

На правах рукописи

Еханин Сергей Георгиевич

***Дефектообразование, ударная ионизация и
электрическая прочность микронных слоев
щелочно-галогидных кристаллов***

Специальность: 01.04.07 – физика конденсированного
состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Томск – 2002

Работа выполнена в Томском Государственном университете систем управления и радиоэлектроники.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Л.А. Лисицына,

доктор физико-математических наук, профессор Э.Г. Косцов,

доктор физико-математических наук, профессор В.Ю. Яковлев.

Ведущая организация – Институт физики прочности и материаловедения СО РАН.

Защита состоится 18 июня 2002 г. в 14 часов
на заседании диссертационного Д 212.269.02 при Томском политехническом университете по адресу: 63403, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «_15_» __мая__ 2002 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физико-математических наук

М.В. Коровкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Данная работа посвящена исследованию изменений структуры микронных слоев щелочно-галоидных кристаллов (ЩГК) под действием сильного и сверхсильного электрических полей и влиянию этих изменений на предпробивные процессы и пробой.

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ. Теоретическое и экспериментальное изучение свойств реальных кристаллов убеждает в том, что все кристаллические тела в той или иной степени дефектны. Идеальность их строения нарушается фононами, структурными дефектами (по Шоттки и Френкелю), чужеродными атомами внедрения или замещения, дислокациями, границами блоков и т.д. Именно дефекты кристаллической решетки обуславливают многие свойства твердых тел. Они влияют на пластичность и вязкость, пределы упругости и прочности, тепло- и электропроводность, фотопроводимость, определяют вид спектров поглощения, испускания и многое другое, в том числе и пробой диэлектриков.

В настоящее время существуют различные точки зрения на природу электрического пробоя твердых диэлектриков. Само наличие этого факта говорит о недостаточной определенности и изученности данного процесса. Еще в большей степени это можно утверждать о связи механических и электрических свойств твердых диэлектриков и влиянии процессов дефектообразования в сильных электрических полях на предпробивные явления и пробой. Здесь можно привести цитату из широко известной книги Сканави Г.И. «Физика диэлектриков (область сильных полей)»:

«Известно, что под стадией потери электрической прочности следует понимать такую стадию в процессе пробоя, когда в диэлектрике создается проводящий путь, а в дальнейшем наблюдается резкое усиление ионизационных процессов и увеличение тока даже при понижении напряжения, приложенного к образцу. Вторая стадия пробоя – разрушение диэлектрика при электрической форме пробоя, по-видимому, весьма тесно связана с первой стадией и возникает непосредственно вслед за ней или даже накладывается на нее. Однако, даже в наиболее современных теориях процесс развития пробоя, переход первой стадии во вторую, природа разрушения диэлектрика не рассматриваются».

Приведенная цитата вполне отражает состояние изученности явления пробоя и в настоящее время. Процессы дефектообразования под действием электрических полей перед пробоем, а тем более в первой и второй стадиях электрического пробоя, не исследованы. Такие исследования вследствие быстротечности процесса пробоя являются технически очень сложными. Например, попытки единичных наблюдений образования дислокаций в щелочно-галоидных кристаллах под действием однородного электрического поля (ис-

ходя из литературных данных) всегда сопровождалось разрушением образца в результате электрического пробоя [1].

До недавнего времени считалось, что в толстом слое твердого диэлектрика механизм электрического пробоя – лавинностримерный, в тонких (микронных) слоях – многолавиностримерный. В еще более тонких слоях (субмикронных), в которых процессы ударной ионизации менее интенсивны, – электронно-термический. Вышеуказанные механизмы пробоя, рассматривающие развитие разряда в пространстве и времени, носят качественный характер и могут стать количественными, если в них будут использованы надежные данные об элементарных процессах (ударная ионизация, генерация экситонов и дефектов решетки, эмиссия электронов с катода и др.). Явление ударной ионизации при этом можно считать краеугольным камнем этого направления. Однако имеются теоретические и экспериментальные работы, объясняющие многие предпробивные явления и сам электрический пробой без ее участия, что поставило под сомнение само существование процессов ударной ионизации в щелочно-галлоидных кристаллах и других твердых диэлектриках.

Для дальнейшего же развития современной техники необходима большая определенность в вышеуказанных вопросах. В связи с развитием микроэлектроники резко расширилась область применения диэлектриков. Во многих устройствах, в частности, в конденсаторах, МДП-структурах, полевых транзисторах и др. используются тонкие диэлектрические слои, которые длительное время подвергаются воздействию сильных электрических полей. В этих условиях в диэлектриках наблюдается развитие физических процессов, приводящих к изменению структуры вещества и ухудшению его электроизоляционных свойств.

Таким образом, при изучении электрической прочности твердых диэлектриков, в том числе в теоретических работах по этому направлению, необходимо учитывать изменение структуры материала под действием сильного электрического поля и влияние этого изменения на предпробивные процессы и пробой.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ состоит в определении роли процессов дефектообразования и ударной ионизации в развитии электрического пробоя микронных и субмикронных слоев ЩГК.

Указанная цель достигается решением следующих задач:

1. Определение природы электропроводности в тонких слоях ЩГК в условиях сильных и сверхсильных электрических полей. Изучение электронных токов и процессов ударной ионизации, измерение энергии электронов, ускоряемых в диэлектрике сверхсильным электрическим полем.

2. Изучение процессов дефектообразования в слоях ЩГК в сильных и сверхсильных электрических полях.

3. Изучение взаимного влияния дефектообразования, электропроводности, электронно-оптических процессов и их вклада в развитие электрического пробоя тонких слоев ЩГК.

Решение поставленных задач составляет основу развиваемого в работе научного направления «Кинетика и механизмы дефектообразования в сверхсильных электрических полях и его влияние на предпробивные процессы и пробой ЩГК». Данное направление является существенным вкладом в область физики диэлектриков – область сильных электрических полей.

Работа включалась в координационные планы НИР АН СССР и РФ по проблемам «Люминесценция и развитие ее применений в народном хозяйстве», «Электрический пробой и старение диэлектриков» направления «Физика, подсекция физика твердого тела» на период 1976-2001 гг. Выполнялась в рамках госбюджетных тем № 14/94 «Низкотемпературные исследования ионных и электронных процессов в ЩГК в условиях сильных и сверхсильных электрических полей», № 4/97 «Исследование ионных и электронных процессов в ЩГК в области сильных и сверхсильных электрических полей», 4/00/2 «Исследование предпробивных явлений и кинетики электрического пробоя в тонких слоях ЩГК» в Томском университете систем управления и радиоэлектроники по единому заказ – наряду. Темы согласованы с Главным советом «Физика, подсекция Физика твердого тела» Минобразования РФ.

ОБЪЕКТ И ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ. Объектом исследования являются физические процессы, протекающие в тонких монокристаллических слоях щелочно-галогенидных кристаллов (ЩГК) в сверхсильных электрических полях. Известен так называемый эффект электрического упрочнения с уменьшением толщины диэлектрика. Открытие этого эффекта позволило в тонких (от 1 до 10 мкм) слоях диэлектрика создавать электрические поля, превышающие пробивные для «толстых», и получивших название сверхсильных. Таким образом, **в тонких диэлектрических слоях в сверхсильном электрическом поле стало возможным наблюдать процессы и явления, которые в более толстых слоях ($d > 10$ мкм) практически невозможно наблюдать и исследовать вследствие возникновения пробоя и чрезвычайной его быстротечности**. К этим процессам и явлениям относятся: протекание электронных токов и свечение слоев ЩГК (электролюминесценция), процессы ударной ионизации, эмиссия электронов, ускоренных электрическим полем в слое диэлектрика, в вакуум, генерация точечных и линейных дефектов и др. Все эти процессы и явления могут составлять новую развивающуюся область физики диэлектриков – область сверхсильных электрических полей

[2]. Многие из этих явлений представляют самостоятельный научный и практический интерес и в той или иной степени могут предвещать или сопровождать пробой, а значит являться предметом данного исследования.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА.

Впервые, в микронных слоях ЩГК, до возникновения пробоя, обнаружен эффект интенсивной генерации линейных и точечных дефектов под действием сильного и сверхсильного электрических полей. Проведено изучение механизмов этого явления. Определены свойства областей с модифицированной полем структурой (повышенная электропроводность, деформация спектров поглощения и др.).

Доказано, что электронные токи, ударная ионизация и электролюминесценция в ЩГК протекают локально и только в местах с измененной под действием электрического поля кристаллической структурой. Для таких областей (каналов предпочтительного переноса заряда) впервые были определены некоторые характеристики электронно-дырочных процессов в сверхсильных электрических полях: коэффициент ударной ионизации и его зависимость от напряженности электрического поля, подвижность дырок и энергетический спектр “горячих” электронов, эмиттированных из ЩГК в вакуум. Впервые показано, что при определенных условиях в таких областях диэлектрика можно осуществить разряд, аналогичный низковольтному тлеющему разряду в газах и наблюдать электролюминесценцию.

Показана определяющая роль дефектообразования в развитии предпробивных процессов в диэлектрике. Выделен критерий, напрямую связанный с механической прочностью образца, при выполнении которого непременно разовьется цепь предпробивных процессов и пробой.

НАУЧНАЯ ЦЕННОСТЬ. Сверхсильное электрическое поле является для твердых диэлектриков одним из экстремальных параметров, при реализации которого наблюдается ряд фундаментальных процессов, связанных с изменением структуры твердого тела. Результаты исследований ЩГК в области сверхсильных электрических полей позволяют выйти на новый уровень в понимании механизмов электропроводности, электролюминесценции и электрического пробоя твердых диэлектриков. Вследствие этого, результаты проведенных исследований могут быть использованы при уточнении ранее созданных и разработке новых теорий в области электролюминесценции и пробоя. В частности, данные исследования дополняют физику твердых диэлектриков – область сильных электрических полей и существенно развивают новую область физики твердых диэлектриков – область сверхсильных электрических полей [2].

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ. Результаты данного исследования могут лечь в основу прикладных методов прогнозирования срока службы и повышения стойкости материалов к процессам электрического старения и пробоя при комплексном воздействии различных факторов, а также методов управления процессами, определяющими электронно-оптические свойства и электрическую прочность твердых диэлектриков.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, выносимые на защиту:

1. **Сильное электрическое поле с напряженностью $E \sim 0,8 E_{\text{прое}}$ ($E_{\text{прое}}$ - электрическая прочность толстых слоев) вызывает в тонком слое ШГК генерацию линейных и точечных дефектов. Дефектообразование предваряет и обуславливает весь комплекс предпробивных процессов и явлений:** деформирует кристаллическую структуру, изменяет распределение электрического поля по толщине и площади слоя диэлектрика, создает каналы и области повышенной электропроводности, в которых протекают ионные и электронные токи и развиваются процессы ударной ионизации, завершающиеся разрушением слоя диэлектрика (пробоем).

2. **Образование новых линейных и, как следствие, точечных дефектов в сильном и сверхсильном электрическом поле может происходить в результате следующих механизмов:**

- 1) **полевого** (вследствие движения в кристалле заряженных дислокаций и их размножения под действием кулоновских сил);
- 2) **пондеромоторного** (генерация новых дислокаций под действием локальных механических напряжений, создаваемых в слое диэлектрика электрическим полем);
- 3) **термоударного** (генерация дислокаций вокруг токового «шнур» под действием механических напряжений, обусловленных градиентом температуры).

Определены условия, при которых может действовать тот или иной механизм генерации дефектов.

3. **Наблюдаемый экспериментальный эффект «шнурования» тока в тонких слоях ШГК обусловлен инжекцией электронов из микронеровностей на катоде при их пространственном совпадении с местами скопления дислокаций в слое, играющих роль каналов предпочтительного переноса заряда.** Такая ситуация может быть реализована автоматически при наличии микроострий на катоде с достаточно малым радиусом скругления, тогда вследствие действия пондеромоторных сил дислокационная структура будет развиваться прямо под микроострием. Инжекция электронов из катода в области повышенного электропереноса облегчается за счет усиления электри-

ческого поля вблизи микроострий (геометрический фактор) и более интенсивных процессов миграционной поляризации вдоль дислокационных линий.

4. Ускорение электронов полем, ударная ионизация и возбуждение центров свечения наблюдается только в созданных под действием сверхсильного электрического поля каналах повышенной электропроводности, представляющих из себя области с модифицированной вследствие термоударного механизма структурой, имеющие высокую концентрацию линейных и точечных дефектов. Именно в таких областях слоя при протекании процессов ударной ионизации и возбуждения электронами наблюдается электролюминесценция (ЭЛ) и осуществляется квазистационарный электрический разряд, аналогичный тлеющему разряду в газах.

5. Нарушение электрической прочности тонких слоев ЩГК происходит после достижения некоторой критической напряженности поля, при которой начинается генерация линейных и точечных дефектов при данных условиях эксперимента.

Выполнение этого критерия непременно вызовет цепь процессов, приводящих к пробой:

1) в полях с напряженностью $0,8 E_{\text{пр}\infty} < E < E_{\text{пр}\infty}$ при достаточной временной выдержке накопление линейных и точечных дефектов вызывает расстрескивание слоя и пробой;

2) в области сверхсильных электрических полей (при $E \geq E_{\text{пр}\infty}$) генерация дефектов приводит к возникновению локальных токов автоэлектронной эмиссии, сопровождаемых термопластическими эффектами, созданию каналов повышенной электропроводности, возникновению в них процессов ударной ионизации, стримера и пробоя, или возникновению квазистационарного режима (в образцах со спиртовыми электролитовыми электродами), его последующего срыва, вызывающего новое нарастание тока и пробой.

ДОСТОВЕРНОСТЬ выдвигаемых на защиту научных положений и результатов обусловлена использованием образцов ЩГК (модельного диэлектрика), тонких, микронной толщины, слоев диэлектрика, в которых развитие пробоя вследствие процессов ударной ионизации замедлено, использованием электродов, позволяющих создавать в образце однородное по напряженности электрическое поле, более корректными, чем ранее, методами изучения предпробивных явлений (метод управляемой принудительной инжекции электронов в диэлектрик через полупрозрачный металлический катод и другие), применением для исследований образцов с малой начальной концентрацией дефектов и условиями эксперимента, при которых влияние процессов дефектообразования на измеряемые характеристики были сведены к минимуму. Кроме того, высокая достоверность полученных результатов достигалась исполь-

зованием взаимно дополняющих методик измерений, согласованностью результатов при измерении различных характеристик (электрических, электронно-оптических, спектральных и др.), соответствием данных экспериментов с расчетами, в том числе и результатами других авторов, непротиворечием современным представлениям о предпробивных явлениях и электрическом пробое в ЦГК и других широкозонных диэлектриках.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА. Результаты, изложенные в диссертационной работе, получены автором и группой сотрудников и аспирантов, руководимых автором, а также в сотрудничестве с учеными кафедры физической электроники и кафедры конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры ТУСУР. Автор принимал активное участие в проведении всех экспериментальных работ, разработке исследовательских методик, обсуждении результатов и планировании дальнейших исследований в данном направлении. В процессе выполнения диссертационной работы автор заново проанализировал и переосмыслил всю совокупность экспериментальных результатов, полученных ранее в соавторстве, значительно углубил их понимание и интерпретацию. Существенно уточнил совместно разработанные физические модели и расчеты и расширил сферы их применения. В результате такого анализа лично автором были сформулированы основные защищаемые научные положения и проведено их обоснование.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Основные результаты работы обсуждались на: 4 и 5 Всесоюзных совещаниях по электролюминесценции (Черновцы и Ставрополь, 1971г.), Международном совещании по фотоэлектрическим и оптическим явлениям в твердом теле (Варна, Болгария, май, 1974), Всесоюзном симпозиуме по диэлектрическим материалам и материалам квантовой электроники (Москва, 1977), Всесоюзном семинаре «Элементарные релаксационные процессы в ионных кристаллах» (Рига, 1981), Первой международной конференции по проводимости и пробое диэлектриков (Тулуза, Франция, 1983), Республиканских конференциях «Физика твердого тела и новые области ее применения» (Караганда, 1986, 1990), Всесоюзном семинаре «Люминесценция и ее применение в народном хозяйстве» (Запорожье, 1987), Всесоюзной конференции по физике диэлектриков (Томск, 1988), Расширенном заседании секции электролюминесценции Научного Совета по люминесценции АН СССР (Вильнюс, 1989), Международной конференции по физике твердого тела (Караганда, 1996), Международной конференции по радиационно-термическим эффектам и процессам в неорганических материалах (Томск, 1998, 2000), Международной конференции по физике диэлектриков (С-Петербург, 2000).

ПУБЛИКАЦИИ. Основное содержание диссертации опубликовано в 25 статьях в центральных журналах, 27 тезисах докладов на конференциях по рангу не ниже Всероссийских и 5-ти отчетах по НИР, имеющих государственную регистрацию, перечень основных публикаций приведен в конце автореферата.

ОБЪЕМ И СТРУКТУРА РАБОТЫ. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитированной литературы, семи приложений. Работа содержит 304 страницы машинописного текста, 5 таблиц, 94 рисунка и библиографию из 347 наименований, включая основные работы автора. В приложениях приведены основные методики расчетов и экспериментов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Исходным материалом являются ЦГК, выращенные из расплава ОСЧ методом Кирополуса. Суть метода изготовления образцов заключается в том, что в кристалле размерами 15x15x3 мм со стороны широких граней во встречном направлении вымываются соосные лунки. Материал, оставшийся между лунками, представляет собой рабочий слой образца. В некоторых случаях рабочий слой будет формироваться между дном лунки и плоскостью раскола («односторонние» образцы). За счет резкой анизотропии растворения рабочий слой представляет собой тонкую пластинку микронной толщины с высокой степенью плоскопараллельности, «запечатанную» в кристалл макроскопических размеров. Площадь равной толщины может достигать нескольких квадратных миллиметров. Приготовление образцов осуществлялось на специальной установке, включающей в себя резервуар с рабочим раствором, термостат со стеклянным змеевиком, специальный держатель образца с медицинскими иглами, через которые подается раствор к граням образца и нижний резервуар для накопления используемого раствора. Рабочий раствор, проходя через змеевик термостата, нагревается до оптимальной температуры. Нагретый раствор через резиновые трубки и медицинские иглы поступает к образцу и вытравливает лунки необходимой глубины. Использованный раствор стекает в нижний резервуар. Контроль толщины слоя осуществляется визуально с помощью микроскопа.

Выявление дислокационной структуры слоев проводилось методом избирательного травления поверхности слоя. Наблюдение изменений дислокационной картины после приложения электрического поля к образцу осуществлялось при использовании в качестве электродов электролита, который не оказывает травящего воздействия на поверхность кристалла. Этому требованию удовлетворяет насыщенный раствор соответствующей данному кристал-

лу соли в бутиловом спирте. Визуальные исследования дислокационной картины слоев проводились с помощью микроскопа МИМ-7.

Для оценки влияния структурных изменений, происходящих в образце под действием сильных и сверхсильных электрических полей, на концентрацию дополнительных электронных состояний в запрещенной зоне кристалла проводились измерения коэффициента поглощения слоя диэлектрика в области края фундаментального поглощения. Для измерения коэффициентов поглощения ЩГК использовалась установка, включающая в себя вакуумный монохроматор ВМР-2, источник ультрафиолетового света – лампу высокого давления ВМФ-25 и регистрирующее устройство на базе фотоэлектронного умножителя ФЭУ-19А и микроамперметра. Специфические особенности измерения абсорбционных характеристик образцов, используемых в данной работе, связаны с малыми геометрическими размерами рабочего слоя. Поэтому регистрирующее устройство ВМР-2 было доработано: уменьшена площадь выходящего из монохроматора светового потока и увеличена чувствительность.

Для оценки степени изменения поверхности слоя образца после воздействия электрического поля были проведены электронно-микроскопические исследования поверхности при увеличении в несколько десятков тысяч раз.

Измерения электронно-оптических характеристик образцов ЩГК проведены на трех установках, на импульсном и переменном напряжениях. Компенсация емкостной составляющей тока проводилось с помощью мостовой схемы. Первая установка (с использованием электролитовых электродов на основе бутилового спирта) позволяет производить измерения зависимостей между яркостью электролюминесценции, током, текущим через образец и напряженностью электрического поля при различной температуре (от 80°C до минус 35°C). Данный диапазон температуры ограничен свойствами электролитовых электродов. Для исследования электронно-оптических характеристик при более низкой температуре (вплоть до температуры жидкого азота) использована вторая установка, в которой в качестве электродов применяется газовая плазма низкого давления. В этой установке предусмотрена возможность отделения излучения образцов ЩГК от свечения газового разряда.

Для исключения влияния контактных явлений на электронные процессы в объеме диэлектрика использовалась установка, осуществляющая принудительную импульсную инжекцию электронов в диэлектрик электронным пучком. Регулируемая инжекция осуществлялась через полупрозрачный металлический электрод. На данной установке в тонких монокристаллических слоях ЩГК впервые были проведены наблюдения процессов ударной ионизации и определены зависимости коэффициента ударной ионизации от напряженности поля.

Изучение спектров горячих электронов, ускоряемых в диэлектрике сверхсильным электрическим полем, были проведены на специальной вакуумной установке методом задерживающего потенциала. При этом образец ЦГК анодной стороной прижимался вакуумно плотно к вакуумной камере установки, в которой помещался вторично-электронный умножитель и электрод в виде сетки. На сеточный электрод подавалось пилообразное, задерживающее вылетающие электроны из сверхтонкого (несколько сотен ангстрем) анодного электрода, напряжение. Катодный электрод, чтобы увеличить электрическую прочность образцов при измерениях в сверхсильных электрических полях, выполнялся из электролита.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В первой главе (литературный обзор) излагаются существующие представления о механизмах электрического пробоя твердых диэлектриков. Рассматриваются различные теории и модели электрического пробоя, показано, что понимание физических процессов, проходящих в сильных и сверхсильных полях невозможно без решения краеугольной проблемы: реализуются ли в ЦГК и других широкозонных диэлектриках процессы ударной ионизации или нет.

До середины семидесятых годов сомнений относительно обусловленности пробоя процессами ударной ионизации не было. В пользу этого механизма свидетельствовали и явление электрического упрочнения диэлектриков с уменьшением их толщины, и наличие минимума на зависимости электрической прочности от толщины, и другие экспериментальные результаты. Однако, прямые доказательства существования процессов ударной ионизации и возбуждения ионов основной кристаллической решетки отсутствовали. Исследования токов, протекающих в диэлектриках в предпробивных электрических полях, могли бы дать информацию о наличии ударной ионизации в диэлектрике. И, хотя, имеются экспериментальные работы [3], в которых, по мнению их авторов, регистрировались в слоях ЦГК электронные токи и доказывалось существование процессов ударной ионизации, возникают большие сомнения, что это так. Сомнения вызваны тем, что величина этих токов сильно зависела от концентрации точечных дефектов (в закаленных образцах токи на несколько порядков были выше, чем в отожженных). Кроме того, основные измерения токов проводились с водными электролитовыми электродами, при применении которых достигается относительно малая электрическая прочность, и в сравнительно толстых слоях, в которых электронные токи не должны наблюдаться без пробоя. Все это наводит на мысль, что авторы наблюдали ионные токи, связанные с высоковольтной поляризацией.

С другой стороны, имелись теоретические и экспериментальные работы, в которых показано, что электрический пробой может проходить без участия процессов ударной ионизации. И даже более того, что ударная ионизация ионов основной решетки невозможна, т.к. в ЩГК узкие зоны проводимости. Однако, есть теоретические работы, например [4], в которой этот последний вывод не подтверждается.

Первыми, достаточно достоверными сведениями о существовании в ЩГК электронных токов, сопровождаемых процессами ударной ионизации, были результаты по наблюдению электролюминесценции микронных слоев ЩГК со спиртовыми электролитовыми электродами [5]. Согласно [5] электролюминесценция ЩГК обусловлена возбуждением центров свечения в результате их неупругого взаимодействия с электронами проводимости. Установлено, что в неактивированных ЩГК в качестве центров свечения выступают α -центры, концентрация которых при ЭЛ достигает значений $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Увеличение концентрации α -центров связывается с генерацией точечных структурных дефектов в ЩГК при ЭЛ в сверхсильном электрическом поле. Анализ спектров свечения активированных ЩГК [5] указывает на то, что разогретые полем электроны возбуждают активаторные центры свечения, что позволяет судить об энергии быстрых электронов. Например, в кристаллофосфоре *NaCl-Ag*, возбуждение активаторных центров свечения наблюдается при энергии фотонов (при фотолюминесценции) или «горячих» электронов при электролюминесценции в 6 эВ. Если есть электроны с такой энергией, то они могут ускориться полем и дальше и произвести ударную ионизацию.

Как указывается многими авторами, электрическое поле вызывает механические напряжения, которые, с одной стороны, могут понизить величину разрушающих механических усилий, с другой – изменить характер предпробивных процессов, которые в деформированном диэлектрике могут протекать иным образом, чем в недеформированном.

В литературном обзоре рассмотрены также вопросы влияния на электрическую прочность детонационных процессов [1], возникающих при воздействии взрывчатых веществ. Эти результаты могут быть учтены при анализе процессов в диэлектрике при кратковременных воздействиях сильных и сверхсильных электрических полей. Кроме того, довольно успешные попытки привлечь детонационные процессы для описания развития разряда в твердых диэлектриках приводятся в [6, 7].

В итоге, можно сделать вывод, что для выяснения механизмов предпробивных явлений реальных диэлектриков необходимо знать, какую роль в нарушении электрической прочности играют механические напряжения и структурные дефекты.

Влияние электронных центров окраски, являющихся источниками слабосвязанных электронов, на электрическую прочность ШГК изучалось неоднократно. Однако, определенных выводов сделано не было. По-видимому, непосредственное влияние предпробивного электрического поля на систему точечных дефектов при комнатной и более низкой температуре является неэффективным. Тем не менее, образование точечных дефектов движущимися под действием механических нагрузок дислокациями приводит к большим изменениям ионной проводимости. Многие исследователи показывают, что активация ионно-вакансионных процессов может быть опосредована активацией дислокационных процессов в сильном электрическом поле.

Как показал анализ литературного обзора, процесс дефектообразования под действием предпробивного электрического поля практически не изучен. Основная масса работ посвящена электрическому старению ШГК при повышенной температуре. Изучению же этих процессов при комнатной и более низкой температуре уделено мало внимания, по-видимому, из-за большой их длительности в условиях относительно слабых, по напряженности, электрических полей.

С другой стороны, в условиях сильных и сверхсильных электрических полей скорости деградационных процессов должны резко увеличиваться и данные процессы могут стать определяющими в физической картине предпробивных явлений. Вследствие этого исследования деградационных процессов в этих условиях становятся чрезвычайно актуальными.

Таким образом, к началу данных исследований, при изучении электрической прочности широкозонных твердых диэлектриков, в том числе в теоретических работах по этому направлению, не учитывалось изменение структуры кристаллов под действием сильного электрического поля (полевая генерация дислокаций и точечных дефектов) и влияние этого изменения на предпробивные процессы и пробой. И основная причина такого положения, по-видимому, в том, что как только эти процессы начинают проявляться, то сразу инициируют практически мгновенно развивающийся пробой. В конце главы формулируются задачи исследования, состоящие в определении роли процессов дефектообразования и ударной ионизации в развитии электрического пробоя ШГК.

Выполнение данных задач усложняется тем, что, как известно, имеется масса экспериментальных исследований, показывающих, что механизм развития пробоя в значительной степени зависит от условий эксперимента (вида диэлектрика, состояния поверхности катода, распределения поля в диэлектрике, величины перенапряжения и длительности воздействия напряжения и др.). Все это затрудняет определение основных причин, вызывающих электрический пробой. Тем не менее, имеется возможность исследовать процессы.

приводящие твердые диэлектрики к пробую, в более контролируемых условиях. Имеются в виду исследования в образцах твердых диэлектриков толщиной менее 10 мкм.

Благодаря эффекту электрического упрочнения в диэлектриках микронной и субмикронной толщины удается создавать электрические поля, значительно превышающие по напряженности пробивные для толстых слоев (десятки микрон и более), без разрушения образца. При таких полях, называемых сверхсильными, в диэлектриках протекают электронные и ионные и другие процессы, которые в толстых слоях не могли быть исследованы из-за возникновения разрушения диэлектрика в результате пробоя.

Исследования проводились в тонких (микронных и субмикронных) слоях ЦГК, приготовленных методом анизотропного растворения, в которых могут быть реализованы однородные сверхсильные электрические поля без пробоя. В качестве электродов использовались электролитовые электроды на основе тяжелых спиртов и другие электроды (в том числе плазменные), при которых достигается наибольшая электрическая прочность.

Во второй главе «Ударная ионизация, свечение и энергетические спектры горячих электронов в ЦГК» приведены экспериментальные и расчетные данные по исследованию вольт-амперных характеристик, кинетики и других характеристик электронно-оптических процессов в тонких слоях ЦГК с электролитовыми электродами и в условиях внешней управляемой инжекции в диэлектрик низкоэнергетическим электронным пучком через полупрозрачный металлический катод.

На рис. 1 показана вольт-амперная характеристика (ВАХ) образца NaCl с электролитовыми электродами, измеренная на импульсном напряжении, длительностью 100 мкс и построенная в координатах $\ln I = f(I/E)$. Важной новой информацией о переносе заряда в сильных и сверхсильных электрических полях является большая величина ионного тока. На рис. 1 этому току соответствует второй (справа) участок ВАХ. Первый участок обусловлен некомпенсированными токами утечки. На образцах с большей начальной концентрацией дефектов кристаллической решетки наблюдаются и большие ионные токи. С понижением температуры величины тока на начальных участках ВАХ уменьшаются, по сравнению с комнатной температурой, что подтверждает их ионный характер. Интенсивное свечение образца наступает тогда, когда электронный ток становится определяющим в вольт-амперной характеристике (появляется второй излом на ВАХ). О появлении электронного тока и процессов ударной ионизации на этом участке ВАХ свидетельствуют начинающаяся электролюминесценция (ЭЛ) [5] и увеличение крутизны этого участка с увеличением толщины слоя диэлектрика. ЭЛ в тонких слоях начинается при более высоких полях, чем в более толстых слоях диэлектрика. Это связа-

но с характером протекающих токов, сопровождаемых процессами ударного возбуждения центров свечения. Чем толще слой, тем больше столкновений горячих электронов с центрами свечения, тем в более слабых полях будет зафиксировано свечение, при одной и той же чувствительности экспериментальной установки.

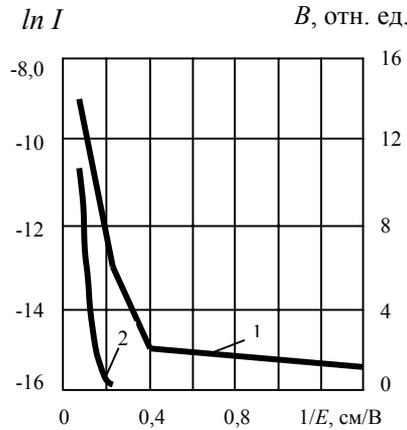


Рис. 1 Вольт-амперная (1) и вольт-яркостная (2) характеристики монокристаллического слоя NaCl толщиной 1,4 мкм при комнатной температуре, где B – яркость свечения, площадь слоя $S = 0,1 \text{ мм}^2$.

Перегиб на ВАХ и начало свечения диэлектрического слоя, а также соответствующая им напряженность электрического поля $E_{кр}$ указывают не на начало процессов ударной ионизации, а на начало автоэлектронной эмиссии из катодного электрода, сопровождаемой процессами ударной ионизации. Таким образом, проявляет себя электролитовый спиртовый электрод, являющийся запорным. Только «открывается» спиртовый электрод при меньших напряженностях электрического поля, чем водный, металлические и графитовый электроды. Поэтому в работе [3] и в других более ранних работах электронные токи в ЩГК с такими электродами вплоть до пробоя обнаружены не были.

Анализ ВАХ по теории токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ) показал, что рост электронного тока в исследуемом интервале полей не связан с заполнением ловушек, а обусловлен процессами ударной ионизации, и что электроны инжектируются в слой диэлектрика при таких полях, когда вероятность захвата их ловушками мала.

С понижением температуры и меньших начальных концентрациях дефектов в слое наблюдается сдвиг начала свечения в область более сильных полей, чем при более высоких концентрациях дефектов и температуре. Этот факт свидетельствует о наличии поляризационных процессов в диэлектрике, связанных с движением заряженных дефектов. Наличие процессов миграционной поляризации также необходимо учитывать при изучении предпробивных явлений в ЦГК и других твердых диэлектриков.

В результате этих исследований показано, что провести количественные исследования процессов ударной ионизации в ЦГК со спиртовыми электродами по ВАХ, как в работе [3], не удастся, так как невозможно выделить участки ВАХ, определяемые процессами автоэлектронной эмиссии (АЭЭ) и ударной ионизации в чистом виде. Выделение таких участков было бы возможно при условии, когда приток электронов в слой не прекращался бы и при относительно малых напряженностях поля.

Осуществить это условие, как показано в данной главе, возможно при использовании принудительной, независимой от внешнего электрического поля, инжекции электронов в диэлектрик. Такой вид инжекции можно осуществить, используя метод электронного контакта, при котором электроны в диэлектрик инжектируются электронным пучком.

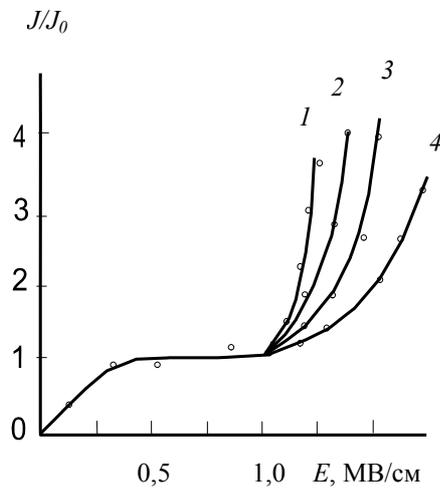


Рис.2. Зависимости отношения тока через слой (J) к току насыщения (J_0) от напряженности электрического поля (E), для NaCl различной толщины d , мкм: 1 – 6,5; 2 – 4,5; 3 – 3,2; 4 – 1,6.

Однако, использовать непосредственно импульсный электронный контакт для изучения активных токов в ЦГК в сильных и сверхсильных электрических полях невозможно, т.к. не удастся в этих условиях измерять активные токи, обусловленные одной только инжекцией электронов в диэлектрик электронным лучом. Кроме того, достичь полей больших, чем поле, при котором происходит срыв электронов с ловушек (для NaCl более $8 \cdot 10^5$ В/см), очевидно, нельзя, т.к. отрицательный приповерхностный заряд, выполняющий роль катода, а значит, и напряжение на слое при повышении внешнего напряжения возрастать не будет.

Исходя из вышеизложенного, для проведения исследований элек-

трофизических свойств ЩГК в сильных и сверхсильных электрических полях применялась импульсная инжекция электронов ($\tau_{\text{инж}} = 1 \div 10$ мкс) через тонкий металлический электрод электронным пучком. Электрическое напряжение при этом подавалось непосредственно на электроды образца в виде строб-импульса, причем длительность импульса напряжения много больше $\tau_{\text{инж}}$. Такая длительность импульса напряжения позволяла пренебречь емкостной составляющей тока через образец. Исследование в этих условиях ВАХ образцов ЩГК с различной толщиной диэлектрического слоя показало, что, действительно, удается выделить участки ВАХ, где ударная ионизация не маскируется другими процессами (см. рис. 2). Анализ полученных результатов показал возможность определения величины коэффициента ударной ионизации и его зависимости от напряженности электрического поля. Ранее также проводились оценки коэффициента ударной ионизации и были получены зависимости $\alpha = f(E)$ [1] для некоторых ЩГК. Однако, эти оценки проводились по данным пробоя из условия зарождения стримера (критерий Мика) и, как указывают сами авторы, являются весьма ориентировочными. Есть литературные данные по определению $\alpha = f(E)$ и по вольт-амперным характеристикам [3], однако эти эксперименты были проведены в условиях, когда трудно отделить процессы, проходящие в объеме слоя диэлектрика, от контактных явлений, влияний объемных зарядов, возникающих при протекании тока, и др.

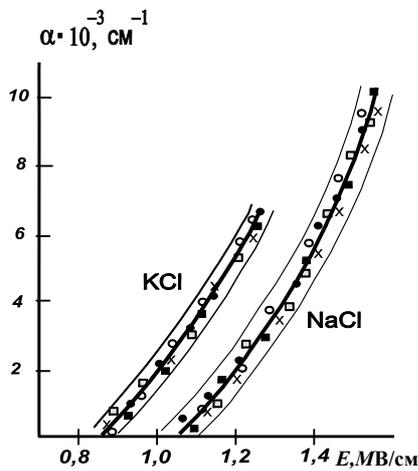


Рис. 3. Зависимости коэффициента ударной ионизации α от напряженности электрического поля для KCl и NaCl. Линиями показаны разбросы в значениях α , обусловленные ошибками в измерении толщины диэлектрика.

Таким образом, впервые достаточно корректные измерения зависимостей коэффициента ударной ионизации для NaCl и KCl проведены в данной работе (см. рис. 3).

Экспериментально полученная зависимость $\alpha = f(E)$, позволила впервые для твердых диэлектриков провести расчет распределения потенциала по толщине слоя при образовании положительного объемного заряда (ПОЗ) вблизи анода, вследствие процессов ударной ионизации.

Расчет проведен несколькими методами для стационарного случая, когда выполняется условие непрерывности полного тока, т.е. скорость накопления дырок в области анода

уравновешивается их оттоком к катоду. Проведен анализ точности полученных решений. Учет влияния ПОЗ дает возможность детальнее представить физические явления, протекающие в предпробивных полях, показать теоретически возможность существования стационарного полного тока. Оказалось, что такой режим возможен для случая электролитовых электродов. Электролитовый электрод имеет большое удельное сопротивление. По-видимому, это и приводит к уменьшению неоднородностей поля в слое, связанных с микронеровностями на электродах. Этот механизм наряду с наличием дырочного тока приводит к возникновению стационарного режима и в наших условиях. Кроме этого, следует учесть, что насыщение тока в экспериментах наблюдается при возникновении в образце свечения. Возможно, при этом наблюдаются рекомбинационные процессы. Действительно, учитывая полученное с помощью расчетов распределение потенциала по толщине слоя ди-

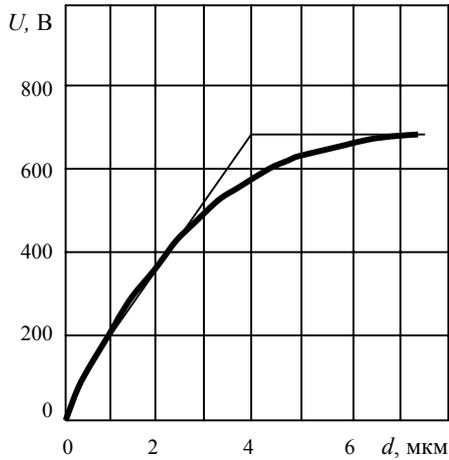


Рис. 4. Аппроксимация функции распределения потенциала по толщине исследуемого образца при $E_k = 2,2$ МВ/см (напряженность поля у катода).

электрика (см. рис. 4), можно сделать вывод, что в области ПОЗ (у анода) напряженность электрического поля мала, существует большая концентрация дырок, значит, имеется определенная вероятность для протекания рекомбинационных процессов.

Обнаружено разгорание свечения (ЭЛ) при неизменном напряжении на слое диэлектрика. Разгорание свечения тонкого слоя ЦГК возникает, начиная с $E_{кр.}$, т.е. при том же поле, при котором начинается рост тока, обусловленный процессами ударной ионизации (см. рис. 1). Этот экспериментальный факт позволяет заключить, что свечение, как и рост тока, обусловлены начавшимися в этих полях в $NaCl$ ионизационными процессами. Ранее делалось подобное предположение [5], однако, прямое подтверждение получено впервые в данной работе. Время разгорания свечения обусловлено физическими процессами, приводящими к формированию в прианодной области ПОЗ и развитию в слое ЦГК электрического разряда, аналогичного низковольтному тлеющему разряду в газах. Из условия стационарности полного тока проведена оценка минимальной величины подвижности дырок: $\mu_p = 2 \cdot 10^{-6}$ см²/В·с. Знание этого параметра может быть очень полезным для теории про-

литовый электрод имеет большое удельное сопротивление. По-видимому, это и приводит к уменьшению неоднородностей поля в слое, связанных с микронеровностями на электродах. Этот механизм наряду с наличием дырочного тока приводит к возникновению стационарного режима и в наших условиях. Кроме этого, следует учесть, что насыщение тока в экспериментах наблюдается при возникновении в образце свечения. Возможно, при этом наблюдаются рекомбинационные процессы. Действительно, учитывая полученное с помощью расчетов распределение потенциала по толщине слоя ди-

боя ионных кристаллов, а также при изучении перемещения дырок в кристалле в предпробивных полях.

Однако, следует учесть, что процессы ударной ионизации исследовались в условиях, когда инжектируемые в слой диэлектрика электроны имели довольно значительную начальную энергию. Оценки, проведенные в [8], показывают, что прошедшие через металлический катод электроны могут иметь энергию до 40-60 эВ, что во много раз превышает энергию их взаимодействия с фононами. Это может способствовать возникновению эффекта “убегания” электронов и сказаться на величине коэффициента ударной ионизации и его зависимости от напряженности поля. С другой стороны, известно, что инжектируемые электроны, даже имеющие значительно большую энергию, чем в данном случае, очень быстро термализуются, отдавая излишек энергии кристаллической решетке, так что указанные недостатки могут и не играть значительной роли.

Учитывая вышеизложенное, были проведены исследования по измерению спектров «горячих» электронов, ускоряемых полем в слое и вышедших через анодный электрод в вакуум. В качестве катода использовался электролит на основе бутилового спирта, так как с таким катодом удастся получить большую, чем с другими электродами электрическую прочность. Начальная энергия инжектируемых в слой электронов в данном эксперименте значительно меньше, чем в случае принудительной инжекции электронным пучком. В качестве анода использовался тонкий слой (порядка 200 ангстрем) алюминия. Показано, что существенная часть электронов, вылетевших в вакуум, имеет энергию $2\div 10$ эВ и более. Электроны, имеющие такую энергию при вылете из образца, вполне могут производить ударную ионизацию ионов основной кристаллической решетки. Следует подчеркнуть, что зафиксированы электроны даже с энергиями вплоть до 100 эВ.

Таким образом, впервые экспериментально показано, что в тонких слоях ШГК в сверхсильных электрических полях наблюдаются процессы ускорения электронов полем до энергий, достаточных для ударной ионизации. Причем, судя по экспериментам с инжекцией в диэлектрик носителей заряда электронным пучком, ударная ионизация может начинаться в поле со значительно меньшей напряженностью (при наличии свободных электронов), чем напряженность, при которой начинается АЭЭ из катодного электрода, даже электролитового. В случае с металлическими электродами электролюминесценции не наблюдается вплоть до пробоя, поскольку как только первые электроны попадают в слой, в нем имеются все условия для немедленного развития электрического пробоя.

Однако, следует отметить, что заметная эмиссия горячих электронов в вакуум наблюдалась только в том случае, когда нарушалась целостность тонкого

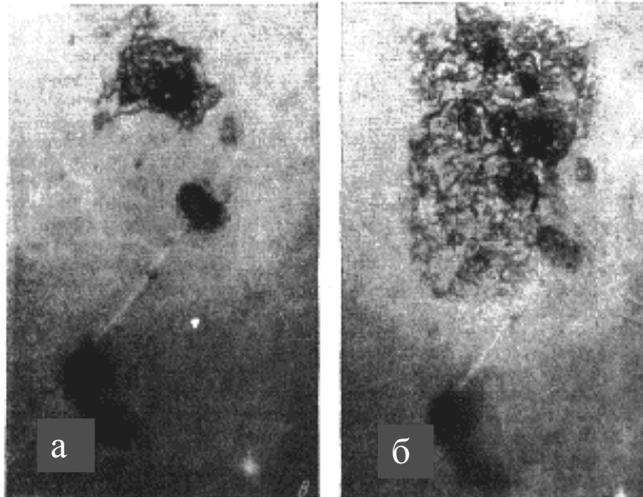


Рис. 5. Изменения в анодном электроде и образце при воздействии импульсов напряжения (увеличение 500 раз), а – поверхность образца в отраженном свете после 10-го импульса, б – после 20-го.

анодного электрода и в структуре слоя диэлектрика появлялись изменения, разрастающиеся по мере подачи последующих импульсов напряжения (см. рис.5). Эти экспериментальные данные свидетельствуют о локальном протекании электронного тока в слое ЦГК, сопровождающегося интенсивными деградационными процессами.

Очевидно, что ускорение электронов в таких областях с нарушенной кристаллической решеткой может происходить по-иному, чем в неповрежденном кристалле. Поэтому возникает задача проведения исследований деградационных явлений в ЦГК, возникающих в сверхсильных электрических полях, и влияния их на элементарные электронно-оптические процессы.

Третья глава «Дефектообразование и перенос заряда в ЦГК в условиях сильных и сверхсильных электрических полей» посвящена изучению механизмов и закономерностей дефектообразования и переноса заряда, а также их взаимного влияния, в условиях сильных и сверхсильных электрических полей и разной температуры.

Сильные электрические поля (до начала протекания электронных токов).

Показано, что в сильном однородном электрическом поле в микронных слоях ЦГК наблюдается генерация дислокаций еще до наступления пробоя (см. рис. 6). Дальнейшие исследования показали, что увеличение числа дислокаций зависит от напряженности и времени воздействия электрического поля. Воздействие электрического поля на дислокационную структуру носит пороговый характер, причем, чем меньше время воздействия поля, тем при

большей напряженности поля начинается генерация новых дислокаций. Приложение электрического поля одной напряженности поочередно прямой и обратной полярности замедляет генерацию дислокаций, с понижением температуры начало интенсивной генерации дислокаций смещается в область более сильных полей. Наблюдения за участками с неравномерным распределением дислокаций показали, что новые ямки травления появляются преимущественно в тех местах, где до воздействия поля уже имелись дислокации. Таким образом, электрополевая генерация дислокаций обусловлена размножением дислокаций, имеющих в кристалле еще до воздействия поля.

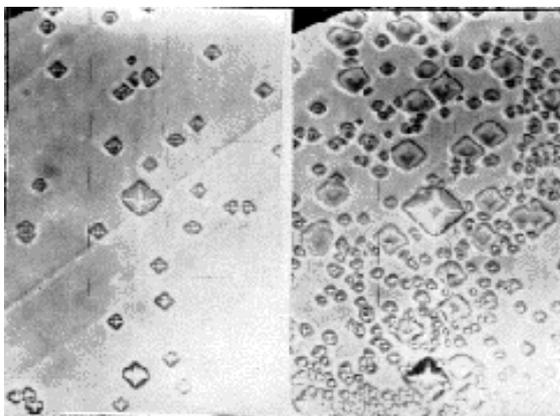


Рис. 6. Микрофотография поверхности слоя NaCl после травления: *а* – до приложения электрического поля; *б* – после воздействия электрического поля с напряженностью 3,2 МВ/см ($\tau_{\text{имп}} = 100$ мкс)

заряженные линии дислокаций и на систему точечных дефектов, которые, перераспределяясь в слое, разупрочняют прикатодную область [9]. Причем, несимметричность картин травления катодной и анодной поверхностей свидетельствует о том, что подавляющее число образующихся дислокаций представляет собой полупетли, выходящие на катодную поверхность. Механизмом размножения в данном случае может быть двойное поперечное скольжение винтовых участков дислокаций, приводящее к формированию новых дислокационных петель.

Оптические исследования образцов в сильном поле показали, что воздействие сильного поля приводит к образованию новых электронных состояний в запрещенной энергетической зоне кристалла.

Проведенные наблюдения показывают, что местом возникновения новых дислокаций в сильном электрическом поле является катодная поверхность. Неравномерность распределения дислокаций по толщине кристаллического слоя, а также отсутствие ярко выраженных полос скольжения после воздействия поля, свидетельствуют о том, что большую роль в процессе генерации дислокаций играет электростатическое воздействие поля непосредственно на

Это выражается в смещении края фундаментального поглощения в сторону меньших энергий (см. рис.7). Наиболее вероятной причиной дополнительного поглощения, вызывающего такой сдвиг, является оптическая генерация экситонов в окрестности линий дислокаций. Об этом свидетельствуют литературные данные, качественное соответствие распределений дислокаций и коэффициента поглощения по толщине слоя и совпадение пороговых значений напряженностей поля, при которых наблюдаются генерация дислокаций и деформация спектров поглощения.

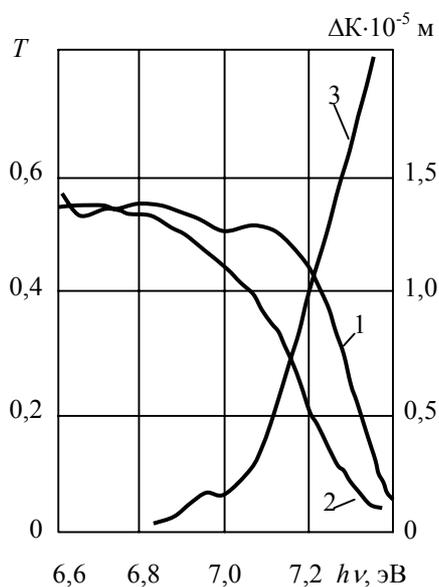


Рис.7. Спектры пропускания слоя $NaCl$ до (1) и после (2) воздействия поля ($E = 1,1 \cdot 10^8 \text{ В/м}$, $t = 80 \text{ мин}$). 3 – соответствующий разностный спектр поглощения. Толщина слоя – 77 мкм.

с меньшей напряженностью. Кроме того, изменения в вольт-амперных и вольт-яркостных характеристиках могут быть связаны с изменением энергии электронно-дырочных состояний в местах переноса заряда вследствие дефектообразования.

Сверхсильные электрические поля (при протекании электронных токов в диэлектрике). При визуальном наблюдении дислокационных картин после воздействия напряженности электрического поля, равной $E_{кр}$, при которой начинал протекать электронный ток и возникало свечение (см. рис.1), на поверхности слоя были обнаружены области (пятна) с повышенной плотностью

При исследовании влияния дефектообразования на процессы переноса заряда было выяснено, что при повторном измерении ВАХ ионная составляющая тока существенно уменьшилась, а не увеличилась, как ожидалось. Причем, свечение образца при повторном измерении начиналось при меньшей напряженности электрического поля, чем в первом опыте. По мнению автора, при движении катионных вакансий к аноду происходят процессы поляризации, приводящие к перераспределению потенциала возбуждающего напряжения по толщине диэлектрического слоя образца и усилению напряженности электрического поля у катода. Это и приводит к сдвигу начала протекания электронного тока через образец и свечения (при повторном измерении) в область полей

и большими размерами ямок травления (см. рис. 8). Дальнейшее повышение напряженности электрического поля приводило к увеличению этих областей, и этот процесс продолжался до тех пор, пока области с повышенной плотностью ямок травления не распространились на площадь всего слоя. Визуальные наблюдения мест свечения и картин травления показали, что в областях с наблюдаемой после эксперимента повышенной плотностью ямок травления протекали локальные токи (сравните с рис. 5).

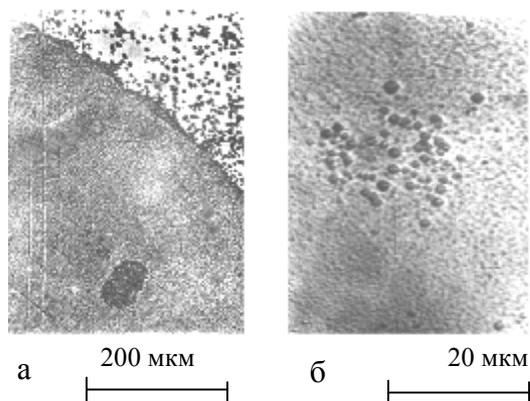


Рис. 8. Следы микроструктуры свечения, проявляемые травлением. Стрелкой показано малое скопление крупных ямок травления, показанное в увеличенном виде на микрофотографии (б).

При малом уровне возбуждения светящиеся точки появляются на небольшом участке слоя, по-видимому, в наиболее дефектных местах, или там, где толщина слоя минимальна. При повышении напряжения область свечения разрастается и может достигать величины площади всего слоя, после чего слой, как правило, пробивается. Если после подачи на образец нескольких импульсов напряжения изменить полярность импульсов, то вместо свечения точечной структуры наблюдается область однородного распределения свечения. Соответствие областей точечного и сплошного свечения подтверждает предположение о том, что свечение связано с формированием положительного объемного заряда в прианодной области слоя. При изменении полярности возбуждающего напряжения положительный заряд дырок оказывается в прикатодной области, что усиливает инжекцию электронов в слой. Аналогичное явление происходит и при возбуждении слоя переменным напряжением, поскольку изменение полярности при этом происходит через каждый полупериод.

Исследование распределения свечения по площади слоя диэлектрика показали, что микроструктура свечения, а, значит, и протекающего через слой электронного тока, существенно зависят от вида возбуждающего напряжения.

При импульсном возбуждении свечение имеет ярко выраженную неоднородность по площади слоя: свет излучают отдельные точки диаметром менее 0,5

В связи с наблюдаемым локальным протеканием электроного тока через слой диэлектрика была проведена оценка роли термического воздействия тока на дефектообразование в области шнура и остальной части слоя. Решалось известное уравнение теплопроводности для случая однородного бесконечно длинного цилиндрического источника тепла в бесконечной среде. Поскольку величина радиуса шнура R точно неизвестна, расчеты проведены для разных значений R .

Очевидно, для любого момента времени температура максимальна в центре шнура, поэтому целесообразно рассмотреть решение для разницы температуры в центре шнура (при $r = 0$) и остальной части слоя:

$$\delta T(0, t) = f_0 \left(t - \int_0^t \exp\left(-\frac{R^2}{4a\tau}\right) d\tau \right), \quad \text{где } f_0 = \frac{IU}{VC\rho} \quad (1)$$

Для $NaCl$: $C=870$ Дж./кг·К; $\rho = 2,4 \cdot 10^3$ кг/м³; $a = 5,2 \cdot 10^{-6}$ м²/с (температуропроводность), $d = 4,6 \cdot 10^{-6}$ м, $V=9,2 \cdot 10^{-8}$ м³. При длительности импульса $t = 0,1$ мс наблюдения дают $R \sim 0,1 \div 0,5$ мкм.

В табл. 1 даны значения температуры в центре шнура после воздействия импульса длительностью 0,5 мс при следующих экспериментальных параметрах:

$$E = 3,0 \cdot 10^8 \text{ В/м}, J = 2 \cdot 10^{-6} \text{ А}^1 \text{ для различных значений } R.$$

Таблица 1.

$R, \text{ м}$	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}
$\delta T(0, t), ^\circ\text{C}$	0,45	7,65	16,28	16,5	16,554

Расчет проводился при использовании вычислительной системы *MathCAD*.

Из данных таблицы следует, что величина радиуса шнура слабо влияет на приращение температуры. Еще слабее влияет время воздействия напряжения на слой (в рассматриваемом диапазоне t , от $5 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-3}$ с), поскольку в аргумент подынтегральной экспоненты (1) величина времени входит в первой степени. Существенное влияние, как видно, оказывают три параметра: напряженность электрического поля, полный ток в шнуре и коэффициент теплопроводности среды. Из этих трех параметров наиболее неопределенным оказывается величина J , поскольку она является усредненной по всем шнурам. Можно предположить, что существуют шнуры, в которых значение тока на

¹ Величина J оценивалась как отношение полного тока, текущего через образец к числу визуально наблюдаемых точек свечения. Поэтому данная оценка соответствует среднему значению тока шнура.

порядок превышает среднюю величину \bar{J} , однако при этом как показал расчет, избыточная температура не превышает десятков градусов.

Однако, это не дает оснований отвергнуть термоударный механизм образования микрообластей пластической деформации. Действительно, как показано расчетами, отличные от нуля компоненты тензора механических напряжений достигают в центре одиночного токового шнура максимальных значений:

$$\sigma_{rr} = \sigma_{\varphi\varphi} = \frac{\hat{E} \alpha \delta T_0}{6(1 - \sigma)}, \quad (2)$$

где \hat{E} - модуль Юнга; σ - коэффициент Пуассона; α - температурный коэффициент объемного расширения; δT_0 - превышение температуры в центре шнура.

При подстановке в выражение (2) параметров кристалла *NaCl* - $\hat{E} = 3,6 \cdot 10^{10}$ Па; $\sigma = 0,245$; $\alpha = 1,17 \cdot 10^{-4}$ град $^{-1}$, получим:

$$\sigma_{rr} = \sigma_{\varphi\varphi} = 0,93 \cdot 10^6 \cdot T_0 \text{ (Па)}. \quad (3)$$

Воспользовавшись данными табл. 1 и соотношением (3) составим следующую таблицу, отражающую зависимость механических напряжений от характерного радиуса токового шнура.

Таблица 2

$R, \text{ м}$	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}
$\sigma_{rr(\varphi\varphi)}, \text{ МПа}$	0,418	7,114	15,14	15,345	15,4

Согласно различным литературным источникам предел текучести кристаллов *NaCl* лежит в широком диапазоне значений – от долей до единиц МПа и, в редких случаях, превышает значение 5 МПа. Это дает основание считать, что напряжения, указанные в табл. 2, достаточны для возникновения пластических деформаций в окрестности токового шнура.

Показано, что при протекании активных токов в сверхсильных электрических полях нагрева кристалла, достаточного для термической генерации точечных дефектов, не происходит. Экситонный механизм генерации точеч-

ных дефектов также малоэффективен, т.к., по-видимому, наблюдается интенсивная полевая диссоциация свободных экситонов еще до того, как возникнут условия их распада на френкелевские пары дефектов. Кроме того, как указывается некоторыми авторами, в тонких слоях диэлектрика может происходить интенсивный сток свободных экситонов к поверхности («масштабный» эффект). Есть и другие возражения, так, характер «разгорания» свечения и возрастания квантового выхода в образце при неизменном напряжении, свидетельствует о том, что дефектообразование происходит не только во время протекания тока, но и в промежутках между импульсами, что не согласуется с экситонным механизмом генерации точечных дефектов.

Были проведены температурные исследования механизмов генерации точечных дефектов. В качестве характеристики, определяющей концентрацию точечных дефектов, использовалась величина квантового выхода безактиваторной ЭЛ (η). Показано, что рост эффективности образования вакансий с ростом температуры согласуется с предположением о дислокационном механизме генерации точечных дефектов. Эти результаты подтверждают данные многих экспериментов о том, что основными генераторами точечных дефектов в пластически деформируемых кристаллах являются винтовые участки дислокаций со ступеньками, образующимися в процессе поперечного скольжения. Таким образом, основным при генерации точечных дефектов является дислокационный механизм.

Выяснение причин локального протекания электронного тока может «пролить свет» на одну из важнейших сторон предпробивных процессов. Ведь локально большая плотность электронного тока сама по себе может быть причиной разрушения диэлектрика, например, в случае электронно-термического пробоя. Кроме того, физические процессы, приводящие к локализации электронного тока, могут нести информацию об элементарных актах взаимодействия электронов проводимости и кристаллической решетки, о структуре зон и другую важную научную информацию о свойствах диэлектриков в сильных электрических полях.

Известно, что при электролитовых электродах электрическая прочность слоев ЦГК значительно выше, чем при металлических. Причина этого эффекта оказалась в следующем. В [1] было показано, что на поверхности слоев каменной соли и других ЦГК обнаруживаются углубления до 800 Å прямоугольной и треугольной формы. При нанесении на поверхность электрода металла или графита эти углубления становятся микровыступами, обладающими большой кривизной. Это приводит к значительному усилению напряженности поля вблизи таких микроострий, по сравнению со средним полем. В случае катода с этих микровыступов будет иметь место усиленная эмиссия электронов, стимулирующая развитие пробоя. В случае

электролитового электрода можно предполагать образование промежуточного слоя сглаживающего неровности на поверхности кристалла, что и приводит к большей электрической прочности в таких условиях.

Имеются еще электроды (электронный и плазменный), обладающие такими же качествами, как и электролитовые. Кроме сглаживающего микронеровности эффекта, такие электроды обладают малой плотностью заполненных электронных состояний, по сравнению с металлическими электродами, и большим удельным сопротивлением. Эти свойства затрудняют процесс развития электрического пробоя (стабилизируя ток в этих местах) и позволяют достигать более высоких средних напряженностей поля. Именно с такими электродами впервые для ионных кристаллов удалось наблюдать электролюминесценцию микронных слоев ШГК [5] и достичь напряженностей, превышающих пробивную для более толстых слоев диэлектриков ($d > 20$ мкм), т.е. достичь области сверхсильных электрических полей. Таким образом, спиртовой электролитовый, электронный и плазменный контакты имеют свойство препятствовать локализации переноса заряда, а значит не играют определяющей роли в «шнуровании» тока.

Другой возможной причиной локализации электронного тока могут быть процессы разогрева электронной подсистемы сильным электрическим полем и, как следствие, возникновение перегривной неустойчивости и шнуrowания электронов проводимости [7]. Электронные неустойчивости могут возникнуть в диэлектрике при выполнении известного критерия, устанавливающего взаимосвязь минимальной концентрации носителей заряда n_0 , размера области с электронной проводимостью r_e и напряженности E_c , при достижении которой происходит изменение знака дифференциальной электропроводности. Как показано в [7], этот критерий для ШГК находится в пределах $6 \cdot 10^{15} < n_0 \cdot r_e < 2 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2}$. Эти величины значительно превышают критерий для полупроводников, так, для *n-GaAs* $n_0 \cdot r_e > 4 \cdot 10^{14} / \text{м}^2$ [7]. Это означает, что электронные неустойчивости в диэлектриках возникают при гораздо более жестких условиях, чем в полупроводниках. Кроме того, при выполнении критерия перегривной неустойчивости, флуктуация тока, возникшая в системе электронов проводимости, перемещается в пространстве с определенной дрейфовой скоростью и нарастает во времени. В связи с этим для того, чтобы возможность неустойчивости была реализована, необходимы определенные интервалы времени и пространства. Оказалось, что протяженность области развития неустойчивости L находится в пределах: $10^{-4} < L < 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ [7], то есть, имеет величину порядка нескольких сотен микронов.

Таким образом, и перегревная электронная неустойчивость не может быть основной причиной локального протекания электронных токов в микронных слоях ЩГК в условиях сильных и сверхсильных электрических полей.

Как уже говорилось выше, местом возникновения новых дислокаций в сильном электрическом поле является катодная поверхность. В окрестности дислокационной линии бóльшая концентрация вакансий, чем в остальной части кристалла, и, как указывается во многих литературных источниках, бóльшая их подвижность. Все это позволяет предполагать, что определяющую роль в развитии процессов на катоде может играть миграционная поляризация. Известно, что в сильных электрических полях при комнатной температуре в неактивированных ЩГК имеется ионная электропроводность, обусловленная наиболее подвижными вакансиями ионов щелочного металла. В предпробивных электрических полях катионные вакансии, двигаясь к анодному электроду, будут создавать искажения в распределении потенциала по толщине диэлектрического слоя. Усиление напряженности поля в прикатодной области может создавать условия, облегчающие АЭЭ из катода в область скопления дислокаций, и локализацию электронного тока.

Были проведены электронно-микроскопические исследования поверхности слоев NaCl вблизи нахождения электролюминесцирующих каналов. На анодной поверхности слоя (см. рис. 9) обнаружены микронарушения, представляющие собой возвышенности округлой формы с диаметром $\sim 0,5$ мкм. Значительная часть возвышенностей встречается парами. На катодной поверхности наиболее часто встречаются плоскостонные впадины, окаймленные кольцевыми возвышенностями (см. рис. 10а). Эти локальные микронарушения также встречаются парами. Все это свидетельствует о том, что токовые шнуры локализуются преимущественно в местах расположения дислокационных выходов и сопровождается переносом вещества. Попарное расположение каналов преимущественного переноса заряда может быть связано с выходом дислокационных полупетель на анодную поверхность.

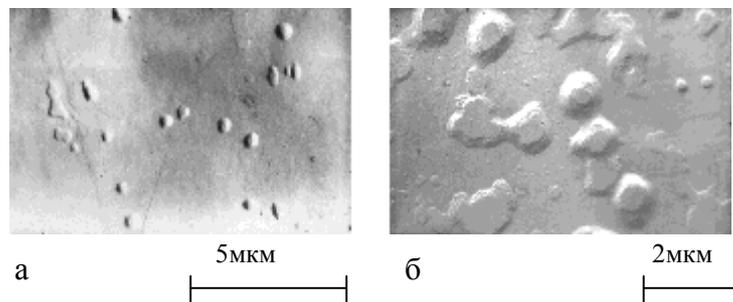


Рис. 9. Анодная поверхность. Микронарушения, возникающие в местах локального электропереноса. Реплика – Pt, угол отнения 20 градусов.

К сожалению, конструкция образцов и технология их приготовления не позволяет провести электронно-микроскопические исследования обеих поверхностей одного и того же участка образца. Можно лишь предполагать, что локальные микронарушения на анодной и катодной поверхностях соответствуют друг другу по положению. Например, видимые на катодной поверхности точечные участки эрозии (см. рис. 10б) могут соответствовать локальным возвышенностям на анодной поверхности, а значит являться местами локального усиления поля и инжекции электронов в диэлектрик.

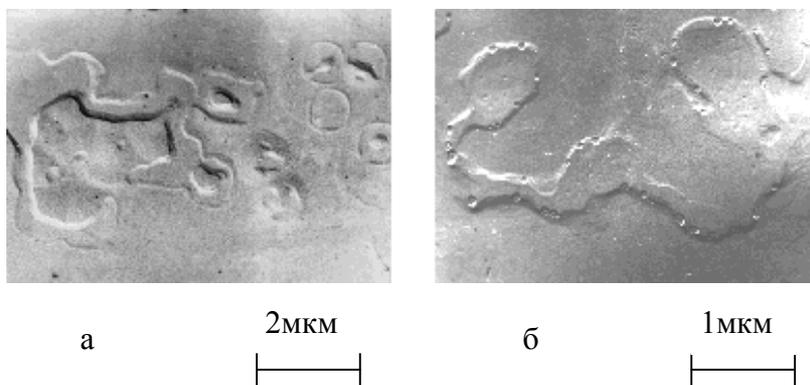


Рис. 10. Микронарушения на катодной поверхности в местах локального переноса заряда.

Однако, не следует сбрасывать со счетов и непосредственное влияние на дислокационную структуру пондеромоторных сил ($F = \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot E^2 / 2$), возникающих при воздействии на диэлектрик сильного электрического поля. Если принять во внимание тот факт, что на катодной поверхности имеются микронеровности, вблизи которых может наблюдаться значительное усиление напряженности электрического поля, то локальные значения пондеромоторных сил могут значительно превышать предел текучести кристалла. Незавершенный сдвиг может наблюдаться в условиях, когда линейные размеры площади слоя значительно превышают толщину диэлектрика. Именно так и обстоит дело с образцами ЦГК микронной толщины: диаметр слоя одинаковой толщины может достигать 1 мм, а толщина слоя диэлектрика находится в пределах от 1 до 10 мкм.

Таким образом, при малых размерах микронеровности при незавершенном сдвиге может наблюдаться 4 попарно разноименных винтовых дислокации. При инжекции электронов из этой микронеровности и, вследствие этого, термоударе, образуется область с сильно деформированной кристаллической решеткой. Размеры этой области могут значительно превышать диаметр начального канала переноса заряда и величину микронеровности, поэтому эти 4 дислокации при травлении могут не наблюдаться, так как попадут в эту дефектную область. При значительных линейных размерах микронеровности и наличии незавершенного сдвига, расстояния между дислокациями могут быть значительно больше размеров токовых шнуров и нарушенных, вследствие термоудара, областей. Расположение таких областей на поверхности слоя диэлектрика может выглядеть детерминированным (взаимно связанным).

В четвертой главе приводятся результаты исследования кинетики предпробивных процессов и электрической прочности микронных слоев ЦГК при различных формах возбуждающего напряжения, температуре и других условиях эксперимента.

Исследование предпробивных явлений в микронных слоях ЦГК показало, что развитие пробоя в тонких слоях проходит со значительно меньшей скоростью, чем в массивных диэлектриках. Это происходит потому, что при прохождении малого межэлектродного расстояния электронные лавины не могут вырасти до критических размеров, обуславливающих быстрый (с характерным временем, соизмеримым с временем пролета носителей заряда) пробой. Малая толщина слоя ограничивает развитие лавинных процессов, что позволяет выделять и изучать отдельные элементы такого сложного явления, как пробой. Важнейшим результатом данных исследований является впервые достоверно установленный факт, что начальной стадией электрического пробоя твердых диэлектриков является генерация дефектов кристаллической структуры.

Электрическая прочность образцов ЦГК с электролитовыми электродами.

При подаче постоянного напряжения на образец ЦГК и комнатной температуре в области полей с такой напряженностью, когда электронного тока нет, но полевой механизм дефектообразования возможен, пробой наступает при достижении некоторой критической концентрации дислокаций, при которой формируются микротрещины (см. рис. 11).

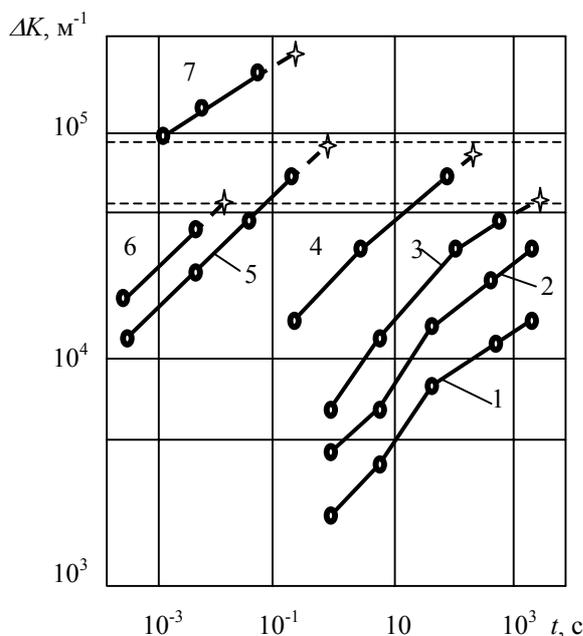


Рис. 11. Зависимости ΔK (7,3эВ) от времени воздействия электрического поля при разных его напряженностях, где E [МВ/см]: 1-1,0; 2-1,1; 3-1,35; 4-1,5; 5-2,1; 6-2,25; 7-3,3.

го в пределах $(0,6-0,8) \cdot 10^5 \text{ м}^{-1}$ (на рис.11 эта область показана пунктирными линиями). Исключениями из правила составляли образцы, имеющие толщину слоя менее 3 мкм (кривая 7). Такое развитие дислокационной системы происходит интенсивнее с увеличением начальной концентрации дислокаций.

В области сверхсильных электрических полей в образцах ШГК с электролитовыми электродами при постоянном напряжении перед пробоем практически всегда возникает электролюминесценция. Однако, вначале идет процесс генерации дислокаций (одна из составляющих темновой паузы). Как только выходы новых дислокаций пространственно совпадут с имеющимися на поверхности слоя микронеровностями, пойдет процесс инжекции электронов из катода в окрестность дислокационной линии, если напряженность

Данная интерпретация зависимости различного коэффициента поглощения слоя (ΔK) до и после воздействия электрического поля возможна, исходя из предположения, что ΔK пропорционален средней концентрации дислокаций в слое (ΔK измерялся при энергии квантов света 7,3 эВ, соответствующей спектральной области с наибольшим поглощением, см. рис. 7).

Оптические исследования показали, что накопление дефектов происходит непрерывно. Электрический пробой образцов возникал при достижении величиной ΔK некоторого критического значения, лежащего

поля вблизи микронеровности будет достаточной. Локальная напряженность поля вблизи микроострия может усиливаться вследствие повышения напряженности поля, вызванного оттоком катионных вакансий вдоль дислокационных линий.

С началом инжекции электронов из катода в окрестностях локального электронного переноса возникают термопластические эффекты (термоударный механизм дефектообразования) и формируются каналы с модифицированной структурой, имеющие повышенную электропроводность. В таких каналах возможно ускорение электронов, возбуждение центров свечения и ударная ионизация.

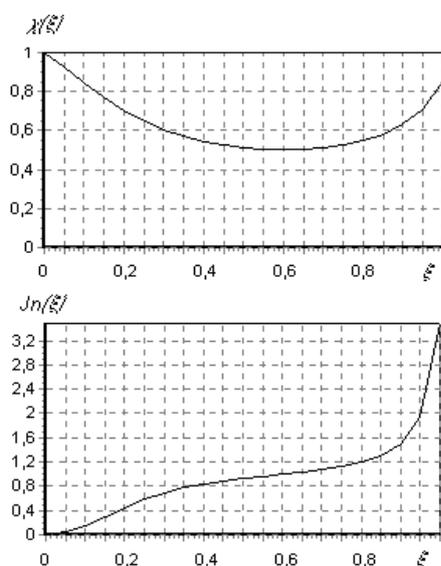


Рис. 12. Отклонение от стационарных зависимостей относительных напряженности поля $\chi(\xi)$ и электронного тока $J(\xi)$ при увеличении J_0 (ξ - безразмерная толщина). Сравните с рис. 4.

сформованных участках одновременно с процессами ударной ионизации, образованием ПОЗ и стационарного режима идут процессы миграционной поляризации (движение катионных вакансий к аноду). При этом, часть образующихся дырок начинает локализовываться вблизи катионных вакансий и вакансионных комплексов на их основе, являющихся ловушками дырок. Этот процесс сопровождается уменьшением дырочного и увеличением электронного токов и, в конечном итоге, приводит к прорастанию ПОЗ к катоду и пробую, вследствие срыва стационарного режима. Срыв стацио-

Электролитовые электроды с возникновением ионизационных процессов начинают ограничивать скорость нарастания и величину сквозного тока, осуществляя временное сопряжение электронного и дырочного токов. В результате, в сформованном участке ЦГК возникает квазистационарное распределение потенциала по толщине слоя (см. рис. 4), характеризующееся постоянством амплитуды тока и свечения. При изменении напряжения в некоторых пределах это состояние сохраняется и сопровождается пропорциональным изменением тока и яркости свечения (постоянством квантового выхода). Однако, следует признать, что стабильность сформованных участков не является абсолютной. В

нарного режима в этом случае, чаще всего, происходит по причине увеличения тока инжекции из электрода I_0 (см. рис. 12), так как с увеличением этого тока (а он возрастает при проращении ПОЗ к катоду) критичность стационарного режима к его флуктуациям увеличивается. Длительность этих процессов, приводящих к пробоям, определяется скоростью проращения ПОЗ к катоду и связана с движением катионных вакансий, а значит зависит от величины напряженности электрического поля (перенапряжения) и температуры. При комнатной температуре (при малых перенапряжениях) это время составляет несколько десятков миллисекунд, при температуре минус 30 °С – несколько секунд.

На импульсном (однополярном) напряжении² полевой механизм генерации линейных дефектов играет существенно меньшую роль, и предпробивные процессы начинаются при большей средней напряженности поля, но в той же последовательности: генерация дефектов вблизи микронеровности на катоде, локальный электронный ток, формирование каналов повышенной электропроводности. Процессы ударной ионизации в таких каналах проходят аналогично, но с одним отличием – за время между импульсами может происходить частичное рассасывание ПОЗ и облака катионных вакансий, поэтому суммарное время воздействия напряжения без пробоя может быть значительно большим, чем при постоянном напряжении. Например, при измерении спектров электролюминесценции удавалось подавать без разрушения образца несколько сотен импульсов длительностью 100-200 мкс [5].

Импульсное напряжение со сменой полярности (переполусовка). Если после подачи на образец нескольких импульсов одной полярности соответствующего напряжения, подать импульс другой полярности того же напряжения (или даже значительно меньшего), то можно наблюдать вспышку свечения. Во время переполусовки значительная часть ПОЗ в электролюминесцирующих каналах “высвечивалась”, кроме того, подача напряжения противоположной полярности возвращала облако катионных вакансий в прикатодную область, то есть выводила “излишнюю” их концентрацию из области ПОЗ. Как оказалось, эта процедура способствовала увеличению электрической прочности образца ЩГК в процессе измерения ВАХ. Для этого перед каждым измерением образец некоторое время выдерживался под напряжением обратной полярности, но меньшей амплитуды. Амплитуда напряжения выбиралась такой, чтобы напряженность

² Длительность импульсов возбуждающего напряжения обычно составляла несколько сотен микросекунд.

поля примерно соответствовала $0,8-0,9 E_{пр\infty}$. При такой напряженности и длительности воздействия поля (~ 100 мкс) интенсивность дефектообразования была минимальной при достаточной для этой процедуры скорости движения катионных вакансий.

На переменном напряжении достаточно большой частоты и малом перенапряжении происходит ограничение движения катионных вакансий к аноду, но освобождение от них приэлектродных областей. При плавных изменениях синусоидального напряжения ПОЗ, образованный “быстрыми” дырками, успевает рассасываться. Как показали осциллограммы тока и свечения, между ними наблюдается линейная зависимость [5]. То есть вспышка свечения при смене полярности напряжения отсутствует. Такой режим способствует наиболее оптимальному наблюдению электролюминесценции без пробоя.



Рис. 13. Гистерезис яркостно-токовой зависимости, наблюдаемой в тонких слоях ЦГК.

возникать по той же причине – накопление ПОЗ на глубоких ловушках, продвижение его к электродам и срыв квазистационарного напряжения вследствие флуктуаций возросшего тока инъекции.

При относительно малой частоте переменного напряжения и достаточно большом перенапряжении за время действия полупериода катионные вакансии смогут преодолевать расстояния, соизмеримые с толщиной слоя, и попадут в область ПОЗ. Тогда ПОЗ будет частично локализовываться на глубоких ловушках и при смене полярности синусоидального напряжения будет наблюдаться вспышка свечения. На осциллограммах тока и свечения в этом случае наблюдается гистерезис (см. рис. 13). При длительном воздействии напряжения происходит накопление ПОЗ на глубоких ловушках и продвижение его к электродам, при этом наблюдается понижение яркости свечения и амплитуды тока, так как эффективная толщина слоя диэлектрика, где происходит ударная ионизация, уменьшается. Очевидно, пробой будет

При более низкой температуре происходит уменьшение подвижности катионных вакансий и замедление предпробивных процессов. Наиболее эффективно такое замедление наблюдается в электролюминесцирующих каналах при выполнении одновременно двух условий: повышения частоты переменного напряжения и понижения температуры. Эксперименты, проведенные при температуре минус 160°C с плазменными электродами при кратковременном воздействии переменного сверхсильного электрического поля показали, что вплоть до пробоя, ни тока, ни свечения в предварительно охлажденных образцах ЦГК наблюдать не удавалось. Причем, даже в активированных примесями образцах свечение нельзя было отделить от помех. Токи также отсутствовали при данной чувствительности измерительной установки. Пробой возникал вследствие расстрескивания слоя диэлектрика. Все это подтверждает опережающую роль дефектообразования и, связанного с ним предпочтительного переноса зарядов вдоль линейных дефектов.

Электрическая прочность образцов ЦГК с металлическими электродами.

В условиях принудительной управляемой инжекции электронов через полупрозрачный металлический катод в слой диэлектрика предпробивные процессы проходят следующим образом. Как уже говорилось выше, металлические электроды являются, по существу, запорными. Таким образом, до определенной напряженности электрического поля инжекция из катодного электрода отсутствует. Предпробивные процессы в этом случае будут зависеть от уровня внешней инжекции, которую можно регулировать. При плотности тока инжекции $J_0 < 10^{-3} \text{ А/см}^2$ в диапазоне полей с $E \sim 1-1,5 \text{ МВ/см}$ в микронных слоях NaCl можно наблюдать процессы ударной ионизации без разрушения диэлектрика, поскольку при этих уровнях инжекции интенсивность лавинных процессов недостаточна для пробоя. Однако, при $J_0 > 10^{-3} \text{ А/см}^2$ [8] при протекании токов ударной ионизации в прианодной области слоя образуется ПОЗ значительной плотности, существенно усиливающий поле в остальной части слоя и коренным образом изменяющий кинетику развития предпробивных процессов. При таких плотностях тока инжекции наблюдается нарастание сквозного тока как во время импульса инжекции, так и от импульса к импульсу (см. рис. 14). При определенных соотношениях J_0 и E и при электролитовом аноде иногда удается наблюдать стационарный режим протекания тока и свечения. Пробой в этом случае возникает по причине срыва стационарного режима (как и при обоих электролитовых электродах).

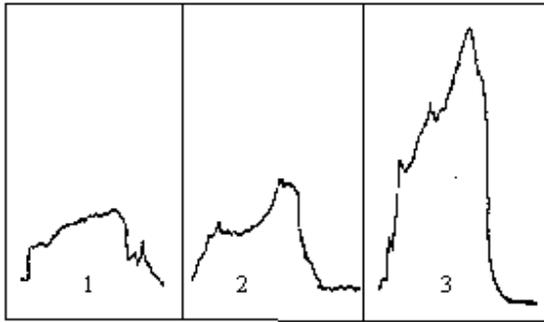


Рис.14. Осциллограммы нарастания тока при неизменном напряжении на слое NaCl, $\tau_{\text{имп}} = 10$ мкс. Цифрами показаны номера импульсов.

Однако наиболее часто нарастание тока вследствие накопления ПОЗ заканчивается всплеском тока и пробоем вследствие начавшейся неуправляемой инжекции из металлического катода. Показано, что в начальной стадии пробой имеет черты многолавиностримерного, но в заключительной стадии является электронно-термическим [1].

Разрушения в заключительной стадии пробоя существенно зависят от величины тока, протекающего через канал предпочтительного электропереноса³. Как показали расчеты, при $I = 50$ мкА и $E \sim 1,5$ МВ/см (для NaCl) температура в центре канала превышала температуру плавления материала. В экспериментах с электролитовым анодом, сопротивление которого могло достигать 10 МОм, расплавления каналов пробоя не происходило, вследствие ограничения тока электролитовым электродом. В случае металлических электродов, даже при включении “гасящего” сопротивления в электрическую цепь последовательно с образцом, пробой приводил к расплавлению канала диаметром до 50 мкм. Это значит, что энергии емкости слоя с металлическими электродами хватает для расплавления вещества канала.

Электрический пробой в образцах с двумя металлическими электродами.

В этом случае (при напыленных металлических электродах) влияние микронеровностей на электродных поверхностях будет играть значительно большую роль, чем при электролитовых электродах. Напряженность поля вблизи микроострий может превышать среднюю на 2 порядка. В связи с этим, процессы дефектообразования и последующая локализация электронного тока будут проходить в непосредственной близости от микроострий. При этом процесс переноса заряда и последующего пробоя будет проходить

³ Следует иметь в виду, что процессы генерации дефектов идут и с металлическими электродами, поэтому в таком образце, также как и в случае обоих электролитовых электродов, возникают каналы предпочтительного переноса заряда, по которым могут канализировать инжектируемые через металлический катод электроны.

значительно быстрее, чем с электролитовыми электродами, которые обладают стабилизирующими ток свойствами. Стационарного режима протекания тока при этом не возникает, так как возрастание тока инжекции практически не ограничено, и такой стабилизирующий фактор как дырочный ток не успевает возникнуть. Поэтому начало инжекции электронов из электрода в диэлектрик практически означает начало пробоя, поскольку электроны инжектируются в область предпочтительного переноса заряда, в которой имеются условия для ударной ионизации и развития пробоя.

Далее, в главе 4 проведен анализ литературных данных по исследованию предпробивных процессов и пробоя нитевидных кристаллов (НК) щелочно-галогенидных соединений (ЩГС) и других диэлектрических материалов, а также микроплазменного пробоя в различных полупроводниках.

Особый интерес у автора вызвала информация о предпробивных процессах и пробое НК ЩГС. Нитевидные ЩГК обладают почти идеальной кристаллической структурой и значительно большей механической прочностью, чем массивные ЩГК и образцы микронной толщины, приготовленные из массивных ЩГК. Однако, электрическая прочность НК ЩГС оказалась ниже, чем в образцах ЩГК микронной толщины. Причинами этого, по-видимому, являются: неоднородность поля, создаваемого при исследовании пробоя НК электродами «сфера плоскость» и «масштабный фактор». Влияние развитой поверхности у НК, как указывается в [9], приводит к обогащению приповерхностных слоев вакансиями, что в значительной степени определяет высокие начальные значения их механической прочности. В сильных и сверхсильных электрических полях отток катионных вакансий может приводить к существенному разупрочнению НК и нивелированию различий в механической прочности с микронными слоями ЩГК.

Большая приповерхностная концентрация вакансий определяет кинетику накопления и разрушения F -центров, создаваемых радиацией, и их влияние на электрическую прочность НК. Сильной зависимостью приповерхностной концентрации катионных вакансий, а, значит, механической и электрической прочности НК, от условий эксперимента (форма, длительность электрического воздействия, температура и др.) можно объяснить аномально большой разброс пробивного напряжения при низкой температуре.

Таким образом, основные результаты исследования электрической прочности НК ЩГС укладываются в схему развиваемых в данной работе взглядов.

Значительное сходство в природе и кинетике предпробивных процессов в микронных слоях ЩГК имеется с микроплазменными процессами в обратнорасположенных $p - n$ -переходах различных полупроводниковых материалов:

Ge, GaAs, GaP, тройных соединениях и гетеропереходах. Так же, как и в слоях ЩГК, в них наблюдается точечная структура свечения, участие дислокаций в создании каналов предпочтительного переноса заряда (микроплазменных каналов), существенное отличие электрических характеристик таких каналов (микроплазм) от остальной части кристалла.

Аналогичный вывод можно сделать и при сравнении предпробивных явлений в тонких слоях других диэлектрических материалов: ZnS, SiO, SiO₂, полимерных материалах. В них, также как и в микронных слоях ЩГК, перед пробоем наблюдаются сходные процессы: накопление дефектов, локализация токов и свечения, наблюдаемые в местах скопления дислокаций и других структурных дефектов, трансформация ВАХ по мере деградации структуры диэлектрика и др.

Заключение

Благодаря эффекту электрического упрочнения с уменьшением толщины в тонких слоях щелочно-галогидных кристаллов и других диэлектриков удается создавать без разрушения образца электрические поля, значительно превышающие по напряженности пробивные для толстых слоев (десяти микрон и более). При таких полях, называемых сверхсильными, в диэлектриках протекают электронные и ионные процессы, которые в более толстых слоях не могли быть исследованы из-за возникновения разрушения диэлектрика в результате пробоя.

Исследования проводились в микронных и субмикронных слоях ЩГК, приготовленных методом анизотропного растворения, в которых могут быть реализованы однородные сверхсильные электрические поля без пробоя. В качестве электродов использовались электролитовые электроды на основе тяжелых спиртов и другие электроды (в том числе плазменные и электронный контакт), при которых достигается наибольшая электрическая прочность.

Использование микронных слоев ЩГК и таких электродов позволяет не только достичь сверхсильных электрических полей, но и растянуть процесс пробоя во времени, определить и исследовать наиболее существенные его составляющие. Впервые показано, что процессы движения заряженных дефектов и дефектообразование под действием электрического поля предваряют и обуславливают все явления, определяющие электрическую прочность и пробой ЩГК. Этот важный с мировоззренческой точки зрения вывод составляет основу развиваемого в работе научного направления, связанного с изучением кинетики и механизмов протекания в сверхсильных электрических полях дефектообразования и его влиянием на предпробивные процессы и пробой ЩГК. В свою очередь, данное направление является существенным

вкладом в новую область физики диэлектриков – область сверхсильных электрических полей [2].

Основные полученные результаты сформулированы в виде выводов в конце каждой главы и, в общем, могут быть сведены к следующему:

1. Установлено, что движение заряженных дефектов и дефектообразование предвещает и обуславливает все основные предпробивные процессы в микронных слоях ШГК. Определены механизмы, кинетика генерации линейных и точечных дефектов и их роль в изменении механических и электрических свойств материала и развитии пробоя.
2. Ускорение электронов, ударная ионизация и электролюминесценция наблюдаются только в каналах повышенной электропроводности, созданных под действием сверхсильного электрического поля.
3. Впервые для областей с модифицированной электрическим полем кристаллической структурой были определены некоторые характеристики электронно-дырочных процессов: коэффициент ударной ионизации и его зависимость от напряженности поля, подвижность дырок и энергетический спектр «горячих» электронов, эмиттированных в вакуум.
4. Впервые обнаружены и проанализированы возможности осуществления в каналах с модифицированной полем структурой квазистационарного электрического разряда, аналогичного тлеющему разряду в газе. Как показали расчеты, такой разряд возможен, когда скорость накопления дырок, образующихся в прианодной области вследствие процессов ударной ионизации, может уравниваться их оттоком к катодному электроду.
5. Предложен критерий, при выполнении которого, возникает цепь предпробивных явлений и пробой. Таким критерием является напряженность электрического поля, при которой начинается генерация линейных и точечных дефектов в образце при данных условиях эксперимента. Таким образом, впервые удалось связать прямую электрическую прочность с механическими характеристиками прочности исследуемого на пробой материала.

В заключение работы проведена попытка обобщения разработанных представлений на предпробивные процессы в нитевидных ШГК, а также сравнение предпробивных процессов в ШГК с предпробивными процессами в других диэлектрических материалах и полупроводниках. Показано, что об-

щим свойством всех материалов в условиях сверхсильного электрического поля является локальный характер переноса заряда, связанный с наличием линейных дефектов. Имеется большое сходство в природе и кинетике развития предпробивных процессов, обусловленных стадией накопления дефектов, между слоями ШГК и другими диэлектрическими материалами.

Полученные результаты позволяют выйти на новый уровень в понимании механизмов электропроводности, электролюминесценции и электрического пробоя твердых диэлектриков. Вследствие этого, развитые в данной работе физические представления могут быть использованы при уточнении и разработке теорий в области электролюминесценции и пробоя, лечь в основу прикладных методов прогнозирования срока службы и повышения стойкости материалов к процессам электрического старения и пробоя при комплексном воздействии различных факторов, а также методов управления процессами, определяющими электронно-оптические свойства и электрическую прочность твердых диэлектриков.

Список цитируемой литературы

1. Воробьев А.А., Воробьев Г.А. Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. – 1966. – Изд. «Высшая школа». – 224 с.
2. Воробьев Г.А., Еханин С.Г., Несмелов Н.С. Физика твердых диэлектриков, область сверхсильных электрических полей // Изв. вузов. Физика. – 2000. – Вып.8. – С. 26-35.
3. Баранов А.В., Воробьев Г.А. // Радиотехника и электроника.- 1965.-Т. 10.-Вып. 11.-С. 206.
4. Onodera Y. Energy bands in CsJ // J. Phys. Soc. Japan. – 1968. - V.25, №2. – P. 469-480.
5. Несмелов Н.С. Дис. ...докт. физ.-мат. наук.- Рига, Саласпилс: ИФТТ АН Латв. ССР. - 1980.
6. Косцов Э.Г. Детонационный механизм пробоя диэлектрика – Сб. тезисов докладов Всесоюз. научн. конф. «Пробой и электрическое старение». – Баку, 1982. – С. 21-23.
7. Вершинин Ю.Н. Электронно-тепловые и детонационные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков. – Екатеринбург: УрО РАН. – 2000. – 258 с.
8. Воробьев Г.А., Еханин С.Г., Несмелов Н.С. Ударная ионизация в ШГК // ФТТ. – 1976. – Т.18, вып. 1. – С. 192-195.
9. Зуев Л.Б. Физика электропластичности ШГК. – Новосибирск: Наука. Сиб. отделение АН, 1990. – 120с.

Основные публикации по теме диссертации

1. Еханин С.Г., Несмелов Н.С. Вольт-яркостная характеристика электролюминесценции NaCl // Изв. вузов. Физика. – 1969. - №12. – С.149-151.
2. Воробьев Г.А., Еханин С.Г., Кривошеков В.П., Несмелов Н.С. Исследование свечения каменной соли в сверхсильных электрических полях при наличии электронного контакта // ФТТ. – 1970. – Т.12, вып. 5. – С. 1487-1489.
3. Ведерников В.А., Еханин С.Г., Несмелов Н.С. Температурная зависимость электролюминесценции каменной соли // ФТТ. – 1970. – Т.12, вып.3. – С. 937-939.
4. Воробьев Г.А., Еханин С.Г., Милюшина М.М., Несмелов Н.С. Появление дислокаций в сильном электрическом поле // ФТТ.-1973.- Т. 15. – С. 2545-2547.
5. Еханин С.Г. Исследование кинетики ударной ионизации и свечения в ЩГК: Автореф. дисс. ...канд. физ.-мат. наук. - Томск: ТГУ, 1974.- 12 с.
6. Воробьев Г.А., Еханин С.Г., Лебедева Н.И., Несмелов Н.С. Механизм свечения ЩГК в сильных электрических полях // ФТТ. – 1975. – Т.17. – С.1495-1496.
7. Еханин С.Г. Особенности импульсного электронного контакта // Радиотехника и электроника. – 1975. – Т.20, №4. – С. 792-795.
8. Воробьев Г.А., Еханин С.Г., Несмелов Н.С. Ударная ионизация в ЩГК // ФТТ. – 1976. – Т.18, вып. 1. – С. 192-195.
9. Воробьев Г.А., Дацко Л.С., Дружинин А.П., Еханин С.Г. и др. Эмиссия горячих электронов из тонких монокристаллических слоев ЩГК. // ФТТ. – 1978. – Т.20, вып.4. – С.1059-1061.
10. Экспериментальные и теоретические исследования электронно-оптических и ионных процессов в тонких монокристаллических слоях NaCl в сверхсильных электрических полях: Отчет о НИР/ Научн. рук. Еханин С.Г. – Томск: ТИАСУР, 1986. - № ГР 01830003337. – 58с.
11. Еханин С.Г., Несмелов Н.С., Нефедцев Е.В. Приготовление тонких монокристаллов NaCl методом анизотропного растворения // ПТЭ. – 1986. - №3. – С.225-227.
12. Еханин С.Г., Несмелов Н.С., Потахова Л.Ю. Исследование вольт-амперных характеристик микронных слоев каменной соли в сверхсильных электрических полях // Изв. вузов. Физика. – 1989. – Вып.7. – С.115-117.
13. Еханин С.Г., Несмелов Н.С., Нефедцев Е.В. О механизме зарождения точечных дефектов в ЩГК // В сб. ст. «Физика диэлектриков», изд. КарГУ, 1989.

14. Еханин С.Г., Несмелов Н.С., Нефедцев Е.В. О месте появления новых дислокаций при их электрополевой генерации // Кристаллография – 1990. – Т.35, вып. 1. – С.237-238.
15. Еханин С.Г., Несмелов Н.С., Нефедцев Е.В. Влияние сильного электрического поля на фундаментальный край оптического поглощения ЩГК // Изв. вузов. Физика. – 1990. – Вып.3. – С.105-106.
16. Еханин С.Г., Несмелов Н.С., Нефедцев Е.В. Пластические явления в тонких монокристаллических диэлектриках в сверхсильных электрических полях // Ред. журн. «Изв. вузов. Физика».-Томск, 1990.- Деп. в ВИНТИ 15.03.90, № 1446.
17. Еханин С.Г., Несмелов Н.С., Нефедцев Е.В. Температурные зависимости квантового выхода электролюминесценции и деградационные процессы в *NaCl* // ФТТ. – 1990. – Т.32, Вып.2. – С.409-412.
18. Еханин С.Г., Несмелов Н.С. Установка для низкотемпературных исследований микронных слоев ЩГК в сверхсильных электрических полях, статья. // ПТЭ. - 1994, N3. - С.182-185.
19. Воробьев Г.А., Еханин С.Г., Несмелов Н.С. Электрический пробой ЩГК вследствие ударной ионизации электронами // Изв. вузов. Физика. – 1994. – вып.2. – С.119-121.
20. Еханин С.Г., Несмелов Н.С., Солдатова Л.Ю. Кинетика дефектообразования в ЩГК в сверхсильном электрическом поле // Изв. вузов. Физика. – 1997. – вып.4. – С.3-6.
21. Еханин С.Г., Несмелов Н.С., Свешников И.В. Исследование спектральных характеристик ЭЛ ЩГК с плазменными электродами // Изв. вузов. Физика. – 1997. – вып.9. – С.102-106.
22. Воробьев Г.А., Еханин С.Г., Несмелов Н.С. Физика твердых диэлектриков, область сверхсильных электрических полей // Изв. вузов. Физика. – 2000. – Вып.8. – С. 26-35.
23. Еханин С.Г., Несмелов Н.С., Солдатова Л.Ю. Влияние радиационных дефектов на электрическую прочность ЩГК // Тез. докл. на 2-ой межд. конф. «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах». - Томск, 14-19 авг. 2000 г. - С.95-96.
24. Еханин С.Г. Токи и дефектообразование в ЩГК в сверхсильных электрических полях // Тез. докл. на 9 межд. конф. по физ. диэл., Т.1. - С-Петербург, изд. РГПУ, 17-22 сент. 2000 г. - С.143-144.
25. Воробьев Г.А., Еханин С.Г., Несмелов Н.С. Новая область физики диэлектриков // Тез. докл. на 9 межд. конф. по физ. диэл., Т.1. - С-Петербург, изд. РГПУ, 17-22 сент. 2000 г. - С.139-140.