

На правах рукописи

Абдуллин Эдуард Нуруллович

**ВЗРЫВОЭМИССИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ ШИРОКОАПЕРТУРНЫХ
ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ МИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ**

05.27.02 – вакуумная и плазменная электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Томск – 2007

Работа выполнена в Институте сильноточной электроники СО РАН, г. Томск.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор
Ю.П. Усов
(Томский политехнический университет,
г. Томск)

доктор технических наук
А.Л. Филатов
(Институт электрофизики УрО РАН,
г. Екатеринбург)

доктор физико-математических наук,
профессор
Ю.Н. Новоселов
(Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
г. Москва)

Ведущая организация: НИИ электрофизической аппаратуры
им. Д.В. Ефремова, г. Санкт-Петербург

Защита состоится 28 сентября 2007г. в 15-00 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 СО РАН.

Автореферат разослан « » _____ 2007г.

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



Д.И. Проскуровский

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследований

Электронные пучки с энергией электронов от десятков до 500 – 600 кэВ, токами от единиц ампер до десятков и сотен килоампер, поперечным сечением $10^2 - 10^4 \text{ см}^2$ и более находят применение для возбуждения мощных газовых лазеров, генерации импульсов СВЧ и рентгеновского излучения, решения технологических задач в плазмохимии, очистке газов, стерилизации, отверждении покрытий, радиационной химии и технологии (обработка пленки, прививка) и т.д.

Для получения таких пучков используют мощные электронные источники и ускорители со взрывоэмиссионными катодами. Взрывоэмиссионные источники характеризуются широким диапазоном энергий, токов и плотностей токов генерируемых электронных пучков. В отличие от электронных источников на основе термокатодов, плазменных источников с сеточной стабилизацией эмиссионной границы, они не содержат сложных систем формирования и развертки пучка, дополнительных источников электропитания и газа. При больших значениях тока пучка использование взрывной эмиссии не имеет альтернатив.

Характерной чертой взрывоэмиссионных электронных источников является ограниченная $10^{-7} - 10^{-6}$ с длительность импульса тока электронного пучка. Во взрывоэмиссионных источниках отбор тока производится из расширяющейся в межэлектродный промежуток со скоростью $\sim 10^6 \text{ см/с}$ плазмы, которая образуется в результате взрыва микроострий на поверхности катода в процессе протекания тока. Генерация электронного пучка сопровождается десорбцией газа с анода, образованием и распространением в межэлектродный промежуток анодной плазмы. Заполнение плазмой вакуумного зазора приводит к закорачиванию диода и прекращению генерации пучка.

Задача увеличения длительности импульсов электронных пучков, получаемых во взрывоэмиссионных диодах, всегда была одной из наиболее актуальных в сильноточной электронике. Причиной этого является высокое энергосодержание микросекундных электронных пучков при умеренных значениях тока. В то же время применение микросекундных пучков позволяет реализовать режимы, представляющие интерес для ряда технологических процессов.

К началу данной работы было известно, что проводимость вакуумного межэлектродного промежутка при формировании разряда возрастает немонотонно, существуют геометрии промежутка и режимы разряда, в которых скорость распространения катодной плазмы уменьшается, имеет место высоковольтная квазистационарная фаза разряда. Уменьшение скорости связывалось с насыщением эмиссионной способности плазмы по мере расширения, приводящим к стабилизации тока разряда, при этом

длительность высоковольтной стадии достигала 10^{-4} с и более¹. В то же время, длительность электронных пучков большого сечения, получаемых в мощных взрывоэмиссионных диодах при ускоряющих напряжениях $\sim 10^5$ В не превышала долей и единиц микросекунд. Вопросы о механизме стабилизации тока, возможности затягивания высоковольтной стадии разряда в мощных диодах с большим поперечным сечением электронного пучка были изучены недостаточно. В этой связи исследование механизма стабилизации тока является актуальным для решения задачи увеличения длительности электронных пучков, получаемых во взрывоэмиссионных электронных источниках и мощных вакуумных диодах при ускоряющих напряжениях в сотни киловольт.

Разработка взрывоэмиссионных вакуумных диодов с большим поперечным сечением пучка чрезвычайно важна при создании ускорителей, предназначенных для накачки мощных эксимерных лазеров. В современных лазерных системах используют, как правило, ускорители с промежуточными накопителями энергии, при этом длительность электронного пучка составляет $\sim 100 - 200$ нс. Создание сильноточных взрывоэмиссионных диодов микросекундного диапазона и мощных импульсных генераторов открывает возможность для реализации новых схем ускорителей с питанием электронного диода непосредственно от первичного накопителя. Исключение формирующих линий упрощает конструкцию ускорителя и лазера в целом, повышает надежность и уменьшает стоимость установки.

Важными вопросами практического применения взрывоэмиссионных электронных источников являются вопросы реализации частотных режимов работы, а также о необходимых вакуумных условиях. Частотные режимы используются в технологических электронных ускорителях, СВЧ-генераторах, при этом важной задачей является обеспечение ресурса катода. Значительный интерес представляет задача получения электронных пучков длительностью $0.1 - 1$ мкс в диапазоне давлений $10^{-1} - 10^{-2}$ мм рт. ст. Использование форвакуумной откачки упрощает конструкцию ускорителя, расширяет его технологические возможности.

Цели работы

1. Исследование механизмов стабилизации тока и получение широкоапертурных микросекундных электронных пучков во взрывоэмиссионных диодах и электронных источниках при ускоряющих напряжениях $\sim 10^5$ В.
2. Разработка широкоапертурных вакуумных диодов для возбуждения мощных газовых лазеров, исследование эффективности работы электронных ускорителей без промежуточных накопителей энергии.

¹ Баженов Г.П., Бугаев С.П., Месяц Г.А., Чесноков С.М. Использование взрывной эмиссии для получения импульсов электронного тока длительностью 10^{-4} с и более // Письма в ЖТФ. – 1976. – Т. 2. – В. 10. – С. 462 – 465.

3. Повышение ресурса работы и рабочего давления взрывоэмиссионных электронных источников. Получение пучков длительностью $\sim 10^{-7}$ с в диапазоне давлений остаточного газа $10^{-1} - 10^{-2}$ мм рт. ст.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые:

1. Показано, что во взрывоэмиссионных диодах с катодами в виде острия или лезвия на плоскости, многолезвийными и многоострийными катодами, формирующими электронные пучки большого сечения, важная роль в установлении квазистационарного режима разряда принадлежит пространственному заряду пучка. Присутствие пространственного заряда в межэлектродном зазоре приводит к ограничению роста тока, что наряду с насыщением эмиссионной способности катодной плазмы обеспечивает переход разряда в квазистационарную фазу, при этом сплошная плазменная эмиссионная поверхность на катоде может отсутствовать.
2. Экспериментально показано, что при плотности тока пучка $10^{-1} - 1$ А/см² основным фактором, ограничивающим длительность импульса электронного пучка во взрывоэмиссионном диоде, является газовыделение с анода. При ограничении количества газа, поступающего с анода, и обеспечении мер, предотвращающих распространение к аноду катодной плазмы, в мощных вакуумных диодах и взрывоэмиссионных источниках возможно получение широкоапертурных электронных пучков длительностью $10^{-5} - 10^{-4}$ с и более.
3. Установлено, что эмиссионные свойства катодов с гладкой эмитирующей поверхностью с диэлектрическим покрытием зависят от материала основания катода. Осуществлен подбор материалов покрытия и основания катода и разработаны конструкции катодов и вакуумных диодов сильноточных электронных ускорителей, предназначенных для накачки эксимерных лазеров с активным объемом 30 – 600 л.
4. Экспериментально показано, что ток электронного пучка в сильноточных диодах с большим поперечным сечением пучка ($0.25 - 3$ м²) в результате газовыделения с анода в 1.15 – 1.4 раза превышает ток, ограниченный пространственным зарядом в соответствии с законом степени $3/2$ в отсутствие газа и плазмы в межэлектродном промежутке. Превышение уменьшается при увеличении напряжения на диоде с 300 до 600 кВ.
5. Экспериментально продемонстрирована высокая эффективность радиальной накачки мощных эксимерных лазеров с помощью электронных ускорителей без промежуточных накопителей энергии. Показано, что энерговыход в газ при использовании таких ускорителей составляет $\sim 40\%$ энергии электронного пучка в диоде и $\sim 30\%$ от энергии, запасенной в первичном накопителе.

6. Предложен и практически реализован способ секционирования мощных вакуумных диодов, формирующих радиально-сходящиеся электронные пучки, позволяющий уменьшить число генераторов электронного ускорителя по сравнению с числом магнитоэкранированных диодов.
7. Экспериментально продемонстрирована возможность затягивания высоковольтной стадии разряда во взрывоэмиссионном диоде при давлении остаточного газа $10^{-1} - 10^{-2}$ мм рт. ст. до $10^{-7} - 10^{-6}$ с. При напряжении на диоде ~ 200 кВ и давлении остаточного газа 10^{-2} мм рт. ст. длительность электронных пучков, выведенных из диода через титановую фольгу толщиной 50 мкм, составляет 0.2 мкс.
8. Показано, что параметры катодной плазмы при взрывной эмиссии и в дуговом разряде, а также характеристики дугового разряда в межэлектродном промежутке с одноэлементным катодом, такие как катодное падение, пороговый ток, удельная эрозия определяются порядковым номером металла катода в периодической таблице элементов.
9. Предложена модель интенсивного газовыделения с анода, объясняющая процесс газовыделения радиоллизом в пленках органических загрязнений и рабочей жидкости насосов.

Научная и практическая ценность

1. Выполнены исследования работы диодов с многоострийными катодами. На базе многоострийных катодов впервые реализован электронный источник с энергией электронов ~ 200 кэВ, током пучка ~ 200 А, поперечным сечением ~ 300 см², длительностью импульса тока пучка до 25 мкс, а также электронный источник с энергией электронов до 300 кэВ, током ~ 3 кА, поперечным сечением пучка 19×140 см² длительностью до 6 мкс с постоянным импедансом диода.
2. Разработана конструкция взрывоэмиссионного электронного источника с энергией электронов 150–200 кэВ, током пучка $\sim 30 - 50$ А, поперечным сечением пучка ~ 100 см² длительностью $\sim 10^{-4}$ с.
3. Разработаны конструкции катодов и мощных электронных диодов, формирующих электронные пучки прямоугольного сечения и радиально-сходящиеся с энергией электронов $\sim 500 - 600$ кэВ, током 60 кА – 0.6 МА, длительностью 1 – 1.5 мкс для накачки эксимерных лазеров с активным объемом 30 – 600 л.
4. Разработан частотный генератор Маркса и взрывоэмиссионный электронный источник на его основе с энергией электронов $\sim 200 - 250$ кэВ, током пучка $\sim 300 - 400$ А, поперечным сечением пучка 100×200 мм² и 100×800 мм², длительностью 0.3 – 0.4 мкс, частотой следования импульсов 100 – 300 Гц.

5. Экспериментально продемонстрирована возможность получения во взрывоэмиссионном источнике электронных пучков длительностью $\sim 10^{-7}$ с при давлении остаточного газа $\sim 10^{-2}$ мм рт. ст.
6. Разработаны методики измерения: токов электронных пучков большого сечения с помощью поясов Роговского в условиях несимметричного возбуждения обмотки; энергии и распределения энергии по сечению электронного пучка с помощью калориметров и тепловизора; энергии электронного пучка, вложенной в газ, с помощью механотронов.
7. Получены приближенные соотношения для расчета тока пучка в диоде с катодом в виде острия или лезвия на плоскости.

Апробация работы

Результаты работы опубликованы в двух специализированных сборниках, 29 статьях в отечественных и зарубежных рецензируемых журналах, а также в 25 докладах на международных конференциях и симпозиумах. По теме диссертации получено 3 авторских свидетельства на изобретения.

Результаты работы докладывались на II – VII, XII, XIII Всесоюзных и Международных симпозиумах по сильноточной эмиссионной электронике (1975, 1978, 1982, Томск; 1984, Новосибирск; 1986, 1988, 2000, 2004, Томск); Всесоюзных симпозиумах по ненакаливаемым катодам (1977, 1980, Томск); VII, IX, XI, XV, XVI, XVIII, XIX, XX International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (1976, Novosibirsk, USSR; 1980, Eindhoven, Netherlands; 1984, Berlin, DDR; 1992, Darmstadt, Germany; 1994, Moscow – St. Peterburg, Russia; 1998, Eindhoven, Netherlands; 2000, Xian, P.R.China; 2002, Toors, France); IX, XIV International Conference on High-Power Particle Beams (1992, Washington; 2002, Albuquerque, USA); III Workshop on KrF Laser Technology (1992, Rutherford Appleton Laboratory), IV International Conference on Plasma Physics and Plasma Technology (2003, Minsk, Belarus); VI International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows (2002, Tomsk).

Личный вклад автора

Автором внесен определяющий вклад в создание сильноточных диодов мощных электронных ускорителей, предназначенных для накачки эксимерных лазеров, включающий постановку задач исследований, разработку основных конструктивных решений и измерительных методик, проведение экспериментов, анализ и интерпретацию полученных результатов. Автором выполнены исследования по генерации широкоапертурных электронных пучков в частотном режиме и при давлении остаточного газа $10^{-1} - 10^{-2}$ мм рт. ст., предложен механизм установления

квазистационарного разряда во взрывоэмиссионных диодах, механизм интенсивного газовыделения с анода под действием электронного пучка.

Численные расчеты формирования электронных пучков выполнены совместно с С.В. Логиновым, В.Т. Астрелиным, С.Я. Беломытцевым. Исследование процессов в межэлектродном промежутке, зависимости свойств катодной плазмы от порядкового номера материала катода в периодической таблице элементов, разработка и исследование электронных источников с многострийными катодами и длительностью импульса электронного пучка $\sim 10^{-4}$ с выполнены совместно с Г.П. Баженовым, С.П. Бугаевым, С.М. Чесноковым.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, двух приложений, заключения, содержит 10 таблиц, 86 рисунков и список цитированной литературы из 230 наименований. Объем диссертации 229 страниц.

Защищаемые научные положения

1. Во взрывоэмиссионном диоде с катодом с острийными или лезвийными эмиттерами рост тока в начальной стадии расширения катодной плазмы замедляется в результате ограничения тока пространственным зарядом пучка, что способствует замедлению роста концентрации плазмы, распространяющейся из эмиссионных центров, снижению кратности заряда ионов в составе плазмы, и, таким образом, насыщению эмиссионной способности плазмы и установлению квазистационарного режима разряда, когда виртуальный катод на границе плазмы отсутствует, а движение плазмы к аноду тормозится электрическим полем, до образования на поверхности катода сплошной плазменной эмиссионной поверхности. Скорость роста тока в диоде в процессе установления квазистационарного разряда тем меньше, чем меньше напряженность поля в межэлектродном промежутке и величина тока, отбираемого из эмиссионных центров.
2. В квазистационарной фазе разряда первеанс диода увеличивается в результате распространения плазмы вдоль основания катода, роста проводимости межэлектродного промежутка в результате ионизации газа, поступающего с электродов, и стимулированного этим роста эмиссионной способности катодной плазмы. Основным фактором ограничения длительности квазистационарной фазы разряда при плотности тока пучка $0.1 - 1 \text{ А/см}^2$ является образование анодной плазмы. При ограничении количества газа, поступающего с анода, обеспечении мер, предотвращающих распространение к аноду катодной плазмы, длительность электронных пучков, получаемых во взрывоэмиссионных источниках при напряжении на межэлектродном промежутке $\sim 10^5 \text{ В}$, достигает $10^{-5} - 10^{-4} \text{ с}$.

3. Эмиссионные свойства катодов с диэлектрическим покрытием зависят как от свойств материала покрытия, так и свойств материала основания катода. Использование катодов с покрытием из бархата с видимыми на просвет порами и волокнами, ориентированными перпендикулярно поверхности ткани, закрепленного на основании из карботекстима, графитоволокнистого материала с удельным сопротивлением $(5 - 50) \times 10^{-2}$ Ом·м, позволяет получать и выводить в газовый объем радиально-сходящиеся электронные пучки с энергией электронов $\sim 300 - 600$ кэВ, плотностью тока $\sim 20 - 30$ А/см², поперечным сечением до ~ 3 м², длительностью $\sim 10^{-6}$ с.
4. Влияние магнитных полей токов, протекающих по электродам секционированного вакуумного диода, при числе генераторов, меньшем числа магнитоэкранированных диодов, на формирование пучка можно ослабить при выполнении токоподвода к катодам магнитоэкранированных диодов с помощью электрода в виде обечайки больших размеров. Уменьшение токов, протекающих вдоль кюветы, и связанных с ними магнитных полей достигается за счет использования системы магнитоизолирующих пластин обратного тока и секционирования катодов каждого магнитоэкранированного диода в направлении вдоль поверхности кюветы.
5. Применение взрывоэмиссионных катодов с бархатным покрытием и основанием из карботекстима в совокупности с генераторами Маркса с вакуумной изоляцией и линейными трансформаторами позволяет реализовать мощные компактные электронные ускорители для накачки эксимерных лазеров, обеспечивающие однородный по объему кюветы энерговклад с эффективностью до $\sim 40\%$ от энергии электронного пучка в диоде и $\sim 30\%$ от энергии, запасенной в генераторе импульсов высокого напряжения.
6. Длительность высоковольтной стадии разряда при напряжении на взрывоэмиссионном диоде ~ 200 кВ достигает $500 - 800$ нс при давлении остаточного газа 10^{-2} мм рт. ст. и 80 нс при 10^{-1} мм рт. ст. Увеличение длительности достигается за счет предотвращения эмиссии с конструктивных элементов катода, обеспечения достаточной мощности и энергозапаса источника питания вакуумного диода, применения частотного режима работы. При давлении остаточного газа 10^{-2} мм рт. ст. величина тока пучка, выведенного за титановую фольгу толщиной 50 мкм, составляет ~ 100 А, а длительность импульса тока равна 200 нс.

Краткое содержание работы.

Во **Введении** приведены характеристика работы и защищаемые научные положения.

В Главе 1 приводится краткий обзор результатов исследований процессов, протекающих в вакуумном межэлектродном промежутке и определяющих параметры генерируемых электронных пучков.

При разработке электронных источников с большим поперечным сечением пучка важной задачей является инициирование на катоде большого числа эмиссионных центров. К настоящему времени показано, что условием инициирования эмиссии является достижение высокой напряженности электрического поля, достаточной для взрыва микрообъемов вещества катода и образования плазмы². Возможность инициирования эмиссионного центра зависит от свойств материала катода, его электропроводности, плотности, теплофизических параметров. В таблице 1 приведены значения постоянного напряжения на промежутке длиной 1 мм, при котором происходит инициирование эмиссии и пробой промежутка U_{np} , а также скорости коммутации d/t_k , определенной как частное от деления длины промежутка на время спада напряжения от уровня 0.9 до 0.1 от первоначального значения³.

Таблица 1. Характеристики пробоя в зависимости от материала электродов.

Параметры	Материал электродов														
	W	Ta	Mo	Ni	Ti	Nb	Cu	Al	Zn	Pb	In	Cd	Bi	Sn	C
U_{np} , кВ	73	68	62	56	55	48	46	45	26	24	23	22	21	19	16
d/t_k , 10^6 см/с	2.7	3.5	2.6	1.9	1.9	3.0	2.5	2.6	1.6	1.3	1.3	1.3	1.1	1.5	2.0

Видно, что напряжение пробоя промежутка с графитовым катодом минимально, что является важным основанием для применения графита для изготовления эмиттеров взрывоэмиссионных катодов. В то же время, к началу данной работы графит не использовался при изготовлении катодов источников электронных пучков большого сечения.

Важным фактором, влияющим на работу взрывоэмиссионного электронного источника, является электрическая эрозия, приводящая к уменьшению напряженности поля на поверхности эмиттеров, прекращению их работы. К числу наиболее эрозионностойких материалов относятся медь, тантал, в связи с чем они широко использовались для изготовления эмиттеров взрывоэмиссионных катодов, несмотря на высокую напряженность поля, необходимую для инициирования эмиссии.

Инициирование и функционирование эмиссии возможно при условии, что ток, протекающий через эмиссионный центр, не может быть меньше некоторого порогового тока, названного минимальным током взрывной эмиссии⁴. Величина минимального тока зависит от материала эмиттера и

² Бугаев С.П., Литвинов Е.А., Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. Взрывная эмиссия электронов // УФН. – 1975. – Т. 115. – №1. – С. 101-120.

³ Юрике Я.Я. Время роста искры при вакуумном пробое для электродов из различных материалов // Изв. вузов. Физика. – 1974. – №11. – С. 140-147.

⁴ Баженов Г.П., Чесноков С.М. О минимальном токе взрывной эмиссии электронов // Изв. Вузов. Физика. – 1976. – №11. – С. 133-134.

близка пороговому току вакуумной дуги. Уменьшение рабочего тока эмиттера уменьшает эрозию и, тем самым, увеличивает срок службы катода.

Высокая эмиссионная способность катодной плазмы обусловлена ее высокой электронной температурой, концентрацией, а также высокой кратностью заряда ионов. Уменьшение времени от начала разряда, увеличение скорости роста тока ведут к росту кратности заряда ионов, и, следовательно, росту эмиссионной способности. При малых межэлектродных промежутках $10^{-1} - 1$ см ток в диоде быстро нарастает, что связано с высокой скоростью расширения плазмы $\sim 2 \times 10^6$ см/с. Заполнение плазмой приводит к дуговому разряду и прекращению генерации пучка.

При больших межэлектродных промежутках $1 - 10$ см в росте проводимости в высоковольтной стадии разряда характерно присутствие трех фаз. Продолжительность первой, начальной фазы роста тока, составляет $10^{-8} - 10^{-7}$ с. По истечении этого времени имеет место более или менее выраженная квазистационарная фаза со слабоизменяющимся током, продолжительность которой может достигать единиц микросекунд и более. Квазистационарная фаза завершается сильноточной фазой длительностью $10^{-7} - 10^{-6}$ с, в течение которой происходит повторный рост тока до уровня тока короткого замыкания источника питания, после чего в межэлектродном промежутке зажигается дуговой разряд.

Причиной насыщения эмиссионной способности катодной плазмы является достижение тепловым током в процессе расширения плазмы величины тока, отбираемого в соответствии с законом степени $3/2^5$. После перехода в насыщение движение плазмы по направлению к аноду прекращается, распространение плазмы происходит в направлениях, где электрическое поле мало, а именно, вдоль поверхности катода. Условием дальнейшего распространения плазмы в межэлектродный зазор является рост ее эмиссионной способности.

Эмиссионную способность плазмы можно ограничить при уменьшении отбираемого тока, изготовлении эмиттеров из материалов, производящих малое количество плазмы, помещении эмиттеров в полый электрод, ограничивающий распространение плазмы поперек межэлектродного промежутка. Использование этих мер стабилизирует ток разряда и позволяет получать при напряжении на межэлектродном промежутке $\sim 10^4$ В электронные пучки с током ~ 1 А длительностью 10^{-4} с и более. Установление квазистационарного значения тока за время $10^{-8} - 10^{-7}$ с связывается с распространением плазмы до ограничивающих стенок, что требует, однако, высоких скоростей плазмы $\sim 10^7$ см/с и более. Предполагалось, что достижение таких скоростей является следствием ускорения плазмы виртуальным катодом в начальной фазе разряда.

⁵ Баженов Г.П., Месяц Г.А., Чесноков С.М. О замедлении скорости движения эмиссионной границы катодного факела в диоде, работающем в режиме взрывной эмиссии // Радиотехника и электроника. – 1975. – Т. 20. – №11. – С. 2413 – 2415.

Исследования деионизации плазмы, однако, показали, что существенного ускорения плазмы виртуальным катодом во взрывоэмиссионном электронном источнике не происходит⁶. При токах эмиттера $10 - 10^3$ А катодная плазма, распространяющаяся от эмиссионного центра, не огибает преграды, расположенной на ее пути, ускорения плазмы виртуальным катодом в область тени за преградой не происходит. При взаимодействии со стенками плазма нейтрализуется с вероятностью ~ 1 . Отсутствие ускорения плазмы требует уточнения механизма установления квазистационарного режима разряда.

Исследования формирования пробоя межэлектродного промежутка показали, что наряду с катодными процессами важная роль принадлежит анодным процессам, а также влиянию анодных процессов на катодную плазму (А×К-взаимодействию), процессам в межэлектродном промежутке. Воздействие пучка с энергией электронов ~ 10 и $100 - 200$ кэВ на поверхность анода приводит к десорбции газа с эффективностью соответственно $\sim 2 - 3$ и 10 молекул на электрон, при этом средняя скорость газа составляет $\sim (5 - 6) \times 10^4$ см/с. Газовыделение с анода, начинающееся сразу после появления пучка, приводит к образованию анодной плазмы, росту тока и переходу разряда в сильноточную фазу⁷. При плотности тока пучка $0.1 - 10$ А/см² время до образования анодной плазмы можно оценить из соотношения:

$$t_0 = \sqrt{\frac{m}{M}} \frac{e}{\gamma \sigma} \frac{1}{j}. \quad (1)$$

Здесь m и M – массы электрона и иона, e – заряд электрона, σ – сечение ионизации, γ – эффективность десорбции, j – плотность тока.

Малая продолжительность высоковольтной сильноточной фазы разряда связана с быстрым ростом проводимости промежутка после образования анодной плазмы. Увеличение длительности этой фазы достигается при использовании плазменного анода с искусственно созданной плазмой. Некоторого увеличения длительности сильноточной фазы, как будет показано далее, можно достичь без применения плазменного анода путем соответствующей организации электродной системы, ослабляющей А×К-взаимодействие.

Электронные пучки большого сечения, применяемые для предыонизации СО₂-лазеров, были получены с использованием многоострийных катодов с медными эмиттерами высотой $3 - 5$ мм. Для защиты от пробоев края катода закрывали экраном в виде трубы диаметром

⁶ Абдуллин Э.Н., Баженов Г.П. Взаимодействие катодной плазмы с поверхностью катода в электронном источнике со взрывной эмиссией электронов (ВЭЭ) // Изв. вузов. Физика. – 1981. – №11. – С. 26 – 29.

⁷ Абдуллин Э.Н., Баженов Г.П., Бугаев С.П., Ерохин Г.П. Получение квазистационарных электронных пучков в высоковольтном вакуумном разряде // Тез. докл. IV Всесоюз. симп. по сильноточной электронике. – Томск, 1982. – Ч. 1. – С. 90 – 93.

~ 20 – 30 мм. При напряжении на диоде до 300 кВ плотность тока пучка составляла $0.5 - 5 \text{ А/см}^2$, длительность $10^{-8} - 10^{-7} \text{ с}$. Число работающих острий равно ~ 20 – 25%. При длительности импульса ~ 10^{-6} с наблюдались пробой, сопровождающиеся неконтролируемым ростом тока диода.

Широкоапертурные электронные пучки микросекундной длительности были получены при больших межэлектродных расстояниях и использовании генератора Маркса с выходным напряжением 1.2 МВ и достаточным энергозапасом⁸. В диоде с многострийным катодом сечением 200 см^2 , содержащим 800 острий, межэлектродном зазоре 14 см ток пучка составил 5 кА, длительность импульса тока 4 мкс.

Электронный пучок с поперечным сечением $300 \times 3000 \text{ мм}^2$ был получен в ускорителе, использованном для возбуждения CO_2 -лазера с активным объемом 270 л и энергией излучения 5 кДж⁹. При напряжении на диоде 200 кВ плотность тока пучка в кювете составляла 0.4 А/см^2 , длительность импульса тока пучка 2 мкс. Пробой в диоде были устранены при увеличении высоты эмитирующих острий с 5 до 12 мм. В целом, однако, причины пробоев, возможности и способы увеличения длительности импульсов электронных пучков в мощных взрывоэмиссионных диодах при ускоряющих напряжениях ~ 10^5 В и более были неясны.

Электронные пучки, используемые для возбуждения мощных эксимерных лазеров, являются релятивистскими, сильноточными, характеризуются высокими значениями плотности тока ~ $20 - 30 \text{ А/см}^2$ и более и энергии пучка 10 – 100 кДж, что связано с высокой мощностью накачки рабочей смеси ($0.1 - 0.5 \text{ МВт/см}^3$) и большими, порядка десятков и сотен литров, возбуждаемыми объемами газа. Для предотвращения пинчевания пучка под действием собственного магнитного поля используют внешнее ведущее магнитное поле или секционирование диода на несколько диодов, каждый из которых экранирован (изолирован) от магнитных полей других. Для повышения мощности пучка питание каждого из магнитоэкранированных диодов осуществляется от отдельного генератора, функции которого выполняет формирующая линия, при этом длительность импульса напряжения, подаваемого на диод, составляет ~ 100 – 200 нс.

К недостаткам существующих ускорителей можно отнести их сложность, что обусловлено применением формирующих линий.

В этой связи в ИСЭ СО РАН был разработан новый подход, заключающийся в использовании для получения сильноточных

⁸ Бугаев С.П., Кассиров Г.М., Ковальчук Б.М., Месяц Г.А. Получение интенсивных релятивистских микросекундных электронных пучков // Письма в ЖЭТФ. – 1973. – Т. 18. – В. 2. – С. 82 – 85.

⁹ Бычков Ю.И., Карлова Е.К., Карлов Н.В., Ковальчук Б.М., Кузьмин Г.П., Курбатов Ю.А., Манылов В.И., Месяц Г.А., Орловский В.М., Прохоров А.М., Рыбалов А.М. Импульсный CO_2 – лазер с энергией излучения 5 кДж // Письма в ЖТФ. – 1976. – Т.2. – Вып.5. – С. 212 – 216.

широкоапертурных электронных пучков мощных импульсных генераторов Маркса с вакуумной изоляцией, а также генераторов, собранных по схеме линейного трансформатора с вакуумной изоляцией вторичного витка и временем вывода энергии $\sim 10^{-6}$ с без применения формирующих линий.

Исключение формирующих линий усложняет задачу получения пучка в связи с увеличением длительности импульса напряжения, а также величины энергии, подводимой к диоду. Для обеспечения работы передающих линий генератора в режиме магнитной самоизоляции важным требованием является малое время установления первеанса диода или «включения» катода. В связи с высокой плотностью и большой длительностью тока пучка важное значение имеет обеспечение равномерной работы катода.

К началу данной работы широкоапертурных вакуумных диодов, устойчиво работающих в диапазоне плотности тока пучка $\sim 20 - 30$ А/см² и длительности $\sim 10^{-6}$ с и более, не существовало. В целом, энергетическая эффективность ускорителей без промежуточных накопителей энергии нуждалась в экспериментальной проверке.

В Выводах и постановке задачи в конце главы сформулированы задачи работы:

1. Уточнение механизма стабилизации тока и формирования квазистационарного разряда во взрывоэмиссионных электронных источниках и вакуумных диодах, в том числе с многоострийными катодами.
2. Разработка практических конструкций микросекундных взрывоэмиссионных электронных источников и вакуумных диодов и исследование возможности затягивания высоковольтной стадии разряда, в том числе и при форвакуумных давлениях остаточного газа.
3. Разработка экспериментальных методик для получения и регистрации параметров сильноточных широкоапертурных электронных пучков.
4. Разработка сильноточных вакуумных диодов мощных электронных ускорителей без промежуточных накопителей энергии и получение электронных пучков для накачки эксимерных лазеров при больших в десятки и сотни литров возбуждаемых объемах газа. Анализ эффективности работы таких ускорителей.

В **Главе 2** приводятся результаты исследований по затягиванию высоковольтной стадии разряда во взрывоэмиссионных диодах, разработке электронных источников с длительностью импульса пучка $\sim 10^{-6}$ с и более при ускоряющих напряжениях $\sim 10^5$ В.

В п. 2.1, 2.2 рассматривается роль пространственного заряда электронного пучка в процессе установления квазистационарного режима разряда в межэлектродном промежутке. На основании результатов численных расчетов и приближенного анализа показано, что пространственный заряд уменьшает скорость роста тока в диоде по мере расширения плазмы, при этом величина тока слабо зависит от радиуса

плазмы, скорость роста тока определяется геометрией межэлектродного промежутка. Так в случае диода с катодом в виде одиночного острия на плоскости увеличение радиуса плазмы в 2 раза с 3 до 6 мм приводит к увеличению тока в 1.7 раза. При работе острия в многоэмиттерном катоде скорость роста тока острия дополнительно уменьшается: то же самое увеличение тока в 1.7 раза является результатом увеличения радиуса плазмы в 3.3 раза (с 3 до 10 мм). Еще медленнее нарастает ток лезвийных эмиттеров. В диоде с катодом, содержащим 5 эмитирующих лезвий, формирующим пучок прямоугольного сечения, увеличение радиуса плазмы от 3 до 10 мм приводит к увеличению тока лишь в 1.37 – 1.6 раза. При этом более быстро нарастает ток крайних лезвий, находящихся в большем электрическом поле. На слабую зависимость тока от радиуса плазмы в диоде с многолезвийным катодом указывалось позднее в работе ¹⁰.

Слабый рост тока в процессе расширения плазмы в реальных электронных источниках ограничивает количество и концентрацию поступающей в межэлектродный промежуток катодной плазмы, снижает кратность заряда ионов, и, следовательно, эмиссионную способность плазмы. Снижение эмиссионной способности способствует ее насыщению, установлению квазистационарного режима разряда, увеличению длительности генерируемых электронных пучков. Работа диода с многоэмиттерным катодом характеризуется меньшим влиянием расширения плазмы на величину тока по сравнению со случаем катода с единичным эмиттером.

В п. 2.3 описаны исследования формирования пробоя в диодах с многострийными катодами с медными эмиттерами высотой 4 мм, применяемыми для получения широкоапертурных электронных пучков. Эксперименты показали, что использование многоострийных катодов приводит к стабилизации разряда, при этом средняя скорость заполнения плазмой межэлектродного промежутка составляет 1.3 – 1.6 см/мкс.

Поведение тока диода зависит от числа работающих острий. При большом числе работающих острий осциллограммы напряжения и тока имеют близкую форму, пробой в диоде может отсутствовать, длительность импульса тока пучка определяется временем разряда используемого в качестве источника питания генератора Маркса. При малом числе работающих острий и большом токе, приходящемся на работающее острие, наблюдается рост тока диода, на осциллограммах тока присутствуют кратковременные выбросы, сопровождающиеся локальными увеличениями плотности тока пучка на аноде, разряд завершается пробоем диода. Увеличение числа работающих острий, уменьшение тока, отбираемого с единичного эмиттера, являются, таким образом, способом увеличения длительности импульса электронного тока.

¹⁰ Беломытцев С.Я., Коровин С.Д., Пегель И.В. Условия постоянства тока во времени в сильноточном планарном диоде // Письма в ЖТФ. – 1998. – Т. 24. – В. 5. – С. 63 – 69.

Малое число работающих острий в диодах с многострийными катодами связано с влиянием так называемого эффекта экранировки, в соответствии с которым снижение электрического поля под действием пространственного заряда пучка, отбираемого с эмиссионного центра, может приводить к подавлению эмиссии с острий вблизи этого центра¹¹. Сокращение длительности фронта импульса напряжения ведет к уменьшению временного разброса между срабатыванием острий, ослаблению экранировки, увеличению числа работающих острий¹².

Механизм стабилизации тока в диоде с многострийным катодом обсуждается в п. 2.4. В соответствии с представлениями об ограничении роста тока пространственным зарядом работа диода с многострийным катодом отличается от случая единичного острия тем, что электронные траектории от отдельных эмиттеров могут пересекаться. При малом числе и плотности работающих острий, малой высоте острий, эмитируемые электронные пучки мало пересекаются, острия работают независимо друг от друга, при этом квазистационарная фаза разряда выражена слабо. Увеличение числа работающих острий приводит к пересечению электронных пучков с отдельных острий и быстрому установлению квазистационарного значения тока. Образование «коллективного» пространственного заряда в диоде, в каждой точке создаваемого большим числом эмиттеров, препятствует самопроизвольному росту тока с отдельных острий, что и объясняет стабилизирующий эффект многоострийного катода.

Условием затягивания высоковольтной стадии разряда в диодах с многоострийными катодами является выбор геометрии диода, материала острий и параметров импульса напряжения, обеспечивающих инициирование эмиссии на большом числе острий, снижение рабочей напряженности поля на катоде, отсутствие пробоев на стенке вакуумной камеры. Очевидно, что плотность объемного заряда минимальна на краях катода, в связи с чем возможен рост тока с периферийных эмиттеров, на что непосредственно указывают результаты вычислений (п. 2.1, 2.2). Влияние этого эффекта можно ослабить при использовании экранных электродов больших размеров, обеспечивающих снижение напряженности поля, и, тем самым, компенсирующих недостаток объемного заряда на краях катода.

Изложенные представления были реализованы при разработке ускорителя с многострийным катодом с энергией электронов 300 кэВ, длительностью импульса до 6 мкс, током пучка 3 и 15 кА, поперечным сечением пучка соответственно $19 \times 140 \text{ см}^2$ и $10 \times 140 \text{ см}^2$.

¹¹ Беломытцев С.Я., Коровин С.Д., Месяц Г.А. Эффект экранировки в сильноточных диодах // Письма в ЖТФ. – 1980. – Т. 6. – В. 18. – С. 1089 – 1092.

¹² Бурцев В.А., Василевский М.А., Василевская Ю.А., Ройфе И.М., Энгелько В.И., Яковлев С.П., Янкин Е.Г. О работе источника электронов с взрывоэмиссионным катодом в частотном режиме при большой длительности импульса // ЖТФ. – 1981. – Т. 51. – В. 7. – С. 1478 – 1489.

Ускоритель предназначен для работы в двух вариантах: возбуждения CO_2 -усилителя или накачки XeCl -лазера. В варианте CO_2 -лазера катод содержал три ряда эмиттеров из медной проволоки диаметром 0.3 мм высотой 6 см, расположенных в шахматном порядке, расстояния между рядами 3 см, расстояние между эмиттерами в ряду 6 см (рис.1). В варианте XeCl -лазера использовались эмиттеры в виде зубьев из медной фольги толщиной 20 мкм высотой 2.5 см. Расстояния между рядами и эмиттерами в ряду равны соответственно 1.25 см и 2.5 см. Радиусы экранных электродов равны 7.5 и 2.5 см, расстояния между осями – 44 см для CO_2 - и 16 см для XeCl -лазера. Расстояния от концов острий до анода равны соответственно 19 см и 6.5 см. Источником напряжения являлся генератор Маркса с емкостью в ударе 50 нФ с длительностью фронта импульса напряжения на диоде соответственно 300 нс и 80 нс.

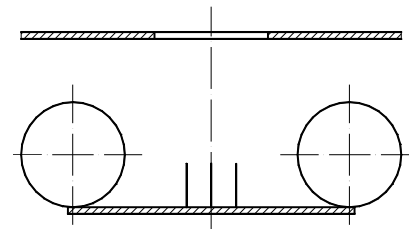


Рис.1. Схема диода с многоострийным катодом.

Благодаря значительной высоте острий, малой длительности фронта импульса напряжения, большим радиусам экранных электродов обеспечивается срабатывание большинства острий, малое время установления импеданса диода, соответственно ~ 0.6 мкс и 0.14 мкс, практически постоянное значение импеданса в течение импульса, электронный пучок имеет резкие края. Малое время установления импеданса свидетельствует о том, что квазистационарная фаза разряда реализуется без образования сплошной плазменной эмиссионной границы.

Увеличение длительности достигается при уменьшении электрического поля в межэлектродном промежутке, использовании эмиттеров, способных работать при низкой напряженности поля. В п. 2.5 описывается конструкция электронного источника с многоострийным катодом, позволившего впервые получить электронные пучки с энергией электронов 200 кэВ, током 220 А, поперечным сечением ~ 300 см², длительностью до 25 мкс. Эмиттерами служили 18 заостренных графитовых стержней высотой 3 – 4 см над поверхностью катода, помещенных в полый катодный электрод, выполняющий функции экрана и экспандера, ограничивающего расширение плазмы. Расстояние от концов острий до торца катодного электрода составляло 5 см, расстояние от концов эмиттеров до анода – 14 – 18 см. Наблюдения показали, что работает 70 – 90 % острий. Наибольшее число работающих острий наблюдалось при сопротивлении графитовых стержней ~ 10 Ом. Увеличение числа работающих эмиттеров достигалось при установке сопротивлений в цепях эмиттеров в многоострийном катоде¹³.

¹³ Бурцев В.А., Василевский М.А., Ройфе И.М., Середенко Е.В., Энгелько В.И. О повышении стабильности работы многоострийных взрывоэмиссионных катодов // Письма в ЖТФ. – 1978. – Т. 4. – В. 18. – С. 1083 – 1087.

Разработанный источник характеризовался стабильностью параметров, что позволило применить его в исследованиях по отверждению лаковых покрытий на древесине.

Увеличение длительности электронных пучков до 10^{-4} с и более достигалось за счет дальнейшего уменьшения электрического поля на катоде, при этом для инициирования эмиссии использовался вспомогательный разряд, исключалась возможность распространения катодной плазмы в межэлектродный промежуток (п. 2.6). Эмиттером служил графитовый диск диаметром 10 – 20 мм, установленный соосно в катодном электроде цилиндрической формы. Для стабилизации положения эмиссионной границы инициирование эмиссии производили со стороны диска, противоположной аноду, что ослабляло А×К-взаимодействие. Для уменьшения количества поступающего с анода газа и концентрации анодной плазмы использовались большие ~ 10 см и более межэлектродные расстояния, уменьшение тока и плотности тока пучка. В результате использования этих мер получены электронные пучки с энергией электронов ~ 150 кэВ, током ~ 30 – 40 А, поперечным сечением ~ 100 см², длительностью ~ 50 – 100 мкс. При токах до единиц ампер возможно затягивание высоковольтной стадии разряда и получение электронных пучков длительностью ~ 10^{-3} с и более.

Эксперименты показали, что формирование пробоя в источнике связано с анодной плазмой, появление которой обнаруживается по росту тока медленных электронов на положительную пластину анализатора энергии, установленного за щелью в аноде, и ленгмюровский зонд на аноде перед началом роста тока диода в сильноточной фазе. Эксперименты показали, что генерация электронного пучка не прекращается и в сильноточной фазе разряда вплоть до полного спада напряжения на межэлектродном промежутке, при этом амплитуда тока пучка достигает ~ 300 А, длительность импульса тока пучка – 15 – 20 мкс.

В Выводах сформулированы результаты исследований, описанных в главе. Отмечается важная роль пространственного заряда пучка в установлении квазистационарного режима разряда в межэлектродном промежутке, возможность получения во взрывоэмиссионных источниках при напряжении ~ 10^5 В электронных пучков длительностью 10^{-5} – 10^{-4} с и более.

В Главе 3 рассмотрены вопросы разработки катодов, моделирования и получения сильноточных электронных пучков, разработки измерительных методик для применения в ускорителях мощных эксимерных лазеров.

В п. 3.1 приведены результаты исследования эмиссионных свойств катодов с гладкой эмитирующей поверхностью на основе углеграфитового войлока и диэлектрических покрытий. К началу работ по созданию мощных эксимерных лазеров в ИСЭ СО РАН сообщалось о применении катодов с гладкой эмитирующей поверхностью из углеграфитового войлока для получения широкоапертурных электронных пучков с плотностью тока

25 А/см² длительностью 650 нс¹⁴. Было известно также о снижении напряжения инициирования эмиссии и увеличении тока пучка при помещении синтетических волокон¹⁵ и бархата¹⁶ на металлическую поверхность катода.

В этой связи были выполнены измерения тока электронных пучков в диоде с катодами небольших размеров на основе углеграфитового войлока и бархата, исследовано влияние материала диэлектрического покрытия и основания катода на напряжение инициирования эмиссии и время установления первеанса диода. Использовались покрытия из стреч-велюра, плюша, двух сортов бархата (голубого и черного), различающихся густотой (соответственно 145 и 40 волокон в пучке) и длиной волокон (0.5 мм и 1.5 мм), асбеста. Основания катодов выполнялись из нержавеющей стали или карботекстима ПУ, углеграфитового материала, имеющего структуру фанеры, с удельным сопротивлением $(5 - 50) \times 10^{-2}$ Ом/м.

Эксперименты показали, что при напряжении на диоде 300 – 400 кВ катоды с войлочным или бархатным покрытием позволяют получать пучки с плотностью тока $\sim (20 - 30)$ А/см² и более длительностью ~ 1 мкс и могут быть применены в разрабатываемых ускорителях. Продолжительность квазистационарной фазы разряда превышала значение времени до образования анодной плазмы, получаемое из формулы (1), что может свидетельствовать об уменьшении эффективности газовой выделенности в связи с истощением адсорбированных пленок при высокой плотности тока пучка.

Материал покрытия и основания катода существенно влияют на эмиссионные свойства. Наименьшие напряжения инициирования эмиссии и время включения катода наблюдаются при использовании покрытий из черного бархата на основании из карботекстима. Минимальная напряженность поля, при которой наблюдались устойчивое включение и работа катода, составляла менее 10 кВ/см.

Выбор конфигурации диода, обеспечивающей получение сильноточных широкоапертурных электронных пучков, производился на основании данных численных расчетов, выполненных с помощью пакета Poisson-2. Вариант диода для получения пучка сечением 250×1000 мм² ускорителя Модуль показан на рис. 2. Профиль катода образован сопряжением цилиндрических поверхностей с радиусами 60 мм и 600 мм. Ширина эмитирующей части 200 мм. Ширина выводного окна 250 мм, радиус кривизны опорной решетки 528 мм. При напряжении на диоде 500 кВ,

¹⁴ Rosocha L.A. et al. An overview of Aurora: a multi – kilojoule KrF laser-system for inertial confinement fusion // Laser and Particle Beams. – 1986 – V. 4. – Part 1. – P. 55 – 70.

¹⁵ Адлер (R.J. Adler), Киутту (G.F. Kiuttu), Симпкинс (B.E. Simpkins), Салливан (D.J. Sullivan), Восс (D.E. Voss). Катод из синтетического волокна с повышенной электронной эмиссией // ПНИ. – 1985. – №5. – С. 126 – 127.

¹⁶ Гудович В.А., Димов И.А., Кленов Г.И., Матвеев С.П. Сильноточные взрывоэмиссионные эмиттеры // Тезисы докладов VII Всесоюзн. симп. по сильноточной электронике. – Томск, 1988. – Ч.1. – С. 52 – 54.

расстоянии катод-анод в плоскости симметрии диода 65 мм, ток пучка составляет 47 кА на 1 м длины катода. Ширина пучка на аноде ~ 230 мм, магнитное поле на краю пучка ~ 300 Гс.

Распределение плотности тока достаточно однородное. Уменьшение напряжения до 300 кВ приводит к уменьшению тока до 22 кА и увеличению ширины пучка. Появление анодной плазмы приводит к росту тока до 82 кА, сжатию пучка, увеличению углов влета электронов в фольгу на краю катода.

Исследовано влияние профиля катода на величину тока и распределение плотности тока пучка. Определена геометрия катода для получения пучков с током ~ 50 кА при радиусе анода 310 мм в магнитоэкранированных диодах ХеС1-лазера с активным объемом 600 л.

В п. 3.3 описываются методики определения магнитных полей в сильноточных диодах и других элементах ускорителей. Данные о величине и распределении магнитных полей получали в результате численного решения двумерных уравнений Лапласа и Пуассона для векторного потенциала, а также с помощью физического моделирования. В последнем случае исследовали распределение магнитных полей на уменьшенных моделях объектов при малых уровнях тока. Реальные значения индукции рассчитывали по результатам измерений с учетом соответствующего увеличения размеров и тока пучка.

В п. 3.4 описаны методики, разработанные для измерения параметров сильноточных широкоапертурных микросекундных электронных пучков.

Выполнены исследования работы поясов Роговского при измерении токов электронных пучков большого сечения. Предложена схема пояса с распределенной нагрузкой, позволяющая производить измерения в условиях неравномерного возбуждения обмотки при произвольном распределении измеряемого тока относительно пояса.

Для измерения энергии электронного пучка и ее распределения по сечению пучка использовали медицинский тепловизор ТВ-03, а также калориметрические преобразователи энергии импульсного лазерного излучения ТПИ-2М.1 с диапазоном измерения 1 – 1000 Дж и площадью приемной поверхности 36 см². Для увеличения рабочей поверхности использовалось до 32 калориметров. Регистрация сигналов с калориметров или групп калориметров осуществлялась отдельно.

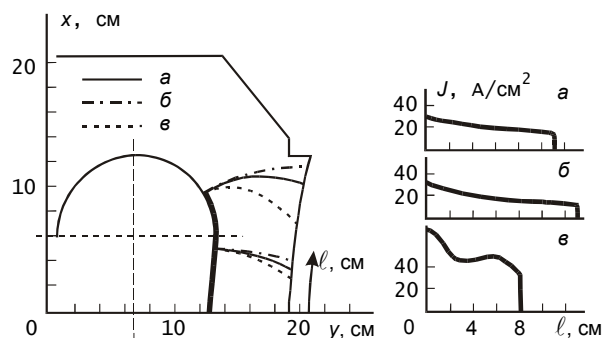


Рис. 2. Вариант вакуумного диода, электронные траектории и распределения плотности тока на аноде ускорителя Модуль. Напряжение на диоде $U = 500$ (а) и 300 кВ (б), в – диод с анодной плазмой, $U = 500$ кВ.

Значения энерговкладов в газ рассчитывались по результатам измерения скачка давления с помощью механотронов, представляющих собой отпаянные электронные приборы, состоящие из двух вакуумных диодов, анод одного из которых перемещается при изменении давления окружающего газа. Показано, что величина скачка давления, регистрируемого механотроном, пропорциональна энергии пучка, вложенной в газ, и не зависит от распределения энергии в газовом объеме.

В п. 3.5 приведены данные по получению электронных пучков на ускорителе Модуль, явившемся прототипом модуля ускорителя, используемого для накачки ХеСІ-лазера с активным объемом 600 л.

Источником питания ускорителя является восьмиступенчатый генератор Маркса с вакуумной изоляцией с прямоугольной колонной. Каждая ступень образована тремя конденсаторами емкостью 0.18 мкФ, зарядное напряжение до 100 кВ. Величина емкости генератора в ударе составляет 68 нФ, собственная индуктивность 300 нГн, активное сопротивление 1.6 Ом. При зарядном напряжении 100 кВ запасаемая энергия 21.6 кДж. Благодаря использованию вакуумной изоляции взрывоэмиссионный катод размещен на последней ступени генератора Маркса, проходной вакуумный изолятор отсутствует, что уменьшает индуктивность разрядной цепи.

Использовались катоды с профилем, близким к расчетному, с эмитирующей поверхностью из углеграфитового войлока, карботекстима ПУ или с покрытием из бархата. Анодом служила пластина из нержавеющей стали или выводное окно с геометрической прозрачностью 85%, закрытое фольгой из титана или нержавеющей стали толщиной 30 мкм или сплава АМГ-2 толщиной 50 мкм. Вывод пучка осуществлялся как в атмосферу, так и в газовый объем, ограниченный выводным окном и металлическим фланцем, являвшимся коллектором пучка.

При зарядном напряжении на генераторе Маркса $U_3 = 90 - 100$ кВ получен электронный пучок с энергией электронов до 600 кэВ, током 55 – 65 кА, поперечным сечением 25×100 см² с энергией пучка в диоде до 17 кДж, при этом ~ 80% энергии выделяется в течение 0.6 мкс, энергия пучка, выведенная за фольгу – 10 кДж.

Экспериментальные и расчетные значения тока, нормированные на ток $I_{3/2}$ соответствующего плоского диода с той же площадью эмитирующей поверхности S и тем же межэлектродным зазором d , различаются в 1.15 – 1.4 раза (рис. 3), что

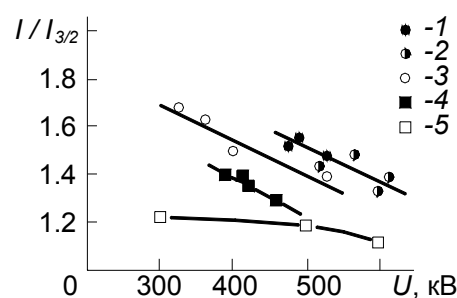


Рис. 3. Зависимости отношения $I/I_{3/2}$ от напряжения на диоде с катодами на основе углеграфитового войлока $S = 13 \times 81$ см², $d = 42$ (1) и 52 мм (2), $S = 20 \times 88$ см², $d = 50$ (3) и 40 мм (4). Расчетные значения (5) при $S = 20 \times 100$ см², $d = 65$ мм.

связано с влиянием анодных

процессов на величину тока. Увеличение напряжения на диоде приводит к уменьшению разницы между экспериментальными и расчетными значениями. Экспериментальные распределения энергии по сечению пучка имеют большую неравномерность по сравнению с расчетными распределениями плотности тока.

В Выводах сформулированы результаты выполненных исследований. Наиболее важным результатом является установление возможности и разработка технологии получения мощных сильноточных микросекундных электронных пучков в ускорителях без промежуточных накопителей энергии.

В Главе 4 описываются конструкции мощных вакуумных диодов, разработанных в настоящей работе, и ускорителей на их основе, приведены данные по получению радиально-сходящихся электронных пучков.

В п. 4.1 приведено описание ускорителя для накачки лазера с активным объемом 30 л.

Ускоритель состоит из генератора Маркса с вакуумной изоляцией и вакуумного диода. В отличие от ускорителя Модуль колонна генератора имеет цилиндрическую форму и содержит 9 ступеней. Емкость генератора в ударе равна 54 нФ, собственная индуктивность 0.63 мкГн, внутреннее сопротивление 1.2 – 2.5 Ом, зарядное напряжение ~ 70 – 100 кВ.

Вакуумный диод собран в цилиндрической вакуумной камере с внутренним диаметром 530 мм и длиной 1040 мм (рис. 4). Катод представлял собой тонкостенный цилиндр диаметром 350 мм и длиной 830 мм с приваренными на торцах кольцами для снижения напряженности поля. Эмиттерами служили 4 полосы бархата 130 × 800 мм, которые наклеивали вдоль образующих на внутреннюю поверхность катода.

Наружный диаметр кюветы (по опорной структуре) – 225 мм, внутренний – 200 мм, количество окон – 4, сечение окна – 130 × 974 мм. Окна закрывались титановой фольгой 50 мкм. Геометрическая прозрачность поддерживающей фольгу опорной структуры 75%. Полный объем кюветы ~ 58 л, максимальное рабочее давление 3 атм.

При напряжении на диоде ~ 500 – 550 кВ ток электронного пучка в диоде составлял 50 – 60 кА, максимальная энергия пучка в диоде достигала ~ 14 – 15 кДж. Ускоритель использовался для накачки ХеСl-, а также КrF-лазеров, в исследованиях HF-лазера с накачкой химической реакцией, инициируемой электронным пучком.

Особенностью диода с цилиндрическим катодом является большая величина магнитных полей, создаваемых обратными токами, протекающими на фланцы вакуумной камеры по поверхности кюветы, что приводит к

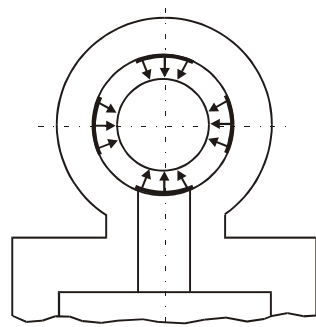


Рис.4. Схема диода для накачки лазера с активным объемом 30 л.

увеличению потерь энергии при прохождении пучка через выводное окно. В связи с этим в п. 4.2 исследована возможность снижения магнитного поля за счет частичного секционирования диода с помощью пластины обратного тока, соединяющей кювету по образующей со стенкой вакуумной камеры. В отличие от исходной конфигурации в катоде со стороны, противоположной генератору, организовывается разрыв для размещения пластины. Установка пластины обеспечивает замыкание части анодного тока на стенку камеры помимо кюветы, приводя к перераспределению магнитного поля в диоде. При наличии пластины магнитные силовые линии не замыкаются вокруг кюветы, а охватывают электронный пучок, при этом длина силовых линий существенно возрастает, что и обеспечивает снижение магнитного поля.

Как показали исследования, установка пластины при токе диода 60 кА позволяет уменьшить магнитное поле вблизи катода с 400 Гс в случае цилиндрического катода до 310 Гс, что близко магнитному полю диода ускорителя Модуль. Величина тока пластины 18 кА.

Полученные данные использованы при разработке сильноточного электронного ускорителя с радиально-сходящимся пучком с энергией электронов 480 кэВ, током пучка в диоде до 87 кА, длительностью импульса тока на полувывоте 400 нс. При запасаемой в генераторе энергии 17 кДж энергия пучка, вложенная в газ, составила 3.7 кДж. Полная эффективность передачи энергии от генератора в газ составила 22%.

В п. 4.3 приведено описание конструкции мощного электронного ускорителя, предназначенного для накачки ХеСІ-лазера с активным объемом 600 л (внутренний диаметр кюветы 620 мм, длина активной части 2000 мм, полный объем 923 л). Устройство ускорителя схематично показано на рис. 5.

Ускоритель собран на базе 12 вакуумно-изолированных 8-и ступенчатых генераторов Маркса, аналогичных генератору ускорителя Модуль. Каждый генератор снабжен катодом. Генераторы размещались в 6 откачиваемых баках попарно, образуя 6 ускорителей с токами и длиной пучка вдвое большими, чем на установке Модуль. Ускорители размещались вокруг кюветы по радиусам, установка в плане имела форму звезды.

Профили катодов имели вид в соответствии с рис. 5, в. Основания катодов изготовлены из труб $\varnothing 80$ мм, расстояния между осями труб 180 мм.

Эмитирующие части с размерами $210 \times 950 \times 20$ мм изготавливались из карботекстима ПУ и закрывались бархатом. Расстояние от эмитирующей

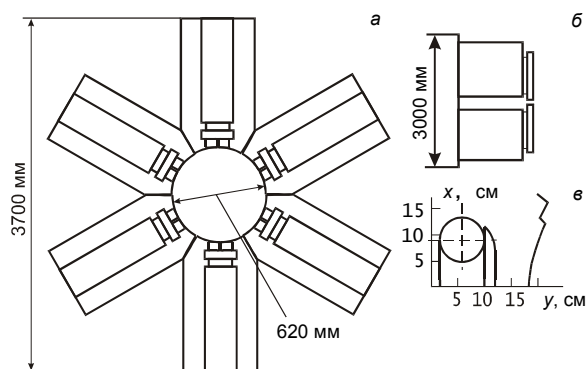


Рис. 5. Схема ускорителя для накачки лазера с активным объемом 600 л. *а* – сечение ускорителя в плане, *б* – схема расположения модулей, *в* – сечение диода.

поверхности катода до опорной решетки выводного окна 60 – 65 мм. Количество окон – 24 (по 4 на ускоритель). Окна закрывались титановой фольгой толщиной 40 мкм. Общая площадь окон $\sim 3 \text{ м}^2$. Геометрическая прозрачность опорной структуры выводного окна $\sim 70\%$. Магнитное экранирование диодов осуществлялось благодаря гальваническому контакту между стенками баков и кюветой. Максимальное давление в кювете до 3 атм.

При зарядном напряжении генераторов Маркса 90 – 95 кВ получены радиально-сходящиеся электронные пучки с энергией электронов 550 – 600 кэВ, током $\sim 0.6 - 0.7 \text{ МА}$, длительностью 1.5 мкс.

В таблице 2 приведены значения энергии, запасаемой в генераторах Маркса, $W_{ген}$, энергии электронного пучка в диоде $W_{диода}$, энергии пучка, выведенной за фольгу, $W_{пучка}$, а также вложенной в газ $W_{газ}$ в зависимости от зарядного напряжения при давлении аргона в кювете 3 атм и соответствующие значения эффективности передачи энергии, характеризующие работу ускорителя.

Таблица 2. Параметры ускорителя ХеСl-лазера с активным объемом 600 л.

$U_{зар.}, \text{ кВ}$	85	90	95
$W_{ген}, \text{ кДж}$	187	210	234
$W_{диода}, \text{ кДж}$	137	160	175
$W_{пучка}, \text{ кДж}$	85	95	102
$W_{газ}, \text{ кДж}$	54	65	71
$W_{диода} / W_{ген}$	0.73	0.76	0.75
$W_{пучка} / W_{диода}$	0.62	0.59	0.58
$W_{газ} / W_{диода}$	0.39	0.41	0.41
$W_{газ} / W_{ген}$	0.29	0.31	0.31

При запасенной энергии 230 кДж энергия электронного пучка в диоде составляет $\sim 170 \text{ кДж}$, энергия пучка, выведенного за фольгу, достигает 100 кДж, энергия пучка, вложенная в газ $\sim 70 \text{ кДж}$, что соответствует эффективности передачи энергии из диода в газ $\sim 40\%$, общей эффективности передачи энергии от генератора в газ $\sim 30\%$. При использовании смеси Ar: Хе: HCl = 750:10:1 при давлении 2 атм на длине волны $\lambda = 308 \text{ нм}$ получена энергия излучения 1.9 кДж.

При достаточной мощности и энергозапасе импульсных генераторов конструкцию ускорителя можно упростить за счет уменьшения числа генераторов, обеспечивающих питание магнитоэкранированных диодов. Вариант схемы секционирования при числе генераторов, меньшем числа диодов разработан и реализован в электронном диоде сильноточного ускорителя, предназначенного для накачки ХеСl-лазера с активным объемом 200 л. Устройство ускорителя и данные по получению электронных пучков приведены в п. 4.4, 4.5.

Конструкция ускорителя и электронного диода приведена на рис. 6. Источниками высокого напряжения являются 2 параллельно включенных линейных трансформатора с вакуумной изоляцией вторичного витка. Каждый трансформатор состоит из 10 ступеней, заряжаемых до 80 – 85 кВ. Емкость первичного накопителя ступени 1.36 мкФ, индуктивность ступени ~ 35 нГн. Напряжение к диоду подается с помощью вакуумных линий, являющихся вторичными витками линейных трансформаторов. Волновое сопротивление разрядного контура 1.4 – 1.05 Ом.

Электронный диод состоит из шести магнитоэкранированных диодов. Основными элементами диода являются: вакуумная камера 1 с боковыми фланцами 2, коллектор 3, катоды 4 с катододержателями 5, катодные пластины 6 для подвода тока к катодам, магнитоизолирующие подвижные 7 и неподвижные 8, 9 пластины, кювета 10, ложементы 11.

Особенностью диода является использование коллектора 3 в виде обечайки большого диаметра $\varnothing 1140$ мм, длиной 1200 мм, что обеспечивает независимый подвод тока к катодам, экранировку диодов от магнитных полей вакуумных линий. Коллектор подвешивается соосно с вакуумной камерой с помощью двух пружин 12 с общей индуктивностью 5.5 мкГн. Использование пружин для изоляции коллектора упрощает конструкцию ускорителя.

Магнитная изоляция диодов обеспечивается в результате применения коллектора 3, катодных 6 и магнитоизолирующих пластин 7 – 9, обеспечивающих подачу тока к катодам и вывод обратных токов за пределы магнитоэкранированных диодов на стенку вакуумной камеры. Суммарная индуктивность диода ~ 40 нГн.

Катод каждого магнитоэкранированного диода состоит из трех катодов, что уменьшает токи, текущие вдоль катодов и по поверхности кюветы в аксиальном направлении. Конструкция катодов подобна используемой в ускорителе лазера с объемом 600 л. Размеры катодов в плане 215 × 480 мм, ширина эмитирующей поверхности 120 мм, полная площадь эмитирующей поверхности катодов 0.95 м².

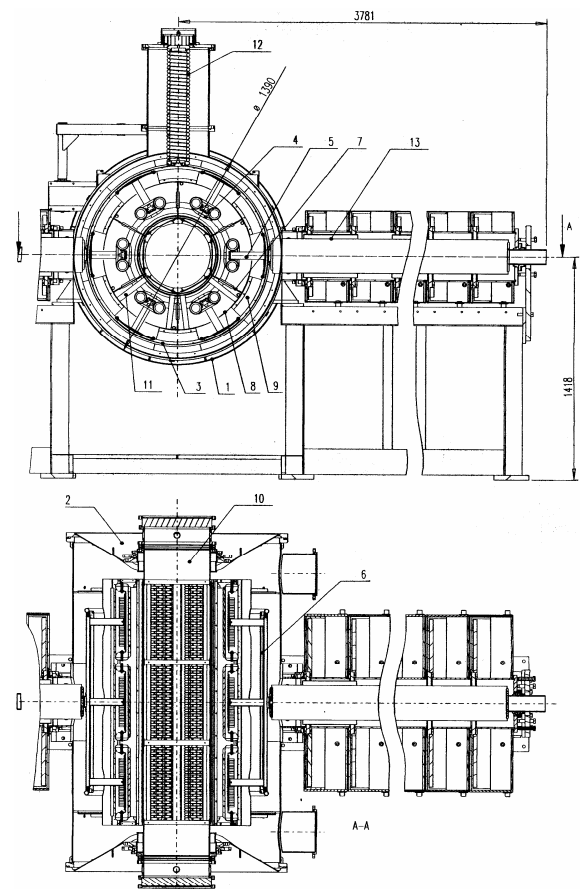


Рис. 6. Конструкция электронного диода.

Вывод пучка осуществляется через 18 окон с размерами 170×478 мм, закрытых титановой фольгой толщиной 40 мкм. Геометрическая прозрачность поддерживающей структуры выводных окон единичного магнитоэкранированного диода $\sim 75\%$. Рабочее давление в кювете до 4 атм.

При напряжении на диоде 550 кВ величина тока пучка в диоде составляет ~ 250 кА, величина тока, поступающего в кювету, ~ 140 кА. При токе пружин ~ 30 кА потери тока с поверхности коллектора 3 в максимуме тока диода составляют ~ 40 кА, что соответствует средней плотности тока утечки ~ 0.5 А/см².

Токовые и энергетические параметры ускорителя, а также значения эффективности передачи тока и энергии от первичного накопителя к кювете для зарядного напряжения 80 и 85 кВ приведены в таблице 3. Здесь же приведены значения эффективности передачи энергии ускорителя лазера Титания¹⁷ с энергией первичного накопителя 89 кДж, энергией электронов 600 кэВ, диаметром и длиной кюветы соответственно 420 мм и 1500 мм, содержащего 4 или 8 формирующих линий. Видно, что значения эффективности передачи энергии в газ обеих установок близки.

Таблица 3. Параметры ускорителя ХеС1-лазера с активным объемом 200 л.

Зарядное напряжение, кВ	80	85	Эффек- -тивн. %	Эффек- -тивн.%, [17]
Напряжение на диоде U , кВ	500	550		
Полный ток диода I , кА	280	320	100%	
Ток электронного пучка в диоде I_d , кА	214	250	78%	
Ток пучка I_f за решеткой, кА, не менее	148	176		
Ток пучка I_b за фольгой в кювете, кА	115	136	54.4%	
Ток пружин I_s ($t = 400$ нс), кА	30	32		
Ток утечки с поверхности коллектора I_l , кА	36	38		
Максимальная мощность в диоде P , ГВт	140	176		
Пик мощности пучка в кювете P_c , ГВт	58	75		
Энергия, запасаемая в генераторе W_0 , кДж	87	98	100%	100%
Энергия, передаваемая в диод, W , кДж	75	86		
Энергия пучка в магнитоизолированных диодах W_d , кДж,	51	61	62%	65%
Энергия пучка за решеткой W_f , кДж,	35	45		
Энергия пучка за фольгой W_b , кДж	26	32		
Энергия, вложенная в газ W_g кДж	16	19	31%	35%
Потери энергии в пружинах ($t = 1$ мкс), кДж	8.6	8.6		
Утечки с поверхности коллектора, кДж	15.4	16.4		
Полная эффективность (W_g / W_0)			19.4%	22.5%

¹⁷ Angood S.M., Bailly-Salins R., Kidd A.K., Hirst G.J., Shaw M.J. The Titania amplifier module design // Proc. III Workshop on KrF Laser Technology. Workshop 1- Pulsed Power. – Rutherford Appleton Laboratory, 1992. – PP. 13.

По сравнению с Титанией разработанный ускоритель, однако, более прост, компактен, надежен. Ускоритель успешно эксплуатируется с 2001 г, за время эксплуатации существенных нарушений в работе ускорителя не происходило. В настоящее время ускоритель используется в составе мощной широкоапертурной эксимерной лазерной системы.

В Выводах отмечается, что ускорители без промежуточных накопителей позволяют реализовать высокую эффективность радиальной накачки мощных эксимерных лазеров. Энерговклад в газ при использовании таких ускорителей составляет $\sim 30 - 40\%$ от энергии электронного пучка в диоде и $\sim 20 - 30\%$ энергии, запасенной в первичном накопителе, что близко значениям энерговкладов, получаемым в лазерах, разработанных по традиционным схемам.

В Главе 5 описаны конструкции разработанных импульсно-периодических генераторов Маркса и электронного источника на их основе, приведены данные по получению электронных пучков при давлении остаточного газа $10^{-2} - 10^{-1}$ мм рт.ст.

Разработан лабораторный макет импульсно-периодического генератора Маркса с интенсивной продувкой, реализуемой за счет размещения рабочего колеса вентилятора в блоке разрядников, а также 2 макета генераторов с механическими вращающимися разрядниками (п. 5.1).

Устройство генераторов показано на рис. 7. Генераторы состоят из шести ступеней, имеют воздушную изоляцию. Генератор с продувкой собран из конденсаторов КВИ – 3, емкость ступени – 2 нФ. Electroды разрядников устанавливались на стенках корпуса по окружности изоляционного диска $\varnothing 520$ мм с лопатками, вращение которого обеспечивало продувку межэлектродных зазоров. Привод диска осуществлялся от асинхронного двигателя или двигателя постоянного тока. При скорости вращения двигателя 1500 об./мин скорость движения лопаток составляла ~ 20 м/с. Генератор с вращающимися разрядниками получали при замене диска с лопатками на диск с шаровыми электродами, являвшимися подвижными электродами разрядников. Габариты генераторов (без двигателя привода и зарядного устройства) $1050 \times 850 \times 250$ мм. Емкость генераторов в ударе 330 пФ, волновое сопротивление ~ 140 Ом. Зарядное напряжение 40 – 50 кВ.

Второй генератор с вращающимися разрядниками собран из 6 конденсаторов ИМН-100-0.1. Каждый разрядник содержит два искровых промежутка, образованных четырьмя шаровыми электродами, два из которых размещены на вращающемся диэлектрическом стержне и имеют электрический контакт друг с другом. Волновое сопротивление генератора ~ 20 Ом. Зарядное напряжение до 50 кВ. Источником зарядного напряжения служил двухполупериодный выпрямитель АУФ-400 без емкостного фильтра.

Эксперименты продемонстрировали стабильную работу генератора с продувкой при частоте следования импульсов 100 – 300 Гц. При зарядном напряжении ~ 40 кВ, частоте следования импульсов 100 Гц, амплитуда

напряжения на нагрузке 330 Ом составляет $\sim 150 - 170$ кВ, мощность в импульсе ~ 30 МВт, средняя мощность в нагрузке ~ 1 кВт. Ресурс непрерывной работы генератора составляет не менее 8 часов.

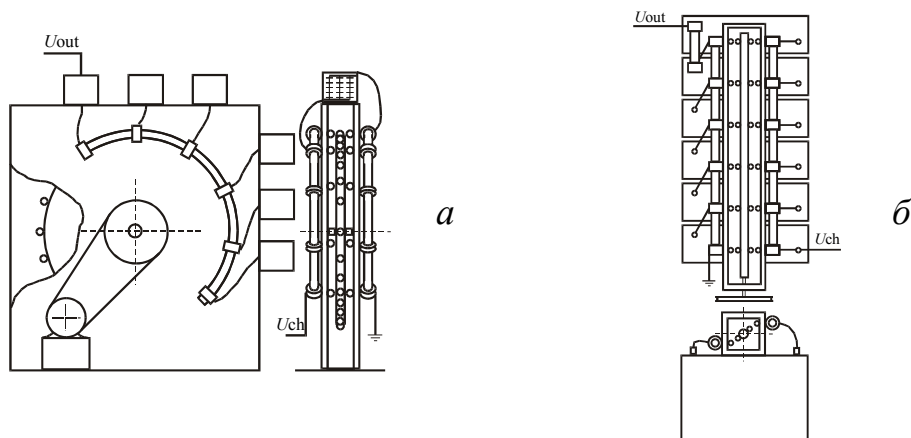


Рис. 7. Схемы генераторов с вращающимися разрядниками на основе конденсаторов КВИ-3 (а) и ИМН-100-0.1 (б).

Работа генератора на конденсаторах КВИ-3 с вращающимися разрядниками на частоте 100 Гц менее стабильна, наблюдаются колебания амплитуды импульсов выходного напряжения, связанные с использованием двухполупериодного выпрямителя. Рабочая частота генератора с конденсаторами ИМН-100-0.1 – до 20 Гц.

В п. 5.2 описано устройство ускорителя, разработанного на базе генератора с продувкой. Ускоритель позволяет получать пучки с энергией электронов 200 – 250 кэВ, током до 500 А, длительностью импульса 300 – 400 нс, поперечным сечением 100×200 или 100×800 мм², частотой следования импульсов 100 Гц. При получении пучка сечением 100×800 мм² количество ступеней генератора увеличивали до восьми.

Использовались многоострийные катоды с поперечным сечением 210×110 и 850×110 мм². Катоды содержали 30 или 170 эмиттеров из медной проволоки диаметром 0.2 мм высотой 30 мм. Эмиттеры располагались в два ряда вдоль длинной стороны катода. Вершины эмиттеров были заглублены на 5 мм в полость катода, при этом корпус катода выполнял функции экранного электрода. В варианте источника с сечением пучка 100×200 мм² использовался катод с выдвигающимися проволочными эмиттерами. Идея такого катода высказывалась С.П. Бугаевым, в настоящей работе она практически реализована. Вывод пучка в атмосферу производили через охлаждаемые окна с геометрической прозрачностью 80%, закрытые алюминиевой фольгой толщиной 50 мкм.

Использование подачи эмиттеров в межэлектродный зазор позволяет реализовать работу ускорителя при частоте следования импульсов 100 Гц в режиме с выводом электронного пучка сечением 100×200 мм² в атмосферу в течение 8 часов и более. При напряжении ~ 200 кВ средняя плотность тока пучка в диоде составляет ~ 1.5 А/см², средняя плотность тока пучка за

фольгой $\sim 1 \text{ А/см}^2$, энергия пучка за фольгой $\sim (2.4 - 2.6) \text{ Дж/имп.}$ Электронный пучок имеет резкий край, что связано с наложением электронных пучков, отбираемых с отдельных острий. Получен и выведен в атмосферу при частоте следования импульсов 100 Гц пучок сечением $100 \times 800 \text{ мм}^2$. Энергия выведенного пучка 3.2 Дж/имп.

В п. 5.3 приведены результаты экспериментов по получению электронных пучков во взрывоэмиссионном диоде при давлении остаточного газа $p = 10^{-2} - 10^{-1} \text{ мм рт. ст.}$

Электронные пучки, получаемые во взрывоэмиссионных диодах при $p = 10^{-2} - 10^{-1} \text{ мм рт. ст.}$, имеют ограниченную длительность $\sim 10^{-8} \text{ с}$, что обусловлено появлением плазмы и зажиганием дугового разряда в межэлектродном промежутке. В этой связи исследована возможность удержания напряжения при наличии плазмы в межэлектродном зазоре с целью затруднить переход разряда в дуговую стадию и тем самым увеличить длительность генерируемых электронных пучков. Для затягивания высоковольтной стадии использовались те же методы, что и при низких давлениях остаточного газа, а именно, применение катодных материалов, производящих малое количество плазмы, уменьшение скорости спада напряжения на диоде (ограничение эмитирующей поверхности, предотвращение потерь тока с катододержателя, обеспечение достаточной мощности и энергозапаса источника электропитания, применение частотного режима работы).

Источниками напряжения служили разработанные генераторы Маркса (п. 5.1) с емкостью в ударе $C = 17 \text{ нФ}$ и 330 пФ . Использовались катоды с гладким профилем из карботекстима ПУ, латуни, вольфрама с площадью эмитирующей поверхности $S = 10 \text{ см}^2$ и 0.5 см^2 . Для уменьшения утечек с неэмитирующих участков катододержателя использовались керамические трубки. Материал анода – графит, дюралюминий. Длина межэлектродного зазора d изменялась от 8 до 170 мм. О энергетическом спектре электронов судили по результатам прохождения пучка через окно, закрытое титановой фольгой толщиной 50 мкм, в вакууме.

Эксперименты показали, что на зависимостях первеанса диода от времени при давлении остаточного газа $\sim 10^{-2} \text{ мм рт. ст.}$ присутствует квазистационарная фаза разряда. Увеличение давления приводит к увеличению первеанса диода в квазистационарной фазе и уменьшению ее длительности, увеличению скорости роста проводимости в последующей фазе роста тока. Уменьшение площади эмиссионной поверхности увеличивает скорость роста первеанса диода в обеих фазах.

Длительность высоковольтной стадии разряда τ зависит от режима работы и емкости генератора (рис.8). При $p = 10^{-2} \text{ мм рт. ст.}$ длительность τ в случае использования генератора с емкостью $C = 330 \text{ пФ}$ в одноимпульсном режиме равна $\sim 150 \text{ нс}$ и возрастает до 280 нс при частоте следования импульсов 240 Гц, при $p = 10^{-1} \text{ мм рт. ст.}$ $\tau = 80 \text{ нс}$. Использование генератора

с $C = 17$ нФ приводит к росту τ до $\sim 10^{-6}$ с. Изменения площади эмиссионной поверхности и материала катода при $p = 10^{-2} - 10^{-1}$ мм рт. ст. слабо влияют на величину τ .

Показано, что ток в диоде при $p = 10^{-1} - 10^{-2}$ мм рт. ст. как и в вакуумном диоде при $p = 10^{-4} - 10^{-5}$ мм рт. ст. переносится пучком с энергией электронов, соответствующей полному напряжению, приложенному к диоду. Доля тока пучка, прошедшего на коллектор сквозь фольговое окно при $p \sim 10^{-2}$ мм рт. ст., не зависит от давления газа и времени протекания тока, определяется только приложенным к диоду напряжением и хорошо соответствует теоретическим значениям коэффициента пропускания фольги по числу частиц¹⁸. При напряжении на диоде 200 кВ ток пучка, выведенного за титановую фольгу толщиной 50 мкм, составляет 100 А, длительность импульса тока – 200 нс при $p = 10^{-2}$ мм рт. ст. и 40 нс при $p = 10^{-1}$ мм рт. ст. и ограничена пропускной способностью фольги.

В Выводах отмечается повышение ресурса многоострийного катода при использовании подачи острий, возможность получения при давлениях $\sim 10^{-2}$ мм рт. ст. электронных пучков длительностью $\sim 10^{-7}$ с.

В Приложении 1. Зависимость свойств вакуумного разряда от числа валентных электронов атомов металла катода установлена связь характеристик вакуумного разряда как в высоковольтной, так и низковольтной дуговой стадии, таких как удельная эрозия, скорость плазмы, катодное падение, пороговый ток, масс-зарядовый состав с электронной структурой атомов вещества катода. Связь характеристик разряда и свойств плазмы с электронной структурой может быть использована для обоснованного выбора материалов при разработке взрывоэмиссионных электронных источников.

В Приложении 2. Механизм десорбции предложена модель, в которой интенсивное газовыделение с анода связывается с процессами

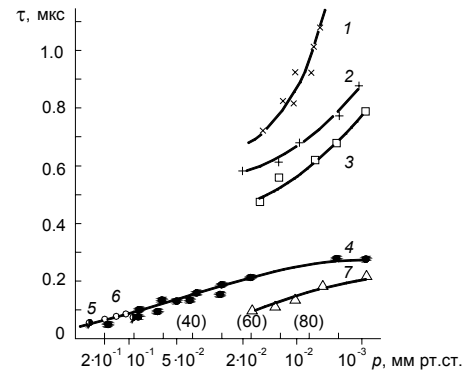


Рис. 8. Зависимости τ от p (значения в скобках соответствуют делениям шкалы терморного вакуумметра); $C = 17$ нФ (1-3) и 330 пФ в частотном (4-6) и однократном режиме (7); $S_e = 9.6$ см² (3) и 0.2 см² в остальных случаях; $d = 170$ (1,5,6), 15 (4), 12 (2,7) и 8 (3) мм; материал катода латунь (1, 5), карботекстим (2-4, 7), вольфрам (6).

¹⁸ Николаев В.Б. Прохождение электронов с энергиями 150-400 кэВ через вакуумплотные фольги из алюминия и титана // Журнал технической физики. – 1976. – Т. 46. – № 7. – С. 1555 – 1556.

радиолиза в пленках рабочей жидкости насосов и органических загрязнений на поверхности анода под действием электронного пучка.

В Заключение приведены основные результаты работы.

1. Установлена важная роль пространственного заряда пучка в процессе формирования квазистационарного разряда во взрывоэмиссионных электронных источниках. Найдено, что в диоде с катодом в виде одиночного острия или лезвия на плоскости, многолезвийным катодом расширение плазмы с постоянной скоростью сопровождается насыщением роста тока в результате ограничения тока пространственным зарядом пучка. Ограничение роста тока наряду с насыщением эмиссионной способности катодной плазмы приводят к стабилизации тока в межэлектродном промежутке и переходу разряда в квазистационарную фазу. В диоде с многоострийным катодом установление квазистационарного разряда происходит до образования на катоде сплошной плазменной эмиссионной границы.
2. Условиями получения электронных пучков длительностью $\sim 10^{-5}$ с и более в диоде с многоострийным катодом является распределение тока по большому числу эмитирующих острий, уменьшение электрического поля в диоде, применение экранных электродов больших размеров, предотвращающих рост тока с эмиттеров, расположенных на краях катода. На базе многоострийных катодов разработаны практические конструкции электронных источников с энергией электронов $\sim 10^5$ эВ длительностью импульса тока пучка $\sim 10^{-5}$ с, токами $10^2 - 10^3$ А, поперечным сечением $10^2 - 10^3$ см².
3. Экспериментально показано, что во взрывоэмиссионном электронном источнике при ускоряющих напряжениях $\sim 10^5$ В в условиях, когда распространение катодной плазмы в межэлектродный промежуток ограничено, возможно получение электронных пучков длительностью $\sim 10^{-4}$ с и более. Причиной ограничения длительности является газовыделение с анода, приводящее к образованию в межэлектродном промежутке анодной плазмы. Показано, что длительность электронных пучков, генерируемых в присутствии в межэлектродном промежутке анодной плазмы, может достигать $\sim 10^{-5}$ с.
4. Установлено влияние на эмиссионные свойства катодов с диэлектрическим покрытием как материала покрытия, так и материала основания катода. Катоды с покрытием из бархата, содержащего видимые на просвет отверстия с ориентацией волокон перпендикулярно поверхности катода, и основанием из карботекстима, относительно высокоомного графитоволокнистого материала, характеризуются малой напряженностью поля, необходимой для инициирования эмиссии, малым временем установления первеанса диода и наряду с катодами с эмитирующей поверхностью из

- углеграфитового войлока позволяют получать электронные пучки с плотностью тока $\sim 20 - 30 \text{ А/см}^2$ длительностью $\sim 1 \text{ мкс}$ и более.
5. Разработаны катоды и мощные вакуумные диоды сильноточных электронных ускорителей без промежуточных накопителей энергии, формирующих радиально-сходящиеся пучки с энергией электронов $\sim 500 - 600 \text{ кВ}$, током $60 \text{ кА} - 0.6 \text{ МА}$, поперечным сечением до 3 м^2 , длительностью $1 - 1.5 \text{ мкс}$, предназначенные для накачки эксимерных лазеров с активным объемом 30, 200 и 600 л.
 6. Экспериментально показано, что эффективность энергоклада при радиальной инжекции микросекундного электронного пучка в кювету с рабочей смесью при давлении $2 - 3 \text{ атм}$ и использовании аргона в качестве буферного газа составляет $\sim 40\%$ от энергии электронного пучка в диоде, при этом общая эффективность энергоклада ускорителя без промежуточного накопителя энергии составляет $\sim 30\%$ от первоначально запасенной энергии в конденсаторах генератора импульсов высокого напряжения.
 7. Предложен и практически реализован способ секционирования мощных вакуумных диодов, позволяющий уменьшить число генераторов электронного ускорителя по сравнению с числом магнитоэкранированных диодов. Энерговклад в газ при использовании данной схемы секционирования составляет $\sim 30\%$ от энергии пучка в диоде и $\sim 20\%$ от энергии первичного накопителя.
 8. Показано, что высоковольтная стадия разряда во взрывоэмиссионном диоде при давлении остаточного газа $10^{-1} - 10^{-2} \text{ мм рт. ст.}$ может быть затянута до $0.1 - 1 \text{ мкс}$. Увеличение длительности достигается при ограничении эмиссии с конструктивных элементов катода, увеличении мощности источника питания, использовании частотного режима работы. Ток в разряде переносится электронным пучком. При напряжении на диоде $\sim 200 - 250 \text{ кВ}$ величина тока пучка, выведенного за титановую фольгу толщиной 50 мкм , составляет $\sim 100 \text{ А}$, длительность импульса тока равна 0.2 мкс при давлении остаточного газа $10^{-2} \text{ мм рт. ст.}$ и 40 нс при давлении $10^{-1} \text{ мм рт. ст.}$
 9. Разработаны методики измерения токов электронных пучков большого сечения с помощью поясов Роговского в условиях несимметричного возбуждения обмотки, энергии и распределения энергии по сечению электронного пучка с помощью калориметров, тепловизора, энергии электронного пучка, вложенной в газ, с помощью механотронов.
 10. Показано, что характеристики дугового разряда в межэлектродном промежутке с одноэлементным катодом, такие как катодное падение, пороговый ток, удельная эрозия, а также параметры катодной плазмы в дуговом разряде и при взрывной эмиссии определяются порядковым номером металла катода в периодической таблице элементов.

11. Предложена модель интенсивного газовыделения с анода, объясняющая процесс газовыделения радиолизом в пленках органических загрязнений и рабочей жидкости насосов.

Результаты выполненных исследований, а также разработанные электронные источники и мощные вакуумные диоды использовались при разработке технологии отверждения лаковых покрытий на древесине, создании электронных ускорителей для накачки CO₂- и эксимерных лазеров. Наиболее важным является последнее применение, где с использованием полученных результатов разработан ряд высокоточных электронных ускорителей без промежуточных накопителей энергии с энергией электронов 500 – 600 кэВ, током пучка 60, 250 кА и 0.6 МА. Ускорители применены для возбуждения мощных эксимерных лазеров с активным объемом соответственно 30, 200 и 600 л. Лазер с объемом 200 л поставлен в КНР (Северо-Западный институт ядерных технологий, г. Сиань) в составе мощной эксимерной лазерной системы. Результаты исследований по получению высокоточных широкоапертурных электронных пучков, полученные в процессе исследований, используются в настоящее время при разработке ускорителя с током пучка ~ 1.2 – 1.5 МА для накачки мощного фемтосекундного лазера с объемом кюветы 600 л.

Список основных публикаций автора по теме диссертации

1. Абдуллин Э. Н., Логинов С. В. Формирование электронного пучка в диоде с острым катодом // Тез. докл. VII Всесоюз. симп. по высокоточной электронике. – Томск, 1988. – Ч. 2. – С. 7 – 9.
2. Абдуллин Э.Н., Заславский В.М., Логинов С.В. Приближенный расчет тока в диоде со взрывоэмиссионным катодом // Известия вузов. Физика. – 1992. – № 2. – С. 3 – 6.
3. Абдуллин Э. Н., Логинов С. В. Расчет широкоапертурного высокоточного РЭП в диоде с многолезвийным катодом. // Тез. докл. VII Всесоюз. симп. по высокоточной электронике. – Томск, 1988. – Ч. 2. – С. 148 – 150.
4. Абдуллин Э.Н., Астрелин В.Т., Беломытцев С.Я., Бугаев С.П., Логинов С.В. Формирование широкоапертурных высокоточных электронных пучков в диодах с многолезвийными катодами // ЖТФ. – 1989. – Т. 59. – В. 1. – С. 184 – 187.
5. Абдуллин Э.Н., Азаров В.Г., Бугаев С.П. Формирование пробоя в высокоточном микросекундном вакуумном диоде // ЖТФ. – 1976. – Т. 46. – В. 11. – С. 2459 – 2461.
6. Абдуллин Э.Н., Бугаев С.П. Источники ленточных электронных пучков с большой площадью поперечного сечения // Разработка и применение источников электронных пучков: Сб. статей / Отв. ред. Г.А.Месяц. – Новосибирск: Наука, 1976. – С. 81 – 93.

7. Абдуллин Э.Н., Шпак В.Г. Генератор высоковольтных импульсов напряжения прямоугольной формы // ПТЭ. – 1974. – №5. – С. 86 – 88.
8. Абдуллин Э.Н., Коновалов И.Н., Лосев В.Ф., Тарасенко В.Ф., Чесноков С.М. Формирование сильноточных микросекундных электронных пучков большой апертуры // ЖТФ. – 1982. – Т. 52. В. 5. – С. 929-934.
9. Abdullin E.N., Bazhenov G.P., Bougaev S.P., Chesnokov S.M., Ladyzhenski O.V. Electron beam production out of cathode flare plasma with limited emissivity // Proc. VII ISDEIV. – Novosibirsk, 1976. – P. 379 – 382.
10. Абдуллин Э.Н., Баженов Г.П., Ладыженский О.Б., Чесноков С.М. Источник электронов со взрывным катодом. А.с. 602041. Заявлено 13.09.76. Оpubл. 23.08.83 // Бюл. изобр. – 1983. – № 31.
11. Абдуллин Э.Н., Баженов Г.П., Чесноков С.М. Принципы получения микросекундных электронных пучков на основе взрывной эмиссии // Тезисы докладов Всесоюзн. симп. по ненакаливаемым катодам. – Томск, 1977. – С. 15 – 16.
12. Абдуллин Э.Н., Вайсбурд Д.И., Коваль Н.Н., Крейндель Ю.Е., Месяц Г.А., Чмух В.Н., Щанин П.М. Использование мощных импульсных пучков электронов для инициирования полимеризации полиэфиров // Письма в ЖТФ. – 1978. – Т. 4, В. 4, С. 213 – 215.
13. Абдуллин Э.Н., Чмух В.Н. Отверждение полиэфирных смол, стимулированное облучением импульсным электронным пучком // Химия высоких энергий. – 1979. – Т. 13. – В. 2. – С. 181 – 182.
14. Абдуллин Э.Н., Баженов Г.П., Ерохин Г.П., Ладыженский О.Б. Динамика роста проводимости межэлектродного промежутка в высоковольтной стадии вакуумного разряда // Импульсный разряд в диэлектриках: Сб.статей / Отв. ред. Г.А. Месяц. – Новосибирск: Наука, 1985. – С. 42 – 55.
15. Abdullin E.N., Bazhenov G.P., Bugaev S.P., Chesnokov S.M., Erokhin G.P., Ladyzhensky O.V. Generation of quasi-stationary electron beams on the basis of a vacuum discharge // Proc. IX Intern. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. – Berlin, 1984. – P. 393 – 395.
16. Abdullin E.N., Bazhenov G.P., Bugaev S.P., Chesnokov S.M., Erokhin G.P., Ladyzhensky O.V. Generation of quasi-stationary electron beams on the basis of a vacuum discharge // IEEE Trans. on Plasma Science. – 1985. – V. PS-13. – No. 5. – P. 338 – 339.
17. Абдуллин Э.Н., Баженов Г.П., Бугаев С.П., Ладыженский О.Б. Генерирование электронных пучков миллисекундной длительности на основе взрывной эмиссии электронов (ВЭЭ) // Письма в ЖТФ. – 1981. – Т. 7. – Вып. 6. – С. 347 – 350.
18. Абдуллин Э.Н., Баженов Г.П., Ерохин Г.П., Ладыженский О.Б. Источник электронов со взрывным катодом. А.с. 971022. Заявлено 08.04.81. Оpubл. 30.09.83 // Бюл. изобр. – 1983. – № 36.

19. Абдуллин Э.Н., Баженов Г.П., Ерохин Г.П., Ладыженский О.Б. Источник электронов со взрывным катодом. А.с. 1628757. Заявлено 09.01.89. (В печати).
20. Абдуллин Э.Н., Баженов Г.П., Ерохин Г.П., Киселев В.Н., Ладыженский О.Б., Чесноков С.М. Эмиссия заряженных частиц из нестационарных плазменных образований // Известия вузов. Физика. – 1994. – № 3. – С. 83 – 99.
21. Abdullin E.N., Vazhenov G.P., Chesnokov S.M., Erokhin G.P., Kiselev V.N., Ladyzhensky O.B. Phases of vacuum and plasma discharges and control of their parameters // Proc. XVI Intern. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. – Moscow to St.Petersburg, 1994. – P. 239 – 242.
22. Абдуллин Э.Н., Заславский В.М., Логинов С.В. Формирование микросекундных электронных пучков с плотностью тока $10 - 50 \text{ А/см}^2$ в вакуумном диоде // Журнал технической физики. – 1991. – Т. 61. – В. 6. – С. 207 – 209.
23. Abdullin E.N., Vazhenov G.P., Morozov A.V. Explosive emission cathodes for production of microsecond large cross-section electron beams // Proc. XX Intern. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. –Tours, France, 2002. – P. 364 – 367.
24. Абдуллин Э.Н., Беломытцев С.Я., Бугаев С.П., Горбачев С.И., Заславский В.М., Зорин В.П., Ковальчук Б.М., Логинов С.В., Матюков Ю.Н., Распутин Р.М., Толкачев В.С., Щанин П.М. Генерация сильноточного электронного пучка большого сечения // Физика плазмы. – 1991. – Т.17. – В. 6. – С. 741 – 745.
25. Abdullin E.N., Gorbachev S.I., Savostyanova Yu.V. Modeling of magnetic fields in high current vacuum diodes // Proc. XII Intern. Symp. on High Current Electronics. – Tomsk, 2000. – P. 386 – 389.
26. Абдуллин Э.Н., Заславский В.М., Логинов С.В. Применение поясов Роговского для измерения токов электронных пучков большого сечения // ПТЭ. – 1996. – № 1. – С. 70 – 73.
27. Abdullin E.N., Bugaev S.P., Efremov A.M., Zorin V.B., Kovalchuk B.M., Loginov S.V., Mesyats G.A., Tolkachev V.S., Schanin P.M., Chistov A.A. Accelerators with vacuum insulated Marx generators // Proc. IX Intern. Conf. on High-Power Particle Beams. – Washington, 1992. – V. 1. – P. 419 – 424.
28. Абдуллин Э.Н., Бугаев С.П., Ефремов А.М. Зорин В.Б., Ковальчук Б.М., Кремнев В.В., Логинов С.В., Месяц Г.А., Толкачев В.С., Щанин П.М. Генераторы пучков электронов на основе вакуумноизолированных генераторов Маркса // ПТЭ. – 1993. – № 5. – С. 138 – 142.
29. Abdullin E.N., Bugaev S.P., Efremov A.M., Zorin V.B., Kovalchuk B.M., Loginov S.V., Mesyats G.A., Tolkachev V.S., Schanin P.M., Chistov A.A. Accelerators with vacuum insulated Marx generators // Proc. III Workshop on KrF Laser Technology. Workshop 1- Pulsed Power. – Rutherford Appleton Laboratory, 1992. – PP. 10.

30. Абдуллин Э.Н., Логинов С.В., Рыжов В.В., Турчановский И.Ю. Измерения энергии, выделяемой в газе инжектированным электронным пучком, с помощью механотронов // ПТЭ. – 1998. – № 1. – С. 120 – 122.
31. Abdullin E.N., Bugaev S.P., Kovalchuk V.M., Loginov S.V., Zaslavsky V.M. High-current vacuum diodes with large-cross-section electron beams // Proc. XV Intern. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. – Darmstadt, 1992. – P. 671 – 673.
32. Abdullin E.N. High current electron accelerators for excimer lasers // Proc. XIII Intern. Symp. on High Current Electronics. – Tomsk, 2004. – P. 123 – 126.
33. Абдуллин Э.Н., Горбачев С.И., Ефремов А.М., Зорин В.Б., Ковальчук Б.М., Логинов С.В., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Толкачев В.С., Феденев А.В., Фомин Е.А., Щанин П.М. Мощный компактный лазер с $\lambda = 308$ и 249 нм, накачиваемый радиально сходящимся электронным пучком // Квантовая электроника. – 1993. – Т.20. – № 7. – С. 652 – 656.
34. Абдуллин Э.Н., Ковальчук Б.М., Орловский В.М., Панченко А.Н., Рыжов В.В., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Турчановский И.Ю. Распределение энергии излучения в выходном пучке широкоапертурных лазеров, возбуждаемых радиально сходящимся пучком электронов // Оптика атмосферы и океана. – 1998. – Т.11. – № 2-3. – С. 160 – 165.
35. Абдуллин Э.Н., Ефремов А.М., Ковальчук Б.М., Орловский В.М., Панченко А.Н., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В. Мощный HF лазер с накачкой нецепной химической реакцией, инициируемой пучком электронов // Письма в ЖТФ. – 1997. – Т.23. – № 5. – С. 58 – 64.
36. Абдуллин Э.Н., Ефремов А.М., Ковальчук Б.М., Орловский В.М., Панченко А.Н., Рыжов В.В., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Турчановский И.Ю. Лазер на смеси $SF_6 - H_2$ с накачкой радиально сходящимся пучком электронов // Квантовая электроника. – 1997. – Т.24. – № 9. – С. 781 – 785.
37. Abdullin E.N., Ivanov N.G., Losev V.F., Turchanovsky I.Yu. Compact Electron Accelerator for Gas Laser Pump // Proc. XIII Intern. Symp. on High Current Electronics. – Tomsk, 2004. – P. 149 – 152.
38. Бугаев С.П., Абдуллин Э.Н., Зорин В.Б., Ковальчук Б.М., Логинов С.В., Месяц Г.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Толкачев В.С., Щанин П.М. Широкоапертурный ХеСl-лазер с энергией излучения ~ 2 кДж // Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34. – № 9. – С. 801 – 804.
39. Kovalchuk V.M., Abdullin E.N., Grishin D.M., Gubanov V.P., Zorin V.B., Kim A.A., Kumpjak E.V., Morozov A.V., Skakun V.S., Steptchenko A.S., Tarasenko V.F., Tolkachev V.S., Schanin P.M., Tsou N.V. E-Beam Accelerator For Excimer Laser // Proc. XIV Intern. Conf. on High-Power Particle Beams. – Albuquerque, New Mexico, USA, 2002. – P. 239-242.
40. Kovalchuk V.M., Abdullin E.N., Grishin D.M., Gubanov V.P., Kim A.A., Kumpjak E.V., Morozov A.V., Skakun V.S., Steptchenko A.S., Tarasenko

- V.F., Tolkachev V.S., Schanin P.M., Tsou N.V., Zorin V.B. Linear transformer accelerator for excimer laser // *Laser and Particle Beams*. – 2003. – V. 21. – P. 219 – 222.
41. Абдуллин Э.Н., Гришин Д.М., Губанов В.П., Зорин В.Б., Ким А.А., Ковальчук Б.М., Кумпяк Е.В., Лио Д., Морозов А.В., Скакун В.С., Степченко А.С., Тарасенко В.Ф., Толкачев В.С., Цой Н.В., Щанин П.М. ХеСl-лазер с энергией излучения 650 Дж // *Квантовая электроника*. – 2004. – Т. 34. – №3. – С. 199 – 202.
 42. Abdullin E.N., Ivanov N.G., Kovalchuk B.M., Losev V.F., Mesyats G.A., Skakun V.S., Tarasenko V.F., Turchanovsky I.Yu., Yastremsky A.G. High power wide-aperture electron-beam-pumped lasers on dense gases // *Laser Physics*. – 2006. – V. 16. – No. 1. – P. 89 – 103.
 43. Tarasenko V.F., Fedenev A.V., Koval'chuk B.M., Abdullin E.N., Loginov S.V., Skakun V.S., Schanin P.M., Tolkachev V.S., Zorin V.B. High-energy wide-aperture lasers pumped by radially convergent electron beams // *Proc. XV Intern. Symposium on Gas Flow Chemical Lasers, and High-Power Lasers*. – Prague, Czech Republic, 2004. – Part 2. – P. 593 – 596.
 44. Лосев В.Ф., Ковальчук Б.М., Тарасенко В.Ф., Панченко Ю.Н., Иванов Н.Г., Коновалов И.Н., Абдуллин Э.Н., Панченко А.Н., Лю Ж., Зорин В.Б., Скакун В.С., Губанов В.П., Степченко А.С., Толкачев В.С. Широкоапертурная эксимерная лазерная система // *Квантовая электроника*. – 2006. – Т. 36. – №1. – С. 33 – 38.
 45. Лосев В.Ф., Ковальчук Б.М., Тарасенко В.Ф., Панченко Ю.Н., Иванов Н.Г., Коновалов И.Н., Абдуллин Э.Н., Панченко А.Н., Зорин В.Б., Скакун В.С., Губанов В.П., Степченко А.С., Толкачев В.С. Мощная эксимерная лазерная система // *Оптика атмосферы и океана*. – 2006. – Т.19. – №2-3. – С.195 – 201.
 46. Abdullin E.N., Ivanov N.G., Kovalchuk B.M., Konovalov I.N., Losev V.F., Panchenko A.N., Panchenko Yu.N., Skakun V.S., Tarasenko V.F., Yastremsky A.G. High power excimer laser systems. // *Laser Physics*. – 2006. – V. 16. – No. 1. – P. 104 – 115.
 47. Losev V.F., Kovalchuk B.M., Tarasenko V.F., Panchenko Yu.N., Ivanov N.G., Zorin V.B., Skakun V.S., Konovalov I.N., Panchenko A.N., Abdullin E.N., Tolkachev V.S., Liu J.R., Yi A.P., Hao X.Q., Zhang Y.S., Yu L., Ma L.Y., Huang K., Tang Y., Wang X.H., Yuan X., Ye X.S., Wang L.J. The Development of a Long Pulse Excimer Laser System // *Proc. XV Intern. Symposium on Gas Flow Chemical Lasers, and High-Power Lasers*. – Prague, Czech Republic, 2004. – Part 2. P. 566 – 569.
 48. Abdullin E.N., Bazhenov G.P., Bazhenov Yu.P., Morozov A.V. Bimetallic effect and structure of valence shells of cathode metal atoms // *Proc. XIV Intern. Symp. on High Current Electronics*. – Tomsk, 2006. – P. 86 – 88.

49. Abdullin E.N., Balbonenko E.F., Fryshtetter A.V., Startsev A.M. Repetitive pulsed Marx generator // Proc. XII Intern. Symp. on High Current Electronics. – Tomsk, 2000. – P. 382 – 385.
50. Abdullin E.N., Morozov A.V. Electron accelerator based on repetitive pulsed Marx generator // Proc. XX ISDEIV. – Tours, France, 2002. – P. 368 – 371.
51. Абдуллин Э.Н., Морозов А.В. Импульсно-периодический электронный ускоритель с большим поперечным сечением пучка // Proc. VI Intern. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. – Tomsk, Russia, 2002. – P. 71 – 74.
52. Абдуллин Э.Н., Морозов А.В. Импульсно-периодический электронный ускоритель с большим поперечным сечением пучка // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири». – Иркутск, 2003. – С. 69 – 74.
53. Абдуллин Э.Н., Баженов Г.П., Балбоненко Е.Ф., Кунц С.Э. Получение сильноточных электронных пучков во взрывоэмиссионном диоде при давлении газа $\sim 10^{-2} - 10^{-1}$ Торр // Письма в ЖТФ. – 1998. – Т. 24. – № 2 – С. 88 – 92.
54. Abdullin E.N., Bazhenov G.P. Obtaining of high-current electron beams in an explosive emission diode at $10^{-2} - 10^{-1}$ Torr gas pressure // Proc. XVIII ISDEIV. – Eindhoven, Netherlands, 1998. – P. 630 – 633.
55. Abdullin E.N., Bazhenov G.P. High-current electron beam formation in an explosive emission diode at $\sim 10^{-2} - 10^{-1}$ Torr gas pressure // IEEE Trans. on Plasma Science. – 1999. – V. 27. № 4. – С. 1092 – 1096.
56. Abdullin E.N., Bazhenov G.P., Bazhenov Yu.P., Morozov A.V. Dependences of vacuum arc discharge processes and characteristics on atom electronic structure of cathode matter // Proc. IV Intern. Conf. on Plasma Physics and Plasma Technology. – Minsk, Belarus, 2003. – V.1. – P. 96 – 99.
57. Abdullin E.N., Bazhenov G.P., Bazhenov Yu.P., Morozov A.V. Cathode material transformation into discharge plasma in explosive electron emission // Proc. XIII Intern. Symp. on High Current Electronics. – Tomsk, 2004. – P. 105 – 108.
58. Абдуллин Э.Н., Баженов Г.П. О механизме интенсивного газовыделения с анода в электронных источниках // Известия вузов. Физика. – 1984. – №11. – 7с. Деп. в ВИНТИ, № 5616-84.

Э. Абдуллин