

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ СИЛЬНОТОЧНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

На правах рукописи

Воробьёв Максим Сергеевич

**ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОНОВ С МНОГОАПЕРТУРНЫМ
ПЛАЗМЕННЫМ КАТОДОМ НА ОСНОВЕ ДУГОВОГО РАЗРЯДА
НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ С ЭФФЕКТИВНЫМ ВЫВОДОМ ПУЧКА
БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ В АТМОСФЕРУ**

Специальность 05.27.02 – вакуумная и плазменная электроника

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор
Коваль Н.Н.

Томск – 2015

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1 Способы генерации, формирования и транспортировки электронных пучков большого сечения (ПБС).....	14
1.1. Ускорители электронов на основе термокатода для генерации ПБС.....	16
1.2. Ускорители электронов для создания ПБС на основе взрывной эмиссии электронов.....	27
1.3. Ускорители электронов для создания ПБС с эмиттерами на основе ионно-электронной эмиссии	40
1.4. Ускорители электронов для создания ПБС на основе плазменного эмиттера с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы.....	47
1.4.1. Ускорители электронов на основе плазменного эмиттера с иницированием дугового разряда низкого давления пробоем по поверхности диэлектрика.....	48
1.4.2. Ускорители электронов на основе эмиттера с контрагированным дуговым разрядом низкого давления.....	56
Выводы и постановка задач исследований.....	66
Глава 2 Описание макета источника электронов с плазменным катодом. Методика и техника экспериментов.....	72
2.1. Описание макета источника электронов с плазменным катодом для формирования, транспортировки и вывода ПБС в атмосферу.....	72
2.2. Методы регистрации распределения плотности тока по сечению пучка.....	91
2.3. Измерение средней энергии и мощности широкоапертурного электронного пучка.....	96

Выводы.....	102
Глава 3 Исследование многоапертурного сеточного плазменного катода на основе импульсного дугового разряда низкого давления.....	104
3.1. Катодный узел с инициированием катодного пятна электрическим пробоем в газе низкого давления.....	104
3.2. Разработка, создание и исследование многоапертурного плазменного катода.....	117
3.3. Вывод электронного ПБС из вакуума в атмосферу.....	137
Выводы.....	145
Глава 4 Разработка, создание и применение автоматизированного широкоапертурного источника электронов с плазменным катодом и выводом ПБС в атмосферу.....	147
4.1.Создание автоматизированного широкоапертурного источника электронов с плазменным катодом.....	147
4.2.Разложение тетрафторида кремния с использованием широкоапертурного источника электронов с плазменным катодом	158
4.3.Обработка натурального латекса с использованием широкоапертурного источника электронов с плазменным катодом.....	165
4.4.Выводы.....	169
Заключение.....	171
Приложения.....	173
Список литературы.....	177

ВВЕДЕНИЕ

Облучению электронными пучками большого сечения (ПБС) больших поверхностей и значительных газовых объемов в настоящее время посвящено уже немало литературы, но интерес к данной тематике продолжает расти. ПБС, выведенные в атмосферу или газ высокого давления через выпускные фольговые окна (ВФО), применяют для полимеризации мономеров [1, 2], очистки атмосферы от выхлопных газов, а также очистки сточных вод от загрязнений [3, 4], в плазмохимии и радиационной химии [5–8], для накачки мощных газовых лазеров [9–12], для коммутации больших токов [13], стерилизации пищевых продуктов и медицинского инструмента [14–17] и др. Для решения таких задач требуются надежные и долговечные ускорители электронов со стабильными параметрами. Так, например, для лазеров, работающих в квазистационарных режимах на молекулах CO_2 , необходимы ПБС с плотностью тока $j_n \approx (10^{-3}) \text{ A/cm}^2$, длительностью импульсов тока $\tau_n \approx (10^{-4} \div 10^{-3}) \text{ с}$ и энергией электронов $E_0 = (200 \div 500) \text{ кэВ}$ при неравномерности распределения плотности тока пучка по его сечению не выше 10% [11, 18]. Подобную задачу можно рационально решить, используя плазменные эмиттеры с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы [9, 13, 19–25], которые обладают рядом преимуществ как перед ускорителями с термокатодом (большой срок службы, нечувствительность к вакуумным условиям, высокая энергетическая эффективность), так и перед ускорителями на основе взрывоэмиссионных катодов (большая длительность импульсов, повышенный срок службы, высокая однородность плотности тока пучка, большая частота следования импульсов). Также, используя плазменные эмиттеры с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы, за счет разделения системы электропитания разряда и ускорения электронов, можно управлять основными параметрами пучка независимо друг от друга в широких

пределах, что сложно реализуемо или невозможно в ускорителях электронов на основе других типов эмиттеров.

Запланированные в настоящей работе исследования, направленные на создание источников электронов, генерирующих ПБС, с параметрами, не достигавшимися ранее, представляют как научный, так и практический интерес, значительно расширяя сферу их возможных применений, а, следовательно, определяют **актуальность** работы.

Цель работы состояла в исследованиях процессов извлечения электронов из многоапертурного плазменного катода на основе дуги низкого давления с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы, формирования, транспортировки и вывода многоэлементного электронного пучка большого сечения через выпускное фольговое окно, а также исследованиях стабильности работы и энергетической эффективности такого источника электронов.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые:

1. Разработаны новые катодные узлы, обеспечивающие генерацию эмиссионной плазмы, с увеличенным ресурсом работы в отсутствие капельной фракции катодной дуги на эмиссионной сетке, в сравнении с катодными узлами с иницированием катодного пятна электрическим пробоем по поверхности диэлектрика, и обеспечивающие более широкий диапазон тока разряда без его обрывов, в сравнении с традиционно используемыми катодными узлами на основе ячейки Пеннинга.

2. Показано, что при организации двухэлектродной многоапертурной электронно-оптической системы с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы, стабильность работы плазменного катода повышается как за счет обеспечения дополнительного перепада давлений между областями генерации плазмы и ускорения электронов, так и за счет снижения влияния на генерацию эмиссионной плазмы высокоэнергетического ионного потока, образующегося при ионизации

электронным пучком десорбированного с поверхности выпускного фольгового окна газа.

3. Показано, что применение многоапертурного плазменного катода позволяет увеличить коэффициент вывода тока пучка из вакуума в атмосферу через выпускное фольговое окно, геометрическая прозрачность опорной решетки которого 56%, с $\beta=0,4$ до $\beta=0,75$, обеспечить за счет этого более высокий КПД источника электронов, а также расширить диапазон его основных характеристик (увеличить ток пучка в атмосфере) и повысить моноэнергетичность пучка во времени за счет снижения просадки напряжения конденсаторной батареи.

Научная и практическая ценность работы состоит в том, что:

1. При использовании плазменных катодов с большой эмиссионной площадью для генерации ПБС предложены конструктивные решения, обеспечивающие достижение высокого коэффициента вывода тока пучка из вакуума в атмосферу, определяемого только энергией электронного пучка и не зависящий от геометрической прозрачности и конструкции опорной решетки, что открывает новые возможности для источников электронов на основе таких катодов.

2. На основании проведенных исследований создан автоматизированный широкоапертурный (75×15) см² источник электронов с плазменным эмиттером, который по совокупности основных параметров и диапазону их независимой перестройки (энергия пучка (100÷200) кэВ, амплитуда тока пучка, выведенного в атмосферу, (2÷30) А, длительность импульсов тока пучка (10÷100) мкс, частота следования импульсов (1÷50) с⁻¹), подходит для использования в научных и промышленных целях.

Основные материалы диссертационной работы опубликованы в 18 работах, из которых **7 статей** в отечественных рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, а также **10 полных текстов докладов** в

трудах международных и всероссийских конференций, симпозиумов и совещаний.

Результаты работ докладывались и обсуждались на 16-ой международной конференции по сильноточной электронике (Томск, Россия, 2010), 4-ом международном Крейнделевском семинаре «Плазменная эмиссионная электроника» (Улан–Удэ, Россия, 2012), 5-ой Всероссийской конференции молодых ученых "Материаловедение, технологии и экология в третьем тысячелетии" (Томск, Россия, 2012), 25-ой международной конференции по разрядам и электрической изоляции в вакууме (ISDEIV) (Томск, Россия, 2012), международной конференции по энергетическим потокам и радиационным эффектам (EFRE-2014) (Томск, Россия, 2014), 5-ом международном Крейнделевском семинаре «Плазменная эмиссионная электроника» (Улан–Удэ, Россия, 2015), 12-ой международной конференции «Газоразрядная плазма и ее применения» (Томск, Россия, 2015), 11-ой международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом» (Минск, Беларусь, 2015), 8-ой международной конференции «Физика плазмы и плазменные технологии» (Минск, Беларусь, 2015).

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. В плазменном источнике импульсного широкоапертурного электронного пучка на основе дугового разряда низкого давления с полым катодом и полым анодом с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы удержание магнитным полем катодного пятна на торце полого катода и отсечка капельной фракции катодной дуги дополнительным диафрагмированным электродом существенно ослабляет процесс запыления эмиссионной сетки продуктами испарения катодного пятна, что обуславливает более высокую стабильность параметров электронного пучка и обеспечивает большой ресурс сетчатого плазменного катода.

2. При использовании в широкоапертурном источнике электронов с сеточным плазменным катодом двухэлектродной многоапертурной

электронно-оптической системы, в которой на эмиссионную сетку, фиксирующей границу плазмы, со стороны разрядного промежутка укладывается металлическая маска, а ускоряющий электрод является соосным выпускным фольговым окном за счет увеличения эффективной площади анода, перераспределения тока разряда в ячейки эмиссионной сетки при увеличении их размера и обеспечения дополнительного перепада давлений между областью генерации плазмы и ускорения электронов повышается стабильность работы плазменного катода и электрическая прочность ускоряющего промежутка, а также обеспечивается повышение коэффициента прохождения тока пучка через выпускное фольговое окно до величины $\beta=0,75$, превышающего геометрическую прозрачность опорной решетки в $\approx 1,5$ раза.

3. Создан автоматизированный источник электронов с сеточным плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления с полыми катодом и анодом, обеспечивающий генерацию широкоапертурного электронного пучка с площадью поперечного сечения $S_{\text{п}}=(75 \times 15) \text{ см}^2$, энергией $E_0=(100 \div 200) \text{ кэВ}$, амплитудой тока пучка, выведенного в атмосферу, $I_{\text{п}}=(2 \div 30) \text{ А}$, при длительности импульсов тока пучка $t_{\text{и}}=(10 \div 100) \text{ мкс}$, частоте их повторения $f=(1 \div 50) \text{ с}^{-1}$ и КПД ($\eta \approx 0,65$). По совокупности основных параметров, диапазону их независимой перестройки, а также ресурсу созданный электронный источник является перспективным для его использования в научных и технологических целях.

При подготовке диссертационной работы были выполнены как расчетные, так и экспериментальные работы. Расчеты и обработка их результатов проводились различными методами. Экспериментальные работы проведены с использованием стандартных и специальных методик измерения электрофизических параметров широкоапертурных ускорителей.

Для решения задач были использованы следующие основные методы исследования:

1. методы аналитического расчета;
2. математическое моделирование с использованием компьютерной техники;
3. известные экспериментальные методики и диагностическая аппаратура для измерения параметров и характеристик электрофизических установок и их узлов;
4. специально разработанные экспериментальные методики и аппаратура для диагностики параметров электронных пучков в атмосфере и в вакууме;
5. верификация экспериментальных данных с помощью сравнения результатов, полученных с использованием различных методик и способов измерений;
6. методы математической статистики для анализа и обработки результатов.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждаются удовлетворительным совпадением экспериментальных и расчетных зависимостей, систематическим характером исследований, использованием независимых дублирующих экспериментальных и расчетных методик, практической реализацией научных положений и выводов при проектировании и создании автоматизированного источника электронов, генерирующего ПБС с выводом его в атмосферу.

Личный вклад автора состоит в создании экспериментальной установки, выборе методик экспериментов, проведении исследований, анализе и обобщении их результатов. Автором самостоятельно выдвинуты защищаемые научные положения, сделаны выводы и даны рекомендации по внедрению результатов работы в создание автоматизированного широкоапертурного источника электронов с плазменным катодом. Обсуждения задач исследований и, методов их решения и результатов

анализа экспериментальных данных проводились совместно с соавторами, фамилии которых указаны в опубликованных по теме диссертации работах.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений с общим объемом 197 страниц, содержит 76 рисунков и 1 таблицу. Список цитируемой литературы включает 166 наименований.

Содержание диссертационной работы.

В первой главе проведен сравнительный анализ электронно-оптических систем на основе различных типов эмиттеров, используемых для генерации ПБС. Рассмотрены ускорители электронов на основе, взрывной, ионно-электронной и термоэмиссии, а также эмиссии из плазменных катодов с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы.

Сделан вывод о том, что в рассматриваемых ускорителях электронов значительные потери тока пучка в выпускном фольговом окне (ВФО) определяются угловой расходимостью генерируемого пучка, которая зависит от направления вектора скорости влета электронов в ускоряющий промежуток, а также влияния собственного магнитного поля на траекторию каждого отдельного электрона (на ускорителях с взрывоэмиссионным катодом). Высокая начальная скорость сообщается электронам путем подачи напряжения смещения на электроды, необходимые для управления параметрами тока пучка. Кроме этого, потери тока пучка в выводной фольге существенны при организации импульсного ускоряющего напряжения. Распределение плотности тока $j_{\text{п}}$ по сечению пучка, получаемое на ускорителях на основе ВЭЭ, сравнительно неоднородно. Это связано как с неодновременностью срабатывания острий, так и с их постепенной деградацией, поэтому распределение от импульса к импульсу также отличается друг от друга. Снижение неравномерности $j_{\text{п}}$ на ускорителях с термокатодом сопровождается уменьшением коэффициента вывода тока пучка из вакуума в атмосферу и переходом от триодной к тетродной системе

генерации электронного пучка, что, усложняет систему электропитания термоэммитера.

Ускорители на основе ионно-электронной эмиссии обладают сравнительно высоким коэффициентом вывода тока пучка из вакуума в атмосферу при ускоряющем напряжении до $U_0=200$ кВ и являются весьма перспективными для получения ПБС высокой средней мощности. Но такие ускорители обладают сравнительно высокой неоднородностью распределения плотности тока по сечению пучка и неспособностью стабильно работать при ускоряющих напряжениях выше $U_0=250$ кВ.

Показано, что для генерации ПБС наиболее перспективными являются ускорители с плазменными катодами, имеющими сеточную стабилизацию границы эмиссионной плазмы. Отмечено, что имеется два вида электронов, влетающих в ускоряющий промежуток. Это термализованные и быстрые электроны, хотя электронов второй группы существенно меньше ($\approx(10\div 20)\%$). Сравнительно низкая энергия электронов, влетающих в ускоряющий промежуток позволяет обеспечивать более низкую угловую расходимость пучка.

Управление распределением плотности тока по сечению пучка осуществляется несколькими способами: путем наклона катодных узлов и введением переменной прозрачности эмиссионной сетки, что позволяет достигать однородности распределения плотности тока пучка с отклонением от среднего значения не хуже $\pm 5\%$.

Рассмотрены предварительные результаты испытаний многоапертурных систем и способов генерации в них эмиссионной плазмы.

Выявлены недостатки существующих катодных узлов с генерацией плазмы на основе дугового разряда низкого давления. К ним относятся либо высокое значение капельной фракции материала катода, либо обрывы и нестабильности тока разряда существенно зависящие от давления рабочего

газа в разрядной системе и обусловленные принципом действия конкретного катодного узла.

В заключении к главе сформулированы основные задачи исследований.

Во **второй главе** приведены методики и техника экспериментов. Описана конструкция макета источника электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления и основные схемы электропитания такого источника электронов. Рассмотрены особенности измерения энергетического спектра электронов пучка, выведенного в атмосферу, его калориметрия и способы измерения распределения плотности тока пучка по его сечению.

В **третьей главе** описана конструкция нового катодного узла для генерации объемной плазмы на основе дугового разряда низкого давления, его инициирование электрическим пробоем в газе, а также приведены основные вольтамперные характеристики (ВАХ) разряда и результаты исследования ресурса работы плазменного катода с таким катодным узлом.

Приведены результаты исследований стабильности работы источника электронов с многоапертурным плазменным катодом, условия переключения тока разряда в область эмиссионной сетки для увеличения коэффициента извлечения тока из эмиттера в ускоряющий промежуток. Особое внимание уделено распределению плотности тока по сечению пучка в системе с плазменным катодом. Проведены исследования эффективности вывода электронного пучка через ВФО из вакуума в атмосферу.

Четвертая глава посвящена вопросам разработки источников электронов, генерирующих ПБС. Описаны особенности конструкции разработанного источника электронов и ключевые моменты его автоматизации. Представлены некоторые применения источника электронов с плазменным катодом и выводом ПБС в атмосферу.

В **заключении** сформулированы основные результаты исследований, обосновывается их достоверность. Указываются публикации по теме диссертации, отмечается личный вклад автора в проведенных исследованиях.

Диссертационная работа выполнена в рамках выполнения проекта №14-29-00091 Российского научного фонда.

ГЛАВА 1. СПОСОБЫ ГЕНЕРАЦИИ, ФОРМИРОВАНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ

Для определения области перспективного использования каждого из типов ускорителей электронов с ПБС следует более подробно рассмотреть их принципы действия, конструктивные особенности и основные характеристики, а также преимущества и недостатки в сравнении друг с другом. Особое внимание необходимо уделить проблеме вывода ПБС через выпускное фольговое окно (ВФО) в атмосферу или газ высокого давления, эффективности генерации и транспортировки ПБС, а также стабильности работы ускорителей электронов в различных их конфигурациях.

Вне зависимости от типа применяемого катода увеличение выводимой в атмосферу плотности мощности пучка, а соответственно и его средней мощности, ограничены не только эмиссионной способностью катода, но и значительными потерями ускоренных электронов в ВФО. Нагрев опорной решетки либо уложенной на нее выводной фольги может привести к разрушению последней и потере вакуума, что неизбежно приведет к аварийной ситуации. Потери пучка в фольге являются неизбежными и зависят от материала и толщины фольги, а также от энергии ускоренных электронов за счет их упругих и неупругих взаимодействий с атомами кристаллической решетки материала, из которого выполнена фольга [26]. При устранении же нагрева опорной решетки последняя может выступать в качестве радиатора для фольги, что существенно увеличивает надежность ускорителя, так как качественное охлаждение фольги приводит к увеличению ее механической прочности и ресурса ее работы.

Именно поэтому независимо от области применения любого широкоапертурного ускорителя электронов, особенно если речь идет о промышленном использовании, можно выделить два главных его параметра: ресурс работы и КПД. Если чаще всего ресурс работы определяется типом

применяемого катода, то КПД зависит от коэффициента вывода электронного пучка из ускоряющего промежутка в атмосферу. В любой системе задача эффективного вывода пучка является многокритериальной в силу зависимости параметров пучка от электронной оптики любого известного ускорителя. Анализируя физические процессы, происходящие в источниках электронов различных типов, можно более всесторонне рассмотреть процессы, происходящие в ускорителе электронов с плазменным катодом с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы, выбранном в конечном итоге в качестве основного объекта исследования. Поскольку энергия электронного пучка, генерируемого такими ускорителями, на сегодняшний день не превышает $E_0=500$ кэВ, то рассматривать в настоящем обзоре ускорители с большей энергией электронов нецелесообразно, так как при более высоких энергиях конструкция ускорителя может существенно изменяться. В том числе значительно изменяется конструкция ВФО. Это связано с тем, что при увеличении энергии электронов, последние способны проходить сквозь фольги с заданной толщиной и материалом с меньшими потерями, что позволяет использовать фольги большей толщины, изготовленные из прочного материала (например, титан), что в итоге позволяет либо полностью отказаться от опорной решетки в конструкции ВФО, либо существенно изменить ее конструкцию и тип охлаждения.

1.1. Ускорители электронов на основе термокатода для генерации ПБС

Эмиссионная электроника уже несколько десятилетий развивается в направлении создания эффективных катодов, позволяющих получать значительные токи с небольших площадей при относительно малых энергозатратах и больших сроках службы. Такое развитие вызвано необходимостью устранения основных недостатков традиционных источников электронов на основе термокатода, в которых, например, имеется большое количество разборных узлов с существенным газовыделением в вакууме. При этом десорбированные газы иногда агрессивны по отношению к материалу самого термокатода, что ведет к его деградации, снижению эмиссионной способности и сокращению срока его службы. Кроме этого, значительная часть мощности накала расходуется на излучение, которое нагревает весь катодный узел. Это приводит к неспособности обеспечивать большие плотности тока эмиссии даже при относительно больших энергозатратах, что является основным недостатком эмиттеров электронов на основе термокатода. Именно поэтому при создании электронных источников вопросам снижения рабочей температуры катода и уменьшению мощности накала уделяется большое внимание. Например, в работе [27], где рассматривается ускоритель, генерирующий электронный пучок сечением $(100 \times 10) \text{ см}^2$ с энергией электронов до $E_0 = 180 \text{ кэВ}$, авторами было выяснено, что в условиях эксперимента при плотности тока пучка $j_{\text{п}} < 30 \text{ мА/см}^2$ для коротких катодов длиной 25 мм без механизмов натяжения, выполненных в виде спиралей, требуется мощность накала на 20% меньше, чем для катодов из нитей длиной 320 мм. При работе с длинными термокатадами обрыв даже одного накального элемента приводит к существенному ухудшению равномерности распределения плотности тока по сечению пучка, а также, что более важно, образующиеся в момент обрыва мельчайшие капли раскаленного металла могут попасть на выводную фольгу, что может

привести к разгерметизации вакуумного промежутка. Среднестатистический ресурс такого катода, работающего в импульсно-периодическом режиме с плотностью тока пучка $j_{\text{п}}=20 \text{ мА/см}^2$, составляет 2,5 часа [27], что весьма мало для технологических применений ускорителей электронов. При работе с короткими накальными элементами, выполненными в виде спирали, отсутствие механических напряжений в катодном узле позволило не только увеличить ресурс работы катода более чем в 5 раз, но и уменьшить неравномерность плотности тока по сечению пучка с 15% до 3%, а в итоге увеличить срок эксплуатации выводной фольги в ≈ 2 раза. Количественных данных о коэффициенте вывода электронного пучка из ускоряющего промежутка в атмосферу в данной работе не сообщается и дальнейших сведений о его применениях не имеется.

Коэффициент вывода пучка β есть отношение тока пучка $I_{\text{п}}$, образованного электронами, выпущенными через фольгу в атмосферу (рис. 1.1), к общему току в ускоряющем промежутке $I_0=I_e+I_i$, образованного электронами и ионами, ускоренными в этом промежутке:

$$\beta=I_{\text{п}}/I_0, \quad (1.1)$$

Если пренебречь ионной составляющей тока пучка, которая для высоковакуумных промежутков обычно не превышает 1%, то коэффициент β можно представить в виде произведения трех коэффициентов [28]:

$$\beta=\eta_{\text{ф}}\eta_{\text{г}}\eta_{\text{у}}, \quad (1.2)$$

где $\eta_{\text{ф}}$ – прозрачность фольги, которая зависит от энергии электронов, материала и толщины фольги; $\eta_{\text{г}}$ – геометрическая прозрачность опорной решетки, равная отношению суммарной площади отверстий к общей площади опорной решетки; $\eta_{\text{у}}$ – угловая прозрачность, то есть доля электронов, которая попала во входное сечение отверстия в опорной решетке и прошедших сквозь канал отверстия, не попав на его стенку. Приведенное выражение справедливо для любого ускорителя, вне зависимости от типа применяемого катода. В практических случаях для ускорителей на основе

термокатода средний угол расхождения потока электронов составляет $\varphi \approx (1 \div 3)^\circ$ [28], но даже такие малые углы приводят к значительным потерям пучка в протяженных каналах (длиной (1÷5) см) опорной решетки.

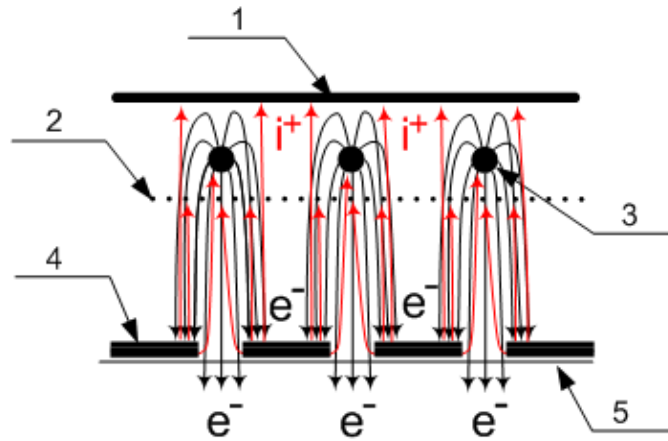


Рисунок 1.1 – Упрощенная схема формирования, транспортировки и вывода ПБС в атмосферу в ускорителе электронов с эмиттером на основе термокатода: 1 – спредер; 2 – управляющая сетка; 3 – термокатод; 4 – опорная решетка; 5 – выводная фольга

Значительная средняя угловая расходимость определяется, в том числе, начальными поперечными составляющими скорости электронов, эмитированных с термокатода с энергией единицы эВ [29, 30], обусловленной сильно неоднородным электрическим полем вблизи катода. Конфигурация линий электрического поля зависит от геометрии как дополнительных электродов, необходимых, к примеру, для управления величиной и распределением плотности тока пучка, так и высоковольтного ускоряющего промежутка. Поскольку $\operatorname{tg}(\varphi) = v_1/v_2$, где $v_1 = (2 \cdot e \cdot U_{\text{д.э.}}/m)^{1/2}$ – начальная скорость электронов, $U_{\text{д.э.}}$ – напряжение смещения прикладываемое к дополнительным электродам, e – заряд электрона, m – масса электрона, а $v_2 = (2 \cdot e \cdot U_0/m)^{1/2}$ – скорость электронов, которую электроны получают в результате движения в ускоряющем поле [19], где U_0 – величина ускоряющего напряжения, то для получения средней угловой расходимости, равной $\varphi = 3^\circ$ начальная энергия электронов должна быть ≈ 100 эВ, которую

электроны могут получить только под действием внешнего электрического поля в области начального формирования пучка до входа в область ускорения.

Кроме этого, магнитное поле накала и неэквипотенциальность катода заметно влияют на распределение плотности тока по сечению пучка с отклонением от среднего значения на $\approx 50\%$ по краям пучка [31, 32]. Для устранения влияния этого эффекта в частотно-импульсном режиме отбор тока с катода производят в момент перехода фазы тока накала через ноль. При такой регулировке частота следования импульсов тока пучка зависит от частоты сети электропитания. В частотном режиме без синхронизации с нулевой фазой тока накала распределение плотности тока по сечению пучка может быть не только неоднородным, но и невоспроизводимым от импульса к импульсу.

Использование ускорителей электронов с одиночным термокатодом и расширяющимся электронным пучком [33], которые до сих пор находят применение благодаря своей сравнительно простой конструкции, показало, что такие ускорители генерируют ПБС с высокой неоднородностью плотности тока по сечению пучка, достигающей в продольном и поперечном направлениях 10% и 50%, соответственно. Расходящийся пучок будет выходить в атмосферу не только с относительно высокой неравномерностью, но и со значительными потерями тока пучка в ВФО, существенно превышающими геометрическую прозрачность опорной решетки и в основном определяемыми угловым разбросом пучка.

Для увеличения поперечных размеров генерируемого электронного пучка и повышения эффективности вывода электронного пучка из ускоряющего промежутка в атмосферу через ВФО большой площади более целесообразно использовать ускорители с многоэлементными термокатадами [34–37].

В работе [36] ускоритель электронов (рис. 1.2) состоит из вакуумной камеры 1, в которой через проходной изолятор 2 установлен катодный блок 3, имеющий плоский формирующий экран 4, эмиттеров из торированного вольфрама 5 каждый сечением $(2 \times 0,6) \text{ мм}^2$ и сетку 6 в виде цилиндрических стержней диаметром 1,2 мм и шагом 10 мм. Элементы катодного блока заключены в электростатический экран 7. Анодом является ВФО сечением $(200 \times 800) \text{ мм}^2$, состоящее из опорной решетки 8 и выводной фольги 9 из АМГ-сплава толщиной 30 мкм. Решетка толщиной 40 мм имеет геометрическую прозрачность 60% и охлаждается водой по периметру. При ускоряющем зазоре, равном $d_0 = 100 \text{ мм}$ совокупность элементов катодного блока и ВФО образует планарную триодную электронно-оптическую систему (ЭОС), подобная которой также описана в [32].

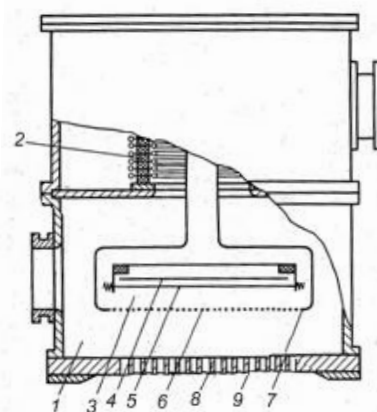


Рисунок 1.2 – Конструкционная схема ускорителя [36]: 1 – вакуумная камера; 2 – проходной высоковольтный изолятор; 3 – катодный блок; 4 – плоский формирующий экран; 5 – торированные карбидированные эмиттеры; 6 – сетка; 7 – электростатический экран; 8 – опорная решетка; 9 – выводная фольга

Для упрощения конструкции сетка и формирующий экран находятся под потенциалом катода. Отбор тока осуществляется ускоряющим электрическим полем, ослабленным управляющей сеткой. Недостатком такой системы является сравнительно низкий коэффициент вывода электронного

пучка, который при ускоряющем напряжении $U_0=240$ кВ был равен $\beta \approx 0,4$. Поскольку геометрическая прозрачность опорной решетки ВФО 60%, а потери тока пучка в алюминиевой фольге толщиной 30 мкм при его энергии $E_0=240$ кэВ не превышают 10% [38], из формулы (1.2) можно сделать вывод, что потери тока пучка, связанные с его угловой расходимостью, существенны и составляют $\approx 15\%$. В работе [32] сетка б также выполнена в виде стержней, но с диаметром 0,1 мм и шагом 1 мм, а на опорную решетку ВФО с геометрической прозрачностью $\approx 70\%$ уложена алюминиевая фольга толщиной 18 мкм. При подборе необходимых потенциалов для наилучшего распределения плотности тока по сечению пучка и уменьшения угловой расходимости пучка, в атмосферу удавалось вывести (30÷40)% от тока с термокатодов I_k . Таким образом, при геометрической прозрачности сетки б равной 90% и предположении, что 10% тока катода перехватывалось этой сеткой, в атмосферу выводилось (40÷50)% от тока пучка при меньшем ускоряющем напряжении, равном $U_0=130$ кВ.

В работе [28] рассмотрены факторы, определяющие угловой разброс электронного потока для ускорителя тетродного типа с системой прямонакальных эмиттеров 2, ЭОС которого приведена на рисунке 1.3, на котором также показаны траектории электронов без учета влияния управляющей сетки 3 при нулевом напряжении на спредере 1. Управляющая сетка 3 состоит из нитей, параллельных эмиттерам. Экранирующая сетка 4 выполнена в виде маски–экрана с круглыми отверстиями. Опорная решетка с круглыми отверстиями 5 с наложенной на нее фольгой является анодом ускоряющего промежутка. Для приведенного случая средний угол электронного потока оказывается равным $\varphi=1,4^\circ$ и первым фактором, определяющим средний угол, является провисание потенциала между нитями катода. Для такой системы можно считать режим работы оптимальным, когда электроны от одного эмиттера не огибают соседние эмиттеры. Этого можно достичь путем подачи отрицательного потенциала на

спредер 1, что приводит к изменению провисания поля между эмиттерами вплоть до случая практически однородного поля. Так, при

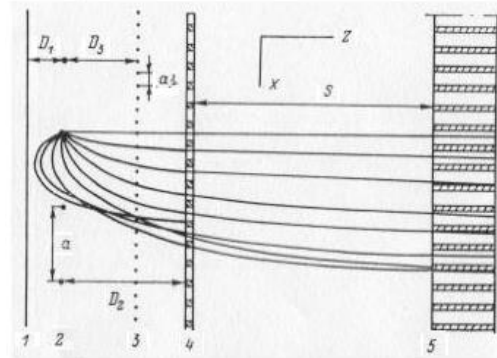


Рисунок 1.3 – Электронно-оптическая система ускорителя тетродного типа [28]: 1 – спредер; 2 – катод; 3 – управляющая сетка; 4 – экранирующая сетка; 5 – анод

подаче потенциала U_1 на спредер 1 относительно потенциала катода 2, равного половине потенциала, прикладываемого к управляющей сетке 3 U_c ($U_1=0,5U_c$), средний угол отклонения электронов составляет $\varphi \approx 0,6^\circ$. Начальное отклонение при этом остается и определяется геометрией эмиттера. В системе же дискретных эмиттеров в комбинации с экранирующей сеткой образуется поток со средним угловым разбросом $\varphi \approx (3 \div 4)^\circ$, что приводит к 25%-ным потерям на стенках каналов опорной решетки ВФО с диаметром отверстий 8 мм и глубиной каналов 30 мм. Авторы акцентируют внимание на том, что основными факторами, приводящими к угловому разбросу потока, являются сама по себе дискретность катодной системы и перфорационная структура экранирующей сетки 4 [28]. Однако, перейдя к линейной структуре экранирующей сетки, удалось уменьшить средний угол отклонения электронов до уровня $\varphi \approx (1,7 \div 2)^\circ$, что в итоге привело к увеличению коэффициента вывода пучка на 10%. На основе такой системы созданы ускорители электронов [39], с площадью сечения пучка до $S_{\text{п}}=2400 \text{ см}^2$ и плотностью тока пучка за фольгой до $j_{\text{п}}=75 \text{ мкА/см}^2$ в непрерывном режиме. Ускоритель электронов [39]

представляет собой планарный триод, в котором в отличие от [31] управление током пучка осуществляется в области отрицательных сеточных напряжений. Несмотря на то, что формирование пучка происходит путем смешивания потоков от отдельных эмиттеров в плоскости сетки с ортогонализацией траекторий частиц, падающих на опорную решетку, получено сравнительно плохое распределение плотности тока по сечению пучка с неравномерностью около $\pm 20\%$, но максимальным коэффициентом вывода электронного пучка из ускоряющего промежутка в атмосферу $\beta \approx 0,5$ при ускоряющем напряжении $U_0 = 200$ кВ и геометрической прозрачности опорной решетки ВФО 50%.

Для улучшения характеристик ускоренного пучка и повышения коэффициента вывода пучка в работе [40] предложен способ расчета для планарной ЭОС с дискретными протяженными катодами и сетками в виде стержней, параллельных катодам [28]. Представленная геометрия ЭОС неизбежно приводит к образованию каустик–перехлеста траекторий с уплотнением частиц на периферии элементарного пучка. Результирующее распределение плотности тока пучка наиболее однородно тогда, когда края элементарных пучков перехватываются второй сеткой. Если этого не происходит, коэффициент вывода тока пучка выше, но распределение плотности тока содержит аномальные уплотнения, образованные периферийными частицами, прошедшими в непосредственной близости от стержней сетки и имеющими вследствие этого наибольшую угловую расходимость. Однако необходимо отметить, что даже незначительные локальные неоднородности плотности тока по сечению пучка в ряде применений могут быть недопустимы. К примеру, при возбуждении несамостоятельных газовых разрядов высокого давления в электроионизационных лазерах локальные уплотнения тока могут вызывать возникновение контрагированных искровых каналов, что приводит к

снижению средней плотности тока пучка, а, следовательно, и выходной мощности генерируемого лазерного излучения.

В работе [41] приведены результаты расчетов электронно-оптических систем ускорителя триодного и тетродного типа, работающих в непрерывном режиме. Конструктивная схема ускорителей как с триодной (электрод 8 в этом случае отсутствует), так и с тетродной ЭОС (с наличием электрода 8) представлена на рисунке 1.4. В вакуумной камере 1 на проходном высоковольтном изоляторе 2 установлен катодно-сеточный блок, в котором имеются спредер 3, ряд проволочных эмиттеров из торированного вольфрама 4, управляющая сетка 5 в виде параллельных вольфрамовых стержней диаметром 3 мм. Элементы катодного блока помещены в электростатический экран 6. ВФО 7 сечением (500×400) мм², являющееся анодом ускорителя, состоит из фольги толщиной 30 мкм, уложенной на охлаждаемую опорную решетку из хромистой бронзы, перфорированной щелевыми отверстиями с геометрической прозрачностью 64%.

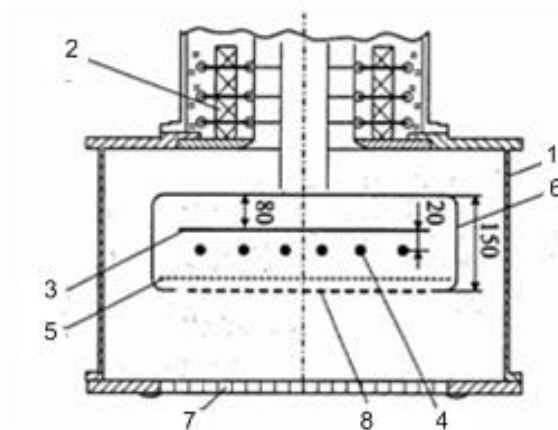


Рисунок 1.4 – Конструкционная схема ускорителей с триодной ЭОС (в отсутствие формирующей сетки 8) и тетродной ЭОС (схема соответствует) [41]: 1 – вакуумная камера; 2 – высоковольтный изолятор; 3 – спредер; 4 – проволочные эмиттеры; 5 – управляющая сетка; 6 – электростатический экран; 7 – ВФО; 8 – формирующая сетка

Управление рассматриваемым триодом осуществляется в области отрицательных сеточных напряжений. Ток в ускоряющем промежутке I_0 в этом случае совпадает с током катода, поскольку отсутствует перехват электронного тока сеткой. Эксперименты подтвердили существенное влияние геометрии управляющей сетки 5 на характеристики ускорителя с ЭОС триодного типа. Для достижения требуемых значений тока I_0 была подобрана оптимальная конструкция управляющей сетки 5 и шаг стержней, что позволило достичь параметров тока в ускоряющем промежутке $I_0=350$ мА и тока пучка $I_{п}=160$ мА при ускоряющем напряжении $U_0=180$ кВ и плотности тока пучка до $j_{п}=100$ мкА/см² в непрерывном режиме [42].

Катодно-сеточный блок тетродного типа кроме указанных для триода элементов содержит еще одну сетку 8 – формирующую (рис. 1.4), которая для упрощения схемы электропитания соединена с электростатическим экраном, спредером и одним из концов термоэммиттеров. Управление током ускорителя осуществляется в области положительных потенциалов управляющей сетки 5. В этом случае ток катода I_k не совпадает с током в ускоряющем промежутке I_0 , поскольку часть электронов с катода перехватывается управляющей сеткой, что является недостатком такой системы, учитывая ограниченную эмиссионную способность термо катода.

По результатам расчетов по методике, представленной в работе [40], получено, что кроме потерь на положительной сетке, равных (6÷7)%, существуют дополнительные потери катодного тока, также около (6÷7)%, обусловленные движением частиц в тормозящем поле в промежутке между сетками и движением частиц вдоль катодов. Суммарные потери составляют (12÷15)% катодного тока. Авторы отмечают, что несмотря на то, что энергия перехваченных электронов не превышает 200 эВ, необходимо исключать дополнительные электроды с целью снижения скорости влета электронов в ускоряющий промежуток.

При использовании достаточно сложной тетродной ЭОС была достигнута независимость регулировки тока и энергии электронного пучка, что является безусловным преимуществом такой системы перед триодной. Используя систему автоматического измерения распределения плотности тока по сечению пучка, описанную в [43], было показано, что более высокая однородность ($\leq 10\%$) распределения плотности тока по сечению пучка, выведенного в атмосферу, получена с использованием тетродной системы. Авторы связывают это с тем, что в ЭОС тетродного типа краевые эффекты оказывают значительно меньшее влияние на характеристики пучка вследствие наличия сеток 5 и 8. В ускорителе с триодной ЭОС извлечение электронов обеспечивается полем анода, провисающим сквозь управляющую сетку, а на краях апертуры катодно-сеточного блока тетродной системы провисание электрического поля слабее.

Тем не менее, сложность электронной оптики и схем управления параметрами пучка, взаимозависимость основных параметров электронного пучка, большое время готовности, низкая плотность тока пучка, малое время жизни термокатода, его ограниченная эмиссионная способность и высокая электрическая мощность, необходимая для электропитания накаливаемого катода – всё это накладывает существенные ограничения на области применений ускорителей электронов с термокатадами. Ресурс работы ускорителей на основе термокатода в основном определяется временем жизни термокатода и обычно не превышает 10 часов [27]. Максимальный же коэффициент вывода электронного пучка в атмосферу для ускорителей на основе термокатода до сих пор не превысил $\beta \approx 0,6$, что считается хорошим достижением для ускорителей этого типа, однако путей дальнейшего повышения коэффициента β не предложено.

1.2. Ускорители электронов для создания ПБС на основе взрывной эмиссии электронов

Плотность тока термоэлектронной эмиссии ограничена резким увеличением скорости испарения катода при увеличении температуры, а в конечном итоге температурой плавления материала катода, несмотря на то, что на сегодняшний день существуют термокатоды (боридные, карбидированные, оксидированные) обеспечивающие в различных режимах высокую плотность тока эмиссии $j_0 > 100 \text{ A/cm}^2$ [30]. Достижение высокой плотности тока при фотоэмиссии требует использования мощных источников излучения, что тоже приводит к разрушению поверхности катода. Плотность тока автоэлектронной эмиссии очень сильно зависит от напряженности электрического поля на катоде, и в принципе возможно получение больших плотностей тока ($j_0 = (10^6 \div 10^8) \text{ A/cm}^2$), однако для устойчивого получения таких плотностей тока с достижением ее высокой равномерности по сечению пучка необходимо изготавливать идентичные катоды с микронными радиусами закругления, что технологически очень сложно. Достичь максимальной плотности тока эмиссии по сравнению с любыми другими способами на сегодняшний день можно при использовании взрывоэмиссионных катодов [44], принцип работы которых заключается в следующем. При подаче высокого напряжения на промежуток под действием термоавтоэмиссионного тока происходит взрыв микроострий на поверхности катода с образованием локальных плазменных сгустков — катодных факелов. Электроны на анод поступают с границы плазмы этих факелов, расширяющейся со скоростью $\sim 10^6 \text{ см/сек}$ [44, 45]. При достижении этой границы анода наступает переход в дуговую стадию с увеличением проводимости в промежутка. Эмиссия электронов с катода в процессе перехода металла в плазму определяет рост электронного тока в промежутке. В целом все это явление получило название взрывной эмиссии электронов (ВЭЭ) [45].

Переход от термоавтоэлектронной эмиссии к режиму ВЭЭ сопровождается не только увеличением эмиссионного тока почти на 2 порядка [19], но и ухудшением распределения плотности тока по сечению пучка, так как в подавляющем большинстве случаев для получения ПЭС в источниках с ВЭЭ используют не единичные острия, а многоострийные катоды. Параллельной работы всех острий в таком катоде достигают либо путем использования в качестве эмиттеров материала с малым пороговым током дуги (С, Нg, LaV₆ и др.) [46], либо установкой в цепь каждого эмиттера ограничительного сопротивления [47, 48]. Дополнительно улучшить распределение плотности тока по сечению пучка можно, если направлять истечение потока плазмы из эмиссионного центра так, чтобы исключить прямой выход потока на эмитирующую плазменную поверхность. Это связано с тем, что электронный поток с острийного эмиттера из-за образования эмитирующей плазменной среды на его вершине имеет ярко выраженную кольцевую структуру [10]. А поскольку катодный факел является нестационарным плазменным образованием, расширяющимся в вакуум, то площадь плазменного эмиттера увеличивается во времени, что приводит к увеличению первеанса высоковольтного ускоряющего промежутка [19] и уменьшению его электрической прочности.

Помимо короткой длительности импульса, достигаемой с помощью взрывоэмиссионных катодов немаловажный недостаток таких ускорителей связан с усложнением конструкции ускорителя, необходимой для увеличения длительности импульса тока пучка. Снижение скорости границы катодной плазмы возможно, например, путем нанесения на катод высокомолекулярного вещества [49], путем установки в цепь каждого катода сопротивления, ограничивающего эмиссионный ток [47, 48], либо введением дополнительных электродов, находящихся под автосмещением напряжения при инициировании ВЭЭ [50, 51]. В любом случае механизм работы ускорителя электронов на основе ВЭЭ обуславливает наличие жесткой связи

его основных характеристик (амплитуды, длительности импульса тока пучка и энергии ускоренных электронов) между собой, что не позволяет осуществлять независимую регулировку этих параметров.

Возникновение электронов при ВЭЭ связано с перегревом металла при микровзрыве за счет большой плотности энергии (10^4 Дж/г), а прекращение – охлаждением зоны эмиссии [44, 52]. В результате, при образовании катодной плазмы происходит непрерывный унос материала катода во время всей длительности импульса, затупление эмиттеров и, как следствие, периодические отказы в работе таких катодов. К примеру, количество капель металла для медного катода составляет $2 \cdot 10^7$ Кл⁻¹, а наиболее вероятный диаметр капель $\approx (0,1 \div 0,2)$ мкм [53]. Важно отметить, что унос материала катода при микровзрыве увеличивает вероятность пробоя ускоряющего промежутка и выхода из строя выводной фольги, которая может быть прожжена раскаленной каплей металла. Однако в работе [54,55] говорится о стабильной работе (более 10^6 включений) ускорителей такого типа в условиях масляной откачки и давлении около $p = (10^{-1} \div 10^{-2})$ Па, что связано с поверхностными загрязнениями катода, несколько улучшающими стабильность его работы.

Несмотря на описанные сложности работы ускорителей с эмиттерами на основе ВЭЭ, параметры ПБС этих ускорителей имеют широкий диапазон длительности импульса $t_{и} = (10^{-8} \div 10^{-4})$ с, плотности токов $j_0 = (10^{-3} \div 50)$ А/см² и энергии ускоренных электронов $E_0 = (200 \div 500)$ кэВ и выше с достижением пространственной неоднородности плотности тока по сечению пучка $(10 \div 20)\%$. Важно отметить, что, например, для систем возбуждения группы лазеров на эксимерных молекулах предпочтительнее ПБС с длительностью импульсов тока пучка $t_{и} \approx (10^{-8} \div 10^{-6})$ с, с большими плотностями тока $j_{и} \approx (10 \div 50)$ А/см² и энергией электронов $(200 \div 500)$ кэВ при неравномерности распределения плотности тока не хуже 15%. Кроме этого, в работе [2] показано, что заметное снижение ингибирующего влияния кислорода при

отверждении образцов на основе ненасыщенных олигоэфиров проявляется при плотности тока порядка $j_{\text{п}}=100 \text{ А/см}^2$, а широкий энергетический спектр пучка позволяет создавать неравномерность распределения поглощенной дозы по толщине образца с максимумом в приповерхностных слоях отверждаемого покрытия. Для таких специфических применений ускорители с эмиттерами на основе ВЭЭ находятся вне конкуренции.

При этом имеется ряд недостатков таких ускорителей, связанных со сложностью управления параметрами пучка, нестабильностью работы катода, его относительно малым временем жизни при высоких плотностях тока пучка, сравнительно низкой равномерностью плотности тока по сечению пучка, которой уделяется отдельное внимание [56], поскольку на поверхности катодов планарного типа в таких диодах электрическое поле значительно ниже, чем на кромочных катодах, что приводит к худшей однородности и большей нестабильности плотности тока ВЭЭ, так как сложнее обеспечить необходимую для взрыва острий напряженность электрического поля, которая должна быть не менее 10^6 В/см [44]. Кроме этого, в работе [10] при работе на ускорителе с эмиттером, состоящим из 800 острийных катодов, наблюдалось расхождение пучка на угол около 16° , а на коллекторе фиксировался пучок, структурно состоящий из множества колец, обусловленных конфигурацией электрического поля вблизи острия и эмиссией с его боковой поверхности. В результате этого ускорители с катодами на основе ВЭЭ имеют низкий коэффициент вывода тока пучка из ускоряющего промежутка в атмосферу, для увеличения которого приходится принимать достаточно сложные меры.

Коэффициент вывода пучка β также как и в случае ускорителей на основе термокатодов зависит от применяемой ЭОС, конструкции ВФО и применяемой схемы электропитания, у которой в силу особенностей работы ускорителей на основе ВЭЭ, высоковольтный источник всегда является импульсным. Поэтому возникает проблема, связанная с существенными

потерями мощности пучка в фольге на фронте и спаде импульса ускоряющего напряжения. Например, для устранения этого эффекта используют параллельную цепь пикового напряжения, которая во время нарастания напряжения дает импульс удвоенной амплитуды [57], что приводит к более крутому фронту импульса тока пучка, но увеличивает ширину энергетического спектра электронов пучка за время импульса.

Также одним из способов снижения доли низкоэнергетических электронов в формируемом электронном пучке, выведенном в атмосферу, является задержка плазмообразования на переднем фронте ускоряющего напряжения. Так были уменьшены потери тока пучка в выводной фольге в работах [58, 59] при использовании графитового катода (рис. 1.5). Однако из рисунка 1.5 также видно, что потерями тока пучка на заднем фронте импульса ускоряющего напряжения при работе ускорителя на высокой средней мощности пренебрегать нельзя.

В экспериментах на импульсном электронном ускорителе [60], где также используется механизм задержки плазмообразования за счет использования углеродной ткани, при ускоряющем напряжении $U_0=(350\div 500)$ кВ, длительности импульса $t_{\text{и}}=60$ нс с использованием щелевой опорной решетки с геометрической прозрачностью 70%, на которую уложена выводная фольга толщиной 130 мкм, в атмосферу выводится около 50% от энергии пучка в вакууме. Авторы также отмечают возрастание потерь тока пучка с увеличением ускоряющего зазора, связывая это с расхождением пучка электронов. Важно отметить, что общая площадь эмиссии в данном случае была сравнительно небольшая и составляла около 16 см^2 .

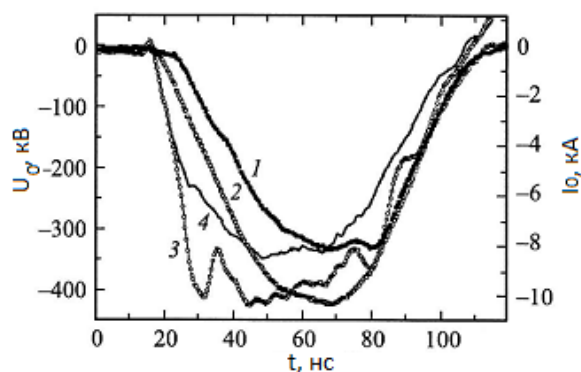


Рисунок 1.5 – Осциллограммы тока в ускоряющем промежутке I_0 (1,2) и ускоряющего напряжения U_0 (3,4) для диода с катодом из графита (1,3) и углеродной ткани (2,4) [58, 59]

Использование металлокерамического катода с повышенным содержанием меди [61] для обеспечения высокого времени запаздывания при высокой теплопроводности, необходимой для частотной работы катода на ускорителе электронов «Астра», описано в работе [62]. При амплитуде ускоряющего напряжения $U_0=370$ кВ и сечении пучка около 30 см² через титановую фольгу толщиной 50 мкм без опорной решетки в атмосферу выводится $4,5$ Дж энергии пучка из $19,5$ Дж, фиксируемых в ускоряющем промежутке. Средняя мощность инжектируемого в атмосферу пучка электронов при частоте следования импульсов $f=50$ с⁻¹ составляла $P_{\text{п}} \approx 200$ Вт при общей мощности пучка в ускоряющем промежутке $P_0 \approx 1000$ Вт.

В работе [63] вывод электронного пучка в атмосферу с энергией $E_0=(300 \div 350)$ кэВ, током до $j_{\text{п}}=0,6$ кА, длительности импульса тока пучка $t_{\text{п}}=120$ нс с частотой $f=30$ с⁻¹ привела к разрушению опорной решетки ВФО, а в ее отсутствие в том же режиме удалось достичь частоты следования импульсов $f=50$ с⁻¹ с отсутствием следов деградации выводной фольги. Такое решение вполне оправдано, но важно, что сечение пучка в данном случае не превышало $S_{\text{п}}=100$ см², но при превышении указанной площади наличие опорной решетки обязательно. Тем не менее, такие окна, но с фольгами из другого материала и другой толщины также применяются в работах [64, 65].

Для нормализации траектории электронного пучка к поверхности ВФО используются фокусирующие электроды 4 (рис.1.6) [66]. При этом расходимость и неоднородность электронного потока в такой системе уменьшаются.

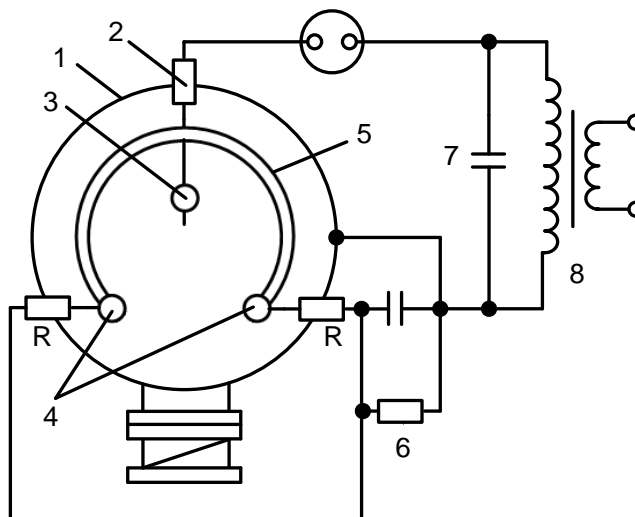


Рисунок 1.6 – Схема электронного источника с фокусирующими электродами [66]: 1 – вакуумная камера; 2 – изолятор; 3 – катод; 4 – фокусирующие электроды; 5 – крепление электродов; 6 – цепь электрического смещения; 7 – высоковольтный конденсатор; 8 – импульсный трансформатор

Такой ускоритель электронов [66] использовался для создания пучка сечением $S_{п}=(200 \times 15) \text{ см}^2$ при плотности тока пучка $j_{п}=0,5 \text{ А/см}^2$, длительности импульса $t_{и}=3 \text{ мкс}$ и энергии ускоренных электронов до $E_0=250 \text{ кэВ}$. Фокусирующие электроды 4 были выполнены в виде цилиндров и крепились на отдельном изоляторе. В этом случае в момент прихода на катод фронта импульса ускоряющего напряжения на катоде образуется большое число эмиссионных центров. Ток с катода растет, и электроны начинают оседать на фокусирующий электрод 4, что приводит к изменению его потенциала вследствие протекания тока через сеточный резистор R, сопротивление которого выбирают таким образом, чтобы падение напряжения на нем соответствовало потенциалу, требуемому из условий

фокусировки. Неоднородность плотности тока по сечению пучка для этого случая была не хуже $\pm 10\%$. Средняя мощность электронного пучка, выведенного в атмосферу достигала при этом $P_{\text{п}}=5$ кВт, но количественных данных о коэффициенте β и времени непрерывной работы такого источника на максимальной выходной мощности пучка в данной работе не приводится.

Кроме этого, при получении электронных пучков с длительностью более 10 мкс с использованием взрывоэмиссионного катода возникает проблема, связанная с разной скоростью движения плазмы в различные моменты времени импульса тока пучка [67]. Скорость разлета может быть как меньше средней скорости разлета частиц плазмы от катода ($V=2 \cdot 10^6$ см/с), так и больше ее. Проблема заключается в том, что при непрерывном испарении и ионизации материала катода, возникает ситуация, в которой граница эмиссии движется со скоростью, меньшей V , а внутренние слои плазмы от вторичных эктонов, движущиеся с большей скоростью, могут ее догнать. Как следствие на границе эмиссии возникают колебания концентрации плазмы [51, 67, 68]. Возникающие на поверхности катода сгустки плазмы, например за счет возникновения новых эктонов, при выходе их на границу эмиссии нарушают условие насыщения эмиссионного тока, и граница эмитирующей плазмы может вновь ускориться, что неизбежно приведет к возрастанию тока пучка. Зондовые исследования потенциала плазмы катодного факела показали, что если по мере повышения тока плазма позади сгустка не способна пропустить этот ток, то сгусток заряжается положительно и в этом месте образуется двойной электрический слой. Диод превращается в триод с сеткой – плазменным сгустком. Авторы считают, что падение напряжения на двойном слое может быть сравнимо с приложенным ускоряющим напряжением. Это приводит к впрыскиванию электронов в вакуумную область с большой начальной скоростью с одновременным увеличением среднего угла падения электронов на опорную решетку. Это неизбежно будет приводить к возрастанию потерь мощности пучка на

стенках каналов опорной решетки ВФО. В совокупности потери электронного тока на опорной решетке могут достигать 70% [68].

Исследованию формирования сильноточного электронного пучка прямоугольного сечения с током порядка предельного тока диода в отсутствие внешнего ведущего магнитного поля, посвящена работа [69], в которой были выполнены численные расчеты и эксперименты по получению в вакуумном диоде электронного пучка микросекундной длительности с энергией электронов $E_0=(500\div 600)$ кэВ, током в ускоряющем промежутке $I_0=(50\div 70)$ кА и поперечным сечением $S_{\text{п}}=(250\times 1000)$ мм². Анодом служила пластина из нержавеющей стали или ВФО с геометрической прозрачностью опорной решетки 85% размерами (250×1000) мм с уложенной на нее титановой фольгой толщиной 50 мкм. На рисунке 1.7 приведена геометрия вакуумного диода, обеспечивающая входение электронов пучка к плоскости анода, которым является опорная решетка ВФО, примерно под прямым углом. При ускоряющем напряжении $U_0=500$ кВ максимальный коэффициент вывода тока пучка β из такого высоковольтного диода, геометрию которого нельзя считать планарной, что усложняет его расчет, достигал $\beta\approx 0,6$.

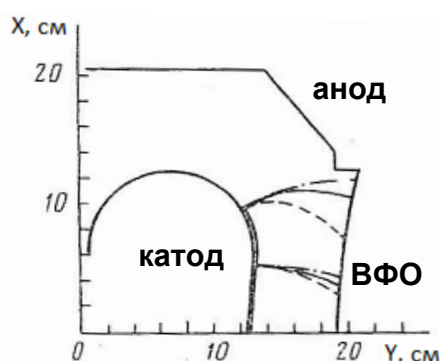


Рисунок 1.7 – Конструкция высоковольтного диода с ортогональной к поверхности ВФО траекторией электронов [69]

Используя полученные результаты, был создан ускоритель электронов для накачки ХеСl-лазера с активным объемом 600 л [70–72], собранный на

базе 12 вакуумно-изолированных восьмиступенчатых генераторов Маркса, каждый из которых снабжен катодом, описанным в [69]. Генераторы размещались в шести откачиваемых баках попарно, образуя 6 ускорителей. Ускорители размещались вокруг кюветы по радиусам так, что установка в плане имела форму звезды (рис. 1.8). Основания катодов изготовлены из труб диаметром 80 мм, расстояния между осями труб 180 мм с размером эмитирующих частей (210×950×20) мм. Расстояние от поверхности катода до опорной решетки ВФО, перекрытого титановой фольгой толщиной 40 мкм, составляло 60÷65 мм. Количество окон 24 (по 4 на ускоритель) с общей их площадью $\approx 3 \text{ м}^2$. Геометрическая прозрачность опорной решетки ВФО $\approx 70\%$. Магнитное экранирование диодов, необходимое для уменьшения влияния собственного магнитного поля пучка на его транспортировку, осуществлялось благодаря гальваническому контакту между стенками баков и кюветой. При амплитуде ускоряющего напряжения 500 кВ в режиме одиночных импульсов в атмосферу удалось вывести пучок с общей энергией 85 кДж, что составляет около 60% от общей энергии пучка в ускоряющем промежутке.

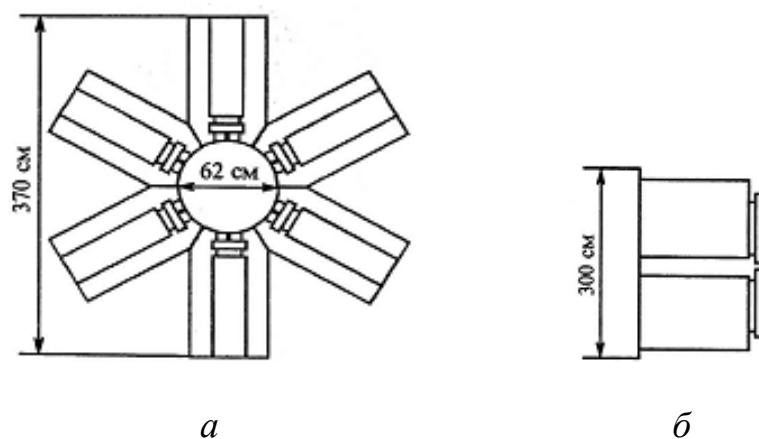


Рисунок 1.8 – Схема ускорителя электронов для накачки лазера с активным объемом 600 л: а – сечение ускорителя в плане; б – схема расположения модулей [69]

Также снижению потерь на опорной решетке ВФО посвящены работы [73, 74], в которой ускоритель электронов с катодом на основе ВЭЭ использовался для накачки KrF-лазера. Установка включает в себя два ускорителя на основе ВЭЭ с площадью катодов $(30 \times 100) \text{ см}^2$ с выводом через ВФО встречно генерируемых электронных пучков в лазерную кювету. Для снижения потерь на ребрах опорной решетки ВФО авторы изменили форму катода со сплошного эмиттера площадью $(270 \times 970) \text{ мм}^2$ на набор ленточных эмиттеров, состоящего из 24 штук, площадь каждого из которых $(25 \times 270) \text{ мм}^2$. Ленточные катоды располагались таким образом, чтобы исключить потери на ребрах опорной решетки ВФО (рис. 1.9). Для улучшения равномерности электрического поля в прикатодной области между каждым ленточным эмиттером устанавливались дополнительные электроды, изолированные от общей катодной пластины. Подобный механизм устранения краевых потерь пучка, но для сплошного ПБС, использовался в работе [75].

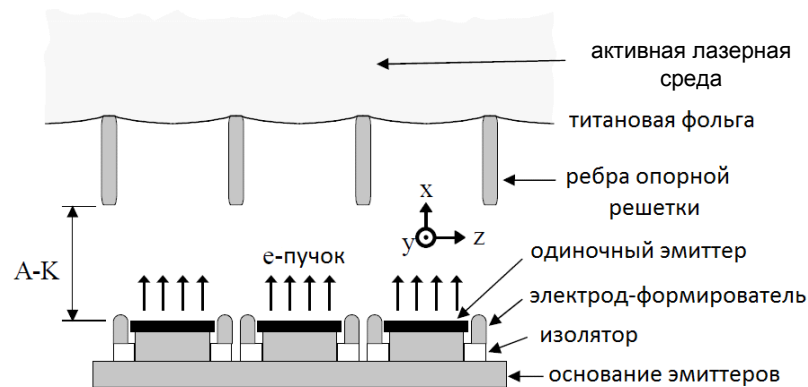


Рисунок 1.9 – Конфигурация диода [73] с катодом в виде набора ленточных эмиттеров

Недостатком системы [72] была сравнительно большая высота ребер опорной решетки, что при зазорах диода $(35 \div 45) \text{ мм}$ приводило к изменению равномерности электрического поля в области опорной решетки, в результате чего фиксировались потери пучка на ее ребрах. Описанный

ускоритель электронов [73] способен работать в частотно-импульсном режиме с частотой повторения импульсов до $f=5 \text{ с}^{-1}$, хотя в работе и не сообщается о времени непрерывной работы ускорителя. В итоге при ускоряющем напряжении до $U_0=750 \text{ кВ}$, током в ускоряющем промежутке до $j_0=180 \text{ кА}$ с временами нарастания и спада импульса 40 нс , длительностью плоской вершины импульса 600 нс и площади сечения пучка $S_{\text{п}} \approx 2600 \text{ см}^2$, в атмосферу удалось вывести пучок мощностью, равной $\approx 60\%$ мощности пучка в ускоряющем промежутке, что является очень хорошим результатом.

При переходе к более высокочастотной работе ускорителей на основе ВЭЭ появляется сложность, связанная с неустойчивой работой высоковольтных генераторов из-за нестабильностей в работе разрядников в результате эрозии электродов, нагрева и загрязнения рабочего газа, запыления изоляторов. Но в работах [76–78] было показано, что устойчивость генератора Маркса в импульсно-периодическом режиме можно повысить за счет организации эффективной продувки разрядников. Используя продувку и при уменьшении межэлектродных зазоров в разрядниках удалось повысить частоту работы генератора до $f=1000 \text{ с}^{-1}$. В результате был создан компактный ускоритель электронов [79], генерирующий пучок с энергией $E_0=(200 \div 250) \text{ кэВ}$, током до $I_0=500 \text{ А}$ при длительности импульсов $t_{\text{и}} \approx 400 \text{ нс}$, способный работать на частоте до $f=100 \text{ с}^{-1}$ с поперечным сечением ВФО $(100 \times 225) \text{ мм}^2$ или $(100 \times 850) \text{ мм}^2$ с геометрической прозрачностью опорной решетки 80% , перекрытой алюминиевой фольгой толщиной 50 мкм . Ресурс непрерывной работы генератора составлял не менее 8 часов , при превышении которого наблюдались нестабильности амплитуды импульсов выходного напряжения, связанные с окислением и эрозией электродов разрядников. В работе указано, что при работе на частоте $f=100 \text{ с}^{-1}$ и коэффициенте $\beta \approx 0,6$ полная энергия выведенного пучка может быть $2,6 \text{ Дж/имп}$ и $3,2 \text{ Дж/имп}$ при работе с окнами сечением $(100 \times 225) \text{ мм}^2$ и $(100 \times 850) \text{ мм}^2$, соответственно.

Также необходимо отметить работу [80], в которой, используя ускоритель электронов с эмиттером на основе ВЭЭ, в атмосферу удавалось вывести $\approx 70\%$ от мощности пучка в ускоряющем промежутке. В данной работе при ускоряющем напряжении $U_0=400$ кВ, токе пучка в ускоряющем промежутке $I_0=8$ кА и длительности импульса $t_{\text{и}}=25$ нс в атмосферу выводился пучок сечением $S_{\text{п}}=(1000 \times 100)$ мм² при частоте следования импульсов $f=100$ с⁻¹. Из данной работы известно, что для вывода пучка использовалась трубчатая опорная решетка, по которой циркулировала вода, с уложенной на решетку титановой фольгой. О геометрической прозрачности опорной решетки ВФО, толщине фольги, средней мощности пучка и времени непрерывной работы такого ускорителя в данной работе не сообщается.

В итоге то основное преимущество, которое отличает ускорители с взрывоэмиссионными катодами от ускорителей других типов, а именно способность достигать высоких плотностей тока пучка при сравнительно высокой его мощности и коротких длительностях импульсов одновременно, несколько затрудняет вывод этого пучка в атмосферу. Это связано не только с большой угловой расходимостью пучка в результате образования двойного слоя на границе эмитирующей плазмы, но и с действием собственного магнитного поля пучка и магнитных полей токов, протекающих по электродам вакуумного диода, а также с наличием коллекторной плазмы, существенно искажающих траекторию ускоряемых электронов [71, 81]. Значительные потери тока пучка связаны и с наличием фронтов импульсов ускоряющего напряжения. Кроме этого, нужно отметить относительно низкий ресурс работы катодов на основе ВЭЭ, что связано с большим количеством микрокапель материала катода, приводящих к его эрозии [68], а также сложность технических решений, позволяющих повышать равномерность распределения плотности тока по сечению такого пучка.

1.3. Ускорители электронов для создания ПБС с эмиттерами на основе ионно-электронной эмиссии.

Одним из способов получения мощных электронных пучков, выведенных в атмосферу через тонкую металлическую фольгу, является использование газонаполненных диодов с катодом на основе ионно-электронной эмиссии (ИЭЭ), в которых реализуется самостоятельный или несамостоятельный высоковольтный тлеющий разряд (ВТР). Давление рабочего газа в ускоряющих промежутках таких систем составляет $p=(0,1\div 10)$ Па. Импульсный сильноточный разряд между электродами с большой площадью поверхности позволяет получать выведенные в атмосферу ПБС с достаточно высокой плотностью тока ($j_n=(0,1\div 1)$ А/см²) и длительностью импульсов тока пучка $t_n=(1\div 100)$ мкс [82–84]. Основным недостатком электронных ускорителей на основе самостоятельного ВТР является сравнительно низкое ускоряющее напряжение, обычно не превышающее $U_0=150$ кВ, выше которого происходит электрический пробой ускоряющего промежутка, в том числе связанный с интенсивным газовыделением с электродов ускоряющего промежутка. В связи с этим возможность использования таких ускорителей ограничена. Простота конструкции является в этом случае явным преимуществом перед другими типами ускорителей, но низкая степень управляемости таких ускорителей и существенная неоднородность распределения плотности тока по сечению пучка относятся уже к его недостаткам. Значительные потери тока пучка в выводной фольге при работе на таких ускорителях обусловлены сравнительно низкой энергией генерируемого пучка электронов, что не позволяет достигать высокой средней мощности пучка по сравнению с другими типами ускорителей.

Для улучшения управляемости током пучка и равномерности плотности тока генерируемого электронного пучка по сечению используются

ускорители электронов с дополнительным эмиттером, например, плазменным, в которых анодная плазма генерируется с помощью вспомогательного разряда. Для создания вспомогательного разряда низкого давления, конечно, можно использовать эмиттер ионов с термокатодом, который, однако, не обеспечивает высокой плотности тока ионов [85, 86]. Кроме этого при увеличении поперечного размера пучка ≥ 100 см приходится увеличивать длину термокатада из вольфрамовых нитей с соответствующим увеличением напряжения накала. Это приводит к неоднородности концентрации ионов в плазменном источнике вдоль термокатада, а соответственно, и к неоднородности тока электронов в пучке. Использование для создания вспомогательного разряда полого катода [87, 88] хоть и позволяет повысить ток диода, но все равно требует сравнительно высоких давлений рабочего газа для генерации ионного пучка, в результате чего ускоряющее напряжение по-прежнему остается ограниченным на уровне не выше $U_0=(200\div 250)$ кВ.

На рисунке 1.10 представлена характерная конструкция такого ускорителя [82]. Высоковольтный вторично-эмиссионный катод 1 и анод 2 служат для формирования 2549 слаборасходящихся пучков электронов, образующих пучок общим сечением $S_{\text{п}}=(180\times 600)$ мм². Оси отверстий диаметром (3÷4,5) мм в аноде 2 совпадают с осями отверстий диаметром 6 мм в медной опорной решетке 3 с общей геометрической прозрачностью 67%. Каждое отверстие в аноде 2 совместно с поверхностью катода 1 образует собирающую линзу для ионов и рассеивающую линзу для электронов. Вывод пучка в атмосферу осуществляется через алюминий-магниевую фольгу толщиной 30 мкм. Ионы создаются с помощью вспомогательного ленточного пучка электронов сечением $S_{\text{п}}=(10\times 180)$ мм². Под действием провисающего в плазменный эмиттер электрического поля ионы извлекаются в ускоряющий промежуток и бомбардируют катод 1, выбивая вторичные электроны. В промежутке между катодом 1 и

многоапертурным анодом 2 электроны ускоряются и выводятся в атмосферу через выводную фольгу 5. Вспомогательный ленточный пучок генерируется с помощью двух дополнительных источников электронов на основе ВТР, работающих встречно. Каждый такой источник электронов состоит из алюминиевого катода 6 и анода 7. Регулировка тока пучка на данном ускорителе электронов осуществляется изменением тока разряда вспомогательных источников электронов.

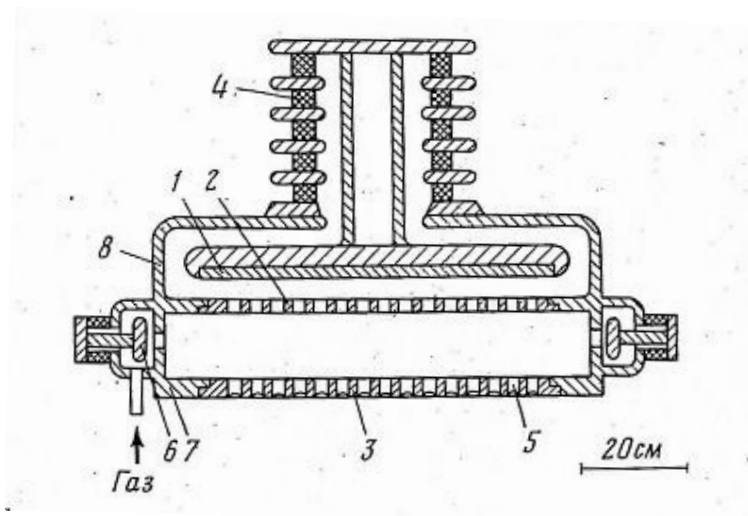


Рисунок 1.10 – Упрощенная конструкция ускорителя электронов на основе несамостоятельного ВТР [82]: 1 – катод; 2 – анод; 3 – опорная решетка; 4 – проходной изолятор; 5 – фольга; 6 – вспомогательный катод; 7 – вспомогательный анод; 8 – вакуумная камера

Из работы [89] известно, что при энергии электронов $E_0=150$ кэВ для алюминиевой фольги толщиной 30 мкм электронная прозрачность составляет $T_N \approx 0,84$. В данном случае при ускоряющем напряжении $U_0=150$ кВ коэффициент вывода электронного пучка составил $\beta \approx 55\%$, но авторы утверждают, что в данной системе возможен вывод электронов близкий к $\beta \approx 1$, но без учета потерь тока в выводной фольге, потери в которой неизбежны. К недостаткам все же необходимо отнести: 1) тепловую нагрузку на катод, который неизбежно нагревается под действием ионной

бомбардировки с выделением на нагрев мощности больше произведения ионного тока и приложенного ускоряющего напряжения, поскольку в нагреве катода также принимают участие нейтральные частицы, рожденные в процессе нейтрализации части ионов, эмитированных плазмой; 2) перегрев фольги, связанный с неспособностью ускорителя работать при более высоких ускоряющих напряжениях; 3) зависимость ионно-электронной оптической системы (ИЭОС) от параметров генерируемого пучка, поскольку при изменении любого из параметров плазмы, генерируемой вспомогательным разрядом, величина провисающего в эмиттер электрического поля также изменится, что приводит к разной степени фокусировки ионного потока. Такое изменение фокусировки в работе [89] наблюдалось при изменении диаметра отверстий в аноде 2.

Авторы работы [90] считают, что потери в опорной решетке обусловлены расходимостью пучка за плоскостью анода и в основном определяются длиной пространства дрейфа и толщиной опорной решетки ВФО, которые для наилучшего вывода пучка должны быть минимальны. Но толщина опорной решетки выбирается минимальной из соображений обеспечения ее механической прочности, а дрейфовое пространство не может быть меньше трех–пяти толщин слоя катодного падения вспомогательного разряда. Потери же электронного тока на аноде 2 зависят как от пространственного распределения тяжелых частиц, падающих на катод, так и от фокусировки электронных пучков, формирующихся между высоковольтными катодом и анодом электродной системы ускорителя.

В результате анализа полученных экспериментальных данных в [82] авторами работы [90] был создан ускоритель электронов с площадью выводного окна 350 см^2 , в котором использовалась ИЭОС щелевого типа. На опорную решетку с геометрической прозрачностью 70% укладывалась алюминиевая фольга толщиной 37 мкм. Щелевые анод и опорная решетка выполнены водоохлаждаемыми. С учетом использовавшегося в качестве

рабочего газа воздуха, катода, выполненного из нержавеющей стали и параметров выводной фольги при ускоряющем напряжении ~ 200 кВ максимальный расчетный коэффициент вывода пучка (в отсутствие потерь на аноде и опорной решетке ВФО) составил $\beta \approx 0,75$. В экспериментах поиск оптимальной геометрии ускоряющего промежутка и пространства дрейфа электронного пучка при ускоряющем напряжении $U_0=200$ кВ позволил получить $\beta=0,62$, что позволило достичь средней мощности пучка до $P_{\text{п}}=3,5$ кВт. На рисунке 1.11 представлены зависимости выведенного тока пучка $I_{\text{п}}$ и коэффициента вывода пучка β от общего тока в ускоряющем промежутке I_0 из которой видно, что максимальный коэффициент β возможен только при определенном токе в ускоряющем промежутке I_0 , который в свою очередь управляется током разряда $I_{\text{р}}$.

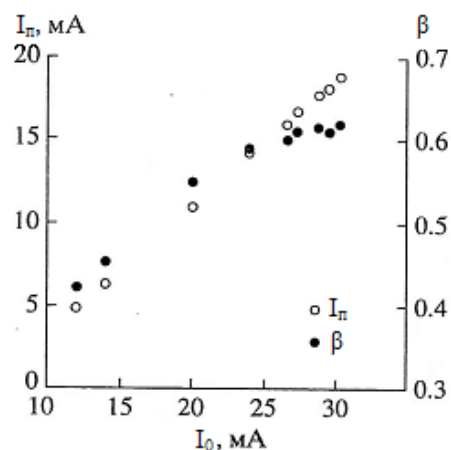


Рисунок 1.11 – Экспериментальная зависимость тока пучка $I_{\text{п}}$ выведенного в атмосферу и коэффициента вывода пучка β от общего тока в ускоряющем промежутке I_0 при ускоряющем напряжении $U_0=190$ кВ [90]

Применение непрерывного вспомогательного разряда, генерирующего анодную плазму, дает возможность использовать постоянное высокое напряжение (до 200 кВ), тем самым обеспечивая моноэнергетичность пучка, что не только позволяет снизить потери в выводной фольге, но и открывает новые технологические возможности для ускорителей такого типа. Высокий коэффициент вывода электронного пучка β является безусловным

достижением ускорителей такого типа, но высокие значения коэффициента β достигаются только при определенных конфигурации ИЭОС, параметрах вспомогательного разряда и ускоряющем напряжении, которые определяют оптимальное распределение ионного потока на катод. Это существенно усложняет регулировку параметров генерируемого пучка, сужая диапазон регулировки.

Несмотря на обозначенные недостатки ускорителей [82, 90], их преимущества позволяют использовать такой принцип генерации для создания нескольких модификаций ускорителей электронов в качестве устройств ионизации газовых лазеров с площадью сечения пучка $S_{\text{п}}=(450 \times 300) \text{ мм}^2$ с энергией электронов $E_0=180 \text{ кэВ}$ и средней мощностью пучка, выведенного в атмосферу до $P_{\text{п}}=2 \text{ кВт}$, а также для создания ускорителя электронов импульсно-периодического действия со средней мощностью пучка $P_{\text{п}}=6 \text{ кВт}$ и сечением пучка $S_{\text{п}}=(1800 \times 300) \text{ мм}^2$ [91].

Еще более высокой энергии электронного пучка (до $E_0=250 \text{ кэВ}$) удалось достичь в работах [83, 92, 93], где анодная плазма генерируется с использованием импульсного вспомогательного дугового разряда низкого давления, контрагированного сужением. Наличие сужения в такой разрядной системе приводит к перепаду давления между катодной и анодной областями вспомогательного разряда, что облегчает возбуждение и горение дуги с током $I_{\text{р}}=(1 \div 100 \text{ А})$ при длительности импульсов до $t=150 \text{ мкс}$ и позволяет поддерживать в анодной области и высоковольтном ускоряющем промежутке низкое давление $p=(10^{-2} \div 10^{-3} \text{ Па})$ [20]. К ускоряющему промежутку прикладывалось напряжение до $U_0=250 \text{ кВ}$. Пучок выводился в атмосферу через фольгу из алюминий–магниевого сплава толщиной 30 мкм , которая укладывалась на опорную решетку общей площадью $S_{\text{п}} \approx 200 \text{ см}^2$, перфорированную круглыми отверстиями 6 мм . Ускоритель работал в частотно-импульсном режиме с частотой следования импульсов до $f=300 \text{ с}^{-1}$ при длительности импульса тока пучка до $t_{\text{и}}=150 \text{ мкс}$ и его амплитуде до

$I_0=120$ А. При длительности импульса тока пучка $t_{и}=20$ мкс возможен режим работы при ускоряющем напряжении $U_0=250$ кВ и амплитуде тока в ускоряющем промежутке $I_0=30$ А, тогда как увеличение тока до $I_0=110$ А приводило к уменьшению максимального ускоряющего напряжения до $U_0=200$ кВ. Авторы показали, что это связано с тем, что в первом случае плазма находится в плоскости анода, а во втором расстояние между плазменной границей и катодом сокращается вдвое.

В [93] также показано, что коэффициент β сильно зависит от ионно-электронной оптики и даже при фиксированном ускоряющем напряжении $U_0=150$ кВ меняется в диапазоне $\beta=(0,3\div 0,7)$ в зависимости от диаметра отверстий в аноде, длины ускоряющего зазора, тока в ускоряющем промежутке и тока вспомогательного разряда. Но необходимо отметить, что хоть и в узком диапазоне параметров пучка, но коэффициент вывода пучка около $\beta\approx 0,7$ соответствует лучшим из известных в литературе значениям, а такие ускорители позволяют организовать вывод электронного пучка с относительно высокой средней мощностью. Главным же достижением ускорителей на основе ИЭЭ является слабая зависимость тока пучка, выведенного в атмосферу, от геометрической прозрачности опорной решетки ВФО, что позволяет организовать для ВФО качественное водяное охлаждение, чаще всего необходимое при работе на высокой средней мощности генерируемого электронного пучка.

1.4. Ускорители электронов для создания ПБС на основе плазменного эмиттера с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы.

Для генерации электронных пучков в импульсно-периодическом режиме в микросекундном диапазоне длительности импульсов, необходимых, например, для накачки лазеров на атомарных переходах инертных газов (например, неона и ксенона [11, 22, 94–97]) подходят ускорители электронов с сетчатыми плазменными эмиттерами на основе различных типов газовых и вакуумных разрядов. В таких ускорителях генерируется объемная плазма, граница которой стабилизируется мелкоструктурной металлической сеткой, что позволяет реализовать стабильную во времени электронную эмиссию. Извлечение электронов из плазменного эмиттера происходит через отверстия в эмиссионной сетке под действием прикладываемого ускоряющего напряжения между плазменным катодом и ВФО, являющимся в этом случае анодом. Положение границы плазмы зависит от ее параметров, размера ячейки сетки и величины прикладываемого ускоряющего напряжения. Размер ячейки сетки в каждом отдельном случае выбирается таким образом, что при извлечении электронов из эмиттера в ускоряющий промежуток наблюдается слабая зависимость основных параметров генерируемого пучка (ток и энергия пучка, длительность и частота следования импульсов) друг от друга, поскольку граница плазмы изменяет свое положение незначительно [19, 20, 98–101].

К главным достоинствам ускорителей электронов с плазменным катодом с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы можно отнести относительную простоту и механическую надежность конструкций, нечувствительность к загрязнениям и случайным напускам воздуха, высокую энергетическую эффективность, малое время включения близкое к времени формирования разряда, большой срок службы, отсутствие

микронеоднородностей плотности тока пучка по его сечению, широкий диапазон независимой регулировки основных параметров пучка и его моноэнергетичность, а также возможность изменения конфигурации пучка за счет изменения конфигурации сетки.

Электронная эмиссия с катода разрядного промежутка происходит в результате функционирования катодного пятна по поверхности катода, его бомбардировки ионами и квантами излучения атомов, а также благодаря усилению прикатодного электрического поля ионным слоем. Поскольку в газоразрядной плазме в системах с полым анодом большой площади тепловая скорость электронов значительно больше скорости ионов, это приводит к образованию у анода разрядной системы потенциального барьера для плазменных электронов, приводящего к так называемому отрицательному анодному падению ($[\varphi_{пл}-\varphi_a]>0$) [20, 98, 102]. При подаче ускоряющего напряжения потенциальный барьер в ячейках сетки снижается и одновременно повышается потенциал плазмы относительно стенок полого анода и сетки, что приводит к перераспределению разрядного тока и, таким образом, к увеличению эмиссионного тока. Эти процессы делают механизм эффективной электронной эмиссии из плазмы существенно отличным от механизма ионной эмиссии [98].

1.4.1. Ускорители электронов на основе плазменного эмиттера с инициированием дугового разряда низкого давления пробоем по поверхности диэлектрика.

Одним из способов зажигания дугового разряда при низких давлениях рабочего газа $p=(10^{-2}\div 10^{-1})$ Па в промежутках длиной порядка 100 мм является искусственное инициирование катодного пятна дополнительным электрическим пробоем по поверхности диэлектрика. Хотя длина свободного пробега электрона для реакции ионизации оказывается много больше длины

зазора, в промежутке зажигается разряд с сравнительно низким напряжением горения. В этом случае основную часть промежутка занимает столб плазмы со степенью ионизации, достигающей до 10%, и с низким падением напряжения на нем. При таком иницировании разряда на поверхности катода функционирует катодное пятно, а электроны ускоряются в двойном электрическом слое между границей образованного катодного факела и плазмой анодного столба до энергии, практически соответствующей напряжению горения разряда [103, 104].

Такой способ генерации плазмы является наиболее эффективным из-за снижения напряжения горения дугового разряда равного $U_p=(30\div 200)$ В (так называемая «открытая дуга»), существующего в отсутствие внешнего магнитного поля. Напряжение горения такого разряда зависит от геометрии электродного промежутка, рода рабочего газа, амплитуды тока разряда и др.. В таком разряде из-за наличия катодного пятна и плотной плазмы можно реализовать стабильный разрядный ток относительно большой величины, составляющей десятки–сотни ампер [105–109]. Стабилизация границы эмиссионной плазмы мелкоструктурной металлической сеткой в этом случае позволяет получать пучки электронов с длительностью импульса достигающей миллисекундного диапазона. При использовании такого способа генерации плазмы можно создавать большие плазменные объемы ($\geq 0,1$ м³) с большой эмиссионной поверхностью ($S_{\text{п}}=(10^2\div 10^3)$ см²), причем генерация этой плазмы возможна даже в отсутствие специального напуска газа. Однако при давлении $p\sim 10^{-3}$ Па коэффициент извлечения электронов из плазменного эмиттера имеет весьма низкое значение ($\alpha < 0,1$) и для создания большой эмитирующей поверхности требуется использовать совокупность большого числа синхронно работающих разрядных промежутков.

Из работ [110, 111] известно, что при иницировании разряда у катода образуется плазменный факел, который распространяется к полуму аноду со скоростью $V_{\text{п}}\approx(1\div 2)\cdot 10^6$ см/с, скорость которого увеличивается по мере

увеличения давления в разрядной системе. С расширяющейся границы факела происходит отбор электронов, которые ионизуют газ в пространстве между границей факела и полым анодом. Это приводит к накоплению в промежутке ионов и более быстрому росту тока на полый анод по сравнению с вакуумным случаем. В условиях эксперимента в установившемся режиме полый анод был заполнен плазмой с потенциалом относительно стенок полого анода $\varphi_p \approx (40 \div 50)$ В. При средних давлениях $p = (10^{-2} \div 10^{-1})$ Па процессы ионообразования происходят более интенсивно, и полное переключение разряда на полый анод происходит раньше, чем факел достигает полого анода.

При использовании такого плазменного эмиттера в ускорителе электронов [121] был получен и выведен в атмосферу электронный пучок сечением $S_n = (200 \times 500)$ мм² с энергией $E_0 = 200$ кэВ, током $I_n = 20$ А, длительностью $t_n = 100$ мкс и частоте следования импульсов $f = 25$ с⁻¹. Кроме этого было показано, что равномерность плотности тока по сечению пучка может быть существенно улучшена за счет суперпозиции токов разряда от двух катодов, установленных на противоположных торцах анодной полости. Поскольку данные работы являются пионерскими, коэффициенту β вывода пучка из ускоряющего промежутка в атмосферу не уделялось должного внимания.

Кроме этого в работе [112] показано, что для длинных вакуумных промежутков при малых амплитудах импульса тока поджига по сравнению с током разряда время коммутации сильно зависит от тока в цепи поджига, что связано с сильным торможением катодной плазмы. При сравнении тока поджига с током разряда эмиссионная способность плазмы определяется законом «степени 3/2», ограничивающим ток электронов из плазмы, а скорость коммутации стремится к начальной скорости распространения катодного факела, что приводит к уменьшению времени формирования разряда. При токе разряда $I_p \approx 100$ А и сравнимой с ним величине тока

поджига достигалась минимальная длительность фронта импульса тока разряда $t_{\phi} \approx 5$ мкс.

В работе [113] показана возможность работы ускорителя электронов с плазменным эмиттером, генерирующего ПБС, в пакетно-импульсном режиме с частотой следования импульсов до 10^5 с^{-1} путем сеточной модуляции тока разряда, создающего эмитирующую плазму. Схема такого ускорителя представлена на рисунке 1.12.

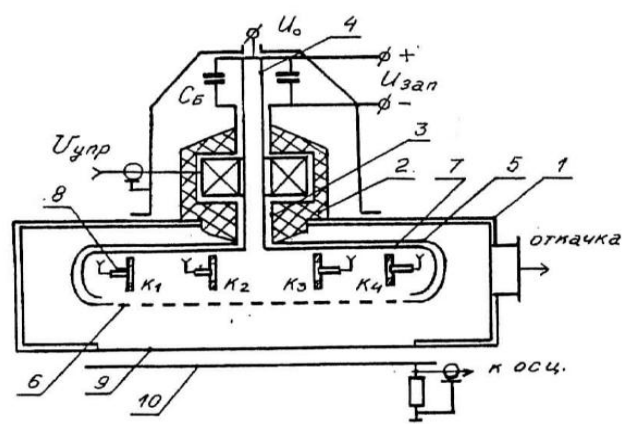


Рисунок 1.12 – Схема ускорителя электронов [113]: 1 – вакуумная камера; 2 – изолятор; 3, 4 – токовводы; 5 – плазменный эмиттер; 6 – эмиссионная сетка; 7 – полый анод; 8 – катодные узлы; 9 – ВФО; 10 – коллектор

В вакуумной камере 1 с помощью проходного изолятора 2 и токоввода 3 установлен цилиндрический эмиттер 5, имеющий на боковой поверхности эмиссионное окно размером $(30 \times 700) \text{ мм}^2$, затянутое мелкоструктурной сеткой 6 с геометрической прозрачностью 50%. На токовводе 4 закреплен полый анод 7 с окном, совмещенным с сеткой эмиттера. Формирование эмитирующей плазмы обеспечивается зажиганием дугового разряда низкого давления между четырьмя катодными узлами 8 и общим анодом 7. Дуговой разряд инициируется поджигающими электродами, конструкция которых аналогична [103]. Для предотвращения выхода электронов из плазмы разряда в ускоряющий промежуток в паузах

между управляющими импульсами на сетку 6 эмиттера относительно полого анода 7 подается отрицательное запирающее напряжение до 400 В. Постоянное ускоряющее напряжение $U_0=(120\div 180)$ кВ прикладывается между сеткой 6 и выводным окном 9 с геометрической прозрачностью 70% и перекрытым титановой фольгой, толщиной 12 мкм. Длительность тока разряда составляла $t=200$ мкс амплитудой $I_p=(300\div 1000)$ А. Ток пучка за фольгой регистрировался коллектором 10.

В режиме без запирающего напряжения и модуляции тока при ускоряющем напряжении $U_0=160$ кВ и разрядном токе $I_p=400$ А за фольгу выводился ток пучка с током $I_n=100$ А и длительностью импульса $t_n=200$ мкс, соответствующей длительности импульса тока разряда. Поскольку в данной работе использовалась одна сетка, то можно предположить, что коэффициент извлечения α был близок к $\alpha\approx 0,8\div 1$, а коэффициент β вывода тока в данном случае не превышал значения $\beta=0,35$. Зная геометрическую прозрачность опорной решетки ВФО, и что прозрачность такой фольги для электронов с энергией $E_0=160$ кэВ составляет около $T_N\approx 0,7$ [38, 89], то по формуле (1.2) около 15% потерь тока пучка приходится на электроны, которые попали в канал опорной решетки, но не прошли его из-за влияния угловой расходимости пучка. Высокая угловая расходимость подтверждается также тем, что ток пучка регистрируется вплоть до запирающего напряжения, равного 250 В. Поскольку максимальная величина запирающего напряжения определяется как размером ячейки эмиссионной сетки, так и энергией электронов, замкнутых в полой аноде, то эта величина говорит о том, что температура электронов имеет энергию, составляющую десятки электронвольт.

Измерения параметров плазмы, генерируемой в разрядной системе с иницированием разряда пробоем по поверхности диэлектрика, описаны в работе [105], из которой известно, что потенциал плазмы относительно стенок полого анода имеет положительный потенциал в диапазоне

$\varphi_p=(20\div 50)$ В, который увеличивается по мере увеличения давления рабочего газа в диапазоне $p=(1\div 5)\cdot 10^{-2}$ Па. Плазменные электроны в рабочем диапазоне давлений имеют температуру вплоть до $T_e\approx 30$ эВ, распределение концентрации плазмы по оси разряда улучшается по мере увеличения давления, а ее абсолютные значения находятся в диапазоне $n=(5\div 8)\cdot 10^{10}$ см⁻³.

Исследование энергетического спектра электронов в плазме дугового разряда [105] показало, что помимо термализованных электронов, имеющих температуру около $T_e\approx(20\div 30)$ эВ, в плазме есть более высокоэнергетичные электроны, прошедшие разрядный промежуток без взаимодействия с рабочим газом, энергия которых достигает ≥ 120 эВ и примерно соответствует напряжению горения разряда. Но при увеличении давления в разрядной камере доля высокоэнергетичных электронов в спектре уменьшается, что, вероятно, связано с рассеянием электронов на нейтралах, а уменьшение самой энергии происходит за счет снижения напряжения горения разряда.

Сравнительно высокая тепловая скорость электронов и наличие быстрых электронов должны приводить к высокой угловой расходимости пучка и низким значениям коэффициента вывода тока пучка из ускоряющего промежутка в атмосферу, что связано с потерями тока пучка в каналах опорной решетки, что и наблюдалось в работе [113].

Данные о сравнительно низком коэффициенте β вывода пучка из ускоряющего промежутка в атмосферу для ускорителя электронов с плазменным эмиттером на основе дуги низкого давления с инициированием разряда пробоем по поверхности диэлектрика подтверждаются также в работе [24]. Схема ускорителя подобна [113], но отличается площадью эмиссии, равной $S_{\text{п}}=(550\times 30)$ мм², конструкцией ВФО и схемами электропитания плазменного эмиттера и ускоряющего промежутка, которые позволяли работать при токе разряда $I_p=(100\div 900)$ А и импульсном ускоряющем напряжении до $U_0=300$ кВ. ВФО имеет щелевую конфигурацию с геометрической прозрачностью около 70% и перекрыто титановой фольгой

толщиной 25 мкм. Расстояние между эмиссионной сеткой и ВФО, определяющее длину его высоковольтного ускоряющего промежутка, составляло 120 мм. Потери в фольге на переднем и заднем фронте также присущи данной системе. При ускоряющем напряжении $U_0=200$ кВ коэффициент вывода тока пучка из ускоряющего промежутка в атмосферу составлял $\beta \approx 35\%$. При указанной геометрической прозрачности опорной решетки ВФО и прозрачности фольги для электронов с энергией, соответствующей приложенному ускоряющему напряжению, $T_N \approx 0,8$ [38, 89] с учетом формулы (1.2) можно сказать, что потери тока пучка, обусловленные его угловой расходимостью, составляют около $\approx 20\%$. При энергии $E_0=300$ кэВ $T_N \approx 0,96$, а потери, обусловленные угловой расходимостью пучка, составляют около $\approx 10\%$. Такое уменьшение потерь тока пучка при увеличении ускоряющего напряжения можно объяснить неизменной начальной скоростью влета электронов в ускоряющий промежуток и снижением его угловой расходимости. Измерения на коллектор показали, что пучок при его ускорении расширяется и на коллекторе фиксируется отпечаток площадью (550×40) мм² с отклонением плотности тока пучка от среднего значения $\pm 10\%$. Авторы указывают, что такое расширение обусловлено углом расхождения, равным $\varphi \approx 2^\circ$.

Необходимо отметить, что при работе на ускорителях с плазменными эмиттерами на основе дуги низкого давления, которая инициируется пробоем по поверхности диэлектрика, примерно одинаковые значения коэффициента β были получены как на ускорителе с радиально расходящимся [13], так и радиально сходящимся электронными пучками [11, 114].

Ускоритель с радиально расходящимся электронным пучком [13] состоял из двух цилиндрических камер, в одной из которых дуговым разрядом низкого давления генерировалась плазма, а второй являлось ВФО, диаметром 500 мм и высотой 1700 мм. ВФО с геометрической

прозрачностью $\approx 70\%$ перфорировано круглыми отверстиями диаметром 20 мм и перекрыто алюминий-магниевой фольгой толщиной 50 мкм. При импульсном ускоряющем напряжении $U_0=300$ кВ, токе в ускоряющем промежутке $I_0=30$ А в атмосферу удавалось вывести $I_{\text{п}}=15$ А с длительностью импульса тока пучка $t_{\text{и}}=100$ мкс. При такой энергии пучка прозрачность фольги для электронов составляет $T_{\text{N}}\approx 0.98$ [38, 89], а следовательно, учитывая формулу (1.2), потери тока пучка, обусловленные угловой расходимостью пучка, составляют около 16%.

Ускоритель с радиально сходящимся электронным пучком [11, 114] разрабатывался для повышения эффективности возбуждения пеннинговской смеси в лазере, генерирующем излучение в видимом диапазоне длин волн. Данный ускоритель состоит из цилиндрической вакуумной камеры, внутри которой коаксиально расположены тороидальный цилиндрический эмиттер, являющийся полым анодом для разряда, с внутренним диаметром 500 мм и опорная решетка ВФО диаметром 300 мм. ВФО одновременно является газовой кюветой лазера. В данном случае использовались два вида опорных решеток: с круглыми отверстиями диаметром 20 мм при общей ее геометрической прозрачности $\approx 60\%$ и с щелевыми отверстиями шириной 20 мм при геометрической прозрачности опорной решетки $\approx 80\%$, которые в обоих случаях перекрывались фольгой толщиной 40 мкм из алюминий-бериллиевого сплава. Плазма в плазменном эмиттере создавалась шестью катодными узлами, расположенными на торцах полого анода по три с каждой стороны. Внутренний цилиндр плазменного эмиттера был перекрыт мелкоструктурной сеткой с размером ячеек (1×1) мм, через которую осуществляется эмиссия электронов в ускоряющий промежуток. В данной работе в импульсно-периодическом режиме (ускоряющее напряжение до $U_0=200$ кВ, ток в ускоряющем промежутке $I_0=(0,1\div 0,5)$ А, длительность и частота следования импульсов $t_{\text{и}}=(10\div 100)$ мкс и $f=10$ с $^{-1}$, соответственно) в атмосфере был получен электронный пучок с коэффициентом вывода

$\beta \approx (0,5 \div 0,6)$. При геометрической прозрачности опорной решетки 80%, перфорированной прямоугольными отверстиями, и с учетом того, что при энергии электронов $E_0 = 200$ кэВ прозрачность фольги для электронов составляет $T_N \approx 0,92$ [38, 89], по формуле (1.2) можно рассчитать потери тока пучка, обусловленные его угловой расходимостью, которые составляют около (12÷15)%.

Проведенный обзор позволяет утверждать, что использованные для генерации электронных ПБС ускорители с плазменными эмиттерами на основе дуги низкого давления, инициируемой дополнительным разрядом по поверхности диэлектрика, также обладают сравнительно низким коэффициентом β вывода тока пучка из ускоряющего промежутка в атмосферу, что можно объяснить значительной угловой расходимостью пучка. Широкий энергетический спектр электронов, образованных в полом аноде со средней энергией около $T_e \approx 30$ эВ и наличие быстрых электронов с энергией соответствующей напряжению горения разряда, ускоренных в двойном слое в прикатодной области и прошедших разрядный промежуток без взаимодействия с нейтралами рабочего газа, подтверждают наличие сравнительно высокой начальной скорости электронов при их влете в ускоряющий промежуток. Уменьшение энергии быстрых электронов возможно путем увеличения рабочего давления, которое, однако, ограничено электрической прочностью высоковольтного ускоряющего зазора.

1.4.2. Ускорители электронов на основе эмиттера с контрагированным дуговым разрядом низкого давления.

Предельное ускоряющее напряжение можно повысить, применяя более эффективные способы генерации плазмы необходимой плотности при более низком давлении или с перепадом давления между разрядной камерой и ускоряющим промежутком [33, 98, 115, 121]. Оба этих способа повышения

электрической прочности используются в электронном источнике, схема которого представлена на рисунке 1.13. В электронных источниках этого типа высокий вакуум в промежутке между эмиссионной сеткой 6 и ускоряющим электродом 7 обеспечивается в результате последовательного понижения давления в промежутках между электродами 3, 4, 6 разрядной камеры и расширения газа в анодной полости 5. При подаче на электроды 7, 3, 4 импульсного напряжения с амплитудой (1÷3) кВ между катодами 1 и анодом 3 возникает разряд Пеннинга, переходящий в дугу с катодным пятном, которая вследствие принудительного ограничения тока промежуточного анода 3 перебрасывается через отверстие в нем на главный анод 4. В результате возникает дуговой контрагированный разряд с холодным катодом в магнитном поле (с индукцией (5÷10) мТл) и расширенной анодной частью.

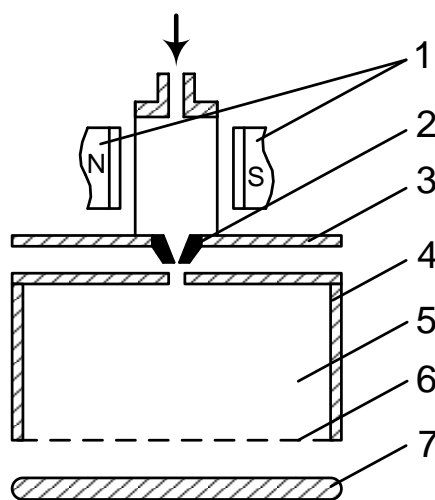


Рисунок 1.13 – Схема электронного источника на основе низковольтного дугового разряда [98, 121]: 1 – катоды; 2 – ферромагнитная вставка; 3 – промежуточный анод; 4 – полый анод; 5 – анодная полость; 6 – эмиссионная сетка; 7 – коллектор

С катодной стороны контрагирующего канала возникает плазменный сгусток, окруженный двойным электрическим слоем, ускоряющим и

фокусирующим электроны. Напряжение на слое обычно составляет (50÷80) В, что обеспечивает высокую ионизирующую способность ускоренных в этом слое электронов. Плотность плазмы в сгустке и в промежутке между анодами достигает $(10^{14} \div 10^{15}) \text{ см}^{-3}$, а плотность тока в контрагирующем канале $(10^3 \div 10^4) \text{ А/см}^2$.

Как и в случае открытой дуги (Раздел 1.4.2) в прианодной плазме электроны состоят из двух групп, одна из которых образована прошедшими двойной слой быстрыми электронами, не испытывавшими неупругих столкновений с атомами, и медленными электронами, появившимися в результате ионизации газа. Эти же две группы имеются в потоке заряженных частиц, проникающих в анодную полость через отверстие в главном аноде. О присутствии в анодной полости быстрых электронов свидетельствуют энергетические спектры электронов, измеренные с помощью четырехсеточного энергоанализатора [116]. Когда потенциал эмиссионной сетки 6 и полого анода 4 равны, потенциал плазмы составляет около $\varphi_p \approx 40 \text{ В}$. При появлении положительного потенциала на эмиссионной сетке и снижения, тем самым, потенциального барьера для плазменных электронов, потенциал плазмы начинает увеличиваться, и при напряжении на сетке 60 В потенциал плазмы возрастает до величины $\varphi_p \approx 55 \text{ В}$. Высокий положительный потенциал наблюдается и в других системах, в которых плазма синтезируется электронным потоком в полости с большой площадью анода [117]. Измерения электронной температуры по оси полого анода с использованием цилиндрического зонда Ленгмюра показали, что температура электронов изменяется в диапазоне $T_e \approx (5 \div 20) \text{ эВ}$.

Кроме того, через отверстие в аноде 3 (рис. 1.13) в анодную полость выходит газ, напускаемый в разрядную камеру. Таким образом, оказываются совмещенными в пространстве интенсивный поток электронов (около 10^3 А/см^2 в области отверстия в главном аноде) и поток нейтралов. Потенциальный барьер у стенок полого анода препятствует выходу из него

плазменных электронов, которые оказываются запертыми внутри полого анода. Эти электроны многократно отражаются от стенок полого анода, увеличивая ионизацию остаточного и рабочего газа. В результате их взаимодействия в анодной полости синтезируется достаточно однородная низкотемпературная плазма [98]. В отсутствие ускоряющего напряжения непрерывность тока разряда обеспечивается попаданием на стенки полости и ускоряющий электрод быстрых электронов, способных преодолеть пристеночный потенциальный барьер. Появление электронов в вакууме за сеткой и ток на ускоряющий электрод рассматриваются как результат электронной эмиссии из плазмы анодной полости через ячейки эмиссионной сетки.

Схему построения электронного источника на основе дугового контрагированного разряда с расширенной анодной частью использовали при создании ускорителя электронов [98], обеспечивающего ПБС площадью $S_{\text{п}}=(800 \times 350) \text{ мм}^2$, в котором использованы четыре идентичных разрядных камеры, работающие на одну общую анодную полость, в которых импульсный разряд возбуждается синхронно. Для уменьшения разброса моментов зажигания и времени формирования импульсных дуговых разрядов в отдельных камерах в них поддерживался слаботочный разряд Пеннинга с током до 50 мкА.

При импульсном ускоряющем напряжении $U_0=(250 \div 270) \text{ кВ}$ и общем разрядном токе $I_p=(30 \div 45) \text{ А}$ генерировался пучок с током до $I_{\text{п}}=(10 \div 15) \text{ А}$ длительностью 100 мкс с неравномерностью плотности тока по сечению пучка около 20% и глубиной высокочастотной модуляции 6%. Основные потери электронного тока пучка авторы связывают с применением импульсного высокого напряжения для ускорения электронов, справедливо считая, что выбором момента зажигания дугового разряда и длительности его горения относительно времени приложения ускоряющего напряжения можно значительно уменьшить количество низкоэнергетичных электронов,

ускоряемых на фронте и спаде высоковольтного импульса, что в итоге позволило существенно уменьшить потери электронов при выводе их через фольгу, снижая ее нагрев. Крупный размер ячейки эмиссионной сетки и наличие высокочастотных колебаний на импульсе тока разряда позволяет сделать предположение о близком к единице значении коэффициента α извлечения электронов [98]. В связи с этим предположением и, зная геометрическую прозрачность опорной решетки, можно определить коэффициент β вывода тока из ускоряющего промежутка в атмосферу, который в данном случае составлял $\beta \approx 0,3$. Данных о конструкции используемого ВФО и типа применяемой фольги в работе [98] нет, но сравнительно высокая энергия пучка позволяет предположить, что основные потери тока приходятся на конструкцию опорной решетки, в которой часть потерь обусловлена ее конечной геометрической прозрачностью, а другая часть обусловлена угловой расходимостью пучка, в результате которой ускоренные электроны не проходят канал в опорной решетке, а оседают на его стенках.

Кроме этого известно, что протекание значительного тока в контрагированной дуге во многих случаях сопровождается обрывом, обусловленным электронной откачкой газа из канала контрагирования и уходом ионов в катодную область разряда [102]. Время горения разряда до обрыва зависит от давления в канале контрагирования, поэтому на условия горения разряда влияет количество газа, сорбированного электродами за время пауз между импульсами и выделяющегося во время разряда под действием бомбардировки электродов заряженными частицами [118]. Поступая в разряд, десорбированный газ способствует поддержанию этого разряда. При этом поток газа, обусловленный десорбцией, может быть даже больше потока, определяемого напуском. Это важно при работе ускорителей в частотном режиме, поскольку с увеличением частоты длительность паузы между импульсами уменьшается, тем самым уменьшается количество газа,

сорбированного за это время, что соответственно ведет к уменьшению вклада, определяемого потоком десорбированных атомов, что приводит к сокращению длительности импульса тока разряда. В связи с этим приходится увеличивать напуск рабочего газа, что неизбежно приводит к ухудшению электрической прочности высоковольтного ускоряющего промежутка, что и наблюдалось в работе [98]. При увеличении тока разряда длительность импульса также уменьшается, что связано с усилением электронной откачки десорбированного и напускаемого газа, а также с увеличением скорости десорбции. Последний фактор вызывает повышение перепада давления в канале контрагирования в начале импульса и уменьшение времени откачки десорбированного газа.

Измерения интенсивности спектральных линий возбужденных атомов и ионов в канале контрагирования [118] показали, что в спектре излучения присутствуют как линии напускаемого газа, так и материала электродов. Измерения по отношению ионных линий аргона показали, что температура электронов в течение импульса возрастает от $(3\div 5)$ эВ до $(14\div 20)$ эВ. Рассчитанное при $T_e=15$ эВ относительное содержание атомов материала магниевого катода составило 7%, а материала главного анода, выполненного из железа, 3%. Это указывает на несущественную роль процессов эрозии электродов в динамике газовых условий разряда, но подтверждает факт наличия сравнительно высокой скорости влета электронов в ускоряющий промежуток.

Причем, в работах [102, 119] показано, что в результате электронной откачки нейтралов из области контрагирования происходит увеличение напряжения на двойном слое, образующимся у входа в канал контрагирования со стороны катодной области. Напряжение на двойном слое определяет энергию электронов, которые производят ионизацию и возбуждение нейтральных атомов рабочего газа. В [118] выявлено, что напряжение на двойном слое увеличивается к концу каждого импульса тока

разряда, что связано с откачкой десорбированных атомов. Напряжение на двойном слое также растет с уменьшением расхода газа и увеличением частоты следования импульсов тока разряда. Чтобы при переходе в частотный режим работы ускорителя свести к минимуму изменения параметров разрядного тока и генерируемой им плазмы, целесообразно электроды разрядной камеры изготавливать из материалов с хорошей сорбционной способностью и использовать хорошо сорбируемый рабочий газ с большим массовым числом.

Расширить диапазон тока разряда возможно путем перехода дугового разряда низкого давления из контрагированного в каскадный режим горения [25, 120]. В этом случае ток разряда горит без характерных для контрагированной дуги обрывов тока, при котором дуга замыкается между катодом и анодом через расположенный между ними металлический электрод с образованием на этом электроде катодного пятна. Вероятность перехода дуги в каскадный режим горения возрастает с увеличением тока дуги, предшествующего обрыву, причем при достижении определенного тока при фиксированном расходе газа такой переход происходит в течение каждого импульса с локализацией катодного пятна вблизи канала контрагирования. Другим фактором, способствующим переходу дуги в каскадный режим горения, является значительное перенапряжение, возникающее на промежутке в момент обрыва тока из-за наличия индуктивности в схеме питания. В каскадном режиме разряд можно рассматривать как две последовательно горящие дуги и общее напряжение горения, которое в условиях эксперимента составляло $U_p=(120\div 160)$ В, является суммой напряжений на участках катод–промежуточный электрод и промежуточный электрод–анод. Измерения показали, что большая часть напряжения (80÷100) В прикладывается между катодом и промежуточным электродом. Разница в напряжениях горения дуги на отдельных участках связана с возникновением на промежуточном электроде анодного пятна,

существующего, как известно [117], при положительном анодном падении, величина которого может достигать нескольких десятков вольт. При расходе рабочего газа $10 \text{ мПа} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ наибольший стабильный ток контрагированного дугового разряда с длительностью импульса $t=30 \text{ мкс}$ в условиях эксперимента не превышал $I_p=100 \text{ А}$. В тех же условиях в каскадном режиме горения разряда было реализовано горение разряда с током до 1 кА , причем величина тока ограничивалась мощностью источника питания.

Использование каскадного режима горения дуги на ускорителе электронов с плазменным эмиттером можно рассмотреть на примере работы [121]. В отличие от работы [98], где извлечение электронов осуществляется со плазменной поверхности вдоль оси разрядных камер, в данной работе образование во всем объеме анодной полости относительно однородной плазмы осуществляется, используя два катодных узла, оси которых почти перпендикулярны направлению извлечения электронов (рис. 1.14) [121, 122]. Катодные узлы 1 с дуговым контрагированным разрядом установлены на торцах анодной полости 2, выполненной в виде прямоугольного параллелепипеда. Полость с помощью двух проходных изоляторов 5 крепится к вакуумной камере 6. На одной из боковых сторон полости имеется прямоугольное окно размером $(600 \times 150) \text{ мм}^2$, затянутое эмиссионной сеткой 3 с размером ячейки $(0,4 \times 0,4) \text{ мм}$. Параллельность потока электронов обеспечивается прикатодным электродом 4 высотой 30 мм . Электроны выводятся в атмосферу через фольгу 7, наложенную на медную опорную решетку 8, охлаждаемую водой.

Особенностью схемы электропитания ускорителя является использование постоянного ускоряющего напряжения при импульсном горении разряда. Благодаря этому полностью исключается появление низкоэнергетических электронов, возникающих при импульсном ускоряющем напряжении на фронте и спаде этого импульса. Спад ускоряющего напряжения за время импульса не превышал 5% .

Авторы отмечают существенное повышение электрической прочности ускоряющего промежутка при поперечном извлечении по сравнению с продольным. Ими установлено, что распределение плотности тока эмиссии зависит от угла φ наклона осей разрядных камер относительно оси полости. При $\varphi=8^\circ$ неравномерность распределения плотности тока по сечению пучка не превышает $\pm 10\%$, однако одновременно происходит некоторое увеличение сечения пучка.

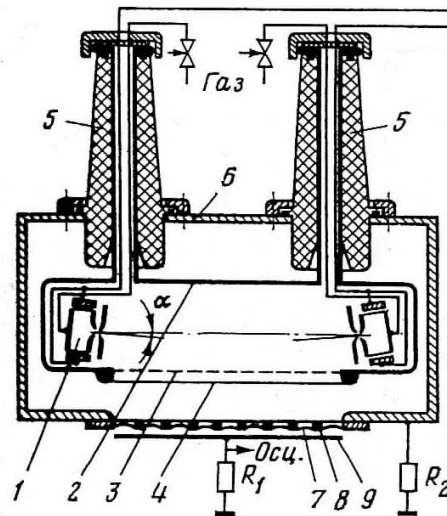


Рисунок 1.14 – Упрощенная конструкция и схема электропитания электронного источника [121]: 1 – катодный узел; 2 – полый анод; 3 – эмиссионная сетка; 4 – электрод-формирователь; 5 – изоляторы; 6 – вакуумная камера; 7 – фольга; 8 – опорная решетка; 9 – коллектор

При ускоряющем напряжении $U_0=250$ кВ и длительности импульсов тока разряда $t=100$ мкс, повторяющихся с частотой $f=20$ с⁻¹, ускоритель стабильно работал с плотностью тока перед фольгой $j_0=12$ мА/см². В случае длительности импульсов $t=30$ мкс плотность тока могла быть повышена до $j_0=35$ мА/см². Ток ПБС в ускоряющем промежутке при этом составлял около $I_0=30$ А. При геометрической прозрачности опорной решетки ВФО равной 88% полученное значение $\beta=0,65$ удовлетворительно согласуется с расчетным коэффициентом прозрачности фольги по числу частиц $T_N=0,77$,

полученным в работах [38, 89]. Подставляя полученные значения в формулу (1.2), можно получить, что потери тока пучка, приходящиеся на угловую расходимость составляют в данном случае единицы процентов, что можно объяснить высокой геометрической прозрачностью опорной решетки. Но недостатком такой системы является то, что при такой высокой геометрической прозрачности опорной решетки практически невозможно организовать ее принудительное водяное охлаждение [123, 124], а соответственно отсутствует возможность работы ускорителя на высокой средней мощности пучка длительное время, поскольку это приведет к перегреву опорной решетки, разгерметизации вакуумных уплотнений и, как следствие, к аварии.

Кроме этого, если в ускорителях электронов с плазменными эмиттерами, в которых граница катодной плазмы ограничена мелкоструктурной металлической сеткой, достичь на этой сетке локальной концентрации большой плотности заряда (высокоэнергетическая ионная бомбардировка из ускоряющего промежутка, возникновение анодных пятен в плазменном эмиттере, зарядка диэлектрических включений и др.), это приведет к возникновению на эмиссионном электроде катодного пятна с неограниченной эмиссионной способностью и электрическому пробое ускоряющего промежутка. В результате таких пробоев ограничивалась длительность непрерывной работы ускорителя из-за выхода выводной фольги из строя. Ток электрического пробоя может замкнуться как на опорную решетку ВФО, что определяется его толщиной и конфигурацией отверстий в опорной решетке, так и на выводную фольгу. А поскольку геометрическая прозрачность опорной решетки очень велика ($\approx 90\%$), то вероятность того, что ток пробоя замкнется на фольгу достаточно высока, что и наблюдалось в экспериментах работы [121]. Это подтверждается работой [9], где отмечается, что при использовании щелевых структур опорной решетки ВФО вследствие ухудшения однородности электрического

поля на аноде, которым является ВФО, также наблюдаются электрические пробои на выводную фольгу, что приводило к аварийным ситуациям и ограничивало область применения таких структур ВФО.

В итоге ускорители электронов с плазменным эмиттером на основе контрагированного разряда с расширенной анодной частью также обладают сравнительно низким коэффициентом β вывода тока пучка из вакуума в атмосферу, в связи с широким энергетическим спектром электронов плазмы, генерируемой таким разрядом. Угловая расходимость пучка, как и в ускорителях на основе других типов катодов, является фактором, приводящим к значительным потерям тока пучка в каналах опорной решетки ВФО. Нужно отметить, что ресурс работы катодного узла на основе контрагированной дуги низкого давления существенно выше, чем при инициировании катодного пятна по поверхности диэлектрика (см. главу 1.4.1), что вызвано большей массой применяемого катода и способом инициирования катодного пятна путем электрического пробоя в газе, непрерывно напускаемым в полость плазменного эмиттера. Кроме этого, конструкция такого катодного узла исключает наличие микрокапель материала катода на электродах разрядной системы, что положительно отражается на электрической прочности высоковольтного ускоряющего промежутка.

Выводы и постановка задач исследований

Проведенный обзор литературы показывает, что традиционные ускорители на основе термокатодов обладают весьма низкой энергетической эффективностью, т.к. энергетические затраты на нагрев катода зачастую сравнимы с мощностью пучка, а также существенно ограничивают плотность эмиссионного тока из-за того, что основная доля вкладываемой энергии уходит на излучение. Кроме этого такие ускорители электронов в режиме

относительно больших плотностей тока обладают очень низким ресурсом работы катода не превышающим нескольких десятков часов вследствие его эрозии. Термокатоды неспособны работать на малых длительностях импульса вследствие инерционности нагрева, что приводит к введению дополнительных электродов, позволяющих осуществлять регулировку тока пучка путем подачи на эти электроды дополнительных напряжений смещения. Введение дополнительных электродов позволяет увеличить коэффициент извлечения электронов в ускоряющий промежуток, тем самым увеличивая ток I_0 , но приводит к сообщению извлекаемым электронам дополнительной энергии, приводящей к увеличению поперечной составляющей скорости влета в ускоряющий промежуток, что приводит к дополнительным потерям тока пучка в каналах опорной решетки ВФО. Максимальный достигнутый коэффициент вывода β на сегодняшний день для ускорителей электронов с термокатодом не превышает $\beta \approx 0,6$. Важным моментом при выборе ВФО является определение конструкции и геометрии опорной решетки ВФО. Во-первых, для отвода тепла от ВФО, вызванного потерями тока пучка на ребрах опорной решетки, последнюю желательно изготавливать с принудительным охлаждением из материала с высоким коэффициентом теплопроводности, что также позволит ей выступать в роли радиатора для выводной фольги, и может существенно увеличивать срок службы этой фольги. Во-вторых, проведенный анализ литературы показывает, что при использовании опорных решеток перфорированных круглыми отверстиями, в отличие от случаев использования опорных решеток щелевого типа, электрические пробои высоковольтного ускоряющего промежутка на выводную фольгу практически не наблюдались. Это, несмотря на низкую геометрическую прозрачность «дырочных» опорных решеток, является их явным преимуществом перед опорными решетками щелевого типа.

Ускорители на основе ВЭЭ обладают бóльшим ресурсом работы, способностью достигать высоких плотностей тока пучка при сравнительно низкой однородности распределения плотности тока по сечению пучка и неспособностью или сложностью реализации длительности импульса, превышающей десятки мкс. Кроме этого, такие источники электронов отличаются изменением параметров генерируемого пучка при испытаниях на ресурс. Проблемой является также и то, что по ходу работы может изменяться распределение плотности тока пучка, что связано с разбросом срабатывания каждого отдельного острия в многоострийных катодах, поскольку достичь стабильной величины напряженности поля, необходимой для инициирования ВЭЭ, на каждом отдельном острие весьма сложно. Управление плотностями тока, превышающими десятки A/cm^2 , также является достаточно острой проблемой, поскольку при таких плотностях тока необходимо учитывать влияние на траекторию генерируемого пучка его собственного магнитного поля, а также расположение обратных тоководов, создающих магнитное поле при протекании по ним тока. Использование катода, имеющего дискретную систему, повторяющую геометрию опорной решетки ВФО, позволяет исключить потери тока пучка на ребрах опорной решетки и организовать работу таких ускорителей на высокой средней мощности пучка, выведенного в атмосферу.

Ускорители электронов на основе ИЭЭ позволяют получать относительно высокую среднюю мощность пучка, выведенного в атмосферу, используя опорную решетку ВФО дырочного или щелевого типов. При настройке и оптимизации геометрии ускоряющего промежутка и параметров разрядной системы был достигнут коэффициент вывода $\beta \approx 0,75$. Это обеспечивает работу на высокой средней мощности пучка, выведенного в атмосферу, а поскольку потери тока на ребрах опорной решетки минимальны, можно использовать опорную решетку, охлаждаемую водой, в качестве радиатора для выводной фольги, что приводит к увеличению

ресурса работы последней. Основным недостатком в данном случае является то, что высокий коэффициент вывода β получается только при определенной ЭОС практически в одном режиме работы. Так, например, при изменении ускоряющего напряжения, тока вспомогательного разряда или геометрии ускоряющего промежутка происходит расфокусировка ионного пучка, бомбардирующего катод, что неизбежно приводит к потерям тока электронного пучка на ребрах опорной решетки ВФО и, как следствие, к значительному уменьшению коэффициента β .

Отдельное место занимают ускорители электронов с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы, что позволяет обеспечивать широкий диапазон перестройки параметров генерируемого пучка, поскольку при изменении параметров ЭОС граница плазмы изменяет свое положение незначительно. Это позволяет получать одинаковый коэффициент вывода β при фиксированном ускоряющем напряжении. Использование различных форм горения разряда позволяет конструировать ускорители, обеспечивающие токи пучка от миллиампер до единиц килоампер в двухэлектродной разрядной системе. Использование дополнительных электродов нежелательно опять же с точки зрения увеличения начальной энергии электронов, влетающих в ускоряющий промежуток, во избежание потерь тока пучка на ребрах опорной решетки ВФО. Использование для генерации эмиссионной плазмы дуговой формы горения разряда является перспективным в связи с минимальным напряжением горением разряда и максимальной энергетической эффективностью генерации эмиссионной плазмы. При иницировании катодного пятна электрическим пробоем в газе в скрещенных полях катодные узлы имеют высокий ресурс работы, в основном определяемый износом достаточно массивных катодов. Обычно такие катодные узлы работают в условиях контрагирования (например, ячейка Пеннинга), когда катодное пятно «спрятано» от прямой видимости полого анода, что позволяет уменьшить количество микрокапель материала

катода на эмиссионной сетке и в ускоряющем промежутке, негативно отражающихся на электрической прочности высоковольтного ускоряющего промежутка. Недостатком же таких катодных узлов является ограничение тока разряда либо по длительности, либо по амплитуде, что связано с условиями контрагирования и что, в конечном итоге, приводит к обрыву тока разряда либо к появлению так называемой каскадной дуги с увеличенным напряжением горения.

В итоге, анализ существующих электронных источников, генерирующих ПБС, имеющих высокую эффективность генерации пучка при сравнительно больших эмиссионных токах ($1 \div 1000$) А с длительностью ($1 \div 1000$) мкс, показывает, что таким требованиям наиболее полно удовлетворяют электронные источники с плазменными катодами на основе дуги низкого давления с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы. Именно поэтому такой источник выбран в качестве основного объекта исследований. Инициирование основного разряда пробоем по поверхности диэлектрика [103, 104, 110, 111] безусловно является перспективным и находит широкое применение, но имеет существенный недостаток, связанный с высокой скоростью эрозии катода и запылением диэлектрической вставки материалом катода в процессе работы, что приводит к нестабильностям работы плазменного эмиттера и электронного источника в целом. Второй проблемой является то, что, как и при ВЭЭ, при инициировании катодного пятна и горении дугового разряда вместе с генерируемой плазмой возникает большое количество микрокапель, что является известным недостатком данного вида разряда [135]. Эти микрокапли могут либо оседать на эмиссионной сетке, стабилизирующей границу эмиссионной плазмы, либо проникать сквозь ячейки эмиссионной сетки в высоковольтный ускоряющий промежуток, что в обоих случаях приводит к локальному повышению электрического поля на этих микрокаплях, которые можно рассматривать как микроострия, что в итоге

приводит к ухудшению электрической прочности высоковольтного ускоряющего промежутка. Кроме этого, такие раскаленные микрокапли металла могут, достигая выводной фольги, прожигать ее, что приводит к выходу выпускной фольги из строя, и, как следствие, к разгерметизации вакуумного промежутка и аварии. Но широкий диапазон токов разряда, пониженное напряжение горения разряда, стабильность работы и простота конструкции позволяют использовать такой катодный узел и в настоящее время.

Таким образом, представляется необходимым решение *следующих задач*:

1. Создание катодного узла с увеличенным ресурсом работы, способного обеспечивать стабильные параметры тока разряда без обрывов и модуляций в диапазоне тока разряда $I_p=(5\div 100)$ А, длительности импульсов $t=(5\div 100)$ мкс при частоте их следования до $f=50$ с⁻¹ в отсутствие капельной фракции материала катода на электродах разрядной системы.

2. Исследование процессов формирования, транспортировки и вывода электронного пучка с многоапертурным плазменным катодом.

3. Разработка источника электронов с плазменным катодом на основе дуги низкого давления, генерирующего пучок большого сечения, выведенный в атмосферу средней мощностью $P_{\text{п}}=4$ кВт в импульсно-периодическом режиме.

ГЛАВА 2. Описание макета источника электронов с плазменным катодом. Методика и техника экспериментов

2.1. Описание макета источника электронов с плазменным катодом для формирования, транспортировки и вывода пучка большого сечения в атмосферу

Учитывая анализ литературных источников, приведенный в главе 1, в качестве основного объекта исследований была выбрана схема источника электронов с широкоапертурным сеточным плазменным катодом на основе импульсного дугового разряда низкого давления. Упрощенная схема макета такого источника электронов, на котором проводились экспериментальные исследования, представлена на рисунке 2.1, а внешний вид основных его элементов приведен на рисунке 2.2 [24, 125]. В вакуумной камере 1 диаметром 800 мм и длиной 1300 мм, выполненной из нержавеющей стали, на проходном высоковольтном изоляторе, представляющем из себя полиэтиленовый цилиндр с внешним диаметром 475 мм и высотой 240 мм с развитой поверхностью, закреплен сеточный плазменный катод 2 (рис. 2.3). Плазменный катод представляет собой полый полуцилиндр из нержавеющей стали диаметром 300 мм и длиной 800 мм, на торцах которого закреплены два катодных узла на основе дугового разряда низкого давления с иницированием катодного пятна электрическим пробоем по поверхности диэлектрика [103–105, 110, 111], конструкция и фотография которого приведены на рисунке 2.4. Импульсы поджига от генератора поджигающих импульсов 10 (рис.2.1) с амплитудой напряжения до 10 кВ, током 5 А и длительностью 5 мкс поступают на поджигающий электрод 3 катодного узла и иницируют электрический пробой по поверхности диэлектрика (капролона), что приводит к появлению на магниевом катоде 4, диаметром 5 мм, катодного пятна.

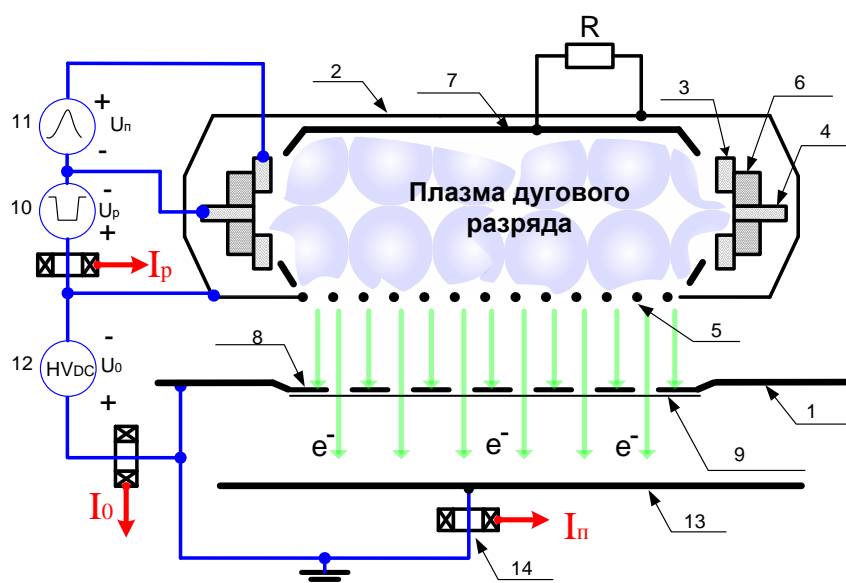


Рисунок 2.1 – Упрощенная схема макета широкоапертурного источника электронов с плазменным катодом: 1 – вакуумная камера; 2 – плазменный катод; 3 – поджигающий электрод; 4 – цилиндрический магниевый катод; 5 – эмиссионная сетка; 6 – изолятор; 7 – полый анод; 8 – опорная решетка; 9 – выводная фольга; 10 – источник электропитания разряда; 11 – источник электропитания поджига; 12 – высоковольтный источник электропитания; 13 – коллектор; 14 – пояс Роговского

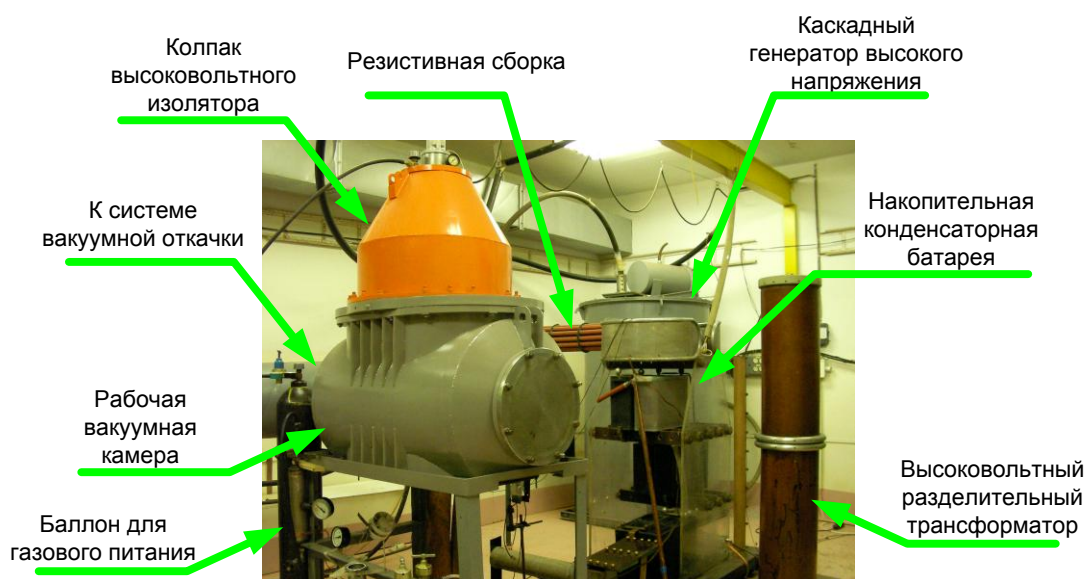


Рисунок 2.2 – Внешний вид макета широкоапертурного источника электронов с плазменным катодом

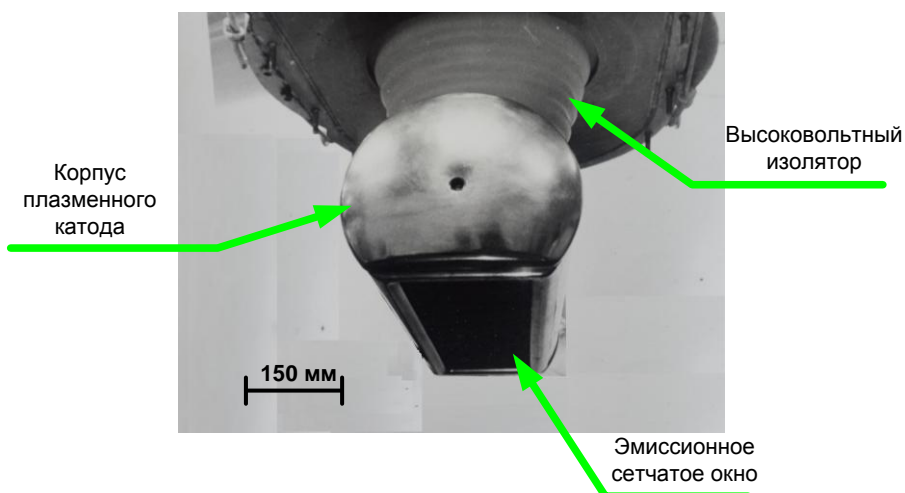


Рисунок 2.3 – Внешний вид плазменного катода

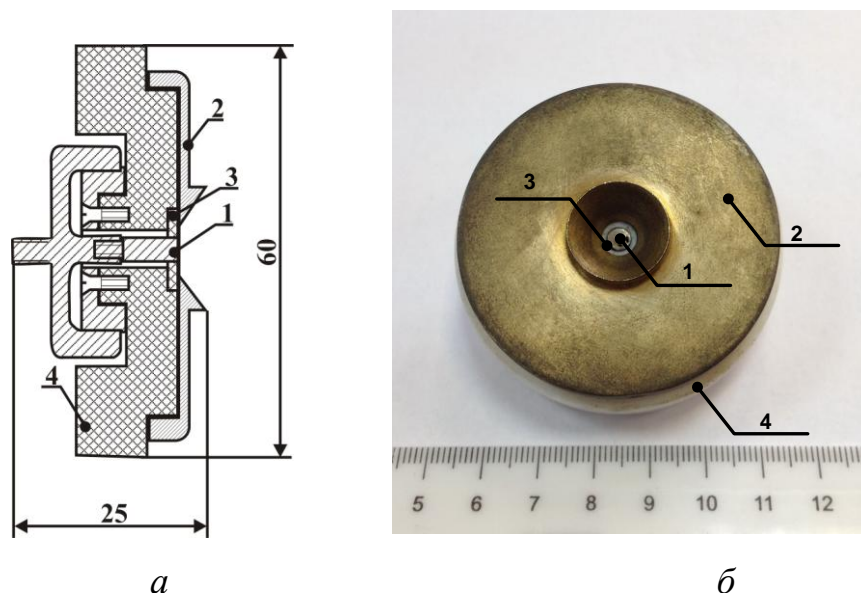


Рисунок 2.4 – Конструкция (а) и фотография (б) катодного узла с иницированием катодного пятна электрическим пробоем по поверхности диэлектрика: 1 – магниевый катод; 2 – поджигающий электрод; 3 – диэлектрическая вставка; 4 – корпус

Основной импульсный дуговой разряд с амплитудой тока до 150 А и длительностью импульса до 100 мкс зажигается между катодами 4 двух катодных узлов и общим полым анодом 7, роль которого играет коробчатая вставка из нержавеющей стали с размерами (750×150×120) мм,

расположенная внутри полуцилиндрического корпуса плазменного катода с размерами (850×250×180) мм. Таким образом, обеспечивается зажигание и горение объемного дугового разряда, который генерирует эмиссионную плазму, заполняющую анодную полость 7 электродной системы разряда. Граница этой плазмы стабилизируется мелкоструктурной металлической сеткой 5, перекрывающей эмиссионное окно прямоугольной формы с размерами (750×150) мм. Размеры ячейки эмиссионной сетки 5 варьировались в пределах (0,4÷1) мм с примерно одинаковой геометрической прозрачностью ≈50%. Для переключения и горения тока разряда в область эмиссионной сетки 5 последняя электрически соединена с источником питания разряда напрямую, а полый анод 7 основной разрядной системы электрически соединялся с эмиссионной сеткой 5 через сопротивление R, которое варьировалось в диапазоне R=(1÷100) Ом.

Под действием постоянного ускоряющего напряжения величиной до 200 кВ, приложенного между плазменным катодом и выпускным фольговым окном 8,9 (ВФО) источника электронов, расстояние между которыми менялось в диапазоне (70÷200) мм, с площади плазменной эмиссионной поверхности, стабилизированной мелкоструктурной металлической сеткой 5, осуществляется отбор электронов и их ускорение в промежутке «эмиссионная сетка 5 – ВФО 8,9» до энергии, соответствующей приложенному ускоряющему напряжению U_0 , которое могло варьироваться в диапазоне (50÷200) кВ. В медной опорной решетке 8 толщиной 20 мм с общей геометрической прозрачностью 56% имеется 344 отверстия диаметром 15 мм. ВФО перекрыто фольгой 9 из алюминий-магниевого сплава АМг–2н толщиной 30 мкм, имеющей минимальный порог по выводу электронов ≈ 70 кВ, измеренный экспериментально.

Подвод электрического питания к плазменному катоду осуществляется семижильным высоковольтным кабелем марки КПВ–300/7, который при вводе в электронный источник помещен, как и высоковольтный изолятор, в

герметичный металлический сосуд, наполненный газообразным азотом, сжатым до избыточного давления $p=5$ атм, что обеспечивает в источнике электронов подачу постоянного высокого напряжения до 200 кВ без электрических пробоев как твердотельной (высоковольтный изолятор), так и газовой изоляции в сосуде.

Разработанная и созданная схема электрического питания макета широкоапертурного источника электронов представлена на рисунке 2.5. Ток разряда I_p фиксировался поясом Роговского в цепи полого анода разряда, который измерял ток с обоих катодных узлов. Для фиксации остальных токов (тока в ускоряющей промежутке I_0 и тока пучка I_n , введенного в атмосферу) также выбраны пояса Роговского, поскольку такие измерения вносят минимальные искажения полезного сигнала в измерительную цепь. Так, использование для измерений токов, протекающих в различных цепях, поясов Роговского с чувствительностями 20 А/В и 50 А/В эквивалентно установке в эти цепи активных шунтов тока сопротивлением $R_{ш}=0,25$ мОм и $R_{ш}=0,1$ мОм, что позволяет минимизировать погрешность измерений токов до $<1\%$ [126].

Для обеспечения работы на высоковольтной стороне схемы электропитания разряда, последняя запитывается через высоковольтный разделительный трансформатор (рис.2.5), фотография которого показана на рисунке 2.2. Данный трансформатор представляет собой цилиндр, заполненный трансформаторным маслом, выполненный из бакелитовой трубы высотой 2000 мм и диаметром 350 мм. Внутри этой трубы установлен сердечник из электротехнической стали сечением ≈ 30 см² с намотанными на него двумя обмотками в количестве 400 витков каждая с дополнительной межслойной изоляцией, выполненной фторопластовой лентой. Разделительный трансформатор рассчитан на передачу электрической мощности до 300 Вт с электрической изоляцией относительно «земляного» потенциала до 250 кВ.

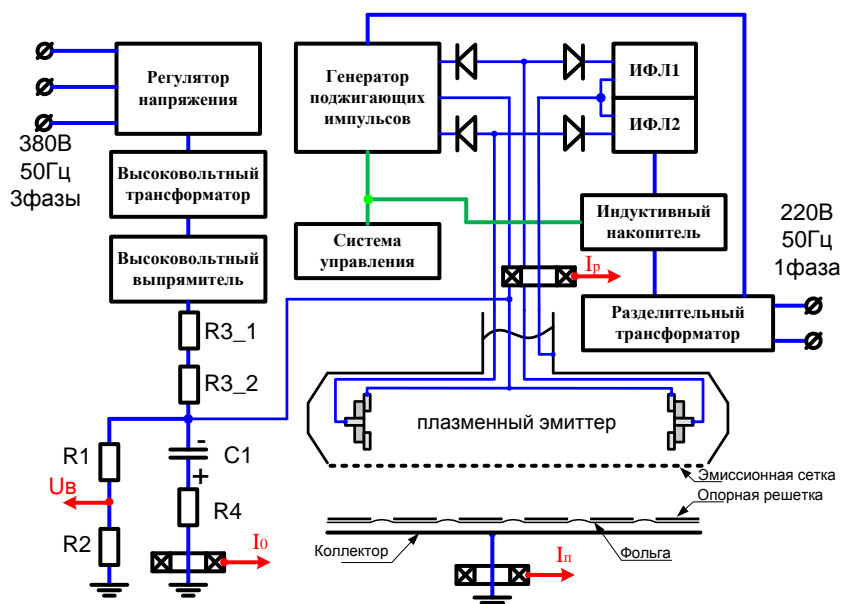


Рисунок 2.5 – Блок-схема электропитания макета широкоапертурного источника электронов с плазменным катодом

Схема электропитания разряда (рис.2.6) позволяет осуществлять независимую регулировку амплитуды тока разряда и частоты следования импульсов в диапазонах $I_p=(10\div 150)$ А и $f=(0,1\div 50)$ с⁻¹. Длительность импульса тока разряда регулируется путем установки необходимого количества звеньев искусственной формирующей линии (ИФЛ), что позволяет регулировать длительность импульса в диапазоне (10÷100) мкс. Для уменьшения вероятности срабатывания ИФЛ в отсутствие поджигающего импульса, что характерно для высокоимпедансных линий, которые необходимо заряжать до напряжений, существенно превышающих напряжение горения разряда, ИФЛ между импульсами тока разряда должны быть разряжены и заряжаться до необходимого напряжения за оптимальное время, определяемое передачей энергии из индуктивного накопителя в ИФЛ, которое в нашем случае не превышало 100 мкс. Такой способ зарядки можно реализовать при накоплении энергии в магнитном поле сердечника с контролем ее величины, что реализуется при использовании индуктивного накопителя, управляемого по оптоволоконному каналу связи и передачи этой

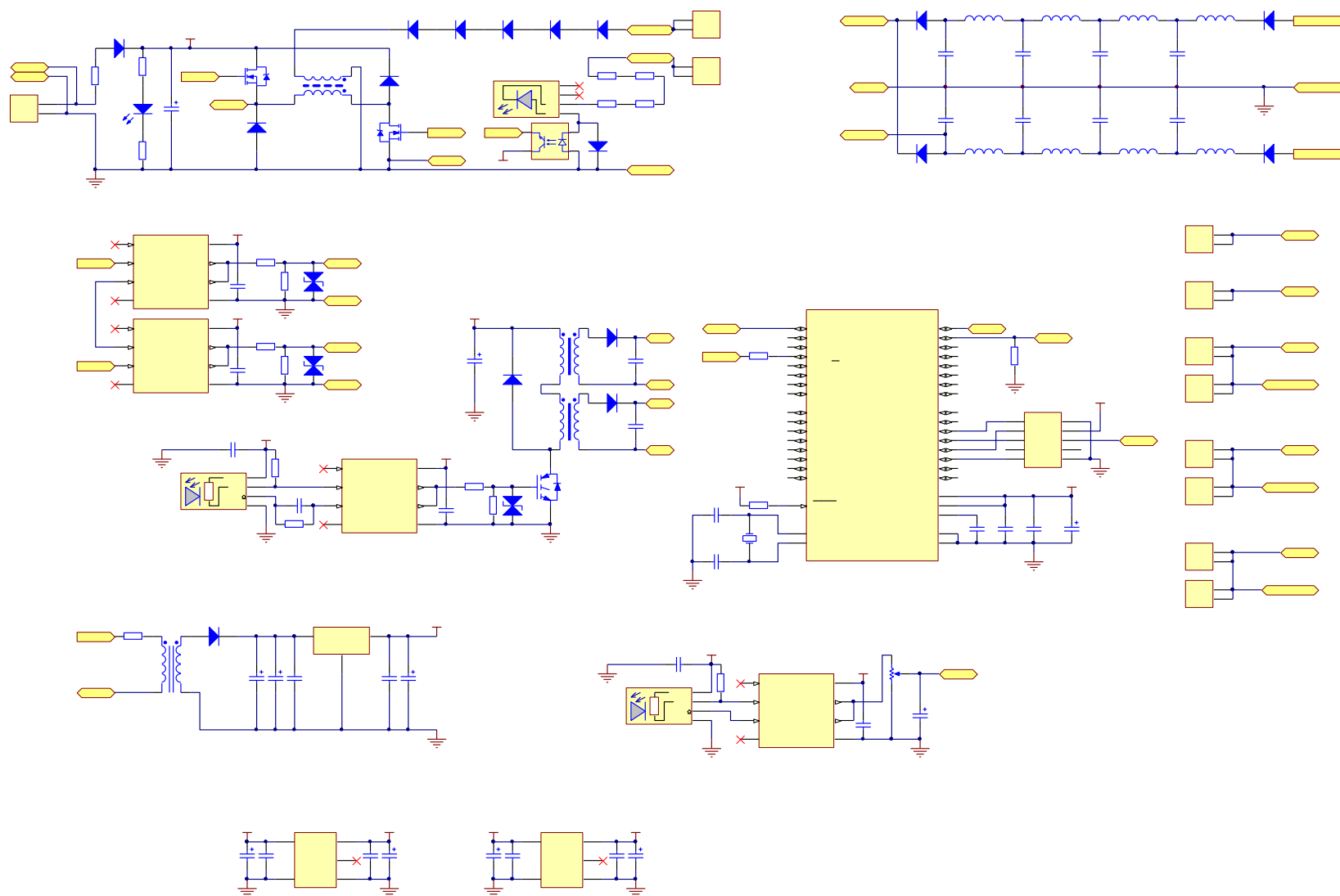


Рисунок 2.6 – Схема электропитания разряда

энергии в ИФЛ. К моменту прохождения между поджигающим электродом и катодом высоковольтного импульса амплитудой ≈ 10 кВ, энергия из индуктивного накопителя уже отдана в ИФЛ, напряжение на которой соответствует требуемому току разряда. Такой способ управления увеличивает стабильность работы источника электронов, увеличивая тем самым его надежность.

Схема электропитания разряда работает следующим образом. При подаче на затворы транзисторов Q1 и Q2 управляющих импульсов (рис.2.6) происходит открывание этих ключевых элементов и двухобмоточный дроссель T1 накапливает энергию в магнитном поле сердечника с распределенным зазором. На этом сердечнике намотаны первичная и вторичная обмотки. Величина запасаемой энергии ($E_{\max}=2$ Дж) зависит от необходимого тока разряда и определяется временем ($t_{\max}=800$ мкс) прикладывания постоянного напряжения величиной 300 В к первичной обмотке дросселя. Диодная сборка D1–D5 позволяет осуществлять в сердечнике накопление энергии, поскольку напряжение, прикладываемое к ним в этот момент времени, является запирающим. Но при закрытии транзисторов Q1, Q2 на вторичной обмотке дросселя происходит переполяривание напряжения, к диодной сборке D1–D5 прикладывается напряжение прямой полярности и ток начинает протекать через вторичную обмотку двухобмоточного дросселя. Напряжение на вторичной обмотке дросселя ограничено коэффициентом трансформации, который в данном случае равен $k=5$. Ток, возникший во вторичной обмотке дросселя начинает заряжать ИФЛ и энергия, запасенная в магнитном поле накапливается в электрическом поле конденсаторов, из которых собраны ячейки ИФЛ.

При завершении передачи энергии в ИФЛ на вход транзистора Q3 подается импульс управляющего напряжения, что приводит к его открытию, и постоянное напряжение величиной ≈ 300 В прикладывается к последовательно соединенным первичным обмоткам повышающих

трансформаторов Т2 и Т3. При достижении на вторичных обмотках этих трансформаторов величины напряжения, соответствующего электрическому пробоею по поверхности диэлектрика между катодами и поджигающими электродами соответствующих катодных узлов, происходит инициирование разряда, и ИФЛ, заряженные до напряжения, соответствующего ожидаемому току разряда (рис.2.7), разряжаются через разрядный промежуток (катод – полый анод), генерируя импульс тока квазипрямоугольной формы. Генерируемая плазма заполняет плазменный катод и под действием ускоряющего напряжения с ее границы осуществляется отбор электронов, их ускорение в промежутке «плазменный катод – ВФО» и вывод ускоренных электронов через ВФО в атмосферу или газ высокого давления.

Из [98] известно, что вне зависимости от механизма отбора электронов из плазмы (через потенциальный барьер, через частично открытую эмиссионную поверхность или через полностью открытую эмиссионную поверхность), который определяется соотношением между протяженностью ионного приэлектродного слоя l и размером ячейки эмиссионной сетки r , ток эмиссии всегда пропорционален концентрации эмиссионной плазмы n . Это означает, что независимо от того, как осуществляется генерация плазмы, эмиссией электронов можно управлять регулировкой концентрации n . Именно поэтому управление током электронов из плазмы изменением плотности эмитирующей плазмы наиболее часто осуществляется изменением тока разряда, что хорошо видно из представленной на рисунке 2.8 а зависимости тока в ускоряющем промежутке I_0 от тока разряда I_p при фиксированных ускоряющем напряжении $U_0=150$ кВ, длине ускоряющего промежутка $d=140$ мм и давлении рабочего газа $p=30$ мПа (N). На рисунке 2.8 б приведена зависимость тока в ускоряющем промежутке I_0 от ускоряющего напряжения U_0 при фиксированном токе разряда $I_p=50$ А, из которой видно, что ускоряющее напряжение слабо влияет на величину тока в ускоряющем промежутке, что, как уже отмечалось в Главе 1, является одним

из явных преимуществ источников электронов с сеточным плазменным катодом.

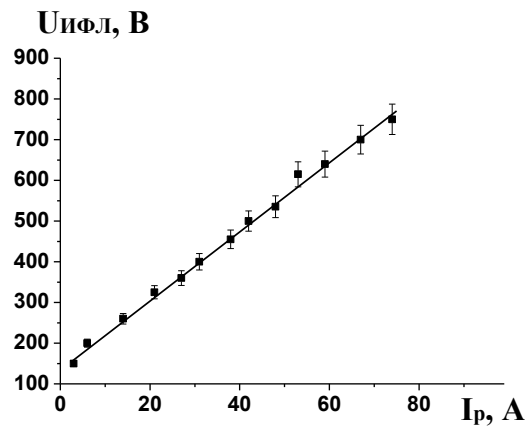


Рисунок 2.7 – Зависимость амплитуды тока разряда I_p от напряжения на искусственной формирующей линии $U_{\text{ифл}}$, генерирующей импульсы длительностью $t \approx 40$ мкс (при работе одного катодного узла)

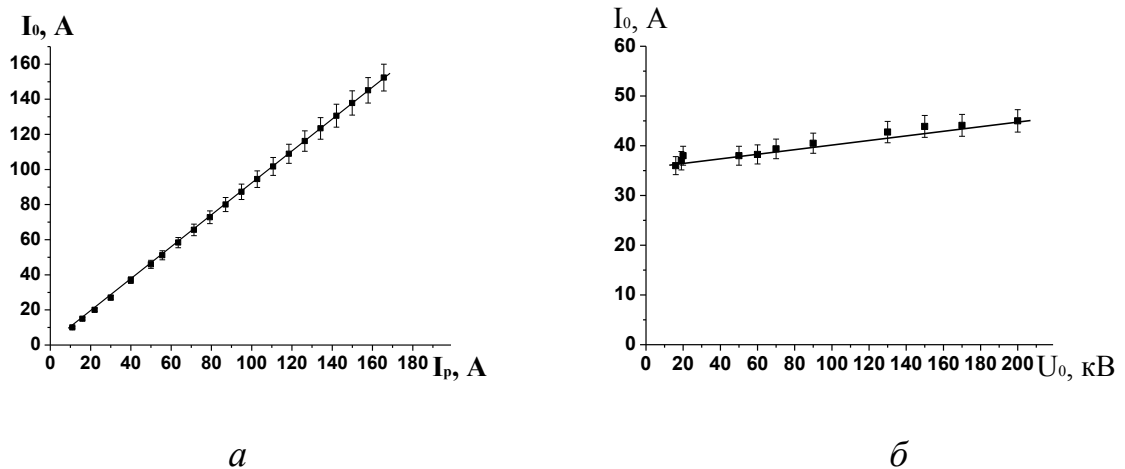


Рисунок 2.8 – Зависимости тока в ускоряющем промежутке I_0 от тока разряда I_p при ускоряющем напряжении $U_0=150$ кВ (а) и тока I_0 от напряжения U_0 при $I_p=50$ А (б): длина ускоряющего промежутка $d_0=140$ мм; $p=30$ мПа (N); размер ячейки эмиссионной сетки (0,4×0,4) мм

Формирование постоянного высокого напряжения происходит посредством каскадного генератора, представляющего собой высоковольтный трансформатор и выпрямитель, собранный по схеме

учетверения напряжения, и конденсаторной батареи С1 (рис.2.5). Выходное напряжение каскадного генератора плавно регулируется с помощью включенного на сетевой стороне трехфазного регулятора, подающего на вход каскадного генератора прямоугольные импульсы напряжения (10÷250) В частотой 50 с^{-1} с регулируемой скважностью импульсов. Регулятор, выполненный по мостовой инверторной схеме, дистанционно управляется из пультной комнаты посредством оптоволоконных каналов связи. Регулировка осуществляется путем уставки на блоке управления напряжения, прикладываемого к первичной обмотке высоковольтного трансформатора.

Конденсаторная батарея С1 общей емкостью $C1=0,26 \text{ мкФ}$ обеспечивает при амплитуде тока в ускоряющем промежутке $I_0 \approx 40 \text{ А}$ и длительности импульса тока пучка $t_{\text{и}} \approx 40 \text{ мкс}$ просадку напряжения $\Delta U \approx 4\%$ от ускоряющего напряжения $U_0=160 \text{ кВ}$ (рис.2.9). Конденсаторная батарея представляет собой три последовательных каскада, параллельно соединенных между собой высоковольтных конденсаторов марки ИК–100/0,4 (по два в каждом каскаде) и сборку ограничительных резисторов общим сопротивлением $R_4 \approx 100 \text{ Ом}$, необходимых для ограничения тока в ускоряющем промежутке во время его электрического пробоя на уровне не более 2 кА. Ограничение тока уменьшает уровень электрических «наводок» на схемы электропитания и управления источника электронов, а также увеличивает надежность работы конденсаторов, установленных в конденсаторной батарее. Для облегчения работы с блоками электропитания плазменного катода и изменения сопротивления R в цепи полого анода 2 (см.рис. 2.1) без разгерметизации вакуумной камеры, конденсаторная батарея открыта и работает в атмосфере воздуха при нормальном давлении. Измерение тока в ускоряющем промежутке I_0 осуществлялось поясом Роговского, который был установлен в цепи накопительной конденсаторной батареи С1 на ее положительном заземленном выводе (рис. 2.5).

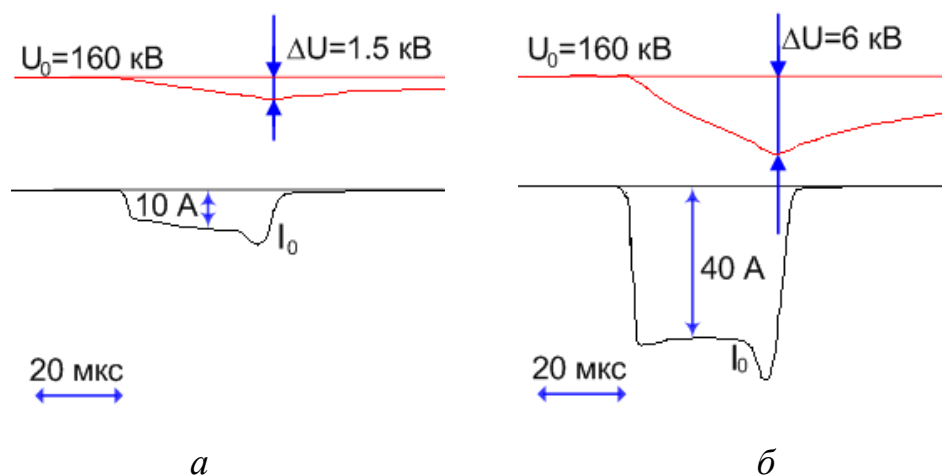


Рисунок 2.9 – Характерные осциллограммы тока в ускоряющем промежутке I_0 и просадки напряжения на высоковольтной конденсаторной батарее ΔU : $I_0=10$ А (а) ; $I_0=40$ А (б)

С выхода выпрямителя каскадного генератора через резисторные сборки R3_1 и R3_2, первая из которых конструктивно расположена внутри каскадного генератора и имеет общее сопротивление $R3_1 \approx 160$ кОм, а вторая смонтирована на конденсаторной батарее и представляет из себя две последовательно соединенные резистивные сборки из 19-ти сопротивлений марки КЭВ–20 номиналом 1 МОм каждый и имеет общее сопротивление $R3_2 \approx 160$ кОм (рис.2.2) напряжение прикладывается к накопительной конденсаторной батарее. Эти сборки позволяют ограничить ток в цепи выпрямительных диодов каскадного генератора при электрическом пробое высоковольтного ускоряющего промежутка на уровне не более 1 А. В промежутках между импульсами тока пучка конденсаторная батарея заряжается до напряжения, соответствующего уставке с учетом коэффициента трансформации высоковольтного трансформатора ($k=500$) и схемы умножения напряжения (умножение на «4»). Контроль высокого напряжения U_0 происходит посредством омического делителя с соотношением $(R2:R1)=(1:50000)$, что позволяет контролировать напряжение конденсаторной батареи, используя стрелочный прибор с погрешностью

измерений 5%, а также контролировать просадку напряжения на конденсаторной батарее, путем измерения напряжения U_B на сопротивлении R_2 с выводом данного сигнала на один из каналов осциллографа Tektronix TDS-2014 с погрешностью измерений не более 5% (рис. 2.5, рис. 2.9). Средняя выходная мощность высоковольтного выпрямителя составляет 25 кВт.

Измерение тока пучка I_p , выведенного через ВФО из ускоряющего промежутка в атмосферу и попадающего на коллектор, осуществлялось поясом Роговского в цепи коллектора размером (800×200) мм, который устанавливался с атмосферной стороны на расстоянии 20 мм от выводной фольги ВФО (рис. 2.5). Для фиксации электронов, отраженных от коллектора, он был покрыт полиимидной пленкой толщиной 40 мкм, прозрачной для ускоренных электронов, но уменьшающей вероятность выпуска электронов, отраженных от коллектора. В результате этого отраженные от коллектора электроны не способны замкнуться по другой электрической цепи кроме заземленного алюминиевого коллектора. Кроме того, изоляция коллектора препятствовала стеканию заряда через ионизированный электронным пучком воздух.

На рисунке 2.10 представлены характерные осциллограммы импульсов тока разряда I_p , тока в ускоряющем промежутке I_0 и тока пучка I_p , выведенного в атмосферу, при ускоряющем напряжении $U_0=150$ кВ, давлении рабочего газа (Ar) $p=50$ мПа, длине ускоряющего промежутка $d=140$ мм и размере ячейки эмиссионной сетки (0,4×0,4) мм.

Как уже было отмечено в главе 1, использование для вывода электронного ПБС в атмосферу опорной решетки, перфорированной круглыми отверстиями, а, следовательно, имеющей сравнительно низкую геометрическую прозрачность, снижает вероятность электрического пробоя на выводную фольгу, а также существенно уменьшает вероятность прорыва фольги, что бывает при использовании опорной решетки с щелевой

структурой в результате деформации ее ребер при повышении их температуры выше критической [121]. Диаметр отверстий в опорной решетке выбирается исходя из двух противоречивых условий: отверстия должны быть оптимального диаметра для обеспечения максимальной прочности фольги, выдерживающей перепад давлений между атмосферой и вакуумом, но при этом отверстия должны иметь как можно больший диаметр для обеспечения максимального вывода тока пучка в атмосферу [28, 40, 90].

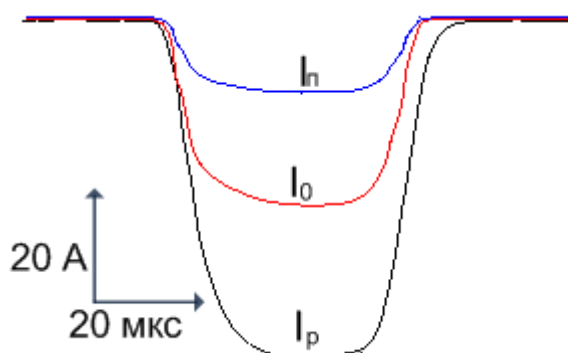


Рисунок 2.10 – Характерные осциллограммы импульсов тока разряда I_p , тока в ускоряющем промежутке I_0 и тока пучка I_n , выведенного в атмосферу, при ускоряющем напряжении $U_0=150$ кВ и давлении $p=50$ мПа (Ar): размер ячейки эмиссионной сетки $(0,4 \times 0,4)$ мм; сопротивление в цепи полого анода $R=10$ Ом; $d_0=140$ мм

Потери тока пучка в выводной фольге приводят к ее нагреву. Одним из неблагоприятных факторов, к которым приводит этот нагрев, является снижение механической прочности выводной фольги [39]. Кроме этого, под действием перепада давлений между атмосферой и вакуумом фольга находится в деформированном состоянии. Именно поэтому выбору материала и толщины фольги необходимо уделять особое внимание. Фольга, выполненная из технически чистого алюминия, обладает низкой механической прочностью ($\sigma=150$ МПа) [127]. Однако, необходимо отметить, что чем меньше примесей в алюминии, тем выше его коррозионная стойкость. Поскольку механические свойства алюминия

зависят от содержания в нем легирующих элементов, повышение которых обычно ведет к увеличению прочности алюминиевого сплава, то материалом для выводной фольги был выбран алюминиево-магниевый сплав АМг-2н. Несмотря на то, что введение магния в алюминий приводит к снижению пластичности последнего, главным преимуществом сплава АМг-2н перед технически чистым алюминием является меньшая зависимость механической прочности от температуры этого сплава. Алюминиево-магниевая фольга из сплава АМг-2н обладает повышенной механической прочностью, которая начинает заметно снижаться только при повышении температуры выше 100°C ($\sigma_{100^{\circ}\text{C}}=270$ МПа, $\sigma_{200^{\circ}\text{C}}=210$ МПа, $\sigma_{300^{\circ}\text{C}}=80$ МПа) [127]. Увеличение же температуры фольги, выполненной из технически чистого алюминия от $T=20^{\circ}\text{C}$ до $T=100^{\circ}\text{C}$ приводит к снижению ее механической прочности в три раза, что неприменимо для использования такой фольги в ВФО при обеспечении источником электронов высокой средней мощности пучка.

Максимальная тепловая нагрузка T_{max} выводной фольги приходится на центр отверстий в опорной решетке [19] (рис. 2.11). Это означает, что чем более мощный пучок выводится в атмосферу, тем сильнее будет греться выводная фольга в центре отверстия в опорной решетке, тем самым снижая механическую прочность фольги в этой области. Однако, в Главе 1 было показано, что для уменьшения вероятности электрического пробоя ускоряющего промежутка на выводную фольгу более оптимальной является конфигурация опорной решетки с перфорацией круглыми отверстиями и сотовой системой их размещения для увеличения геометрической прозрачности опорной решетки. Для наглядности на рис.2.11 представлен разрез опорной решетки в плоскости минимального расстояния между отверстиями. В экспериментах было обнаружено, что основной прорыв фольги происходит на внешнем диаметре отверстий, граничащим с другим отверстием, максимально близко расположенных друг к другу, что,

вероятно, связано с максимальной механической напряженностью фольги в этом месте, вызванной малым радиусом изгиба фольги R_{\min} . Увеличение радиуса скругления отверстий приводит к увеличению расстояния между соседними отверстиями, а, следовательно, к уменьшению геометрической прозрачности ВФО. Именно поэтому в отверстиях опорной решетки на ее стороне, обращенной к выводной фольге, выполнены оптимальные скругления радиусом $R_{\min}=1$ мм, которые уменьшают механические напряжения в местах изгиба фольги и, тем самым, увеличивают срок ее службы.

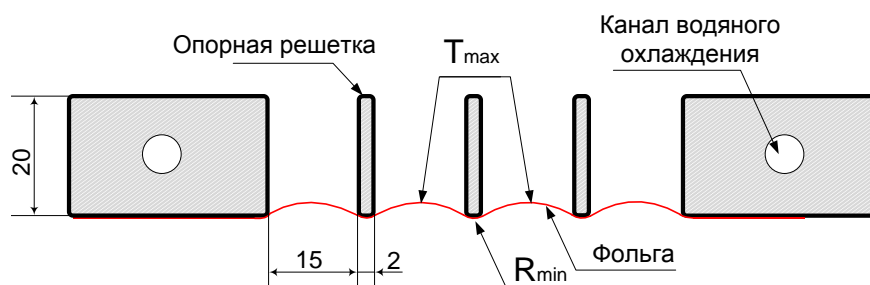
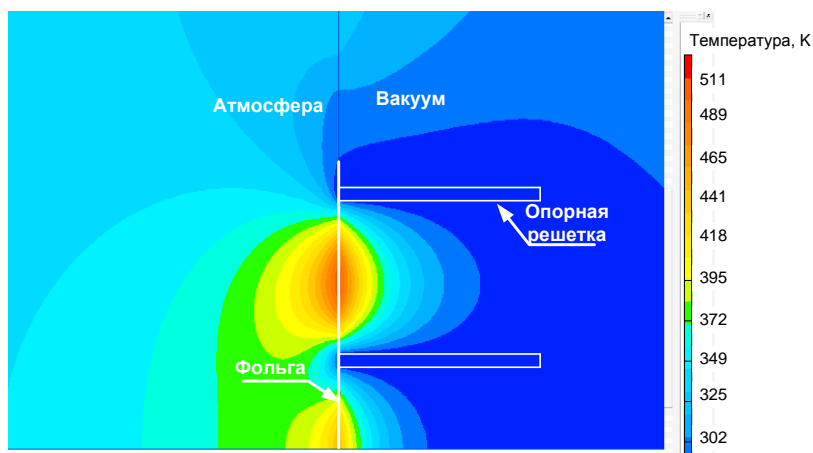
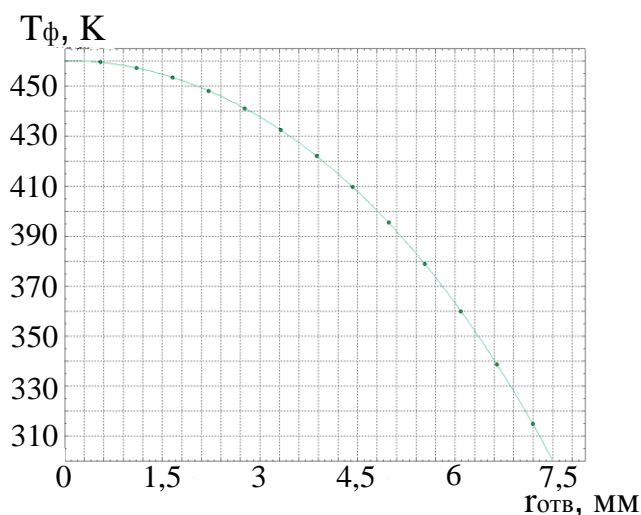


Рисунок 2.11 – Характерное сечение ВФО в месте минимального расстояния между круглыми отверстиями при сотовой системе их размещения

Для определения максимального диаметра отверстий в опорной решетке ВФО в среде Elcut был произведен оценочный тепловой расчет фольги АМг-2н толщиной 30 мкм в зависимости от диаметра отверстий в опорной решетке (рис. 2.12 а). В расчетах была принята плотность мощности электронного пучка, падающего на фольгу, равная 200 кВт/м^2 и было сделано основное допущение: ускоренный электронный пучок не попадает на опорную решетку ВФО, тем самым не вызывая ее нагрева. Рассматривался установившийся режим работы макета источника электронов, когда температура всех его узлов достигает некоторой максимальной температуры. В этом случае можно, задав постоянную температуру опорной решетки, которая определяется скоростью протока



a



б

Рисунок 2.12 – Моделирование в среде Elcut нагрева выводной фольги толщиной 30 мкм из сплава АМг-2н под действием электронного пучка при выводе его в атмосферу (*a*) и распределение температуры фольги T_{ϕ} по радиусу отверстия в опорной решетке $r_{отв}$ (*б*) при плотности мощности пучка, рассеиваемой в фольге, равной 100 кВт/м^2 и фиксированной температуре опорной решетки, равной 300 К

воды через нее, определить нагрев фольги в каждой ее точке. Необходимо отметить, что макет источника электронов допускает работу в широком диапазоне ускоряющих напряжений $U_0=(150\div 200) \text{ кВ}$. Но при $U_0=150 \text{ кВ}$ в

атмосферу выводится пучок мощностью около половины от мощности пучка в ускоряющем промежутке. Было предположено, что вторая половина мощности пучка рассеивается в выводной фольге [38, 89], нагревая ее. Следовательно, при принятой плотности мощности пучка, падающего на опорную решетку, к нагреву выводной фольги будет приводить половина от принятой плотности мощности пучка, равная 100 кВт/м^2 .

Задав максимальную температуру опорной решетки в установившемся режиме, равной 300 К , а также задав теплопроводность алюминиевой фольги и медной опорной решетки, было показано, что при диаметре отверстий в опорной решетке ВФО, равным 15 мм , максимальная температура фольги $T_{\text{ф}}$ достигает значения $T_{\text{max}}=460 \text{ К}$ (рис. 2.11, рис. 2.12 б). Это приводит к снижению ее механической прочности до 230 МПа [127]. С учетом того, что расчеты являются оценочными и в условиях эксперимента температура фольги $T_{\text{ф}}$ может быть выше, например, за счет снижения теплопроводности на границе сред фольга–опорная решетка, расчетное значение прочности фольги 230 МПа является вполне допустимым для применения фольги в конструкции ВФО, имеющего отверстия в опорной решетке диаметром 15 мм . Поэтому при проектировании конструкции ВФО было решено остановить выбор именно на таком диаметре отверстий в опорной решетке.

Вакуумная камера откачивается паромасляным диффузионным насосом НД–400 со скоростью откачки 400 л/с до предельного давления $p_{\text{пред}}(\text{НД}) \approx 8 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$. Затвор насоса – угловой, с ручным приводом. Для предварительного разрежения вакуумной камеры и подключения к ней диффузионного насоса используется механический вакуумный насос типа АВЗ–20Д со скоростью откачки 20 л/с до предельного давления $p_{\text{пред}}(\text{АВЗ}) \approx 1 \text{ Па}$. Давление при работе форвакуумного насоса измеряется термоманометрическим преобразователем типа ZJ–52Т и ионизационным преобразователем типа ZJ–27, установленными в вакуумной

камере над затвором диффузионного насоса. Данные с преобразователей поступают на вакуумметр ZDF–III–LED (52T/27), производства КНР.

Напуск рабочего газа в макет источника электронов осуществляется через полиэтиленовую трубку длиной ≈ 7 м с внешним и внутренним диаметрами 5 мм и 1 мм, соответственно. Трубка уложена по развитой поверхности высоковольтного изолятора со стороны сосуда, наполненного газом до избыточного давления $p=5$ атм., обеспечивающего высоковольтную изоляцию на напряжение, превышающее максимальное ускоряющее (до 250 кВ). Один из концов трубки в этом случае оказывается под потенциалом плазменного катода (-200 кВ), а второй под потенциалом вакуумной камеры («Земля»). Для исключения вероятности зажигания высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) в напускаемом газе внутри трубки в ней необходимо обеспечить избыточное давление в соответствии с правой ветвью кривой Пашена. Это достигается либо путем установки на входе в вакуумную камеру дополнительного газового натекавателя, позволяющего осуществлять регулировку скорости потока напускаемого в вакуумную камеру газа, либо путем установки на границу раздела «вакуум–трубка напуска» специальной керамической вставки. Поскольку используемая керамика является пористым материалом с контролируемой газовой проницаемостью, то давление в трубке, через которую осуществляется напуск рабочего газа, будет определяться только длиной и сечением этой керамической вставки. Так при минимальном рабочем давлении в вакуумной камере 20 мПа, избыточное давление в трубке превышает 2,5 атм., что при ее длине позволяет подавать ускоряющее напряжение до 250 кВ при использовании в качестве рабочих газов аргона или азота без электрического пробоя в газе по длине трубки.

При работе источника электронов на высокой средней мощности пучка с поверхности ВФО и плазменного катода происходит интенсивное газовыделение десорбированного газа, что неизбежно приводит к некоторому увеличению давления в вакуумной камере и, как следствие, к уменьшению

электрической прочности высоковольтных зазоров. Поскольку вакуумная откачка происходит только с одной стороны вакуумной камеры и осуществляется через специальное колено диаметром 400 мм с радиусом изгиба 900 мм, которое необходимо для уменьшения попадания паров масла в вакуумную камеру, на входе в это колено создается перепад давлений, что создает благоприятные условия для зажигания самостоятельного высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) между корпусом плазменного катода и внутренней полостью колена. Причем поскольку ВТР зажигается на левой ветви кривой Пашена, где разряду легче развиваться по длинному пути, то дополнительный высоковольтный изолятор, необходимый для электрической развязки вакуумной системы и анода источника электронов, роль которого играет вакуумная камера, нужно устанавливать со стороны вакуумной системы. Такой высоковольтный изолятор представляет из себя полый цилиндр высотой 200 мм с внешним диаметром 400 мм, выполненный из капролона. Использование такой конструкции позволило исключить зажигание ВТР и, тем самым, повысить электрическую прочность источника электронов с сеточным плазменным катодом.

2.2. Методы регистрации распределения плотности тока по сечению пучка

Для измерения распределения плотности тока по сечению пучка, выведенного в атмосферу, использовались три метода регистрации: измерение тока пучка коллектором малой площади, аналогичное экспериментам [43], калориметрический и пленочный [128], позволяющие получать как качественные, так и количественные данные и сравнивать их друг с другом.

Калориметрический метод измерения плотности тока по сечению пучка, основанный на превращении кинетической энергии электронов в

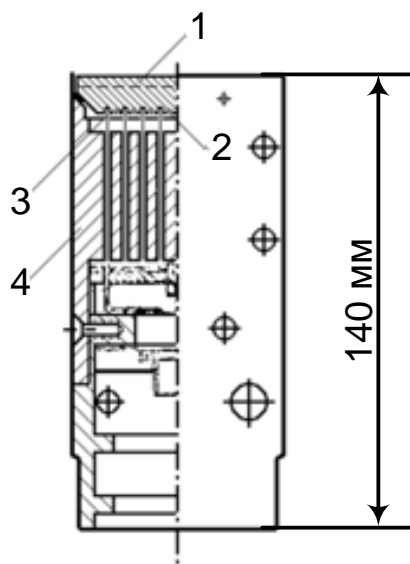
тепловую, осуществлялся с помощью стандартного калориметрического преобразователя типа ТПИ–2М.1 с чувствительностью $K=1 \cdot 10^{-4}$ В/Дж. Конструкция и внешний вид такого преобразователя представлены на рисунке 2.13. Основными элементами конструкции калориметрического преобразователя ТПИ–2М.1 (рис. 2.13 а), определяющими его функциональные характеристики, являются приемный элемент 1, выполненный в виде пластины ($60 \times 60 \times 10$) мм из рекристаллизованного графита, батарея хромель–копелевых термопар 2, проволочный константановый нагреватель 3 и дюралевый корпус 4. Процесс измерения энергии пучка заключается в подаче пучка на приемный элемент калориметра, нагреве пучком этого элемента, ожидании окончания переходного процесса и измерении выходного сигнала батареи термопар, который пропорционален плотности энергии измеряемого пучка. Измерение сигнала с калориметра производилось осциллографом Tektronix TDS 2014. Калориметр, фотография которого приведена на (рис. 2.13 б), устанавливался на расстоянии 20 мм от выводной фольги источника электронов и дискретно перемещался по продольной и поперечной сторонам ВФО. Плотность тока пучка в этом случае определялась по формуле:

$$j = \frac{U_{\text{осц}}}{K \cdot S \cdot (E_0 - \Delta E) \cdot t_u}, \quad (2.1)$$

где $U_{\text{осц}}$ – напряжение с батареи последовательно соединенных термопар, измеренное на осциллографе (рис.2.14), K – чувствительность калориметра; E_0 – энергия электронов в ускоряющем промежутке; ΔE – потери энергии пучка в выводной фольге, численно показанные в [38]; S – площадь приемной пластины калориметра, равная 36 см^2 , t_u – длительность импульса тока пучка.

Из предположения, что ширина энергетического спектра электронов, вышедших в атмосферу, по всей площади пучка одинаковая, измеряя $U_{\text{осц}}$, можно однозначно определить распределение плотности тока по сечению

пучка с дискретностью по площади 36 см^2 , поскольку остальные коэффициенты в выражении (2.1) постоянны.



а



б

Рисунок 2.13 – Конструкция калориметрического преобразователя типа ТПИ–2М.1 (а) и его фото (б): 1 – приемный элемент; 2 – батарея хромель–копелевых термопар; 3 – нагреватель; 4 – дюралевый корпус

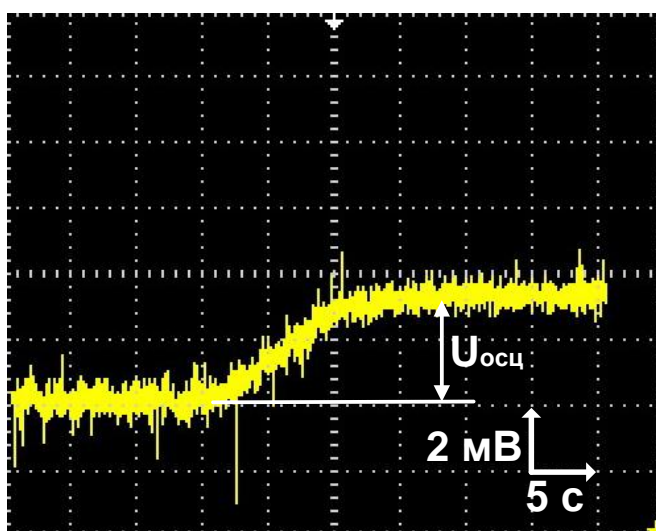


Рисунок 2.14 – Характерная осциллограмма напряжения $U_{\text{осц}}$ с батареи термопар калориметра ТПИ–2М.1 в установившемся режиме: ускоряющее напряжение $U_0=150 \text{ кВ}$; ток в ускоряющем промежутке $I_0=26 \text{ А}$;

длительность импульса $t_{и}=40$ мкс; количество импульсов $N=30$ при частоте их следования $f=3$ с⁻¹

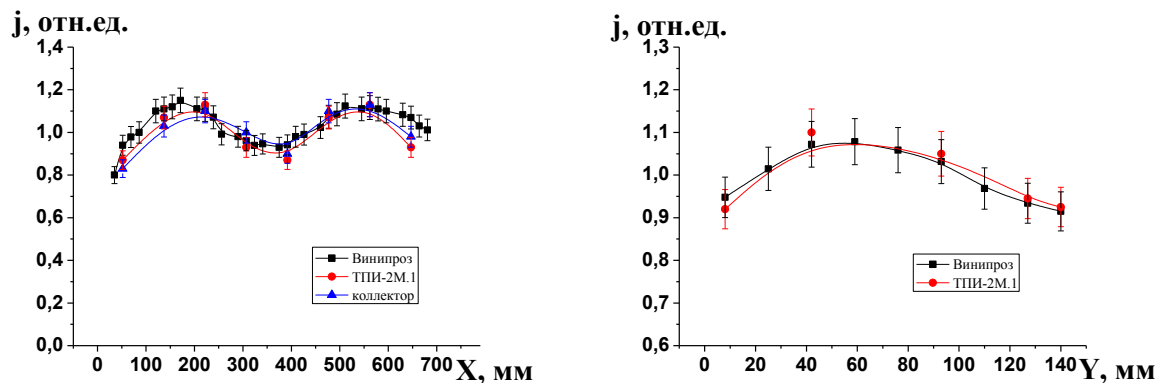
Вторым способом измерения распределения плотности тока по сечению пучка являлось использование коллектора малой площади. В этом случае в эксперименте вместо калориметра ТПИ-2М.1 использовалась стальная коллекторная пластина с собирающей площадью, как и у калориметра, равной $(6 \times 6) = 36$ см². Так же как и коллектор, описанный в Разделе 2.1, для фиксации электронов, отраженных от коллектора, данный коллектор был покрыт полиимидной пленкой толщиной 40 мкм, прозрачной для ускоренных электронов, но уменьшающей вероятность выпуска электронов, отраженных от коллектора. Ток пучка, замыкающийся на коллектор, фиксировался поясом Роговского с чувствительностью 20 А/В. Для измерения распределения плотности тока по сечению пучка коллектор перемещался по продольной оси, в те же положения, что и описанный выше калориметр ТПИ-2М.1. Это позволяло не только оценивать распределение плотности тока по сечению пучка, но и среднюю энергию электронов.

Третьим способом оценки распределения плотности тока по сечению пучка является анализ автографа пучка, полученного на полимерной пленке (винипрозе). Такая пленка при попадании на нее высокоэнергетического электронного пучка меняет свою оптическую плотность пропорционально поглощенной дозе излучения от электронного пучка [129]. При фиксированной энергии электронного пучка оптическая прозрачность винипроза отображает плотность заряда электронного пучка, а при фиксированном времени облучения – плотность тока пучка. Таким образом, зная значение средней плотности тока электронов, легко подобрать время облучения винипроза, при котором автограф пучка будет содержать информацию о распределении плотности тока по сечению пучка.

Исследования распределения плотности тока по сечению пучка проводились по фиксации отпечатков электронного пучка на винипрозе, установленным как в вакууме, так и в атмосфере. Лист винипроза размером (750×150) мм укладывался на водоохлаждаемую заглушку, играющую роль анода ускоряющего высоковольтного зазора. При измерениях в вакууме для снятия заряда, накапливаемого на поверхности винипроза при бомбардировке последнего электронным пучком, на лист винипроза укладывалась фольга из алюминий-магниевого сплава АМг–2н толщиной 30 мкм, перекрывающая всю площадь винипроза. Это позволяет увеличить электрическую прочность высоковольтного ускоряющего промежутка при снятии распределения плотности тока по сечению пучка, достигая при этом режима облучения без электрических пробоев ускоряющего промежутка. После облучения винипроз выдерживался при комнатной температуре в воздушной атмосфере в течение времени около 24 часов, как это рекомендовано в [128]. Количественная оценка распределения плотности тока по сечению пучка осуществлялась при фотометрировании отпечатка пучка, считая, что потемнение винипроза пропорционально плотности тока пучка [128]. Для фотометрирования использовался люксметр «Light meter AZ instrument 8581» с максимальной чувствительностью на длине волны 550 нм и точностью измерений $\pm 5\%$ при площади приемного элемента люксметра $\approx 80 \text{ мм}^2$.

На рисунке 2.15 представлены продольное (а) и поперечное (б) распределения плотности тока по сечению пучка, полученные при ускоряющем напряжении 150 кВ, амплитуде тока пучка 10 А, длительности импульса 40 мкс и прохождении $N=45$ (для винипроза) импульсов тока пучка, воздействующих на винипроз. Из представленных зависимостей видно, что отклонение от среднего значения плотности тока по сечению пучка по его длинной и короткой сторонам не превышает $\pm 15\%$ и $\pm 10\%$, соответственно. Удовлетворительное совпадение результатов измерения

плотности тока пучка по его сечению этими тремя методами в пределах 10% свидетельствует о достоверности полученных экспериментальных данных.



a

б

Рисунок 2.15 – Распределения плотности тока по длинной (*a*) и короткой (*б*) сторонам ВФО, полученные в источнике электронов с широкоапертурным плазменным катодом с размером ячейки эмиссионной сетки (0,4×0,4) мм. Ускоряющее напряжение 150 кВ, амплитуда тока пучка 10 А, длительность импульса 40 мкс, количество импульсов тока пучка, воздействующих на винипроз, равно 45

2.3. Измерение средней энергии и мощности широкоапертурного электронного пучка

Определение средней энергии пучка в импульсе в вакуумном ускоряющем промежутке и средней мощности пучка осуществлялось по формулам:

$$E_{cp} = (U_{0_cp} - I_0 \cdot R_4) \cdot I_0 \cdot t_u, \quad P_{cp} = E_{cp} \cdot f,$$

где U_{0_cp} – напряжение, прикладываемое к ускоряющему промежутку с учетом просадки конденсаторной батареи за время импульса тока пучка, I_0 – ток пучка в ускоряющем промежутке, R_4 – ограничительное сопротивление конденсаторной батареи, равное $R_4 \approx 100$ Ом, t_u и f – длительность и частота следования импульсов тока пучка.

Отдельной и важной задачей в исследовании эффективности вывода пучка из ускоряющего промежутка в атмосферу является экспериментальное измерение средней энергии и средней мощности этого пучка. Такие измерения проводились тремя способами.

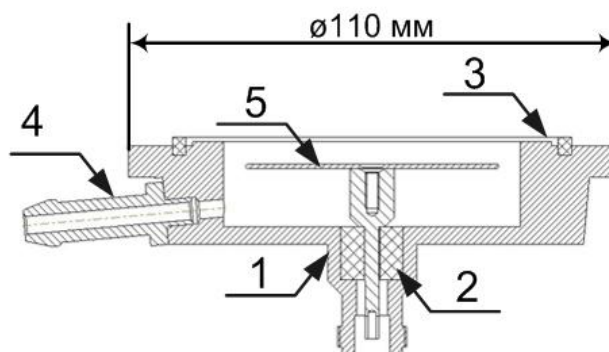
Первый способ калориметрический, с использованием показаний средней энергии пучка калориметром типа ТПИ–2М.1, который также как и при измерениях распределения плотности тока по сечению пучка перемещался вдоль продольной и поперечной осей ВФО. Показания калориметра в данном случае показывают среднюю энергию пучка за один или более импульсов. Зная среднюю энергию пучка в импульсе, частоту следования импульсов в единицу времени и распределение плотности энергии по сечению пучка, можно однозначно оценивать среднюю энергию, а, соответственно, и среднюю мощность пучка, выведенного в атмосферу.

Второй способ измерения средней мощности пучка, выведенного в атмосферу, также является калориметрическим, но основан на другом принципе. В данном случае измерения средней мощности пучка осуществлялись по нагреву воды, охлаждающей ВФО. Зная скорость протока воды через охлаждающую систему ВФО, и измеряя ее температуру на входе и выходе, в установившемся режиме, когда температура на выходе из ВФО перестает увеличиваться, можно рассчитать среднюю мощность пучка, оставшуюся в виде потерь в ВФО. Разница между мощностью пучка P_0 , связанной с общим током в ускоряющем промежутке и мощностью потерь пучка $P_{\text{ВФО}}$, выделяемой в ВФО, будет равна средней мощности пучка, выведенного из ускоряющего промежутка в атмосферу. Дополнительно был специально разработан и изготовлен водоохлаждаемый коллектор из нержавеющей стали размером (800×200) мм, позволяющий фиксировать среднюю мощность пучка, выведенного в атмосферу, по такому же принципу. В этом случае мощность, выделяемая в виде тепла, приводящего к нагреву воды в коллекторе, всегда была на $\approx(10\div 15)\%$ меньше мощности

пучка, выведенного в атмосферу, получаемой по нагреву воды в ВФО. К примеру, при средней мощности пучка в ускоряющем промежутке $P_0=2000$ Вт, мощность пучка, рассеиваемая в ВФО составляет $P_{ВФО}\approx 1400$ Вт, соответственно мощность пучка, выведенного в атмосферу должна быть около $P_{п}\approx 700$ Вт, но мощность пучка, фиксируемая водоохлаждаемым коллектором составляет $P_{п}\approx 600$ Вт. Это, вероятно, связано с потерями энергии пучка в воздушном зазоре между ВФО и водоохлаждаемым коллектором, который в экспериментах был равен 20 мм, отражением высокоэнергетических электронов от коллектора, а также с наличием в ускоряющем промежутке высокоэнергетических ионов (см. Главу 3). Погрешность измерений такого способа измерения средней мощности пучка, выведенного в атмосферу, в основном определяется прибором, измеряющим температуру воды. Важно отметить, что перепад температуры подбирается экспериментально за счет регулирования скорости потока воды. В экспериментах для измерения температуры использовался пирометр ИЕС–825/93, позволяющий осуществлять измерения с точностью в десятые доли градусов измеряемой температуры среды. Оцененная в экспериментах точность этого метода составила $\pm 10\%$

Еще одним из способов измерения средней энергии пучка, выведенного в атмосферу был, так называемый, фольговый метод [130, 131], позволяющий построить энергетический спектр исследуемого пучка, а затем, зная максимум спектра, определить среднюю энергию электронов. Суть метода заключается в следующем. На расстоянии 10 мм от выводной фольги располагался экранированный коллектор диаметром 65 мм, фиксирующий часть тока пучка, выведенного в атмосферу. Конструкция такого коллектора позволяет изменять толщину фольги–фильтра, через которую ускоренные электроны попадают на коллектор, либо набором тонких фольг, либо заменой одной фольги на другую более толстую. На рисунке 2.16 представлена конструкция (рис. 2.16 а) и фотография (рис. 2.16 б)

фольгового фильтра, установленного в атмосфере под ВФО. В данных экспериментах толщина фольги-фильтра обеспечивалась путем набора



a



б

Рисунок 2.16 – Схема фольгового фильтра (а) и его фотография, установленного под ВФО (б): 1 – корпус; 2 – изолятор; 3 – крепление для фольг-фильтров; 4 – патрубок для вакуумной откачки; 5 – коллектор

алюминиевых фольг, толщина каждой из которых около 9 мкм. По мере увеличения количества фольг-фильтров между ВФО и коллектором, наблюдалось уменьшение величины фиксируемого на коллекторе электронного тока, что проиллюстрировано зависимостью, представленной на рисунке 2.17. На рисунке 2.18 представлены характерные осциллограммы токов в ускоряющем промежутке I_0 (3) и тока коллектора фольгового фильтра $I_{кф}$ (2), фиксируемого коллектором после прохождения пучком

фольгового фильтра, а также просадки напряжения на высоковольтной конденсаторной батарее ΔU (1), которые подтверждают, что при заданном токе I_0 в ускоряющем промежутке величина тока коллектора $I_{\text{кф}}$ при фиксированной толщине фольги-фильтра зависит только от величины ускоряющего напряжения U_0 .

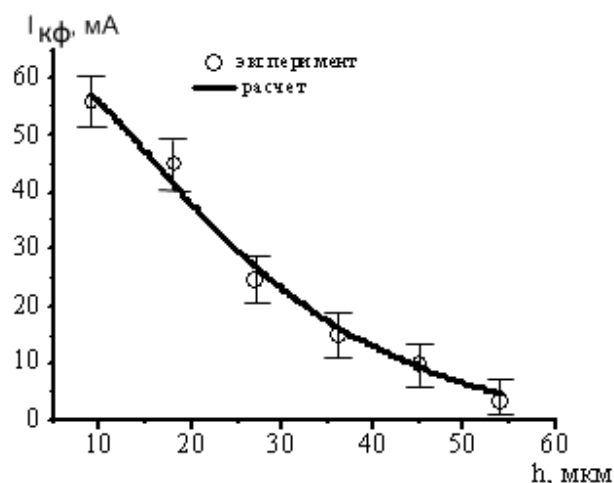


Рисунок 2.17 – Характерная зависимость тока пучка, фиксируемого на коллекторе фольгового фильтра $I_{\text{кф}}$ от толщины фольги-фильтра при ускоряющем напряжении $U_0=130$ кВ и общем токе в ускоряющем промежутке $I_0=10$ А

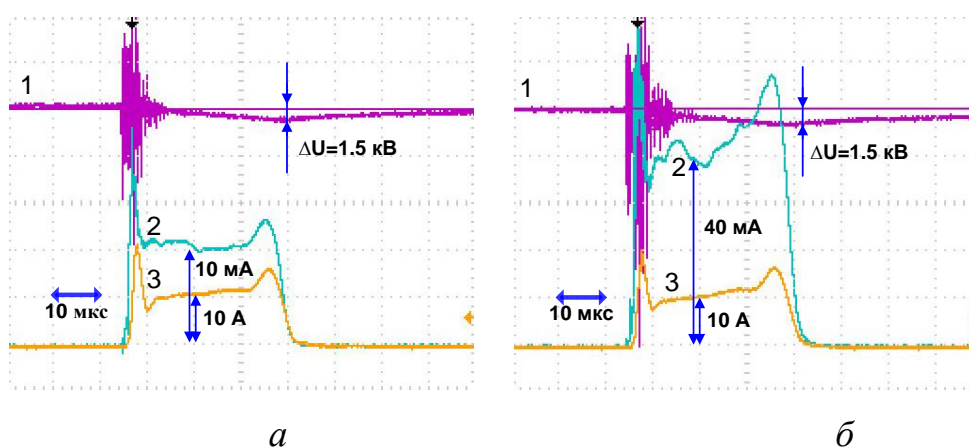


Рисунок 2.18 – Характерные осциллограммы: 1 – просадки напряжения на высоковольтной конденсаторной батарее ΔU ; 2 – тока коллектора фольгового фильтра $I_{\text{кф}}$; 3 – тока в ускоряющем промежутке I_0 при ускоряющем

напряжении $U_0=130$ кВ (а) и $U_0=160$ кВ (б) в экспериментах по определению энергетического спектра электронного пучка фольговым методом

Восстановление спектра электронного пучка, выведенного в атмосферу, по кривой его ослабления в тонких фольгах осуществлялось методом регуляризации Тихонова, разработанным для некорректно поставленной задачи решения интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода, с минимальным числом априорных предположений о виде спектра [131].

Данная задача была решена в работе [132] путем решения некорректной задачи методом регуляризации Тихонова [133]. В качестве основной предпосылки возможности расчетного восстановления исходного спектра электронов $f(\varepsilon)$ полагалось, что известна точная зависимость коэффициента ослабления $\tau(\varepsilon, x)$ моноэнергетического пучка электронов с энергией ε после его нормального падения на плоский слой известного вещества толщиной x . В качестве такой функции $\tau(\varepsilon, x)$ были использованы полуэмпирические формулы из работы [134], которые апробированы для различных веществ (атомные номера Z от 4 до 82) и широкого диапазона энергий электронов (энергии электронов от 8 кэВ до 30 МэВ). Точность аппроксимации этими формулами экспериментального коэффициента ослабления была не хуже 3%.

Применительно к алюминию (атомный номер $Z = 13$, массовое число $A = 27$, плотность $\rho=2.7$ г/см³) эмпирическая зависимость для коэффициента ослабления монохроматического пучка электронов с энергией ε (МэВ) имеет следующий вид:

$$\tau(x, \varepsilon) \approx \frac{e^{S(\varepsilon)} + 1}{e^{S(\varepsilon)} + \exp\left\{\left(S(\varepsilon) + 2\right) \frac{x}{R(\varepsilon)}\right\}}, \quad (2.2)$$

Безразмерная функция $S(\varepsilon)$ и экстраполированная длина пробега $R(\varepsilon)$ (мм) рассчитывались по известным формулам [134].

Недостатком метода регуляризации является то, что он не может генерировать устойчивые решения с острыми пиками, так как стабилизирующий функционал «подавляет» такие функции. Было проведено тестирование метода в отношении его возможности восстановления узких спектров. Для этого был рассчитан коэффициент ослабления моноэнергетического пучка электронов с энергией 150 кэВ, а затем использована процедура генерации решения методом регуляризации. В результате был получен колоколообразный спектр (диапазон энергий по основанию $(100 \div 200)$ кэВ), максимум которого соответствовал значению равному 150 кэВ.

Таким образом, используемый метод эффективен при восстановлении только достаточно гладких спектров. Но даже для спектров, содержащих узкие линии, он позволяет выявить характеристические энергии этих линий. Применительно же к измерению средней мощности пучка такой способ является весьма перспективным, поскольку для ее измерения достаточно знать только величину выведенного тока пучка и его среднюю энергию.

Выводы

1. Создан макет широкоапертурного источника электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления с иницированием катодного пятна электрическим пробоем по поверхности диэлектрика. Принцип работы источника электронов позволяет осуществлять независимую регулировку параметров пучка (энергии ускоренных электронов, амплитуды тока пучка, длительности и частоты следования импульсов) путем уставки ускоряющего напряжения и изменения параметров тока разряда.

2. Высокий КПД пучка за счет малой мощности, вкладываемой в разряд, моноэнергетичность пучка за счет работы источника электронов при постоянном ускоряющем напряжении, обеспечиваемым энергией, накопленной в высоковольтной конденсаторной батарее, а также независимость регулировки основных параметров генерируемого пучка в широком диапазоне их изменения являются несомненными преимуществами созданного макета источника электронов перед известными аналогами, что позволяет проводить исследования по оптимизации параметров источника электронов и процессов с его использованием.

3. Разработаны и апробированы методики измерения параметров пучка. Показано, что погрешность измерений тока пучка не превышает 5%, распределения плотности тока по сечению пучка – 10%, энергии ускоренных электронов – 10%, средней мощности пучка – 10%.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОАПЕРТУРНОГО СЕТОЧНОГО ПЛАЗМЕННОГО КАТОДА НА ОСНОВЕ ИМПУЛЬСНОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

3.1. Катодный узел с инициированием катодного пятна электрическим пробоем в газе низкого давления

В выводах по анализу методов получения электронных ПБС, проведенному в литературном обзоре, а также в Главе 2, было показано, что из существующих электронных источников, генерирующих ПБС с выводом их в атмосферу или газ высокого давления, имеющих высокую эффективность генерации пучка при сравнительно больших эмиссионных токах ($10 \div 1000$ А) с длительностью ($1 \div 1000$) мкс, условиям применения в радиационно-химической технологии и накачки газовых лазеров в наибольшей степени соответствуют источники электронов с сеточными плазменными катодами на основе дуги низкого давления. Инициирование основного дугового разряда пробоем по поверхности диэлектрика [103, 104, 110, 111, 121] находит применение благодаря таким преимуществам как: широкий диапазон токов разряда, пониженное рабочее давление, малый разброс времени срабатывания и простота конструкции. Но такой катодный узел имеет существенный недостаток, связанный с относительно высокой скоростью эрозии катода и запылением диэлектрической вставки материалом катода в процессе работы, что со временем приводит к нестабильностям работы плазменного катода и источника электронов в целом. Второй проблемой является то, что при инициировании катодного пятна и горении дугового разряда вместе с генерируемой плазмой возникает значительное количество микрокапель, проблеме уменьшения или исключения которых часто уделяется особое внимание при разработке вакуумно-дугового оборудования, используемого в

технологических целях [135]. Если разрядная система сеточного плазменного катода устроена таким образом, что катодное пятно находится в прямой видимости полого анода основного разряда, эти микрокапли могут оседать на эмиссионной сетке, стабилизирующей границу эмиссионной плазмы, что приводит к усилению электрического поля на этих каплях и инициированию на сетке катодного пятна с неограниченной эмиссионной способностью. Это приводит к неконтролируемому увеличению тока в ускоряющем промежутке, снижению на этом промежутке напряжения и «стягиванию» тока пучка в низкоэнергетический токовый шнур высокой плотности, локально замыкающийся либо на опорную решетку, либо на выводную фольгу ВФО, что также нежелательно, поскольку фольга при воздействии на нее такого токового шнура может выйти из строя в результате локального перегрева. Кроме этого, важно отметить, что раскаленные микрокапли материала катода разряда, либо микрокапли с поверхности эмиссионной сетки при инициировании на ней катодного пятна, могут, достигая выводной фольги, локально прожигать ее, что также приводит к выходу фольги из строя, разгерметизации вакуумного промежутка и, как следствие, к аварии. Такие прожигания фольги наблюдались в источниках электронов на основе ВЭЭ [68] с высокими плотностями тока пучка, а соответственно, большим количеством микрокапель, острия катодов в которых обычно расположены в направлении ускоряющего электрода. Однако такую возможность прожигания фольги нельзя исключать и при использовании плазменного катода на основе дугового разряда низкого давления, который также создает некоторое количество микрокапель.

В катодном узле с инициированием катодного пятна пробоем по поверхности диэлектрика, с конструкцией, описанной в Главе 2 [110, 111] экспериментально измеренный унос материала катода составил $M \approx 2$ мкг/Кл. Такой износ катода мог бы обеспечивать сравнительно высокий ресурс стабильной работы плазменного катода ($\approx 10^6$ имп), но обычно ресурс такого

катодного узла ограничивается запылением материалом катода диэлектрической вставки, что приводит к затруднению инициирования катодного пятна. Катодный узел, а, соответственно, и источник электронов в целом начинают в этом случае работать нестабильно, что затрудняет дальнейшее использование последнего. Оценочно, можно сказать, что при обеспечении плазменным катодом средней мощности пучка в ускоряющем промежутке около $P_0=1$ кВт при коэффициенте извлечения электронов $\alpha=0,5$ в результате запыления диэлектрической вставки ресурс стабильной работы такого катодного узла составляет $N \approx 10^5$ импульсов, что составляет не более 12 часов непрерывной работы плазменного катода.

Для подтверждения наличия микрокапель материала катода, образующихся при функционировании катодного пятна по рабочей поверхности катода, был поставлен следующий эксперимент. В плазменный катод напротив катодного узла с инициированием катодного пятна электрическим пробоем по поверхности диэлектрика, описанного в разделе 2.1 и представленного на рисунке 2.4, на расстоянии 100 мм была установлена пластина из нержавеющей стали размером $(90 \times 100 \times 0,2)$ мм, находящаяся под потенциалом полого анода (рис. 3.1). В этом случае данная пластина, как часть полого анода, является коллектором для исследуемых микрокапель.

Данный катодный узел работал при токе разряда $I_p=60$ А, длительности импульсов $t=40$ мкс с частотой их следования $f=20$ с⁻¹ в количестве $N=10^5$ имп. После прохождения указанного количества импульсов тока разряда на коллекторной пластине, фиксирующей микрокапли, был получен отпечаток, представленный на рисунке 3.2 а. Из рисунке 3.2 б видно, что размер микрокапель достигает $\approx(5 \div 10)$ мкм. Результаты исследований элементного состава (рис.3.3), проведённого на сканирующем электронном микроскопе SEM-515 «Philips», оснащенного приставкой для

энергодисперсионного микроанализа, свидетельствуют о наличии на поверхности коллекторной пластины высокого содержания магния.



Рисунок 3.1 – Фотография плазменного катода с установленным коллектором для микрокапель от катодного узла с инициированием катодного пятна электрическим пробоем по поверхности диэлектрика

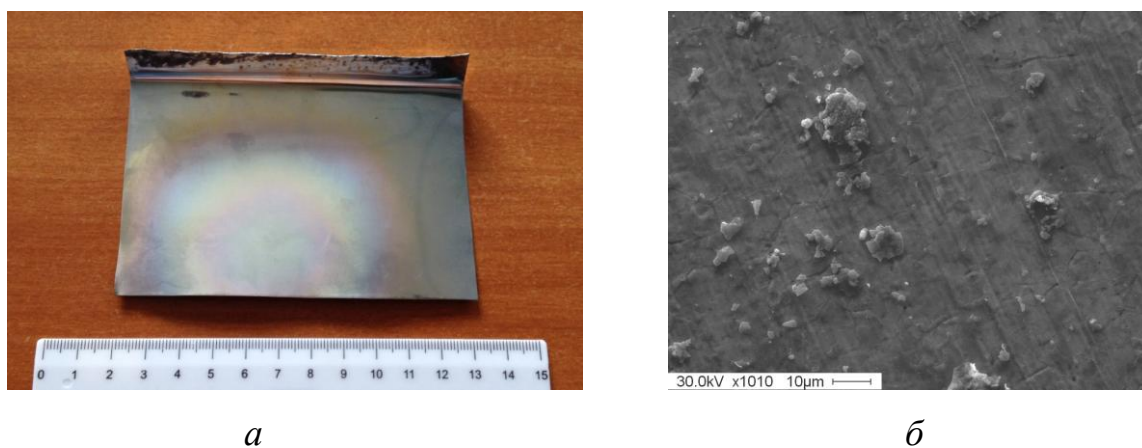
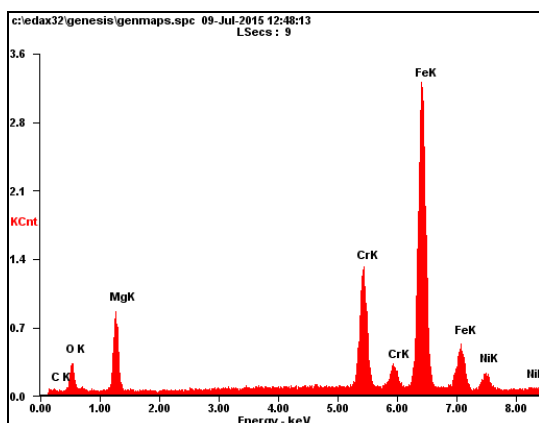


Рисунок 3.2 – Фотография отпечатка (а) и его увеличенный вид (б), оставленного на пластине из нержавеющей стали после работы катодного узла с инициированием катодного пятна электрическим пробоем по поверхности диэлектрика после прохождения $N=10^5$ имп. при токе разряда $I_p=60$ А, длительности импульсов $t=40$ мкс с частотой их следования $f=20$ с⁻¹



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>CK</i>	09.80	22.72
<i>OK</i>	13.51	23.53
<i>MgK</i>	23.46	26.88
<i>CrK</i>	10.67	05.72
<i>FeK</i>	39.38	19.64
<i>NiK</i>	03.18	01.51
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF

Рисунок 3.3 – Энергодисперсионный микроанализ отпечатка, оставленного на коллекторной пластине после работы катодного узла с иницированием катодного пятна электрическим пробоем по поверхности диэлектрика (параметры эксперимента те же, что и для рисунка 3.2)

Проведенные эксперименты подтверждают предположения авторов работ [110, 111, 121] об ухудшении электрической прочности высоковольтного ускоряющего промежутка за счет микрокапель материала катода на электродах разрядной системы, приводящих к усилению на них электрического поля, и возникновению на этих электродах катодного пятна с неограниченной эмиссионной способностью, а, соответственно, к электрическому пробоем ускоряющего промежутка.

В итоге, отметим два существенных недостатка катодного узла с иницированием катодного пятна разрядом по поверхности диэлектрика:

- 1) наличие микрокапель существенно ограничивает параметры источника электронов, снижая его электрическую прочность и стабильность работы;
- 2) низкий ресурс катодного узла, который при $P_0=1$ кВт и $\alpha=0,5$ составляет $N \approx 10^5$ имп. (≈ 12 часов непрерывной работы), исключает стабильную работу на высокой средней мощности пучка. Поэтому рассматриваемый катодный узел для решения задачи по увеличению средней мощности пучка практически не подходит.

В литературном обзоре было показано, что одним из способов увеличения электрической прочности высоковольтного ускоряющего промежутка при использовании катодных узлов на основе дуги низкого давления является их перпендикулярное расположение относительно оси извлечения электронов из плазменного катода в ускоряющий промежуток [24, 113, 121]. В первую очередь это достигается за счет снижения количества микрокапель материала катода на эмиссионной сетке. Для дальнейшего уменьшения количества таких микрокапель на электродах разрядной системы и в области ускоряющего промежутка, была предложена конструкция катодного узла, позволяющая заэкранировать катодное пятно от прямой видимости полого анода путем введения диафрагмирования в полый катод, на поверхности которого внешним магнитным полем удерживается катодное пятно. Подобное решение ранее использовалось в работах [25, 121, 136], однако, у данного решения имеются существенные отличия.

Конструкция предложенного катодного узла и его внешний вид представлены на рисунке 3.4. Инициирование катодного пятна в данном случае происходит в результате «прямого» электрического пробоя в газе, что исключает промежуточные электроды и изоляторы, необходимые для инициирования катодного пятна и подверженные запылению материалом катода (в сравнении с тем же катодным узлом с диэлектрической вставкой [110, 111]). При подаче высоковольтного импульса напряжения амплитудой до ≈ 10 кВ между полым катодом 4 и поджигающим электродом 1, играющим роль полого анода для данной разрядной системы, в газе, напускаемом через отверстие в поджигающем электроде, зажигается тлеющий разряд. Поскольку схема электропитания данной ячейки выполнена без стабилизации тока разряда, это приводит к росту плотности тока на катоде и инициированию на его внутренней поверхности катодного пятна. При этом наблюдается резкое уменьшение напряжения горения разряда, и

тлеющий разряд переходит в другую стадию горения – дуговую с катодным пятном.

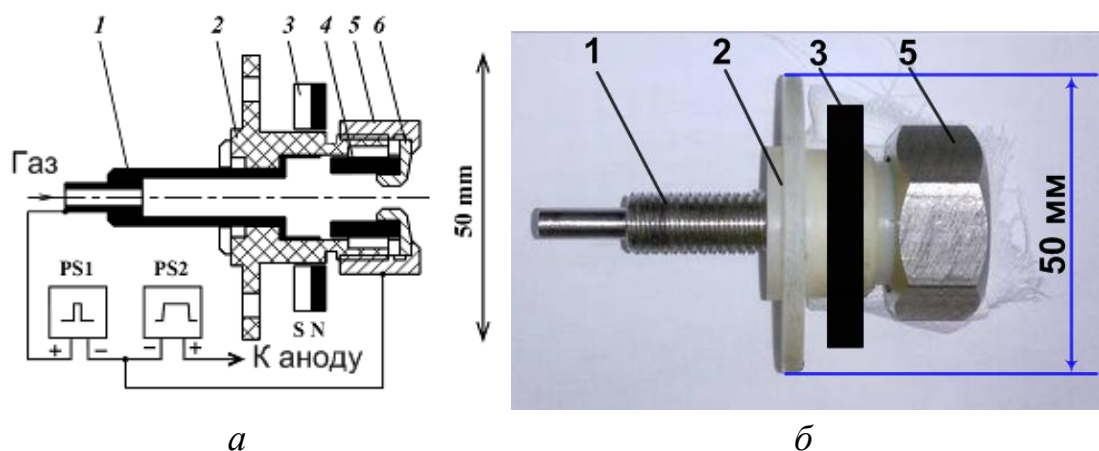


Рисунок 3.4 – Конструкция катодного узла (а) и его внешний вид (б):
 1 – поджигающий электрод; 2 – изолятор; 3 – кольцевой магнит; 4 – магниевый полый катод; 5 – гайка из нержавеющей стали; 6 – ферромагнитная вставка

Для облегчения зажигания разряда и способности разряда стабильно гореть при пониженном давлении рабочего газа, когда горение разряда в основном происходит в парах материала катода – катод выполнен из магния, обладающего сравнительно низкой энергией ионизации (7,6 эВ) и невысокой температурой плавления (650°C) [137]. Так как разряд в ячейке происходит на левой ветви кривой Пашена, применение полых форм как катода, так и поджигающего электрода при фиксированном напуске рабочего газа позволяет снизить напряжение электрического пробоя, необходимое для зажигания тлеющего разряда и перехода его в дугу. Наблюдающаяся при длительной работе эрозия катода несколько увеличивает расстояние между полым катодом и полым поджигающим электродом, но практически не влияет ни на напряжение электрического пробоя данного разрядного промежутка, ни на напряжение горения дугового разряда. Это положительно сказывается на стабильности работы катодного узла плазменного катода и источника электронов в целом.

Из представленной на рисунке 3.5 картины распределения линий магнитного поля в разработанном катодном узле видно, что максимум напряженности магнитного поля находится в расширенной области полого поджигающего электрода 1. Это достигается за счет соответствующего расположения постоянного кольцевого магнита 3. Максимум напряженности магнитного поля в области полого анода, которым для данной разрядной системы является полый поджигающий электрод 1, позволяет увеличивать количество взаимодействий электронов, рожденных в результате бомбардировки поверхности полого катода ионами, с напускаемым в разрядную систему рабочим газом.

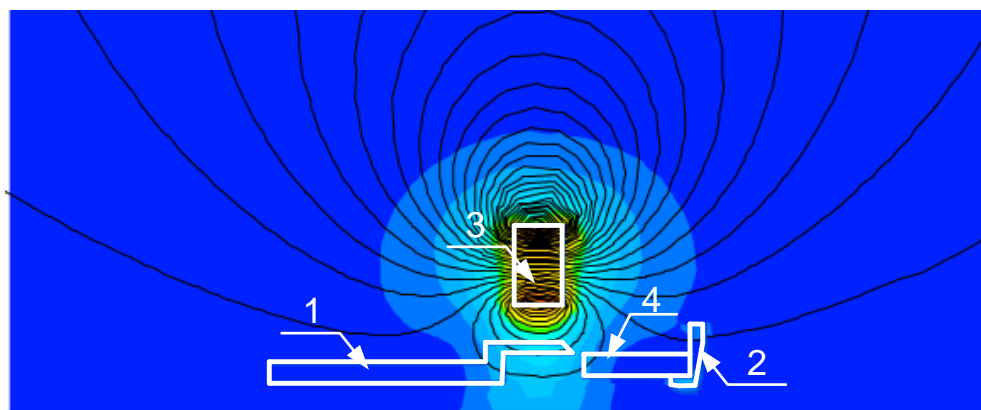


Рисунок 3.5 – Распределение магнитного поля, обеспечиваемого кольцевым магнитом, в новом катодном узле: 1 – поджигающий электрод; 2 – ферромагнитная вставка; 3 – кольцевой магнит; 4 – полый катод

Из [135] известно, что удержание катодного пятна с помощью магнитного поля на поверхности катода обеспечивается за счет свойства катодного пятна смещаться в направлении острого угла, образованного силовыми линиями магнитного поля с поверхностью катода. Поэтому из представленного распределения также видно, что в выбранной геометрии магнитного поля катодное пятно будет удерживаться на внутреннем торце полого катода 4 со стороны поджигающего электрода 1. Поскольку индукция магнитного поля должна быть не менее $(10\div 20)$ мТл [135], то кольцевой

магнит 4 был выбран с индукцией магнитного поля в центральной части кольца 50 мТл. Особенность такого удержания катодного пятна характеризуется стабильным горением разряда при снижении минимального тока дуги до $I_{\min} \approx 5$ А. В случае ухода катодного пятна с рабочего торца катода на боковую поверхность разряд не прекращается, поскольку магнитное поле возвращает катодное пятно обратно на торец катода.

Для определения количества микрокапель материала катода на электродах разрядной системы был проведен эксперимент, аналогичный описанному выше, где напротив нового катодного узла с инициированием катодного пятна электрическим пробоем в газе на расстоянии 100 мм была установлена коллекторная пластина из нержавеющей стали размером (90×100×0,2) мм (рис.3.6).



Рисунок 3.6 – Фотография плазменного катода с установленным коллектором для микрокапель от нового катодного узла с инициированием катодного пятна электрическим пробоем в газе

В этом случае на коллекторной пластине был получен отпечаток, представленный на рисунке 3.7 а. Увеличенный вид полученного отпечатка (рис.3.7 б) показал, что на поверхности коллекторной пластины, обращенной к новому катодному узлу, отсутствуют микрокапли, а энергодисперсионный микроанализ этой поверхности показал практически полное отсутствие

магния (рис.3.8). Высокое содержание углерода в этом случае можно объяснить большим его содержанием в вакуумной камере от диффузионного насоса. Взаимодействие углерода с направленным потоком плазмы из нового катодного узла в область полого анода за счет напуска рабочего газа приводит к образованию на поверхности коллектора углеродистых пленок, которые фиксируются в виде автографа черного цвета диаметром ≈ 20 мм.

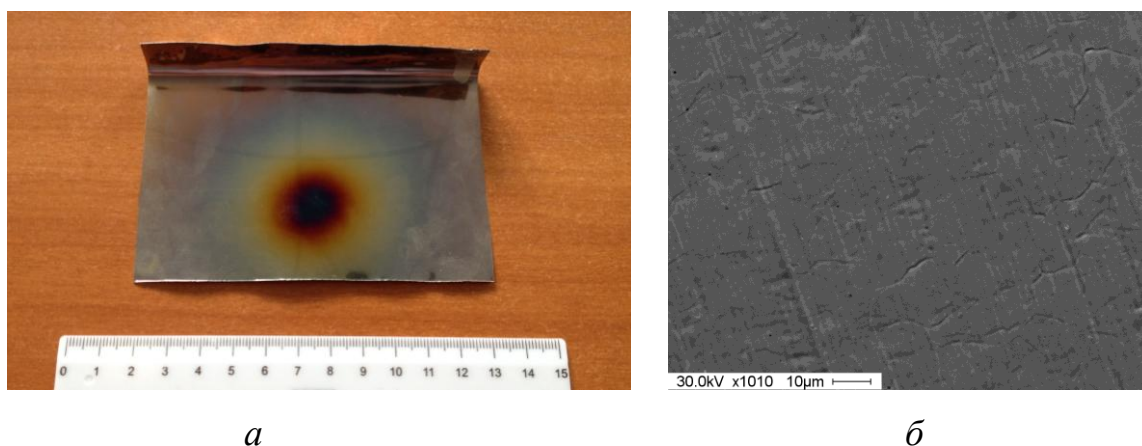
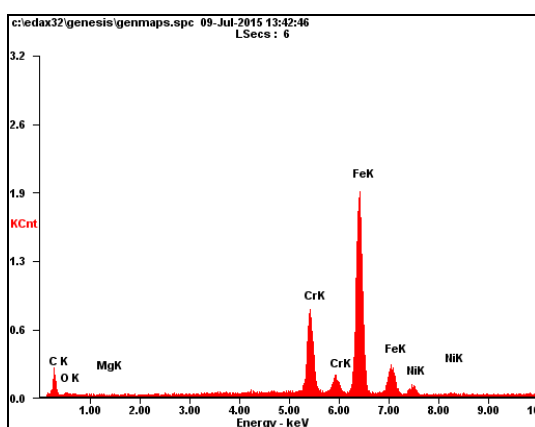


Рисунок 3.7 – Фотография отпечатка (а) и его увеличенный вид (б), оставленного на металлической пластине из нержавеющей стали после работы катодного узла с иницированием катодного пятна электрическим пробоем в газе (параметры эксперимента те же, что и для рис.3.2)



Element	Wt%	At%
CK	47.18	77.48
OK	03.94	04.85
MgK	00.40	00.32
CrK	09.90	03.75
FeK	36.22	12.79
NiK	02.36	00.79
Matrix	Correction	ZAF

Рисунок 3.8 – Энергодисперсионный микроанализ отпечатка, оставленного на коллекторной пластине после работы нового катодного узла с иницированием катодного пятна электрическим пробоем в газе (параметры пучка те же, что и для рис.3.2)

Вероятностные траектории микрокапель с полого катода в область полого анода и эмиссионного электрода основной разрядной системы представлены на рисунке 3.9. Видно, что контрагирующее отверстие позволяет существенно снизить количество микрокапель на электродах основной разрядной системы, удерживая их в основном на электродах катодного узла. Для исключения вероятности электрического пробоя между катодом и поджигающим электродом по диэлектрическому корпусу, также подверженному запылению материалом катода, диаметр полого катода был выбран на 2 мм меньше внутреннего диаметра корпуса.

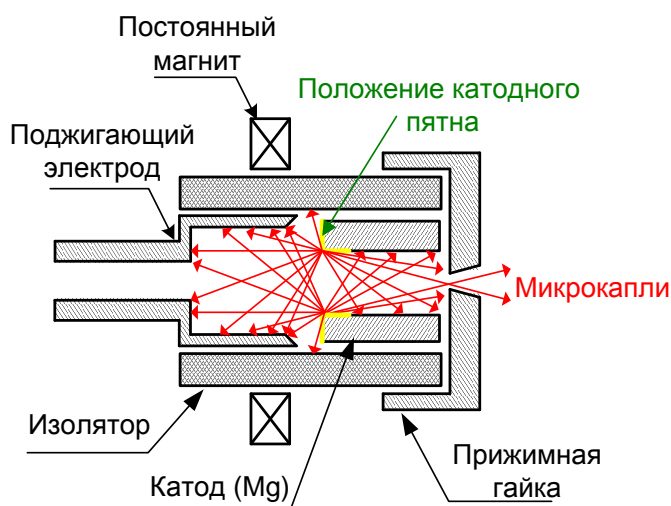


Рисунок 3.9 – Возможные траектории микрокапель с магниевого катода нового катодного узла с инициированием катодного пятна электрическим пробоем в газе

Необходимо отметить, что при использовании катодных узлов на основе ячейки Пеннинга [138] в отверстии одного из электродов, обычно находящегося под плавающим потенциалом, происходит контрагирование дугового разряда, что приводит к повышению напряжения горения разряда. В этом случае с катодной стороны контрагирующего канала образуется плазменный сгусток, окруженный двойным электрическим слоем пространственного заряда, ускоряющим и фокусирующим электроны.

Напряжение на слое обычно составляет (50÷80) В, что обеспечивает высокую ионизирующую способность ускоренных в этом слое электронов [116]. Такое контрагирующее отверстие необходимо для обеспечения дополнительного перепада давлений между областью генерации плазмы и ускоряющим промежутком, что позволяет увеличить электрическую прочность последнего. Но уменьшение расхода газа или увеличение тока разряда приводят к обрыву дуги в канале контрагирования с возможностью появления и стабильного существования каскадной дуги («катод – промежуточный электрод – анод»), имеющей сравнительно высокое напряжение горения, которая, однако, может устойчиво существовать в широком диапазоне значений амплитуд и длительностей разрядного тока [138].

При проектировании нового катодного узла был выбран сравнительно большой диаметр контрагирующего отверстия, равный 4 мм, что позволяет обеспечивать через его сечение большие плотности тока разряда (до ≈ 1 кА/см²) при фиксированной его длительности (до 100 мкс) без обрывов тока дуги, как это наблюдалось в катодных узлах на основе ячейки Пеннинга [120, 138]. Если сравнить ВАХ дуговых разрядов низкого давления в электродных системах с катодными узлами на основе ячейки Пеннинга [83] (рис.3.10, кривая 1), с открытой дугой [111] (рис.3.10, кривые 3,4), и дугой, обеспечиваемой предложенным катодным узлом (рис.3.10, кривые 2,5), видно, что разряд, генерируемый новым катодным узлом, имеет пониженное напряжение горения. Это связано, как с отсутствием влияния внешнего магнитного поля на основной разряд, которое приводит к фактическому уменьшению площади анода, на которую замыкается ток разряда (в сравнении с кривой 1), так и, вероятно, с увеличением степени ионизации плазмы в области полого катода и увеличения за счет этого ее проводимости (в сравнении с кривыми 3,4). Для уменьшения влияния внешнего магнитного поля на ток основного разряда в новом катодном узле введена

ферромагнитная вставка б (рис.3.4), позволяющая исключить магнитный поток от постоянного магнита в пространстве полого анода основного разряда.

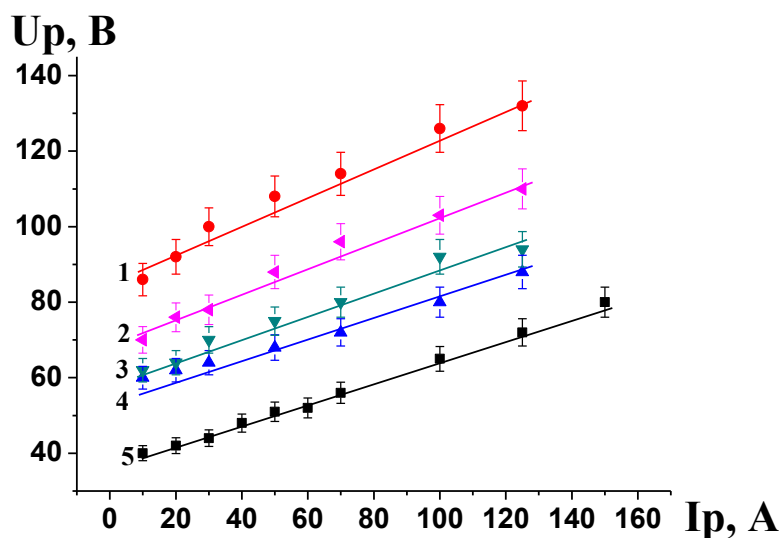


Рисунок 3.10 – ВАХ дуговых разрядов при $p=50$ мПа и $R=0$ Ом при работе различных катодных узлов: 1 – катодный узел на основе ячейки Пеннинга [83]; 3,4 – катодный узел с открытой дугой с вольфрамовым и магниевым катодом, соответственно [111]; 2,5 – новый катодный узел без кольцевого магнита и с кольцевым магнитом, соответственно

В то же время ионизационные процессы, происходящие в катодном узле, а именно увеличенное за счет внешнего магнитного поля количество взаимодействий первичных замагниченных электронов с атомами рабочего и остаточного газа при неизменной длине их свободного пробега, приводит к снижению напряжения в прикатодном слое в отличие от катодного узла с «открытой» дугой [110, 111]. В отсутствие внешнего магнитного поля в новом катодном узле напряжение горения разряда возрастает (рис.3.10, кривая 2), превышая напряжение «открытой» дуги, поскольку количество взаимодействий первичных электронов с рабочим газом при той же длине свободного пробега электронов в этом случае уменьшается. Диаметр

отверстия в предложенном катодном узле, равный 4 мм, был выбран для отсечки плазменного катода от образующихся при функционировании катодного пятна микрокапель материала катода, которые в таком случае имеют низкую вероятность попадания в ускоряющий промежуток (рис. 3.9). Таким образом, новый катодный узел позволяет исключить обрывы тока разряда, связанные с его контрагированием, при пониженном напряжении горения разряда, а также существенно уменьшить (в экспериментах не обнаружены) количество образующихся на электродах разрядной системы микрокапель материала катода.

Ресурсные испытания нового катодного узла показали, что по сравнению с катодным узлом с инициированием катодного пятна пробоем по поверхности диэлектрика увеличенная масса катода, его перепыление и отсутствие диэлектрической вставки позволили уменьшить износ материала катода до $M=0,5$ мкг/Кл и достичь ресурса катода более $N=10^7$ имп. при амплитуде и длительности импульсов тока разряда $I_p=60$ А и $t=40$ мкс, соответственно.

3.2. Разработка, создание и исследование многоапертурного плазменного катода

Вывод электронного ПБС в атмосферу обычно происходит через ВФО. При генерации электронных пучков, сечение которых превышает $S_{\text{п}}=100$ см², в конструкции ВФО присутствует опорная решетка, геометрическая прозрачность которой обычно $\leq 90\%$. В основном при выборе ВФО внимание разработчиков акцентируется на геометрической прозрачности опорной решетки и ее конфигурации (перфорация круглыми [3936, 82, 83], шестигранными [139, 140] или прямоугольными отверстиями [41, 98, 110]), которые определяются режимом работы ВФО, исключающим во время работы источника электронов перегрев выводной фольги, обычно

являющейся самым слабым звеном в конструкции любого ВФО [123], особенно при выводе электронных ПБС с высокой средней мощностью.

Наиболее оптимальная сотовая система размещения круглых отверстий ВФО, необходимая для уменьшения вероятности электрического пробоя на выводную фольгу, не позволяет получать геометрическую прозрачность опорной решетки выше 75%. Введение водяного охлаждения в конструкцию опорной решетки, необходимого для отвода части мощности пучка от опорной решетки и выводной фольги, также приводит к снижению геометрической прозрачности этой решетки. Но чем выше средняя мощность пучка, тем выше абсолютные значения потерь на опорной решетке. В этом случае получаются два противоречивых условия: увеличение площади охлаждения (там, где проходят водяные каналы) приводит к еще большим потерям тока пучка на опорной решетке ВФО, а уменьшение этой площади не позволяет отводить от опорной решетки рассеиваемый в ВФО поток средней мощности, вызванный потерями тока пучка. Выходом из такой ситуации может быть изменение электронно-оптической системы таким образом, чтобы исключить или значительно уменьшить электронный поток на опорную решетку ВФО [141, 142]. В нашем случае при проектировании опорной решетки ВФО ее геометрическая прозрачность составила 56% (см. Главу 2). Поэтому необходимо провести разработку, создание и исследования работы многоапертурного плазменного катода, удовлетворяющего такому решению проблемы, при котором на опорную решетку будет попадать минимальное количество ускоренных электронов.

Для этого на эмиссионную сетку 5 (рис.3.11) с габаритными размерами (750×150) мм и размером ячейки (0,4×0,4) мм, обеспечивающим стабилизацию границы эмиссионной плазмы в плоскости сетки, укладывалась маска 6 из нержавеющей стали толщиной 0,2 мм, фотография которой представлена на рисунке 3.12 а. Маска была перфорирована круглыми отверстиями диаметром (8÷12) мм. Маска укладывалась на

эмиссионную сетку и приваривалась к ней точечной сваркой для улучшения электрического контакта и выравнивания поверхности маски с плоской поверхностью эмиссионной сетки. Такой способ организации эмиссионной поверхности позволяет разделить последнюю на 344 круглых ячейки, которые являются отдельными эмиссионными структурами плазменного катода. Поскольку влияние начальных тепловых скоростей электронов пучка наиболее заметно на краях ПБС [33], то для учета расхождения крайних электронных пучков, отверстия, расположенные по периметру маски были меньшего диаметра (на $\approx (1 \div 4)$ мм) по сравнению с остальными отверстиями маски. В этом случае под действием приложенного ускоряющего напряжения эмиссия электронов осуществляется дискретно с площади плазменной поверхности этих структур, формируя многоапертурную эмиссионную структуру.

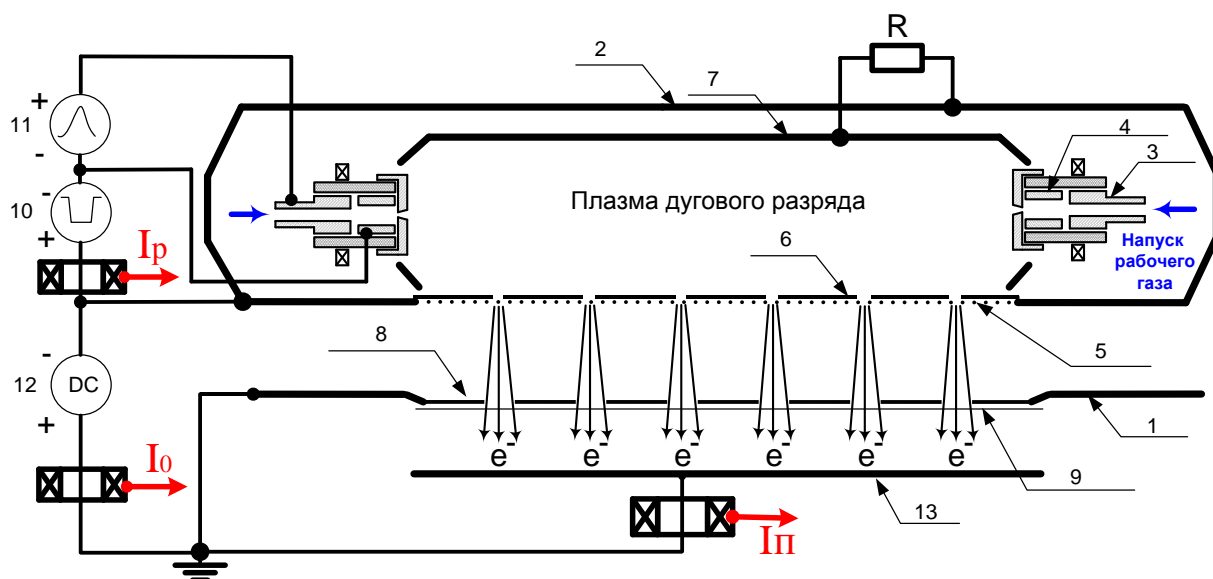


Рисунок 3.11 – Схема макета широкоапертурного источника электронов:
 1 – вакуумная камера; 2 – плазменный катод; 3 – поджигающий электрод;
 4 – цилиндрический магниевый катод; 5 – эмиссионная сетка; 6 – металличе-
 ская маска; 7 – полый анод; 8 – опорная решетка; 9 – выводная фольга;
 10 – источник электропитания разряда; 11 – источник электропитания
 поджига; 12 – высоковольтный источник электропитания; 13 – коллектор

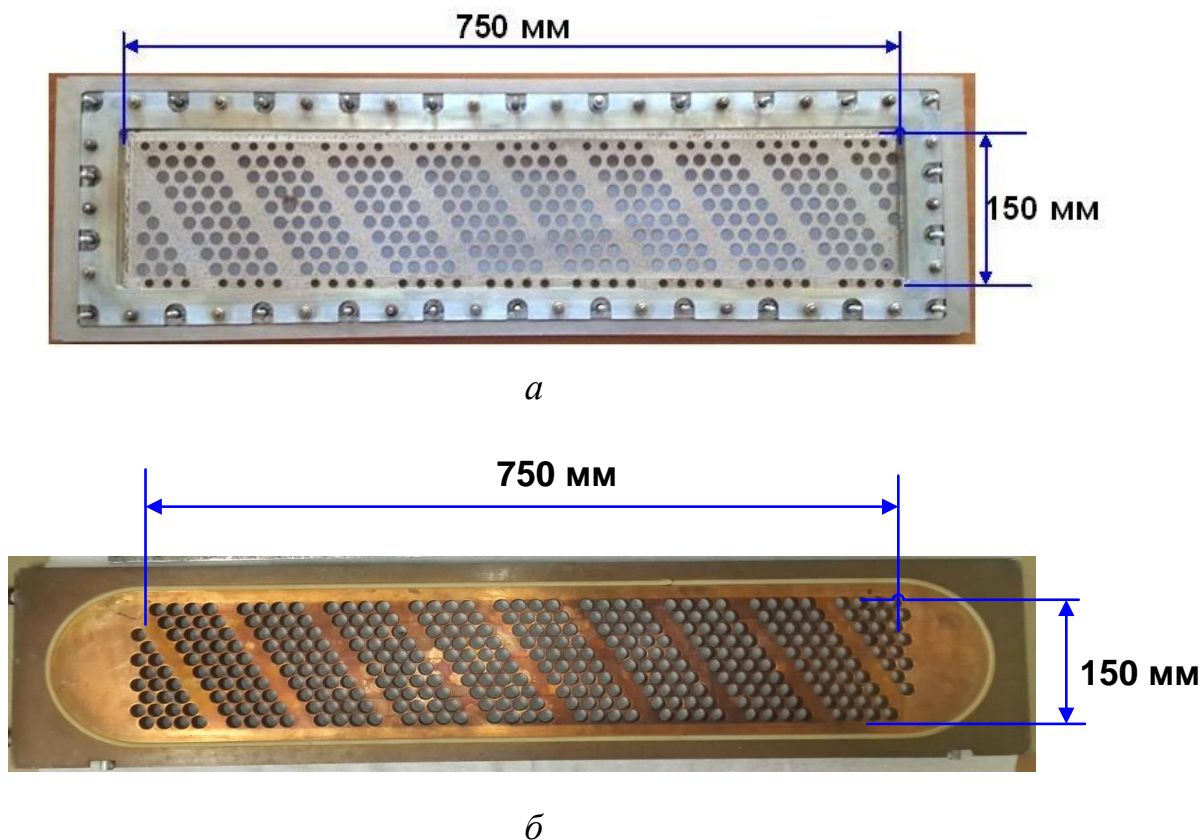


Рисунок 3.12 – Фотография маски, приваренной точечной сваркой к эмиссионной сетке плазменного катода (а), и фотография опорной решетки (б)

В опорной решетке 8 ВФО (рис. 3.12 б) имеется такое же количество соосных отверстий, как и в маске 6 эмиссионной структуры (т.е. 344), но всегда большего диаметра, равного 15 мм. Таким образом, широкий электронный пучок представляет суперпозицию элементарных пучков, сформированных отдельными эмиссионными структурами, плазменная граница которых стабилизирована мелкоструктурной металлической сеткой.

Кроме этого, учитывая сказанное в Разделе 3.1, катодные узлы с иницированием катодного пятна электрическим пробоем по поверхности диэлектрика были заменены на новые катодные узлы на основе дугового разряда низкого давления с иницированием катодного пятна электрическим пробоем в газе (рис.3.11).

При извлечении электронов из плазменного катода в ускоряющий промежуток в отсутствие маски 5 и использовании сетки с ячейкой

(0,4×0,4) мм с общей геометрической прозрачностью равной 44% экспериментально было получено, что максимальный коэффициент извлечения электронов $\alpha \approx 0,6$ достигается при величине сопротивления в цепи полого анода $R \geq 10$ Ом (рис. 3.13 а). Кроме этого, из представленной зависимости видно, что коэффициент извлечения α увеличивается по мере увеличения амплитуды тока разряда I_p . Согласно [98], приэлектродный слой можно считать ионным и его величина l в отсутствие ускоряющего напряжения может быть оценена из равенства ионного тока на анод, определяемого соотношением Бома и законом Чайлда-Ленгмюра для ионного тока:

$$l = \frac{(\varepsilon_0 / n)^{1/2} \varphi_p^{3/4}}{(ekT_e)^{1/4}} \quad (3.1),$$

где ε_0 – электрическая постоянная, n – концентрация плазмы, φ_p – потенциал плазмы относительно эмиссионного электрода, e – заряд электрона, k – постоянная Больцмана, T_e – электронная температура. Таким образом, согласно формуле (1.3) увеличение тока разряда, а, следовательно, увеличение концентрации плазмы приводит к уменьшению приэлектродного слоя, что в свою очередь приводит к увеличению площади открытой плазменной поверхности и увеличению коэффициента извлечения α .

Поскольку геометрическая прозрачность эмиссионной сетки, равная $\approx 50\%$, меньше коэффициента извлечения α , становится явным механизм переключения тока разряда в ячейки эмиссионной сетки под действием провисающего в плазменный катод потенциала высоковольтного анода, роль которого выполняет ВФО. Из рисунке 3.13 видно, что такой способ переключения тока весьма эффективен, поскольку напряжение горения разряда в этом случае изменяется незначительно (рис. 3.13 б), а коэффициент извлечения электронов α увеличивается в более чем два раза (рис. 3.13 а), что повышает эффективность работы плазменного катода [143, 144].

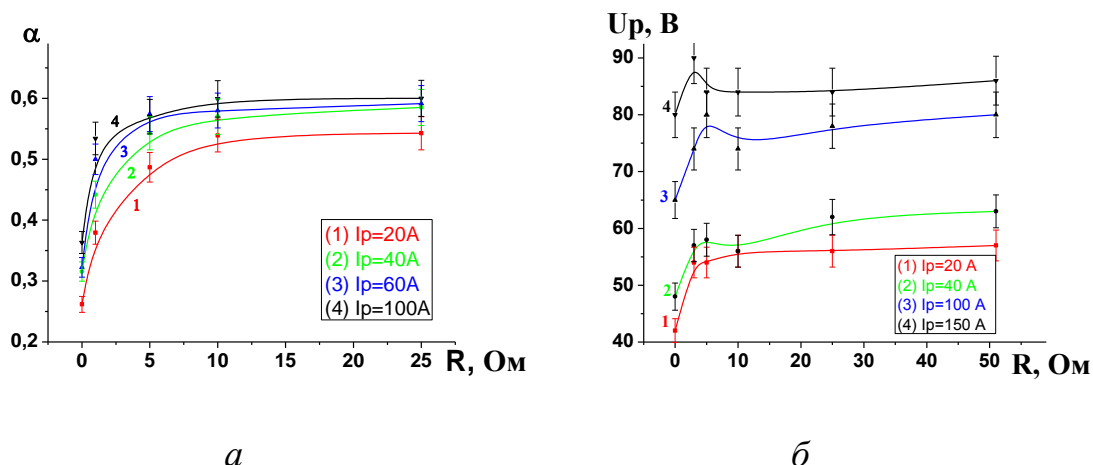


Рисунок 3.13 – Зависимости коэффициента извлечения α электронов из плазменного катода в отсутствие маски при $U_0=160$ кВ (а) и напряжения горения разряда U_p (б) от сопротивления в цепи полого анода R , размер ячейки эмиссионной сетки (0,4×0,4) мм

Влияние величины сопротивления R на переключение тока разряда в область эмиссионной сетки и соответствующий этому рост коэффициента извлечения α определяется, вероятно, динамикой пристеночного ионного слоя пространственного заряда в ячейках эмиссионной сетки. При зажигании разряда и введении в схему сопротивления R на последнем появляется отрицательное относительно анода смещение потенциала (рис.3.14), что приводит к появлению дополнительного потенциального барьера для термализованных электронов плазмы. Дополнительный потенциальный барьер приводит к еще большему запираению термализованных электронов в пространстве полого анода и еще большему числу их столкновений с атомами рабочего газа. Электронам становится легче уйти в область с более низким потенциальным барьером, и основной электронный ток переключается в область эмиссионной сетки.

Другим немаловажным фактором является то, что при величине сопротивления $R=0$ Ом и подаче ускоряющего напряжения разряд переключается в область эмиссионной сетки постепенно (рис.3.15 а). Это

приводит к увеличению длительности переднего фронта импульса тока в ускоряющем промежутке I_0 , достигающего $t_{\phi} \approx 40$ мкс. Но при увеличении сопротивления R передний фронт импульса тока I_0 уменьшается и при $R \geq 10$ Ом форма импульса тока I_0 становится стабильной с более крутым передним фронтом $t_{\phi} \approx 10$ мкс и более выраженной плоской вершиной (рис.3.15 б).

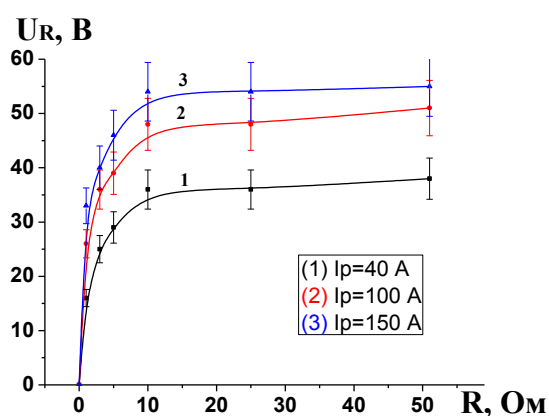


Рисунок 3.14 – Зависимость падения напряжения на сопротивлении R в цепи полого анода от величины этого сопротивления при разных токах разряда I_p

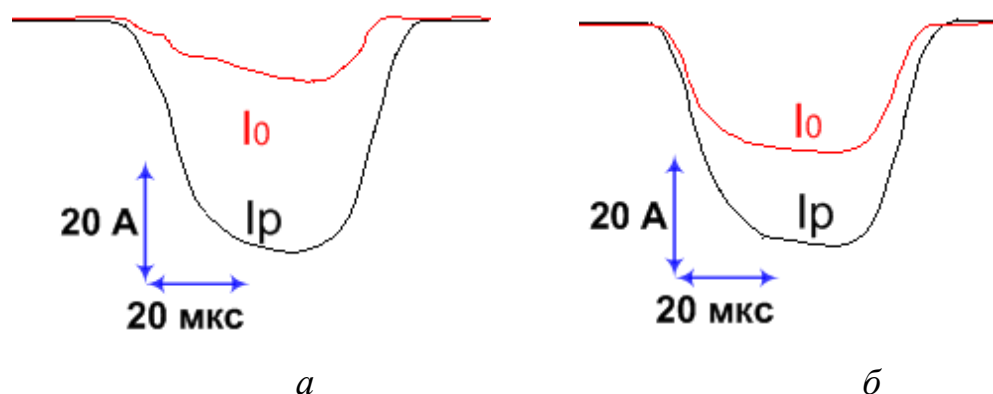


Рисунок 3.15 – Характерные осциллограммы импульсов тока разряда I_p и тока в ускоряющем промежутке I_0 при сопротивлении в цепи полого анода $R=0$ Ом (а) и $R=10$ Ом (б) при ускоряющем напряжении $U_0=150$ кВ и давлении аргона $p=50$ мПа

Распределение параметров плазмы в плазменном эмиттере исследовано численно [145, 146] с применением дрейфово-диффузионной модели, описывающей электронные плотности заряженных частиц (n_e) и их средние энергии (n_ε), как функцию времени и пространства [147]. Уравнения переноса электронов (e) и плотности энергии (ε) имеют вид:

$$\frac{\partial n_{e,\varepsilon}}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_{e,\varepsilon} + \mathbf{E} \cdot \Gamma_{e,\varepsilon} = R_{e,\varepsilon}, \quad (3.2)$$

$$\Gamma_{e,\varepsilon} = -(\mu_{e,\varepsilon} \cdot \mathbf{E})n_{e,\varepsilon} - \mathbf{D}_{e,\varepsilon} \cdot \nabla n_{e,\varepsilon},$$

где $\Gamma_{e,\varepsilon}$ – потоки электронов и энергии, $\mu_{e,\varepsilon}$ – подвижности, \mathbf{E} – электрическое поле, $\mathbf{D}_{e,\varepsilon}$ – коэффициенты диффузии, $R_{e,\varepsilon}$ – скорость ионизации и энергетические потери (или сообщение энергии) из-за неупругих столкновений. Транспортные коэффициенты (коэффициенты разряда), зависят от функции распределения электронов по энергии и вычисляются с помощью программы BOLSIG + [148].

Расчетные кривые [145, 146] (рис. 3.16) показывают, что с увеличением сопротивления R увеличивается концентрация n_e и потенциал плазмы φ_p . Оценки показывают, что увеличение тока в ускоряющем промежутке при фиксированном токе разряда и изменении R от 0 до 10 Ом в эксперименте связано с увеличением плотности хаотического тока (концентрации и температуры плазменных электронов) за счет увеличения числа отраженных от полого анода электронов, которые принимают участие в ионизации газа.

При введении в плазменный катод металлической маски 6 (рис.3.11) с диаметром отверстий 12 мм и общей геометрической прозрачностью $\approx 30\%$, уложенной на эмиссионную сетку с размером ячейки (0,4×0,4) мм, коэффициент извлечения электронов α уменьшается прямо пропорционально геометрической прозрачности маски и при $U_0=160$ кВ и $I_p=60$ А составляет $\alpha \approx 0,6 \times 0,3 \approx 0,2$ (рис.3.17). Используя эмиссионную сетку с размером ячейки (0,4×0,4) мм в диапазоне токов разряда $I_p=(10 \div 100)$ А при длительности

импульса тока разряда на полувысоте $t=40$ мкс, длине ускоряющего зазора $d_0=(70\div 200)$ мм, давлении рабочего газа $p=(20\div 60)$ мПа невозможно было получить коэффициент извлечения α , по абсолютной величине превышающий значение геометрической прозрачности маски. Это связано с толщиной присеточного слоя, расчетная толщина которого в указанных диапазонах была не меньше $l=50$ мкм, что приводило к тому, что извлечение электронов осуществлялось через потенциальный барьер и частично открытую границу эмиссионной плазмы.

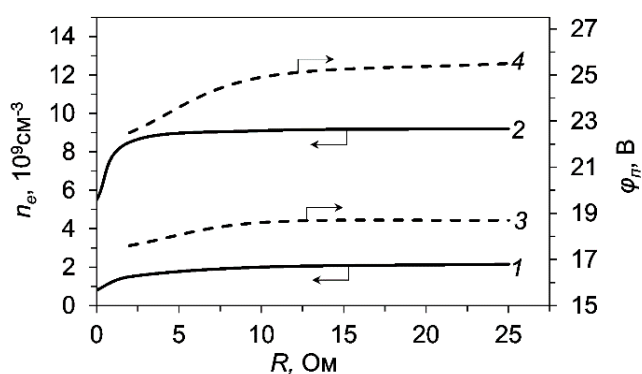


Рисунок 3.16 – Расчетные концентрация плазмы (1,2) и потенциал плазмы (3,4), соответствующие экспериментальным значениям сопротивления в цепи полого анода R . 1, 3 – $I_p = 20$ А; 2, 4 – $I_p = 90$ А

Но из [98] известно, что в отличие от случая эмиссии ионов из плазмы, при отборе из плазмы электронов возможно переключение электронной компоненты тока разряда в ячейки эмиссионной сетки, хотя плазма и не остается инертной к этому отбору и реагирует на отбор из нее электронов повышением своего потенциала. На практике увеличение потенциала плазмы возможно до момента самопроизвольного возникновения катодного пятна на поверхности электродов разрядной системы с отрицательным анодным падением потенциала относительно потенциала плазмы [149]. Это накладывает ограничение на максимальный размер ячейки сетки, поскольку при его увеличении увеличивается коэффициент извлечения α , что приводит

к все большему увеличению потенциала плазмы и связанных с этим нестабильностей токов разряда и эмиссии.

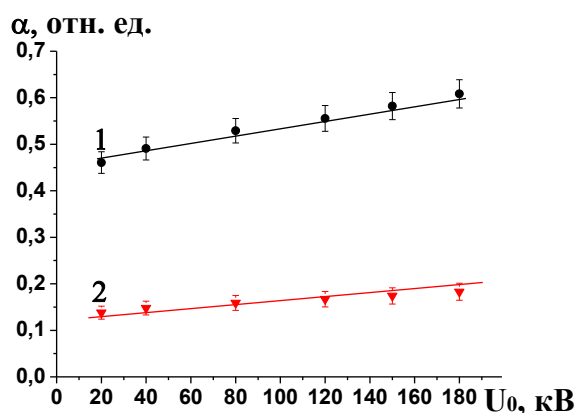


Рисунок 3.17 – Зависимость коэффициента извлечения электронов α от ускоряющего напряжения U_0 при токе разряда $I_p=40$ А: 1 – в отсутствие маски; 2 – с установленной в плазменный катод маской с диаметром отверстий 12 мм: размер ячейки эмиссионной сетки (0,4×0,4) мм; длина ускоряющего зазора $d_0=140$ мм; давление аргона $p=50$ мПа; сопротивление в цепи полого анода $R=10$ Ом

В [100, 101] выделены некоторые общие свойства, характерные для эмиссии электронов из плазмы. В этих работах на основе анализа процесса эмиссии электронов из плазмы было получено соотношение, позволяющее определить максимальный коэффициент извлечения электронов α в условиях устойчивой работы плазменного катода:

$$\frac{GS_e}{(S_e + S_a)} \leq 1, \quad (3.3)$$

где S_e – площадь эмиссионной поверхности плазмы, S_a – суммарная площадь анода, включая поверхность всех электродов, на которые могут уходить электроны из разрядного промежутка, G – параметр разряда, приблизительно равный отношению плотности хаотического тока электронов в плазме к плотности электронного тока на анод в отсутствие отбора электронов из плазмы. Коэффициент G зависит от условий ионизации и для разрядов с

отрицательным анодным падением потенциала находится в пределах $G \approx (2 \div 20)$. Зная это, можно сказать, что наибольший коэффициент извлечения α , при котором источник электронов работает стабильно, возможен при $G=2$, когда $\alpha=0,5$. В наших экспериментах в отсутствие маски максимальное значение коэффициента α , выше которого нарушалась стабильность работы источника, составляло около $\alpha=0,7$.

Для последующих экспериментов по выводу электронного пучка из ускоряющего промежутка в атмосферу перспективно дальнейшее уменьшение диаметра отверстий в маске, что существенно облегчает юстировку этих отверстий в маске и опорной решетке ВФО (см. Раздел 3.3). Но в случае с сеткой с размером ячейки $(0,4 \times 0,4)$ мм и маской с отверстиями диаметром 12 мм с общей геометрической прозрачностью 30% коэффициент извлечения α не превышает значения $\alpha \approx 0,25$, то есть по сравнению с экспериментом без маски коэффициент α уменьшился прямо пропорционально уменьшению площади эмиссии за счет маскирования. Был сделан вывод, что без принятия дополнительных мер дальнейшее уменьшение отверстий в маске приведет к большему уменьшению коэффициента α , что крайне нежелательно, поскольку в этом случае приходится работать с большими токами разряда, что приводит к значительной выработке катодов и, как следствие, к сокращению срока службы катодных узлов источника электронов. Кроме того, в разряде потребляется значительная (для вакуумного случая) мощность, часть которой выделяется на электродах разрядной системы, приводя к их нагреву. Снятие (отведение) этой мощности затруднено, поскольку эти электроды находятся на стороне высокого потенциала.

Также, из [98] известен механизм переключения тока разряда в область эмиссионной сетки. Суть его заключается в переключении электронной компоненты тока разряда на электрод разрядной системы, имеющий положительное смещение потенциала относительно остальных электродов

этой системы. При наличии высокого ускоряющего напряжения положительный потенциал ВФО, проникает сквозь ячейки эмиссионной сетки в плазменный катод. Это приводит к переключению плазменных электронов в область эмиссионной сетки и их выходу через ячейки сетки в ускоряющий промежуток, а соответственно, к росту коэффициента извлечения электронов α .

Для облегчения юстировки отверстий в маске и опорной решетке при наличии эффекта переключения тока разряда в ячейки эмиссионной сетки был поставлен эксперимент, в котором отверстия в маске были уменьшены до диаметра 8 мм, а для облегчения переключения тока разряда в ячейки эмиссионной сетки, и тем самым, увеличения коэффициента извлечения α эмиссионная сетка была заменена на сетку с размером ячейки (0,6×0,6) мм.

При установке в плазменный катод сетки с размером ячейки (0,6×0,6) мм, но в отсутствие маски, источник электронов работает очень нестабильно (рис. 3.18 *a*). При появлении высокого ускоряющего напряжения и зажигания разряда на импульсах токов как разряда, так и эмиссии появляются высокочастотные модуляции с частотой около (1÷2) МГц. Обнаруживается влияние высокого напряжения на форму и амплитуду тока разряда, снижение электрической прочности ускоряющего промежутка и стабильности работы источника электропитания плазменного катода вплоть до выхода из строя элементов его электрических схем. Несмотря на это можно явно наблюдать увеличение коэффициента α , который при токе разряда $I_p=20$ А, ускоряющем напряжении $U_0=160$ кВ и длине ускоряющего зазора $d_0=120$ мм был около $\alpha=0,75$ (рис. 3.19 *a*). Это также можно объяснить увеличением площади открытой плазменной эмиссионной поверхности при том же пристеночном слое, что и при ячейке сетки (0,4×0,4) мм, поскольку измерения осуществлялись при одинаковом токе разряда и давлении рабочего газа (аргона) в камере, равного $p=50$ мПа.

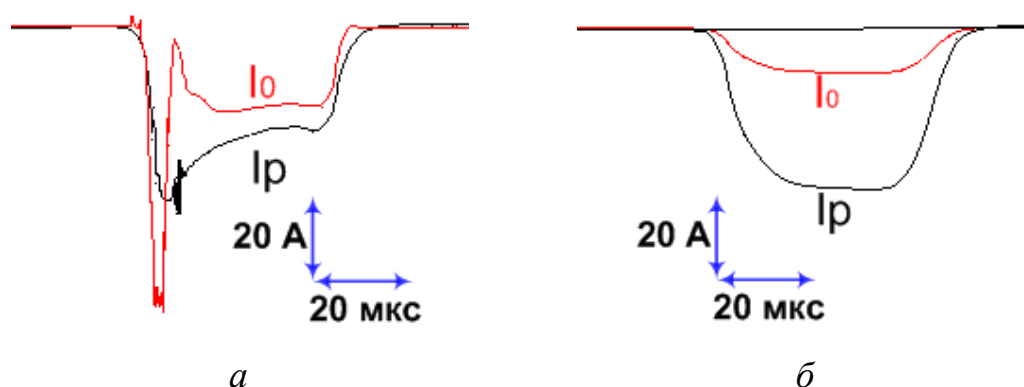


Рисунок 3.18 – Характерные осциллограммы токов разряда I_p и тока в ускоряющем промежутке I_0 при $U_0=150$ кВ: (а) – в отсутствие маски; (б) – с маской с отверстиями диаметром 8 мм и геометрической прозрачностью 13%, размер ячейки эмиссионной сетки (0,6×0,6) мм

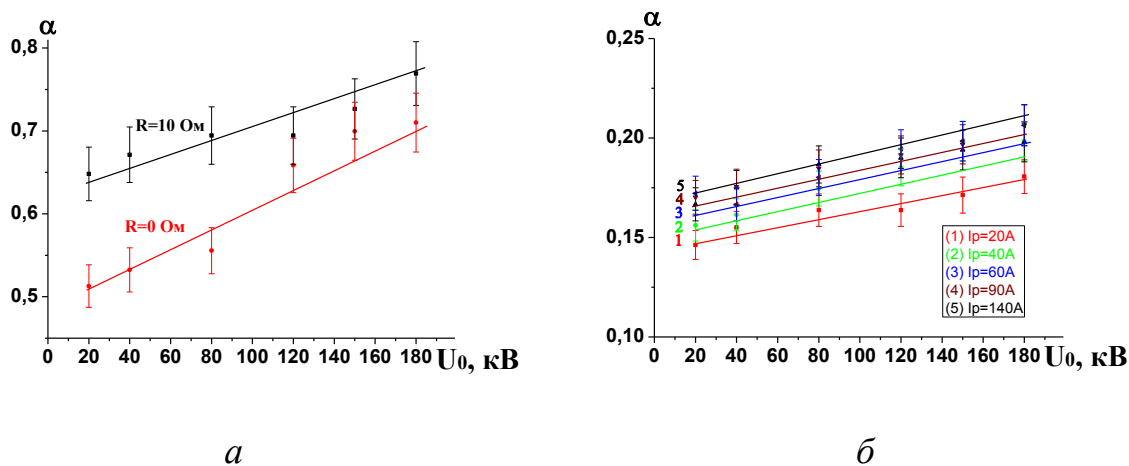


Рисунок 3.19 – Зависимости коэффициента извлечения α от ускоряющего напряжения U_0 : (а) – в отсутствие маски при токе разряда $I_p=40$ А; (б) – с маской с отверстиями диаметром 8 мм и геометрической прозрачностью 13% при $R=10$ Ом: размер ячейки эмиссионной сетки (0,6×0,6) мм, длина ускоряющего промежутка $d_0=140$ мм, давление аргона $p=50$ мПа

При введении в плазменный катод маски с диаметром отверстий 8 мм и геометрической прозрачностью равной 13%, уложенной на эмиссионную сетку с размером ячейки (0,6×0,6) мм, на импульсах токов разряда и эмиссии прекращаются все высокочастотные модуляции, а ускоряющее напряжение

перестает влиять на форму и амплитуду импульса тока разряда (рис. 3.18 б). Это возвращает одно из главных преимуществ использования плазменного катода, а именно обеспечивает независимую регулировку параметров тока пучка (амплитуда, длительность и частота следования импульсов) путем регулировки тока разряда.

В этом случае были получены зависимости коэффициента извлечения α от ускоряющего напряжения U_0 при разных токах разряда I_p (рис. 3.19 б). Например, при $I_p=100$ А, $U_0=160$ кВ и геометрической прозрачности маски 13% достигается коэффициент извлечения $\alpha \approx 0,2$. Форма импульса тока в ускоряющем промежутке в этом случае имеет слегка нарастающую плоскую вершину, при фиксированном токе разряда (рис.3.20).

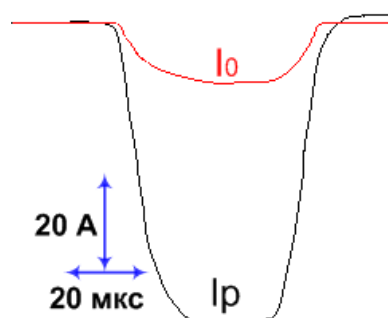


Рисунок 3.20 – Характерные осциллограммы импульсов тока разряда I_p и тока в ускоряющем промежутке I_0 в экспериментах с установленной в эмиттер маской перфорированной отверстиями диаметром 8 мм, уложенной на эмиссионную сетку с размером ячейки (0,6×0,6) мм при ускоряющем напряжении $U_0=160$ кВ, сопротивлении в цепи полого анода $R=10$ Ом, длине ускоряющего промежутка $d_0=140$ мм и давлении аргона $p=50$ мПа

Полученные данные хорошо согласуются с моделью переключения тока разряда в ячейки эмиссионной сетки под действием прикладываемого ускоряющего напряжения [103], а нарастание тока в ускоряющем промежутке может свидетельствовать, например, о росте концентрации

плазмы в течение импульса тока разряда и постепенном уменьшении толщины пристеночного слоя в ячейках сетки.

Кроме этого, известно, что использование плазменных катодов, в которых эмиссия осуществляется лишь с определенных участков, ограниченных эмиссионной сеткой, позволяет стабилизировать параметры генерируемого пучка [138,150–154]. Вероятно, это также связано с уменьшением влияния высокого ускоряющего напряжения на параметры эмиссионной плазмы. Кроме этого, при введении в плазменный катод металлической маски с низкой геометрической прозрачностью между областями генерации плазмы и ускорения электронов образуется дополнительный перепад давлений. Это было подтверждено экспериментально путем измерения давления рабочего газа в трех зонах установки. В электродной системе источника электронов (рис.3.21) устанавливалось три манометрических преобразователя марки ПМИ-2: за плазменным катодом Р1 (над диффузионным насосом), в плазменном катоде Р2 и в ускоряющем промежутке Р3. В первом эксперименте маска в плазменном катоде отсутствовала и, используя вакуумметр ВИТ–3, были измерены показания преобразователей, которые при разных напусках рабочего газа показали практически одинаковые значения. Во втором эксперименте было показано, что при введении в плазменный катод металлической маски с общей геометрической прозрачностью $\approx 13\%$, при напуске рабочего газа (аргона) с расходом $Q \approx 0,1 \text{ м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$ и давлении рабочего газа в ускоряющем промежутке 20 мПа, в плазменном катоде давление было в $\approx 1,5$ раза выше и составляло ≈ 30 мПа. Это позволяет организовать стабильную работу плазменного катода с увеличенной электрической прочностью высоковольтного ускоряющего промежутка, поскольку возможна работа при несколько пониженном напуске рабочего газа (с $Q \approx 0,1 \text{ м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$ без маски до $Q \approx 0,07 \text{ м}^3 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}^{-1}$ с маской). Если ввести количественный показатель стабильности работы источника электронов S ,

обратно пропорциональный количеству электрических пробоев $N_{пр}$ на 1000 импульсов тока пучка ($S=1/N_{пр}$), то по предварительным оценкам стабильность работы S источника электронов, увеличилась обратно пропорционально геометрической прозрачности маски, установленной в плазменный катод. Так, стабильность была увеличена с $S \approx 2$ до $S \approx 12$.

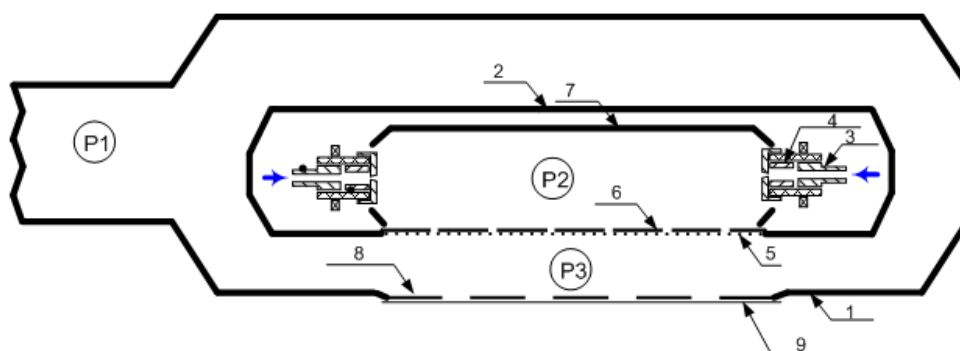


Рисунок 3.21 – Схема эксперимента по измерению давления в различных зонах источника электронов тремя преобразователями марки ПМИ-2: над диффузионным насосом P1, в плазменном катоде P2 и в ускоряющей промежутке P3: 1 – вакуумная камера; 2 – корпус плазменного катода; 3 – поджигающий электрод; 4 – полый катод; 5 – эмиссионная сетка; 6 – металлическая маска; 7 – полый анод; 8 – опорная решетка; 9 – выводная фольга

Для дальнейшего обсуждения процессов, происходящих при отборе из плазменного катода электронов, необходимо описать механизм генерации плазмы в электродной системе плазменного катода. Электроны, рожденные в результате функционирования катодного пятна, ускоряются в прикатодном слое и поступают в пространство полого анода 7 основного разряда с энергией примерно соответствующей напряжению горения разряда. В результате взаимодействия этих первичных электронов с атомами напускаемого газа, происходит ионизация последнего. Поскольку площадь анода в этом случае многократно превышает площадь катода и электроны, обладающие большей подвижностью, чем рожденные в результате

ионизации рабочего газа ионы, могут легко уйти на полый анод 7, то для сохранения баланса токов и напряжений плазма реагирует на уход из нее электронов повышением своего потенциала [98]. При прикладывании ускоряющего напряжения в ячейках эмиссионной сетки появляется провисающее в них электрическое поле, уменьшающее потенциальный барьер для термализованных электронов плазмы. Эти электроны, захваченные электрическим полем ускоряющего промежутка, также извлекаются из плазмы, что опять же приводит к еще большему возрастанию ее потенциала относительно электродов разрядной системы. Но увеличение потенциала плазмы относительно стенок полого анода всегда ограничено. Например, такое увеличение потенциала плазмы может привести к образованию на поверхности полого анода катодного пятна, возникновению высокочастотных шумов тока разряда, искажениям его формы и амплитуды и др. Образованное на стенке полого анода катодное пятно приводит к локальному росту плотности плазмы и, как следствие, к неконтролируемому увеличению тока разряда с соответствующим увеличением эмиссионного тока. Это, в свою очередь, стимулирует пробой высоковольтного ускоряющего промежутка [149]. Из [149] также известно, что на повышение потенциала плазмы существенное влияние могут оказывать высокоэнергетичные ионы, попадающие в плазменный катод из ускоряющего промежутка через эмиссионную сетку, геометрическая прозрачность которой всегда меньше единицы.

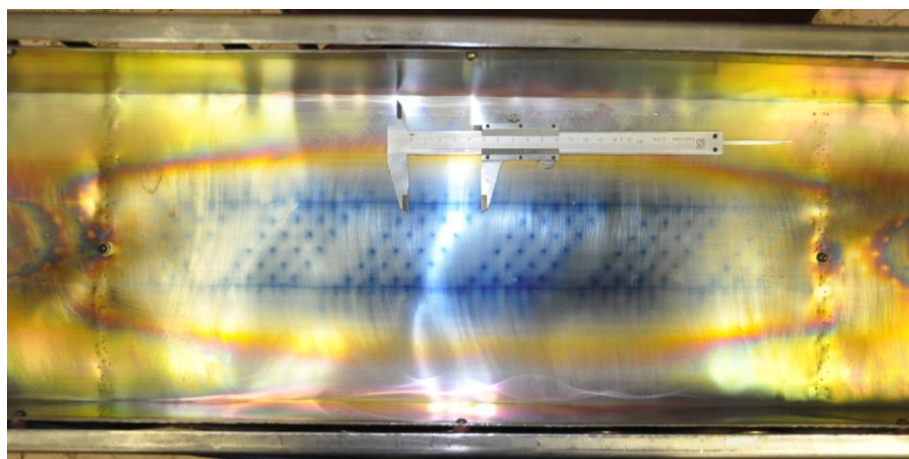
О наличии в ускоряющем промежутке ионов свидетельствует автограф ионного пучка, оставленный на эмиссионной сетке 5 (рис. 3.22 *a*) и полом аноде 7 (рис. 3.22 *б*) (см. рис. 3.11).

Эксперимент проводился в отсутствие в плазменном катоде маски (рис. 3.23). Несколько уменьшенные габаритные размеры отпечатка ионного пучка на эмиссионной сетке, и еще меньшие на экране связаны, вероятно, с наличием в месте контакта вакуумной камеры с опорной решеткой

«ступеньки», приводящей к фокусировке ионного пучка. Как уже отмечалось, в данном случае ионы могут родиться, например, в результате ионизации десорбированного с поверхности выводной фольги и опорной решетки газа.



a



б

Рисунок 3.22 – Отпечатки ионного пучка, оставленные на эмиссионной сетке со стороны высоковольтного ускоряющего промежутка (*a*) и на полом аноде разряда (*б*), полученные в экспериментах в отсутствие маски в плазменном катоде

Кроме этого, из анализа автографа, представленного на рис. 3.22 установлено, что каждый ионный пучок, сформированный в канале опорной решетки ВФО, имеет диаметр всегда меньший, чем диаметр отверстий в опорной решетке, что также, вероятно, связано с фокусировкой каждого

такого пучка в отдельности под действием провисающего в отверстия опорной решетки электрического поля высоковольтного ускоряющего промежутка. Это подтверждается результатами численного моделирования процессов эмиссии электронов из плазменного катода и формирования пучка большого сечения [145, 146].

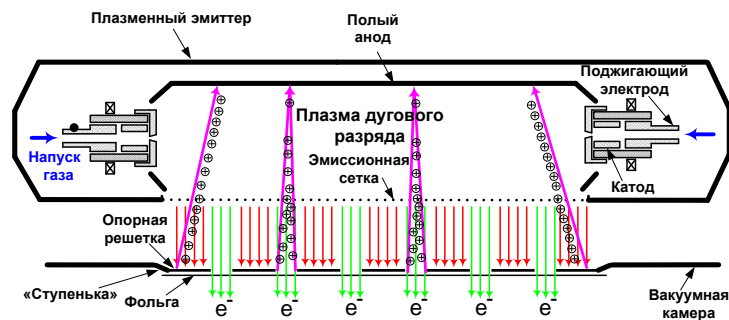


Рисунок 3.23 – Траектории электронного и ионного пучков

В итоге, отсутствие в плазменном катоде маски приводит к тому, что часть ионного потока достигает эмиссионной сетки, выбивая вторичные электроны в количестве, пропорциональном коэффициенту вторичной ионно-электронной эмиссии, который определяется материалом катода и энергией ионов [83]. Другая часть ионного потока, определяемая геометрической прозрачностью эмиссионной сетки, инжектируется в эмиссионную плазму и частично достигает полого анода 7 разрядной системы. Это, во-первых, должно приводить к увеличению потенциала плазмы [98], а, во-вторых, к выбиванию с полого анода 7 вторичных электронов [83].

Все это негативно сказывается на электрической прочности ускоряющего промежутка, что связано с увеличением потенциала эмиссионной плазмы, неконтролируемым увеличением эмиссионного тока, связанным с ионно-электронной эмиссией, зарядкой диэлектрических включений, всегда присутствующих при использовании паромасляной диффузионной системы откачки и др. Снижение электрической прочности

высоковольтного ускоряющего промежутка сопровождается взаимозависимостью параметров пучка, поскольку процессы, происходящие в ускоряющем промежутке существенно влияют на процессы, происходящие в разрядном промежутке, в котором генерируется эмиссионная плазма.

Таким образом, важно отметить, что траектории электронов, эмитированных из плазменного катода и практически по нормали ускоренных к ВФО, и траектории образованных вследствие ионизации десорбированного газа ионов, ускоренных в результате фокусировки под некоторым углом к эмиссионной сетке, существенно отличаются. Зная это, можно значительно уменьшить часть ионного потока, инжектируемого в эмиссионную плазму и приводящего к увеличению ее потенциала, что также достигается наличием в плазменном катоде маски с низкой геометрической прозрачностью, которая при диаметре основных отверстий 8 мм составляла $\approx 13\%$ (рис. 3.11). Но поскольку с учетом геометрической прозрачности эмиссионной сетки, равной $\approx 50\%$, суммарная геометрическая прозрачность эмиссионного электрода получается около 7% (когда в плазменном катоде маски нет геометрическая прозрачность эмиссионного электрода равна геометрической прозрачности эмиссионной сетки и составляет $\approx 50\%$), преимущественная часть ионного потока участвует в ионно-электронной эмиссии. Такой способ снижения потенциала эмиссионной плазмы возвращает одно из главных преимуществ плазменного катода, а именно независимую регулировку параметров пучка.

3.3. Вывод электронного ПЭС из вакуума в атмосферу

Исследования эмиссионной способности многоапертурного плазменного катода позволили сделать заключение о перспективности использования таких эмиттеров в электронных источниках, в которых вывод ускоренного электронного пучка осуществляется через ВФО, в конструкции которого присутствует опорная решетка, имеющая отверстия, соосные с отверстиями в маске, укладываемой на эмиссионную сетку. Главным образом, это перспективно с точки зрения уменьшения или исключения потерь тока пучка на ребрах опорной решетки [141–145].

Для проверки данного утверждения при использовании многоапертурного плазменного катода был поставлен ряд экспериментов по выводу электронного пучка в атмосферу через ВФО, в водоохлаждаемой опорной решетке которого выполнены отверстия диаметром 15 мм при общей ее геометрической прозрачности 56%.

На рисунке 3.24 (кривая 1) представлена зависимость коэффициента вывода тока пучка β из ускоряющего промежутка в атмосферу без установленной в плазменный катод маски. Видно, что по мере роста ускоряющего напряжения происходит увеличение коэффициента вывода электронного пучка из ускоряющего промежутка в атмосферу β .

Сравнивая результаты эксперимента с данными, полученными в [38], можно констатировать, что в отсутствие маски при увеличении энергии электронов посредством увеличения ускоряющего напряжения увеличение коэффициента вывода пучка β происходит только за счет увеличения прозрачности фольги для высокоэнергетических электронов [143–145]. Таким образом, потери тока в опорной структуре ВФО в исследованном диапазоне энергий электронов пучка слабо зависят от величины ускоряющего напряжения, что можно объяснить малой угловой

расходимостью сформированного электронного пучка, связанной с относительно низкой температурой электронов, извлекаемых из плазменного катода. Слабая зависимость коэффициента β от момента его фиксации по длительности импульса тока пучка $t_{и}$ (рис. 3.24, кривая 3) подтверждает стабильность работы источника электронов во всем временном диапазоне импульса тока пучка с слабо изменяющимся во времени коэффициентом β , даже при допущении, что параметры эмиссионной плазмы несколько меняются во времени.

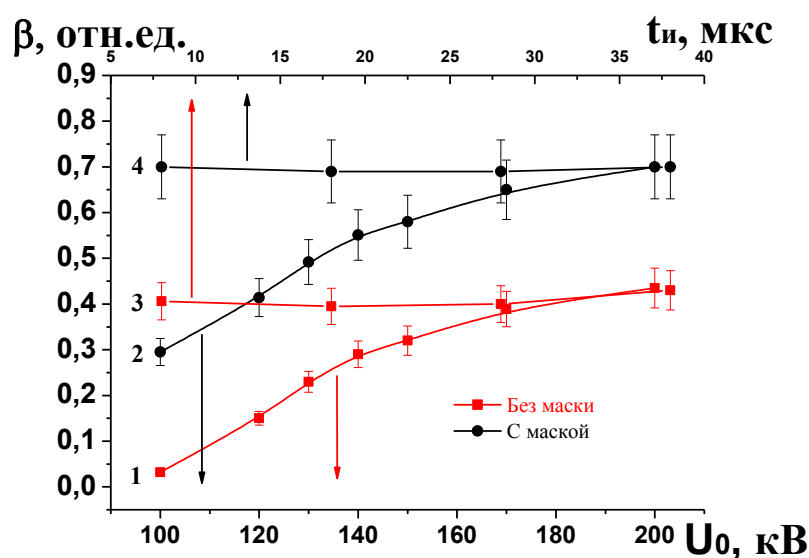


Рисунок 3.24 – Зависимости коэффициента вывода пучка β от величины ускоряющего напряжения и момента фиксации коэффициента β по длительности импульса $t_{и}$. 1,3 – без маски; 2,4 – с установленной в плазменный катод маской с отверстиями диаметром 12 мм при диаметре соосных отверстий в опорной решетке 15 мм; размер ячейки эмиссионной сетки (0,4×0,4) мм

Теоретические оценки расфокусировки электронного пучка из-за влияния поперечных скоростей электронов были выполнены в среде «ELCUT». Данная среда позволяет оценить отклонение единичного электрона при влете его в ускоряющий промежуток с начальной скоростью в

заданном направлении. Но в данной расчетной среде не учитываются релятивистские эффекты; не учитывается пространственный заряд в уравнениях движения (аппроксимация бесконечно малым током); не учитываются физические свойства плазменного катода, таким образом, все частицы в пучке имеют одинаковую точку вылета и кинетическую энергию; электростатическое поле внутри конечного элемента изменяется линейно.

В результате расчет отклонения траектории электронов в ускоряющем промежутке происходил при следующих условиях: начальная скорость 50 эВ, угол вылета начального электрона меняется в диапазоне $(0 \div 90^\circ)$ относительно оси извлечения электронного пучка (рис. 3.25). Было получено, что при таких условиях (специально взятых с грубыми допущениями) максимальное расширение пучка составляет около 3 мм. Поэтому, исходя из имеющихся отверстий в опорной решетке ВФО, диаметр которых равен 15 мм, в первых экспериментах отверстия в маске были выполнены диаметром 12 мм.

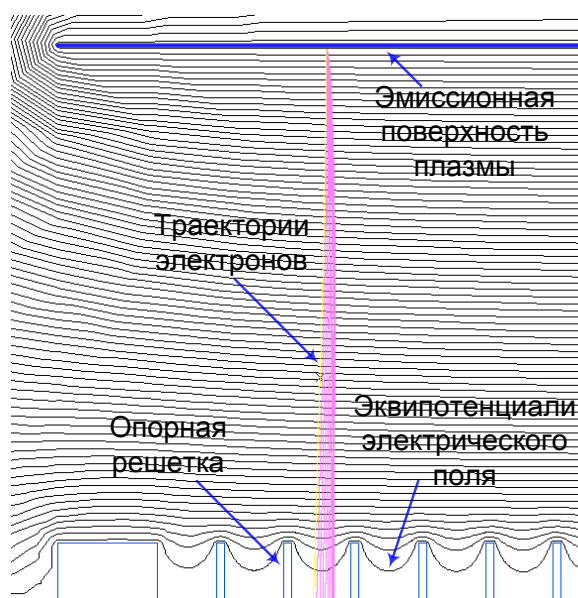


Рисунок 3.25 – Расчет траектории одиночных электронов, вылетевших с одной точки плазменного катода с энергией 50 эВ и углом вылета от 0 до 90°

В экспериментах по минимизации потерь в опорной структуре ВФО с установленной в плазменный катод маской с отверстиями диаметром 12 мм,

были получены зависимости, представленные на рисунке 3.24 (кривые 2, 4). В этом случае потери тока в опорной структуре ВФО при ускоряющем напряжении 200 кВ были уменьшены с 60% до 30%. Из данных [38], при ускоряющем напряжении 200 кВ в алюминиевой фольге толщиной 30 мкм теряется около 12% электронного тока. Можно предположить, что остальные 18% приходятся как на высокоэнергетические электроны, отраженные от выпускной фольги [26], ионы, образующиеся в результате взаимодействия отраженных электронов с десорбированным газом, так и на потери пучка на опорной решетке ВФО, вызванные неидеальностью юстировки отверстий в маске и опорной решетке ВФО.

Для облегчения юстировки отверстий в опорной решетке и маске и исключения вероятности попадания высокоэнергетического электронного потока на ребра опорной решетки, отверстия в маске были уменьшены до диаметра 8 мм. Коэффициент вывода тока пучка β при ускоряющем напряжении $U_0=200$ кВ был увеличен до $\beta=0,75$. Предполагая, что в этом случае все ускоренные электроны попадают в отверстия опорной решетки ВФО, и зная, что при $U_0=200$ кВ $\approx 12\%$ от тока в ускоряющем промежутке теряется в выводной фольге [38] (в эти 12% входят также отраженные от фольги электроны), тогда в ускоряющем промежутке в результате взаимодействия пучка с десорбированным с ВФО газом около 13% от тока в ускоряющем промежутке приходится на ионную составляющую.

Это предположение было подтверждено теоретическими оценками [145, 146], которые показали, что при ускоряющем напряжении $U_0=200$ кВ и условии отсутствия потерь тока пучка на ребрах опорной решетки на ионную составляющую тока в ускоряющем промежутке приходится 12%, что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Измерения мощности пучка, выведенного в атмосферу, используя водоохлаждаемый коллектор, описанный в Разделе 2.3, показали, что при ускоряющем напряжении $U_0=200$ кВ, токе в ускоряющем

промежутке $I_0=16$ А, длительности импульса $t_{и}=40$ мкс, частоте следования импульсов $f=50$ с⁻¹ и средней мощности пучка в ускоряющем промежутке около $P_0\approx 6,4$ кВт из ускоряющего промежутка через ВФО был выведен пучок средней мощностью около $P_{п}\approx 4$ кВт. Дальнейшее увеличение мощности пучка было ограничено мощностью используемого в экспериментах регулятора высоковольтного источника электропитания.

В итоге, используя многоапертурную систему извлечения электронов из плазменного катода с юстировкой соосных отверстий в плоскопараллельных маске и опорной решетке ВФО, в атмосферу было выведено около 75% от тока и более 60 % от мощности пучка в ускоряющем промежутке.

Меньший коэффициент вывода мощности пучка в атмосферу по сравнению с коэффициентом вывода тока пучка связан тем, что некоторые электроны, прошедшие сквозь выпускную фольгу и вышедшие в атмосферу оставляют часть своей энергии в фольге в результате неупругих взаимодействий высокоэнергетического электрона с атомом кристаллической решетки материала фольги. Кроме этого, часть энергии, составляющую единицы процентов [155], пучок теряет, проходя двухсантиметровый воздушный промежуток. Это приводит к расширению энергетического спектра пучка, выведенного в атмосферу, что также было подтверждено экспериментально, используя фольговый метод, описанный в Разделе 2.3.

Проведенные измерения энергетического спектра электронного пучка показали, что, к примеру, при энергии электронов 130 кэВ средняя энергия пучка составляет около (80÷90) кэВ, что проиллюстрировано на рисунке 3.26. Похожий результат с отклонением средней энергии пучка от энергии, соответствующей приложенному ускоряющему напряжению, был продемонстрирован в работе [31].

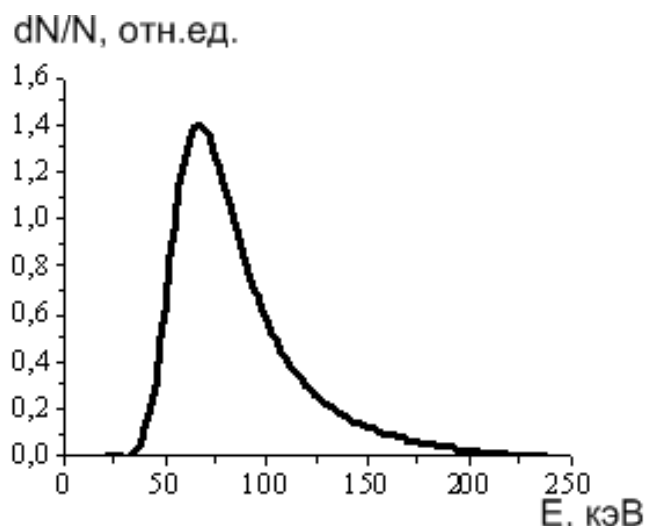


Рисунок 3.26 – Энергетический спектр электронного пучка, выведенного в атмосферу, при ускоряющем напряжении $U_0=130$ кВ и общем токе в ускоряющем промежутке $I_0=10$ А

Кроме этого, были проведены эксперименты по измерению распределения плотности тока по сечению пучка. Отпечаток генерируемого электронного пучка на винипрозе с установленной в плазменный катод маской с отверстиями диаметром 8 мм, уложенной на сетку с размером ячейки (0,6×0,6) мм, представлен на рисунке 3.27. Результаты измерений распределения плотности тока по сечению пучка, используя винипроз, установленный с вакуумной стороны, калориметр ТПИ–2М.1 и коллектор площадью 36 см² (см. Раздел 2.2), установленные в атмосфере на расстоянии 20 мм от выводной фольги, представлены на рисунке 3.28. Видно, что неравномерность распределения плотности тока по сечению пучка по его длинной и короткой сторонам не превышает, соответственно, ±15% и ±10% от среднего значения, и практически повторяет распределение плотности тока по сечению пучка в отсутствие маски (рис.2.15). Как в наших экспериментах в отсутствие маски, так и в работах [110, 111], распределение плотности тока по сечению пучка имеет в центральной части локальные

минимум и максимум по продольной и поперечной сторонам пучка, соответственно.

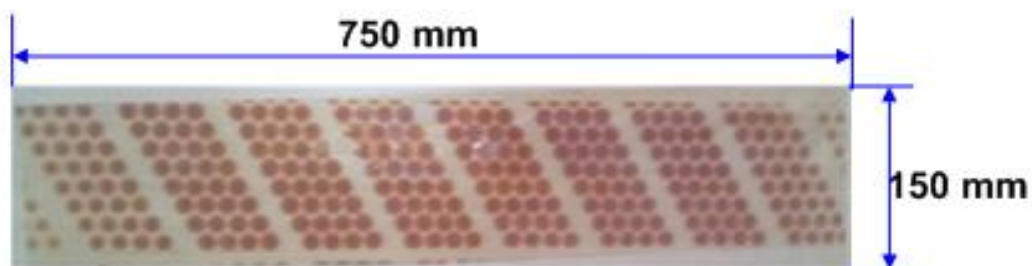


Рисунок 3.27 – Отпечаток электронного пучка на полимере (винипрозе). В плазменном катоде установлена маска с отверстиями диаметром 8 мм, размер ячейки эмиссионной сетки (0,6×0,6) мм; ускоряющее напряжение $U_0=150$ кВ, амплитуда тока в промежутке $I_0=7$ А, длительность импульса $t_{и}=40$ мкс, количество импульсов тока пучка, воздействующих на винипроз, $N=45$

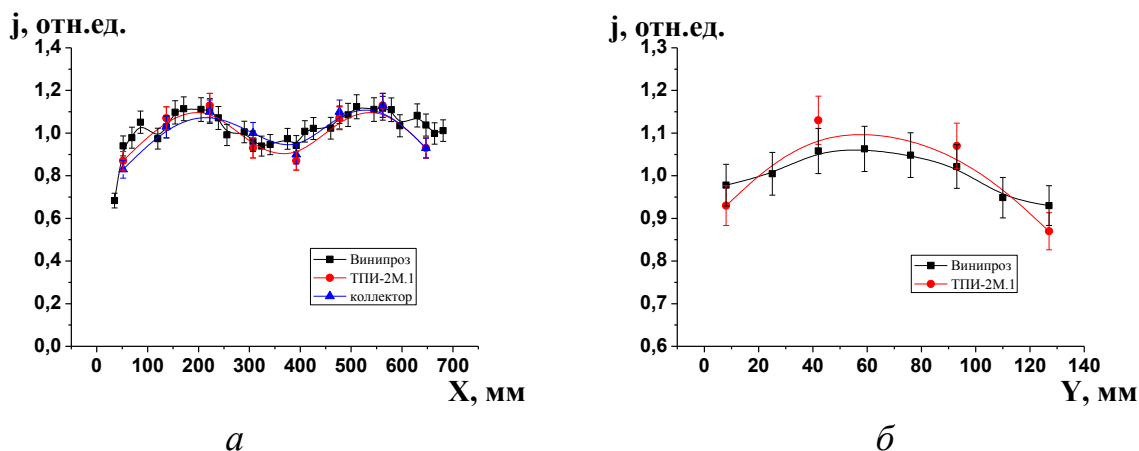


Рисунок 3.28 – Распределения плотности тока по длинной (*а*) и короткой (*б*) сторонам ВФО, полученные в источнике электронов с многоапертурным плазменным катодом с установленной в него маской с отверстиями диаметром 8 мм и размером ячейки эмиссионной сетки (0,6×0,6) мм (параметры пучка те же, что и для рисунка 3.27)

Эффект переключения тока разряда в ячейки эмиссионной сетки можно рационально использовать для интегрального перераспределения плотности тока разряда с целью выравнивания распределения плотности эмиссионного

тока по сечению пучка [156]. Это достигается путем введения в плазменный катод маски с переменной прозрачностью. Таким образом, для выравнивания плотности тока пучка по его сечению маска была выполнена с отверстиями $(8 \div 12)$ мм: увеличенного до 12 мм диаметра в областях минимальной плотности тока пучка и уменьшенного до 8 мм диаметра в областях с его максимальной плотностью.

Распределение плотности тока по сечению пучка, полученное в этом случае, представлено на рисунке 3.29. Видно, что увеличение отверстий в маске приводит к увеличению плотности тока по сечению пучка в местах с минимальной плотностью и уменьшению – на участках, где плотность тока была максимальна.

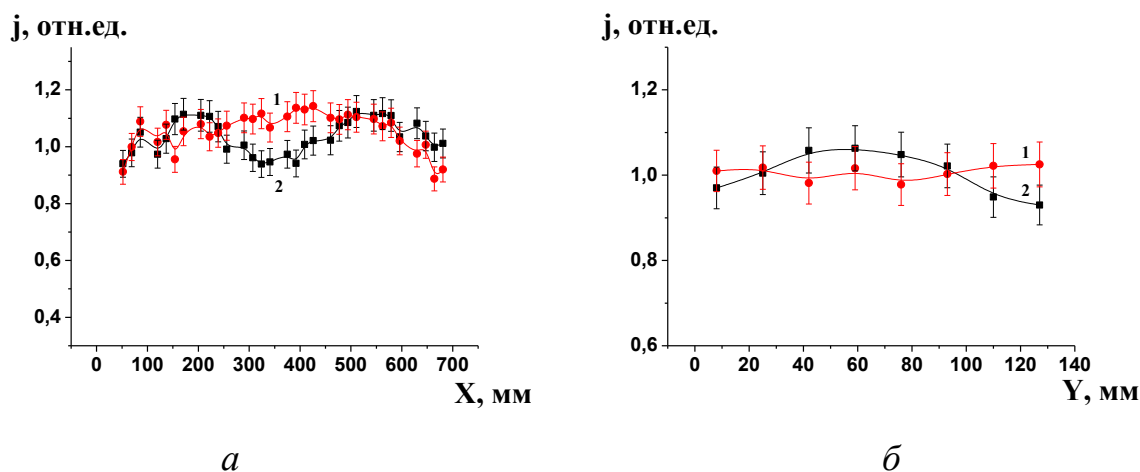


Рисунок 3.29 – Распределения плотности тока по длинной (а) и короткой (б) сторонам выпускного фольгового окна, полученные в источнике электронов с многоапертурным плазменным катодом с размером ячейки эмиссионной сетки $(0,6 \times 0,6)$ мм. 1 – маска с дискретно изменяющейся прозрачностью; 2 – маска с постоянной геометрической прозрачностью и отверстиями диаметром 8 мм (параметры пучка те же, что и для рис.3.27)

Выводы

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Создан катодный узел плазмогенератора на основе дугового разряда низкого давления, в котором инициирование катодного пятна осуществляется электрическим пробоем в газе на левой ветви кривой Пашена, т.е. по «длинному пути». Это достигается как за счет конфигурации электродов, так и за счет напуска рабочего газа в катодный узел при диафрагмировании дополнительного электрода, находящегося под катодным потенциалом. Катодный узел отличается устойчивостью работы в широком диапазоне токов разряда ($5 \div 100$ А) и повышенным (в >10 раз) ресурсом работы по сравнению с известными аналогами. Кроме этого, диафрагмирование дополнительного электрода позволяет убрать катодное пятно из зоны прямой видимости полого анода, что практически исключает появление микрокапель материала катода в областях генерации плазмы и ускорения электронов, и тем самым позволяет в ≈ 5 раз повысить электрическую прочность ускоряющего промежутка источника электронов.

2. Показано, что для повышения устойчивости работы сеточного плазменного катода, формирующего пучки большого сечения, целесообразно плазменную эмиссионную поверхность разделить на множество эмиссионных участков меньшей площади с помощью специальной маски, укладываемой на эмиссионную сетку. Это позволяет при использовании более крупных ячеек сетки и оптимизации конфигурации маски, перераспределить ток разряда преимущественно в ячейки эмиссионной структуры, увеличив плотность эмиссионного тока и повысив коэффициент извлечения электронов из плазменного катода α , равный отношению тока в ускоряющем промежутке I_0 к току разряда I_p , а, следовательно, повысив эффективность эмиттера в целом. Кроме этого, в конфигурации с маской

стабилизируется ток разряда, обеспечивается дополнительный перепад давлений между областью генерации плазмы и ускорения электронов, и, как следствие, также повышается электрическая прочность ускоряющего промежутка источника электронов.

3. Продемонстрирована принципиальная возможность перераспределения тока разряда в плазменном катоде на основе импульсного дугового разряда низкого давления путем введения в плазменный катод металлической маски с переменной прозрачностью, с таким же количеством отверстий, как в опорной решетке ВФО и соосных с ними. В этом случае площадь отверстия в маске должна быть обратно пропорциональна плотности плазмы в области эмиссии электронов. Использование в сеточном плазменном катоде такой маски позволило выровнять распределение плотности тока по сечению пучка большого сечения и добиться неоднородности распределения плотности тока в атмосфере не выше $\pm 10\%$ и $\pm 5\%$ от средней плотности тока по длинной и короткой сторонам сечения пучка, соответственно, при площади пучка в тысячу квадратных сантиметров.

4. Показано, что для уменьшения потерь ускоренных электронов на опорной решетке ВФО в источниках электронов с сеточным плазменным катодом, необходимо согласовать структуру маски со структурой опорной решетки ВФО. При этом реализуется двухэлектродная многоапертурная электронно-оптическая система, формирующая многоэлементный электронный пучок, который может быть с малыми потерями тока пучка на опорной решетке ВФО выведен через фольгу в атмосферу. Такой способ формирования, транспортировки и вывода в атмосферу широкого электронного пучка позволяет увеличить в ≈ 2 раза коэффициент вывода пучка в атмосферу и, соответственно, повысить КПД источника электронов.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА, СОЗДАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ШИРОКОАПЕРТУРНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОНОВ С МНОГОАПЕРТУРНЫМ ПЛАЗМЕННЫМ КАТОДОМ И ВЫВОДОМ ПУЧКА БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ В АТМОСФЕРУ

4.1. Создание автоматизированного широкоапертурного источника электронов с плазменным катодом

В результате проведенных экспериментов на стенде широкоапертурного источника электронов (см.Главу 3) были предложены меры по увеличению электрической прочности высоковольтного ускоряющего промежутка, а, тем самым, увеличения стабильности работы широкоапертурного источника электронов с плазменным катодом, что позволяет расширить параметры электронного пучка (увеличить плотность тока пучка), увеличить вывод электронного пучка из вакуумного ускоряющего промежутка в атмосферу через ВФО с коэффициентом вывода β , превышающим геометрическую прозрачность этого ВФО, уменьшить просадку напряжения конденсаторной батареи при одинаковом токе пучка (при $C_{\text{бат}}=\text{const}$), а, следовательно, уменьшить ширину энергетического спектра электронного пучка в течение импульса.

В основном такой режим работы достигается за счет введения в плазменный катод маски, разбивающей эмиссионную поверхность на множество эмиссионных ячеек, граница плазмы в которых стабилизируется мелкоструктурной эмиссионной сеткой, а также за счет использования для генерации плазмы катодных узлов с экранированием катодного пятна от прямой видимости полого анода основного разряда, позволяющим исключить поступление микрокапель материала катода на электроды разрядной системы, к которым в том числе относится эмиссионная сетка,

чистота которой зачастую определяет предельные параметры генерируемого электронного пучка.

Введение сопротивления R в цепь полого анода разряда создает на последнем отрицательное смещение потенциала относительно потенциала эмиссионной сетки. Это приводит к переключению электронной компоненты тока разряда в область эмиссионной сетки и позволяет без маски достигать высоких значений коэффициента извлечения до $\alpha \approx 0,6$ при ускоряющем напряжении $U_0 = 200$ кВ при устойчивой работе плазменного катода со сравнительно мелкой ячейкой эмиссионной сетки (например, $(0,4 \times 0,4)$ мм). Использование в плазменном катоде маски с низкой геометрической прозрачностью, равной $\approx 13\%$, снижает коэффициент извлечения электронов α , но увеличение размера ячейки эмиссионной сетки до $(0,6 \times 0,6)$ мм при $U_0 = 200$ кВ позволяет даже при такой геометрической прозрачности маски достигать коэффициента извлечения $\alpha \approx 0,2$. Переменная прозрачность маски с диаметром отверстий обратно пропорциональным плотности плазмы в области эмиссионной структуры позволяет выровнять плотность тока пучка по его сечению с отклонением от среднего значения $\pm 10\%$ и $\pm 5\%$ по длинной и короткой сторонам сечения пучка, соответственно.

Отдельным пунктом необходимо выделить, что введение в плазменный катод маски с конфигурацией отверстий, повторяющей конфигурацию отверстий в опорной решетке ВФО, с диаметром отверстий в маске меньшего диаметра (для учета расширения пучка за счет отличной от нуля начальной скорости электронов, влетающих в ускоряющий промежуток, и кулоновского расталкивания пучка, генерируемого отдельной эмиссионной структурой), при $U_0 = 200$ кВ позволяет увеличить коэффициент вывода тока пучка до значения $\beta \approx 0,75$ в сравнительно широком диапазоне токов в ускоряющем промежутке.

На основе результатов, полученных на стенде для исследования основных узлов макета источника электронов был создан лабораторный

образец широкоапертурного источника электронов с плазменным катодом. Основные этапы разработки и создания такого источника заключались в следующем: 1) был разработан и создан блок автоматизации вакуумной системы источника электронов; 2) произведена автоматизация высоковольтной системы электропитания; 3) организована система электропитания плазменного эмиттера, обеспечивающая дистанционное управление параметрами тока разряда; 4) разработана и создана система, обеспечивающая безопасность технического персонала, обслуживающего источник электронов.

Автоматизированная система вакуумной откачки электронного источника, схема которой приведена на рисунке 4.1 *a*, была выполнена на промышленном контроллере WAGO–750–312. Насосная группа была оставлена такой же, как и на макете источника электронов (см. главу 2), однако затвор диффузионного насоса ND был заменен на затвор шиберного типа с механическим приводом. Механический насос NL, АВЗ–20Д, при помощи пневматических клапанов VP3 и VP4 может непосредственно подключаться к вакуумной камере, создавая в ней предварительное разряжение для диффузионного насоса ND. Давление в вакуумной камере при работе как форвакуумного, так и диффузионного насосов измеряется широкодиапазонным вакуумметром P1 GRANVILLE–PHILLIPS, установленным над затвором диффузионного насоса. Колено, позволяющее за счет своей формы снизить концентрацию паров масла в вакуумной камере, было заменено на прямой цилиндр из нержавеющей стали диаметром 400 мм и длиной 1000 мм, а для снижения концентрации паров масла в вакуумной камере после диффузионного насоса установлена водоохлаждаемая ловушка паров масла VL. Такое решение позволило снизить габариты установки. Для увеличения электрической прочности и исключения зажигания высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) между плазменным эмиттером и внутренней полостью установленного цилиндра со стороны вакуумной

камеры на входе в этот цилиндр установлена металлическая сетка из нержавеющей стали с геометрической прозрачностью более 90% и крупным размером ячейки, равным (15×15) мм. Это позволяет сократить высоковольтный зазор между корпусом плазменного катода и цилиндром путем выравнивания электрического поля на входе в этот цилиндр без существенного снижения скорости откачки и, тем самым, значительно уменьшить вероятность возникновения самостоятельного ВТР в рабочем диапазоне давлений источника электронов $p=(20\div 50)$ мПа).

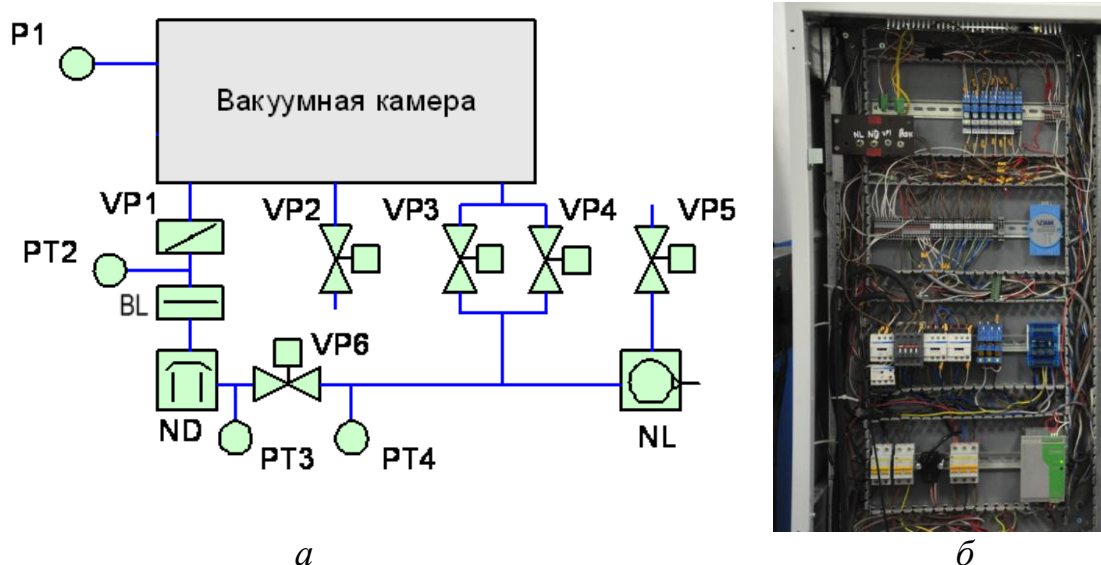


Рисунок 4.1 – Схема автоматизированной системы вакуумной откачки широкоапертурного источника электронов с плазменным катодом (а) и фотография щита управления вакуумной системы (б)

Управление и контроль системой вакуумной откачки осуществляется из пультной комнаты с помощью персонального компьютера, используя оптоволоконные каналы связи, необходимые для помехозащищенной работы этого компьютера. Фотография щита управления вакуумной системой представлена на рисунке 4.1 б.

Кроме этого, был создан алгоритм управления высоковольтным источником электропитания, позволяющий осуществлять стабильную работу источника электронов, а также совместно с коллегами из Института ядерной

физики СО РАН (г. Новосибирск) был запущен в эксплуатацию такой высоковольтный источник электропитания, фотография которого представлена на рисунке 4.2 *а*, со следующими основными параметрами:

- Входное напряжение питания 3Ф, 380В 50/60Hz;
- Выходное напряжение (20÷200) кВ;
- Стабилизация напряжения, % не более 2;
- Выходной средний ток, мА до 100;
- Средняя мощность источника, кВт до 20;
- Дистанционное управление, интерфейс RS-485;
- Время непрерывной работы, часов 20;
- Габаритные размеры, мм 700×700×2000;
- Вес, кг 300.

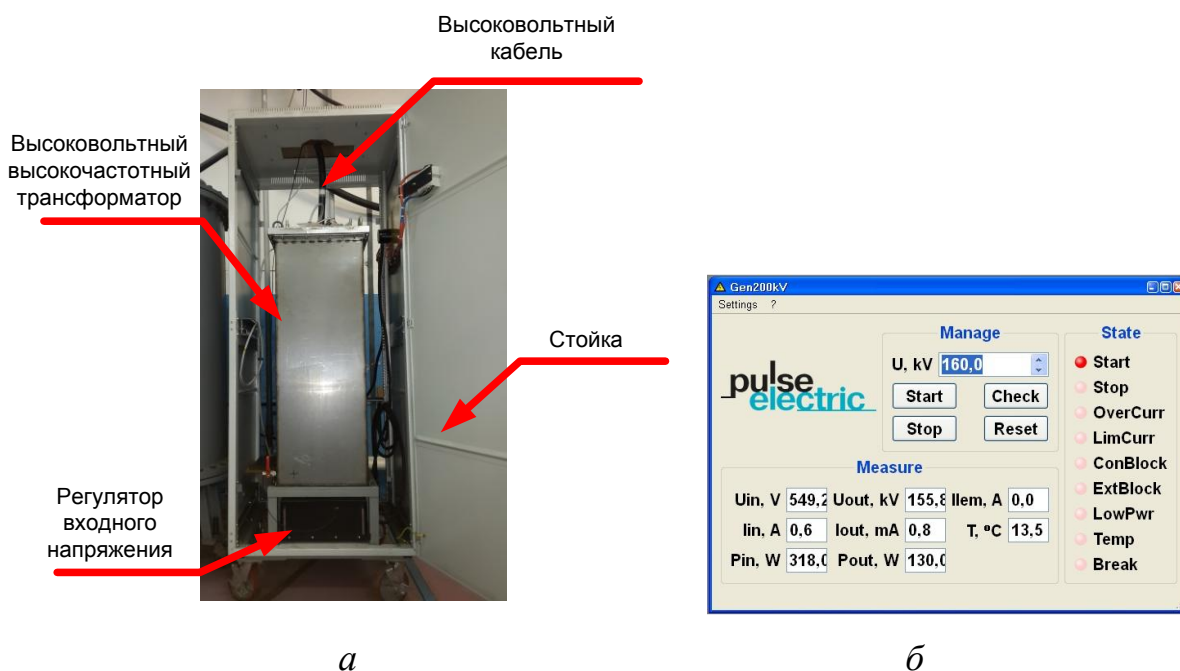


Рисунок 4.2 – Внешний вид высоковольтного источника электропитания (*а*) и табло управления этим источником от персонального компьютера (*б*)

На рисунке 4.2 *б* показано табло управления высоковольтным источником электропитания с персонального компьютера. Видно, что на табло выводится не только величина уставки ускоряющего напряжения, но и

величина выходной средней мощности высоковольтного источника электропитания, а также температурный режим работы его инвертора, максимально подверженного тепловой нагрузке.

Созданный высоковольтный источник электропитания имеет меньшие массогабариты (по сравнению с каскадным генератором, описанным в главе 2), дистанционное управление, обеспечивающее высоковольтную развязку по оптоволоконным каналам связи, стабилизацию выходного напряжения, что крайне необходимо при работе на высокой средней мощности. В этом случае главным является слабая зависимость величины ускоряющего напряжения от остальных параметров пучка (амплитуда тока пучка, его длительность и частота следования импульсов) (рис. 4.3), что существенно облегчает управление источником электронов.

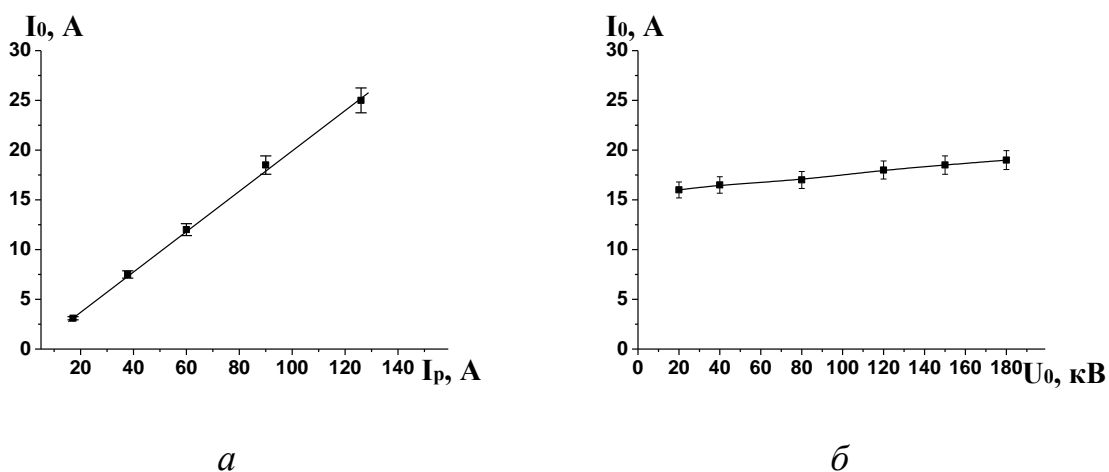


Рисунок 4.3 – Зависимости тока в ускоряющем промежутке I_0 от тока разряда I_p при $U_0=150$ кВ (а) и от ускоряющего напряжения U_0 при $I_p=90$ А (б) с установленной в эмиттер маской с отверстиями диаметром 8 мм, уложенной на эмиссионную сетку с размером ячейки $0,6 \times 0,6$ мм при $p=50$ мПа (Ar) и сопротивлению в цепи полого анода $R=10$ Ом

Кроме этого, используя новый высоковольтный источник электропитания, был организован плавный выход на заданную величину ускоряющего напряжения после возникновения пробоя высоковольтного

ускоряющего промежутка со скоростью 20 кВ/с (скорость подобрана эмпирически), что необходимо для восстановления устойчивой работы источника электронов. Уменьшение этой скорости выхода на уставку ускоряющего напряжения приводит к увеличению тепловой нагрузки на выводную фольгу, поскольку, чем меньше ускоряющее напряжение, тем меньше электронов способно ее преодолеть. Увеличение скорости выхода на уставку ускоряющего напряжения не позволяет выйти на рабочий режим в связи с повышением вероятности возникновения электрического пробоя высоковольтного ускоряющего промежутка, что в итоге также приводит к перегреву фольги и увеличению вероятности выхода ее из строя.

Для обеспечения защиты персонала от поражения электрическим током, помимо концевых выключателей, установленных на дверях бункера, его свинцовых воротах, а также в пультовой комнате, все элементы высоковольтной конденсаторной батареи были помещены в герметичный сосуд диаметром 1200 мм и высотой 1700 мм, заполненный газообразным азотом до избыточного давления $p=5$ атм (рис. 4.4). Дополнительно, это позволило минимизировать высоковольтные зазоры внутри конденсаторной батареи и обеспечить независимость их электрической прочности от состояния внешней среды. Такое решение позволяет применять конденсаторную батарею, например, в условиях высокой влажности воздуха без снижения в ней электрической прочности высоковольтных зазоров.

В сосуде высокого давления, сверху на конденсаторной батарее, так же как и в открытой конденсаторной батарее (см. Главу 2), установлена экранированная металлическая чашка, находящаяся под потенциалом ускоряющего напряжения. Такая чашка необходима для выравнивания потенциала между элементами схемы электропитания плазменного катода, которая расположена внутри этой чашки. Блок–схема системы электропитания плазменного эмиттера представлена на рисунке 4.5. Через высоковольтный разделительный трансформатор TV_{HV} , также установленный

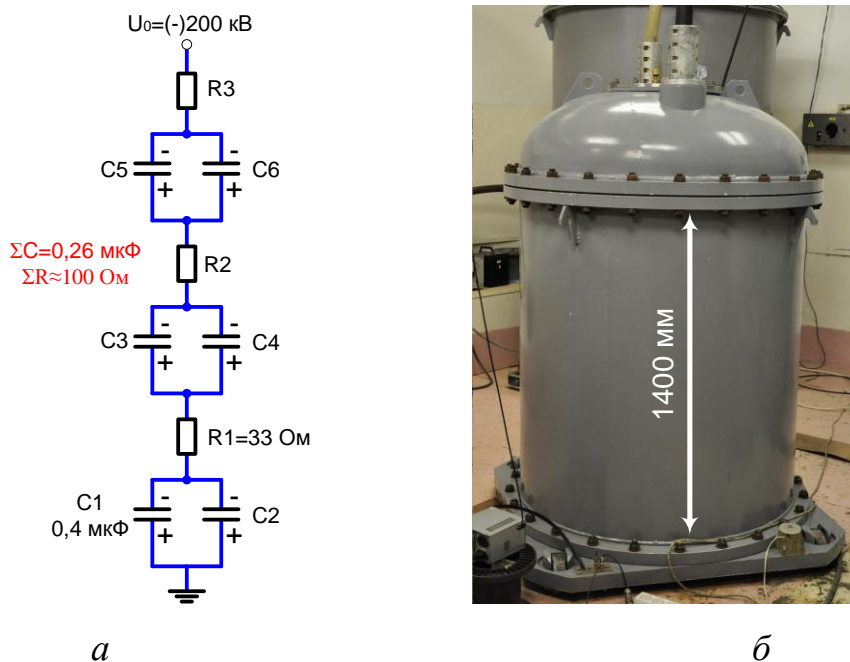


Рисунок 4.4 – Электрическая схема закрытой конденсаторной батареи (а) и ее фотография (б)

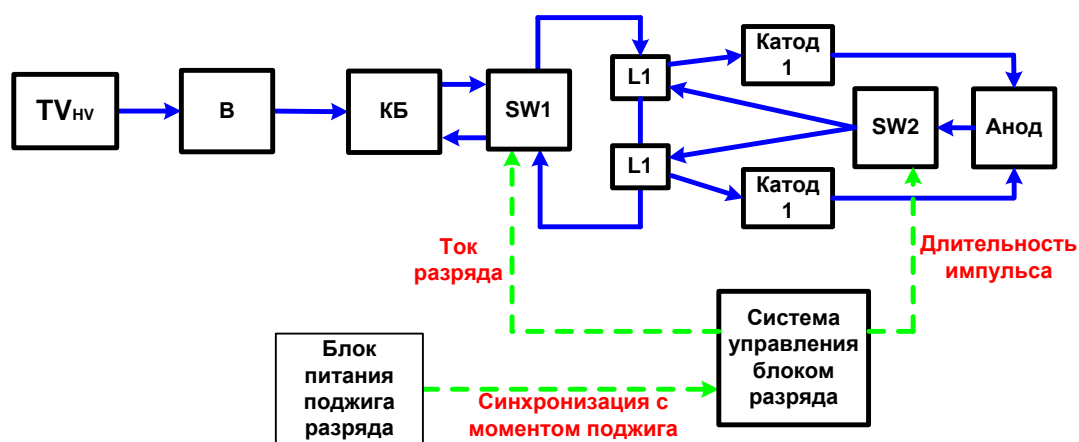


Рисунок 4.5 – Блок-схема системы электропитания плазменного катода: TV_{HV} – высоковольтный разделительный трансформатор; В – выпрямитель; КБ – конденсаторная батарея; SW1, SW2 – ключевые элементы; L1, L2 – двухобмоточные дроссели

внутри сосуда высокого давления вместе с конденсаторной батареей, сетевое напряжение выпрямляется диодным мостом В и подается на одноконтурный

преобразователь напряжения, нагрузкой для которого являются два двухобмоточных дросселя L1 и L2. Ток, протекая через первичные обмотки дросселей, индуцирует в их сердечниках магнитные потоки, позволяя тем самым накапливать в них энергию. Поскольку оба дросселя выполнены идентично, то при протекании через их первичные обмотки тока заданной величины в них копится одинаковое количество энергии. Когда ток дросселей достигает заданного тока разряда, ключевой элемент SW1 закрывается и ток через первичные обмотки прекращается, трансформируясь во вторичные обмотки дросселей, что одновременно сопровождается подачей поджигающих импульсов на оба катодных узла, обеспечивая условия для устойчивого инициирования разряда. Вторичной обмоткой дроссели подключены к разрядному промежутку: «катод 1–анод», «катод 2–анод». Напряжение холостого хода на вторичных обмотках дросселей определяется согласно коэффициенту трансформации, равному единице, но при загорании разряда напряжение разряда устанавливается согласно его ВАХ (рис. 3.10). В цепи полого анода установлен ключевой элемент SW2, позволяющий устанавливать длительность импульса тока разряда, а, соответственно, и длительность импульса тока пучка. Выключение ключевого элемента приводит к переключению тока вторичной обмотки дросселя в первичную обмотку, и рекуперации энергии в конденсаторную батарею КБ схемы электропитания разряда. Управление схемой электропитания плазменного катода также осуществляется из пультной комнаты, используя оптоволоконные каналы связи, показанные на рисунке 4.5 штриховыми линиями.

В конечном итоге блок–схему модернизированного электронного источника можно представить в виде, представленном на рисунке 4.6. Конструкция такого электронного источника представлена на рисунке 4.7, а его общий вид на рисунке 4.8.

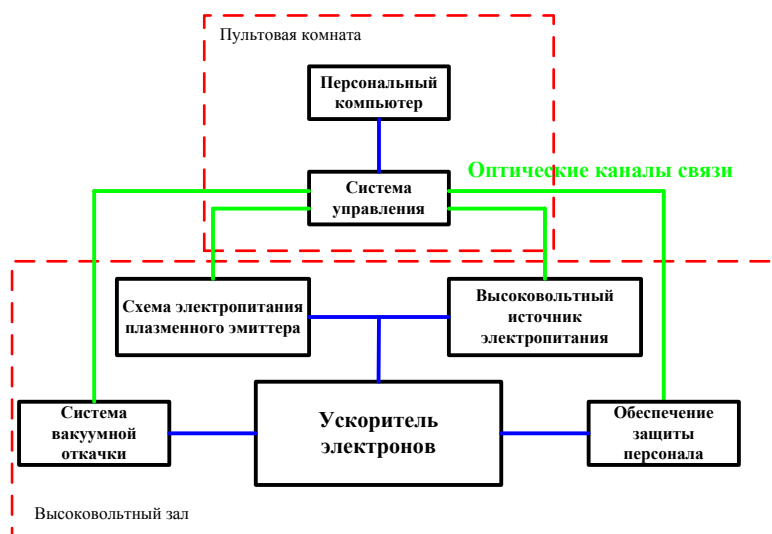


Рисунок 4.6 – Блок-схема разработанного широкоапертурного источника электронов с плазменным катодом.

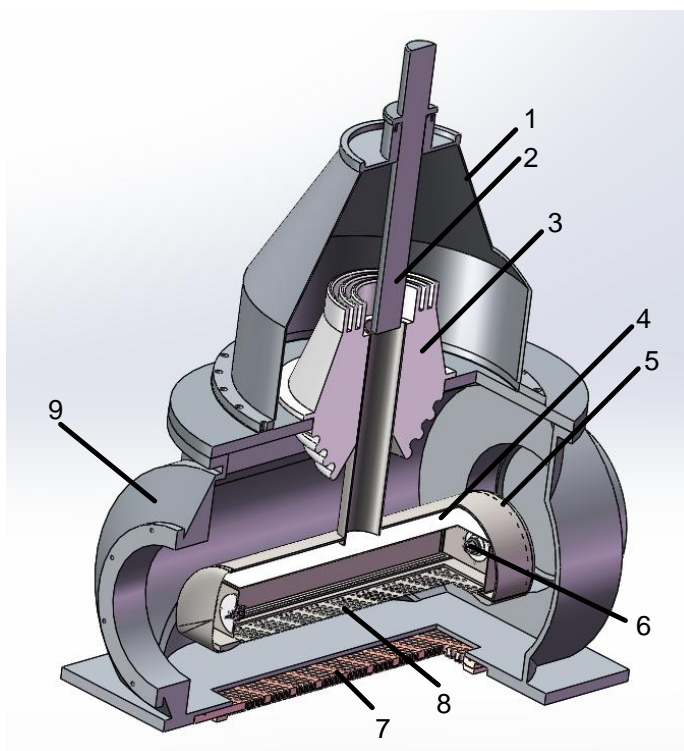


Рисунок 4.7 – Конструкция разработанного широкоапертурного источника электронов с плазменным катодом: 1 – колпак высоковольтного изолятора; 2 – высоковольтный кабель; 3 – высоковольтный полиэтиленовый изолятор; 4 – полый анод; 5 – корпус плазменного катода; 6 – разработанный катодный узел; 7 – ВФО; 8 – маска, приваренная к эмиссионной сетке; 9 – вакуумная камера

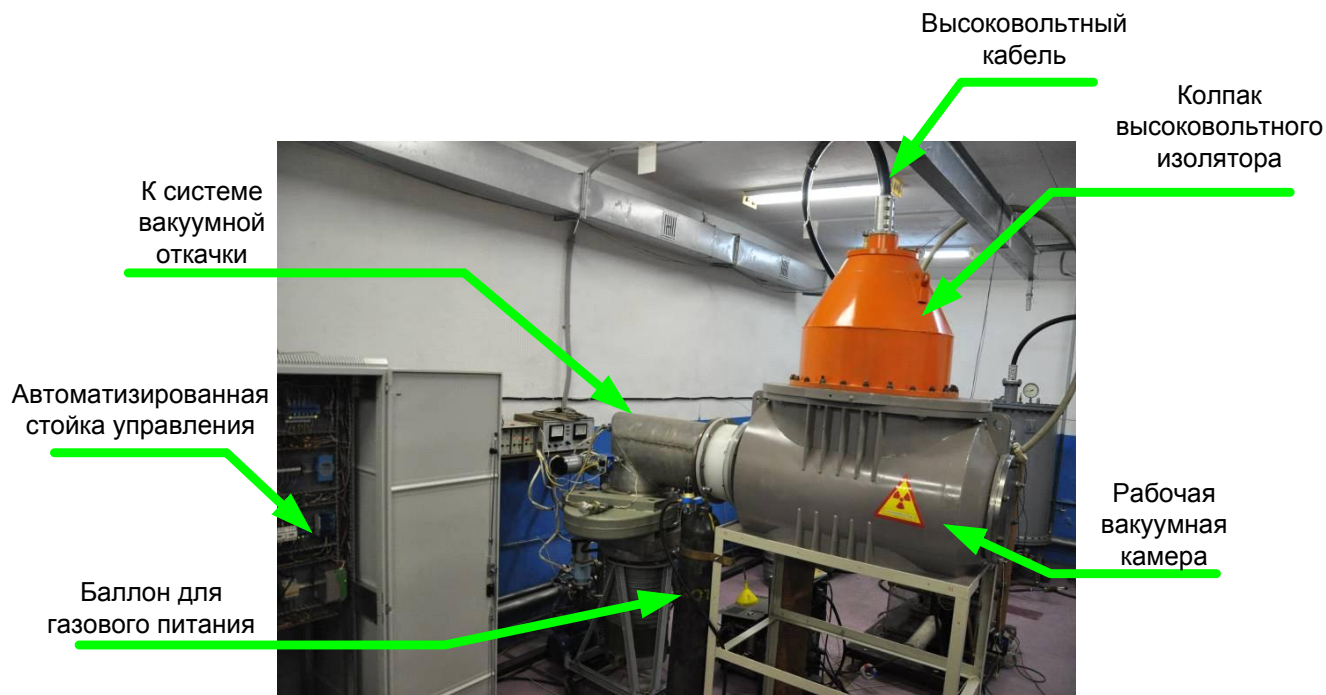


Рисунок 4.8 – Внешний вид разработанного широкоапертурного источника электронов с плазменным катодом

В итоге, модернизация отдельных блоков макета источника электронов позволила создать автоматизированный широкоапертурный электронный источник с плазменным катодом, способный обеспечивать параметры пучка, представленные в таблице 4.1. Средняя мощность схемы электропитания плазменного катода при этом не превышает 100 Вт.

Таблица 4.1

Энергия электронов, кэВ	(100÷200)
Амплитуда тока пучка (в атмосфере), А	(5÷30)
Длительность импульсов тока пучка, мкс	(10÷100)
Частота следования импульсов, с ⁻¹	(1÷50)
Размеры пучка, мм	750×150
Неоднородность плотности тока по сечению пучка, %	±10
Максимальная мощность пучка (в атмосфере), кВт	4

4.2. Разложение тетрафторида кремния с использованием широкоапертурного источника электронов с плазменным катодом

На предприятиях химической и металлургической промышленности в результате производственной деятельности накапливаются сотни тонн побочного продукта производства в виде газообразного высокотоксичного тетрафторида кремния (ТФК) [157]. Это является проблемой для предприятия как с точки зрения издержек на нейтрализацию ТФК, так и экологичности производства. Организация утилизации таким образом, чтобы на выходе этого процесса образовывался полезный продукт является весьма перспективной задачей, требующей исследований [16, 158]. К таким исследованиям, например, относится плазмохимическое разложение газообразного ТФК под действием импульсного низкоэнергетического электронного пучка, поскольку при разложении данного газа можно получать дорогостоящие продукты – кремний Si и фтор F [159–161].

Тетрафторид кремния – SiF_4 . При нормальных условиях это бесцветный газ с температурой сублимации минус 95°C и резким раздражающим запахом. Плотность в твердом состоянии $2,13 \text{ г/см}^3$, в жидком – $1,59 \text{ г/см}^3$, в газообразном – $4,68 \text{ мг/см}^3$. Критическая температура минус $14,2^\circ\text{C}$. Критическое давление $3,67 \text{ МПа}$ ($36,7 \text{ кгс/см}^2$). ТФК ядовит и дымит во влажном воздухе, т.к. легко взаимодействует с водой, образуя кремнефтористоводородную кислоту.

При использовании традиционных термохимических методов разложения ТФК стоимость его переработки в несколько раз превышает стоимость конечных полезных продуктов, что, в том числе, связано со сравнительно низкой чистотой отходов данного газа. Поэтому традиционный подход в связи с высокой стоимостью ставит под вопрос целесообразность разложения ТФК, что и приводит к необходимости дорогостоящего захоронения отходов производства.

Необходимость разработки новых методов и технологий разложения ТФК вызвана:

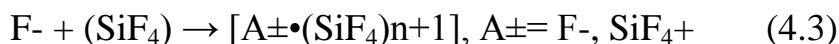
- высокими издержками на нейтрализацию газообразного ТФК и связанными с этим экологическими проблемами на химических предприятиях;
- отсутствием эффективных методов разложения ТФК;
- возможностью использования продуктов реакции разложения ТФК в виде элементного кремния, в том числе для нужд солнечной энергетики [162];
- возможностью использования разрабатываемых методов для разложения других галогенидов металлов.

Процесс разложения молекулы ТФК заключается в обработке исходного тетрафторида кремния потоком электронов при комнатной температуре и давлении, близком к атмосферному с последующим разделением твердой (кремний) и парогазовой фаз (фтор + тетрафторид кремния), конденсацией кремния в виде твердых частиц или тонких пленок. В итоге, продуктами восстановления могут являться полупроводниковый кремний и элементный фтор.

Процесс разложения тетрафторида кремния с помощью импульсного электронного пучка основан на проведении следующих реакций:



или



Цепной процесс образования заряженных кластеров (4.3) существенно ускоряет процесс конденсации, повышая эффективность конверсии молекул SiF_4 при взаимодействии с поверхностью твердого тела. Теоретически, степень конверсии исходного газа в процессе разложения молекулы ТФК электронным пучком может составлять величину, близкую к 1.

Высокая чистота кремния может быть обеспечена самим механизмом разложения, а также параметрами разложения ТФК и осаждения кремния на функциональную подложку.

Для экспериментального подтверждения высказанного предположения о механизме конверсии ТФК были проведены эксперименты по разложению ТФК под действием импульсного электронного пучка, используя созданный макет широкоапертурного источника электронов с плазменным катодом. Широкий диапазон параметров пучка и независимость регулировки параметров пучка друг от друга были ключевыми факторами при выборе данного источника электронов с выводом пучка в атмосферу в качестве основы для реализации процесса разложения газообразного ТФК. Разложение газообразного ТФК, инициированное пучком электронов, происходило в специально созданном плазмохимическом реакторе. Скорость прямой реакции разложения газа и получения пленки кремния регулировалась путем изменения параметров электронного пучка.

На рисунке 4.9 показана схема эксперимента по разложению ТФК пучком электронов, состоящая из импульсно–периодического источника электронов 1, плазмохимического реактора 6, конструкция и внешний вид которого представлены на рисунке 4.10, и системы прокачки газа, состоящей из баллона 4 с ТФК, электромагнитных клапанов впуска и выпуска рабочего газа из реактора и ручного натекаателя, осуществляющего регулировку давления в реакторе. Давление газа в реакторе измерялось с помощью манометрического преобразователя ПМТ–2. Плазмохимический реактор 6 представляет собой цилиндр из нержавеющей стали диаметром 60 мм и длиной 150 мм. Верхний торец реактора был закрыт полиимидной пленкой, расположенной на опорной решетке реактора, через которую в него производится ввод электронного пучка. Ввод и вывод газа из реактора осуществлялся с помощью вакуумноплотных вводов, расположенных на боковой поверхности реактора с противоположных сторон друг

относительно друга. В плазмохимический реактор 6 помещался стакан из нержавеющей стали толщиной 0,2 мм, на внутренних стенках которого закреплялись стеклянные (25×75 мм) и медные (диаметр 10 мм) подложки (рис. 4.11).

Было проведено два отдельных эксперимента в следующем порядке:

1. Газовая магистраль прокачивалась вакуумным насосом 7 до давления около 1000 Па.

2. После прокачки все вентили от ресивера 2 до химпоглотителя 5 закрывались.

3. В первом эксперименте в ресивер 2 напускался SiF_4 , а во втором эксперименте смесь $\text{SiF}_4:\text{H}_2(1:2)$, в обоих случаях до давления ~ 4 кгс/см².

4. В первом эксперименте ТФК напускался в реакционную камеру 6 до давления 0,4 кгс/см² (от атмосферного давления), во втором эксперименте смесь $\text{SiF}_4:\text{H}_2$ до давления 0,8 кгс/см².

5. Закрывались все клапаны газовой магистрали, кроме входного вентиля химпоглотителя 5.

6. В реакционной камере 6 происходило облучение газообразного SiF_4 (или смеси $\text{SiF}_4:\text{H}_2$) электронным пучком с параметрами: ускоряющее напряжение $U_0=150$ кВ, амплитуда тока пучка $I_{\text{п}}=10$ А, длительность импульса $t_{\text{и}}=40$ мкс, частота следования импульсов $f=10$ с⁻¹.

7. При прохождении $N=1000$ импульсов открывался выходной клапан реакционной камеры 6 и газовые продукты реакции переходили в химпоглотитель 5.

8. Для первого эксперимента пункты 4, 5, 6, 7 повторялись 10 раз затем повторялся пункт 3, и пункты 4, 5, 6, 7 повторялись еще 10 раз.

9. Для второго эксперимента в смеси $\text{SiF}_4:\text{H}_2$ пункты 4, 5, 6, 7 повторялись 10 раз.

Давление газа в реакционной камере без H_2 и с H_2 составляло 0,4 кгс/см² и 0,8 кгс/см², в соответствии с пунктами 8–9.

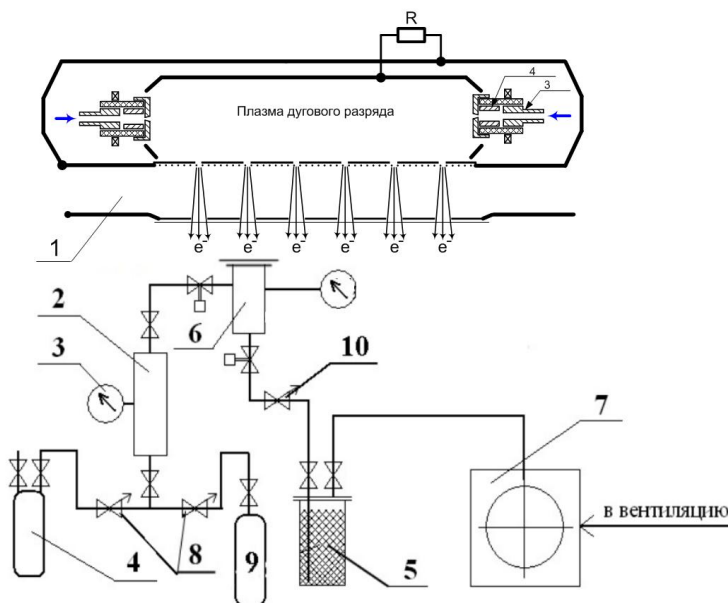
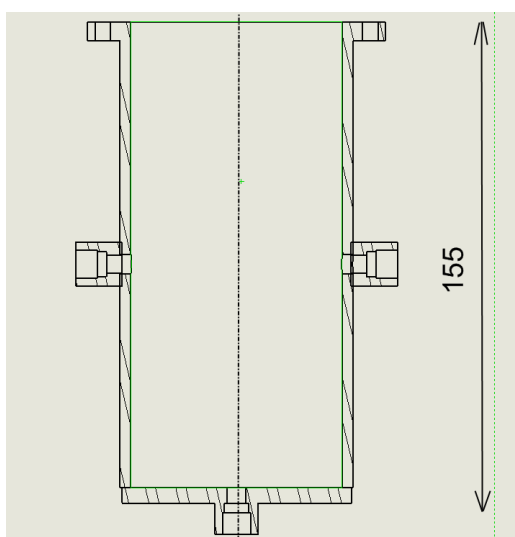


Рисунок 4.9 – Схема эксперимента по разложению ТФК пучком электронов: 1 – источник электронов; 2 – ресивер; 3 – манометр; 4 – баллон с ТФК; 5 – химпоглотитель; 6 – реакционная камера; 7 – вакуумный насос; 8 – клапана для напуска в ресивер; 9 – баллон с водородом; 10 – клапан для откачки рабочей газовой смеси



a



б

Рисунок 4.10 – Конструкция (а) и внешний вид (б) плазмохимического реактора

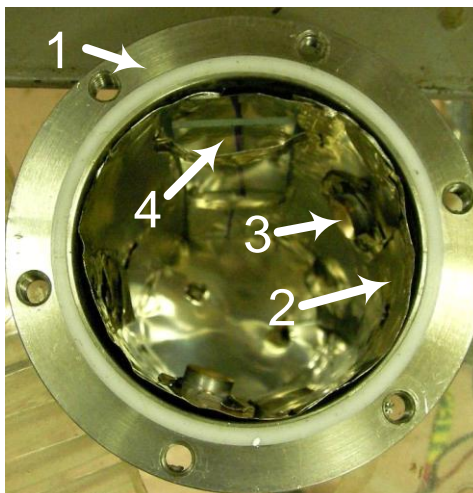


Рисунок 4.11 – Размещение подложек в плазмохимическом реакторе (вид сверху): 1 – реактор; 2 – металлический стакан; 3 – медный образец; 4 – стеклянный образец

В ходе экспериментов по разложению ТФК без восстановительной среды с помощью импульсного электронного пучка на стеклянной подложке были получены пленки кремния толщиной от 100 нм (на расстоянии 1 см от дна реактора) до 300 нм (на расстоянии 1 см от входной фольги реактора). Толщина пленки определялась с помощью интерференционного микроскопа МИИ-4, имеющего разрешение не хуже 20 нм. Исследование полученной пленки кремния методом вторично-ионной масс-спектрометрии на медной подложке с помощью масс-спектрометра MS-7201M, имеющего предел обнаружения примеси не хуже 10^{-1} ат.%, показало ее относительно невысокую чистоту (рис. 4.12). В результате разложения ТФК в смеси с восстановительной средой (водород) под действием импульсного электронного пучка были получены частицы кремния, оксидов кремния и фторидов кремния. Анализ электронно-микроскопических изображений частиц (рис. 4.13) показывает, что частицы кремния имеют форму тонких пластинок. Размеры пластинок изменяются от 3 нм до 160 нм. Присутствуют

также фториды кремния, представленные конгломератами округлых частиц, размеры которых изменяются в пределах 25–35 нм.

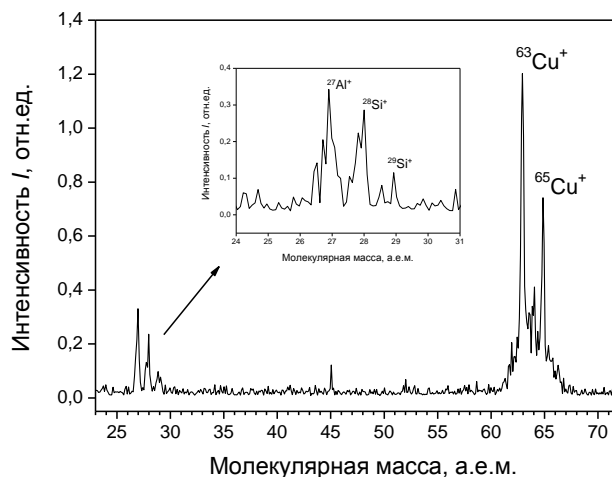


Рисунок 4.12 – Исследование полученных пленок кремния на медной подложке методом вторично-ионной масс-спектрометрии

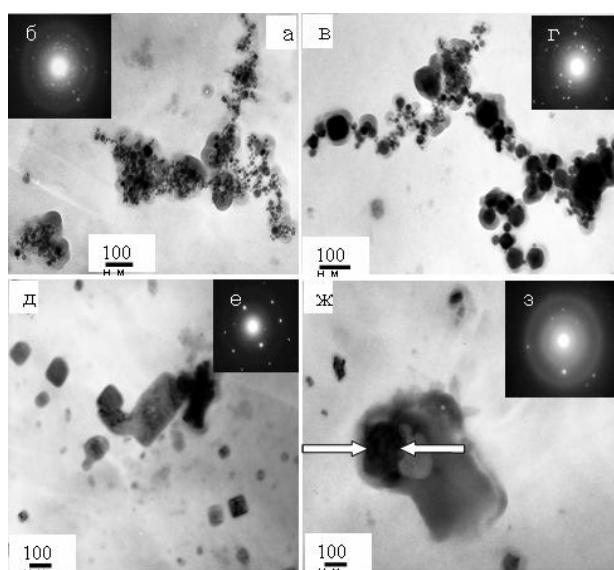


Рисунок 4.13 – Электронно-микроскопические изображения частиц, формирующихся на стеклянной подложке в результате разложения смеси $\text{SiF}_4:\text{H}_2=1:2$ под действием электронного пучка; а, в, д, ж – светлопольные изображения; б, г, е, з – микроэлектронограммы; а-г изображения частиц окиси кремния SiO_2 ; д – изображения частиц кремния; ж – изображения частиц окиси кремния SiO_2 и фторида кремния SiF_4

В результате проведенных экспериментов была показана принципиальная возможность разложения ТФК с помощью импульсного электронного пучка, генерируемого источником электронов с плазменным катодом, и конденсации на подложках кремния как в виде порошка, так и в виде пленки толщиной от 100 до 300 нм. Для использования полученной пленки кремния в полупроводниковой промышленности требуется улучшить ее чистоту, что, в свою очередь требует проведения дополнительных исследований.

4.3. Обработка натурального латекса с использованием широкоапертурного источника электронов с плазменным катодом

В настоящее время известно, что при обработке натурального латекса электронным пучком, выведенным в атмосферу, изменяются свойства образцов, изготовленных из обработанного латекса [163]. Особенностью работы [164] является достижение высокого значения прочности на разрыв каучуковых образцов (до 35 МПа), изготавливаемых из натурального латекса со специальными добавками, обработанного непрерывным электронным пучком с током до 10 мА и энергией 250 кэВ. Целью такой электронно-пучковой обработки является образование дополнительных поперечных связей между молекулами цис-1,4-полиизопрена, являющегося основным компонентом натурального латекса [163]. Недостатком этого метода является обязательное добавление в латекс нормального бутилакрилата или нонан-диол-диакрилата, которые используются в качестве эффективных катализаторов для радиационной вулканизации латекса, но при этом увеличивают коагуляцию латекса и приводят к токсичным испарениям, что может поставить под угрозу цель коммерциализации процесса активации латекса электронным пучком особенно при использовании вулканизированного латекса в медицинских целях. Стремление перейти к

химически чистой обработке натурального латекса вызвано наличием различных аллергических реакций у человека на вещества (сера, эпоксидная смола и др.), вводимые в латекс, в том числе, при традиционном химическом методе обработки. Из-за этого проблема химически чистой обработки натурального латекса с достижением повышенных механических свойств изготавливаемой из него конечной продукции остро стоит уже долгое время. В том числе последние десятилетия для решения этой проблемы используется процесс гамма-облучения натурального латекса с использованием кобальтовых пушек (^{60}Co), при котором максимальные значения прочности на разрыв образцов, изготовленных из обработанного таким способом латекса, достигают 18 МПа [163]. Производительность процесса обработки латекса на основе такого метода облучения составляет до 50 кг/час и требует значительных производственных площадей со специальной радиационной защитой персонала от генерируемого излучения.

Основываясь на результатах предварительных исследований [165], для модификации натурального латекса под действием электронного пучка в настоящих исследованиях также использовался импульсный широкоапертурный источник электронов с плазменным катодом [125, 166].

При энергии электронов 200 кэВ глубина проникновения электронов в латекс составляет $\sim 0,2$ мм, что не позволяет одновременно обрабатывать большой объём латекса. В работе [165] для обработки натурального латекса электронным пучком использовалась роторная система прокачки натурального латекса, которая в экспериментах показала сравнительно плохое перемешивание особенно в осевой области системы прокачки, поэтому была разработана и изготовлена система прокачки латекса для его многократного прохождения под пучком электронов (рис. 4.14 *a*), состоящая из перистальтического насоса 1, со скоростью подачи латекса 40 л/ч, реакционной кюветы, где происходила обработка латекса, и системы трубопроводов. Реакционная кювета состоит из ёмкости для накопления

латекса 2, зоны обработки 3 размером $(17 \times 9) \text{ см}^2$, составляющая $\approx 15\%$ от общей площади пучка, расположенной под углом 3° к плоскости выводной опорной структуры фольгового окна, и ёмкости слива 4, где происходит перемешивание латекса. В итоге равномерность облучения достигается обеспечением ламинарного движения латекса в зоне обработки с заданной скоростью, и дальнейшим перемешиванием обработанного латекса с исходным и частично обработанным. На рисунке 4.14 б представлена фотография разработанной системы прокачки латекса.

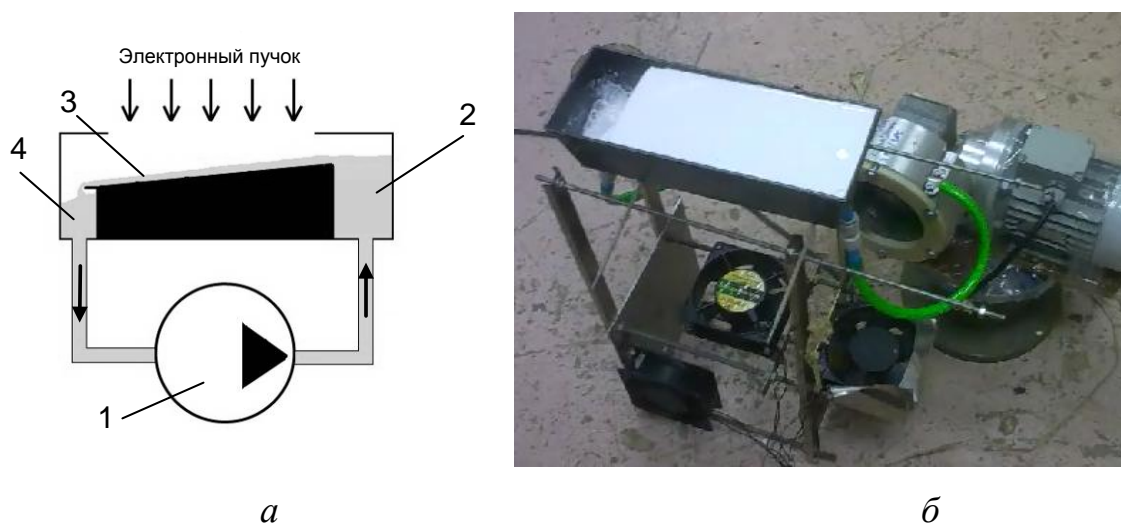


Рисунок 4.14 – Схема системы прокачки латекса (а) и ее фотография (б):

1 – перистальтический насос; 2 – резервуар для подачи латекса; 3 – слой латекса толщиной $\approx 2 \text{ мм}$; 4 – резервуар для приема облученного латекса

Величина дозы облучения должна быть достаточно большой для образования максимального количества поперечных связей, но ограничена такой величиной, при которой не происходит коагуляции латекса уже в процессе его обработки. Поэтому, основываясь на данных [165] и зная параметры системы прокачки латекса, а также параметры генерируемого электронного пучка, был подобран следующий режим обработки натурального латекса импульсным электронным пучком: ускоряющее напряжение $U_0=160 \text{ кВ}$, амплитуда тока пучка $I_p=12 \text{ А}$, длительность импульса $t_{\text{и}}=35 \text{ мкс}$, частота следования импульсов $f=10 \text{ с}^{-1}$. Величина дозы

облучения, вводимая в латекс, регулировалась путем контроля количества импульсов тока пучка.

После облучения латекса из него изготавливались образцы размером (150×100×0.5) мм, которые в течение 24 часов выдерживались в атмосфере воздуха при комнатной температуре, а затем после вымачивания в 1 %-ном растворе аммиака нагревались в печи при температуре 70°C до полной вулканизации. Из полученного каучукового полотна вырубались образцы в форме «лопатки» с длиной рабочей зоны около 40 мм для зажима их в универсальной испытательной машине «Zwick–2.5», с помощью которой эти образцы по стандартной методике разрывались для определения их прочности на разрыв.

Известно, что самым важным в практическом отношении радиолитическим превращением в полимерах является сшивание [16]. В результате, при увеличении дозы облучения сетчатая структура полимера становится все более частой, а прочность образцов, изготовленных из обработанного пучком латекса, линейно растет, что представлено на рисунке 4.15. Максимальное значение прочности на разрыв каучуковых образцов, составившее $T=21$ МПа, было получено при введении в натуральный латекс дозы облучения, равной $D\approx 27$ Мрад. По литературным данным на сегодняшний день это значение прочности на разрыв является рекордным среди химически чистых процессов получения натурального каучука. Дальнейшее увеличение дозы облучения, поглощённой жидким натуральным латексом, приводит к его вулканизации уже в процессе электронно-пучковой обработки и к образованию на поверхности латекса стекловидного слоя, что делает невозможным его использование, и, в частности, изготовление и исследование каучуковых образцов. Однако, считать указанный режим обработки натурального латекса оптимальным нельзя, поскольку это требует отдельных дополнительных исследований.

Оценки показывают, что при использовании всей площади электронного пучка при его средней мощности в атмосфере $P_{п}=4$ кВт производительность обработки натурального латекса может составлять ≈ 20 кг/час, что является приемлемым для применения созданного источника электронов с широкоапертурным плазменным катодом в производственных целях.

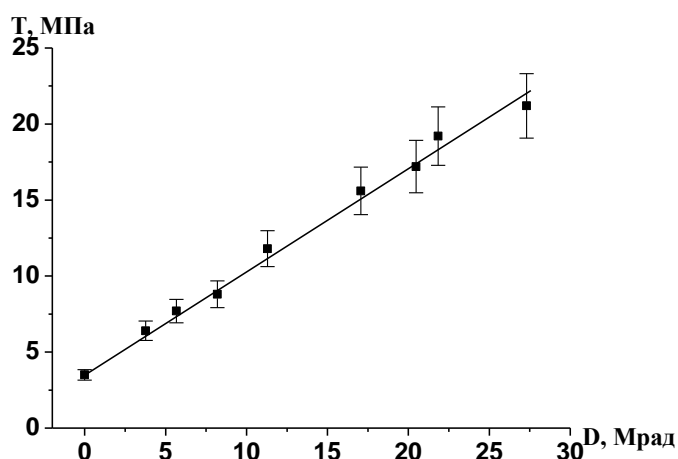


Рисунок 4.15 – Зависимость прочности на разрыв образцов T от введенной в латекс дозы облучения D при ускоряющем напряжении $U_0=160$ кВ, амплитуде тока пучка $I_{п}=12$ А, длительности импульса $t_{и}=35$ мкс и частоте следования импульсов $f=10$ с $^{-1}$

Выводы

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. На основании проведенных исследований создан автоматизированный широкоапертурный (75×15) см 2 источник электронов с многоапертурным сеточным плазменным катодом и выводом ПЭС в атмосферу, который по совокупности основных параметров и диапазону их независимой перестройки (энергия пучка $(100 \div 200)$ кэВ, амплитуда тока пучка, выведенного в атмосферу $(2 \div 30)$ А, длительность импульсов тока

пучка ($10 \div 100$) мкс, частота следования импульсов ($1 \div 50$) с^{-1}), коэффициенту вывода тока пучка из ускоряющего промежутка в атмосферу ($\beta=0,75$) и КПД ($\chi \approx 0,65$) подходит для применения его в промышленных целях.

2. Экспериментально показана принципиальная возможность разложения молекулы тетрафторида кремния под действием низкоэнергетичного электронного пучка с образованием на выходе реакции пленочного кремния и свободного фтора. Это перспективно для использования источников электронов для утилизации газообразного ТФК, образованием на выходе реакции разложения молекулы ТФК пленочного кремния и применением его, к примеру, в солнечной энергетике.

3. Экспериментально показана принципиальная возможность эффективного использования широкоапертурного импульсного электронного пучка, генерируемого источником электронов с плазменным катодом на основе дуги низкого давления, в процессах предварительной радиационной сшивки натурального латекса без добавления дополнительных веществ, ускоряющих процесс вулканизации. Использование такого источника электронов с целью радиационной активации натурального латекса позволяет увеличить прочность на разрыв вулканизированных образцов, изготовленных из этого латекса после обработки электронным пучком, с 3 МПа до 21 МПа без добавления химических добавок, что перспективно для реализации технологии производства экологически чистой (биосовместимой) резины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие **основные результаты**:

1. Создан катодный узел плазмогенератора на основе дугового разряда низкого давления с стабильно работающий в диапазоне токов разряда $I_p=(10\div 100)$ А без его обрывов при длительности импульсов $t=(10\div 100)$ мкс и частоте их следования до $f=50\text{ с}^{-1}$ с ресурсом, превышающим $N=10^7$ имп. Диафрагмирование выходного электрода разработанного катодного узла практически исключает попадание микрокапель материала катода на электроды разрядной системы.

2. Показано, что для повышения устойчивости работы сеточного плазменного катода целесообразно плазменную эмиссионную поверхность разделить на множество эмиссионных участков меньшей площади с помощью перфорированной металлической маски, укладываемой на эмиссионную сетку, что приводит к увеличению площади полого анода. Использование маски с переменной прозрачностью, обратно пропорциональной плотности тока эмиссии, позволяет выровнять распределение плотности тока по сечению пучка, и при использовании более крупной ячейки эмиссионной сетки увеличить плотность эмиссионного тока и повысить коэффициент извлечения электронов из плазменного катода α , а, следовательно, эффективность эмиттера в целом. Показано, что использование в плазменном катоде новых катодных узлов и многоапертурной маски с низкой геометрической прозрачностью позволяет кратно увеличить электрическую прочность ускоряющего промежутка.

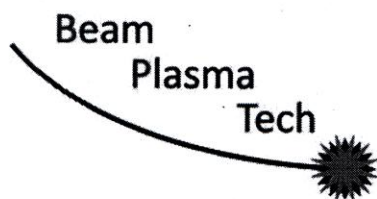
3. Показано, что в многоапертурной двухэлектродной электронно-оптической системе, формирующей многоэлементный электронный пучок, возможно обеспечить траекторию и вывод электронного пучка большого

сечения в атмосферу с минимальными потерями тока пучка на опорной решетке ВФО.

4. На основании проведенных исследований создан автоматизированный широкоапертурный $(75 \times 15) \text{ см}^2$ источник электронов с многоапертурным сеточным плазменным катодом, который по совокупности основных параметров и диапазону их независимой перестройки (энергия пучка $(100 \div 200) \text{ кэВ}$, амплитуда тока пучка, выведенного в атмосферу $(2 \div 30) \text{ А}$, длительность импульсов тока пучка $(10 \div 100) \text{ мкс}$, частота следования импульсов $(1 \div 50) \text{ с}^{-1}$), коэффициенту вывода тока пучка из ускоряющего промежутка в атмосферу ($\beta=0,75$) и КПД ($\chi \approx 0,65$) подходит для применения его в промышленных целях.

5. Экспериментально показана принципиальная возможность разложения молекулы ТФК под действием низкоэнергетичного (до 200 кэВ) электронного пучка, выведенного через ВФО в атмосферу газообразного ТФК, с образованием на выходе реакции пленочного кремния и свободного фтора, а также возможность эффективного использования широкоапертурного импульсного электронного пучка в процессах предварительной радиационной сшивки натурального латекса без добавления дополнительных веществ, ускоряющих процесс вулканизации.

В заключении автор искренне благодарит д.т.н. Н.Н. Ковалю, под руководством которого была выполнена диссертационная работа. Автор признателен С.А. Сулакшину, В.В. Денисову и В.В. Яковлеву за помощь в проведении экспериментов, а также П.М. Щанину за полезные советы. Автор выражает благодарность всем сотрудникам лаборатории плазменной эмиссионной электроники за полезные дискуссии по теме диссертационной работы. Отдельную благодарность автор выражает В.В. Шугурову за конструктивные замечания, активное участие в работе, помощь в планировании и подготовке экспериментов, а также анализе их результатов.



« ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ »

Общество с ограниченной ответственностью
(ООО «ППТ»)

ИНН/КПП 7017259011/ 701701001

634055, г. Томск, ул. Смирнова, 42/1-5

Телефоны: + 8(3822)492683, 89138072425

E-mail: bpt@bptvac.ru, llcppt@mail.ru

Web-сайт: <http://www.bptvac.ru>

Акт

использования результатов диссертационной работы на соискание степени кандидата технических наук Воробьева М.С. «Источник электронов с многоапертурным плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления с эффективным выводом пучка большого сечения в атмосферу»

Компания «Пучково-плазменные технологии» осуществляет разработку и внедрение технологий модификации материалов и изделий с использованием вакуумного электронно-ионно-плазменного оборудования.

С целью внедрения электронно-пучкового оборудования в промышленное производство для ООО «Пучково-плазменные технологии» в Институте сильноточной электроники СО РАН (ИСЭ СО РАН) были проведены исследования по модификации натурального латекса под действием импульсного электронного пучка на модернизированном ускорителе электронов «ДУЭТ» с многоапертурным плазменным катодом, создание которого является результатом диссертационной работы Воробьева М.С.

В ходе исследований осуществлялось облучение натурального латекса (страна происхождения - Малайзия) в жидкой фазе под действием импульсного электронного пучка (параметры электронного пучка: ускоряющее напряжение - 160 кВ, ток эмиссии 30 А, длительность импульса - 35 мкс, частота следования импульсов - 10 Гц) с введенной дозой 27 Мрад. Из модифицированного латекса изготавливались образцы в форме «лопатки» для определения предела прочности на разрыв при их растяжении на универсальной электро-механической испытательной машине Instron 3369. В результате испытаний установлено, что для представленных образцов средняя величина предела прочности на разрыв составила 21 МПа со средней деформацией при растяжении 1900 %.

Проведенные испытания показали, что введение в натуральный латекс дозы облучения 27 Мрад позволило увеличить предел прочности на разрыв вулканизированного латекса более чем в 5 раз по сравнению с образцами без облучения.

Результат испытаний по определению предела прочности на разрыв «лопаток» из натурального латекса, полученный с использованием метода облучения под действием

импульсного электронного пучка на ускорителе электронов «ДУЭТ» с многоапертурным плазменным катодом является лучшим среди других известных методов обработки натурального латекса без дополнительных химических веществ и катализаторов.

Полученные результаты позволяют перейти к стадии ОКР по созданию комплексного оборудования для крупнотоннажной обработки натурального латекса на базе созданного макета ускорителя электронов «ДУЭТ» с многоапертурным плазменным катодом.

Директор ООО

«Пучково-плазменные технологии»



В.В. Денисов



Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский государственный университет»
Испытательный центр «Томский региональный центр коллективного пользования»
Томского государственного университета (ИЦ ТРЦКП ТГУ)
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36 тел./факс:8(3822)783-714 E-mail: ckp@mail.tsu.ru, Web: <http://ckp.tsu.ru>

на 1 листе

Заключение № 2015-08-02 от «03» августа 2015г.

Заказчик: Общество с ограниченной ответственностью «Пучково-плазменные технологии»

Объект анализа: образцы лопаток из латекса сечением (6x0.3) мм² в области разрыва, изготовленные из латекса подвергнутого облучению электронным пучком. Величина дозы облучения 27 Мрад. Количество образцов, переданных на испытания: 7.

Пробу отобрал: заказчик

Дата поступления материала в лабораторию: 02.08.2015 г.

Цель анализа: определение предела прочности на разрыв (МПа) при растяжении лопаток из латекса.

Наименование оборудования для проведения работ: Настольная универсальная электро-механическая испытательная машина Instron 3369 (свидетельство о поверке № 4862/202 от 17.12.2014)

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА*

№ п/п	Толщина [mm]	Ширина [mm]	Начальная расчётная длина [mm]	Скорость испытания [mm/min]	Предел прочности на разрыв [МПа]	Деформация при растяжении [%]
1	0,60000	6,00000	40,0	150,0	9,36314	1 606,4
2	0,50000	6,00000	40,0	150,0	17,30539	1 927,4
3	0,30000	6,00000	40,0	150,0	22,56320	2 005,2
4	0,30000	6,00000	40,0	150,0	24,52345	1 981,0
5	0,60000	6,00000	40,0	150,0	15,01965	1 979,4
6	0,30000	6,00000	40,0	150,0	14,94544	1 712,0
7	Образец выпал из обработки					

Примечание – Образы под номерами 1, 5 и 6 не учтены при усреднении результатов предела прочности на разрыв, т.к. разрыв образца происходил вне рабочей зоны. Тем не менее, величина деформации при усреднении находится в одном диапазоне.

Заключение: В результате испытаний установлено, что для предоставленных образцов, изготовленных из латекса с дозой облучения 27 Мрад, средняя величина предела прочности на разрыв составила 21 МПа со средней деформацией при растяжении 1900 %.

Рекомендации: рассмотреть возможность изготовления образцов с рабочей поверхностью: длина – не более 20 мм, толщина 0,3-0,35 мм, ширина – 3 мм.

Директор ТРЦКП ТГУ



К.В. Алексеенко

Некоммерческое партнерство по научной и инновационной деятельности «Томский Атомный Центр»

634041, г.Томск, ул.Вершинина, 24В. Тел/Факс (3822) 43-52-19

Email: tomskatom@mail.ru

ИНН 7017118211/КПП 701701001 ОГРН 1057000154200

Акт

использования результатов диссертационной работы на соискание степени кандидата технических наук Воробьева М.С. «Источник электронов с многоапертурным плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления с эффективным выводом пучка большого сечения в атмосферу»

Место проведения испытаний: Институт сильноточной электроники СО РАН (ИСЭ СО РАН), пр. Академический 2/3.

Специалистами Сублиматного завода Сибирского химического комбината (СХК) и Института сильноточной электроники СО РАН (ИСЭ СО РАН) под патронажем Томского атомного центра (ТАЦ) были проведены совместные испытания системы для разложения тетрафторида кремния (ТФК) под действием импульсного электронного пучка, генерируемого ускорителем электронов «ДУЭТ», создание которого является результатом исследований по диссертационной работе Воробьева М.С. В результате испытаний в реакторе объемом 0.5 дм³ на образцах из стали 12Х18Н10Т была получена пленка кремния толщиной 300 нм. Осуществлялось 20 напусков ТФК при давлении 0.8 атм. Общее количество импульсов электронного пучка составило 20000 (ускоряющее напряжение – 160 кВ, ток пучка 18А, длительность импульса 35 мкс, частота следования импульсов – 5 Гц). При добавлении в смесь ТФК водорода в соотношении SiF₄:H₂=1:2 и 10 напусках смеси при давлении в реакторе 0.4 атм (1000 импульсов электронного пучка на каждый напуск) были получены пластинки кристаллического кремния с размерами от 3 до 160 нм.

В результате проведенных экспериментов показано, что метод разложения ТФК под действием импульсного электронного пучка с получением на выходе пленочного и порошкового кремния пригоден для утилизации тетрафторида кремния, являющегося экологически опасными отходами химического производства.



А.Ф. Чемерис

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Абдуллин, Э.Н. Отверждение полиэфирных смол, стимулированное облучением импульсным электронным пучком / Э.Н. Абдуллин, В.Н. Чмух // ХВЭ. – 1979. – Т.13. – Вып.2. – С. 181–182.

2 Чмух, В.Н. Радиационное отверждение ненасыщенных олигоэфиров наносекундными сильноточными пучками электронов / В.Н. Чмух // Диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук. – Томск, 1983. – 175 с.

3 Салимов, Р.А. Мощные ускорители электронов для промышленного применения / Р.А. Салимов. – Успехи физических наук, 2000. – Т.170. – №2. – С. 197–201.

4 Chmielewski, A.G. Industrial Application of e-beam plasma to air pollution control / A.G. Chmielewski, Z. Zimek, E. Iller, B. Tyminski, J. Licki // J. Tech. Phys. – 2000. – V41(1). – Special Issue. – P. 551–572.

5 Ершов, Б.Г. Радиационные технологии: возможности, состояние и перспективы применения / Б.Г. Ершов. – Вестник Российской академии наук, 2013. – Т.83. – №10. – С. 885–895.

6 Власов, В.А. Экспериментальное исследование и математическое моделирование восстановления фторидных соединений импульсным электронным пучком / В.А. Власов, А.И. Пушкарёв, Г.Е. Ремнев, С.А. Сосновский, В.В. Ежов, Т.И. Гузеева // Известия ТПУ, 2004. – Т.307. – №5. – С. 89–93.

7 Ворогушин, М.Ф. Пучковые и ионно-плазменные технологии / М.Ф. Ворогушин, В.А. Глухих, Г.Ш. Манукян, Д.А. Карпов, М.П. Свиньин, В.И. Энгелько, Б.Ц. Яценко // Вопросы атомной науки и техники, 2002. – №3. – С. 101–109.

8 Пушкарёв, А.И. Использование импульсных электронных пучков в плазмохимии / А.И. Пушкарёв, Г.Е. Ремнев, Д.В. Пономарев, В.В. Ежов, Д.В. Гончаров // Известия ТПУ, 2006. – Т.309. – №2. – С. 103–108.

9 Коваль, Н.Н. Генерация в инертных газах при накачке электронным пучком большого сечения с длительностью импульса тока до 2.5 мс / Н.Н. Коваль, Ю.Е. Крейндель, Г.А. Месяц, В.С. Скакун, В.Ф. Тарасенко, В.С. Толкачев, А.В. Феденев, А.А. Чагин, П.М. Щанин // Письма в ЖТФ, 1986. – Т.12. – Вып.1. – С. 37–42.

10 Бугаев, С.П. Высоковольтный вакуумный диод с холодным катодом для инжекции электронного пучка в газовый лазер / С.П. Бугаев, А.В. Кочкарев, В.И. Манылов, В.М. Пайгин // ПТЭ, 1974. – №2. – С. 160–163.

11 Bugaev, A.S. Radially convergent 30–100- μ s e-beam-pumped Xe and Ne lasers / A.S. Bugaev, N.N. Koval, M.I. Lomaev, S.V. Mel'chenko, V.V. Ryzhov, V.F. Tarasenko, I.Yu. Turchanovsky, A.V. Fedenev, P.M. Shanin // Laser and Particle Beams, 1994. – V.12. – №4. – P. 633–646.

12 Басов, Н.Г. Лазеры на конденсированных и сжатых газах / Н.Г. Басов, В.А. Данилычев // Успехи физических наук, 1986. – Т.148. – В.1. – С. 55–100.

13 Ефремов, А.М. Высоковольтный импульсный источник электронов с плазменным эмиттером для получения радиально расходящегося пучка / А.М. Ефремов, Б.М. Ковальчук, Ю.Е. Крейндель, В.С. Толкачев, П.М. Щанин // ПТЭ, 1987. – №1. – С. 167–169.

14 Черняев, А.П. Ускорители в современном мире / А.П. Черняев. – М.: Издательство Московского университета, 2012. – 368 с.

15 Ростов, В.В. Возможность стерилизации перевязочных средств с помощью сильноточных импульсно-периодических электронных пучков прямого действия на примере раневой абсорбирующей повязки / В.В. Ростов, П.И. Алексеенко, П.В. Выходцев, А.В. Штейнле, В.И. Мазин, Е.П.

Красноженов, Л.С. Муштоватова, Т.В. Солодкова, П.С. Постников, К.В. Кутонова, Л.А. Штейнле // Сибирский медицинский журнал. – 2012. – Т.27. – №1. – С. 141–146.

16 Соковнин, С.Ю. Наносекундные ускорители электронов и радиационные технологии на их основе / С.Ю. Соковнин. – Екатеринбург: УрО РАН, 2007. – 225 с.

17 Алимов, А.С. Практическое применение электронных ускорителей / А.С. Алимов. – Препринт НИИЯФ МГУ, 2011. – №13/877. – 41 с.

18 Елецкий, А.В. Эксимерные лазеры / А.В. Елецкий // Успехи физических наук, 1978. – Т.125. – №2. – С. 279–314.

19 Бугаев, С.П. Электронные пучки большого сечения / С.П. Бугаев, Ю.Е. Крейндел, П.М. Щанин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 112 с.

20 Источники электронов с плазменным эмиттером. Под ред. Ю.Е. Крейнделя. – Новосибирск: Наука, 1983. – 115 с.

21 Bayless, J.R. Plasma cathode electron gun / J.R. Bayless // Rev. Sci. Instrum., 1975. – V46. – №9. – P. 1158–1160.

22 Винтизенко, Л.Г. Генерация в инертных газах при накачке электронным пучком ускорителя с плазменным катодом / Л.Г. Винтизенко, В.И. Гушенец, Н.Н. Коваль, Г.А. Месяц, В.С. Скакун, В.Ф. Тарасенко, А.В. Феденев, П.М. Щанин // Докл. АН СССР, 1986. – Т.288. – №3. – С.609–612.

23 Гаврилов, Н.В. Плазменный катод электронного ускорителя с большим сечением пучка / Н.В. Гаврилов, В.В. Осипов, О.А. Буреев, Д.Р. Емлин, А.С. Каменецких, В.А. Шитов // Письма в ЖТФ, 2005. – Том 31. – Вып.3. – С. 72–78.

24 Gielkens, S.W.A. A long-pulse 300 keV electron gun with a plasma cathode for high-pressure gas lasers / S.W.A. Gielkens, P.J.M. Peters, W.J. Witteman, P.V. Borovikov, A.V. Stepanov, V.N. Tskhai, M.A. Zavjalov, V.I. Gushenets, N.N. Koval // Rev. Sci. Instrum., 1996. – V.67. – №7. – P.2449–2452.

25 Окс, Е.М. Высоковольтный электронный источник с плазменным катодом и высокой плотностью энергии пучка в импульсе / Е.М. Окс, П.М. Щанин // ПТЭ, 1988. – №3. – С. 166–169.

26 Батраков, А.В. Воздействие сильноочного электронного пучка на металлические материалы: методические указания к выполнению работ по курсу «Эмиссионная электроника» для магистрантов, обучающихся по магистерской программе 210102 «Микроволновая электроника» направления 210100 «Электроника и микроэлектроника» / А.В. Батраков и А.Б. Марков. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 24 с.

27 Анисимова, Т.Е. Повышение надежности и ресурса работы катодного узла электронного ускорителя с выводом пучка большого сечения в атмосферу / Т.Е. Анисимова, А.Н. Малинин // ПТЭ, 2008. – №6. – С.99–102.

28 Аброян, М.А. Эффективность высоковольтных ускорителей электронов с выводом пучка большого сечения в атмосферу / М.А. Аброян, Г.И. Трубников // ЖТФ, 1989. – Т.59. – №2. – С. 129–134.

29 Райзер, Ю.П. Физика газового разряда / Ю.П. Райзер. – Учеб. руководство. – М.: Наука, 1987. – 592 с.

30 Добрецов, Л.Н. Эмиссионная электроника / Л.Н. Добрецов, М.В. Гомоюнова. – М.: 1966. – 564 с.

31 Григорьев, Ю.В. Четырехэлектродная электронная пушка с выпуском потока сечением $10 \times 80 \text{ см}^2$ в атмосферу / Ю.В. Григорьев, Л.П. Шантурин // ПТЭ, 1979. – №4. – С. 194–196.

32 Григорьев, Ю.В. Импульсная электронная пушка с выпуском потока большого сечения в атмосферу / Ю.В. Григорьев, Л.П. Шантурин // ПТЭ, 1978. – №2. – С. 187–189.

33 Бугаев, С.П. Техника получения высокоэнергетических электронных пучков с большим поперечным сечением / С.П. Бугаев, Ю.Е. Крейндель, П.М. Щанин // ПТЭ, 1980. – №1. – С. 7–24.

34 Федоров, В.И. Электронная пушка с выводом потока большого сечения в атмосферу / В.И. Федоров, Л.П. Шантурин // ПТЭ, 1976. – №1. – С. 153–155.

35 Farrel, S.R. Broad beam electron gun / S.R. Farrel, L.L. Demeter, P.S. Woods // Pat. №3863163. – США, 1975.

36 Аброян, М.А. Импульсный ускоритель электронов с выводом пучка большого сечения в атмосферу / М.А. Аброян, П.М. Богомазов, С.Ф. Зверев, С.Л. Косогоров, В.А. Лагутин, В.А. Родичкин, А.Д. Сусаров, Г.М. Токарев, К.А. Шарков // ПТЭ, 1982. – №5. – С. 28–30.

37 Шантурин, Л.П. Формирование широких однородных электронных потоков / Л.П. Шантурин, В.И. Федоров // Радиотехника и электроника, 1980. – №2. – С. 372–380.

38 Seltser, S.M. The propagation and reflection of electrons by foil / S.M. Seltser, M.J. Berger // Nucl. Instrum. And Methods, 1974. – V.119. – P. 157–179.

39 Аброян, М.А. Устройство ионизации для непрерывного сверхзвукового электроионизационного СО-лазера / М.А. Аброян, В.В. Акулов, П.М. Богомазов, С.Л. Косогоров, Г.Ш. Манукян, С.А. Мотовилов, В.Я. Шведюк, В.Б. Шапиро // Квантовая электроника, 1996. – Вып.23. – №8. – С. 751–752.

40 Аброян, М.А. Влияние электроннооптических факторов на коэффициент вывода пучка широкоапертурных ускорителей электронов / М.А. Аброян, Ю.В. Зуев, С.Л. Косогоров, В.Я. Шведюк // ЖТФ, 2003. – Т.73. – Вып.8. – С. 98–104.

41 Косогоров, С.Л. Расчетное и экспериментальное исследование электронно-оптических систем низкоэнергетичных электронных ускорителей с пучком большого сечения / С.Л. Косогоров // ЖТФ, 2011. – Т.81. – Вып.7. – С. 115–119.

42 Баранов, Г.А. Широкоапертурный ускоритель непрерывного действия с выводом электронного пучка высокой плотности / Г.А. Баранов, Л.В. Бодакин, В.А., В.А. Гурашвили, И.Д. Джигайло, О.В. Комаров, С.Л. Косогоров, В.Н. Кузьмин, В.И. Сень, Д.Ю. Ткаченко, Н.А. Успенский, В.Я. Шведюк // ПТЭ, 2013. – №1. – С. 81–85.

43 Аброян, М.А. Измерения в реальном времени распределения плотности тока в низкоэнергетичных электронных пучках большого сечения / М.А. Аброян, С.Л. Косогоров, И.В. Набокова, Н.А. Успенский, В.А. Чумисев, В.Б. Шапиро, В.Я. Шведюк // ПТЭ, 2007. – №4. – С. 109–112.

44 Месяц, Г.А. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга / Г.А. Месяц. – М.: Наука, 2000.

45 Бугаев, С.П. Взрывная эмиссия электронов / С.П. Бугаев, Е.А. Литвинов, Г.А. Месяц, Д.И. Проскуровский // Успехи физических наук, 1975. – Т.115. – Вып.1. – С. 101–120.

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

47 Бурцев, В.А. О повышении стабильности работы многоострийных взрывоэмиссионных катодов / В.А. Бурцев, М.А. Василевский, И.М. Ройфе, Е.В. Середенко, В.И. Энгелько // Письма в ЖТФ, 1978. – Т.14. – №18. – С. 1083–1087.

48 Бурцев, В.А. Исследование диода со взрывоэмиссионным катодом при больших длительностях импульсах тока / В.А. Бурцев, М.А. Василевский, О.А. Гусев // ЖТФ, 1978. – Т.48. – №7. – С. 1494–1503.

49 Зайцев, Н.И. Влияние диэлектрического покрытия поверхности кромочного взрывоэмиссионного катода на структуру электронного пучка / Н.И. Зайцев, Е.В. Иляков, Г.С. Кораблев, И.С. Кулагин, Е.В. Пискарев // Тез.

Докл. 7 Всесоюзн. Симп. по сильноточной электронике. – Томск, 1988. – Ч.1. – С. 58–60.

50 Engelko, V. Pulsed electron beam facility (GEZA) for surface treatment of materials / V. Engelko, B. Yatsenko, G. Mueller, H. Bluhm // Vacuum, 2001. – V.62. – P. 211–216.

51 Архипов, А.В. Исследование интенсивных импульсных электронных пучков большого сечения / А.В. Архипов, В.Г. Ковалев, М.В. Мишин, Г. Мюллер, Г.Г. Соминский, В.И. Энгелько // Известия ВУЗов. Радиофизика, 2004. – Т.XLVII. – №5–6. – С. 471–479.

52 Месяц, Г.А.. Эктон – лавина электронов из металла / Г.А. Месяц // Успехи физических наук, 1995. – Т.165. – №6. – С. 601–626.

53 Месяц, Г.А. Импульсный электрический разряд в вакууме / Г.А. Месяц, Д.И. Проскуровский. – Новосибирск: Наука, 1984. – 256 с.

54 Коваль, Б.А. О материалах эмиттеров долговечных холодноэмиссионных катодов / Б.А. Коваль, Д.И. Проскуровский, Е.Б. Янкелевич // Тезисы докл. III Всесоюзного симпозиума по сильноточной электронике. –Томск, 1978. – С. 19–20.

55 Абдуллин, Э.Н. Получение сильноточных электронных пучков во взрывоэмиссионном диоде при давлении газа $\sim 10^{-2}$ – 10^{-1} Тор / Э.Н. Абдуллин, Г.П. Баженов, Е.Ф. Балбоненко, С.Э. Кунц // Письма в ЖТФ, 1998. – Т.24. – №2. – С. 88–92.

56 Афанасьев, К.В. Токовые характеристики вакуумных диодов квазипланарной конфигурации со взрывоэмиссионными катодами из различных материалов при длительности высоковольтного импульса в единицы наносекунд / К.В. Афанасьев, М.И. Вагнер, О.П. Кутенков, И.В. Пегель, Г.А. Прибытков, В.В. Ростов, В.П. Тараканов // Изв. Высших учеб заведений. Физика, 2012. – Т.55. – №7. – С. 41–48

57 Loda, G.K. Recent advances in cold cathode technology as applied to high power lasers / G.K. Loda // Proc. 2nd intern. conf. on high power electron and ion beam research and technology. – Cornell, 1977. – V.2. – P. 879–890.

58 Пушкарёв, А.И. Эффективность работы планарного диода с взрывоэмиссионным катодом при задержке плазмообразования / А.И. Пушкарёв, Ю.Н. Новоселов, Р.В. Сазонов // ЖТФ, 2008. – Т.78. – Вып.3. – С. 72–77.

59 Пушкарёв, А.И. Исследование потерь импульсного электронного пучка при формировании и выводе из диодной камеры ускорителя / А.И. Пушкарёв, Ю.Н. Новоселов, Р.В. Сазонов // ПТЭ, 2007. – №5. – С. 117–124.

60 Ремнев, Г.Е. Импульсный сильноточный ускоритель с согласующим трансформатором / Г.Е. Ремнев, Э.Г. Фурман, А.И. Пушкарёв, С.Б. Карпузов, Н.А. Кондратьев, Д.В. Гончаров // ПТЭ, 2004. – №3. – С. 130–134.

61 Вагнер, М.И. Исследование характеристик планарного диода с композиционным катодом / М.И. Вагнер, И.С. Егоров, М.И. Кайканов, Г.А. Прибытков, Г.Е. Ремнев, А.П. Савицкий, А.В. Степанов // Изв. Вузов. Физика, 2011. – №11/3. – С. 80–85.

62 Егоров, И.С. Частотно-импульсный электронный ускоритель «АСТРА» / И.С. Егоров, М.И. Кайканов, Е.И. Луконин, Г.Е. Ремнев, А.В. Степанов // ПТЭ, 2013. – №5. – С. 81–84.

63 Егоров, И.С. Выходное окно сильноточного ускорителя электронов «АСТРА» / И.С. Егоров, М.И. Кайканов, Г.Е. Ремнев // Изв. ТПУ, 2013. – №2. – Т.322. – С. 91–94.

64 Котов, Ю.А. Частотный наносекундный ускоритель электронов УРТ-0,2 / Ю.А. Котов, С.Ю. Соковнин // ПТЭ, 1997. – №4. – С. 84–86.

65 Котов, Ю.А. Частотный наносекундный ускоритель электронов УРТ-0,5 / Ю.А. Котов, С.Ю. Соковнин, М.Е. Балезин // ПТЭ, 2000. – №1. – С. 112–115.

66 Loda G.K. Repetitively pulsed electron beam generator / G.K. Loda, D.A. Meskan // Proc. 2nd intern. conf. on high power electron and ion beam research and technology. – Cornell, 1977. – V.1. – P. 252–273.

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

68 Месяц, Г.А. Импульсная энергетика и электроника. / Г.А. Месяц. – М.:Наука, 2004. – 704 с.

69 Абдуллин, Г.А. Генерация сильнооточного микросекундного электронного пучка большого сечения / Э.Н. Абдуллин, С.Я. Беломытцев, С.П. Бугаев, С.И. Горбачев, В.М. Заславский, В.П. Зорин, Б.М. Ковальчук, С.В. Логинов, Ю.Н. Матюков, Р.М. Распутин, В.С. Толкачев, П.М. Щанин // Физика плазмы, 1991. – Т.17. – В.6. – С. 741–745.

70 Бугаев, С.П. Широкоапертурный ХеСl–лазер с энергией излучения ~2 кДж / С.П. Бугаев, Э.Н. Абдуллин, В.Б. Зорин, Б.М. Ковальчук, С.В. Логинов, Г.А. Месяц, В.С. Скакун, В.Ф. Тарасенко, В.С. Толкачев, П.М. Щанин // Квантовая электроника, 2004. – Т.34. – №9. – С. 801–804.

71 Абдуллин, Э.Н. Взрывоэмиссионные источники широкоапертурных электронных пучков микросекундной длительности / Э.Н. Абдуллин. – Диссертация на соискание д.т.н. – Томск, 2007. – 229 с.

72 Абдуллин, Э.Н. Генераторы пучков электронов на основе вакуумно-изолированных генераторов Маркса / Э.Н. Абдуллин, С.П. Бугаев, А.М. Ефремов, В.Б. Зорин, Б.М. Ковальчук, В.В. Кремнев, С.В. Логинов, Г.А. Месяц, В.С. Толкачев, П.М. Щанин // ПТЭ, 1993. – №5. – С. 138–142.

73 Hegeler, F. The electra KrF Laser / F. Hegeler, M.C. Myers, M. Friedman, J.L. Giuliani, J.D. Sethian, S.B. Swanekamp, M.F. Wolford // IEEE 25

International power modulator symposium and high voltage workshop. – Hollywood, 2002. – P. 121–125.

74 Hegeler, F. Efficient electron beam deposition in the gas cell of the Electra laser / F. Hegeler, D. V. Rose, M. C. Myers, J. D. Sethian, J. L. Giuliani, M. F. Wolford, M. Friedman // *Phys. Plasmas*, 2004. – V.11. – P. 5010–5021.

75 Абдуллин, Э.Н. Формирование сильноточечных электронных пучков большой апертуры / Э.Н. Абдуллин, И.Н. Коновалов, В.Ф. Лосев, В.Ф. Тарасенко, С.М. Чесноков // *ЖТФ*, 1982. – Т.52. – В.5. – С. 929–934.

76 Abdullin, E.N. Repetitive pulsed Marx generator / E.N. Abdullin, E.F. Balbonenko, A.F. Fryshtetter, A.M. Startsev // *Proc. XII Symp. On High Current Electronics*. – Tomsk, 2000. – P. 382–385.

77 Ельчанинов, С.А. Исследования стабильности высоковольтного разрядника с потоком рабочего газа между электродами / А.С. Ельчанинов, Ф.Я. Загулов, С.Д. Коровин, Г.А. Месяц // *ПТЭ*, 1979. – № 4. – С. 162–164.

78 Губанов, В.П. Высоковольтный наносекундный генератор с частотой следования импульсов до 1 кГц / В.П. Губанов, С.Д. Коровин, А.С. Степченко // *ПТЭ*, 1997. – №1. – С. 95–98.

79 Абдуллин, Э.Н. Импульсно-периодический электронный ускоритель с большим поперечным сечением пучка / Э.Н. Абдуллин, А.В. Морозов // *Proc.VI Intern. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows*. – Tomsk, 2002. – P. 71–74.

80 Загулов, Ф.Я. Импульсный наносекундный ускоритель электронов с частотой срабатывания до 100 Гц / Ф.Я. Загулов, В.Я. Борисов, Г.Я. Власов, А.А. Макушев, В.В. Лопатин, А.С. Ельчанинов, Б.М. Ковальчук // *ПТЭ*, 1976. – №5 – С. 18–20.

81 Абдуллин, Э.Н. Применение стержневых обратных токопроводов для уменьшения магнитного поля вакуумного диода / Э.Н. Абдуллин, А.В. Морозов // *ПТЭ*, 2013. – №4. – С. 57–65.

82 Аброян, М.А. Ускоритель электронов непрерывного действия на основе вторичной ионно-электронной эмиссии / М.А. Аброян, Н.А. Успенский, В.П. Федяков // ПТЭ, 1984. – №4. – С. 24–27.

83 Гаврилов, Н.В. Импульсный источник электронов на основе несамостоятельного высоковольтного тлеющего разряда / Н.В. Гаврилов, Ю.Е. Крейндель, П.М. Щанин // ПТЭ, 1984. – №2. – С. 143–146.

84 Новиков, А.А. Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой / А.А. Новиков. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 96 с.

85 Pigache, D. Secondary emission electron gun for high pressure molecular lasers / D. Pigache, G. Fournier // J. Vac. Sci. Technol., 1975. – V.12. – №6. – P. 1197–1199.

86 Нечаев, А.А. Газовая электронная пушка с плазменным анодом / А.А. Нечаев, И.Г. Персианцев, В.М. Полушкин, М.А. Тимофеев, В.А. Тугарев // ПТЭ, 1983. – №2. – С. 156–157.

87 Isaacs, G.G. A cold cathode glow discharge electron gun for high pressure CO₂-laser ionization / G.G. Isaacs, D.L. Jordan, P.J. Dooley // J. Phys. E.: Sci. Instrum., 1979. – V.12. – P. 115–118.

88 Clark, W.M. A long pulse, high-current electron gun for e-beam sustained excimer lasers / W.M. Clark, G.J. Dunning // IEEE J. of Quant. Electronics, 1978. – V.14. – №2. – P. 126–129.

89 Николаев, В.Б. Прохождение электронов с энергиями 150–400 кэВ через вакуумноплотные фольги из алюминия и титана / В.Б. Николаев // ЖТФ, 1976. – №7. – С. 1555–1556.

90 Аброян, М.А. Широкоапертурные ускорители электронов с высоким коэффициентом вывода пучка / М.А. Аброян, И.Ю. Евстратов, С.Л. Косоголов, С.А. Мотовилов, В.В. Сиротинкин, В.Б. Шапиро // ПТЭ, 1998. – №2. – С. 83–88.

91 Аброян, М.А. Широкоапертурные ускорители электронов / М.А. Аброян, С.Л. Косоголов, В.Я. Шведюк // Атомная энергия, 2003. – Т.94. – В.4. – С. 304–309.

92 Винтизенко, Л.Г. Импульсные высоковольтные источники электронов с плазменным эмиттером для формирования пучков большого сечения / Л.Г. Винтизенко, Н.В. Гаврилов, Н.Н. Коваль, Ю.Е. Крейндель, В.С. Толкачев, П.М. Щанин // В кн.: Источники электронов с плазменным эмиттером. – Новосибирск: Наука, 1983. – С. 41–59.

93 Гаврилов, Н.В. Высоковольтные диоды с ионно-электронным эмиттером и анодной плазмой, генерированной импульсной контрагированной дугой / Н.В. Гаврилов. – Дисс. на соиск. уч. ст. канд. физ.-мат. наук. – Томск, 1985, 163 с.

94 Бункин, Ф.В. Излучение смесей инертных газов с водородом при возбуждении электронным пучком / Ф.В. Бункин, В.И. Держиев, Г.А. Месяц, В. С. Скакун, В. Ф. Тарасенко, В. А. Юровский, С. И. Яковленко // Квантовая электроника, 1984. – Т.11. – №6. – С. 1277–1280.

95 Басов, Н.Г. Мощная квазинепрерывная генерация в видимой области спектра на смеси инертных газов высокого давления / Н.Г. Басов, А.Ю. Александров, В.А. Данилычев, В.А. Долгих, О.М. Керимов, Ю.Ф. Мызников, И.Г. Рудой, А.М. Сорока // Письма ЖТФ, 1985. – Т.41. – В.4. – С. 156–158.

96 Lawton, S.A. The high-pressure neutral infrared xenon laser / S.A. Lawton, J.B. Richards, L.A. Newman, L. Specht, T.A. De Temple // J. Appl. Phys., 1979. – V.50. – №6. – P. 3888–3898.

97 Лосев, В.Ф. Генерация в смеси Ag:Xe при комбинированной накачке / В.Ф. Лосев, В.Ф. Тарасенко // Квантовая электроника, 1980. – Т.7. – №3. – С. 663–664.

98 Казьмин, Г.С. Электронный диодный ускоритель с большим сечением пучка / Г.С. Казьмин, Н.Н. Коваль, Ю.Е. Крейндель, В.С. Толкачев, П.М. Щанин // ПТЭ, 1977. – №4. – С. 19–20.

99 Коваль, Н.Н. Эмиссионная электроника / Н.Н. Коваль, Е.М. Окс, Ю.С. Протасов, Н.Н. Семашко. – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 596 с.

100 Жаринов, А.В. Плазменный катод электронов с сеточной стабилизацией. I / А.В. Жаринов, Ю.А. Коваленко, И.С. Роганов, П.М. Терюканов // ЖТФ, 1986. – Т.56. – Вып.1. – С. 66–71.

101 Жаринов, А.В. Плазменный катод электронов с сеточной стабилизацией. II / А.В. Жаринов, Ю.А. Коваленко, И.С. Роганов, П.М. Терюканов // ЖТФ, 1986. – Т.56. – Вып.4. – С. 687–693.

102 Грановский, В.А. Электрический ток в газе. Установившийся ток / В.А. Грановский. – М.: Наука, 1971. – 543 с.

103 Коваль, Н.Н. Формирование импульсного разряда низкого давления при принудительном иницировании катодного пятна / Н.Н. Коваль, Ю.Д. Королев, В.Б. Пономарев, В.Г. Работкин, И.А. Шемякин, П.М. Щанин // Физика плазмы, 1989. – Т.15. – В.6. – С. 747–752.

104 Козырев, А.В. Процессы в катодной области дугового разряда низкого давления / А.В. Козырев, Ю.Д. Королев, И.А. Шемякин // Известия ВУЗов. Физика, 1994. – №3. – С. 6–23.

105 Толкачев, В.С. Электронные ускорители с эмиттером на основе дугового разряда низкого давления / В.С. Толкачев. – Диссертация на соискание уч. ст. канд. техн. наук. – Томск, 1988. – 141 с.

106 Воробьёв, М.С. Источник электронов с многодуговым плазменным эмиттером для получения мегаваттных пучков субмиллисекундной длительности / М.С. Воробьёв, С.А. Гамермайстер, В.Н. Девятков,

Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин, П.М. Щанин // Письма в ЖТФ, 2014. – Т.40. – Вып.12. – С. 24–30.

107 Воробьёв, М.С. Источник электронов с сетчатым плазменным эмиттером для генерации интенсивного пучка субмиллисекундной длительности / М.С. Воробьёв, В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин, П.М. Щанин // Изв. ВУЗов. Физика, 2014. – Т.57. – №11/3. – С. 204–209.

108 Vorobyov, M.S. The multiarc plasma cathode electron source / M.S. Vorobyov, V.V. Denisov, V.N. Devyatkov, S.A. Gameraister, N.N. Koval, V.V. Shugurov, S.A. Sulakshin, V.V. Yakovlev // Proc. XXVth Intern. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 2012. – P. 615–618.

109 Воробьёв, М.С. Формирование и транспортировка интенсивного субмиллисекундного электронного пучка в продольном магнитном поле / М.С. Воробьёв, В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин // Труды V Международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника», 2015. – С. 163–170.

110 Коваль, Н.Н. Эффективное использование дуги низкого давления в сетчатом плазменном эмиттере электронов / Н.Н. Коваль, Ю.Е. Крейндел, Г.А. Месяц, В.С. Толкачев, П.М. Щанин // Письма в ЖТФ, 1983. – Т.9. – Вып.9. – С. 568–572.

111 Koval, N.N. The effect of gas on the development of a vacuum arc with a hollow anode / N.N. Koval, Yu.E. Kreindel, V.S. Tolkachev, P.M. Schanin // IEEE Transactions on electrical insulation, 1985. – V.EI–20. – №4. – P. 735–737.

112 Коваль, Н.Н. Влияние поджига на время коммутации длинных вакуумных промежутков / Н.Н. Коваль, М.Ю. Крейндел, Е.А. Литвинов, В.П. Толкачев // ЖТФ, 1991. – Т.61. – Вып.17. – С. 198–199.

113 Гушенец, В.И. Высокочастотная генерация импульсных электронных пучков большого сечения / В.И. Гушенец, Н.Н. Коваль, Д.Л.

Кузнецов, Г.А. Месяц, Ю.Н. Новоселов, В.В. Уварин, П.М. Щанин // Письма в ЖТФ, 1991. – Т.17. – Вып.23. – С. 26–29.

114 Koval, N.N. Broad beam electron sources with plasma cathodes / N.N. Koval, E.M. Oks, P.M. Schanin, Yu.E. Kreindel, N.V. Gavrilov // Nuclear Instrum. and Methods, 1992. – V.A321. – P. 417–428.

115 Белюк, С.И. Ускорители электронов с плазменным инжектором и выводом пучка в атмосферу / С.И. Белюк, В.А. Груздев, Ю.И. Жердев // ПТЭ, 1975. – №3. – С. 30–32.

116 Злобина, АФ. Параметры плазмы в экспандере электронного эмиттера с дуговым контрагированным разрядом / А.Ф. Злобина, Г.С. Казьмин, Н.Н. Коваль, Ю.Е. Крейндель // ЖТФ, 1980. – Т.50. – №6. – С. 1203–1207.

117 Клярфельд, Б.Н. Анодная область в газовом разряде при низких давлениях / Б.Н. Клярфельд, Н.А. Неретина // ЖТФ, 1958. – Т.18. – Вып.2. – С. 297–314.

118 Коваль, Н.Н. Особенности дугового контрагированного разряда с холодными катодами в режиме повторяющихся импульсов / Н.Н. Коваль, Н.П. Кондратьева, Ю.Е. Крейндель, П.М. Щанин // ЖТФ, 1981. – №1. – С. 200–203.

119 Злобина, А.Ф. Характеристики неустановившегося дугового контрагированного разряда с холодными катодами в магнитном поле / А.Ф. Злобина, Ю.Е. Крейндель Ю.М. Ларин // ЖТФ, 1979. – Т.49. – Вып.4. – С. 740–746.

120 Гаврилов, Н.В. Переход дугового разряда низкого давления из контрагированного в каскадный режим горения / Н.В. Гаврилов, Ю.Е. Крейндель, Е.М. Окс, П.М. Щанин // ЖТФ, 1983. – Т.53. – В.10. – С. 1947–1951.

121 Гаврилов Н.В. Высоковольтный электронный источник с плазменным эмиттером для формирования пучков большого сечения / Н.В. Гаврилов, Б.М. Ковальчук, Ю.Е. Крейндель, В.С. Толкачев, П.М. Щанин // ПТЭ, 1981. – №3. – С. 152–154.

122 Schanin, P.M. Plasma-emitter electron accelerator / P.M. Schanin, N.N. Koval, V.S. Tolkachev, V.I. Gushenets // Russian Physics Journal, 2000. – V.43. – №5. – P. 427–431.

123 Федоров, В.И. Расчет фольговых окон для электронных пушек с широким потоком / В.И. Федоров, А.С. Мясников, Л.П. Шантурин // ПТЭ, 1981. – №6. – С. 144–147.

124 Kang, M. An improved hibachi support structure for electron-beam diode foils / M. Kang, B. Weinstein, E. Rose // Los Alamos National Laboratory. – Los Alamos, New Mexico. – P. 461–464.

125 Воробьёв, М.С. Радиационная обработка натурального латекса с использованием широкоапертурного ускорителя электронов с плазменным эмиттером / М.С. Воробьёв, В.В. Денисов, Н.Н. Коваль, В.В. Шугуров, В.В. Яковлев, К. Uemura, P. Raharjo // ХВЭ, 2015. – Т.49. – №3. – С. 169–172.

126 Климов, А.И. Экспериментальные методы в сильноточной электронике / А.И. Климов // Учебное пособие. – Томск, 2009. – Изд-во ТПУ. – 229 с.

127 Белецкий, В.М. Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение) / В.М. Белецкий, Г.А. Кривов // Справочник. – К.: «КОМИНТЕХ», 2005. – 365 с.

128 Аброян, М.А. Измерение распределения плотности тока по сечению электронного пучка в импульсных ускорителях с большим полем облучения / М.А. Аброян, М.И. Афанасьев, И.Г. Персианцев, В.М. Полушкин, Т.С. Пулинец, В.Г. Ткачев, В.Э. Третьяков, Г.М. Токарев, В.Б. Саенко, Б.П. Яценко // Препринт К-0387. – Л.: НИИЭФА, 1980. – 10 с.

129 Кондратьев, Е.А. Автоматизированный измерительный комплекс для исследования пространственной структуры электронного пучка / Е.А. Кондратьев, В.Д. Письменный, А.Г. Рахимов, В.Б. Саенко // Применение ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве: Материалы III Всесоюзного совещания. – Ленинград, 1979. – Т.3. – С. 203–210.

130 Воробьёв, М.С. Восстановление спектров электронов электронных пучков из кривых ослабления для вакуумных и газовых диодов / М.С. Воробьёв, Е.Х. Бакшт, Н.Н. Коваль, А.В. Козырев, В.Ф. Тарасенко // Изв. ВУЗов. Физика, 2014. – Т.57. – №11/3. – С. 189–194.

131 Kozyrev, A.V. Reconstruction of electron beam energy spectra for vacuum and gas diodes / A.V. Kozyrev, V.Yu. Kozhevnikov, M.S. Vorobyov, E.Kh. Baksht, A.G. Burachenko, N.N. Koval, V.F. Tarasenko // Laser and Particle Beams, 2015. P.1–10. Cambridge University Press. – 0263-0346/15. – doi:10.1017/S0263034615000324.

132 Baksht, E.H. Spectrum of last electrons in nanosecond breakdown of air at atmospheric pressure / E.H. Baksht, A.G. Burachenko, V.Yu. Kozhevnikov, A.V. Kozyrev, I.D. Kostyrya, V.F. Tarasenko // Proc. 16 International Symposium on High Current Electronics, 2010. – P. 43–46.

133 Тихонов, А.Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 288 с.

134 Tabata, T. A generalized empirical equation for the transmission coefficient of electrons / T. Tabata, R. Ito // Nucl.Instr. and Methods, 1975. – V.127. – P. 429–434,.

135 Андреев, А.А. Вакуумно–дуговые покрытия / А.А. Андреев, Л.П. Саблев, С.Н. Григорьев. – Харьков. ННЦ ХФТИ, 2010. – 318 с.

136 Астрелин, В.Т. Получение высокой плотности тока субмиллисекундного электронного пучка в диоде с плазменным катодом в

режиме эмиссии с открытой плазменной границей / В.Т. Астрелин, И.В. Кандауров, Ю.А. Трунев // ЖТФ, 2014. – Т.84. – Вып.2. – С. 106–111.

137 Гуляев, А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – Учебник для вузов, 6-е изд., перераб. и доп. – М: Metallurgy, 1986. – 544 с.

138 Крейндель, Ю.Е. Импульсный источник электронов с плазменным эмиттером на основе каскадной дуги / Ю.Е. Крейндель, Е.М. Окс, П.М. Щанин // ПТЭ, 1984. – № 4. – С. 127–130.

139 Егоров, И.С. Выходное окно сильноточного ускорителя электронов «АСТРА» / И. С. Егоров, М. И. Кайканов, Г.Е. Ремнёв // Известия ТПУ, 2013. – Т.322. – №2. – С. 91–94.

140 Ремнёв, Г.Е. Исследование генерации импульсного электронного пучка в частотном режиме работы ускорителя / Г.Е. Ремнёв, И.С. Егоров, М.И. Кайканов, Г.Г. Канаев, Е.И. Луконин, А.В. Нашилевский, А.В. Степанов // Изв. вузов. Физика, 2011. – Т.54. – №11-3. – С. 74–79.

141 Воробьёв, М.С. Ускоритель электронов с многоапертурным плазменным эмиттером / М.С. Воробьёв, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин, В.В. Шугуров // Изв. ВУЗов. Физика, Т.57. – №11/3. – 2014. – С. 194–199.

142 Воробьёв, М.С. Источник электронов с многоапертурным плазменным эмиттером и выводом пучка в атмосферу / М.С. Воробьёв, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин // ПТЭ, 2015. – №5. – С. 112–120.

143 Воробьёв, М.С. Исследование стабильности работы плазменного эмиттера для широкоапертурного источника электронов / М.С. Воробьёв, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин, В.В. Шугуров // Труды V Международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника», 2015. – С. 61–69.

144 Воробьёв, М.С. Исследование энергетической эффективности источника электронов с многоапертурным плазменным эмиттером и выводом пучка большого сечения в атмосферу / М.С. Воробьёв, Н.Н. Коваль,

С.А. Сулакшин // Труды V Международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника», 2015. – С. 145–152.

145 Нгуен, Б.Х. Исследование основных механизмов энергетических потерь в источнике электронов с плазменным эмиттером и выводом пучка большого сечения в атмосферу / Б.Х. Нгуен, Т.В.Коваль, М.С. Воробьёв // Труды V Международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника», 2015. – С. 30–36.

146 Koval, T.V. Application of the plasma grid emitter in the large-aperture electron source / T.V. Koval, M.S. Vorobyov, Nguyen Bao Hung // Proc. VIII Intern. Conf. on Plasma Physics and Plasma Technology. – Minsk, 2015. – P. 250–253.

147 Hagelaar, G. J. M. Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models / G.J.M. Hagelaar, L.C. Pitchford // Plasma Sources Sci. Technol, 2005. – V.14. – P. 722–733.

148 BOLSIG+ Electron Boltzmann equation solver [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.bolsig.laplace.univ-lse.fr/download.php> (дата обращения: 30.03.2015)

149 Devyatkov, V.N. Effect of electron extraction from a grid plasma cathode on the generation of emission plasma / V.N. Devyatkov, N.N. Koval // Journal of Physics: Conference Series 552, 2014. – 012014. – doi:10.1088/1742-6596/552/1/012014. [Электронный ресурс].

150 Крейндель, Ю.Е. Электронная пушка непрерывного действия с плазменным катодом большой площади / Ю.Е. Крейндель, В.Я. Мартенс, В.Я. Съедин, С.В. Гавринцев // ПТЭ, 1982. – №4. – С. 178–180.

151 Burdovitsin, V.A. Fore-vacuum plasma-cathode electron sources / V.A. Burdovitsin, E.M. Oks // Laser and Particle Beams, 2008. – Т.26. – №4. – С. 619–635.

152 Goebel, D.M. Long pulse, plasma cathode e-gun / D.M. Goebel, R.W. Schumacher, R.M. Watkins // Proc. Conf. on High Power Particle Beams. – Washington, 1992. – P. 1093–1098.

153 Kandaurov, I. Submillisecond electron beam for plasma heating in multi-mirror trap gol-3 / I. Kandaurov, V. Astrelin, A. Avrorov, A. Burdakov, P. Bykov, G. Derevyankin, V.A. Kapitonov, V. Kurkuchekov, A. Rovenskikh, S. Sinitsky, Yu. Trunev, and V. Yarovoy // Fusion Science and Technology, 2011. – V.59. – №1. – P. 67–69.

154 Гаврилов, Н.В. Многоапертурная система извлечения заряженных частиц из плазменного источника / Н.В. Гаврилов, Е.М. Окс // Авт. свидетельство №976806. – 1981.

155 Григорьев, Ю.В. Измерение тока электронов с энергией 60–130 кэВ в воздухе / Ю.В. Григорьев, А.В. Степанов // ПТЭ, 1982. – №5. – С. 124–125.

156 Vorobyov, M.S. On improvement of the current density distribution in large-cross-section beams produced by a multi-aperture plasma electron source / M.S. Vorobyov, N.N. Koval // Proc. VIII Intern. Conf. on Plasma Physics and Plasma Technology. – Minsk, 2015. – P. 238–241.

157 Галкин, Н.П. Технология фтора / Н.П. Галкин, А.Б. Крутиков. – М.: Атомиздат, 1968. – 188 с.

158 Пушкарёв, А.И. Цепные процессы в низкотемпературной плазме / А.И. Пушкарёв, Ю.Н. Новоселов, Г.Е. Ремнев // Новосибирск: Наука, 2006. – 226 с.

159 Шугуров, В.В. A silicon films deposition in the process of SiF₄ decomposition in pulsed glow discharge / В.В. Шугуров, В.В. Денисов, А.А. Калушевич, В.В. Яковлев, М.С. Воробьёв, А.И. Суслов, Н.Н. Коваль // Известия ВУЗов. Физика, 2012. – Т.55. – №12/3. – С. 123–127.

160 Koval, N.N. A Study of Si Film Deposition under the Action of a Pulsed E-beam / N.N. Koval, V.V. Shugurov, A.I. Suslov, V.V. Denisov, V.V. Yakovlev,

M.S. Vorobyov, G.P. Khandorin, A.K. Ledovskikh, A.A. Galata, A.P. Murlyshev, V.S. Volchkov // Proc. 10th Intern.Conf. on Modif. of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. – Tomsk, 2010. – P. 687–690.

161 Koval, N.N. The obtainment of silicon from silicon tetrafluoride under the impact of the high-energy electron beam / N.N. Koval, V.V. Shugurov, A.I. Suslov, V.V. Denisov, V.V. Yakovlev, M.S. Vorobyov, G.P. Khandorin, A.K. Ledovskikh, A.A. Galata, A.P. Murlyshev, and V.S. Volchkov // Proc. 16 Intern. Symp.on High Current Electronics. – Tomsk, 2010. – P. 545–548.

162 Абубеков, Р.А. Ядерная и солнечная энергетика – проблемы и перспективы / Р.А. Абубекеров, В.Е. Домашев, Е.Д. Домашев, А.И. Карелин, В.А. Карелин // Энергетика: экономика, технология, экология, 2002. – №3. – С. 25–30.

163 Blackley, D.C. Science and Technology. / D.C. Blackley // Polymer Lattices: Types of Lattices, 1997. – V.2. – 2nd ed. – 592 p.

164 Haque, Md. E. A New Trend in Radiation Vulcanization of Natural Rubber Latex with a Low Energy Electron Beam / Md. E. Haque, K. Makuuchi, H. Mitomo, F. Yoshii, K. Ikeda // Polymer Journal, 2005. – V.37. – №.5. – P. 333–339.

165 Raharjo, P. Application of large area plasma cathode electron beam for natural rubber vulcanization / P. Raharjo, K. Uemura, N.N. Koval, V. Shugurov, V. Denisov, V. Jakovlev, W. Setiawan, M. Utama // Proc.15 International Symposium on High Current Electronics. – Tomsk: Publishing House of the IAO SB RAS, 2008. P. 497-501.

166 Денисов, В.В. Вулканизация натурального каучука с использованием ускорителя электронов с плазменным катодом / Денисов В.В., М.С.Воробьёв, В. В. Шугуров, В.В.Яковлев // Сборник материалов V Всероссийской конференции молодых ученых «Физика и химия высокоэнергетичных систем». – Томск: ТМЛ-Пресс, 2009. – С. 622-625.