

На правах рукописи



ПУНАНОВ ИВАН ФЕДОРОВИЧ

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ И  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ВЫСОКОВОЛЬТНОГО НАНОСЕКУНДНОГО ПРОБОЯ  
КОНДЕНСИРОВАННЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ**

01.04.04 — Физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург — 2017

Работа выполнена на кафедре электрофизики ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина» и в группе физики диэлектриков ФГБУН Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор  
**Чолах Сеиф Османович**

Научный консультант: кандидат физико-математических наук  
**Емлин Рафаил Вениаминович**

Официальные оппоненты: **Кривобоков Валерий Павлович**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет»,  
заведующий кафедрой экспериментальной физики

**Березин Владимир Михайлович**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»,  
профессор кафедры физической электроники

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный  
технический университет», г. Новосибирск

Защита состоится «28» июня 2017 г. в 17:00 на заседании диссертационного совета Д212.285.02 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (Зал Учёного совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», а также на сайте университета по адресу <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?d=51&rid=267859>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета



Ищенко Алексей Владимирович

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы исследования.** Экспериментальное изучение характеристик пробоя твёрдых и жидких диэлектриков при воздействии на них высоковольтных импульсов наносекундной длительности представляется актуальной задачей как с практической, так и с фундаментальной точки зрения. Практический интерес к исследованию наносекундного пробоя продиктован потребностями современной мощной импульсной энергетики, плазмотехники, сильноточной электроники. Развитие этих областей техники идёт по пути увеличения вкладываемой в вещество мощности, что требует всё более высоких напряжений и перехода к более коротким импульсам. Так, для компактных лабораторных мощных сильноточных устройств диапазон напряжений простирается от десятков киловольт до нескольких мегавольт, диапазон применяемых импульсов — от десятков наносекунд до долей наносекунды [1]. Использование диэлектрических материалов в качестве конструкционных или функциональных в таких импульсных условиях невозможно без знания их поведения при пробое. Однако для многих материалов, традиционно используемых в импульсной технике, подобного рода сведения относятся к области микросекундных воздействий. Они не всегда могут быть применены в наносекундной области, поскольку при укорочении воздействия импульса все основные характеристики пробоя радикально меняются. Это делает актуальными исследования пробоя этих материалов в наносекундной области длительностей импульсов. Для создания более совершенных устройств, в основе работы которых лежит пробой, необходимо уметь управлять процессами в диэлектрике при воздействии на него электромагнитного излучения большой мощности, что требует знания множества пространственно-временных и энергетических характеристик. Важными характеристиками наносекундного пробоя являются скорость распространения канала пробоя, плотность тока его формирования, проводимость, степень ионизации, давление, температура плазмы, геометрические параметры каналов. С фундаментальной точки зрения важно то, что измеряя эти характеристики и изучая их во взаимосвязи и в зависимости от внешних условий, можно делать выводы о роли в процессе пробоя тех или иных носителей заряда, судить о механизме пробоя, устанавливать фундаментальные зависимости между внутренней структурой веществ и их свойствами. Таким образом, экспериментальное изучение процесса наносекундного пробоя конденсированных диэлектриков представляется актуальным и с точки зрения практического использования диэлектриков, и с точки зрения дальнейшего развития теории электрического пробоя.

**Степень разработанности темы.** Подробно исследован и объяснён пробой газов и тепловой пробой твёрдых диэлектриков, на основании чего разработаны соответствующие методики инженерного расчёта изоляции, однако до сих пор не создано теории электрического пробоя конденсированных диэлектриков, объясняющей всю совокупность имеющихся экспериментальных фактов. Исследования пробоя конденсированных диэлектриков вплоть до середины XX века велись преимущественно в милли- и микросекундном диапазонах длительностей импульсов. Основное внимание исследователи уделяли определению условий, при которых происходит потеря диэлектриком электрической прочности. Стадии формирования пробоя уделялось мало внимания, главным образом, из-за экспериментальных сложностей, связанных с малой длительностью этой стадии. С появлением компактных наносекундных импульсных генераторов и измерительных приборов, способных регистрировать ультракороткие импульсы, расширилась и временная область, в которой можно изучать процесс пробоя, в частности, на стадии его формирования. Однако возросшие экспериментальные и вычислительные возможности не привели к соразмерному прогрессу в понимании природы пробоя. Экспериментальные исследования наносекундного пробоя монокристаллов даже к настоящему времени представлены в литературе достаточно скудно [2]. Исследования наносекундного пробоя жидкостей требуют привлечения новых экспериментальных подходов [3].

**Цель работы.** Целью настоящей работы является исследование закономерностей высоковольтного пробоя щёлочно-галогидных монокристаллов, фторсодержащих диэлектрических жидкостей и пористых керамических материалов, пропитанных жидкостями, при воздействии на них наносекундных импульсов напряжения с субнаносекундными фронтами.

**Задачи.** В работе были поставлены следующие задачи: создать измерительную установку для проведения исследований пространственно-временных и энергетических характеристик электрического наносекундного пробоя конденсированных диэлектриков диапазоне напряжений 100—150 кВ; провести исследование каналообразования при объёмном наносекундном пробое конденсированных диэлектриков, в частности, измерить скорости распространения каналов пробоя в жидкостях, кристаллах и керамиках; измерить токи формирования каналов объёмного пробоя; изучить микроструктуру каналов наносекундного пробоя в кристаллах; измерить скоростной спектр потока частиц, истекающего из канала объёмного пробоя в ионных кристаллах, а также возникающего при наносекундном пробое по поверхности диэлектрика в вакууме в таких же импульсных условиях.

**Методология, методы и объекты исследования.** Для определения таких характеристик импульсного пробоя с анода, как скорость распространения и ток формирования канала пробоя использовался метод осциллографирования импульсов напряжения и тока в процессе пробоя. Для определения параметров канальной плазмы и расчёта энергетических характеристик пробоя использовался метод измерения ионной компоненты тока плазменного потока, истекающего из канала пробоя, с помощью цилиндра Фарадея. Объектами исследования являются конденсированные диэлектрики различных классов: щёлочно-галлоидные кристаллы,  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  и  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , оксидноалюминиевые керамики, фторорганические, кремнийорганические и другие диэлектрические жидкости.

**Научная новизна.** Результаты, полученные в работе, расширяют область знаний о высоковольтном наносекундном пробое конденсированных диэлектриков. В частности, были получены следующие новые результаты:

1. В одинаковых импульсных условиях (напряжение до 140 кВ, скорость нарастания напряжения  $10^{14}$  В/с, длительность импульса 8 нс) измерены пространственно-временные и энергетические характеристики объёмного пробоя широкого класса диэлектриков (кристаллических, жидких и композитных), в том числе ранее не исследовавшихся. В одинаковых импульсных условиях исследованы характеристики пучков частиц, образованных при объёмном пробое диэлектрика и при поверхностном перекрытии диэлектрика в вакууме, что позволяет рассматривать плазмообразование в каком-либо из этих процессов, используя данные о другом.
2. Впервые зарегистрированы картины электрического разрушения монокристалла KCl, сформированные в результате действия цуга отражённых наносекундных импульсов напряжения.
3. Впервые показано, что в наносекундном режиме воздействия импульсов в гетерофазной системе из пористой нанокерамики на основе оксида алюминия, пропитанной диэлектрическими жидкостями, собственные пробивные свойства кристаллической матрицы в составе сложного диэлектрика не имеют определяющего значения при больших толщинах образцов.
4. Впервые измерены параметры потока ионов, истекающего из канала наносекундного объёмного пробоя монокристалла в вакуум и показано, что спектры скоростей ионов, образующихся при разряде по поверхности KCl и при объёмном пробое KCl, подобны в диапазоне скоростей частиц 20–200 км/с.

**Научная и практическая значимость работы.** Измеренные характеристики пробоя в твёрдых и жидких диэлектриках позволяют делать оценки параметров образующейся в канале пробоя плазмы. Полученные экспериментальные данные имеют практическое значение для импульсной техники, высоковольтной электрофизики и космического машиностроения. Пространственно-временные и энергетические характеристики пробоя жидких диэлектриков и керамических материалов, пропитанных жидкостями, будут использованы для разработки систем подачи жидкого рабочего тела через пористые функциональные элементы разрядных камер импульсных плазменных электрических реактивных двигателей.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Создана экспериментальная установка, которая позволила впервые зарегистрировать картины разрушения монокристалла, сформированные отдельными наносекундными импульсами из цуга, и впервые измерить характеристики факела, образующегося при выбросе плазмы из канала объёмного пробоя монокристалла в вакуум, и позволяет измерять характеристики процесса объёмного наносекундного импульсного пробоя жидких и твёрдых диэлектриков при воздействии на них импульсов напряжения амплитудой до 140 кВ и длительностью 8 нс со скоростью нарастания напряжения более  $10^{14}$  В/с.
2. Во фторсодержащих жидкостях при воздействии импульсов длительностью 8 нс с фронтом менее 0,5 нс в диапазоне напряжений до 140 кВ при расчётной начальной напряжённости поля  $\sim 10^7$  В/см максимальная скорость развития канала пробоя может достигать  $(1-2) \cdot 10^5$  м/с, что соответствует требованиям к координации изоляции высоковольтных импульсных устройств.
3. В гетерофазной системе из пористого диэлектрика на основе оксида алюминия, пропитанного трансформаторным маслом, при воздействии цуга импульсов длительностью 8 нс амплитудой 140 кВ для образцов, превышающих по толщине пробиваемые одним импульсом, скорость развития канала пробоя уменьшается в  $\sim 20-30$  раз по сравнению со значениями для плотной керамики, что определяет новые функциональные возможности такой системы при использовании в высоковольтных устройствах.
4. В монокристаллах KCl при воздействии импульсами длительностью 8 нс с фронтами менее 0,5 нс формирование канала пробоя происходит локально и непосредственно в момент прохождения фронта пробоя. Возникающие в приканальной области пробойные структуры являются следствием воздействия плазменного сгустка, расширяющегося со скоростью  $\sim 50$  км/с.

**Достоверность научных положений.** Достоверность научных положений обеспечивается систематическим характером исследований, использованием современных методов диагностики, применением современного и надёжного оборудования, непротиворечивостью известным физическим моделям, воспроизводимостью результатов экспериментов и их удовлетворительным согласием с экспериментальными, теоретическими и оценочными данными других исследователей, полученными в сопоставимых условиях.

**Личный вклад автора.** Выбор направления исследований, формулировка задач и обсуждение результатов проводились совместно с научным руководителем д. ф.-м. н. С. О. Чолахом и научным консультантом к. ф.-м. н. Р. В. Емлиным. Эксперименты проводились автором, а также совместно с А. С. Гилёвым и П. А. Морозовым. Съёмка каналов пробоя с помощью оптического микроскопа выполнена в лаборатории сегнетоэлектриков отдела оптоэлектроники и полупроводниковой техники НИИ физики и прикладной математики Института естественных наук УрФУ (совместно с Д. О. Аликиным и М. А. Долбиловым) и в лаборатории прикладной электродинамики Института электрофизики УрО РАН (совместно с Д. С. Колеух). Обработка и анализ результатов проводились автором лично. Все результаты, составляющие научную новизну диссертации, получены лично автором. Выводы и защищаемые положения сформулированы лично автором.

**Апробация и применение результатов.** Материалы, вошедшие в диссертацию, опубликованы в открытой печати и докладывались на всероссийских и международных научных конференциях, школах-семинарах:

- Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых учёных ВНКСФ (г. Кемерово, 2009; г. Волгоград, 2010; г. Архангельск, 2013; г. Ижевск, 2014; г. Омск, 2015);
- Научно-практическая конференция ФТФ-60 «Инновационные технологии в атомной энергетике и смежных областях» (г. Екатеринбург, 2009);
- Молодёжная школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния СПФКС (г. Екатеринбург, 2009, 2013);
- Международная конференция по модификации материалов пучками частиц и потоками плазмы (International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows (СММ), г. Томск, 2010, 2012);
- Международная конференция по импульсной энергетике и физике плазмы PPPS 2013 (The 19th IEEE Pulsed Power Conference (PPC) and the 40th IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS), г. Сан-Франциско, США, 2013);

- Международная конференция по физике плазмы и мощным пучкам частиц ICOPS/BEAMS 2014 (The 41st IEEE International Conference on Plasma Science and the 20th International Conference on High-Power Particle Beams, г. Вашингтон, США, 2014);
- Международная конференция по импульсной энергетике PPC 2015 (The 20th IEEE International Pulsed Power Conference, г. Остин, США, 2015).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 18 печатных работ, из них 8 — в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации для опубликования основных научных результатов диссертаций. Публикации представлены 5 статьями в рецензируемых отечественных (4) и зарубежных (1) научных журналах, 3 статьями в сборниках трудов конференций и тезисами 10 докладов.

**Структура и объём диссертации.** Содержательная часть диссертационной работы включает в себя введение, четыре главы и заключение. Диссертация содержит 165 листов, 48 рисунков, 13 таблиц. Список литературы содержит 209 источников. Приложения на 5 листах.

### Основное содержание диссертации

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель исследования и основные задачи, показана научная новизна и практическая значимость результатов работы, сформулированы защищаемые положения. Приведены сведения об апробации результатов, личном вкладе автора, структуре и объёме диссертации.

**Первая глава** представляет собой обзор литературы. Кратко описаны существующие модели пробоя в кристаллах и жидкостях. Изложены результаты экспериментальных исследований пробоя конденсированных диэлектриков по таким характеристикам, как скорость развития канала пробоя, ток формирования канала, давление в канале пробоя, параметры плазмы в канале пробоя, кристаллографическая направленность каналов. Рассмотрены некоторые экспериментальные методы. Показано, что несмотря на внушительный объём экспериментального материала, полученного при изучении высоковольтного пробоя, его недостаточно для глубокого понимания процессов, идущих в канале пробоя, особенно в наносекундном диапазоне времён воздействия. Рассмотрены некоторые области современной техники и конкретные технологии, где применяются высокое напряжение и ультракороткие импульсы. В заключение главы приводится постановка задач исследования.

**Вторая глава** является методической. В главе приведено описание экспериментальной установки, которая была создана для исследования пробоя твёрдых и жидких диэлектриков в наносекундном диапазоне длительностей импульсов. Установка включает в себя наносекундный импульсный генератор, блоки питания, вакуумные насосы, цифровой запоминающей осциллограф Tektronix TDS 644B и другое измерительное оборудование (вакуумметры, вольтметры), пробойные ячейки. Генератор наносекундных импульсов представляет собой трансформатор Тесла, встроенный в коаксиальную формирующую линию с неуправляемым газовым разрядником. Напряжение срабатывания разрядника составляет 140 кВ. Энергозапас формирующей линии — 0,8 Дж, импеданс — 50 Ом, длина — 80 см. Длительность импульса при работе на согласованную нагрузку — 8 нс, длительность фронта — менее 0,5 нс. Сходные по конструкции генераторы описаны в [4].

Для измерения пространственно-временных характеристик объёмного пробоя твёрдых и жидких диэлектриков использовались ячейки с конфигурацией электродов типа «игла — плоскость». Напряжённость электрического поля вблизи иглы составляет  $\sim 10^7$  В/см. Ячейки располагались в генераторе в 30 см от разрядника. Измерения параметров плазмы каналов пробоя проводились в вакууме с помощью времяпролётного анализатора. Для этого генератор соединялся с вакуумной камерой, в которой расположены пробойная ячейка, цилиндр Фарадея, система целевых диафрагм. Времяпролётная база составляет 40 см. Вакуумный агрегат на основе насосов 2НВР–5ДМ и НВДМ–100 создаёт разрежение в камере  $\sim 10^{-4}$  мм рт. ст.

Совокупность элементов экспериментального оборудования позволяет использовать их для измерения времени и скорости, а также тока и плотности тока формирования каналов пробоя в жидкостях и кристаллах, скоростного спектра ионной компоненты плазменного пучка, возникающего при пробое диэлектрика. Конструкции пробойных ячеек и цилиндров Фарадея, геометрия времяпролётного анализатора и уровень вакуума позволяют производить простейший ионный анализ плазмы пучков, возникающих при поверхностном перекрытии диэлектрика высоковольтным разрядом и истекающих из канала высоковольтного пробоя кристалла в вакуум. Методики измерения всех этих параметров подразумевают осциллографирование сигналов тока и напряжения (сигнал тока после замыкания разрядом межэлектродного промежутка при пробое, сигнал тока при попадании пучка частиц в коллектор ионов).

В заключение главы описаны материалы для исследования и этапы подготовки образцов из них. В качестве объектов исследования взяты фторорганические

и кремнийорганические жидкости, а также традиционно используемые жидкие диэлектрики (дистиллированная вода, трансформаторное масло, вакуумное масло, этиловый спирт и др.). Объектами исследования в классе твёрдых диэлектриков выбраны щёлочно-галлоидные кристаллы KCl и KBr, иттрий-алюминиевый гранат ( $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ ), лейкосапфир ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ), алунд ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и пористая оксидно-алюминиевая наноструктурная керамика.

**Третья глава** посвящена исследованию высоковольтного наносекундного пробоя диэлектрических жидкостей. Изложены результаты измерения скорости развития канала пробоя с анода в конфигурации «остриё—плоскость» в диапазоне межэлектродных расстояний 0,25—6 мм при начальной расчётной напряжённости электрического поля  $\sim 10^7$  В/см для широкого класса диэлектрических жидкостей. Типичный график зависимости времени пробоя жидкости и скорости роста канала от длины межэлектродного промежутка  $\tau(d)$  в режиме воздействия отражёнными наносекундными импульсами длительностью 8 нс (см. Рисунок 1 (а)) показан на Рисунок 1 (б).

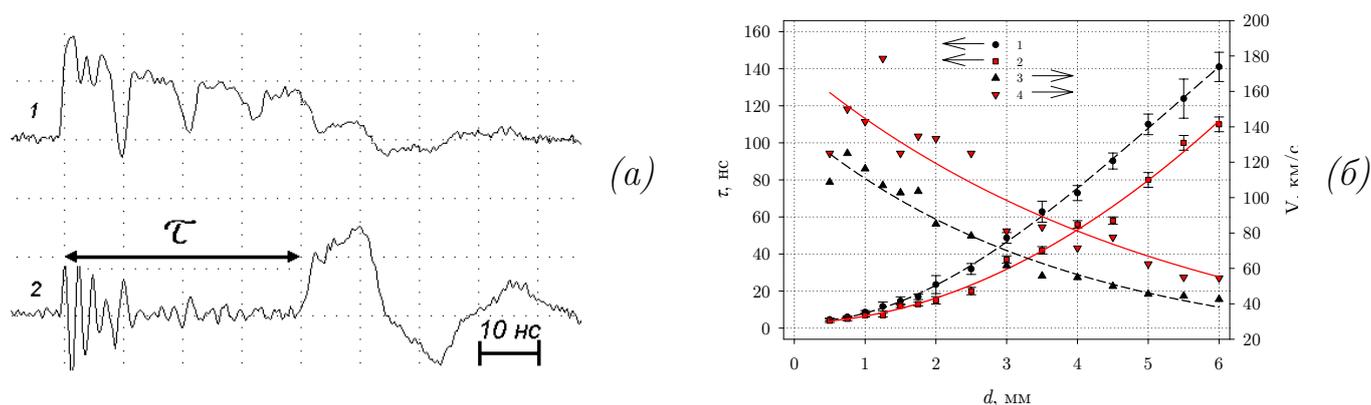


Рисунок 1 – (а) Типичная осциллограмма пробоя образца за время, превышающее длительность импульса (пробой после многократных отражений): напряжение на образце (сигнал 1) и ток через образец (сигнал 2); (б) типичный график зависимости времени и скорости формирования канала пробоя от длины межэлектродного промежутка в жидкости (пропиловый эфир перфторвалериановой кислоты): 1 – среднее время пробоя; 2 – минимальное время пробоя; 3 – средняя скорость роста канала; 4 – максимальная скорость роста канала.

Графики зависимости  $\tau(d)$  для жидкостей характеризуются заметными разбросами времён пробоя. В целом это связано со стохастическим характером развития канала пробоя в жидкости и особенностями переноса заряда из-за отсутствия дальнего порядка. Массивы экспериментальных точек ограничены минимальными значениями времени пробоя  $\tau$  для каждого взятого межэлектродного промежутка  $d$ . По этим минимальным временам пробоя при данном межэлектродном расстоянии можно определить максимальную скорость развития канала, которая будет использована в расчётах и оценках.

В интервале 0—10 нс наблюдается линейная зависимость времени пробоя от расстояния между электродами, то есть скорость роста канала постоянна. Это интервал времени соответствует действию одного импульса (без отражений). Значения максимальной скорости роста канала в исследованных жидкостях для области  $\tau < 10$  нс приведены в Таблице 1. Из таблицы видно, что скорость распространения канала пробоя во фторорганических жидкостях в основном ниже, чем в кремнийорганических жидкостях, но выше, чем в спирте, воде, глицерине, трансформаторном и вакуумном маслах.

Таблица 1 – Скорость распространения канала пробоя в диэлектрических жидкостях при  $U=140$  кВ,  $\tau < 10$  нс.

Диэлектрик	$V$ , км/с
Перфторэйкозан	469
ПМС-200	350
ПЭС-4	250
ПЭС-1	200
4,8, ... оксаперфторпентадодекан	160
Пропиловый эфир перфторвалериановой кислоты	138
1-4-дисульфотриперфторбутан	125
1-6-дисульфотриперфторгексан	125
Нитрил перфторпеларгоновой кислоты	123
Этиловый спирт	120
Диметиловый эфир перфторрадипиновой кислоты	118
Диметиловый эфир перфтор-3-оксоэнантовой кислоты	112
Диметиловый эфир перфторлитарной кислоты	107
1-1-дифторметилциклогексан	103
Глицерин	100
Дистиллированная вода	100
Изопропиловый спирт	100
Метиловый эфир перфторэнантовой кислоты	97
Феноловый эфир перфторвалериановой кислоты	97
Трансформаторное масло	49
Вакуумное масло ВМ-1	38

При межэлектродных расстояниях, для пробоя которых уже не достаточно действия одного импульса, зависимость  $\tau(d)$  меняет характер в сторону уменьшения средней скорости. Это происходит в результате потерь энергии при отражении импульса, расходования энергии на плазмообразование в канале и т.д. Распространению канала пробоя во время действия отражённого импульса можно поставить в соответствие некую дифференциальную скорость  $\Delta d/\Delta\tau$ . Учитывая потери энергии и ставя в соответствие действию каждого последующего отражения дифференциальную скорость роста канала, можно аппроксимировать зависимость  $\tau(d)$ .

Рассмотрим осциллограмму напряжения, приложенного к межэлектродному промежутку (Рисунок 2 (а)). Сигнал на осциллограмме можно упрощённо представить как приложение напряжения амплитудой 140 кВ на время  $\tau_0 = 8$  нс и сброс его на время  $\tau^* = 2,8$  нс. Полагается, что канал продвигается только во время действия плоской части импульса, а подъём и спад напряжения мгновенный. Интервал  $\tau_0 + \tau^*$  используется как дискретная временная единица при дальнейшем рассмотрении.

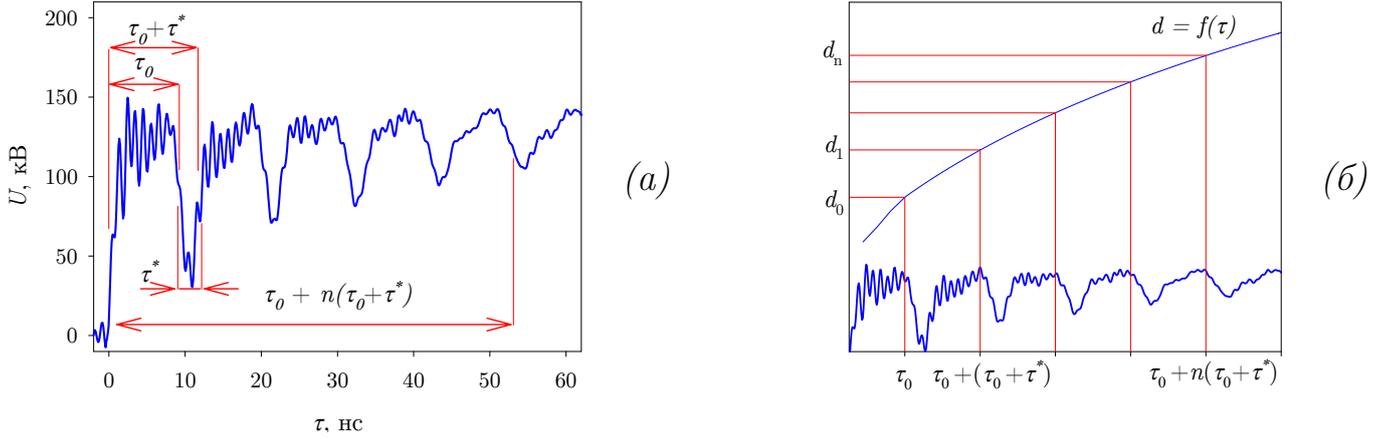


Рисунок 2 – (а) Временные компоненты сигнала напряжения на осциллограмме; (б) график, иллюстрирующий вывод аппроксимационного уравнения (4).

Несмотря на то, что в эксперименте измеряется зависимость  $\tau(d)$ , для нахождения аппроксимационного уравнения удобнее решать обратную задачу, то есть задаваться моментами времени, про которые известно, что в них должно произойти изменение характера зависимости  $\tau(d)$ , и определять те межэлектродные расстояния  $d$ , при которых время пробоя будет именно таким. В качестве опорных точек возьмём моменты времени, отстоящие друг от друга на величину длительности импульса и промежутка между двумя импульсами из цуга, то есть  $\tau_0 + i(\tau_0 + \tau^*)$  при  $i = 0 \dots n$  (см. Рисунок 2 (б)):

$$d_0 = \tau_0 V_0; \quad d_1 = \tau_0 V_0 + \tau_0 V_1; \quad \dots \quad d_n = \tau_0 V_0 + \tau_0 V_1 + \dots + \tau_0 V_n, \quad (1)$$

где  $\tau_0$  — длительность импульса генератора;  $\tau_n$  — время пробоя цугом из  $n$  отражённых импульсов;  $\tau^*$  — временной промежуток между двумя отражёнными импульсами из цуга;  $d_0$  — длина промежутка, пробиваемого за время  $\tau_0$ ;  $d_n$  — длина промежутка, для пробоя которого необходимо  $n$  отражений;  $V_0$  — максимальная начальная скорость роста канала пробоя;  $V_n$  — дифференциальная скорость распространения канала на участке  $d_n - d_{n-1}$ .

Скорость распространения канала пробоя  $V_i$  — величина, уменьшающаяся на каждом шаге (при условии, что не учитывается изменение напряжённости поля).

Процесс замедления распространения канала связан с импульсным характером действия напряжения и уменьшением амплитуды отражённых импульсов. Предположим, что затухание импульса вследствие расхождения его энергии на создание проводящего канала пропорционально его амплитуде после каждого отражения

$$U_1 = q U_0; \quad U_2 = q U_1; \quad \dots \quad U_n = q U_{n-1} = q^n U_0. \quad (2)$$

Скорость распространения канала пробоя при напряжениях порядка сотен киловольт пропорциональна действующему импульсному напряжению, поэтому

$$V_0 = k U_0; \quad V_1 = k U_1; \quad \dots \quad V_n = k U_n. \quad (3)$$

Из этого следует, что  $V_n = V_0 q^n$ . Таким образом, межэлектродное расстояние  $d_n$ , при котором время пробоя будет равно  $\tau_0 + n(\tau_0 + \tau^*)$ , выражается формулой:

$$d_n(\tau) = \tau_0 \sum_{i=0}^n V_i = \tau_0 V_0 \sum_{i=0}^n q^i, \quad (4)$$

где  $\tau_0$  — длительность импульса генератора;  $V_0$  — максимальная начальная скорость роста канала пробоя;  $q$  — коэффициент, учитывающий затухание импульса вследствие расхождения энергии на создание канала и другие потери.

Пример аппроксимации экспериментальных данных по уравнению (4) показан на Рисунке 3.

Существует по крайней мере два механизма уменьшения скорости на последующих импульсах: затраты на плазмообразование и падение напряжения на активном сопротивлении канала. Для таких жидкостей, как вода, трансформаторное и вакуумное масло, этиловый и изопропиловый спирт наблюдается резкое падение скорости на начальном участке графика зависимости  $d(\tau)$  и близкий к линейному рост  $\tau$  при больших значениях  $d$ , что делает аппроксимацию по уравнению (4) недостаточно удовлетворительной и говорит о том, что сопротивление распределено по каналу неравномерно. Для таких жидкостей, как ЖДФ и ПЭС зависимость  $d(\tau)$  хорошо аппроксимируется уравнением (4). Таким образом, для фторорганических жидкостей, вероятно, имеет место относительно равномерное распределение сопротивления по длине канала.

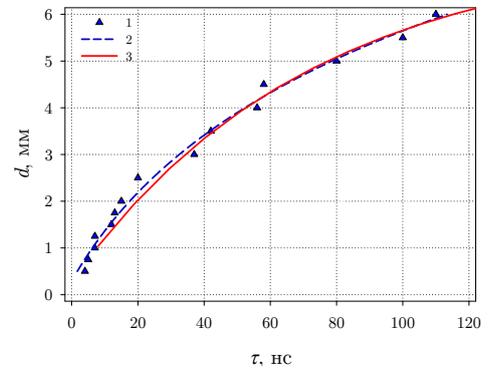


Рисунок 3 — Аппроксимация экспериментальных данных для пропилового эфира перфторвалериановой кислоты: 1 — эксперимент; 2 — трёхпараметрическая логарифмическая регрессия; 3 — аппроксимация по уравнению (4) при  $V_0 = 140$  км/с,  $q=0,89$ .

**Четвёртая глава** посвящена исследованию высоковольтного наносекундного пробоя твёрдых диэлектриков.

**Скорость роста канала пробоя.** Используя результаты Главы 3, представлялось интересным рассмотреть соотношение скоростей развития канала пробоя в жидких и твёрдых, а также в композитных диэлектриках. Из исследованных жидкостей были выбраны три, сильно отличающиеся по свойствам и характеру пробоя: трансформаторное масло; пропиловый эфир перфторвалериановой кислоты и перфторэйкозан. Этими жидкостями были пропитаны образцы пористой керамики, полученной прессованием нанопорошка оксида алюминия, которые пробивались на импульсах при напряжении 140 кВ. Для сравнения результатов пробивались образцы плотной оксидноалюминиевой керамики (алунд) и монокристалл лейкосапфира. Зависимости времени анодного пробоя от толщины образцов для этих материалов показаны на Рисунке 4.

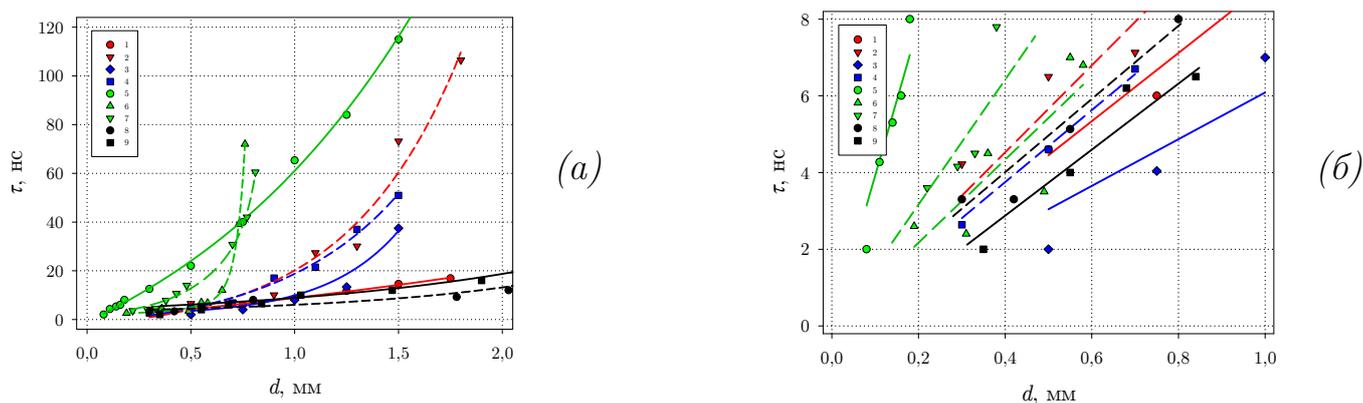


Рисунок 4 – Зависимость времени формирования канала пробоя от толщины образцов: 1 – пропиловый эфир перфторвалериановой кислоты; 2 – оксидноалюминиевая нанокерамика пористостью 34%, пропитанная пропиловым эфиром перфторвалериановой кислоты; 3 – перфторэйкозан; 4 – оксидноалюминиевая нанокерамика пористостью 34%, пропитанная перфторэйкозаном; 5 – трансформаторное масло; 6 – оксидноалюминиевая нанокерамика пористостью 34%, пропитанная трансформаторным маслом; 7 – оксидноалюминиевая нанокерамика пористостью 44%, пропитанная трансформаторным маслом; 8 – алунд; 9 – лейкосапфир.

Из графиков видно, что близкий к линейному характер зависимости времени пробоя от толщины образца имеет место в интервале 0–10 нс (см. Рисунок 4 (б)), который соответствует длительности импульса генератора, то есть ситуации, когда пробой наступал до прихода отражённого импульса. При  $\tau > 10$  нс характер зависимости изменяется в сторону уменьшения средней скорости — так же, как это было при рассмотрении пробоя в диэлектрических жидкостях. В коротких промежутках и при  $\tau < 10$  нс наибольшая средняя скорость роста канала наблюдается во фторорганических жидкостях ( $\sim 140$  км/с), значения сопоставимы со скоростью в монокристаллах лейкосапфира ( $\sim 120$  км/с). Скорости роста каналов в образцах, пропитанных жидкостями, являются близкими при  $\tau < 10$  нс (см. Рисунок 4 (б)).

Наиболее медленно на начальном участке канал растёт в трансформаторном масле, однако уже при  $\tau > 30$  нс керамика, пропитанная трансформаторным маслом, пробивается за большее время, чем само масло. В керамике пористостью 34%, пропитанной трансформаторным маслом, дифференциальная скорость роста канала при  $\tau > 20$  нс падает в 20 раз, для керамики пористостью 44% скорость уменьшается в  $\approx 5-6$  раз. В керамике, пропитанной жидкостями с относительно высокими скоростями развития пробоя — пропиловым эфиром перфторвалериановой кислоты и перфторэйкозаном, — при  $\tau > 30$  нс также наблюдается более медленный рост канала по сравнению с жидкостью-наполнителем (см. Рисунок 4).

Таким образом, в пористой оксидноалюминиевой керамике, пропитанной диэлектрической жидкостью, в режиме многократных отражений наносекундного импульса канал пробоя развивается медленнее, чем в сплошной керамике и монокристалле такого же химического состава, и медленнее, чем в наполняющей пористый образец жидкости в свободном состоянии. Это говорит о том, что собственные пробивные свойства кристаллической матрицы в составе сложного диэлектрика не имеют решающего значения, если его толщина в несколько раз больше, чем толщина образца, пробиваемого за время действия единичного импульса. Важный для практики вывод заключается в том, что гетерогенная система из пористой керамики и трансформаторного масла выдерживает без пробоя воздействия в диапазоне времён до 100 нс при напряжениях до 140 кВ. Такая композиция может быть рекомендована к использованию в качестве конструкционного материала в разрядной камере плазмогенератора на жидком рабочем теле при сопоставимых параметрах импульса напряжения без риска пробоя с высоковольтного электрода на корпус.

Методом осциллографирования напряжения и тока при пробое была измерена скорость роста каналов пробоя в четырёх монокристаллах (KCl, KBr, Nd<sup>3+</sup>:YAG и  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Результаты измерений приведены на Рисунке 5. Максимальные значения скорости роста канала (в пределах действия первого импульса) достигают 600 км/с для KCl и KBr и 200 км/с для Nd<sup>3+</sup>:YAG и  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Скорости роста канала на первом импульсе в монокристаллах значительно выше, чем в жидкостях (за исключением перфторэйкозана). По-видимому, такое различие в скоростях развития канала пробоя в жидкостях и монокристаллах объясняется различными условиями для генерации свободных носителей заряда и их подвижностью. Высокие скорости развития канала пробоя (вплоть до 10<sup>6</sup> м/с) для простых соединений типа щёлочно-галогидных кристаллов удовлетворительно объясняются в рамках модели каскадных оже-переходов [5].

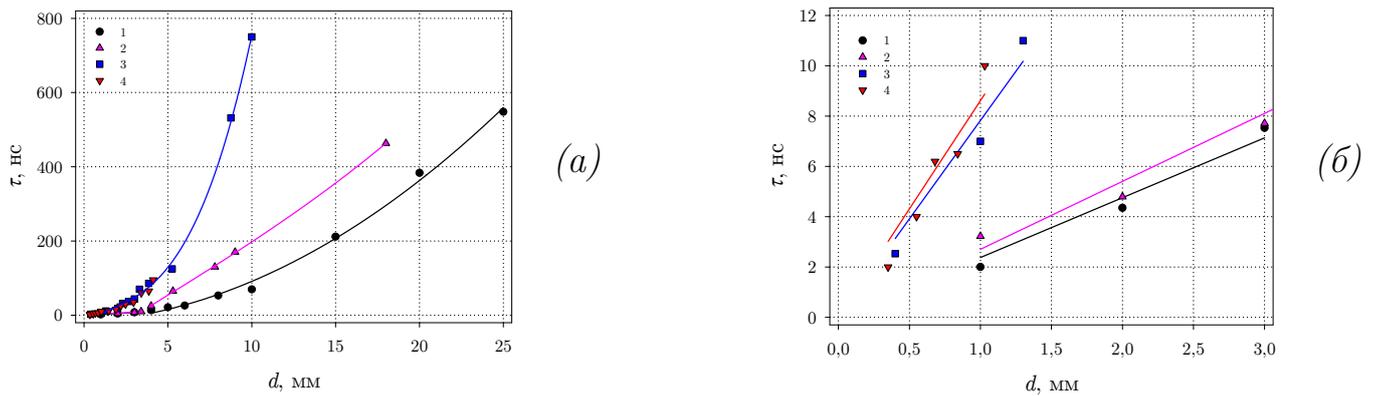


Рисунок 5 – Зависимость времени формирования канала пробоя от толщины образцов: 1 – хлорид калия (KCl); 2 – бромид калия (KBr); 3 – иттрий-алюминиевый гранат ( $Y_3Al_5O_{12}$ ); 4 – лейкосапфир ( $\alpha-Al_2O_3$ ).

Средняя скорость развития канала пробоя для образцов, пробиваемых на первом импульсе (т.е. за время меньше 8 нс), составляет 460 км/с для KCl и 350 км/с для KBr. Для  $\alpha-Al_2O_3$  и  $Nd^{3+}:YAG$  характер зависимости  $\tau(d)$  и численные значения скорости роста канала пробоя для этих монокристаллов достаточно близки (130 и 120 км/с на первом импульсе). Зависимость времени развития канала пробоя от толщины образца при  $\tau > 10$  нс, как и в случае с жидкостями, является нелинейной. Такой характер роста времени пробоя в зависимости от толщины образца связан с импульсным характером действия напряжения, уменьшением скорости формирования каждого последующего участка из-за потерь энергии на плазмообразование и падения напряжения на сопротивлении предыдущего участка. Информацию о сопротивлении канала можно получить, измерив ток, протекающий в цепи анода в процессе формирования канала.

**Ток формирования канала пробоя.** Для определения тока формирования канала пробоя была использована методика, описанная в [6]. В анодную цепь включался маломощный балластный резистор, одновременно служивший игольчатым анодом. В качестве балластных использовались малоиндуктивные непроволочные углеродные резисторы YAGEO типа CF-0.125 двух номиналов 1,2 и 2,7 кОм мощностью 0,125 Вт. При подаче на анод импульса высокого напряжения предзарядный ток, формирующий канал пробоя, проходит через балластный резистор. На резисторе падает часть напряжения импульса, так что действующее напряжение на образце оказывается меньше амплитудного и приводит к уменьшению скорости роста канала пробоя в кристалле по сравнению с обычным анодным пробоем. Зная эту скорость, можно определить эффективное напряжение, приложенное к образцу в предположении, что скорость роста канала линейно зависит от действующего напряжения. Отношение падения напряжения на резисторе к

его сопротивлению даёт среднее значение тока, протекающего в образце до замыкания каналом разрядного промежутка и начала сильноточной фазы пробоя.

Токи формирования каналов пробоя в монокристаллах КСl и КВr равны соответственно  $27 \pm 5$  и  $14 \pm 5$  А. Для определения тока брались значения скорости развития канала только для времён менее 8 нс (пробой одним импульсом, без отражений). По данным [2], при 150 кВ радиусы каналов в КСl и КВr равны соответственно 4 и 6,5 мкм. Плотность тока в каналах таких размеров будет составлять  $5,4 \cdot 10^7$  А/см<sup>2</sup> и  $1,1 \cdot 10^7$  А/см<sup>2</sup>. При таких токах и размерах канала расчётная плотность энергии равна  $2 \cdot 10^6$  Дж/см<sup>3</sup> для КСl и  $0,3 \cdot 10^6$  Дж/см<sup>3</sup> для КВr. При этом энергии каналообразования для этих кристаллов по данными [7] равны, соответственно,  $3 \cdot 10^4$  Дж/см<sup>3</sup> и  $2,5 \cdot 10^4$  Дж/см<sup>3</sup>. Таким образом, в канал на этапе его формирования вводится энергия, значительно превышающая энергию каналообразования, благодаря чему в канале пробоя возможно образование ионов с высокой степенью зарядности, в том числе высокоскоростных.

Воспользуемся полученными данными о токе формирования канала пробоя для описания динамики роста канала пробоя в КСl. Потери энергии обуславливают уменьшение действующего напряжения и, следовательно, скорости роста канала. Энергия, запасаемая в формирующей линии генератора, в начальный момент времени равна  $W_0 = C U_0^2/2$ , после отражения  $W_n = C U_n^2/2$ . Соответственно, убыль энергии после  $n$  отражений составляет  $\Delta W = (C U_0^2 - C U_n^2)/2$ .

Таким образом, напряжение  $n$ -го отражённого импульса равно:

$$U_n = \sqrt{U_0^2 - 2 \Delta W / C}. \quad (5)$$

Здесь  $\Delta W$  — это совокупные потери энергии, произошедшие в процессе роста канала пробоя. Представим эту убыль энергии в виде двух составляющих — расхода энергии на плазмообразование ( $W_p$ ) в канале и джоулевых потерь на активном сопротивлении уже сформировавшегося канала ( $W_r$ ):

$$\Delta W = W_p + W_r. \quad (6)$$

На нулевом шаге энергия тратится только на плазмообразование. На первом шаге (действие первого отражённого импульса по созданию нового участка канала) нужно учитывать убыль энергии на плазмообразование и рассеяние энергии на активном сопротивлении участка канала на предыдущем шаге.

Для  $n$ -го отражённого импульса каждую компоненту  $\Delta W$  можно представить в виде суммы:

$$W_p = \sum_{i=0}^{n-1} W_{p_i}, \quad W_r = \sum_{i=0}^{n-1} (n-i) W_{r_i}. \quad (7)$$

Энергетические затраты на плазмообразование на участке, соответствующем пробойю  $n$  отражёнными импульсами (всего  $n + 1$  актов воздействия) можно представить в виде:

$$W_p = \sum_{i=0}^{n-1} S l_i W_c = \sum_{i=0}^{n-1} \pi r^2 V_i \tau_0 W_c, \quad (8)$$

где  $S$  — площадь сечения канала,  $l_i$  — длина  $i$ -го участка канала,  $W_c$  — удельная энергия каналообразования,  $r$  — радиус канала,  $V_i$  — скорость роста канала на  $i$ -м участке,  $\tau_0$  — длительность импульса генератора. Радиус канала считаем не изменяющимся по крайней мере в пределах действия нескольких импульсов из последовательности.

Полагаем, что сопротивление  $i$ -го участка  $R_i$  пропорционально его длине  $V_i \tau_0$ , а  $R_i = R_0 (V_i/V_0)$ , где  $R_0$  — сопротивление участка, пробиваемого на первом импульсе. Потери на активном сопротивлении сформированного канала:

$$W_r = \sum_{i=0}^{n-1} (n-i) I^2 R_i \tau_0 = \sum_{i=0}^{n-1} (n-i) I^2 R_0 \frac{V_i}{V_0} \tau_0, \quad (9)$$

где  $I$  — ток формирования канала пробоя,  $R_i$  — сопротивление  $i$ -го участка канала.

Учитывая (8) и (9), напряжение  $n$ -го отражённого импульса равно:

$$U_n = \sqrt{\frac{2}{C}} \sqrt{W_0 - \tau_0 \left( \sum_{i=0}^{n-1} \pi r^2 V_i W_c + \sum_{i=0}^{n-1} (n-i) I^2 R_0 \frac{V_i}{V_0} \right)}. \quad (10)$$

Расстояние, на которое продвинется канал, можно представить как:

$$d_n = \sum_{k=0}^n \tau_0 V_k = \sum_{k=0}^n \tau_0 \frac{V_0 U_k}{U_0}. \quad (11)$$

Подставляя (10) в (11) с заменой  $V_i = d_i/\tau_0$ , получаем:

$$d_n = \frac{\tau_0 V_0}{U_0} \sqrt{\frac{2}{C}} \sum_{k=1}^n \sqrt{W_0 - \left( \pi r^2 W_c \sum_{i=0}^{k-1} d_i + \frac{I^2 R_0}{V_0} \sum_{i=0}^{k-1} (k-i) d_i \right)}. \quad (12)$$

Рассмотрим изменение скорости роста канала в КС1 на первых отражениях. Для них средние и максимальные скорости роста отличаются не очень сильно, поэтому воспользуемся средними временами, за которые пробивается тот или иной промежуток. Дифференциальная скорость участка канала на первом отражённом

импульсе (втором импульсе из цуга) равна 240 км/с. Поскольку зависимость роста канала от напряжения считается линейной, такой скорости соответствует эффективное напряжение 75 кВ. Таким образом, уменьшению напряжения на 60 кВ при токе формирования канала 30 А соответствует сопротивление  $\approx 2,5$  кОм. При подстановке параметров в уравнение (12) при  $n = 1$  получается сильно завышенное значение сопротивления  $\approx 60$  кОм. Это говорит о том, что затраты энергии на создание канала действительно больше, чем энергия, достаточная для однократной ионизации атомов калия. Дальнейшее уменьшение дифференциальной скорости (220 км/с, 180 км/с, 140 км/с) не настолько велико, как при первом отражении. Это свидетельствует о том, что сопротивление в канале распределено неравномерно. Вероятно, степень ионизации вещества в уже сформированных участках канала увеличивается при прохождении тока отражённых импульсов.

**Микроструктура канала пробоя.** Картина пробоя, сформированная в результате многократного воздействия наносекундным импульсом, была получена в образцах KCl (см. Рисунок 6).

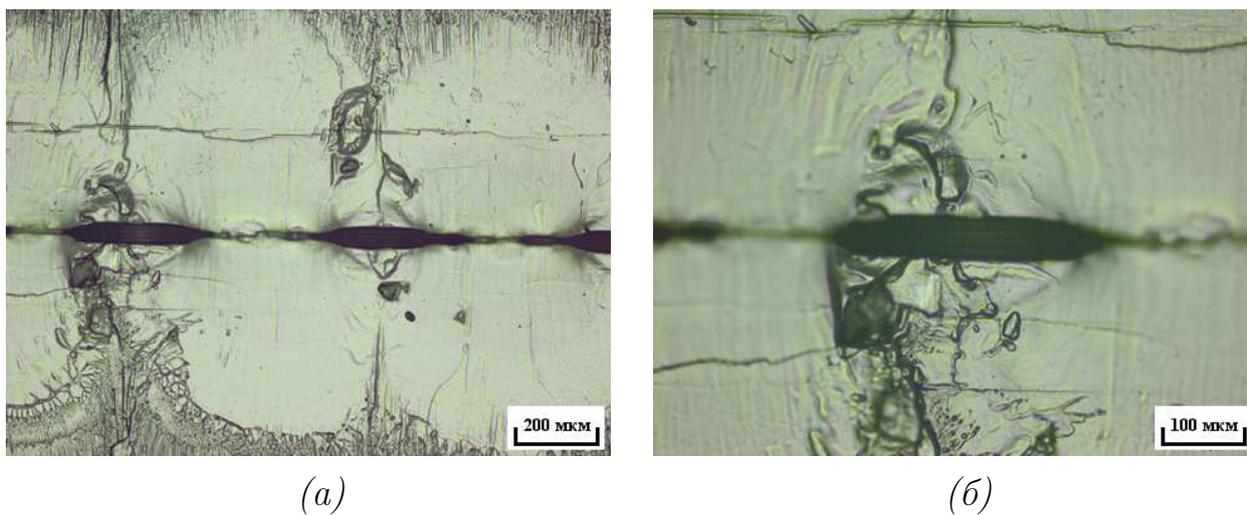


Рисунок 6 – Канал пробоя в монокристалле KCl: (а) элементы пробойной структуры; (б) элемент пробойной структуры при большом увеличении.

Кристалл длиной 27 мм размещался в пробойной камере так, что его верхняя грань находилась над поверхностью масла в воздухе (см. Рисунок 7). К образцу прикладывалось напряжение в форме прямоугольного импульса длительностью 8 нс с амплитудой от 140 кВ. Вершина растущего канала представляет собой границу линии передачи, поэтому падающий импульс отражается от неё (см. Рисунок 8). Воздушный зазор между корпусом и поверхностью кристалла выполняет роль высокоомного балластного резистора, ограничивающего ток при выходе канала на поверхность, благодаря чему картина пробоя не разрушается.

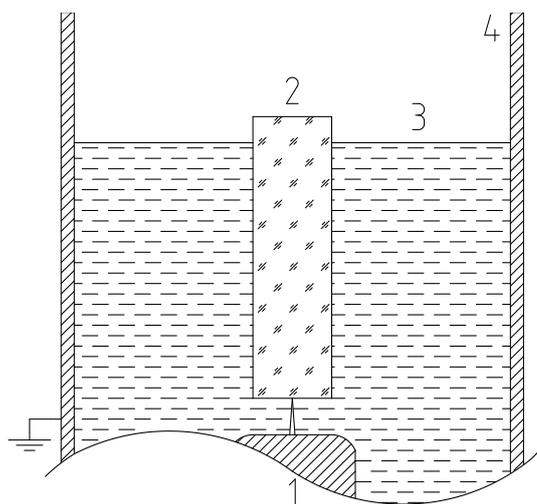


Рисунок 7 – Схема эксперимента по получению тонкой структуры канала пробоя в КСІ: 1 — игловой анод; 2 — образец; 3 — трансформаторное масло; 4 — корпус генератора.

Из Рисунка 6 видно, что канал представляет собой структуру, образованную элементами, имеющими 500 мкм в длину и 50 мкм в ширину. В промежутках между этими элементами канал сужается до 10 мкм. Из Рисунка 5 (а) видно, что при  $d \sim 20$  мм средняя скорость роста канала в КСІ снижается до 30–50 км/с, что соответствует продвижению канала на 300–500 мкм за время  $\sim 10^{-8}$  с. Это даёт основания полагать, что каждый элемент структуры образован в результате действия одного отражённого импульса.

Приходящий фронт импульса напряжения ( $\sim 10^{-10}$  с) формирует узкую часть канала диаметром  $\sim 10$  мкм, которая постепенно расширяется до стационарного диаметра  $\sim 50$  мкм при выходе напряжения на максимальное значение (плоская часть импульса). При спаде напряжения на заднем фронте импульса, отражённого от проводящей вершины канала, диаметр снова уменьшается до значения  $\sim 10$  мкм. С приходом последующего отражённого от генератора импульса этот процесс происходит вновь, формируя следующий элемент картины пробоя. В той части канала, где действовало напряжение уже не имело больших значений  $dU/dt$  (ближе к катоду), канал имел цилиндрическую форму. Проведённый анализ литературы позволяет сделать вывод, что такая детальная картина пробоя получена впервые.

Периодические сужения и расширения канала представляют собой визуализацию изменения напряжения на пробойном промежутке, их диаметр соответствует мгновенным значениям действующего напряжения. Такую интерпретацию возникновения пробойной структуры подтверждают данные, полученные в работе [8], где введено понятие критической радиальной напряжённости поля  $E_{кр}$ , обеспечивающей существование канала анодного пробоя. В соответствии с этой идеей, постоянство скорости распространения канала пробоя с анода и переносимого заряда при изменении мгновенных значений параметров импульса  $dU/dt$

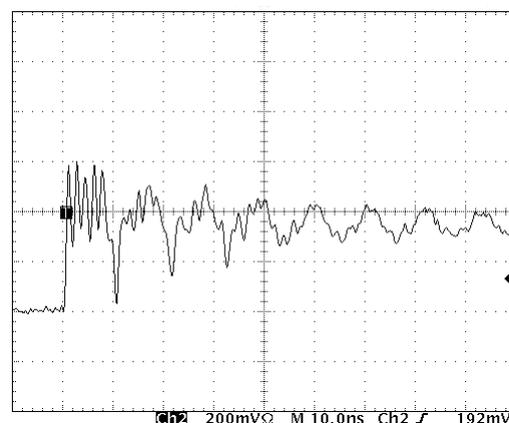


Рисунок 8 – Вид сигнала напряжения при многократном отражении импульса амплитудой 140 кВ от конца разомкнутой линии.

обеспечивается за счёт изменения площади сечения канала пробоя, причём радиус канала изменяется пропорционально мгновенным значениям напряжения.

По обе стороны от узкой части канала видна относительно гладкая поверхность раскрывшейся трещины, которая близка по форме к окружности радиусом  $\sim 500$  мкм. На внешней границе этих областей наблюдаются микрокапли сконденсировавшегося вещества канала (их диаметр  $\sim 3\text{--}5$  мкм). Чёткая граница и сохранение формы каждой из локальных трещин говорят о том, что последующие импульсы не изменяют их форму и размер существенным образом. Сохранение картины локального разрушения происходит, вероятно, по следующим причинам. После расширения канальной плазмы и конденсации её в вершине трещины, устье трещины смыкается за несколько наносекунд. Поскольку плазменные электроны «вытягиваются» электрическим полем в канал и уходят на анод, в трещине происходит «замораживание» положительного заряда и соответствующего ему достаточно высокого положительного потенциала. Давление остаточной высокопроводящей плазмы в канале невелико, поскольку большая часть испарившегося вещества уходит в вершину трещины и конденсируется в ней. Прохождение тока формирования канала ( $\sim 10$  А) на следующем участке не вызывает появления повышенных давлений, что способствует сохранению картины пробоя.

Из Рисунка 6 (а) видно, что структура разрушения регулярная, а характерные размеры области разрушения вокруг канала и области между узкими участками канала близки ( $\sim 500$  мкм). Это позволяет предположить, что приканальная область (см. Рисунок 6 (а)) и элемент из цепочки, образующей канал (см. Рисунок 6 (б)), сформировались за одно и то же время, то есть 8 нс. Трещина в кристалле может распространяться со скоростью, превышающей скорость звука в рассматриваемом веществе, если энергия, введённая в кристалл, много больше энергии, затрачиваемой на раскалывание, а время воздействия мало [9,10]. Оценка верхнего предела энергии, затрачиваемой на раскалывание, даёт около  $6 \cdot 10^{-5}$  Дж. Нижний предел энергии, введённой в кристалл за время действия одного импульса ( $W_{эл}$ ), можно оценить по объёму вещества, превращённого в плазму в элементе канала в приближении однократно заряженных ионов:

$$W_{эл} = NU_{и} = nvU_{и} = \frac{N_A \rho}{M} (\pi r^2 l) U_{и}, \quad (13)$$

где  $N$  — общее число молекул в рассматриваемом объёме;  $U_{и}$  — потенциал ионизации;  $n$  — концентрация частиц;  $v$  — объём элемента канала;  $N_A$  — число Авогадро;  $M$  — молекулярная масса;  $r$  — радиус канала;  $\rho$  — плотность вещества;  $l$  — длина элемента канала.

Эта оценка даёт  $W_{эл} = 5,7 \cdot 10^{-3}$  Дж, то есть энергия образования одного элемента пробойной структуры по крайней мере на два порядка превышает верхний предел оценки энергии, необходимой на создание трещины. Для отдельно взятого элемента пробойной структуры энергетические условия из работ [9,10] выполняются (а также условие малого времени воздействия, равного в данном случае  $\sim 10^{-9}$  с), что говорит о том, что трещина могла распространяться под воздействием расширяющегося сгустка плазмы со скоростью  $\sim 50$  км/с. То, что канальная плазма может при расширении достигать такой скорости, установлено в экспериментах по регистрации тока пучка частиц, истекающих из канала пробоя в КС1 при выходе его на поверхность образца в вакуум.

Полученные данные говорят о том, что в условиях проведённого эксперимента формирование канала пробоя под действием каждого проходящего отражённого импульса из последовательности происходит локально, непосредственно в момент прохождения фронта пробоя и независимо от предыдущих импульсов, а возникающие в приканальной области трещины являются результатом расширения плазменного сгустка со скоростью порядка десятков километров в секунду.

**Параметры плазмы.** С помощью времяпролётного анализатора были проведены измерения скорости частиц, генерируемых поверхностным разрядом, и скорости частиц, истекающих в вакуум из каналов объёмного пробоя в КС1 и КВг. Графики зависимости тока цилиндра Фарадея от времени и от скорости проходящих в цилиндр частиц представлены на Рисунке 9.

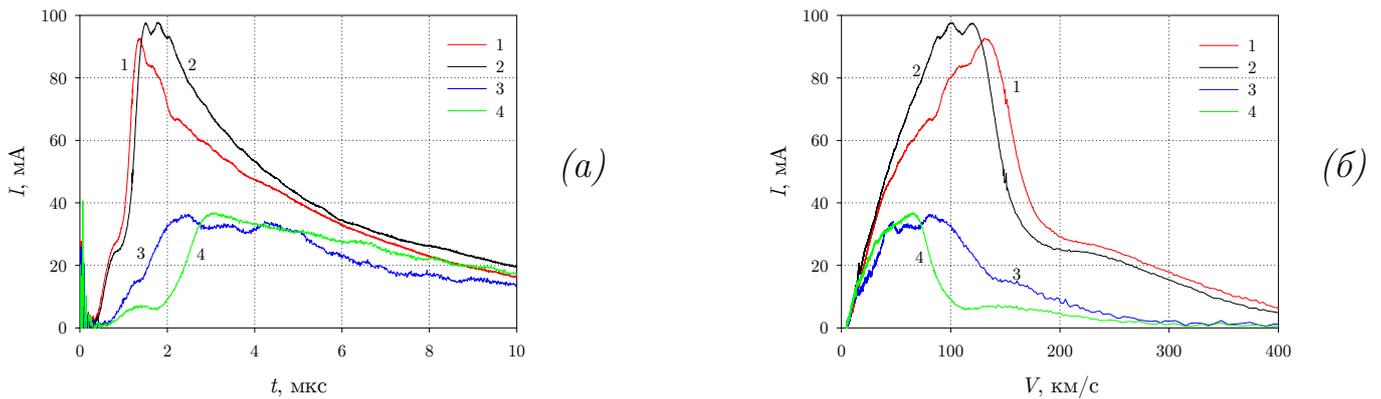


Рисунок 9 – Зависимость тока цилиндра Фарадея от времени (а) и распределение по скоростям частиц (б) как результат выброса плазмы: 1 — из области разряда по поверхности КВг,  $l = 10$  мм; 2 — из области разряда по поверхности КС1,  $l = 10$  мм; 3 — из канала объёмного пробоя в КВг,  $d = 1$  мм; 4 — из канала объёмного пробоя в КС1,  $d = 1$  мм.

В эксперименте по объёмному пробую использовались образцы толщиной 1 мм. Было отмечено, что интенсивность высокоскоростной компоненты пучка для образцов толщиной 2 мм мало отличается от таковой в случае, когда толщ-

на образцов составляет 1 мм, но при этом интенсивность низкоскоростной компоненты заметно выше (см. Рисунок 10). Первое обстоятельство, вероятно, связано с тем, что область ускорения ионов до максимальных скоростей локализована в области вершины канала пробоя, а последнее — с тем, что истечение плазмы из канала большей длины требует больше времени.

Большая интенсивность сигнала тока от разряда по поверхности объясняется большей площадью воздействия разряда. Максимум тока для поверхностного разряда приходится на более скоростные ионы по сравнению с объёмным, что связано с меньшим размером зоны ускорения плазмы объёмного разряда. Максимум тока в случае объёмного выброса из канала в КС1 приходится на ионы со скоростями 50—80 км/с, а в случае поверхностного перекрытия 100—120 км/с. Для КВг максимумы лежат в диапазонах 50—70 км/с и 90—110 км/с.

На графиках распределения частиц по скоростям, относящихся к поверхностному перекрытию, есть два характерных пика. Один из них совпадает с максимумом тока (130 км/с для КС1 и 110—120 км/с для КВг), а другой, существенно менее интенсивный, соответствует скорости около 200 км/с для обоих веществ. Высокоскоростной пик относится к ионам водорода, который присутствует в приповерхностных слоях кристалла и в парах вакуумного масла. Основной пик относится к ионам материала диэлектрика. В низкоскоростной части спектра, вероятно, преобладают заряженные кластеры.

В спектре скоростей ионов поверхностного перекрытия по КС1 максимум тока предположительно соответствует высокозарядным ионам (К либо Cl), так как именно они ускоряются наиболее интенсивно. По данным работы [11], при поверхностном перекрытии по КС1 в сходных условиях образуются ионы с зарядовым числом вплоть до  $Z = 5$ . Для определения вклада каждого типа ионов в общий ток кривые аппроксимировались по формуле  $I = a \cdot \exp [-(V - \langle V_{ion} \rangle)^2 / 2b]$ , где  $a$  — амплитуда;  $b$  — полуширина на уровне  $a/2$ ;  $\langle V_{ion} \rangle$  — средняя скорость ионов. Пример аппроксимации показан на Рисунке 11.

В результате аппроксимации экспериментальной кривой суперпозицией гауссианов получено, что наилучшее совпадение имеет место в случае, когда максимуму тока соответствуют ионы  $K^{4+}$  (137 км/с). Значительный вклад в общий ток

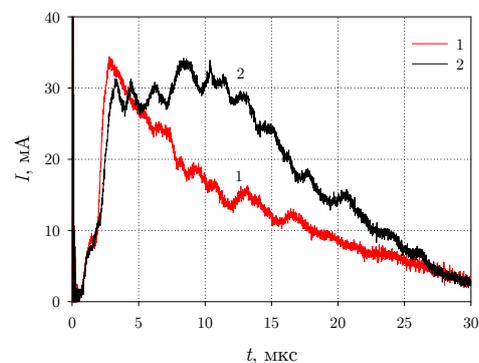


Рисунок 10 – Зависимость тока ионной компоненты пучка частиц из канала объёмного пробоя в КВг от времени: 1 — образец толщиной 1 мм; 2 — образец толщиной 2 мм.

при поверхностном перекрытии дают ионы водорода. Вклад собственно ионов материала диэлектрика в общий ток невелик (около 30%). Значительная доля среди всех ионов приходится на однозарядные ионы калия.

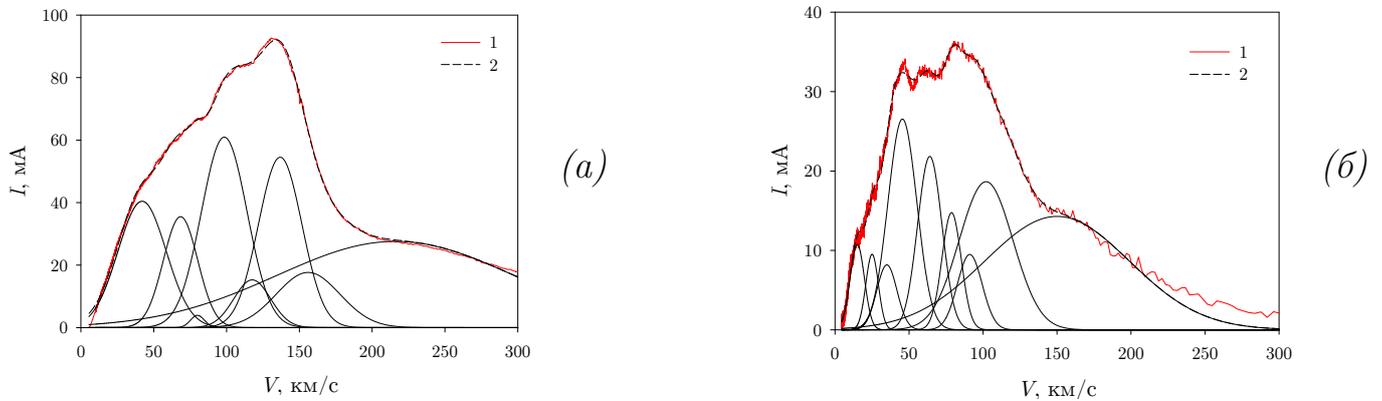


Рисунок 11 – Скоростные спектры пучков частиц, истекающих из области разряда: (а) при поверхностном перекрытии по KCl; (б) при объёмном пробое в KCl. Цифрами обозначены: 1 – экспериментальная кривая; 2 – аппроксимационная кривая.

На графиках, относящихся к выбросу плазмы из канала объёмного пробоя, можно выделить макроскопические пики в диапазоне 50–100 км/с (KCl) и 40–70 км/с (KBr). Разложение на компоненты этих спектров сделано в предположении, что как и в случае поверхностного разряда ионы калия имеют максимальную зарядность  $Z = 5$ . Подобно компонентному составу плазмы поверхностного пробоя, в случае объёмного пробоя значительную долю составляют заряженные кластеры и водород, а среди ионов материала преобладают однозарядные ионы калия (калия и хлора в случае KCl).

Оценка эффективности преобразования вещества в плазму сделана на основании соотношения убыли и количества образовавшихся ионов (из тока цилиндра Фарадея с учётом зарядовых чисел и в предположении, что диаграмма направленности узкая). По графику  $I(t)$  можно определить суммарный заряд частиц, пришедших в цилиндр, проинтегрировав сигнал тока по времени. Площади под гауссианами, аппроксимирующими экспериментальную кривую, дают заряд, приходящийся на каждый тип ионов. Разделив его на соответствующие зарядовые числа, получим число ионов данного типа. Значительную часть тока пучка обеспечивают заряженные кластеры. Для приблизительной оценки степени ионизации кластеры считаются однозарядными. Степень ионизации в плазме объёмного разряда оценивается как  $7 \cdot 10^{-5}$  для KCl и  $3 \cdot 10^{-5}$  для KBr. Для поверхностного разряда оценка степени ионизации для KCl и KBr даёт, соответственно,  $3 \cdot 10^{-4}$  и  $4 \cdot 10^{-4}$ . Таким образом, вещество в канале представляет собой частично ионизованную плазму, нейтральный газ и микрочастицы вещества.

## Основные результаты и выводы

1. Создана экспериментальная установка, позволяющая измерять характеристики процесса объёмного наносекундного пробоя жидких и твёрдых диэлектриков при воздействии на них импульсов напряжения амплитудой до 140 кВ длительностью 8 нс с временем нарастания не более 0,5 нс при начальной напряжённости поля  $E \sim 10^7$  В/см, а также измерять энергетические характеристики пучков заряженных частиц, истекающих в вакуум при давлениях до  $10^{-2}$  Па из области поверхностного либо объёмного разряда, инициированных в таких же импульсных условиях.
2. Измерены скорости развития каналов анодного пробоя для широкого класса жидких, кристаллических и гетерофазных диэлектриков при напряжении  $\sim 100$  кВ в режиме воздействия отражёнными импульсами длительностью 8 нс (до 60 отражений) при скорости нарастания напряжения  $\sim 10^{14}$  В/с. Показано, что для фторорганических жидкостей с различной структурой максимальная скорость роста канала составляет  $\sim 100$  км/с.
3. Показано, что в пористых оксидноалюминиевых нанокерамиках, пропитанных диэлектрическими жидкостями, в режиме многократных отражений импульса канал пробоя развивается медленнее, чем в сплошной керамике и монокристалле такого же химического состава, и медленнее, чем в наполняющей пористый образец жидкости в свободном состоянии. Это говорит о том, что в таком режиме собственные пробивные свойства кристаллической матрицы в составе сложного диэлектрика не имеют определяющего значения, если его толщина больше, чем толщина образца, пробиваемого одним импульсом.
4. Впервые получены картины электрического разрушения в монокристалле КСl, отражающие импульсный характер воздействия внешнего электрического поля и позволяющие делать выводы об электрофизических процессах в диэлектрике при больших скоростях изменения ( $10^{14}$  В/с) напряжения. Показано, что в режиме многократных отражений наносекундного импульса формирование канала в монокристалле происходит локально и непосредственно в момент прохождения фронта пробоя. Развитие приканального разрушения монокристаллов КСl происходит в результате воздействия плазменного сгустка, расширяющегося со скоростью 50–100 км/с.
5. В одинаковых импульсных условиях измерены скорости ионов, истекающих из канала объёмного пробоя и области вакуумного перекрытия по поверхности кристаллов КСl и КВг и показано, что в обоих случаях образуются высокоскоростные многозарядные ионы с максимальной энергией  $\sim 2$  кэВ. Наиболее вероятные скорости ионов, истекающих из головной части канала пробоя КСl и КВг в вакуум, составляют  $\sim 100$  км/с.

## Публикации автора по теме диссертации

### Публикации в рецензируемых научных изданиях, определённых ВАК:

1. *Пунанов, И.Ф.* Исследование пробоя в алюмоиттриевом гранате при субнаносекундных временах нарастания напряжения / И.Ф. Пунанов, Р.В. Емлин, А.С. Гилёв, С.О. Чолах // Физика твердого тела. 2011. Т. 53. Вып. 5. С. 875–877. (0,24 п.л. / 0,06 п.л.)
2. *Пунанов, И.Ф.* Исследование пробоя пористых керамик на наносекундных импульсах / И.Ф. Пунанов, Р.В. Емлин, П.А. Морозов, С.О. Чолах // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55. Вып. 2. С. 57–60. (0,36 п.л. / 0,09 п.л.)
3. *Punarov, I.F.* Measurement of Pre-Breakdown Current in Alkali-Halide Monocrystals Under Nanosecond Pulsed Voltage Conditions / I.F. Punarov, R.V. Emlin, V.D. Kulikov, S.O. Cholakh // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55. Вып. 12/3. С. 48–52. (0,48 п.л. / 0,12 п.л.)
4. *Punarov, I.F.* Investigation of Parameters of Plasma in Nanosecond Breakdown Channels in Alkali-Halide Single Crystals / I.F. Punarov, R.V. Emlin, P.A. Morozov, S.O. Cholakh // Proceedings of the 19th IEEE Pulsed Power Conference and the 40th International Conference on Plasma Science — PPS 2013, June 16–21, 2013, San Francisco, CA, USA. P. 790–793. (0,36 п.л. / 0,09 п.л.)
5. *Morozov, P.A.* Measurement of Parameters of Particle Beams Generated by High-Voltage Surface Vacuum Discharge in Coaxial and Linear Electrode Geometry / P.A. Morozov, I.F. Punarov, R.V. Emlin, A.S. Gilev // IEEE Transactions on Plasma Science. 2013. Vol. 41. Issue 8. Part 2. P. 2145–2149. (0,60 п.л. / 0,15 п.л.)
6. *Пунанов, И.Ф.* Сопротивление канала импульсного электрического пробоя в ионных кристаллах / И.Ф. Пунанов, Р.В. Емлин, А.С. Гилёв, С.О. Чолах // Журнал технической физики. 2014. Т. 84. Вып. 4. С. 35–39. (0,60 п.л. / 0,15 п.л.)
7. *Punarov, I.F.* Comparison of ion velocity spectra of plasma bunches ejecting from the channels of nanosecond breakdown and vacuum surface flashover in KCl single crystals / I.F. Punarov, R.V. Emlin, P.A. Morozov, S.O. Cholakh / Abstracts of the 41st IEEE International Conference on Plasma Sciences and the 20th International Conference on High-Power Particle Beams — ICOPS/BEAMS 2014, May 25–29, 2014, Washington, DC, USA. P. 1. (0,06 п.л. / 0,02 п.л.)
8. *Punarov, I.F.* Measurement of Ion Concentration in Plasma Bunches of Nanosecond Vacuum Surface Flashover at 140 kV / I.F. Punarov, R.V. Emlin, P.A. Morozov, S.O. Cholakh // Proceedings of the 21st IEEE International Pulsed Power Conference — PPC 2015, 31 May — 4 June 2015, Austin, TX, USA. P. 1–3. (0,30 п.л. / 0,08 п.л.)

### Другие публикации

9. *Пунанов, И.Ф.* Измерение времён формирования каналов наносекундного импульсного пробоя жидких диэлектриков при напряжении 140 кВ / И.Ф. Пунанов, Р.В. Емлин, А.С. Гилёв // Материалы 15-й Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых учёных (ВНКСФ–15), г. Кемерово, г. Томск, 26 марта — 2 апреля 2009 г. — Кемерово: Издательство АСФ России, 2009. С. 256–257. (0,24 п.л. / 0,08 п.л.)

10. *Пунанов, И.Ф.* Исследование наносекундного импульсного пробоя жидких фторорганических диэлектриков / И.Ф. Пунанов, Р.В. Емлин, Н.М. Левин // Тезисы юбилейной научно-практической конференции ФТФ–60 «Инновационные технологии в атомной энергетике и смежных областях», г. Екатеринбург, 16–17 апреля 2009 г. — Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2009. С. 48–49. (0,18 п.л. / 0,06 п.л.)
11. *Пунанов, И.Ф.* Измерение времён формирования каналов наносекундного импульсного пробоя фторорганических жидкостей при напряжениях 140 кВ / И.Ф. Пунанов, А.С. Гилёв // Тезисы Юбилейной X Всероссийской школы-семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества, г. Екатеринбург, 9–15 ноября 2009 г. — Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2009. С. 220. (0,12 п.л. / 0,06 п.л.)
12. *Пунанов, И.Ф.* Исследование пробоя монокристаллов  $Y_3Al_5O_{12}$  импульсами наносекундной длительности / И.Ф. Пунанов, Р.В. Емлин, А.С. Гилёв // Материалы 16-й Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых учёных (ВНКСФ–16), г. Волгоград, 22–29 апреля 2010 г. — Волгоград: Издательство АСФ России, 2010. С. 267–268. (0,12 п.л. / 0,03 п.л.)
13. *Emlin, R. V.* Pulse Electrical Breakdown in Crystalline Quartz and Yttrium-Aluminum Garnet / R.V. Emlin, A.S. Gilev, I.F. Punanov, V.D. Kulikov, S.O. Cholakh // Proceedings of the 10th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. — Tomsk: Publishing House of the IOA SB RAS, 2010. P. 166–169. (0,54 п.л. / 0,11 п.л.)
14. *Пунанов, И.Ф.* Исследование образования плазмы в каналах высоковольтного наносекундного пробоя в щёлочно-галогидных кристаллах / И.Ф. Пунанов, Р.В. Емлин, П.А. Морозов, С.О. Чолах // Материалы 19-й Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых учёных (ВНКСФ–19), г. Архангельск, 28 марта — 4 апреля 2013 г. — Архангельск: Издательство АСФ России, 2013. С. 168. (0,12 п.л. / 0,04 п.л.)
15. *Punanov, I.F* Investigation of Parameters of Plasma in Nanosecond Breakdown Channels in Alkali-Halide Single Crystals / I.F. Punanov, R.V. Emlin, S.O. Cholakh // Abstracts of the 19th IEEE Pulsed Power Conference and the 40th International Conference on Plasma Science — PPPS 2013, June 16–21, 2013, San Francisco, CA, USA. P. 331. (0,06 п.л. / 0,02 п.л.)
16. *Пунанов, И.Ф.* Измерение параметров плазмы в каналах наносекундного пробоя в хлориде калия / И.Ф. Пунанов // Тезисы XIV Всероссийской школы-семинара по проблемам физики конденсированного состояния вещества, г. Екатеринбург, 20–26 ноября 2013 г. — Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2013. С. 199. (0,06 п.л. / 0,06 п.л.)
17. *Пунанов, И.Ф.* Спектры скоростей ионов в плазменном потоке при объёмном пробое и поверхностном перекрытии хлорида калия / И.Ф. Пунанов, Р.В. Емлин // Материалы 20-й Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых учёных (ВНКСФ–20), г. Ижевск, 27 марта — 3 апреля 2014 г. — Ижевск: Издательство АСФ России, 2014. С. 221–222. (0,12 п.л. / 0,06 п.л.)
18. *Пунанов, И.Ф.* Исследование ионного состава пучков наносекундного вакуумного перекрытия диэлектриков при 140 кВ / И.Ф. Пунанов, Р.В. Емлин // Материалы 21-й Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых учёных (ВНКСФ–21), г. Омск, 26 марта — 2 апреля 2015 г. — Омск: Издательство АСФ России, 2015. С. 228–229. (0,06 п.л. / 0,03 п.л.)

## Цитируемая литература

- [1] *Шпак, В.Г. (ред.)* Электрофизика на Урале: четверть века исследований / В.Г. Шпак и др. — Екатеринбург: Издательство УрО РАН, 2011. — 456 с.
- [2] *Вершинин, Ю.Н.* Электронно-тепловые и детонационные процессы в диэлектриках / Ю.Н. Вершинин — Екатеринбург: УрО РАН, 2000. — 260 с.
- [3] *Ушаков, В.Я.* Пробой жидкостей при импульсном напряжении / В.Я. Ушаков, В.Ф. Климин, С.М. Коробейников, В.В. Лопатин. — Томск: Издательство научно-технической литературы, 2005. — 488 с.
- [4] *Месяц, Г.А.* Импульсная энергетика и электроника / Г.А. Месяц. — Москва: Наука, 2004. — 704 с.
- [5] *Куликов, В.Д.* Электрический пробой ионных кристаллов / В.Д. Куликов // Журнал технической физики. — 2009. — Т. 79, №1. — С. 60–65.
- [6] *Емлин, Р.В.* Способ определения тока формирования канала высоковольтного пробоя в кристаллических диэлектриках по зависимости скорости формирования канала от напряжения. Патент РФ № 2108592 на изобретение от 10.04.1998 г.
- [7] *Вершинин, Ю.Н.* Электрический пробой твёрдых диэлектриков / Ю.Н. Вершинин. — Новосибирск: Издательство «Наука», Сибирское отделение, 1968. — 212 с.
- [8] *Вершинин, Ю.Н.* Импульсный электрический разряд в твёрдых диэлектриках с точки зрения физики высоких плотностей энергии / Ю.Н. Вершинин // Материалы международной научно-технической конференции по физике твёрдых диэлектриков «Диэлектрики — 97», 24–27 июня 1997, Санкт-Петербург — СПб.: Издательство СПбГТУ, 1997. — С. 147–148.
- [9] *Winkler, S.* Crack Propagation at Supersonic Velocities I / S. Winkler, D.A. Shockey, D.R. Curran // International Journal of Fracture Mechanics. — 1970. — Vol. 6, № 2. — P. 151–158.
- [10] *Curran, D.R.* Crack Propagation at Supersonic Velocities II. Theoretical Model / D.R. Curran, D.A. Shockey, S. Winkler // International Journal of Fracture Mechanics. — 1970. — Vol. 6, № 3. — P. 271–278.
- [11] *Барахвостов, С. В.* Параметры плазмы при наносекундном пробое и капиллярном разряде в твёрдом диэлектрике / С.В. Барахвостов, И.Л. Музюкин // Журнал технической физики. — 2009. — Т. 79, № 5. — С. 29–32.

---

Подписано в печать \_\_\_\_\_.2017. Формат 60 × 84/16

Бумага \_\_\_\_\_ Печать \_\_\_\_\_ Усл. печ. л. 1,0

Заказ № \_\_\_\_\_ Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии ООО «Издательство УМЦ УПИ»

620062, г. Екатеринбург, ул. Гагарина, 35а, офис 2