

На правах рукописи

Шемякин Илья Александрович

ПРЕДПРОБОЙНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЕ ИМПУЛЬСНЫХ
РАЗРЯДОВ В СИЛЬНОТОЧНЫХ КОММУТАТОРАХ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ С
ХОЛОДНЫМ КАТОДОМ

05.27.02 – вакуумная и плазменная электроника

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Томск – 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской Академии Наук
Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН

Научный консультант: доктор физико-математических наук
профессор
Королев Юрий Дмитриевич.

Официальные оппоненты: доктор физико – математических наук,
профессор
Лисицын Виктор Михайлович

доктор технических наук, профессор
Окс Ефим Михайлович

доктор физико – математических наук,
старший научный сотрудник
Сухинин Геннадий Иванович

Ведущая организация: Институт Электрофизики
Уральского Отделения РАН

Защита состоится 11 ноября 2011 года в 15 часов на заседании
диссертационного совета Д 003.031.01 в Институте сильноточной
электроники СО РАН (634055, г. Томск, пр. Академический 2/3).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института сильноточной
Электроники

Автореферат разослан « » _____ 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор

В. В. Рыжов

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Известно, что изучение предпробойных явлений и пробоя является традиционным разделом физики газового разряда, так как позволяет получить информацию как о фундаментальных процессах, протекающих в плазме, так и имеет широкое прикладное значение. Исследование этих явлений в электродных системах с холодным катодом в газах низкого давления было инициировано потребностью импульсной энергетики в сильноточных коммутаторах. К концу 70-х годов создание электрофизических установок для медицины и нефтедобычи, z-пинча и плазменного фокуса, развитие класса эксимерных лазеров и т. д. потребовало разработки промышленных, экологически чистых разрядников, коммутирующих импульсы тока амплитудой десятки и сотни килоампер в микро и наносекундном диапазоне. С нашей точки зрения, максимальной совокупностью полезных свойств обладали водородные тиратроны, в которых коммутация тока осуществлялась плотным тлеющим разрядом низкого давления с термокатодом. Однако, приборы обладали недостатком заключающемся в ограничении величины коммутируемого тока термокатодом. Это стимулировало исследования связанные с поиском и изучением форм разрядов низкого давления с холодным катодом и разработке нового класса коммутаторов.

Исследования проводились **А. Гюнтершульце, В. Л. Грановским, Б. И. Москалевым, И. И. Бакалейником, А. В. Арефьевым и др.** Первой работой, в которой были опубликованы результаты о сильноточном импульсном тлеющем разряде, по-видимому, следует считать статью **Л. Ю. Абрамовича, Б. Н. Клярфельда и др.** (ЖТФ. – 1966. – Т. 36. – Вып. 4. – С. 714). Описывался разряд при плотности тока до 50 А/см^2 , названный сверхплотным тлеющим и делалась попытка объяснить механизм аномально высокой эмиссии с катода. Исследования позволили **И. И. Бакалейнику** (Электронная техника сер. 3 "Газоразрядные приборы". – 1971. – Т. 16. – № 2(22). – СС. 69 – 74) и **А. В. Вишневному** (Авторское свид. СССР № 505052 // Бюллетень Изобретений – № 8 – 20.02.1976) создать макеты разрядников с холодным катодом, однако работы не получили развития.

Параллельно с этим, в ОКБ Вега, НИИ Газоразрядных приборов г. Рязань и в корпорации EGG, США проводились работы по модификации тиратронов. В конце 80-х годов появились первые макеты "тиратронов с заземленной сеткой" где присутствовали элементы разрядников с холодным катодом.

В 1979 году **Д. Кристиансен** исследовал разряд в ионизационных камерах (Z. Physik A. – 1979. – vol. 290. – PP. 35 – 41). Электродная система представляла собой полые катод и анод, соединенные отверстиями, а расстояние между электродами,

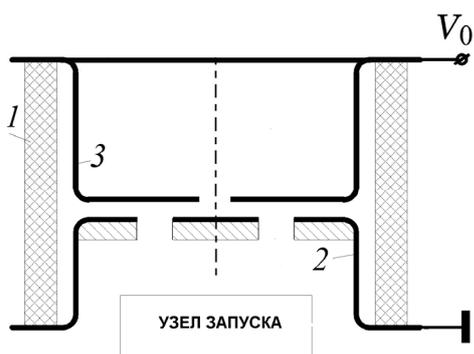


Рис.1. Электродная система для зажигания сильноточного импульсного разряда низкого давления с полым катодом (псевдоискрового разряда).
1—изолятор, 2, 3—электроды.

запуска (рис. 1), основанный на различных видах импульсных разрядов. Сконфигурированный таким образом прибор получил за рубежом название псевдоискрового разрядника (pseudospark switch) или back light thyratrons. Иногда приборы так же называли тиратронами с заземленной сеткой. Заметим, что термин “псевдоискровой” разряд являлся ни физически корректным, ни исторически приоритетным. Действительно подобный тип разряда еще в 1966 г. наблюдал **Б. Н. Клярфельд**, а макеты коммутаторов, подобного типа, еще раньше в нашей стране разработали **И. И. Бакалейник** и **А. В. Вишневский**.

С нашей точки зрения, псевдоискровой разряд правильно идентифицировать как *сильноточный импульсный разряд низкого давления с полым катодом*, а разрядники, созданные на его основе, как *разрядники низкого давления с холодным катодом*. Однако, так как термин псевдоискровой разряд и псевдоискровой разрядник стали устоявшимися, мы будем пользоваться ими наряду с указанными выше.

Изучение разряда, проведенные **Д. Кристиансенсом**, **К. Франком**, **Г. Мехтершиммером** и др. показало, что он обладает рядом замечательных свойств. Скорость нарастания тока достигала величины 10^{12} А/с при времени запаздывания пробоя менее ста наносекунд. Эрозия поверхности катода была незначительна. В результате этого за границей появились первые макеты псевдоискровых разрядников (например J. Phys. E: Sci. Instrum. – 1986. – Vol. 19 – PP. 466 – 470).

Однако приборы обладали рядом недостатков. Они плохо выдерживали зарядное напряжение, имели высокие стартовые потери, а для запуска требовались импульсы напряжения высокой амплитуды и т.д. Вследствие этого на начало постановки настоящей работы, (к началу 90 – х годов) еще не существовало промышленных образцов псевдоискровых разрядников. С нашей точки зрения, это было обусловлено тем, что имеющийся экспериментальный и теоретический материал, касающийся механизмов зажигания как псевдоискрового разряда, так и разрядов, инициирующих

приложенное к ним напряжение и давление газа соответствовали пробоя в левой ветви кривой Пашена (рис. 1). Наблюдались разряды похожие на искру. Так как традиционно считалось, что искровой разряд развивается в газе высокого давления, разряд получил название псевдоискровой (pseudospark discharge).

Разряд мог развиваться в результате статического пробоя и при принудительном инициировании. В последнем случае в 2 размещался узел

его развитие, был недостаточен и часто противоречив. Так, не хватало данных о зависимости времени запаздывания развития пробоя в основном промежутке от амплитуды и полярности приложенного напряжения, давления газа, интенсивности предионизации и т. д., что в свою очередь не позволяло адекватно описать механизм формирования и развития разряда. Непонятны были причины, приводящие к снижению напряжения статического пробоя, что не давало возможность нивелировать данный эффект. Неясен был механизм инициирования разряда, что не позволяло оптимизировать параметры триггерных разрядов и т. д.

Сказанное позволяет определить предмет диссертации, как *предпробойные явления, пробой и процесс развития импульсных разрядов низкого давления в высокоточных коммутаторах с холодным катодом и заключить, что актуальность работы обусловлена широким использованием результатов исследования при разработке нового класса высокоточных коммутаторов.*

Как будет показано, особенностью зажигания рассматриваемых разрядов является факт, что протекание тока происходит в условиях, когда характерная длина разрядного промежутка меньше длины свободного пробега электрона в реакции ионизации и, в отличие от разрядов высокого давления, развитие электронных лавин в принципе невозможно. Будут рассмотрены различные формы разрядов при статическом пробое и принудительном инициировании, в воздухе, азоте, кислороде и ксеноне при давлениях $p = 10^{-1} - 10^{-5}$ Тор, межэлектродных зазорах $d \approx 0,1 - 10$ см, токах $i \approx 10^{-3} - 10^5$ А и длительностях от десятков наносекунд до микросекунд.

Цель и задачи работы.

Цель работы состояла в получении данных касающихся процесса зажигания импульсных разрядов низкого давления и последующего применения полученных результатов для разработки промышленных образцов высокоточных коммутаторов с холодным катодом нового поколения. *Были поставлены следующие задачи:*

- применительно к проблеме высокоточной коммутации провести исследование свойств импульсных разрядов низкого давления с полым холодным катодом, включающее в себя получение экспериментальных данных о предпробойных явлениях, характере процесса пробоя и последующем развитии разрядов;
- построить модели, описывающие полученные экспериментальные данные;
- на основе проведенных исследований сформулировать физические принципы функционирования высокоточных разрядников низкого давления с холодным катодом (псевдоискровых разрядников), позволяющие разработать новый класс промышленных приборов;

- для расширения области применения и улучшения характеристик псевдоискровых разрядников провести испытание прототипов приборов и промышленных образцов.

На защиту выносятся следующие положения.

1. На начальной стадии вакуумного пробоя в длинных промежутках, при принудительном иницировании катодного пятна формируется следующая структура: плазма катодного пятна; плазма катодного факела, характеризующаяся спадающим потенциалом; двойной слой между плазмами пятна и факела; столб разряда. В двойном слое и катодном факеле ионизуются пары материала катода. При этом ионы,двигающиеся к катоду, ускоряются в двойном слое, а ионный поток к аноду возникает за счет ускорения ионов в области спада потенциала в катодном факеле. Высокая проводимость столба обусловлена компенсацией объемного заряда электронов зарядом ионов, движущихся к аноду. Обрывы тока связаны с разрушением области немонотонного распределения потенциала в двойном слое и катодном факеле.

2. Зажигание газового разряда низкого давления при иницировании пучком электронов происходит, когда со стороны катода распространяется интенсивный поток электронов и концентрация газа превышает критическую. На стадии запаздывания пробоя вблизи анода возникает область немонотонного распределения потенциала, в которой происходит ионизация газа осциллирующими электронами. Столб разряда формируется при распространении плазмы от анода к катоду. Время запаздывания пробоя не зависит от напряжения, приложенного к зазору и резко возрастает при концентрации газа стремящейся к критической.

3. Зажигание в полном катоде псевдоискрового разрядника разряда низкого давления с принудительным иницированием катодного пятна и тлеющего разряда с токами единицы ампер приводит к пробое в основном промежутке с временем запаздывания менее 200 нс. Использование узла иницирования катодного пятна на основе пробоя по поверхности полупроводника и организация тлеющего разряда путем переключения тока из системы вспомогательных электродов на полый катод, позволяет получать указанные времена запаздывания относительно начала запускающего импульса при его амплитуде менее полутора киловольт.

4. Механизм формирования псевдоискрового разряда при статическом пробое аналогичен случаю пробоя при принудительном иницировании пучком электронов. При этом поток электронов в разрядный промежуток обеспечивается предпробойными токами, усиленными вследствие эффекта полого катода. Увеличение напряжения статического пробоя обусловлено, подавлением эффекта полого катода и, соответственно, уменьшением предпробойных токов. Это может быть достигнуто либо уменьшением размеров области внутри полого катода, где

происходит осциллирующее движение и размножение электронов, либо искусственным экстрагированием зарядов из данной области на вспомогательный электрод.

5. В электродной системе псевдоискрового разрядника полость, образованная стенками отверстия в катоде, играет роль полого катода. Основным процессом рождения заряженных частиц в полости является ионизация газа электронами, стартовавшими с поверхности и ускоренными в катодном слое. Плотность тока на катоде, при которой происходит переход от плотного к сверхплотному тлеющему разряду, возрастает с уменьшением атомного веса газа. Смена форм горения обусловлена возникновением взрывоэмиссионных процессов на поверхности катода

6. Сформулированы принципы функционирования псевдоискровых разрядников, позволившие разработать промышленные образцы нового класса отпаянных высоковольтных коммутаторов с холодным катодом серий TDI и TPI и впоследствии улучшить их характеристики. Приборы позволяют коммутировать токи в диапазоне от единиц до сотен килоампер в микро и наносекундном диапазоне времен при анодном напряжении до 50 кВ, и допускают подачу на высоковольтный электрод напряжения отрицательной полярности. Разрядники допускают реверс тока и обладают наносекундной стабильностью срабатывания при низкой амплитуде импульсов запуска около 1 кВ и ресурсе до 10^6 Кл. Приборы могут работать в режиме параллельной коммутации.

Достоверность результатов работы.

Достоверность полученных результатов подтверждается систематическим и комплексным характером исследования, позволившим получать данные путем использования различных экспериментальных методик исследования плазмы. Используемые методы включали в себя измерения энергетических и спектральных характеристик, регистрацию эволюции образа разряда с высоким пространственно – временным разрешением, определение параметров плазмы с помощью методов спектральной диагностики и т. д. Кроме того, достоверность результатов подтверждается согласием экспериментальных данных с теорией.

Научная новизна.

1. Показано, что характер процесса зажигания разрядов низкого давления при принудительном инициировании катодного пятна в диапазоне токов $i = 10 - 10^4$ А в системах с межэлектродными зазорами порядка десяти сантиметров и начальных напряжениях существенно превышающих пробивное, определяется давлением и типом газа в промежутке. При низких давлениях наблюдаются колебания напряжения горения и обрывы тока, а при превышении давления газа некоторой критической величины спад напряжения на промежутке происходит монотонно.

2. Предложен механизм токопереноса при вакуумном пробое в случае принудительном иницировании катодного пятна, основанный на концепции немонотонного распределения потенциала в прикатодной области.

3. Показано, что для иницирования газовых разрядов низкого давления пучком электронов необходимо наличие интенсивного потока электронов и концентрации газа, превышающей критическую. Механизм формирования разряда обусловлен ионизацией атомов остаточного газа, накоплением в промежутке избыточного положительного заряда, возникновением вблизи анода области "горба" потенциала и последующим распространением плазмы к катоду.

4. Сделан вывод, что формирование псевдоискрового разряда в случае статического пробоя происходит аналогично случаю принудительного иницирования. При этом электронный ток в разрядный промежуток обеспечивается предпробойными токами, усиленными вследствие эффекта полого катода

5. Предложен способ иницирования пробоя в псевдоискровом разряднике, основанный на переключении тлеющего разряда, горящего в системе вспомогательных электродов на основной катод.

6. Показано, что, псевдоискровой разряд может гореть в сложных, комбинированных, изменяющихся во времени формах.

7. Показано, что величина плотности разрядного тока на катоде, при которой происходит переход от плотного тлеющего разряда к сверхплотному падает с ростом атомного веса газа. Переход обусловлен взрывоэмиссионными процессами на катоде.

8. Представлен механизм токопереноса и ввода энергии в плазму, находящуюся в отверстии в полой катоде, в стадиях плотного и сверхплотного тлеющего разрядов.

Научно-практическая значимость.

1. Сформулированы принципы функционирования псевдоискровых разрядников, на основе которых в России впервые разработан новый класс промышленных сильноточных разрядников низкого давления с холодным катодом.

2. На отпаянных прототипах коммутаторов и промышленных образцах разрядников проведены исследования, позволившие существенно улучшить характеристики приборов и расширить диапазон их работы.

Личный вклад автора.

В представленных в диссертационной работе результатах автор внес определяющий вклад в постановку задач, проведение экспериментальных исследований и анализ полученных результатов. Теоретическая работа проводилась совместно с Ю. Д. Королевым и А. В. Козыревым. Исследования свойств разрядов осуществлялись вместе с сотрудниками лаборатории низкотемпературной плазмы Института Сильноточной Электроники СО РАН О. Б. Францем, К. А. Клименко.

В. Г. Работкиным, А. В. Болотовым, В. Г. Гейманом и Н. В. Ландлем. Разработка методики диагностики плазмы на основе методов эмиссионной спектроскопии осуществлялась автором единолично, а спектроскопические исследования проводились совместно с Н. В. Кондратьевой и сотрудниками Института Физики Университета Эрланген – Нюрнберг (Германия) К. Франком и Ю. Урбаном. Испытание прототипов псевдоискровых разрядников проводилось совместно с изготовителем приборов В. Д. Бочковым, О. Б. Францем, К. Франком и Ю. Урбаном. Фамилии других соавторов, принимавших участие в отдельных направлениях исследований, указаны в списке публикаций по теме диссертации. Все результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично.

Публикации и апробация результатов.

Основные результаты, представленные в диссертации, были получены за период с 1989 по 2009 годы и опубликованы в 53 работах, из них 20 в рецензируемых журналах. По результатам исследований сделано 40 докладов на следующих конференциях, симпозиумах и семинарах.

- XI Всесоюзная конференция по генераторам низкотемпературной плазмы (г. Новосибирск, 1989 г.).
- XV, XVI, XVII, XVIII, XIX, XXI и XXII Международные симпозиумы по разрядам и электрической изоляции в вакууме (г. Дармштадт, 1992, гг. Москва – С. Петербург, 1994г., г. Беркли, 1996 г., г.Эйндховен, 1998 г., г. Ксиан, 2000 г., г. Ялта, 2004 г. г. Матсусе, 2006 г.);
- Третья Международная конференция по электрическим контактам, дугам и их применению (г. Ксиан, 1997 г.);
- V Всесоюзная конференция по физике газового разряда (г. Омск,1990);
- XX, XXII и XXIV Международные конференции по явлениям в ионизованных газах (г. Пиза, 1991 г., г. Хобокен, 1995 г., г. Варшава, 1999 г.);
- III Международная Конференция по z – пинчам (г. Лондон, 1993 г.);
- VI, VII, VIII, IX и X Всероссийские конференции по физике газового разряда (г. Казань, 1992 г., г. Самара, 1994 г., г. Рязань, 1998, 2000, 2002 гг.);
- Международные конференции по физике низкотемпературной плазмы (г. Петрозаводск, 1995, 1998, 2001 гг.);
- VI и VII Международные Конференции по модификации поверхности пучками частиц и потоками плазмы (г. Томск, 2002, 2004 гг.);
- XII Международная конференция высоких мощностей (г. Монтерей, 1999 г.);
- XV Международный симпозиум по сильноточной электронике (г. Томск, 2008 г.);

- IV Международная конференция по физике плазмы и плазменным приложениям (г. Минск, 2003 г.);
- Международная Конференция по мощным модуляторам (г. Голливуд, 2002 г.).

Структура диссертации.

Диссертация выполнена на 296 листах и состоит из расширенного введения, шести оригинальных глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 34 таблицы и 88 рисунков, а список литературы составляет 185 наименований. В начале каждой из глав приведен обзор и сформулированы задачи, которые будут решаться в соответствующем разделе, а в конце – выводы.

Краткое содержание работы

Во введении представлены актуальность работы, предмет, цель, основные задачи исследований и сформулированы защищаемые положения.

Первая глава посвящена исследованию процесса зажигания разрядов низкого давления с принудительным иницированием катодного пятна. Проводится обзор литературы. Рассматриваются разряды в N_2 , He, Xe, длительностью $t \approx 10$ мкс, в системах с полым анодом и межэлектродным зазором $d \approx 10$ см. Давление газа $p \approx 10^{-3} - 10^{-6}$ Тор, начальное напряжение, существенно превышает напряжение горения разряда, а ток $i \approx 10 - 10^4$ А. Изучается динамика развития разрядов, и исследуются потоки ионов, из прикатодных областей.

К моменту времени $t < 1$ мкс после иницирования, ток достигает значения, существенно превышающего Ленгмюровский, а в промежутке формируется структура: катодное пятно, факел с размером существенно меньше размера промежутка и столб. В процессе горения структура изменяется слабо. Факты противоречат механизму зажигания разряда, основанному на представлении о свободном разлете плазмы катодного пятна.

При $p \approx 10^{-5}$ Тор, на основе эффекта Доплера были проведены измерения скоростей ионов материала катода, распадающихся из области катодного факела. Были обнаружены ионы двигающихся в сторону катода и анода со скоростями до $2 \cdot 10^6$ см/с. Это позволило заключить, что в области катодного факела и вблизи его распределение потенциала имеет немонотонный вид и измерить высоту "горба".

Характер процесса зажигания разряда определяется давлением газа. При низких давлениях наблюдаются колебания напряжения горения и обрывы тока, а при превышении давления некоторой критической величины, спад напряжения происходит монотонно. Введем критическое давление p_{cr} и концентрацию n_{cr} , при превышении которых основную роль в формировании разряда играет газ. При $p > p_{cr}$

имеем газовый разряд, при $p \leq p_{cr}$ вакуумный. Рассмотрим полученные результаты на основе концепции о немонотонном распределении потенциала.

Вакуумный разряд. На рис. 2 схематически представлено распределение потенциала по длине промежутка и структура разряда после его формирования. В области $(0 - x_m)$, включающей в себя катодный слой и катодный факел распределение

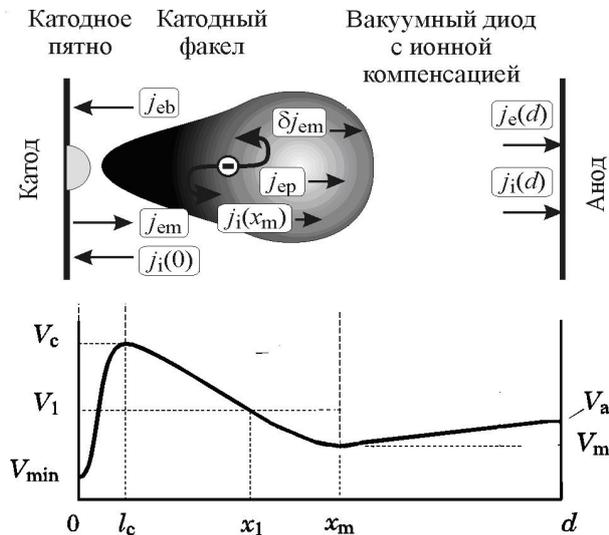


Рис. 2. Качественная картина распределения потенциала по длине промежутка и его структура в случае вакуумного разряда.

потенциала немонотонно. Катодное падение потенциала V_c превышает напряжение горения разряда V_a и сосредоточено на длине l_c . Область $(0 - x_m)$ представляет собой потенциальную ловушку для электронов, стартовавших с катода и потерявших при столкновениях энергию более чем eV_m . За счет их осциллирующего движения обеспечивается наработка плазмы. Оставшаяся часть зазора представляет собой столб разряда (вакуумный диод с ионной компенсацией). С катода в плазму поступает поток нейтральных атомов, которые могут ионизоваться в области $(0 - x_m)$. Если ионизация атомов произошла на длине l_c , то они возвращаются на катод в виде ионов, создавая ионный ток $j_i(0)$. Если же ионизация происходит в промежутке $l_c - x_1$, то ионы могут достигать анода, создавая поток j_i . Плотность тока на катоде определяется током эмиссии j_{em} , обратным током электронов j_{eb} и током ионов $j_i(0)$. В сечении x_m плотность тока обеспечивается долей эмиссионного тока δj_{em} , током электронов из плазмы j_{ep} и током ионов $j_i(x_m)$, родившихся внутри $l_c - x_1$.

Расчеты показывают, что время формирования данной структуры находится на уровне сотен наносекунд, что совпадает с экспериментом и позволяет объяснить малые времена зажигания. Кроме того, хорошая компенсация отрицательного объемного заряда в области столба разряда за счет потока ионов из области факела, дает возможность понять способность вакуумного разряда пропускать большие токи.

Идеология позволяет на качественном уровне объяснить явление обрыва тока. Увеличение полного тока во внешней цепи должно сопровождаться увеличением потока электронов из плазмы j_{ep} через плоскость x_m (рис. 2), т. е. снижением потенциального барьера $e(V_c - V_m)$. При достижении критического тока происходит полное разрушение барьера и ситуация в промежутке резко изменяется, так как исчезают условия поддержания плазмы в области $0 - x_m$ и компенсации тока в

области $(0 - x_m)$, включающей в себя катодный слой и катодный факел распределение потенциала немонотонно. Катодное падение потенциала V_c превышает напряжение горения разряда V_a и сосредоточено на длине l_c . Область $(0 - x_m)$ представляет собой потенциальную ловушку для электронов, стартовавших с катода и потерявших при столкновениях энергию более чем eV_m . За счет их осциллирующего движения обеспечивается наработка плазмы. Оставшаяся часть зазора представляет собой столб разряда (вакуумный диод с ионной компенсацией). С катода в плазму

катодном слое в области вакуумного диода. В результате V_a возрастает. Рис. 3 иллюстрирует представленный механизм. Приведены осциллограммы тока, и поведение интенсивности свечения различных областей разряда во времени. Момент времени, соответствующий обрыву тока, отмечен пунктиром. Видно, что поведение интенсивности из различных областей разряда отличается друг от друга. В процессе, как нарастания тока, так и его обрыва, интенсивность излучения из катодного пятна и столба не претерпевает существенных изменений. Иная ситуация наблюдается в катодном факеле. До обрыва тока в поведении интенсивности излучения наблюдаются колебания и, непосредственно при обрыве, интенсивность резко падает, что говорит о деградации плазмы катодного факела.

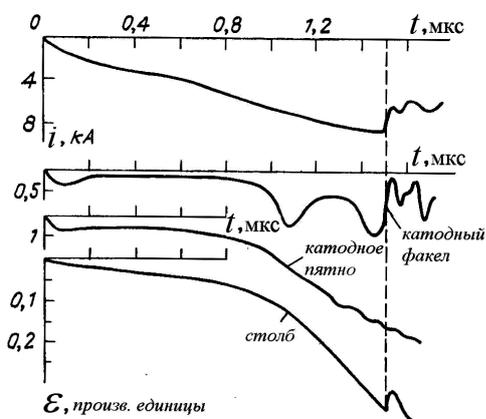


Рис.3. Осциллограммы тока разряда и поведение интенсивности свечения различных областей промежутка во времени.

Азот, $p = 2 \cdot 10^{-5}$ Тор; $V_0 = 8$ кВ

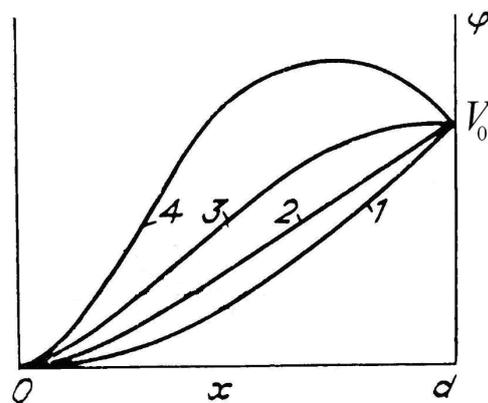


Рис. 4 Качественный вид распределения потенциала при различных плотностях газа в промежутке.

1 – случай вакуумного диода, 2 – распределение потенциала искаженное за счет объемного заряда положительных ионов, 3 – $n = n_{cr}$, 4 – $n > n_{cr}$

Газовый разряд. Увеличение давления газа способствует тому, что часть пучка электронов, стартующего с катода, производит ионизацию газа. Если плотность тока пучка равна или превышает плотность соответствующую закону "3/2" в промежутке накапливается объемный заряд положительных ионов, плотность тока возрастает и, электрическое поле искажается (рис. 4). При значении $n = n_{cr}$ производная потенциала на аноде становится равной нулю (кривая 3), а плотность тока почти на порядок превышает плотность, соответствующую закону "3/2". При $n > n_{cr}$ распределение потенциала в прианодной области становится немонотонным. В результате осцилляции электронов, возле анода происходит ионизация газа и возникает плазма, распространяющаяся в сторону анода. Время формирования разряда t_{ϕ} станет определяться скоростью данного процесса.

Расчеты, сделанные на основе стационарной теории, позволяют вычислить значения n_{cr} или p_{cr} и t_{Φ} и сравнить их с экспериментальными значениями. Результаты для критических давлений представлены в таблице 1. Для гелия и азота эксперимент дает $t_{\Phi,exp} = 0,6 \cdot 10^{-6}$ с, и 10^{-6} с, а расчет $t_{\Phi} = 0,46 \cdot 10^{-6}$ с и $1,2 \cdot 10^{-6}$ соответственно. Налицо неплохое соответствие.

Таблица 1. Экспериментальные и рассчитанные значения критических давлений.

газ	гелий	азот	ксенон
$p_{cr,exp}, \text{Тор}$	$(2-5) \cdot 10^{-3}$	$(3-4) \cdot 10^{-4}$	$(5-6) \cdot 10^{-5}$
$p_{cr}, \text{Тор}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$

Во второй главе представлены результаты, касающиеся процессов, в стадии запаздывания развития пробоя, свойств и механизма формирования псевдоискрового

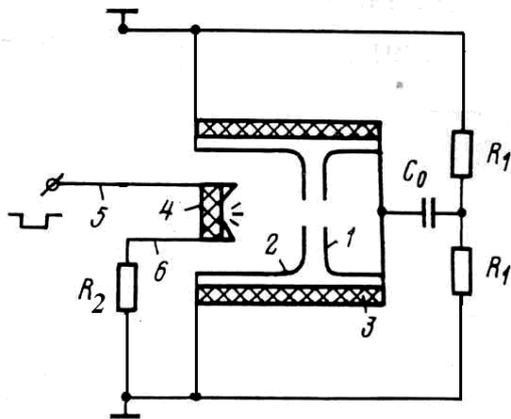


Рис. 5. Схема контура и изображение конструкции камеры. 1, 2 – основные электроды, 3 – корпус, 4 – керамический изолятор, 5, 6 – триггерные электроды, $R_2 = 50$ Ом, $R_1 = 1$ Ом

разряда при принудительном инициировании. Рассматриваются разряды в, N_2 и He при давлении $p = 10^{-1}-10^{-3}$ Тор, начальных напряжениях $V_0 \leq 20$ кВ и токах $i \leq 15$ кА. Использовалась камера представленная на рис. 5. Узел инициирования разряда располагался внутри электрода 2 на оси разрядной камеры. Инициирование разряда происходило в результате прикладывания к электроду 5 импульса напряжения с, амплитудой $V_T = -(2-10)$ кВ. Это приводило к возникновению катодного пятна и развитию пробоя между электродами 5 и 6 по поверхности изолятора 4. Так как пятно находилось под отрицательным потенциалом, ток переключался на электрод 2, в его полости возникала плазма разряда низкого давления и,

в основной промежуток инжектировался пучок заряженных частиц, что приводило к инициированию пробоя.

Конденсатор $C_0 = 10$ нФ, заряжался до напряжения $V_0 = \pm(2-20)$ кВ, $R_1 = 1$ Ом. Величина максимального тока составляла 15 кА при длительности периода около 100 нс. При $V_0 = +V_0$ разряд инициировался пучком электронов, поступающим в промежуток со стороны электрода 2, в противном случае пробой инициировался пучком ионов. Эксперименты позволили сделать следующие выводы:

- Характер пробоя так же, как для разряда низкого давления, при принудительном иницировании катодного пятна определяется концентрацией или давлением газа. Для давления выше критического форма коммутационной кривой гладкая.
- Время запаздывания пробоя не зависит от величины начального напряжения на разрядном промежутке и падает с ростом давления газа.
- Развитие пробоя при иницировании разряда ионным пучком ($V_0 = -V_0$) возможно лишь, когда электрод I является полым. В этой ситуации, времена запаздывания по сравнению со случаем иницировании разряда электронным пучком увеличиваются более чем в два раза.

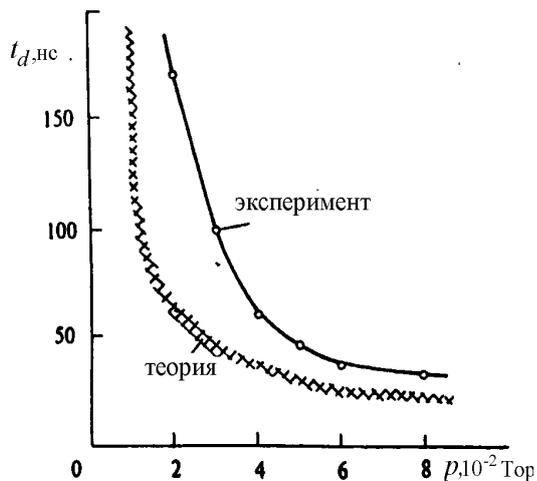


Рис. 6. Зависимость времени запаздывания пробоя от давления. Азот, $V_0 = 6 - 20$ кВ.

При иницировании разряда пучком электронов, механизм формирования псевдоискрового разряда аналогичен механизму формирования разряда низкого давления при принудительном иницировании катодного пятна и определяется концентрацией газа. Для псевдоискровых разрядников имеем ситуацию $n > n_{\text{ср}}$. Вследствие ионизации остаточного газа, вблизи анода возникает "горб" потенциала и, нарабатывается плазма, движущаяся к аноду. На рис. 6 представлены зависимости измеренных и рассчитанных времен запаздывания пробоя от давления для различных V_0 . Видно удовлетворительное соответствие.

Был рассмотрен механизм иницирования псевдоискрового разряда пучком ионов со стороны анода. Проводились расчеты взаимодействия ионного пучка с остаточным газом в вакуумном диоде с плоским катодом. Принимались во внимание процессы ионизации газа ионами, электронами и нейтралами, процесс перезарядки и вторичная эмиссия с катода вследствие бомбардировки ионами и нейтральными атомами. Показано, что ионный и электронный токи малы и не могут иницировать пробой. Ситуация меняется радикально, если пучок ионов инжектируется в катодную полость. Толщина плоской части катода сравнима с размерами основного промежутка, отверстие в катоде начинает играть роль, полого катода. Появляется виртуальный анод, что ведет к возникновению эффекта полого катода. В свою очередь это приводит к возрастанию электронного тока и иницированию пробоя в основном промежутке в соответствии с механизмом, рассмотренным ранее.

Исследования позволяют сформулировать принципы, учет которых необходим при разработке псевдоискровых разрядников.

- В отличие от пробоя высокого давления, для зажигания псевдоискрового разряда требуется наличие интенсивного потока заряженных частиц, поступающего в основной промежуток. Таким образом, *в полости электрода, содержащего узел запуска, должна происходить эффективная генерация заряженных частиц, а электрод должен быть связан с разрядным промежутком.*
- Псевдоискровой разряд может инициироваться не только электронным, но и ионным пучком. *То есть, в отличие от водородных тиратронов псевдоискровые разрядники, имеющие узел запуска в полости заземленного электрода, могут работать при подаче на потенциальный электрод не только положительного, но и отрицательного напряжения. Для этого потенциальный электрод должен быть полым и сообщаться с промежутком.*

Одна из проблем, которая существует при разработке псевдоискровых разрядников, связана с получением малых времен запаздывания пробоя t_d при относительно невысокой энергетике импульсов запуска. В ранних работах, запуск приборов происходил вследствие организации в полном катоде поверхностного разряда, либо, в результате интенсификации тлеющего разряда, горящего в системе вспомогательных электродов (**H. Riege and E. Boggasch**, IEEE Trans. On Plasma Sci. – October 1989. – vol. 17 – N. 5 – PP. 775 – 777; **G. Mechttersheimer et al.** J. Phys. E: Sci.Instrum. – 1986. – Vol. 19 – PP. 466 – 470.) Эти способы обеспечивали низкую эффективность генерации плазмы в полном катоде, что в соответствии с принципом, рассмотренным выше привело к тому, что наносекундные времена запаздывания пробоя достигались лишь при высоких значениях напряжения и тока импульсов запуска $V_T \geq 6$ кВ, $i_T \approx 100$ А. **В третьей главе** исследуется пробой в псевдоискровом разряднике при зажигании в полном катоде разряда низкого давления с принудительным инициированием катодного пятна и тлеющего разряда. Рассматриваются разряды с узлами инициирования катодных пятен на основе диэлектриков ($\epsilon \approx 1 - 2000$) и полупроводников при токах $i \leq 100$ А, а также тлеющие разряды с токами $i \leq 1$ А. Приводятся решения позволившие получить наносекундные времена запаздывания, при существенном снижении амплитуд напряжения и тока запуска.

Разряд низкого давления с узлом инициирования катодного пятна на основе диэлектрика с малым ϵ возбуждался в камере, показанной на рис.5. Исследования показали, что зажигание разряда в полости 2 ведет к пробоем в основном промежутке с малыми временами запаздывания на уровне 50 нс. Однако наносекундные времена формирования разряда в полости обеспечивались лишь при высоких $V_T \geq 6$ кВ и $i_T \geq 30$ А., что было связано с затрудненным инициированием катодного пятна. Кроме

того, ресурс узла запуска был мал (около 10^4 включений), что лимитировалось закорачиванием электродов 5 – 6, вследствие запыления поверхности 4.

Устранение данных недостатков требовало использования узлов инициирования катодных пятен, удовлетворяющих следующим критериям.

- Пятно и поверхностный разряд должны были зажигаться с наносекундными временами запаздывания при малой амплитуде пускового импульса ($V_T \approx 1 - 2$ кВ), что требовало создания специальных мер, улучшающих инициирование пятна и обеспечение на начальном этапе реактивного или активного сопротивления узла на уровне $R_T \approx 100$ Ом – 1кОм.
- Пятно должно было находиться под достаточно высоким отрицательным потенциалом, т.е. протяженность поверхностного разряда должна была быть достаточно большой, что позволяло эффективно зажигать разряд в полости электрода 2 (рис.5) и устранить эффект запыления поверхности узла.

Был разработан узел запуска на основе диэлектрика с высоким ϵ . Узел состоял из керамического диска с $\epsilon \approx 2000$ диаметром 15 мм и толщиной около 1 мм. Одна часть диска была металлизирована и содержала контакт, находящийся под потенциалом земли. С другой стороны располагался упругий посеребренный контакт, к которому прикладывался импульс напряжения запуска. Емкость узла запуска составляла величину $C_T \approx 1$ нФ, а $R_T \approx 1$ кОм. Поверхности диска и контакта обеспечивали множество точечных микроконтактов. При приложении импульса запуска $V_T \leq 2$ кВ, в тройных точках возникало высокое поле и вследствие токов смещения через емкость узла запуска начинал протекать ток. Это приводило к возникновению микропятен в местах микроконтактов и развитию разряда по поверхности. При этом, характерный размер плазмы разряда составлял единицы сантиметров, а плазма пятен находилась под высоким отрицательным потенциалом. При $V_T = 2$ кВ зажигание псевдоискрового разряда происходило с временем запаздывания менее 150 нс.

Ранее, в ОКБ "Вега" и НИИ Газоразрядных приборов г. Рязань, для запуска разрядников использовался узел инициирования катодного пятна на основе пробоя по поверхности полупроводника. Мы провели исследование данного узла применительно к инициированию псевдоискрового разряда.

Узел включал в себя полупроводниковый цилиндр, имеющий шероховатую поверхность. Триггерный электрод представлял собой медную проволочку, навитую на стальную проволоку. Данная конструкция позволяла обеспечивать множество микроконтактов между триггерным электродом и поверхностью цилиндра. Сопротивление узла запуска составляло величину $R_T \approx 0,1 - 1$ кОм. При этом основное сопротивление было локализовано в местах микроконтактов. При прикладывании импульса V_T , через узел начинал протекать ток, что приводило, к возникновению в местах микроконтактов пятен и как следствие к развитию разряда

по поверхности. Вследствие высокой протяженности цилиндра (более сантиметра), данный разряд, имел высокое напряжение горения, что в свою очередь приводило к переключению тока разряда на полость катода. При $V_T = 1,5$ кВ и токе на полость $i \leq 5$ А $t_d \approx 150$ нс, а ресурс работы узла составил более 10^6 включений.

Следующие исследования были направлены на изучение инициирования пробоя в псевдоискровом разряднике в результате переключения тока стационарного тлеющего разряда, горящего в системе триггерных электродов на основной катод.

Эксперименты проводились на отпаянной конструкции, давление в которой обеспечивалось встроенным генератором водорода (рис. 7). Электроды A и B образовывали триггерную камеру, в которой в исходном состоянии зажигался стационарный тлеющий разряд, а C и D являлись электродами основного промежутка. При этом C одновременно являлся дополнительным анодом триггерной камеры, на который могло происходить переключение тока с B . Электроды B и C сообщались через соосные отверстия диаметром δ .

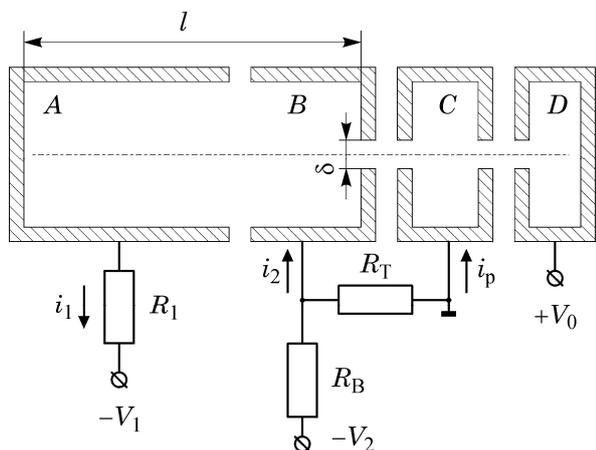


Рис. 7. Система электродов и схема при переключении тока подготовительного разряда на основной катод.

$$R_1 = 100 \text{ кОм}, R_B = 10 \text{ кОм}, R_T = 1 \text{ кОм}$$

Вследствие прикладывания напряжения V_1 , в промежутке $A - B$ зажигался разряд с током i_1 в несколько миллиампер. Небольшая доля этого тока в виде тока i_p могла замыкаться на электрод C . Потенциал анода B был близок к потенциалу электрода C . Подача отрицательного постоянного или импульсного напряжения V_2 приводила к переключению тока i_1 на электрод C что вело к пробую в основном промежутке.

Полное замыкание тока стационарного тлеющего разряда на электрод C возможно лишь при

одновременном выполнении следующих условий: электрод B должен находиться под плавающим потенциалом, протяженность области отрицательного анодного напряжения возле него $\Delta l_a \leq \delta/2$ и плотность плазмы в отверстии в электроде должна обеспечивать возможность протекания тока i_1 . Проведенные оценки и эксперименты показали, что данные условия реализуются при $\delta \geq 4$ мм, $i_1 \geq 3$ мА и потенциале на электроде B $V_B \geq 30$ В. В таблице 2 представлены времена запаздывания пробоя в системе электродов $C - D$ в зависимости от потенциала, приложенного к электроду B . Видно, что при $V_B \geq 200$ В, $t_d \leq 230$ нс.

Таблица 2. Зависимость времени запаздывания пробоя от потенциала, приложенного к электроду В. $i_1 = 5$ мА.

$V_B, \text{В}$	100	150	200	270
$t_d, \text{нс}$	400	300	230	170

Результаты, позволяют сформулировать принцип для разработки псевдоискровых разрядников. *Для получения малых времен запаздывания срабатывания приборов, при низких энергозатратах на запуск, необходимо зажечь в полом катоде разряд низкого давления с принудительным инициированием катодного пятна или тлеющий разряд.*

Если во **второй главе** рассматривался процесс, зажигания псевдоискрового разряда в случае его принудительного инициирования, **то четвертая глава** посвящена исследованию зажигания разряда при статическом пробое в воздухе. Исследуется влияние таких факторов, как размер, форма и потенциал электродов, внесенных в полость основного катода на величину напряжения статического пробоя V_{br} . Анализируется механизм пробоя и, исследуются предпробойные токи, протекающие в электродной системе. Объяснен механизм действия блокирующих электродов. Показаны пути, позволяющие существенно повысить величину V_{br} .

Во второй главе было показано, что необходимым условием развития пробоя являлось наличие интенсивного пучка электронов инжектируемого со стороны катода в основной промежуток. При принудительном запуске такой источник электронов создается искусственно с помощью узла запуска. В случае статического пробоя необходимо объяснить механизм возникновения иницирующих электронов.

Оценка величины взрывоэмиссионных токов показала, что они малы. С другой стороны предварительные опыты показали, что величина V_{br} зависит от геометрии и размеров катодной полости 2 (рис. 5). Рассмотрим этот вопрос подробнее.

На рис. 8а. представлено распределение электрического поля в промежутке. Межэлектродный зазор составлял 5 мм при диаметре отверстий в электродах 4 мм. Внутренний диаметр катода составлял 40 мм при толщине плоской части 4 мм. Видно, что потенциал анода V_0 частично проникает в катодную полость, $\varphi(A) \approx 50$ В.

Потенциальный рельеф внутри полости представляет собой "воронку" для электронов. Электроны, родившиеся внутри полости и имеющие энергию, недостаточную для того чтобы попасть на внутреннюю стенку под действием ускоряющего поля будут стремиться выйти в отверстие. Но из-за малого размера отверстия электроны с достаточно большим начальным моментом импульса относительно оси симметрии не смогут покинуть полость. Таким образом, часть электронов будет совершать осциллирующее движение. В окрестности отверстия, где кинетическая энергия электронов достаточна для ионизации, будет происходить

накопление объемного заряда и размножение заряженных частиц, т.е. возникнет эффект полого катода. Т.е. на стадии формирования разряда, катодная полость играет роль дополнительного поставщика электронов в зазор по сравнению с γ – процессами.

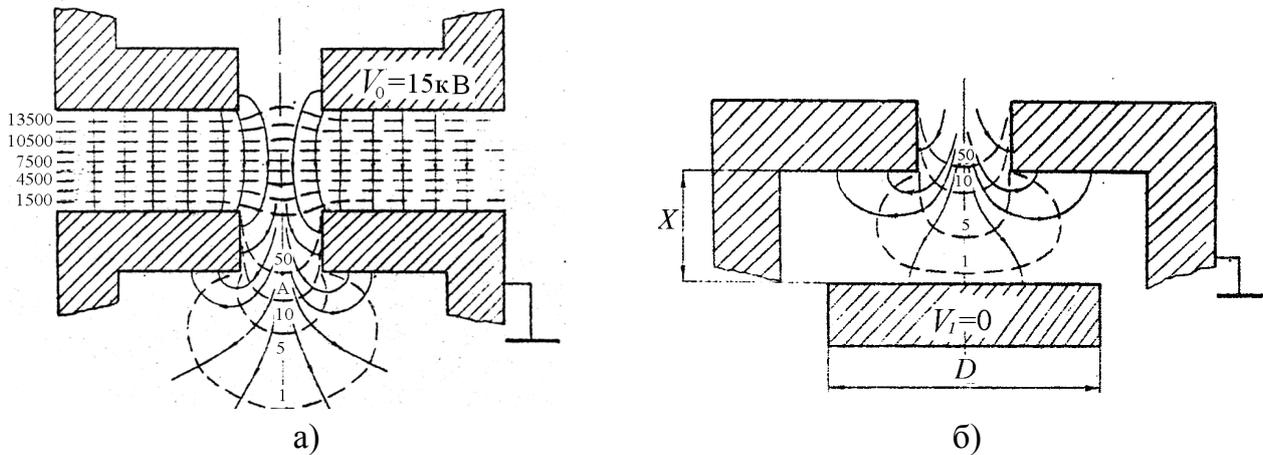


Рис. 8. Распределение электрического поля в промежутке. Штриховые линии эквипотенциальные поверхности, линии со стрелками – силовые линии. цифры – значение потенциала в вольтах. $V_0 = 15$ кВ. а) в полем катоде отсутствуют вспомогательные электроды, б) в полость введен диск под потенциалом земли

Таким образом, для увеличения пробивного напряжения псевдоискрового разрядника необходимо каким-либо образом уменьшать размер области ионизации и количество возможных осцилляций электронов, т.е. подавлять эффект полого катода. Очевидно, этого можно достичь, изменяя электростатическое распределение поля и

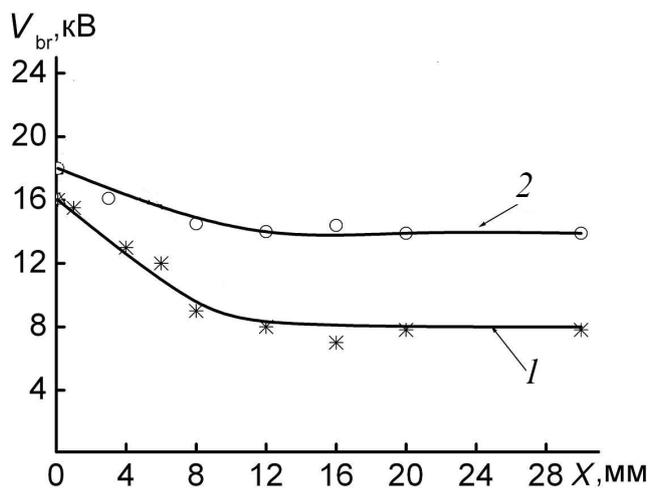


Рис. 9. Зависимость напряжения статического пробоя от расстояния между дисковым электродом и дном катода. 1 – электрод заземлен, 2 – находится под потенциалом $V_1 = +10$ В

уменьшая геометрические размеры полости. Проиллюстрируем это.

В катодную полость вводился вспомогательный электрод, имеющий форму диска диаметром $D = 24$ мм, а расстояние от электрода до дна катодной полости X могло меняться. Электрод мог находиться под потенциалом земли или на него подавалось положительное смещение V_1 . $p = (7-8) \cdot 10^{-2}$ Тор.

На рис. 9 представлена зависимость напряжения статического пробоя от расстояния X . Рассмотрим случай 1. При $X = 0$,

т. е. при соприкосновении диска с внутренней поверхностью полого катода, пробивное напряжение максимально и составляет 16 кВ. Увеличение X приводит к монотонному уменьшению пробивного напряжения, которое при $X \approx 14$ мм выходит на стационарное значение около 8 кВ. Характер зависимости легко понять, обратившись к качественной картине распределения электрического поля (рис. 8б). Если сравнить ее с полем, изображенным на рис. 8а, то можно заметить, что сократились размеры как области возможных осцилляции, так и область возможной ионизации, где кинетическая энергия электронов больше потенциала ионизации. При $X > 14$ мм изменение распределения поля в окрестности отверстия практически не наблюдается и пробивное напряжение близко к случаю свободной полости без вспомогательного электрода.

Видно, что подача на вспомогательный электрод положительного смещения приводит к росту V_{br} (кривая 2, рис.9). Впервые данный эффект был замечен авторами работы (J. Phys. E: Sci.Instrum. – 1986. – Vol. 19 – PP. 466 – 470), которые назвали его эффектом блокировки. В статье не была дана интерпретация механизма действия блокировки. Нами были проведены исследования в этом направлении.

Система электродов включала в себя полые анод и катод и электроды триггерной камеры, в которой возбуждался стационарный тлеющий разряд. Триггерная камера и

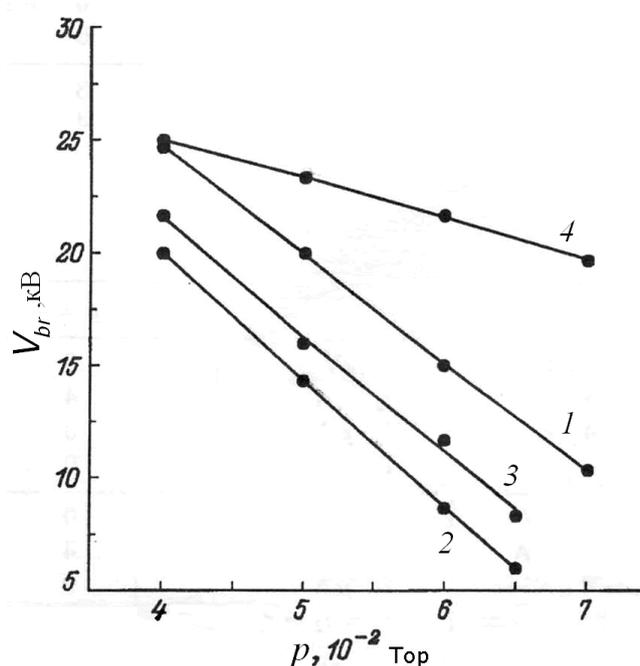


Рис.10. Зависимость напряжения статического пробоя от давления. 1 – тлеющий разряд отсутствует; 2 – включен, отверстия на боковых стенках катода закрыты; 3 – тлеющий разряд включен, отверстия открыты; 4 – тлеющий разряд включен, в полость катода введены зонды.

основной катод были связаны через отверстие на оси. Вокруг катода располагался блокирующий электрод, который находился под положительным потенциалом. На боковых стенках катода было расположено 12 отверстий, через которые осуществлялось действие блокирующего электрода. В ряде случаев боковые отверстия закрывались, что сводило действие блокирующего потенциала к нулю. В других экспериментах эффективность блокировки повышалась путем введения в полость катода зондов, соединенных с блокирующим электродом. Измерялись

предпробойные токи протекающие в основном промежутке и токи замыкающиеся на блокирующий электрод. Исследования показали, что

амплитуда напряжения статического пробоя определяется величиной предпробойных токов, таким образом основной путь повышения V_{br} связан с подавлением данных токов. В этом и заключается физический смысл эффекта блокировки. Сказанное иллюстрирует рис. 10. Включение тлеющего разряда приводит к росту предпробойных токов и снижению V_{br} (1 – 2). Под действием блокирующего электрода токи уменьшаются и, V_{br} растет (3). Усиление блокирующего действия существенно подавляет предпробойные токи и значительно увеличивает V_{br} (4).

Результаты, позволяют сформулировать следующий принцип, который необходимо учитывать при разработке и создании псевдоискровых разрядников.

Для увеличения анодного напряжения приборов, а также повышения возможности работы разрядников в области более высоких частот, необходимо подавлять предпробойные токи, протекающие в полой катодной полости прибора. Это возможно осуществить, как ухудшением связи разрядного промежутка с катодной полостью и изменением ее физических размеров, так и использованием дополнительных электродов, находящихся под потенциалом.

Во второй и четвертой главах мы рассмотрели начальную слаботочную стадию зажигания псевдоискрового разряда. **В пятой главе** рассматриваются сильноточные стадии плотного и сверхплотного тлеющего разрядов в водороде, кислороде и ксеноне при давлении $p = 10^{-1} - 10^{-3}$ Тор, начальных напряжениях $V_0 \leq 20$ кВ и токах $i = 0,1 - 10$ кА. Исследуется динамика развития разрядов. Проведено измерение концентрации и температуры электронов. Представлен способ, позволяющий с высокой точностью измерить температуру тепловых электронов в неравновесной плазме. На основе полученных данных проведен анализ процессов рождения и гибели заряженных частиц и механизм ввода энергии в плазму. Рассмотрен механизм токопереноса, позволяющий объяснить наблюдаемые закономерности. Обсуждаются причины, приводящие к смене форм горения разряда.

Известно, что в своем развитии псевдоискровой разряд проходит через стадии плотного и сверхплотного тлеющих разрядов. Предыдущие работы показали, что существуют режимы, которые невозможно идентифицировать (J. Appl. Phys. – 1995. – vol.79– N. 2 – PP. 631 – 636). Были проведены исследования с использованием секционированных катодов, что позволило идентифицировать разряд. Показано, что разряд может гореть в сложных комбинированных и нестационарных формах, что может приводить к сильным нерегулярностям на коммутационной кривой. Эффект проявляется при невысоких (≤ 1 кА) токах и нивелируется снижением длительности стадии плотного тлеющего разряда и уменьшением напряжения горения.

При рассмотрении процесса токопереноса, одна из проблем связана с пониманием механизма генерации плазмы внутри отверстия в полой катодной полости, которая позволяет пропускать значительные токи. Так например, авторы работы (IEEE Trans.

Plasma Sci. – 1999. – vol. 27 – no. 5 – PP. 1525 – 1537) предположили, что генерация плазмы происходит в результате ионизации газа тепловыми электронами, что потребовало принять $T_e = 8$ эВ. В нашей работе мы провели исследование механизмов рождения и гибели заряженных частиц на основе измерения параметров плазмы. Для этого, в водороде, на стадиях плотного и сверхплотного тлеющих разрядов измерялись концентрация и температура электронов. Учитывались: процесс Джоулевого нагрева, прямая и ступенчатая ионизация газа электронами, ионизация высокоэнергетическими электронами, стартовавшими с катода и ускоренными в катодном слое, столкновительно – излучательная рекомбинация, фоторекомбинация и гибель частиц заряженных вследствие их ухода из промежутка. Показано, что скорость рождения заряженных частиц существенно превышает скорость гибели, а основным каналом генерации плазмы является ионизация газа высокоэнергетическими электронами. Таким образом, пространство, образованное внутри отверстия в катоде можно рассматривать как полый катод, а плазма внутри него представляет собой аналог отрицательного свечения в классическом тлеющем разряде.

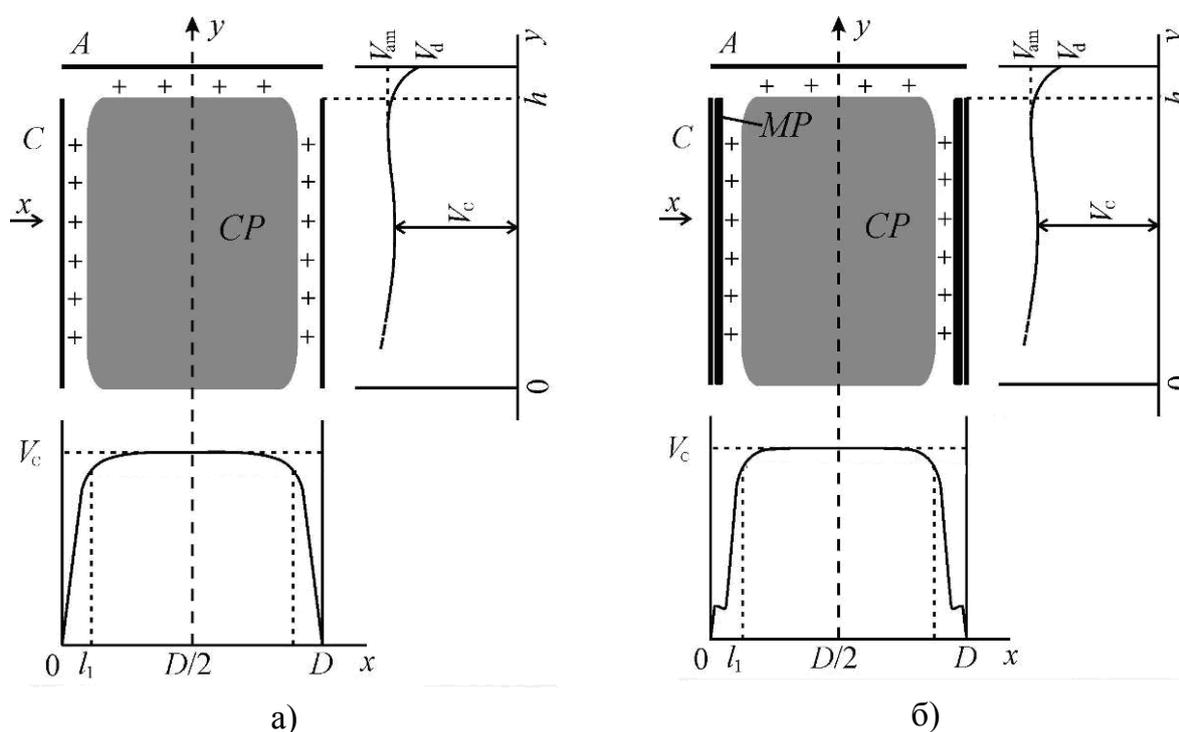


Рис. 11. Области разряда и распределение потенциала для плотного тлеющего разряда (а), и сверхплотного тлеющего разряда (б). A – анод, C – катод, CP – плазма отрицательного свечения, MP – плазма паров материала катода

На рис.11а схематически представлены структура и распределение потенциала в плотном тлеющем разряде. Отверстие в катоде имеет форму цилиндра диаметром D и

высотой h . Для упрощения, около отверстия размещен плоский анод. Считаем, что столб отсутствует, и ток на анод течёт из плазмы отрицательного свечения CP . Полный ток на катоде i_c есть сумма тока эмиссии i_{em} и ионного тока i_i :

$$i_c = i_{em} + i_i = (1 + \gamma)i_i, \quad (1)$$

где γ – коэффициент вторичной эмиссии.

В режиме аномального тлеющего разряда величина $\gamma \approx 0,1 - 0,2$. Таким образом, основной ток на катод обеспечивается ионным компонентом.

Ток разряда на анод обеспечивается быстрыми электронами из плазмы, которые способны преодолеть потенциальный барьер $\Delta V = (V_{am} - V_d)$.

В соответствие с нашей моделью, скорость рождения заряженных частиц в плазме отрицательного свечения определяется вводом энергии от пучка электронов, стартовавшего с катода и ускоренного в катодном слое l_1 .

$$\frac{i_{em} V_c}{\pi D^2 h V^*} = \Psi_{II} \quad (2)$$

где

$$i_{em} = \frac{i_c}{1 + \gamma} \gamma \quad (3)$$

а V^* эффективная цена образования электрон – ионной пары, (в водороде $V^* \approx 45$ эВ).

Подставляя значения Ψ_{II} , i_c из эксперимента и принимая $\gamma = 0,2$ получим расхождение в 20% , что является неплохим согласием.

С ростом тока плотный тлеющий разряд переходит в сверхплотный, характеризующийся плазменными микрообразованиями MP на поверхности катода (рис. 11б). С помощью ССД камеры и секционированных электродов было проведено исследование данного процесса и показано, что величина плотности тока на катоде, при которой наблюдается переход, зависит от сорта газа и для водорода, кислорода и ксенона составляет 700 А/см^2 , 400 А/см^2 и 130 А/см^2 соответственно. Объясним эффект на основе явления взрывной эмиссии.

При высокой плотности тока электрическое поле на поверхности катода E_c достигает некоторого критического значения, при котором значительным становится ток автоэмиссии с отдельных микропятен. В прикатодном слое развивается неустойчивость. Увеличение тока эмиссии с микропятна ведет к росту ионного тока. При высокой локальной электронной и ионной плотности тока, на поверхности катода происходит микровзрыв и возникают пары металла. Эксперименты показали, что критическим для микровзрыва является величина $E_c \approx 10^6 \text{ В/см}$. В нашем случае поле на поверхности катода может быть оценено на основе предположения того, что

ионный ток через слой l_1 подчиняется закону Чаильда-Ленгмюра. Тогда с помощью линейной аппроксимации поведения поля получаем:

$$E_c \approx 0,85 \cdot 10^4 A^{1/4} V_c^{1/4} j_i^{1/2} \quad (4)$$

Расчеты выполненные по (4) показывают, что напряженности поля на катоде около 10^6 В/см достигаются в диапазоне плотностей токов на катоде $j_c \approx 600-1000$ А/см²; 200–400 А/см², 70–140 А/см² для водорода, кислорода и ксенона соответственно что находится в согласии с экспериментом.

Принцип, который необходимо учитывать при разработке псевдоискровых ключей состоит в следующем. *Для улучшения коммутационной характеристики приборов необходимо уменьшать как длительность, стадии плотного тлеющего разряда так и величину напряжения горения разряда в данной стадии.*

Шестая глава посвящена сильноточным коммутаторам низкого давления с холодным катодом (псевдоискровым разрядникам). Описываются недостатки приборов, существовавших на момент постановки работы. Приводятся результаты исследований, направленные на уменьшение длительности стадии плотного тлеющего разряда и снижения напряжения горения разряда. Предложены решения, позволяющие улучшить коммутационную характеристику приборов, снизить их стартовые потери и расширить диапазон работы в области малых токов и напряжений. Описаны особенности конструкций, характеристики и схемы включения нового класса промышленных разрядников низкого давления с холодным катодом серии TDI и TPI, разработанных и изготовленных в ООО Импульсные технологии, г. Рязань, под руководством В. Д. Бочкова при использовании результатов настоящей работы. Исследована работа разрядников на ресурс и показана возможность их работы в режиме параллельной коммутации.

На рис. 12 представлены осциллограммы тока и напряжения, при работе разрядников с низкими начальными напряжениями ($V_0 \approx 1$ кВ). Коммутировался конденсатор $C_0 = 1$ мкФ. Использовался прототип разрядника серии TDI. В полости катода располагался узел запуска, на основе полупроводника, В штатном режиме, пробой в основном промежутке, происходил в результате подачи на проволочный триггерный электрод импульса отрицательной полярности V_T Видно (рис. 13а), что на осциллограмме напряжения регистрируется длительная ($t \approx 1$ мкс) стадия плотного тлеющего разряда с напряжением горения около 600 В. На коммутационной кривой наблюдается затяжка.

Для устранения данного эффекта мы искусственно создали ситуацию, когда на стадии запаздывания пробоя в основном промежутке на внутренней поверхности основного катода инициируется катодное пятно. Для этого проволочный триггерный электрод соединялся с катодом, а на графитовый триггерный электрод подавался

импульс $+V_T$ Видно, (рис. 12б), что стадия плотного тлеющего разряда отсутствует, напряжения на приборе составляет около 200 В, а затяжки тока не наблюдается.

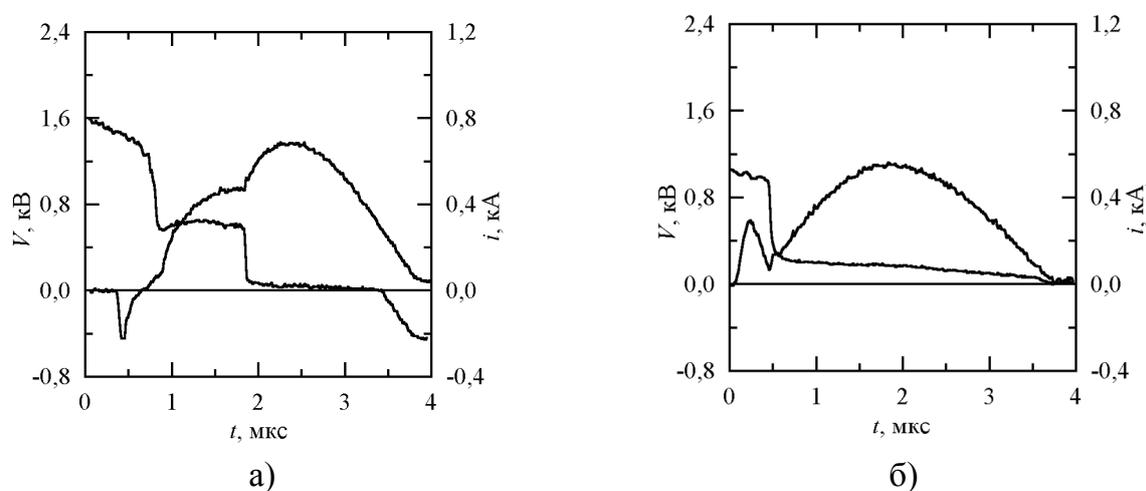


Рис. 12. Осциллограммы напряжения на промежутке и тока прототипа разрядника серии TDI в случае низких начальных анодных напряжений.

а) Запуск разрядника осуществляется по традиционной схеме

б) на стадии запаздывания развития пробоя, в полном катоде искусственно организовано катодное пятно.

В работах **И. И. Бакалейника**, **А. С. Арефьева** и **В. Д. Бочкова** было показано, что распыление и размещение в полости катода материалов, обладающих низкой работой выхода и развитие поверхности катода может приводить к снижению напряжения горения разряда. Эти эффекты исследовались применительно к псевдоискровым разрядникам. Использовались прототипы разрядников серии ТР1. Приборы обладали развитой системой полых катодов. На дне катода располагалась таблетка из смеси порошков вольфрама, оксида алюминия и карбоната цезия. Напряжение горения в стадии плотного тлеющего разряда существенно понизилось.

Семейство разрядников серии TDI (таблица 3) предназначалось для коммутации импульсов тока амплитудой в десятки и сотни килоампер в микро и нано секундном диапазоне времен. Приборы нашли широкое применение в устройствах по исследованию плазменного фокуса и сжимающихся лайнеров, нефти и газодобыче, медицинской аппаратуре и т. д. Разрядники имели отпаянное исполнение, и допускали реверс тока, при наносекундной стабильности срабатывания.

На рис. 13а представлен эскиз разрядника TDI1-150k/25. Основная система электродов образована медным катодом и молибденовым анодом. Межэлектродный зазор составляет 4 мм. Толщина плоской части катода равняется четырем миллиметрам. Основной промежуток связан с катодной полостью через четыре отверстия диаметром четыре миллиметра, что позволяет электрическому полю проникать в полость и способствовать, возникновению эффекта полого катода. Экран

обеспечивает оптимальные размеры катодной полости и защищает полупроводниковый узел запуска от ионного пучка.

Таблица 3. Основные характеристики разрядников серии TDI.

Тип	Анодное напряжение, кВ	Максим. анодный ток, кА	Средний ток, А	Размеры, диаметр x высоту, мм	Полный заряд, скоммут. прибором, Кл	Частота срабатывания, кГц
TDI1-50k/16	1 ÷ 16	50	0.15	50 × 52	10^5	0.1
TDI1-50k/25	1 ÷ 25	50	0.25	98 × 80	2×10^5	0.05
TDI1-50k/50	1 ÷ 50	50	0.25	98 × 88	2×10^5	0.05
TDI1-150k/25	1 ÷ 25	150	0.5	150 × 110	5×10^5	0.05

Известно, что ресурс разрядников в режиме сильноточной коммутации зависит не только от скоммутированного заряда и длительности импульса, но и от симметрии тока протекающего через прибор относительно его оси. В данном направлении были проведены специальные исследования.

Разрядник TDI1-150k/25 коммутировал два конденсатора емкостью 5 мкФ каждый, заряженных до 20 кВ соединенных полосковой линией. В первом варианте разрядник располагался между конденсаторами и, растекание тока через прибор было симметричным. Индуктивность контура $L = 40$ нГн, а максимальный ток $i \approx 200$ кА. Во втором варианте имели ассиметричное растекание (конденсаторы и разрядник располагались на противоположных концах). $L = 40$ нГн, $i \approx 140$ кА. В первом варианте ресурс разрядника превысил $5 \cdot 10^5$ Кл, во втором составил менее 10^3 Кл.

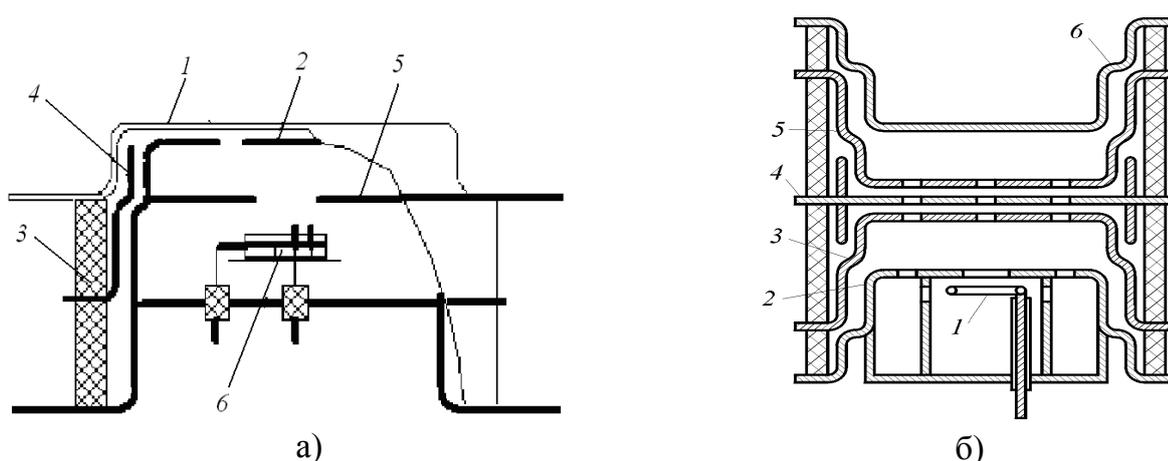


Рис.13. Эскиз разрядников TDI1-150k/25 (а), и TPI2-10k/50 (б).

а) 1 – анод, 2 – катод, 3 – корпус, 4 – экран, 5 – перегородка, 6 – узел запуска

б) 1, 2 – анод и катод триггерной камеры; 3 5 – основные катод и анод (высоковольтный электрод), 4 – градиентный электрод, 6 – потенциальный анод.

Разрядники серии ТРІ (таблица 4) нашли применение в импульсных лазерах, генераторах имитации помех, установках для получения электронных и ионных пучков и т. д. Приборы допускали реверс тока, имели наносекундную стабильность срабатывания, высокий ресурс работы и функционировали при подаче отрицательного напряжения на высоковольтный электрод.

Таблица 4. Основные характеристики разрядников серии ТРІ.

Тип	Макс. анодное напряжение, кВ	Макс. анодный ток, кА	Средний ток, А	Размер: диаметр высота, мм	Заряд, скоммут. прибором, Кл
ТРІ-0,1к/10	10	2	0.15	29 × 80	10^6
ТРІ-1к/20	20	2	0.15	29 × 80	10^6
ТРІ-10к/25*	25	10	0.25	100 × 160	5×10^5
ТРІ2-10к/25*	25	10	0.5	100 × 190	5×10^5
ТРІ2-10к/50*	50	10	0,35	100 × 190	5×10^5

Примечание * – разрядники допускают подачу отрицательного напряжения на высоковольтный электрод.

Полый катод 2 триггерной камеры охватывал кольцевой анод 1 (рис.13б). Это позволяло зажигать подготовительный разряд при низких напряжениях. Катоды 3 и 2 имели развитую поверхность, а в полости 2 располагалась эмиссионная таблетка, что снижало падение напряжения на приборе. Разрядники имели полый анод 5, что допускало работу при подаче на 5 напряжения отрицательной полярности.

В приборах присутствовал потенциальный электрод 6, используемый в качестве блокирующего, что позволяло разрядникам работать с высокими анодными напряжениями и большой частотой срабатывания.

Был рассмотрен вопрос о возможности работы псевдоискровых разрядников в режиме параллельной коммутации. На первом этапе проводились исследования при коммутации умеренных токов до 10 кА и длительности около 300 нс при начальном напряжении $V_0 \leq 25$ кВ в электрическом контуре типичном для импульсных газовых лазеров. Банк конденсаторов был набран из 6 емкостей $C_0 = 47$ нФ, которые коммутировались 12 разрядниками. Волновое сопротивление контура и величина активной нагрузки составляли $\rho = 0,9$ Ом и $R_L = 0,57$ Ом. Частота $f \leq 50$ Гц.

В режиме сильноточной коммутации, эксперименты проводились при максимальных токах до 290 кА, длительности около 2 мкс и амплитуде напряжения на накопительной емкости до 20 кВ. $f \leq 1$ Гц. Два разрядника ТДІ коммутировали два конденсаторов на общую нагрузку $R_L = 0,046$ Ом.

В результате испытаний впервые было показано, что псевдоискровые разрядники могут работать в режиме параллельной коммутации.

В заключении сформулированы основные выводы:

1. Характер процесса зажигания импульсных разрядов низкого давления при принудительном иницировании катодного пятна в диапазоне токов $i = 10 - 10^4$ А в системах с длинными промежутками определяется концентрацией и типом газа. При низких концентрациях наблюдаются колебания напряжения горения и обрывы тока, а при превышении концентрации некоторой критической величины спад напряжения на промежутке происходит монотонно, а коммутационная кривая имеет гладкий вид.

При концентрации ниже критического в промежутке зажигается вакуумный разряд, распределение потенциала в котором имеет немонотонный вид в прикатодной области. Время коммутации определяется не разлетом плазмы катодного пятна, а временем формирования области немонотонного распределения потенциала. Высокая пропускная способность столба обеспечивается вследствие компенсации объемного заряда электронов потоком ионов, движущихся по направлению к аноду. Формирование разряда при концентрациях превышающих критическое обусловлено накоплением избыточного ионного заряда в промежутке, возникновением "горба" потенциала и генерации плазмы в прианодной области с последующим распространением плазмы от анода к катоду.

2. Необходимым условием для зажигания псевдоискрового разряда является инжекция в разрядный промежуток интенсивного потока электронов. Время запаздывания развития пробоя t_d практически не зависит от амплитуды напряжения приложенного к разрядному промежутку и падает с ростом давления рабочего газа. При иницировании разряда пучком ионов величина t_d возрастает примерно в два раза по отношению к случаю электронного иницирования.

3. Механизм зажигания псевдоискрового разряда, иницируемого пучком электронов, аналогичен механизму зажигания разряда низкого давления при принудительном иницировании катодного пятна в условиях, когда концентрация газа в промежутке превышает критическую.

Формирование разряда в условиях иницирования ионным пучком со стороны анода обусловлено последовательным действием накопления избыточного ионного заряда в полости катода и появления виртуального анода, что в свою очередь ведет к развитию разряда, по механизму, описанному в предыдущем абзаце.

4. Исследован пробой в псевдоискровом разряднике в условиях зажигания в полом катоде прибора разряда низкого давления с принудительным иницированием катодного пятна. Показано, что использование узлов иницирования катодного пятна на основе диэлектрика с высоким ϵ и полупроводника позволяет получать времена запаздывания пробоя менее 200 нс при амплитуду пускового импульса 1,5 кВ и токе единицы ампер.

5. Проведено исследование механизм переключения тока стационарного тлеющего разряда, горящего в системе вспомогательных электродов на полый катод

псевдоискрового разрядника. Показано, что необходимым условием переключения является: размер диаметра отверстия в аноде триггерной камеры много меньше протяженности отрицательного анодного падения напряжения; нахождение анода под плавающим потенциалом. Предложен метод инициирования зажигания псевдоискрового разряда, основанный на переключении тока стационарного тлеющего разряда на основной катод. Показано, что при амплитуде импульса запуска около одного киловольта и токе запуска менее одного ампера получены времена запаздывания пробоя менее 150 нс.

6. Зажигание псевдоискрового разряда в случае статического пробоя происходит аналогично случаю принудительного инициирования. При этом поток электронов в разрядный промежуток обеспечивается предпробойными токами, усиленными вследствие эффекта полого катода. Увеличение напряжения статического пробоя связано с сокращением размеров области, внутри полого катода, где возможно осциллирующее движение электронов.

7. Дано объяснение механизма влияния блокирующих электродов на величину напряжения статического пробоя. Показано, что действие обусловлено экстрагированием электронов из катодной полости и как следствие подавлением эффекта полого катода и уменьшением предпробойных токов. Представлены схемные решения, позволяющие повысить напряжение статического пробоя без существенного увеличения времени запаздывания.

8. Показано, что в процессе своего развития сильноточный импульсный разряд низкого давления с полым катодом может гореть в сложных, комбинированных, изменяющихся во времени формах.

9. Сделан вывод, что плотность разрядного тока на катоде, при котором происходит переход от плотного тлеющего разряда к сверхплотному тлеющему разряду, зависит от атомного веса газа. Переход к сверхплотному тлеющему разряду обусловлен взрывоэмиссионными процессами на поверхности катода.

10. Проведен анализ состояния плазмы, и представлен способ, позволяющий с высокой точностью измерить температуру электронов в неравновесной плазме псевдоискрового разряда. Измерены концентрация и температура электронов в различных стадиях развития и в различных областях разряда. Показано, что процесс рождения заряженных частиц в плазме отверстия в катоде обусловлен быстрыми электронами, стартовавшими с катода и ускоренными в катодном слое.

11. Представлен механизм токопереноса в плазме псевдоискрового разряда, который позволяет непротиворечиво объяснить наблюдаемые в экспериментах закономерности.

12. Сформулированы принципы функционирования псевдоискровых разрядников, учет которых позволил разработать промышленные образцы нового класса отпаянных сильноточных коммутаторов с холодным катодом серии TDI и TPI.

13. На макетах и прототипах промышленных приборов проведено исследование путей, уменьшающих длительность стадии плотного тлеющего разряда и снижающих напряжение горения. Развитие площади катода и размещение внутри последнего эмиссионной таблетки, изготовленной из материала с высокой эмиссионной способностью, позволяет существенно снизить напряжение горения. Искусственное инициирование катодного пятна на стадии запаздывания развития пробоя, дает возможность исключить фазу плотного тлеющего разряда. Решения позволяют улучшить коммутационную характеристику приборов, снизить их стартовые потери и расширить диапазон работы в области малых токов и низких анодных напряжений.

14. Описаны конструкции, характеристики и схемы включения нового класса сильноточных импульсных разрядников низкого давления с холодным катодом серии TDI и TPI.

15. Показано, что ресурс работы разрядников серии TDI при коммутации сильноточных импульсов (амплитуда около 200 кА и заряд, перенесенный за импульс 0,1–0,2 Кл) существенно зависит от симметрии тока протекающего через прибор. В контурах с симметричным растеканием токов, разрядники имеют ресурс не менее $5 \cdot 10^5$ Кл. При ассиметричном контуре ресурс может падать более чем на два порядка.

16. Впервые показано, что разрядники низкого давления с холодным катодом можно использовать для параллельной коммутации импульсов тока от единиц до сотен килоампер в микро и наносекундном диапазоне времен.

Список основных публикаций автора по теме диссертации

1. Формирование импульсного разряда низкого давления при принудительном инициировании катодного пятна / Н. Н. Коваль, Ю. Д. Королев, В. Б. Пономарев, В. Г. Работкин, И. А. Шемякин, П. М. Щанин // Физика плазмы. – 1989. – Т. 15, вып. 6. – С. 747 – 752.
2. Обрывы тока в импульсном разряде низкого давления, инициируемом путем принудительного зажигания катодного пятна / А. В. Болотов, А. В. Козырев, А. В. Колесников, Ю. Д. Королев, В. Г. Работкин, И. А. Шемякин // Журн. техн. физики. – 1991. – Т. 61. – вып. 1. – СС. 40 – 46
3. Current cut – off in vacuum plasma – filled diode / A. V. Bolotov, A. V. Kozyrev, A. V. Kolesnikov, Yu. D. Korolev, V. G. Rabotkin, I. A. Shemyakin // Proc. XV Intern. Symp. on Discharge and Electrical Insulation in Vacuum. – Darmstadt, 1992. – PP. 683 – 685.
4. Козырев А. В., Королев Ю. Д., Шемякин И. А. Процессы в катодной области дугового разряда низкого давления // Изв. высш. учебн. завед. Физика. – 1994. – № 3. – СС. 5 – 25.
5. The concept of nonmonotonic potential distribution in low-pressure gas discharges / A. V. Bolotov, A. V. Kozyrev, Yu. D. Korolev, I. A. Shemyakin // Proc. XVII Intern. Symp.

on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. – Berkeley, 1996. – Vol. 1. – PP. 141 – 145.

6. Concept of nonmonotonic potential distribution in the near cathode regions of vacuum arc and low-pressure gas discharge / A. V. Bolotov, A. V. Kozyrev, Yu. D. Korolev, I. A. Shemyakin // Proc. Third Intern. Conf. on Electrical Contacts, Arcs, Apparatus and their Applications. – Xian, P.R. China, 1997. – Vol. 1 – P. 41.

7. Частотный псевдоискровой разрядник с наносекундной стабильностью запуска для коммутации силовоточных коротких импульсов / В. С. Богданов, К. А. Клименко, А. В. Колесников, Ю. Д. Королев, В. А. Лавринович, В. Г. Работкин, И. А. Шемякин // Приборы и техника эксперимента. – 1992. – № 2. – СС. 167 – 170.

8. Исследование механизма зажигания разряда в псевдоискровых разрядниках низкого давления / К. А. Клименко, А. В. Колесников, Ю. Д. Королев, В. Г. Работкин, И. А. Шемякин // Физика плазмы. – 1991. – Т. 17. – вып. 10. – СС. 1256 – 1262.

9. Low pressure discharge in pseudosparks / К. А. Klimenko, A. V. Kolesnikov, Yu. D. Korolev, V. G. Rabotkin, I. A. Shemyakin // Proc. XX Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. – Pisa, Italy, 1991. – Vol. 2. – PP. 492 – 493.

10. Параллельная работа псевдоискровых разрядников на общую нагрузку / К. А. Клименко, А. В. Колесников, Ю. Д. Королев, В. Г. Работкин, И. А. Шемякин // Приборы и техника эксперимента. – 1992. – № 6. – СС. 135 – 139.

11. V. D. Bochkov, Yu. D. Korolev, I. A. Shemyakin. High-current ceramic-metal sealed-off pseudospark switches (designs and applications) // Proc. XVII Intern. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum – Berkeley, 1996. – Vol. 2. – PP. 977 – 980.

12. Ceramic – metal sealed – off pseudospark switch with a trigger unit based on flashover / O. B. Frants, V. G. Geiman, Yu. D. Korolev, V. D. Bochkov, C. Bickes, K. Frank, M. Schlaug // Proc. XVIII Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum – Eindhoven, The Netherlands – August 17 – 21. – 1998. – Vol. 1. – PP. 386 – 389.

13. K. Frank, J. Urban, Ch. Bickes, M. Iberler, U. Ernst, Yu. D. Korolev, O. B. Frants, V. G. Geyman, I. A. Shemyakin, V. D. Bochkov. Mechanism of the pseudospark initiation for the switches with a trigger unit based on flashover // Proc. XIXth Intern. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum – September 18 – 22 – 2000.– Xi'an, China – Vol. 1 – PP. 331 - 334.

14. Seld – off pseudospark switches for pulsed power applications (current status and prospects) / Yu. D. Korolev, O. B. Frants, I. A. Shemyakin, V. G. Geyman, V Dyagilev, V Ushich, V. D. Bochkov, K. Frank, M. Iberler, J. Urban // IEEE Trans. On Plasma Sci. – Oct. – 2001. – Vol. 29 – No. 5 – PP. 796 – 801.

15. Режимы запуска псевдоискрового разрядника со вспомогательным тлеющим разрядом в узле поджига / К. А. Клименко, Ю. Д. Королев, В. Г. Работкин, О. Б. Франц, И. А. Шемякин // Журн. техн. физики. – 1992. – Т. 62, вып. 10. – СС. 74 – 80.
16. Processes in the prebreakdown stage of a low – pressure discharge and the mechanism of discharge initiation in pseudospark switches / A. V. Kozyrev, Yu. D. Korolev, V. G. Rabotkin, I. A. Shemyakin // J. Appl. Phys. – 1993. – Vol. 74 – No. 9. – PP. 5366 – 5371.
17. Исследование псевдоискрового разрядника со вспомогательным тлеющим разрядом в цепи запуска / К. А. Клименко, А. В. Колесников, Ю. Д. Королев, В. Г. Работкин, О. Б. Франц, И. А. Шемякин // Журн. техн. физики. – 1992. – Т. 62, вып. 2. С. 456.
18. Electrical breakdown mechanism in pseudospark switches / К. А. Klimenko, A. V. Kozyrev, Yu. D. Korolev, V. G. Rabotkin, I. A. Shemyakin // Proc. XV Intern. Symp. on Discharge and Electrical Insulation in Vacuum – Darmstadt, 1992. – PP. 467 – 469.
19. Mechanism for initiation of pseudospark discharge by an ion beam injected from anode side / Yu. D. Korolev, O. B. Frants, I. A. Shemyakin, V. G. Rabotkin, V. D. Bochkov, K. Frank, A. I. Kuzmichev, D. A. Kuzmichev // Proc. XXIV Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases – Warsaw, Poland, 1999. – Vol. III. – PP. 57 – 58
20. Effect of a prebreakdown current on the hold – off voltage and discharge initiation in the pseudospark switches / V. D. Bochkov, A. V. Kolesnikov, Yu. D. Korolev, V. G. Rabotkin, O. B. Frants, I. A. Shemyakin // Proc. XVI Intern. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum – Moscow – St. – Peterburg, 1994. – SPIE Proc. – 1994. – Vol. 2259. – PP. 317 – 320.
21. А. В. Болотов, А. В. Козырев, Ю. Д. Королев, В. Г. Работкин, О. Б. Франц, И. А. Шемякин Механизм статического пробоя псевдоискрового разрядника // Физика низкотемпературной плазмы. Материалы конференции. – Петрозаводск, 1995. – Ч. 2. – СС. 216 – 217.
22. Investigation of the effect of blocking potential on the static breakdown voltage and discharge initiation in the pseudospark switches / V. D. Bochkov, A. V. Kolesnikov, Yu. D. Korolev, V. G. Rabotkin, O. B. Frants, I. A. Shemyakin // IEEE Trans. On Plasma Sci. – 1995. – Vol. 23 – No. 3 – PP. 341 – 346.
23. Suppression of a prebreakdown current as a method to increase a static breakdown voltage in pseudospark switches / A. V. Bolotov, A. V. Kozyrev, Yu. D. Korolev, O. B. Frants, I. A. Shemyakin // Proc. XXII Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases – Hoboken – USA, 1995. – Part 1. – PP. 39 – 40.
24. Исследование предпробойных токов, протекающих в псевдоискровых разрядниках / В. Д. Бочков, А. В. Колесников, Ю. Д. Королев, В. Г. Работкин, О. Б. Франц, И. А. Шемякин // Журн. техн. физики. – 1997. – Т. 67 – вып. 10.

25. Исследование потоков ионов, возникающих в прикатодных областях дуги низкого давления / Н. Н. Коваль, Н. П. Кондратьева, Ю. Д. Королев, И. А. Шемякин, П. М. Щанин // Конф. по физике низкотемпературной плазмы ФНТП – 98: Мат. конф. – Петрозаводск, 1998. – Ч. 1. – С. 234 – 238.
26. Исследование потоков ионов, возникающих в прикатодных областях дуги низкого давления / Н. Н. Коваль, Н. П. Кондратьева, Ю. Д. Королев, И. А. Шемякин, П. М. Щанин // Изв. АН Сер. физическая – 1999. – Т. 63 – № 11. – СС. 2271 – 2275.
27. Yu. D. Korolev, O. B. Frants, V. G. Geyman, R. V. Ivashov, N. V. Landl, I. A. Shemyakin, K. Frank, I. Petzenhauser. High-current low – pressure pulsed glow discharge with a hollow cathode // Proc. 7th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows – Tomsk, Russia – 25 – 29 July – 2004 – PP. 107 – 110.
28. Yu. D. Korolev, O. B. Frants, V. G. Geyman, R. V. Ivashov, N. V. Landl, I. A. Shemyakin, K. Frank, R. Bischoff. Current quenching in the pseudospark discharge and generation of a fast electron beam // Proc. XXIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum – Yalta, Crimea – September 27 – October 1, 2004. – PP. 287 – 290.
29. R. Bischoff, K. Frank, I. Petzenhauser, Yu. D. Korolev, O. B. Frants, V. G. Geyman, N. V. Landl, I. A. Shemyakin. Temporal structure of the fast electron beam at the stage of formation of the pseudospark discharge with external triggering // Proc. XXIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum – Yalta, Crimea – September 27 – October 1, 2004. – PP. 291 – 294.
30. Развитие импульсного разряда в сильноточных коммутаторах низкого давления с холодным катодом / В. Д. Бочков, А. В. Болотов, В. Г. Гейман, Н. В. Ландль, Р. В. Ивашов, Ю. Д. Королев, О. Б. Франц, И. А. Шемякин // Изв. Академии наук. Сер. Физическая. – 2003. – В. 67. – N. 9. – СС. 1287 – 1292.
31. Mechanism of the current quenching phenomenon in pseudospark discharge / Yu. D. Korolev, O. B. Frants, V. G. Geyman, R. V. Ivashov, N. V. Landl, I. A. Shemyakin // Proceedings XXth International symposium on discharges and electrical insulation in vacuum. – Tours, France. – July 1 – 5, 2002. – PP. 491 – 494.
32. K. Frank, Ch. Bickes, U. Ernst, M. Iberler, A. Rainer, J. Schwab, J. Urban, W. Weisser, V. Bochkov, O. B. Frants, Yu. D. Korolev, and I. A. Shemyakin, “Design criteria for high performance, high power pseudospark switches” // Proc. 12th IEEE International Pulsed Power Conference – Monterey, California – June 27 – 30, 1999. – Vol. 1 – PP. 224 - 227.
33. Yu. D. Korolev, O. B. Frants, V. G. Geyman, N. V. Landl, R. V. Ivasov, I. A. Shemyakin, R. E. Bischoff, K. Frank, “Temporal structure of the fast electron beam generated in the pseudospark discharge with external triggering” // IEEE Trans. On Plasma Sci. – 2005. – vol. 33 – no 5 – PP. 1648 – 1653.

34. A. V. Bolotov, Yu. D. Korolev, N. V. Landl, O. B. Frants, I. A. Shemyakin and J. Urban / An Investigation of Plasma Parameters of Pulse High – Current Hollow-Cathode Glow Discharge // 15th SHCE Proceedings – Tomsk, 2008. – PP. 244-247.
35. Yu. D. Korolev, O. B. Frants, V. G. Geyman, R. V. Ivasov, N. V. Landl, I. A. Shemyakin, “Generation of EUV Radiation in Plasma of the High – Current Hollow-Cathode Glow Discharge” // Известия Вузов. Физика. – 2006. – № 11 – Приложение – СС. 169 – 172.
36. Yu. D. Korolev, O. B. Frants, V. G. Geyman, R. V. Ivashov, N. V. Landl, I. A. Shemyakin Space – Time Evolution of the Pseudospark Discharge Plasma Emitting Near 13.5 nm // Известия Вузов. Физика. – 2006. – № 11 – Приложение – СС. 217-220.
37. Bolotov A. V., Korolev Yu. D., Frants O. B., Landl N. V., Shemyakin I. A. The EUV Emission Formation from Pseudospark Discharge Plasma // Изв. вузов. Физика. – 2007. – № 9. – Приложение. – СС. 136 – 139.
38. Limited current for a low-pressure pulsed glow discharge with hollow cathode / Yu. D. Korolev, O. B. Frants, V. G. Geyman, R. V. Ivashov, N. V. Landl, I. A. Shemyakin // Proc. 6th international conference on modification of materials with particle beams and plasma flows // Edited by G. A. Mesyats, S. D. Korovin, A. I. Ryabchikov. – Tomsk, Russia. – 23 – 28 September 2002. – PP. 117 – 120.
39. Investigation on dense and superdense glow discharge phases in pseudospark electrode systems / Yu. D. Korolev, O. B. Frants, V. G. Geyman, R. V. Ivashov, N. V. Landl, I. A. Shemyakin // IV Intern. Conf. Plasma Phys. and Plasma Techn. Minsk, Belarus. – September 2003. – Vol. 1. – P. 11.
40. Бочков В. Д., Дягилев В. М., Королев Ю. Д., Ушич В. Г., Шемякин И. А. Патент РФ № 2089003 (заявка 95117322) на изобретение «Газоразрядный прибор с холодным катодом».
41. Бочков В. Д., Королев Ю. Д., Шемякин И. А. Псевдоискровые разрядники для коммутации больших импульсных токов // Физика низкотемпературной плазмы. Материалы конференции. – Петрозаводск, 1995. – Ч. 3. – СС. 402 – 404.
42. Parallel operation of sealed – off pseudospark switches onto common load / V. D. Bochkov, O. B. Frants, V. G. Geiman, Yu. D. Korolev, V. G. Rabotkin, I. A. Shemyakin // Proc. XVII Intern. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. – Berkeley, 1996. – Vol. 2. – PP. 974 – 976.
43. V. D. Bochkov, V. M. Djagilev, V. G. Ushich, Yu. D. Korolev, I. A. Shemyakin, O. B. Frants, K. Frank “Sealed – off pseudospark switches (current status and prospects)” // Proc. 1st Intern. Congress on Radiation Physics, High Current Electronics and Modification of Materials – Tomsk, Russia – 24 – 29 September, 2000. – Vol. 2 (12th Symp. on High Current Electronics) – PP. 245 – 249.

44. Псевдоискровые разрядники для схем питания импульсных лазеров / В. Д. Бочков, Ю. Д. Королев, К. Франк, О. Б. Франц, И. А. Шемякин // Изв. вузов. Физика. – 2000. – Т. 43 – № 5 – СС. 97 – 105.
45. Формирование и развитие сильноточного импульсного разряда в псевдоискровом разряднике / А. В. Болотов, В. Д. Бочков, В. Г. Гейман, Р. В. Ивашов, Ю. Д. Королев, Н. В. Ландль, О. Б. Франц, И. А. Шемякин // Конф. по физике низкотемпературной плазмы ФНТП-2001: Мат. конф. – Петрозаводск, 2001. – Ч. 1. – СС. 90 – 95.
46. Methods for reducing the forward voltage drop in pseudospark switches / V. D. Bochkov, V. M. Dyagilev, V. G. Ushich, O. B. Frants, Yu. D. Korolev, I. A. Shemyakin, V. G. Geyman, R. V. Ivashov, N. V. Landl, K. Frank, M. Iberler, J. Urban // Int. power modulator conference abstract book. – Holliswood, USA. – June 30 – July 3, 2002. – P. 141
47. Yu. D. Korolev, O. B. Frants, I. A. Shemyakin, V. G. Geyman, V. D. Bochkov, R. V. Ivashov, N. V. Landl, K. Frank, M. Iberler, J. Urban, "Features of the pseudospark switch operation at a low anode voltage" // in Proc. The 28th IEEE International Conference on Plasma Science and The 13th IEEE International Pulsed Power Conference, Las Vegas, Nevada, – 2001, PP. 1754 – 1757.
48. Механизм прерывания тока тлеющего разряда низкого давления и переключения тока на дополнительный анод / Н. Н. Коваль, Ю. Д. Королев, И. А. Шемякин, П. М. Щанин, О. Б. Франц // Конф. по физике низкотемпературной плазмы ФНТП – 98: Мат. конф. – Петрозаводск, 1998. – Ч. 1. – СС. 297 – 300.
49. Yu. D. Korolev, I. A. Shemyakin, O. B. Frants, K. Frank "Low voltage triggering of a pseudospark switch" // Proc. XIXth Intern. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum – September 18 – 22, 2000. – Xi'an, China – Vol. 1 – PP. 335 - 338.
50. Low-voltage triggering for pseudospark switch with an auxiliary glow discharge / Yu. D. Korolev, O. B. Frants, I. A. Shemyakin, V. G. Geyman, V. Dyagilev, V. Ushich, V. D. Bochkov, K. Frank, M. Iberler, J. Urban // IEEE Trans. On Plasma Sci. – Oct. 2001. – Vol. 29 – No. 5. – PP. 796 – 801.
51. Yu. D. Korolev, O. B. Frants, V. G. Geyman, et al. "EUV radiation from plasma of a pseudospark discharge in its different stages": Proceedings of SPIE / edited by Kamil A. Valiev – Zvenigorod, 2003. – vol. 5401 – PP. 16 – 21.
52. Yu. D. Korolev, O. B. Frants, V. G. Geyman, R. V. Ivashov, V. N. Landl, I. A. Shemyakin "Energy Input Regimes in the EUV Radiation Source Based on the Pseudospark Discharge" // Proc. XXIIInd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum – Matsue, Japan, September 25 – 29, 2006.
53. Parallel operation of sealed – off pseudospark switches onto common load / V. D. Bochkov, O. B. Frants, V. G. Geiman, Yu. D. Korolev, V. G. Rabotkin, I. A. Shemyakin // Proc. XVII Intern. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. – Berkeley, 1996. – Vol. 2. – PP. 974 – 976.