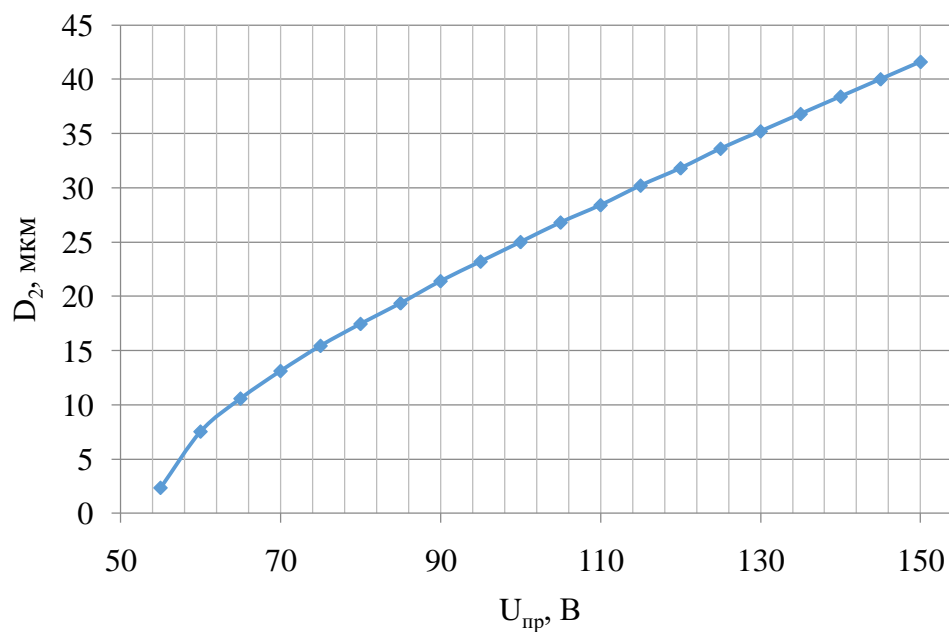


Рисунок 3.23 – Зависимость диаметра канала пробоя верхнего электрода от напряжения пробоя

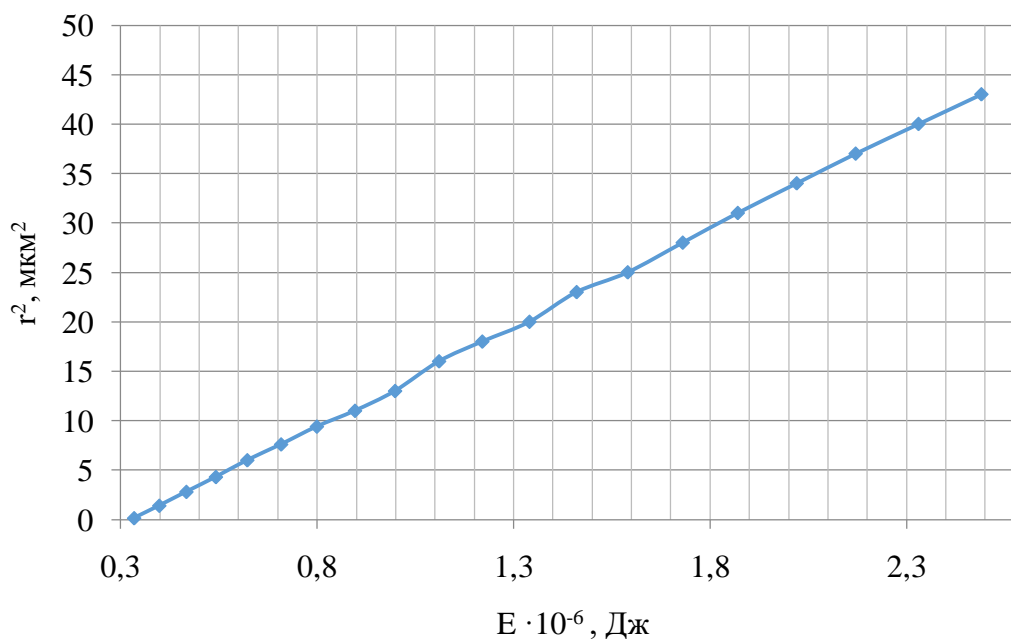


Рисунок 3.24 – Зависимость квадрата радиуса канала пробоя верхнего электрода от выделенной энергии в канале

Из данных зависимостей видно, что с увеличением напряжения пробоя, увеличивается диаметр канала пробоя верхнего электрода, это связано с тем,

что выделяется большая энергия в канале пробоя, что подтверждает рисунок 3.23

Из графика, приведенного на рисунке 3.23 видно, что при напряжении пробоя 60 В, диаметр канала пробоя в верхнем электроде будет равен 10 мкм, данная величина и использовалась для моделирования.

Моделирование выполнено с учетом того, что на верхнем электроде более острое микроострие, чем нижнее, за счет того, что на верхнем электроде металл попадает в пору [57]. Результаты моделирования представлены на рисунках 3.25–3.37.

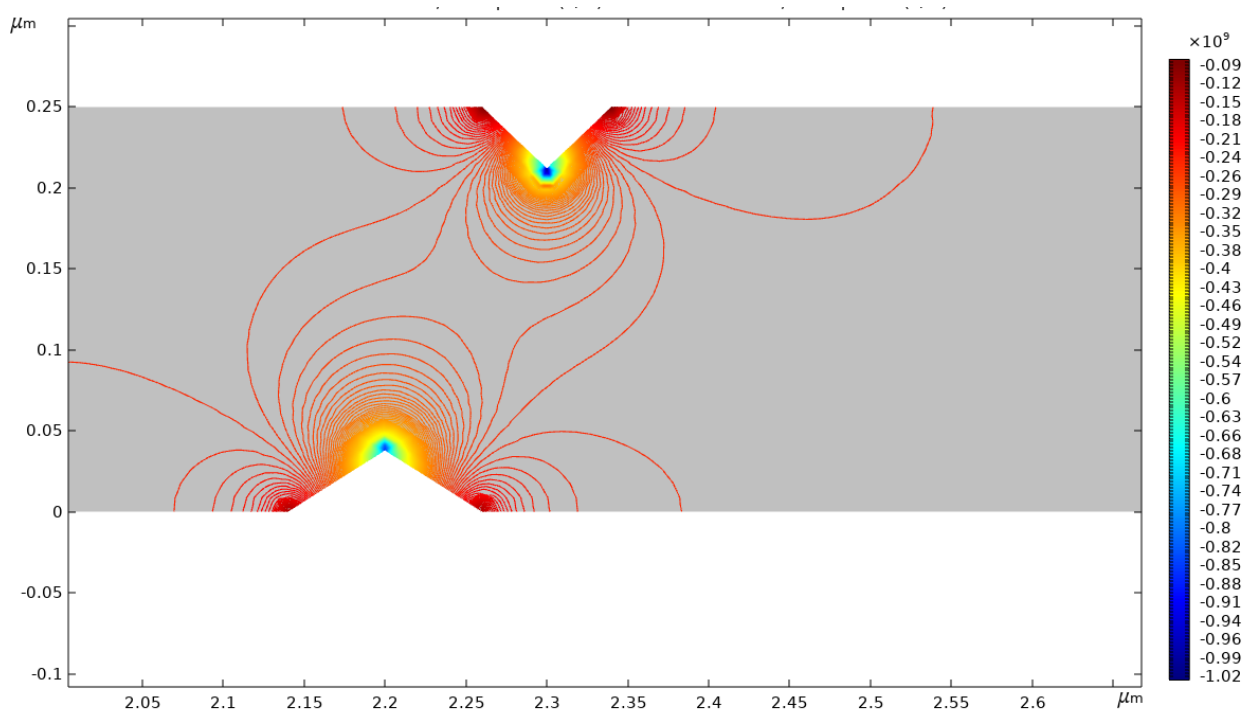


Рисунок 3.25 – Распределение электрического поля в структуре Al-SiO₂-Al до пробоя

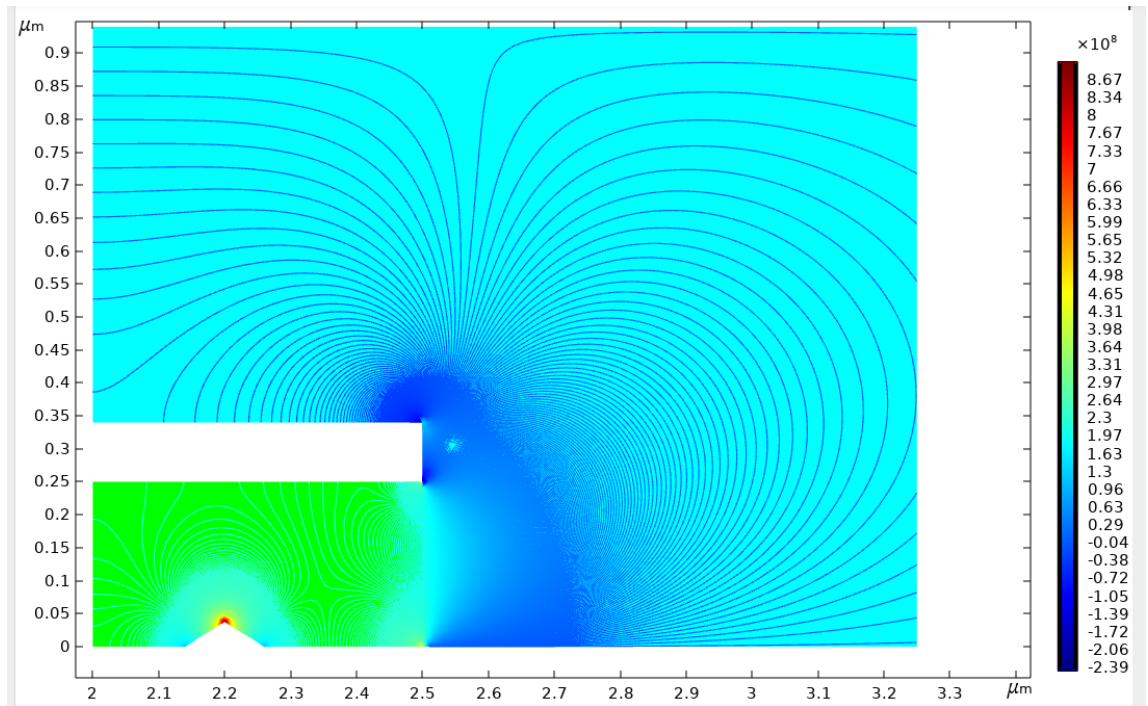


Рисунок 3.26 – Распределение электрического поля в структуре Al-SiO₂-Al после пробоя при положительной полярности верхнего электрода

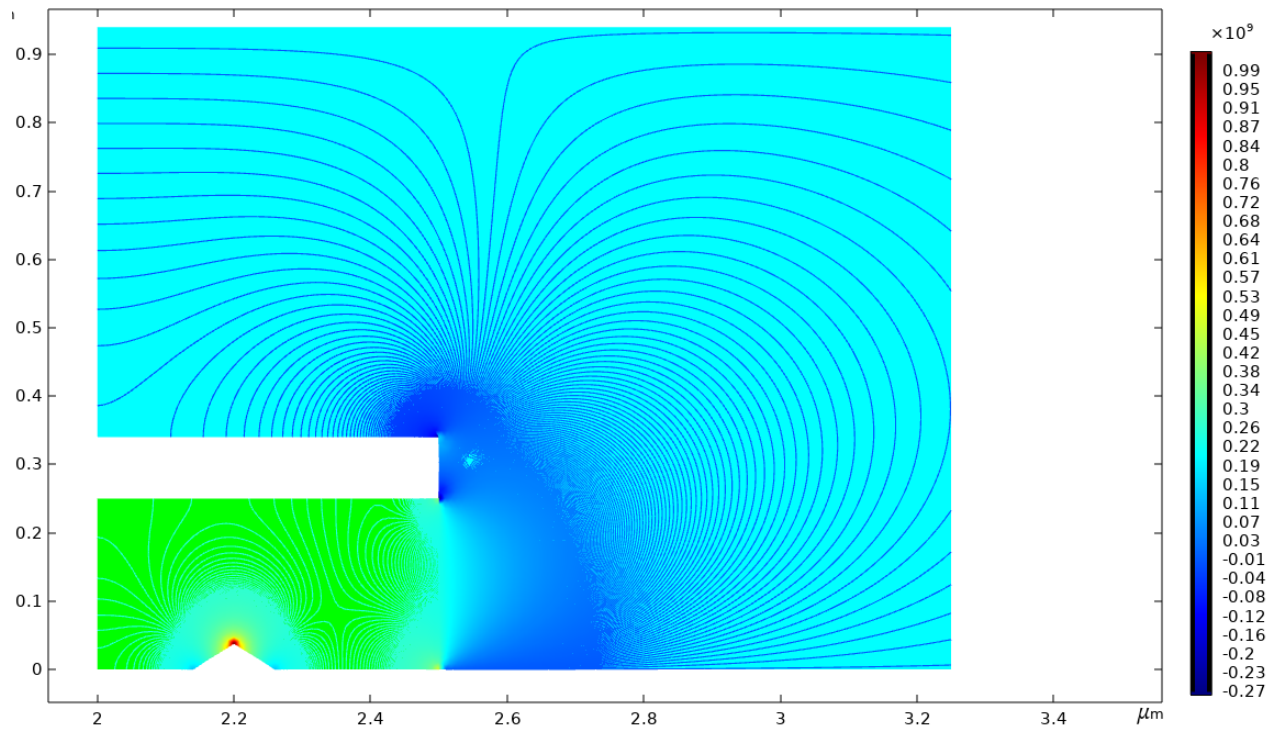


Рисунок 3.27 – Распределение электрического поля в структуре Al-SiO₂-Al после пробоя при отрицательной полярности верхнего электрода

Из результатов моделирования, представленных на рисунках 3.25–3.27 видно, что величина электрического поля в канале при смене полярности увеличилась с $2,39 \cdot 10^8 \frac{\text{В}}{\text{м}}$ до $2,7 \cdot 10^8 \frac{\text{В}}{\text{м}}$. Так же из этих результатов эксперимента видно, что на вершине микроострия самое сильное электрическое поле которое составляет при положительной полярности верхнего электрода $8,67 \cdot 10^8 \frac{\text{В}}{\text{м}}$, а при отрицательной полярности $9,9 \cdot 10^8 \frac{\text{В}}{\text{м}}$. Это можно объяснить тем, что при отрицательной полярности приложенного напряжения снижение электрической прочности более значительно из-за частичного проникновения материала верхнего электрода вглубь диэлектрика, что приводит к формированию микроострий на верхнем электроде. Микроострия в этом случае вызывают усиление электрического поля, а их вершинах, что увеличивает инжекцию электронов в диэлектрике, при условии отрицательного потенциала на них [57]. Это доказывает результаты экспериментов и говорит о том, что при смене полярности наиболее вероятен пробой, а на верхнем электроде находится более острое микроострие.

Вывод к главе 3

В данной главе были проведены измерения электрических характеристик полученных тонкопленочных конденсаторов для последующих экспериментов. Основные параметры (емкость C и тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$) были измерены, с помощью анализатора иммитанс $E7-20$. Толщина пленок была снята экспериментально с помощью микроинтерферометра Линника МИИ-4, а так же проведены ее расчеты. Расчетные значения и экспериментальные данные практически совпали, это означает, что экспериментальные данные получены достоверно. Так же для расчетов диаметра канала пробоя нам необходимо было знать диэлектрическую проницаемость SiO_2 и TiO_2 , которая зависит от метода получения. Поэтому, исходя из экспериментальных данных, была рассчитана ϵ для ионно-

плазменного метода получения SiO_2 (аналогично и для TiO_2). Диэлектрическая проницаемость SiO_2 $\varepsilon = 5$, а TiO_2 $\varepsilon = 33$.

Были проведены исследования состава диэлектрических пленок. Элементный состав пленок исследовался с помощью ИК спектрометра Фурье *Infracum FT-801*. Атомный состав пленок SiO_2 и TiO_2 исследовался с помощью рентгеновского микроанализатора *Bruker Quantax 50 EDX*. Из энергодисперсионного рентгеновского спектра было видно, что кремний и титан вступают в химическую реакцию, поскольку происходит химический сдвиг в область больших энергий. В атомарном составе присутствовал углерод. Вероятно, его присутствие связано с физической адсорбцией на поверхности пленки. Для выявления полной картины необходимо было провести анализ соединений, присутствующих в пленках SiO_2 и TiO_2 . Из результатов было видно, что на ИК-спектрах присутствуют основные пики что свидетельствует об отсутствии избыточного кремния и титана в пленке.

Были выявлены особенности влияния полярности напряжения на электрическую прочность тонкопленочных конденсаторов. А также установлено, что пары воды не влияют на уменьшение напряжения пробоя при смене полярности напряжения. На основании всех результатов можно сказать, что резкое уменьшение первого пробоя после смены полярности можно объяснить более сильным увеличением плотности тока за счет разрушения старого ООЗ (оставшегося, когда это острие было под отрицательным потенциалом) и за счет большей плотности тока из острия, ставшем «критическим». Последний фактор объясняет и уменьшение напряжения пробоя для последующих пробоев при одной полярности. Это свидетельствует в пользу факта «удлинения» микроострия при большей плотности тока. Так же было доказано наличие микроострий и их влияние на пробой тонкопленочного конденсатора.

ВЫВОДЫ

Проанализировав проведенную работу можно сделать выводы:

1. о практической работоспособности любого из вышеописанных методов очистки подложек для улучшения адгезии нижнего электрода к стеклянным подложкам;
2. были отработаны режимы получения МДМ-систем, а именно $Al-SiO_2-Al$ и $Al-TiO_2-Al$ на вакуумной напылительной установке $УВМ-2$;

Основной целью было исследование электрической прочности от числа пробоев при смене полярности верхнего электрода. Результаты были подтверждены и выявлены причины снижения электрической прочности после смены полярности верхнего электрода. Выявлено, что резкое уменьшение первого пробоя после смены полярности можно объяснить более сильным увеличением плотности тока как за счет разрушения старого ООЗ (оставшегося, когда это острие было под отрицательным потенциалом) и за счет большей плотности тока из острия, ставшем «критическим». Так же было доказано наличие микроострий и их влияние на пробой тонкопленочного конденсатора.

Для расчетов диаметра разрушения в верхнем электроде была уточнена формула (3.2) [54], в которой не была учтена энергия, тратящаяся на разрушение в верхнем электроде. Именно по уточненной формуле были сделаны расчеты для последующего моделирования процесса пробоя;

В процессе моделирования были сделаны выводы, что величина электрического поля в канале при смене полярности увеличивается, что объясняется тем, что при отрицательной полярности приложенного напряжения снижение электрической прочности более значительно из-за частичного проникновения материала верхнего электрода вглубь диэлектрика, что приводит к формированию микроострий на верхнем электроде. Микроострия в этом случае вызывают усиление электрического поля, а их вершинах, что увеличивает инжекцию электронов в диэлектрике, при условии отрицательного потенциала на них. Это доказывает результаты экспериментов и говорит о том,

что при смене полярности наиболее вероятен пробой, а на верхнем электроде находится более острое микроострие.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 The International Technology Roadmap for Semiconductors [Электронный ресурс]. – Режим допуска: <http://www.itrs2.net> (дата обращения 06.06.2018).
- 2 Wayne, W. / Modern VLSI Design: IP-Based Design/ W. Wayne/ – Токуо: Prentice Hall, 2009. – 631 pp.
- 3 Данилина, Т. И. / Технология кремниевой наноэлектроники / Т. И. Данилина, В. А. Кагадей, Е. В. Анищенко. // Учебное пособие – Томск: В-Спектр, 2011. – 263 с.
- 4 Цветов, В. П. / Развитие классической микроэлектроники: Ожидаемые физико-технические пределы / В. П. Цветов. – ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес, Вып.3, 2010. – С. 2 – 6.
- 5 Данилина, Т. И. / Процессы микро- и нанотехнологии / Т. И. Данилина, К. И. Смирнова. // Учебное пособие – Томск: В-Спектр, 2004. – 259 с.
- 6 Introducing 7-nm FinFET technology in Microwind [электронный ресурс] / 2017 // Режим доступа: <http://srv-wwwperso.insa-toulouse.fr/~sicard/microwind/7nm.pdf> (дата обращения 08.06.18).
- 7 Introducing 10-nm FinFET technology in Microwind [электронный ресурс] / 2017 // Режим доступа: <http://srv-wwwperso.insa-toulouse.fr/~sicard/microwind/10nm.pdf> (дата обращения 08.06.18).
- 8 Rasit, O. / More than Moore. Technologies for Next. Generation Computer Design / O. Rasit. - New York: Springer, 2015. – 225 pp.
- 9 Introducing 20 nm technology in Microwind [электронный ресурс] / 2017 // Режим доступа: <http://srv-wwwperso.insa-toulouse.fr/~sicard/microwind/20nm.pdf> (дата обращения 08.06.18).
- 10 High Performance 32nm Logic Technology Featuring 2nd Generation High-k + Metal Gate Transistors [электронный ресурс] / IEDM, 2009 // Режим

доступа: <https://www.intel.ru/content/dam/doc/technology-brief/32nm-logic-high-k-metal-gate-transistors-presentation.pdf> (дата обращения 08.06.18).

11 A 45nm Logic Technology with High-k + Metal Gate Transistors, Strained Silicon, 9 Cu Interconnect Layers, 193nm Dry Patterning, and 100% Pb-free Packaging [электронный ресурс] / Intel, 2009 // Режим доступа: http://download.intel.com/pressroom/kits/advancedtech/pdfs/Mistry_IEDM_2007_HiK-MG_foils.pdf (дата обращения 08.06.18).

12 Intel's 45nm CMOS Technology [электронный ресурс] / Intel® Technology Journal, 2008 // Режим доступа: http://ece.iisc.ernet.in/~banerjee/course_E3238/Upload_files/ITJ_v12issue02.pdf (дата обращения 08.06.18).

13 A 65nm Logic Technology Featuring 35nm Gate Lengths, Enhanced Channel Strain, 8 Cu Interconnect Layers, Low-k ILD and 0.57 μm^2 SRAM Cell [электронный ресурс] / Northwestern University, 2004 // Режим доступа: <https://www.scholars.northwestern.edu/en/publications/a-65nm-logic-technology-featuring-35nm-gate-lengths-enhanced-chan> (дата обращения 08.06.18).

14 90 nm Generation, 300mm Wafer Low k ILD/Cu Interconnect Technology [электронный ресурс] / International Interconnect Technology Conference, 2003 // Режим доступа: https://www.academia.edu/11622402/90_nm_generation_300_mm_wafer_low_k_ILD_Cu_interconnect_technology (дата обращения 11.06.18).

15 Accurate A Priori Signal Integrity Estimation Using A Multilevel Dynamic Interconnect Model for Deep Submicron VLSI Design [электронный ресурс] / Solid-State Circuits Conference, 2000 // Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/4157861_Accurate_a_priori_signal_integrity_estimation_sing_a_multilevel_dynamic_interconnect_model_for_deep_submicron_VLSI_design (дата обращения 12.06.18).

16 Lecture 4 – Wires [электронный ресурс] / Spring, 2005 // Режим доступа: <https://ocw.mit.edu/courses/electrical-engineering-and-computer-science/6->

884-complex-digital-systems-spring-2005/lecture-notes/104_wires.pdf (дата обращения 19.06.18).

17 Lecture 15 Handout - Interconnects [электронный ресурс]/ SpringTerm, 2005 // Режим доступа: http://www-mtl.mit.edu/researchgroups/hackman/6152J/SP_2004/lectures/sp_2005_Lecture15.pdf (дата обращения 19.06.18).

18 Строгонов, А. С. / Учет резистивно-емкостных эффектов при проектировании цифровых БИС по субмикронным проектным нормами / А. С. Строгонов. – Компоненты и технологии. Вып.9, 2010. – С. 141 – 144.

19 Interconnect Scaling [электронный ресурс]/ SpringTerm, 2016 // Режим доступа: <https://web.stanford.edu/class/ee311/NOTES/InterconnectScalingSlides.pdf> (дата обращения 20.06.18).

20 Interconnect delay [электронный ресурс]/ 2010 // Режим доступа: <http://www.engr.uconn.edu/~tehrani/teaching/ece3421/Lec-06.pdf> (дата обращения 20.06.18).

21 Громов, Д. В. / Материаловедение для микро- и нанoeлектроники: учебное пособие / Д. Г. Громов, А. А. Краснюк. – М.: МИФИ, 2008. – 156 с.

22 Громов, Д. Г. / Материалы и процессы формирования систем металлизации кремниевых интегральных схем: учебное пособие / Д. Г. Громов, А. И. Молчанов. – М.: МИЭТ, 2006. – 180 с.

23 Kumar, A. / Study the performance analysis of carbon nanotube as a VLSI interconnect / A. Kumar/ - Patiala: Thapar University, 2012. – 101 pp.

24 Герасимов, Ю. М. / Об учете индуктивности межсоединений при разработке КМОП СБИС / Ю. М. Герасимов, Н. Г. Григорьев. – Естественные и технические науки. Вып.6, 2013 – С. 338 - 341.

25 Валиев, С. А. / Проблемы создания высоконадежных многоуровневых соединений СБИС. / А. С. Валиев, А. А. Орликовский, А. Г. Васильев, В. Ф. Лукичев. – Микроэлектроника, Т. 19. Вып.2, 1990. – С. 116 - 131.

- 26 Лебедев, А. И. / Физика полупроводниковых приборов / А. И. Лебедев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 488 с.
- 27 Фелдман, Л. / Основы анализа поверхности и тонких пленок / Л. Фелдман, Д. Майер. – М.: Мир, 1989 – 231 с.
- 28 Вудраф, Д. / Современные методы исследования поверхности / Д. Вудраф. – М.: Мир, 1989. – 564 с.
- 29 Черепин, В.Т. / Методы и приборы для анализа поверхности материалов / В. Т. Черепин. – Киев: Наукова Думка, 1982. – 400 с.
- 30 Schuh, C. A. / Nanoindentation studies of materials / C. A. Schuh. – Materials Today, 2006. – P. 32–40.
- 31 Шик, А. Я. / Физика низкоразмерных систем / А.Я. Шик. – М.: Наука, 1993. – 208 с.
- 32 Никифорова–Денисова, С. Н. / Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники / С. Н. Никифорова–Денисова, Е. Н. Любушкин. – М.: Высшая школа, 1989. – 96 с.
- 33 Асташенкова, О. Н. / Механизмы формирования механических напряжений в пленках карбида кремния и нитрида алюминия, полученных магнетронным методом / О. Н. Асташенкова, А. В. Корляков. – Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии, 2014. – С. 57–61.
- 34 Mozalev, A. / Nucleation and growth of the nanostructured anodic oxides on tantalum and niobium under the porous alumina film / A. Mozalev, M. Sakairi, I. Saeki, H. Takahashi. – Electrochimica Acta., 2003. – N 48. – P. 3155–3170.
- 35 Борисенко, В. Е. / Нанoeлектроника: теория и практика: учеб. / В.Е. Борисенко, А.И. Воробьева, А.Л. Данилюк, Е.А. Уткина. – 3-е изд. – М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2013. – 366 с.
- 36 Лучинина, В. В. / Нанотехнология: физика, процессы, диагностика / Под ред. В.В. Лучинина, Ю.М. Таирова. – М.: Физматлит, 2006. – 552 с.

37 Дульцев, Ф. Н. / Тонкие пленки как основа химических и биологических сенсоров: дис. ... д-ра хим. наук: 02.00.21 / Дульцев Федор Николаевич. – Новосибирск, 2007. – 267 с.

38 Лучкин, А. Г. / Очистка поверхности подложек для нанесения покрытий вакуумно-плазменными методами / А.Г. Лучкин, Г.С. Лучкин. – Вестник КГТУ, 2012. – С. 208–210.

39 Углов, А. А. / Адгезионная способность пленок / А.А. Углов, Л.М. Анищенко, С.Е. Кузнецов. – М.: Радио и связь, 1987. – 104 с.

40 Шмаков, М. / Школа производства ГПИС. Очистка поверхности пластин и подложек / М. Шмаков, В. Паршин, А. Смирнов. – Технологии в электронной промышленности, 2008. – С. 76–80.

41 Данилина, Т. И. / Ионно-плазменные методы получения наноструктур / Т.И. Данилина, П.Е. Троян, Ю.В. Сахаров, Ю.С. Жидик. – Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2017. – С. 40–45.

42 Тареев, Б.М. / Физика диэлектрических материалов / Б.М. Тареев. – М.: Энергоиздат, 1982. – 320 с

43 Поплавко, Ю.М. / Физика диэлектриков / Ю.М. Поплавко. – Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1980. – 400 с.

44 Кикоина, И. К. / Таблицы физических величин: справ. / под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с

45 Сандомирский / Физика тонких пленок / под ред. Сандомирского. – М.: Мир, 1978. – 360 с.

46 Корзо, В. Ф. / Диэлектрические пленки в микроэлектронике / В.Ф. Корзо, В.Н. Черняев. – М.: Энергия, 1977. – 368 с.

47 Сканава, Г. И. / Физика диэлектриков (область сильных электрических полей) / Г.И. Сканава. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1958. – 909 с.

48 . Воробьев, Г. А. / Физика диэлектриков (область сильных полей): учеб. пособие / Г.А. Воробьев, Ю.П. Похолков, Ю.Д. Королев, В.И. Меркулов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 244 с.

49 Гынгазов, С. А. / Исследование электрофизических свойств тонкопленочных систем металл-диэлектрик-металл в экстремальных условиях внешней среды и электрических полей: дис. ... канд. техн. наук / Гынгазов Сергей Анатольевич. – Томск, 1995. – 171 с.

50 Проскуровский, Д.И. / Эмиссионная электроника / Д.И. Проскуровский. – Томск: Том. гос. ун-т, 2010. – 288 с.

51 Зацепина, Т. Н. / Свойства и структура воды / Т.Н. Зацепина. – М.: Изд-во МГУ, 1974. – 167 с.

52 Сахаров, Ю. В. Технология синтеза и свойства пористых оксидных пленок / Ю.В. Сахаров, П.Е. Троян, Ю.С. Жидик. – Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2015. – С. 72–75.

53 Чапман, В. N. / Thin-film adhesion / В.N. Chapman. – J. Vacuum Science and Technology, 1974. – P. 106.

54 Воробьев, Г.А. Пробой тонких диэлектрических пленок. / Г.А. Воробьев, В.А. Мухачев // – М.: «Сов. радио», 1977. – 72 с.

55 Klein N., Gafni H., David H. Mechanism of d.c. electrical break – down in thin siliconoxide films. – «Phys. Of Failure in Electr. », 1965, v. ED – 3, p.315.

56 Budenstein P.P., Hayes P.I. Breakdown Conduction in Al – SiO – Al Capacitors. – «J. Appl. Phys. », 1967, v. ED – 38, p.2837.

57 Сахаров, Ю.В. Структура и свойства пористых оксидных пленок, модифицированных углеродом: диссертация доктора технических наук: 01.04.04. – Томск, 2018. – 304 с.