

На правах рукописи

Лебедь Константин Валерьевич

**ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ И РАЗРЯДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
НЕОРГАНИЧЕСКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ С ПОЛУПРОВОДЯЩИМ
ПОКРЫТИЕМ**

Специальность 05.09.02 – Электротехнические материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2011

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, с.н.с.
Кабышев Александр Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Усов Юрий Петрович

кандидат технических наук, с.н.с.
Черненко Владимир Павлович

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск.

Защита состоится «20» июня 2011 г. в 10⁰⁰ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.10 при ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан «19» мая 2011 г.

И.о. ученого секретаря совета
по защите докторских и
кандидатских диссертаций
Д 212.269.10, д.т.н., профессор

Курец В.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Развитие современного энергетического комплекса стимулирует создание мощных высоковольтных электрофизических установок, что, в свою очередь, предъявляет более высокие требования ко всем узлам таких установок, в том числе и к изоляционным конструкциям. К материалам, наиболее удовлетворяющим такие требования, относят неорганическую керамику, что связано с ее высокими электрофизическими характеристиками.

Одной из основных задач повышения надёжности работы электрофизического оборудования и уменьшения его габаритов является оптимизация изоляторов. Наиболее эффективное использование изоляции достигается в конструкциях с однородной напряженностью электрического поля. В большинстве узлов электротехнических устройств изоляция работает в неравномерных электрических полях, где ее отдельные участки несут повышенную электрическую нагрузку. Это может привести к быстрому разрушению таких участков и изолятора в целом. Снижения напряженности поля можно добиться изменением ёмкости или активной проводимости её отдельных участков. К способам снижения напряженности поля относят выбор формы электродов и диэлектрика, применение внешних и внутренних экранов, применение конденсаторных обкладок, нанесение покрытий на электроды, применение барьеров, градирование изоляции, нанесение полупроводящих покрытий, использование активных делителей напряжения. Одним из наиболее простых способов выравнивания электрического поля является нанесение полупроводящих покрытий.

В качестве перспективного способа снижения поверхностного сопротивления рассматривается ионно-термическая модификация (облучение поверхности диэлектрика ускоренными ионами и последующая термообработка), т.к. обеспечивает высокую адгезию полупроводящего слоя к подложке, исключает необходимость согласования коэффициентов теплового расширения покрытия и основы, что повышает тепловую устойчивость конструкции, даёт возможность создания на изделии тонких полупроводящих покрытий однородных по всей поверхности диэлектрика. Резистивные свойства модифицированного слоя определяются параметрами облучения и термообработки и могут варьироваться в пределах 10^{15} - 10^3 Ом.

Таким образом, создание в приповерхностной области диэлектрика полупроводящего слоя с заданными электрофизическими характеристиками представляется перспективным с точки зрения повышения надёжности работы высоковольтных конструкций и снижения их массогабаритных характеристик.

До настоящего времени в литературе отсутствуют какие-либо данные по влиянию модифицированного слоя на напряжение перекрытия изоляционного промежутка, поэтому исследование в данной области представляет научный и практический интерес.

Цель работы – установить влияние электропроводности полупроводящего покрытия, сформированного в приповерхностном слое изделия ионно-термическим воздействием, на разрядные характеристики электрической изоляции, разработать рекомендаций по управлению напряжением перекрытия изоляционного промежутка.

Для достижения этой цели в работе поставлены следующие задачи:

1. Анализ факторов, влияющих на напряжение перекрытия изоляционного промежутка и способов повышения электрической прочности изоляционных конструкций.

2. Определение режимных параметров облучения и термообработки, позволяющих получить на поверхности диэлектрика термостабильный полупроводящий слой с заданными электрофизическими свойствами.

3. Разработка математических моделей для определения влияния поверхностного сопротивления на распределение электрического поля в изоляционном промежутке.

4. Экспериментальное исследование разрядных характеристик неорганических диэлектриков с полупроводящим покрытием.

Объекты и методы исследования. Поставленные в работе задачи решались экспериментальными и аналитическими методами. Исследования электрофизических и разрядных характеристик выполнены в соответствии с ГОСТ на разработанных в НИИ ВН при ТПУ высокотемпературных стендах «Пирон-1» и «Пирон-2», позволяющих проводить исследования в диапазоне температур от комнатной до 2500 К. В области теории электромагнитных полей использовался метод эквивалентных электрических схем замещения, программные пакеты Maple, MathCAD. Для численного расчета электрического поля использовался метод конечных элементов реализуемый в пакете Comsol Multiphysics. Объектом исследования в данной работе является неорганическая керамика на основе оксидов и нитридов.

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, подтверждается качественным согласием теоретических и экспериментальных результатов. Результаты, полученные при расчете математической модели, не противоречат ранее известным моделям основанных на схеме замещения изоляционной конструкции в декартовой системе координат, что также подтверждает адекватность нашей модели и достоверность полученных результатов.

Научная новизна и основные положения, выносимые на защиту:

1. Впервые экспериментально исследованы разрядные характеристики керамики с полупроводящим слоем, созданным ионно-термическим воздействием. Установлено, что изменение величины удельного поверхностного сопротивления в пределах 10^{12} - 10^{17} Ом не влияет на напряжение перекрытия, а покрытие с поверхностным сопротивлением 10^8 - 10^{12} Ом способствует его увеличению на 30-40%.

2. Разработаны математические модели, позволяющие оценить оптимальное значение поверхностного сопротивления изоляционной конструкции с целью увеличения напряжения перекрытия.

3. На основании результатов моделирования предложен способ регулирования электрического поля путем нанесения на поверхность диэлектрика материалов с высокой диэлектрической проницаемостью.

Практическая значимость работы:

1. Показана возможность создания в приповерхностной области диэлектрика термостабильного полупроводящего слоя устойчивого к окислению на воздухе до 750 К.

2. Установлено, что снижение поверхностного сопротивления вакуумной изоляции снижает напряжение перекрытия изоляционной конструкции.

3. Показано, что в полупроводящем слое с сопротивлением ниже 10^7 - 10^8 Ом, образующиеся включения новой фазы усиливают напряженность электрического поля, снижая разрядное напряжение вдоль границы раздела твердого диэлектрика и окружающей среды.

4. Результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы при создании различных высоковольтных устройств и электрофизической аппаратуры, в которых электрическая прочность изоляционного промежутка определяется разрядным напряжением по поверхности твердого диэлектрика.

Апробация работы

Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались и на Международной научно – практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техники и технологии» (г. Томск, 2007– 2009 гг.), XXXVIII Международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (г. Москва, 2008 г.), 9th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows (Russia, Tomsk, 2008 г.), Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука, технологии, инновации» (г. Новосибирск, 2008 г.), 8-ой Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом» (г. Минск, 2009 г.), IV Всероссийской конференции молодых ученых «Материаловедение, технологии и экология в III-м тысячелетии» (г. Томск, 2009 г.), XIX Международном совещании «Радиационная физика твёрдого тела» (г. Севастополь, 2009 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования» (г. Томск, 2010 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 12 печатных работ, 2 из них в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников из 149 наименований и 3 приложений. Работа изложена на 159 страницах машинописного текста, включая 65 рисунков и 7 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований, отражены научная новизна и практическая значимость, дано краткое описание работы.

В первой главе проведен литературный обзор работ, посвященных анализу влияния различных факторов на разряд по поверхности диэлектриков, повышению рабочей напряженности изоляционных конструкций. Представлены основные методы регулирования электрических полей, целью которых является повышение разрядных напряжений вдоль поверхности твердой изоляции.

Анализ литературных данных показал, что одним из главных факторов, снижающих напряжение перекрытия твердых диэлектриков, является резко неравномерное распределение электрического поля вдоль его поверхности. Правильно выбрав величину поверхностного сопротивления, можно добиться практически равномерного распределения напряжения по поверхности изоляции и повысить напряжение перекрытия.

На основании литературных данных об опытной эксплуатации изоляционных изделий с полупроводящим покрытием выделены основные достоинства и недостатки омического регулирования электрического поля, основанного на нанесении на поверхность изоляционных изделий полупроводящих глазурей. Обозначен альтернативный способ изменения поверхностной проводимости изоляционных материалов.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальной техники, предназначенной для ионно-термической обработки материалов с целью снижения поверхностного сопротивления диэлектриков, а также оборудованию, предназначенному для исследования разрядных характеристик и диэлектрических свойств изоляционных материалов при высоких температурах. Обоснован выбор режима ионно-термической модификации. Рассмотрена методика проведения измерений электрофизических свойств исследуемых образцов.

Модификация поверхностных свойств проводилась частотно-импульсным плазменно-дуговым ускорителем «ДИАНА», разработанным в НИИ ВН при ТПУ, позволяющим получать широкоапертурные пучки ионов различных металлов и сплавов. Принцип работы источника основан на формировании плазмы из материала катода импульсным дуговым разрядом в вакууме при подаче напряжения ~ 3 кВ, с предварительным разрядом ~ 5 кВ длительностью ~ 1 мкс между катодом и поджигающим электродом, и последующим извлечением и ускорением ионов. Источниками напряжения в данной системе служат импульсные трансформаторы.

Параметры ускорителя «ДИАНА» при ионной имплантации следующие:

- длительность импульса ~ 250 мкс;
- частота следования импульсов 50 Гц;
- ток вакуумной дуги $\sim 20-40$ А;
- плотность ионного тока в импульсе (в зависимости от вида ионов) $j=10^{-3}-10^{-2}$ А/см²;
- ускоряющее напряжение ~ 100 кВ.

Такие параметры источника позволяют набрать дозу облучения образца площадью ~ 300 см² за время 10-20 мин, что вполне удовлетворяет требованиям

современной технологии, так как соизмеримо со временем получения вакуума, необходимого для работы источника, после замены образца. Кроме того, формирование плазменного и ионного потоков из одного источника позволяет реализовать режим статического (с разовым напылением тонкой пленки на подложку перед ионной имплантацией) и динамического (совмещение режима осаждения атомов с ионной бомбардировкой) перемешивания и тем самым снять ограничение на максимальную концентрацию имплантируемого элемента. Реализация данных режимов возможна исходя из условий длительности импульсов, т.е. когда $\tau_{\text{дуги}} > \tau_{\text{Уиск}}$. При $\tau_{\text{Уиск}} = 0$ осуществляется осаждение покрытий из плазмы.

Исследования электрофизических и разрядных характеристик в данной работе выполнены на разработанных в НИИ ВН при ТПУ высокотемпературных стендах «Пирон-1» и «Пирон-2», включающих в себя газо-вакуумную систему, печь сопротивления и комплекс измерительной и контролирующей аппаратуры. Конструктивная особенность данных стендов заключается в применении в них высокотемпературных материалов.

Для измерения низковольтных электрофизических свойств в работе применен эквипотенциальный ввод, ток утечки которого не превышал 1-5% от величины измеряемого тока. При высоковольтных исследованиях применялся высоковольтный коаксиальный ввод, предназначенный для подачи напряжения к испытуемым образцам. Изоляция данного ввода обеспечивает высокую надежность и позволяет проводить исследования на постоянном напряжении до 50 кВ.

В данной работе за основу измерений диэлектрических свойств принят ГОСТ Р 50499-93. Все измерения были выполнены на плоских образцах.

В третьей главе приведены результаты исследований электрофизических свойств поверхности диэлектриков после ионно-термической модификации. Результаты этих исследований показали, что облучение неорганических диэлектриков ускоренными ионами, как в отдельности, так и совместно с атомным осаждением (режим ионного перемешивания), в значительной степени воздействует на приповерхностные слои материала, снижая удельное поверхностное сопротивление диэлектриков (до 12 порядков величины). Объемные свойства при этом сохраняются.

Изменение поверхностных свойств обусловлено образованием новых проводящих и/или полупроводящих фаз в приповерхностном слое диэлектрика, созданием вакансионных и более сложных дефектов, формированием комплексов на их основе, а также с участием имплантированных элементов и измельчением размеров кристаллитов основной фазы вплоть до полной аморфизации поверхностного слоя в зоне столкновений. Высокая концентрация наведенных дефектов, структурные и фазовые изменения искажают электронную структуру запрещенной зоны модифицированного слоя. Это отражается на электрофизических, оптических и механических свойствах поверхности.

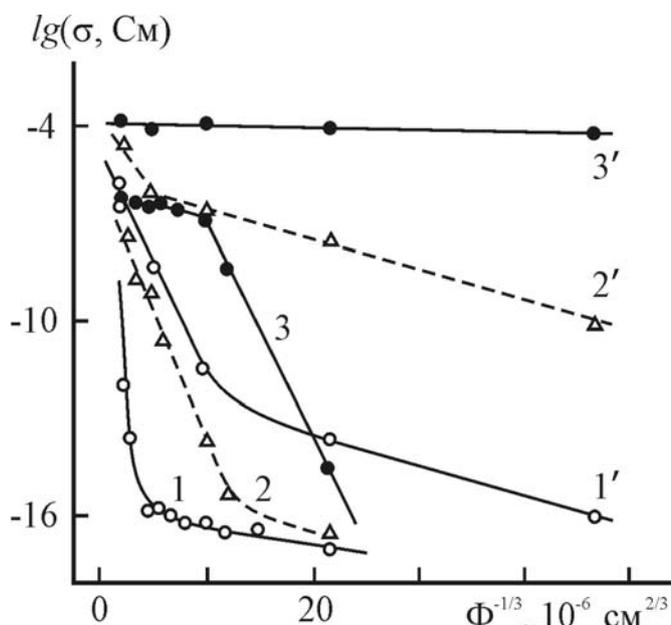


Рис. 1. Зависимость электропроводности нитрида бора при 300 К от флюенса ионов углерода после имплантации (1-3) и в режиме ионного перемешивания (1'-3'); 1,1' – без постимплантационной термообработки; после термообработки при $T=870$ К (2,2') и 1270 К (3,3').

дальнейшему снижению поверхностного сопротивления (рис. 1).

Свойства модифицированной поверхности определяются параметрами облучения и термообработки (энергия имплантируемых ионов, флюенс, химическое взаимодействие с атомами материала, масса как легирующих атомов, так и атомов подложки, температура и среда отжига). Наиболее эффективной с точки зрения снижения поверхностного сопротивления является имплантация легких элементов и элементов, способных встраиваться в кристаллическую решетку подложки с образованием проводящих и/или полупроводящих твердых растворов.

Увеличение флюенса легирующих ионов способствует получению модифицированного слоя с более высокой концентрацией внедренной примеси, которая в свою очередь имеет тесную взаимосвязь с изменением электрофизических свойств поверхности. Исследования модификации нитрида бора ионами углерода при различных флюенсах представлены на рис. 1. Увеличение флюенса ионов приводит к более значительному снижению удельного поверхностного сопротивления, способствует расширению интервала оптимальной постимплантационной термообработки, а полупроводящий слой при этом имеет меньший температурный коэффициент сопротивления и более термостабилен (таблица 1). В режиме ионного перемешивания влияние флюенса на электропроводность модифицируемого слоя сказывается слабее, чем при обычной имплантации (рис. 1), т.к. в этом режиме происходит дополнительный набор дозы за счет внедрения атомов отдачи.

Для закрепления достигнутых в процессе ионной имплантации свойств необходим дополнительный постимплантационный термический отжиг, который способствует активации легирующих частиц, их внедрению в кристаллическую решетку. Для того чтобы исключить электронный обмен поверхности с активными реагентами газовой фазы, вызывающий восстановление свойств за счет электронно-ионных реакций между дефектами, отжиг образцов после облучения необходимо осуществлять либо в вакууме, либо в нейтральной среде. Последующая термообработка не только повышает стабильность резистивных свойств, достигнутых после облучения ускоренными ионами, но и способствует

Оптимальные температуры отжига имплантированного VN и его резистивные свойства

Вид ионов	Флюенс $\times 10^{-15}$, см ⁻²	Интервал термообработки, К	Свойства		
			ρ_s (Ом) при 300 К	ТК $\rho_s \times 10^3$, град ⁻¹	Температурный интервал ТК ρ_s , К
Li	1	1050 - 1200	$(2-22) \times 10^6$	- 1,7	300 - 850
	50	1050 - 1500	$(3-10) \times 10^4$	- 0,62	300 - 1200
C	1	1000 - 1500	$(2-16) \times 10^6$	- 0,97	300 - 1100
	50	1000 - 1600	$(2-9) \times 10^4$	- 0,37	300 - 1200
Al	1	1070 - 1450	$(3-28) \times 10^6$	- 1,6	300 - 950
	50	1070 - 1550	$(2,5) \times 10^6$	- 1,3	300 - 1000

Накопление примеси в подложке ограничивается одновременным с имплантацией процессом распыления поверхности материала и удалением уже введенной примеси. Увеличение флюенса приводит к трансформации профиля распределения примеси, вследствие динамики накопления легирующих атомов с учетом распыления, и при достижении им критического значения, определяемого характеристиками модифицируемого материала, между внедрением и распылением устанавливается равновесие, что вызывает насыщение концентрации имплантированной примеси. Увеличение концентрации внедренной примеси достигается в режиме ионного перемешивания, когда перед облучением на поверхность образца наносят тонкую пленку (статическое перемешивание) либо совмещают режим осаждения атомов с ионной бомбардировкой поверхности (динамическое перемешивание). Варьируя параметрами облучения и осаждения можно управлять физико-химическим составом поверхности.

Таким образом, процесс ионного перемешивания позволяет преодолеть термодинамическое ограничение на смешивание. При имплантации процесс распыления не позволяет достичь этого. В результате можно создать слой с любой концентрацией примеси, любым физико-химическим составом (напыление на подложку атомов, не совпадающих по составу с ионным потоком, осаждение многокомпонентных составов, а также нанесение многослойной пленки с заданными геометрическими параметрами и последующая ионная бомбардировка) и с совершенно новыми уникальными свойствами.

Анализ полученных результатов показал, что ионно-термическая модификация способствует переходу поверхностного слоя диэлектриков в полупроводящее состояние. Резистивные свойства модифицированного слоя определяются параметрами облучения и последующей термообработки и могут варьироваться в пределах 10^{15} - 10^3 Ом. Наибольшее увеличение проводимости достигается при модификации в режиме ионного перемешивания. Вследствие высокой концентрации имплантированной примеси, модифицированный слой более термостабилен, имеет низкий температурный коэффициент

сопротивления ($10^{-3}-10^{-4}$ град $^{-1}$) и обладает устойчивостью к окислению на воздухе до 750 К.

Четвертая глава посвящена математическому моделированию исследуемой изоляционной конструкции с целью определения величины сопротивления полупроводящего слоя, способствующего выравниванию электрического поля вдоль поверхности твердого диэлектрика.

При моделировании сделаны следующие допущения:

- приложенное к диэлектрику напряжение имеет синусоидальную форму;
- отсутствие микроострий на электродах;
- отсутствие зазора между электродами и поверхностью диэлектрика;
- объемные и поверхностные свойства диэлектрика не зависят от пространственных координат, напряженности электрического поля, температуры и других факторов.

При теоретическом рассмотрении задачи повышения напряжения перекрытия можно опираться на предложенный Мантровым М.И. аналитический метод расчета электрических полей, основанный на математическом анализе эквивалентной схемы замещения соответствующей изоляционной конструкции.

Изоляционную конструкцию (рис. 2) можно представить схемой замещения с распределенными параметрами (рис. 3).

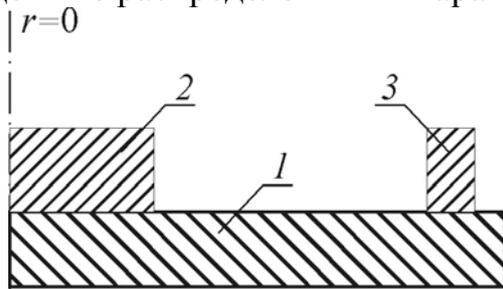


Рис. 2. Схема расположения электродов на образце: 1 – диэлектрик, 2 и 3 – высоковольтный и заземленный электроды соответственно.

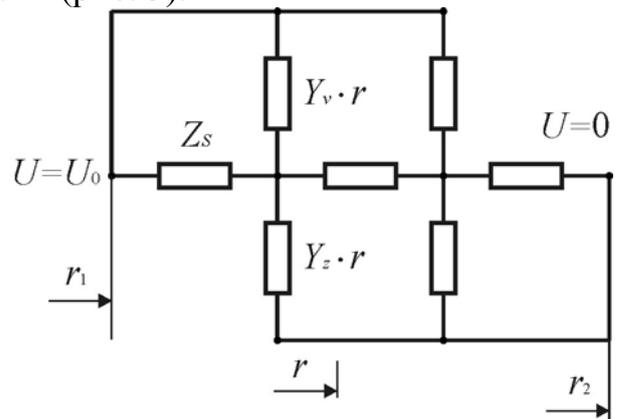


Рис. 3. Схема замещения исследуемой изоляционной конструкции.

Для данной схемы замещения, вводя символический метод обозначения комплексных величин, получим следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{d\dot{U}_s}{dr} &= \dot{I}_s \cdot Z_s \\ -\frac{d\dot{I}_s}{dr} &= Y_z \cdot r \cdot \dot{U}_s - Y_v \cdot r \cdot (\dot{U}_0 - \dot{U}_s) \end{aligned} \right\} (1)$$

где \dot{I}_s – ток вдоль поверхности изоляции; \dot{U}_s – напряжение на поверхности диэлектрика; \dot{U}_0 – напряжение на потенциальном электроде; r – радиус; Z_s – поверхностное сопротивление диэлектрика, отнесенное к элементарному

$$\text{радиусу; } Y_z \cdot r = \frac{2 \cdot \pi \cdot k_1 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_1 \cdot \omega \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{r_2 - r_1 \cdot \left(1 + \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)\right)} \cdot r, \quad Y_v \cdot r = \frac{2 \cdot \pi \cdot k_2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_1 \cdot \omega \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{r_1 + r_2 \cdot \left(\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) - 1\right)} \cdot r -$$

проводимости элементарного радиуса поверхности диэлектрика относительно заземленного и потенциального электродов, соответственно; $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-14}$ Ф/см – электрическая постоянная; ε_1 – относительная диэлектрическая проницаемость окружающей среды; ω – угловая частота; k_1 и k_2 – коэффициенты, характеризующие распределение поля относительно земли и потенциального электродов и зависящие от электрических свойств диэлектрика и окружающей его среды; r_1 – радиус потенциального электрода; r_2 – внутренний радиус заземленного электрода.

Решая систему уравнений (1) путем взаимной подстановки и считая Z_s переменной величиной зависящей от r , получим дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\frac{dU_s^2}{dr^2} = \left(Y_z \cdot r \cdot \dot{U}_s - Y_v \cdot r \cdot (\dot{U}_0 - \dot{U}_s) \right) \cdot Z_s + \frac{d\dot{U}_s}{dr} \cdot \frac{1}{Z_s} \cdot \frac{dZ_s}{dr} \quad (2)$$

Решением данного уравнения относительно распределения напряжения вдоль поверхности диэлектрика является зависимость, определяемая функциями Бесселя 1-го и 2-го рода. Такое решение не удобно с точки зрения аналитического исследования. Для более наглядного представления о влиянии различных факторов на распределение электрического поля вдоль поверхности уравнение (2) можно решить относительно Z_s . Полагая что электрическое поле распределено равномерно вдоль поверхности диэлектрика и определяется только неоднородностью обусловленной системой электродов (т.е. когда

$$\dot{U}_s = \frac{\dot{U}_0}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r}\right), \quad \frac{d\dot{U}_s}{dr} = -E = -\frac{\dot{U}_0}{r \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}, \quad \frac{dU_s^2}{dr^2} = \frac{\dot{U}_0}{r^2 \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}, \quad \text{найдем}$$

зависимость поверхностного сопротивления от r :

$$\frac{1}{Z_s} = \left(-\frac{1}{2} \cdot Y_z \cdot r^2 \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r}\right) - \frac{1}{4} \cdot Y_z \cdot r^2 + \frac{1}{2} \cdot Y_v \cdot r^2 \cdot \ln\left(\frac{r}{r_1}\right) - \frac{1}{4} \cdot Y_v \cdot r^2 - C \right) \cdot r \quad (3)$$

где C – постоянная интегрирования.

В системе электродов рис. 2 сопротивление поверхностного слоя Z_s , отнесенное к элементарному радиусу, связано с удельным поверхностным сопротивлением $Z_{sy\partial}$ соотношением:

$$Z_s = Z_{sy\partial} \cdot \frac{1}{r \cdot 2 \cdot \pi} \quad (4)$$

С учетом (4) зависимость (3) преобразуется к виду:

$$Y_{sy\delta} = -\frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot Y_Z \cdot r^2 \cdot \left[\ln\left(\frac{r_2}{r}\right) + \frac{1}{2} \right] + \frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot Y_V \cdot r^2 \cdot \left[\ln\left(\frac{r}{r_1}\right) - \frac{1}{2} \right] - C \quad (5)$$

где $Y_{sy\delta} = 1/Z_{sy\delta}$ – удельная поверхностная проводимость диэлектрика.

Проводимость $Y_{sy\delta}(r)$ изменяется по кривой с минимумом. Приравнявая производную $dY_{sy\delta}/dr$ нулю, находим r , при котором $Y_{sy\delta}$ минимальна. Подставляя его в (5), находим постоянную интегрирования, полагая $Y_{sy\delta} = Y_{min}$ (Y_{min} – минимальная поверхностная проводимость). В итоге будем иметь:

$$Y_{sy\delta} = -\frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot Y_Z \cdot r^2 \cdot \left(\ln\left(\frac{r_2}{r}\right) + \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot Y_V \cdot r^2 \cdot \left(\ln\left(\frac{r}{r_1}\right) - \frac{1}{2} \right) + Y_{min} + \frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot Y_Z \cdot (y \cdot r_1)^2 \cdot \left(\ln\left(\frac{r_2}{(y \cdot r_1)}\right) + \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot Y_V \cdot (y \cdot r_1)^2 \cdot \left(\ln(y) - \frac{1}{2} \right) \quad (6)$$

где $y = e^{\frac{Y_Z \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{Y_Z + Y_V}}$, e – основание натурального логарифма.

Из формулы (6) видно, что при Y_Z и Y_V , стремящихся к нулю (случай идеального диэлектрика), проводимость $Y_{sy\delta}$ равна Y_{min} и не зависит от радиуса r (рис. 4). Следовательно, увеличение неоднородности электрического поля вдоль поверхности изолятора вызвано наличием в реальных диэлектриках объемной проводимости и емкости по отношению к электродам. Это подтверждает исследования других авторов и адекватность разработанного подхода.

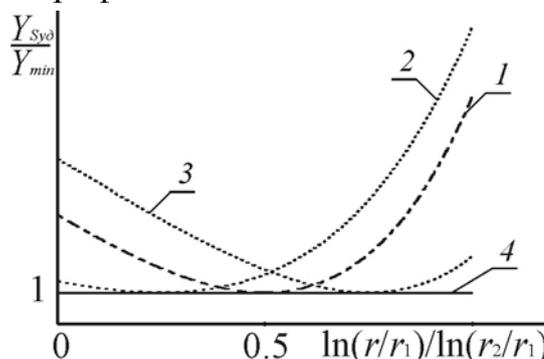


Рис. 4. Распределение удельной проводимости по радиусу при $r_2/r_1=0,5$: 1 – $Y_Z=Y_V$; 2 – $3 \cdot Y_Z=Y_V$; 3 – $Y_Z=3 \cdot Y_V$; 4 – $Y_Z=Y_V=0$.

В зависимости от величин Y_Z и Y_V максимальная проводимость будет либо у заземленного $Y_{sy\delta(r_2)}$, либо у потенциального $Y_{sy\delta(r_1)}$ электродов (рис. 4). Эти проводимости будут больше минимальной в $Y_{sy\delta(r_2)}/Y_{min}$ и $Y_{sy\delta(r_1)}/Y_{min}$ раз, соответственно. Если эти отношения близки к единице, то можно положить, что поверхностная проводимость практически не изменяется от r , а распределение напряжения вдоль поверхности остается равномерным. Данное условие будет выполняться если:

$$Y_{min} \gg -\frac{1}{8 \cdot \pi} \cdot Y_Z \cdot r_2^2 + \frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot Y_V \cdot r_2^2 \cdot \left(\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) - \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot Y_Z \cdot (y \cdot r_1)^2 \cdot \left(\ln\left(\frac{r_2}{(y \cdot r_1)}\right) + \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot Y_V \cdot (y \cdot r_1)^2 \cdot \left(\ln(y) - \frac{1}{2} \right) \quad (7)$$

и

$$Y_{\min} \gg -\frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot Y_Z \cdot r_1^2 \cdot \left(\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{8 \cdot \pi} \cdot Y_V \cdot r_1^2 +$$

$$\frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot Y_Z \cdot (y \cdot r_1)^2 \cdot \left(\ln\left(\frac{r_2}{(y \cdot r_1)}\right) + \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{4 \cdot \pi} \cdot Y_V \cdot (y \cdot r_1)^2 \cdot \left(\ln(y) - \frac{1}{2} \right) \quad (8)$$

Таким образом, выравнивать электрическое поле в изоляционном промежутке можно не только распределением проводимости по определенному закону в зависимости от электрофизических свойств и геометрических параметров конструкции (более предпочтительный способ, так как снижаются активные утечки и, следовательно, нагрев поверхности), но и увеличением проводимости всей поверхности диэлектрика (является наиболее простым способом).

При достаточно высоком удельном поверхностном сопротивлении ($\rho_s > 10^{12}$ Ом), в полной поверхностной проводимости необходимо учитывать емкостную составляющую, т.е. $Y_{sy\delta} = \sigma_s + j\omega C_s$, где $\sigma_s = 1/\rho_s$ – активная составляющая поверхностной проводимости, $C_s = k \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_T$ – поверхностная емкость (эквивалентная взаимная удельная емкость соседних единиц поверхности относительно друг друга), ϵ_T – диэлектрическая проницаемость твердого диэлектрика, k – коэффициент, зависящий от диэлектрических свойств изоляции и окружающей ее среды.

Сопоставление полученных результатов моделирования с ранее известными (результаты моделей, основанных на схеме замещения изоляционной конструкции в декартовой системе координат) подтверждает адекватность разработанного подхода.

С целью определения оптимального значения сопротивления полупроводящего покрытия, обеспечивающего увеличение напряжения перекрытия, был выполнен численный расчет электрического поля в пакете Comsol Multiphysics. Данный пакет имеет простой и удобный интерфейс пользователя и предназначен для моделирования и расчетов научных и инженерных задач, основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных, методом конечных элементов в одном, двух и трех измерениях.

Расчет произведен для изоляционной конструкции представленной на рис. 2 при $U_{\text{расч}} = 1$ В, $r_1 = 5$ мм, $r_2 = 20$ мм, толщине диэлектрика – 0,2 мм, толщине изоляционного диска под исследуемым образцом – 10 мм. Электрофизические свойства изоляционного материала следующие: относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 4$, удельная объемная проводимость $\rho_v = 10^{15}$ Ом/м. Резистивные свойства поверхности задавались через объемное сопротивление полупроводящего слоя аналогично тонкопленочным резисторам в соответствии с выражением:

$$\rho_s = \rho_v / \delta \quad (9)$$

где ρ_v – удельная объемная проводимость полупроводящего слоя, δ – толщина модифицированного слоя (1 мкм).

Наибольший интерес представляет собой напряженность электрического поля вблизи тройной точки (место соприкосновения твердого диэлектрика,

потенциального электрода и окружающей среды), т.к. именно с нее зарождается и формируется разряд. Расчетная напряженность электрического поля у этой точки в зависимости от поверхностного сопротивления представлена на рис. 5.

Как видно из рис. 5, напряженность электрического поля остается постоянной при снижении поверхностного сопротивления до величины порядка 10^{12} Ом. Это обусловлено тем, что при высоком поверхностном сопротивлении ($\rho_s > 10^{12}$ Ом), основной вклад в распределение напряжения

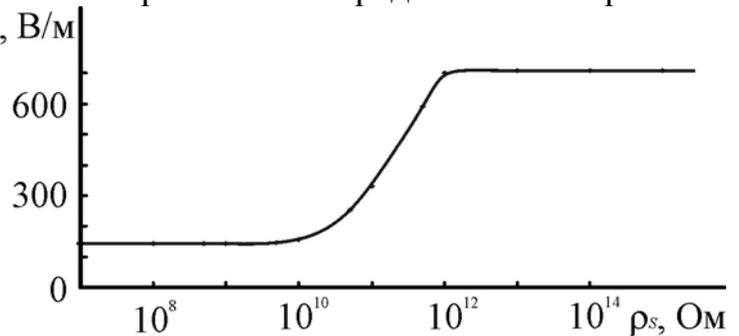


Рис. 5. Зависимость напряженности электрического поля вблизи тройной точки от поверхностного сопротивления твердого диэлектрика.

вдоль поверхности изолятора вносит поверхностная емкость C_s . Снижение сопротивления $\rho_s < 10^{12}$ Ом способствует уменьшению максимальной напряженности и более равномерному распределению напряжения вдоль изоляционного промежутка. Дальнейшее снижение сопротивления ($\rho_s < 5 \cdot 10^9$ Ом) не оказывает влияния на распределение напряжения вдоль поверхности диэлектрика, а максимальная напряженность поля определяется коэффициентом неоднородности данной системы электродов.

Так как основной вклад в распределение напряжения вдоль поверхности изолятора при достаточно высоком значении ρ_s вносит поверхностная емкость C_s , то можно предположить, что ее изменение также будет способствовать перераспределению напряжения вдоль поверхности. Результаты этих исследований представлены на рис. 6.

Видно, что увеличение диэлектрической проницаемости приповерхностного слоя (увеличение удельной поверхностной емкости) при неизменном сопротивлении ведет к снижению максимальной напряженности электрического поля, т.е. должно способствовать повышению напряжения перекрытия.

Повышение разрядного напряжения вдоль границы раздела твердого диэлектрика и окружающей среды в данном случае происходит за счет уменьшения рассеяния силовых линий электрического поля и сгущения их в приповерхностной области изолятора. Таким образом, нанесение на поверхность диэлектрика слоя материала, обладающего высокой ϵ (например, титанат бария BaTiO_3 или другие сегнетоэлектрики), должно повысить напряжение

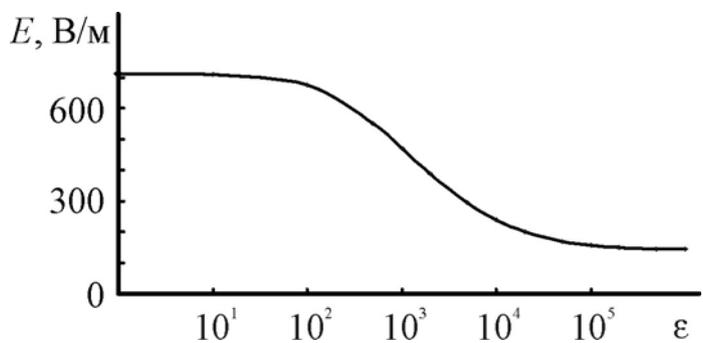


Рис. 6. Зависимость напряженности электрического поля вблизи тройной точки от относительной диэлектрической проницаемости приповерхностного слоя диэлектрика толщиной 1 мкм.

перекрытия. Такой приповерхностный слой может быть создан ионно-термической модификацией в режиме перемешивания.

Таким образом, расчеты показали, что управлять распределением электрического поля в изоляционном промежутке можно варьированием поверхностных свойств диэлектрика (т.е. удельной проводимостью и поверхностной емкостью). Оптимальное значение сопротивления полупроводящего покрытия, обеспечивающее увеличение напряжения перекрытия, составляет $\approx 5 \cdot 10^9$ Ом.

Пятая глава посвящена экспериментальному исследованию разрядных характеристик неорганических диэлектриков с полупроводящим покрытием, сформированным в приповерхностном слое изделия ионно-термическим воздействием.

Исследования проводились на пластинчатых образцах толщиной 0,2 мм в электрическом поле с преобладанием тангенциальной составляющей в коаксиальной системе электродов, представленной на рис. 2, при переменном напряжении частотой 50 Гц с использованием металлических накладных электродов. Диаметр потенциального электрода составлял 10 мм, внутренний диаметр заземленного электрода – 40 мм. Повышение качества узла сочленения диэлектрика с накладными электродами обеспечивалось предварительным нанесением на образец методом магнетронного напыления контактного электродного слоя из титана. Действующее значение напряжения, при котором происходило перекрытие, фиксировалось прибором АИМ-90.

На рис. 7 представлена зависимость напряжения перекрытия модифицированных образцов от величины поверхностного сопротивления.

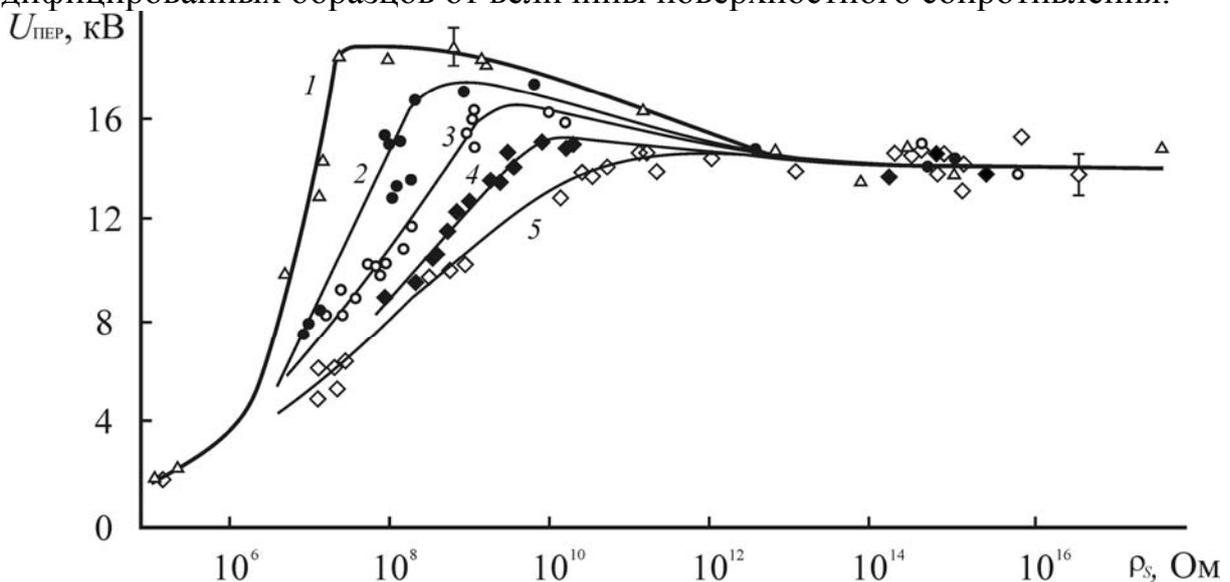


Рис. 7. Напряжение перекрытия керамики из BN с полупроводящим покрытием: цифры у кривых – последовательность экспериментов по перекрытию.

Из приведенной зависимости видно, что изменение величины удельного поверхностного сопротивления в пределах 10^{12} – 10^{17} Ом не влияет на разрядное напряжение изолятора, что хорошо согласуется с расчетными результатами и подтверждает адекватность модели. В интервале сопротивлений $\rho_s = 10^9$ – 10^{12} Ом

наблюдается возрастание напряжения перекрытия на 30-40 % вследствие выравнивания электрического поля.

Снижение ρ_s от 10^9 до $5 \cdot 10^7$ Ом (рис. 7) не оказывает заметного влияния на разрядные характеристики, а напряжение перекрытия, по-видимому, определяется коэффициентом неоднородности поля, обусловленным данной системой электродов.

Качественно, эта зависимость вполне удовлетворительно согласуется с расчетной зависимостью максимальной напряженности электрического поля от величины ρ_s (рис. 5). Однако, напряженность электрического поля снижается более значительно, чем возрастает напряжение перекрытия, что может быть обусловлено наличием в реальных изоляционных конструкциях микронеоднородностей, которые создают локальное усиление поля, облегчая условия зарождения разряда и снижая тем самым напряжение перекрытия.

Снижение напряжения перекрытия при поверхностном сопротивлении ниже $5 \cdot 10^7$ Ом (рис. 7) обусловлено увеличением тока утечки через полупроводящий слой и повышением температуры покрытия, а также усилением электрического поля на проводящих включениях разного размера и формы, которые образуются в модифицированном слое при $\Phi > 10^{15}$ см⁻². Разряд при этом в ряде случаев развивается не с электродов, а с полупроводящего слоя.

Каждое последующее перекрытие изоляционного промежутка происходит при меньшем напряжении (рис. 8), что связано с нагревом диэлектрика поверхностными токами утечки. Сопротивление полупроводящего слоя при нагреве снижается (т.к. характеризуется отрицательным температурным коэффициентом 10^{-3} - 10^{-4} град⁻¹). Это должно способствовать более равномерному распределению напряженности и, как следствие этого, увеличению напряжения перекрытия. Однако большую роль в данном случае играет зависимость пробивного напряжения газов от давления и относительной плотности, которая описывается законом подобия разрядов, причем при повышении температуры напряжение перекрытия снижается более значительно, чем напряжение пробоя чисто воздушного промежутка.

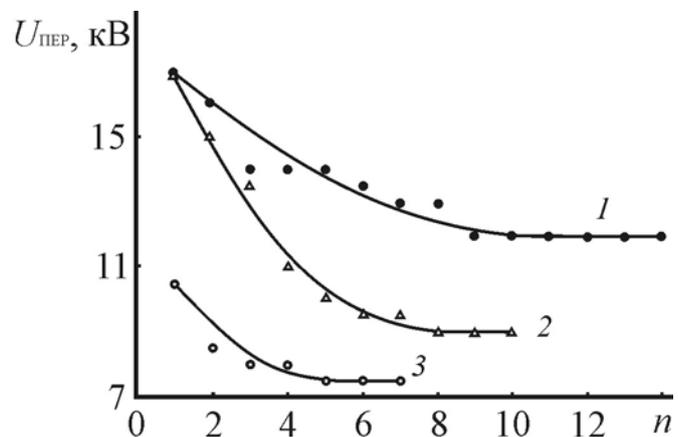


Рис. 8. Зависимость напряжения перекрытия керамики из BN с полупроводящим покрытием от количества последовательных пробоев n (временной интервал между пробоями составлял ~ 20 сек): 1 – $\rho_s = 13 \cdot 10^7$ Ом; 2 – $\rho_s = 7,8 \cdot 10^7$ Ом; 3 – $\rho_s = 1,44 \cdot 10^7$ Ом.

С практической точки зрения для проектирования высоковольтных электрофизических установок необходимо знание электрической прочности применяемой изоляции в различных условиях ее работы. Важно знать, как

зависит напряжение перекрытия от давления газа. Результаты этих исследований представлены на рис. 9.

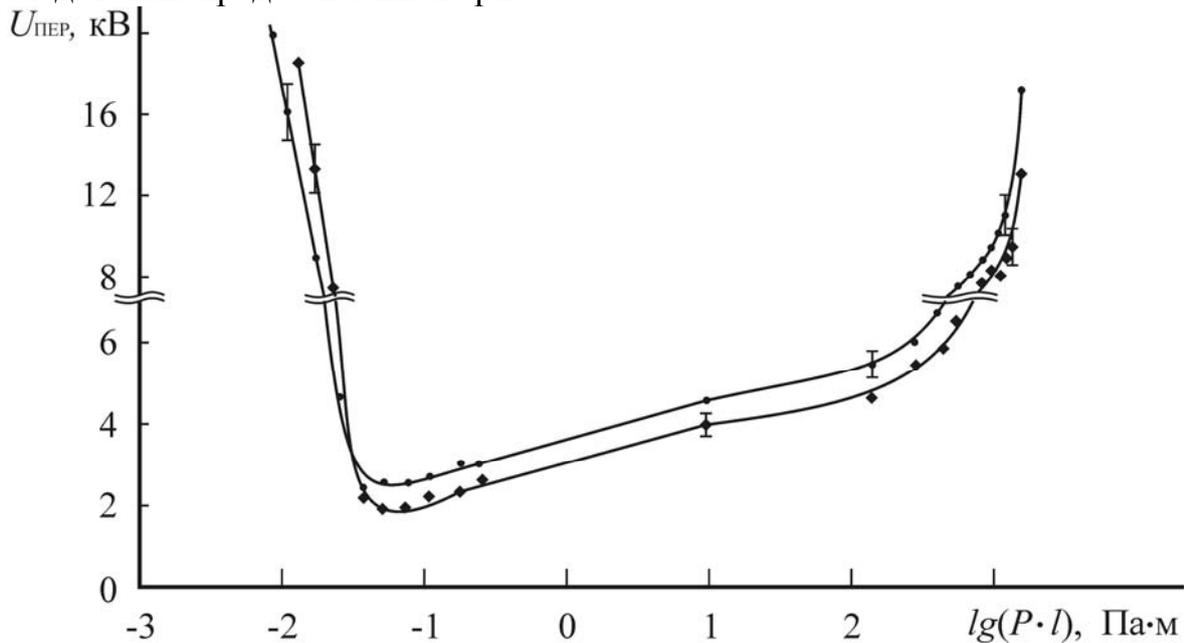


Рис. 9. Зависимость напряжения перекрытия нитрида бора от произведения давления P на длину межэлектродного промежутка l : \blacklozenge – при отсутствии полупроводящего слоя; \bullet – полупроводящий слой с сопротивлением $\rho_s = 3,3 \cdot 10^8$ Ом.

Видно, что зависимость напряжения перекрытия от произведения давления P на межэлектродное расстояние l имеет U-образный вид, характерный для обобщенного закона Пашена $U_{\text{пер}} = f(P \cdot l / T)$, с минимумом при давлении 1-5 Па. Следует отметить, что при давлении выше 5-10 Па напряжение перекрытия образцов с повышенной поверхностной проводимостью выше, чем образцов с высоким удельным поверхностным сопротивлением, что связано с выравниванием электрического поля вдоль изоляционного промежутка.

Повышение напряжения перекрытия в диапазоне давлений ниже 5 Па связано с влиянием лавинно-ионизационных процессов в остаточном газе. В этом диапазоне давлений напряжение перекрытия образцов с низким поверхностным сопротивлением становится меньше разрядного напряжения не модифицированной керамики (рис. 9). Это, по-видимому, связано с тем, что поверхностный разряд в вакууме развивается в слое десорбированного газа и повышение температуры диэлектрика вследствие выделения тепла при поверхностных и объемных токах утечки ведет к его нагреву, что снижает разрядное напряжение изоляционного промежутка. Причем, чем ниже поверхностное сопротивление, тем выше температура диэлектрика и соответственно ниже напряжение перекрытия. Это означает, что выравнивание электрического поля путем увеличения поверхностной проводимости диэлектрика вакуумной изоляции приведет только к снижению напряжения перекрытия. Подтверждением вышесказанного могут служить данные, приведенные Сливковым И.Н. и др., об электрическом пробое и разряде в вакууме. Авторы отмечают, что поверхностное сопротивление диэлектрика

играет существенную роль в определении величины напряжения перекрытия вакуумного промежутка и его увеличение способствует повышению напряжения перекрытия.

Таким образом, экспериментально показано, что поверхностное сопротивление диэлектрика значительно влияет на распределение электрического поля в межэлектродном промежутке, а его изменение является эффективным способом повышения разрядных характеристик изоляторов. Управлять напряжением перекрытия изоляционного промежутка можно изменением ρ_s и ε приповерхностного слоя диэлектрика. Оптимальный диапазон варьирования удельного поверхностного сопротивления составляет 10^8 - 10^{12} Ом. Снизить напряжение перекрытия изоляционного промежутка можно созданием в приповерхностной области диэлектрика полупроводящего слоя с сопротивлением ниже 10^7 - 10^8 Ом. Увеличение поверхностной проводимости вакуумной изоляции снижает величину разрядного напряжения вдоль границы раздела диэлектрических сред.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования модификации поверхности неорганических диэлектриков показывают, что ионная имплантация значительно меняет структуру и свойства приповерхностного слоя, вплоть до перевода его в полупроводящее состояние. Резистивные свойства модифицированного слоя определяются параметрами облучения и последующей термообработки и могут варьироваться в пределах 10^{15} - 10^3 Ом. Наибольшие изменения свойств поверхности достигаются при облучении флюенсом 10^{16} - 10^{17} см⁻² (ограничено процессом распыления подложки) и в режиме ионного перемешивания. Полупроводящий слой, созданный в режиме перемешивания, обладает меньшим ρ_s , высокой термостабильностью, низким температурным коэффициентом сопротивления (10^{-3} - 10^{-4} град⁻¹) и устойчив к окислению на воздухе до 750 К.

2. Экспериментально исследовано влияние величины удельного сопротивления полупроводящего слоя, сформированного ионно-термической модификацией, на напряжение перекрытия изоляционного промежутка. Показано, что его изменение значительно влияет на разрядное напряжение вдоль поверхности твердого диэлектрика.

3. Экспериментально установлено, что вследствие “шунтирования” поверхностного сопротивления диэлектриков поверхностной емкостью, его снижение до 10^{12} Ом не оказывает заметного влияния на напряжение перекрытия.

4. В интервале $\rho_s=10^9$ - 10^{12} Ом наблюдается возрастание напряжения перекрытия до 30%, обусловленное выравниванием электрического поля.

5. Разработаны математические модели, которые позволяют установить зависимость между геометрическими параметрами электродов, приложенным напряжением, объемными и поверхностными свойствами твердого диэлектрика, свойствами окружающей его среды и характером распределения напряжения вдоль границы раздела диэлектрических сред. Данные модели не

противоречат ранее известным и вполне удовлетворительно согласуются с экспериментальными результатами.

6. Показано, что выравнять электрическое поле вдоль поверхности изделия можно увеличением удельной проводимости всей поверхности диэлектрика (что является наиболее простым способом) или ее распределением по определенному закону в зависимости от электрофизических свойств и геометрических параметров конструкции. Последний способ более предпочтителен, так как снижаются активные утечки, и, следовательно, резистивный нагрев поверхности и потери.

7. Опираясь на результаты выполненных расчетов, предложен способ регулирования электрического поля вдоль разрядного промежутка варьированием удельной поверхностной емкости. Выравнивание электрического поля в данном случае происходит за счет уменьшения рассеяния силовых линий электрического поля и сгущения их в приповерхностной области изолятора.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Лебедь К.В. Применение полупроводящих покрытий в изоляции высоковольтных электрофизических установок // Труды XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», г. Томск, 26-30 марта 2007 г.: в 3 т. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – Т. 1. – С. 60-62.
2. Лебедь К.В. Изменение поверхностных свойств изоляторов после ионной имплантации // Труды XIV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», г. Томск, 24-28 марта 2008 г.: в 3 т. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – Т. 1. – С. 63-65.
3. Кабышев А.В., Лебедь К.В., Конусов Ф.В. Изменение свойств диэлектриков после модификации в режиме ионного перемешивания // Тезисы докладов XXXVIII международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами / Под ред. проф. А.Ф. Тулинова. – М.: Университетская книга, 2008. – С. 153.
4. Kabyshev A.V., Lebed K.V. Influence of Implantation Process Mode and Reactivity of the Implanted Ions on the Surface Properties of Insulators // Proceedings of 9th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows, Russia, Tomsk, 21-26 September 2008. – Tomsk: Publishing house of the IAO SB RAS, 2008. – P. 356-359.
5. Лебедь К.В. Создание полупроводящих покрытий на неорганических диэлектриках и управление их свойствами // Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», г. Новосибирск, 4-7 декабря 2008 г.: в 7 частях. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – Ч. 2. – С. 83-85.

6. Кабышев А.В., Лебедь К.В. Влияние режима имплантации и вида ионов на поверхностные свойства диэлектриков // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2008. – Т. 51. – №11. – С. 121-125.
7. Лебедь К.В. Электрический и тепловой расчет изоляторов с полупроводящим покрытием, сформированным ионно-термическим воздействием // Труды XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», г. Томск, 4-8 мая 2009 г.: в 3 т. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – Т. 1. – С. 64-65.
8. Лебедь К.В. Влияние ионно-термической модификации неорганических диэлектриков на их разрядные характеристики // Материалы IV Всероссийской конференции молодых ученых «Материаловедение, технологии и экология в III-м тысячелетии», г. Томск, 19-21 октября 2009 г. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2009. – С. 236-240.
9. Kabyshev A.V., Lebed K.V. Properties changes of inorganic dielectrics after ion-thermal modification // Proceedings of 5th International Conference «Interaction of Radiation with Solids », Belarus, Minsk, 23-25 September 2009. – Minsk: Publishing house of the BSU, 2009. – P. 131-133.
10. Кабышев А.В., Лебедь К.В. Изменение свойств неорганических диэлектриков после ионно-термической модификации // Материалы XIX Международного совещания «Радиационная физика твёрдого тела», г. Севастополь, 31 августа - 5 сентября 2009 г. – М.: Изд-во НИИ ПМТ, 2009. – С. 392-398.
11. Кабышев А.В., Лебедь К.В. Повышение электрической прочности изоляционных конструкций // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования», г. Томск, 25-28 мая 2010 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – С. 124-127.
12. Кабышев А.В., Лебедь К.В. Электропроводность и разрядные характеристики диэлектриков после ионно-термической модификации // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2011. – Т. 54. – №1. – С. 314-318.

Личный вклад автора

Автор единолично подготовил пять работ [1, 2, 5, 7, 8]. В работах, опубликованных в соавторстве, вклад автора состоит в следующем: [4, 9, 10] анализ факторов влияющих на электропроводность и стабильность модифицированной поверхности; [3, 6] обоснование преимуществ модификации в режиме перемешивания по сравнению с ионной имплантацией; [11] разработка математической модели, основанной на анализе эквивалентной схемы замещения исследуемой изоляционной конструкции; [12] описание экспериментальных результатов перекрытия модифицированных образцов, теоретический расчет электрических полей методом конечных элементов в программном пакете Comsol Multiphysics.