

К 663

9-87-313

КОРЕНЕВ
Сергей Александрович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
ПЛАЗМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОНОВ**

Специальность: 01.04.20 - физика пучков
заряженных частиц и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук

Н.И. Балалыкин

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
кандидат технических наук

С.И. Андреев
В.П. Овсянников

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

НИИЯФ при Томском политехническом институте (г. Томск).

Защита диссертации состоится " 8 " июля 1987 года
в 11 часов на заседании Специализированного совета Д-047.01.03
при Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " 6 " июня 1987 года.

Ученый секретарь Специализированного совета
доктор физико-математических наук

Батусов Ю.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Физика и техника генерации импульсных электронных пучков в настоящее время - одно из основных направлений развития ускорительной техники. Сильноточные импульсные электронные пучки используются для решения различных фундаментальных и прикладных задач, таких как коллективные методы ускорения заряженных частиц, инерциальный термоядерный синтез, физика плазмы, разрядов, лазерная техника, физика твердого тела, полупроводниковая технология, материалловедение и др.

Для генерации электронных пучков применяются диоды с плазменными разрядными и взрывоэмиссионными катодами. Экспериментальное исследование вопросов токоотбора потоков электронов с границы движущейся катодной плазмы установило ряд не до конца решенных вопросов, связанных с работой плазменных диодов при относительно низких питающих напряжениях $U \sim 100 + 300$ кВ, получения пучков большого поперечного сечения. Бурное развитие новых направлений в физике твердого тела и технологиях, связанных с использованием электронных пучков, вызвало необходимость разработок источников электронов для прикладных задач.

Цель работы. Диссертационная работа посвящена разработке и исследованию схем пассивных плазменных диодов и созданию на их основе источников электронов для прикладных задач: поверхностной обработке материалов.

Научная новизна. В работах /I-II/, составивших основу диссертации, изложены принципы построения пассивных схем диодов с плазменными катодами на основе незавершенного и скользящего разрядов по поверхности диэлектрика; предложен и экспериментально доказан способ стабилизации вакуумного скользящего разряда по поверхности диэлектрика между двумя коаксиальными электродами без обратного токопровода; устранены оспилляции на импульсе тока пучка электронов в диоде с катодом на основе скользящего разряда по поверхности диэлектрика; предложен и исследован новый тип графитового взрывного катода; предложен и исследован катод со взрывной эмиссией на основе углеродной ткани, позволяющий формировать электронные пучки в планарных и коаксиальных диодах с регулируемой интенсивностью; приведены результаты разработок и исследований источников электронов для прикладных задач (поверхностная обработка материалов электронным пучком).

Практическая значимость. I. Предложенные схемы пассивных диодов с катодами на основе незавершенного и скользящего разрядов по поверхности диэлектрика, а также диоды со взрывоэмиссионными катодами могут быть использованы при разработке импульсных источников электронов для ускорительной техники, сильноточной электроники, лазерной техники, вакуумной технологии по обработке материалов.

2. Разработано три варианта электронных источников для прикладных задач: а) по исследованию эффектов упрочнения металлов при облучении электронным пучком; б) по исследованию свойств полупроводниковых и сверхпроводящих структур при их облучении электронным пучком.

Апробация работ и публикации. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на научно-методическом семинаре ОНМУ (инженерно-физическая секция) (1978-1986 гг.), на Патентном совете ОИЯИ (1979 - 1986 гг.), на конференции молодых ученых ЮИЯИ (Киев, 1981 г.), на совещании по коллективному методу ускорения (Дубна, 1982 г.), на У Всесоюзном симпозиуме по сильноточной электронике (Новосибирск, 1984 г.), на Международной конференции по электронно-лучевым технологиям (Варна, НРБ, 1985 г.) Плазменный источник электронов, разработанный на основе проведенных исследований, удостоен серебряной медали ВДНХ СССР. По материалам выполненных исследований опубликовано 10 печатных работ в журналах ЖТФ, ПТЭ, трудах конференций, совещания, симпозиума, препринтах и сообщениях ОИЯИ, получено I авторское свидетельство СССР.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 104 страницах машинописного текста, иллюстрирована 65 рисунками, состоит из введения, четырех глав, заключения, содержит библиографию из 64 наименований, шести таблиц.

К защите представляются следующие тезисы:

I. Емкостные связи катодного узла и анода в диодах с катодом на основе незавершенного и скользящего разрядов по поверхности диэлектрика позволяют получать на катодном узле напряжения (а следовательно, и напряженности электрических полей), достаточные для формирования катодной плазмы, что исключает из схемы источника электронов специальный генератор импульсного напряжения для зажигания разряда.

2. Покрытие диэлектрика тонким слоем вещества с малой работой выхода стабилизирует скользящий разряд по поверхности диэлектрика между коаксиальными электродами без обратного токопровода и приводит к устранению осцилляций в импульсе тока пучка электронов.

3. Катод со взрывной эмиссией, содержащий инициатор катодной плазмы из проводящего материала с высоким коэффициентом газовыделений (например, графит), с уложенной на него со стороны анода металличе-

ской сеткой, позволяет увеличить ток электронного пучка в 2 + 3 раза по сравнению с плоским катодом при напряжении на диоде 100 + 300 кВ и расстоянии между анодом и катодом 1 см, а также формировать электронные пучки требуемого поперечного сечения.

4. Использование углеродной ткани в качестве инициатора катодной плазмы позволяет формировать электронные пучки с поперечной неоднородностью плотности тока не более ~15% в планарных и коаксиальных диодах и осуществлять регулировку плотности тока в широком диапазоне напряжений на диоде.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность исследования и разработки источников электронов с плазменными катодами для генерации электронных пучков. Отмечено, что открытие взрывной эмиссии электронов произвело коренной перелом в технике генерации электронных пучков. Электронные пучки кроме ускорительной техники стали широко применяться в лазерной технике, технике СВЧ, источниках рентгеновского излучения, в промышленной технологии, в современной микроэлектронике и др. Сформулированы цели работы, отмечена ее новизна и практическая ценность, приведены тезисы, представляемые к защите.

В первой главе приведен обзор плазменных источников электронов применительно к прикладным задачам. Рассмотрены принципы работы и схемные решения газоразрядных источников электронов, источников электронов с разрядными катодами (активные диоды с генераторами зажигания разряда) и источников электронов со взрывной эмиссией. Приведены их основные характеристики, преимущества и недостатки. Основные проблемы взрывоэмиссионных катодов состоят в увеличении токоотбора пучка электронов и в формировании однородных электронных пучков большого поперечного сечения при напряжении ~ 100 + 300 кВ. В активных диодах с разрядными катодами (на основе незавершенного и скользящего разрядов по поверхности диэлектрика со специальными генераторами зажигания разряда) стоят проблемы высоковольтной развязки относительно друг друга двух генераторов импульсного напряжения (I генератор для зажигания разряда и 2 генератор для токоотбора электронов с границы движущейся катодной плазмы). В диодах с катодами на основе скользящего разряда по поверхности диэлектрика наблюдаются нежелательные осцилляции в импульсе тока пучка электронов.

Сформулированы основные вопросы, исследуемые в диссертации.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальной установки для исследования генерации электронных пучков и комплекса диагностической аппаратуры. Установка состоит из генератора импульсного напряжения с высоковольтным выпрямителем, диода с вакуумной системой, системой управления и диагностики, рис. 1а, б. В качестве генератора импульсного напряжения используются промышленные генераторы Аркадьева-Маркса типа ГИИ-400, ГИИ-500. Диод имеет три варианта технической реализации в зависимости от задач проводимых экспериментов. Вакуум-

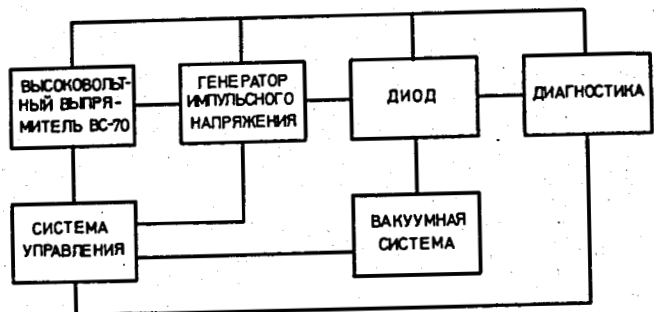


Рис.1а. Структурная схема установки для генерации электронных пучков.

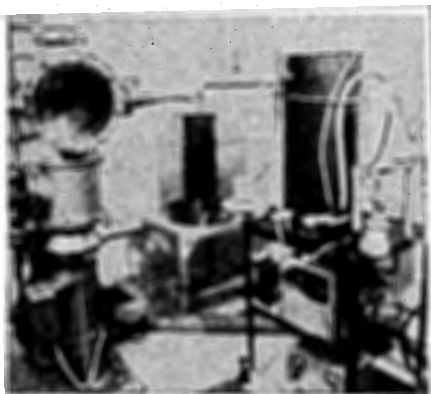


Рис.1б. Общий вид установки (без пульта управления).

ная система включает паромасляный агрегат ВА-0,5. Давление остаточного газа в вакуумной камере диода составляет $\sim 10^{-3}$ Па.

В комплекс диагностической аппаратуры входят устройства для измерения основных параметров электронного пучка: тока пучка – цилиндры Фарадея, пояса Роговского, напряжения – высокоомные делители напряжения, распределения плотности тока – секционированные коллекторы, полимерные пленки, энергетического спектра – спектрометры с частичным поглощением электронов в металлической фольге. Для фотографирования свечения катодной плазмы используется фоторегистрирующая система.

Третья глава посвящена исследованию и разработке плазменных источников электронов диодного типа с катодами на основе незавершенного /1,2,3,4,5/ и скользящего /4,6/ разрядов по поверхности диэлектрика с пассивной генерацией катодной плазмы. В этой главе решаются задачи: высоковольтной развязки катодно-анодного узла путем устранения специального генератора зажигания разряда, исследования условий формирования катодной плазмы и токоотбора пучка электронов. Для решения первой задачи предложена пассивная схема диода, которая позволяет рассматривать диод как емкостный делитель напряжения, рис.2а, б. Из них видно, что элементы катодного узла образуют конденса-

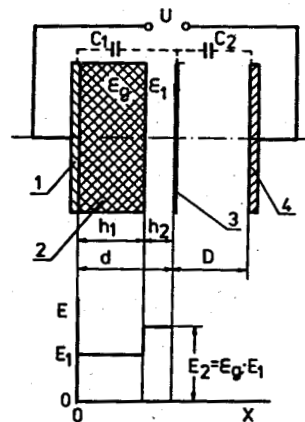


Рис.2а. Схема пассивного диода с катодом на основе незавершенного разряда по поверхности диэлектрика: 1 – металлическая сетка; 2 – диэлектрическая вставка; 3 – цилиндрический электрод; 4 – вакуумная камера; 5 – слой окиси бария; 6 – анод.

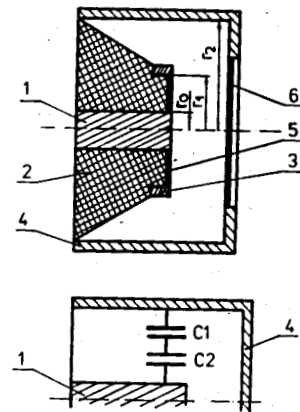


Рис.2б. Схема пассивного диода с катодом на основе скользящего разряда по поверхности диэлектрика: 1 – катодный электрод; 2 – изолятор (диэлектрическая вставка); 3 – цилиндрический электрод; 4 – вакуумная камера; 5 – слой окиси бария; 6 – анод.

тор C_1 , анод и металлическая сетка - C_2 (рис.2а), а анод и цилиндрический электрод - C_1 (рис.2б). При рабочем давлении остаточного газа $P \sim 10^{-3}$ Па в первом типе диода пороговая напряженность электрического поля в зазоре между диэлектриком и металлической сеткой для формирования разряда составляет $E \approx 1,2 \cdot 10^6$ В/см, а во втором диоде пороговая напряженность между катодным электродом и цилиндрическим электродом составляет $E \approx 10^5$ В/см. Верхний предел E во втором типе диода определен электрической прочностью диэлектрика. Сформированный разряд является эмиттером электронов, из которого электрическим полем вытягивается электронный пучок. На основе обработки осциллограмм тока и напряжения построены вольтамперные характеристики этих диодов, рис.3. Из них следует, что плотность электронного тока j ,

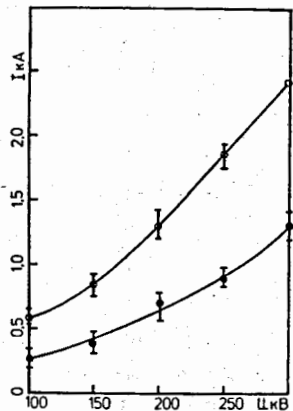


Рис.3. Вольтамперная характеристика диодов с катодами на основе: ○ - незавершенного разряда; ● - скользящего разряда.

отбираемого с катода на основе незавершенного разряда по поверхности диэлектрика, составляет $j \approx 100 + 400$ А/см² при напряжении на диоде $100 + 300$ кВ, а с катода на основе скользящего разряда по поверхности диэлектрика при тех же напряжениях равна $j \approx 400 + 1000$ А/см². Анализ вольтамперных характеристик (в.а.х.) показывает отклонение токобора от закона Чайлда-Ленгмира $\sim 14\%$ для диода с катодом на основе незавершенного разряда по поверхности диэлектрика и $\sim 8\%$ для диода с катодом на основе скользящего разряда по поверхности диэлектрика.

Для инженерного расчета пассивного диода с катодом на основе незавершенного разряда по поверхности диэлектрика необходимо пользоваться следующими основными формулами:

$$U_{\text{уск}} = U - U_{C1}, \quad (1)$$

$$U_{C1} = \frac{U(\epsilon_g h_2 + h_1)}{(\epsilon_g h_2 + \epsilon_g D + h_1)}, \quad (2)$$

$$\frac{U_{C1} \epsilon_g K}{(\epsilon_g h_2 + h_1)} \geq 1,2 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{В}}{\text{см}} \right], \quad (3)$$

где: $U_{\text{уск}}$ - ускоряющее напряжение; U - напряжение на диоде; U_{C1} - напряжение на катодном узле; ϵ_g, h_1 - диэлектрическая проницаемость и толщина диэлектрической вставки; D - расстояние между анодом и катодом (металлической сеткой); h_2 - величина зазора между металлической сеткой и диэлектрической вставкой; при естественном прижме сетки к вставке $h_2 \approx 0,1$ мм; K - коэффициент усиления электрического поля, обусловленный геометрией металлической сетки, обычно $K = 2 + 15$ для сетки с ячейкой $1,0 \times 1,0$ ммхмм и диаметром проволочек $\sim 0,1 + 0,3$ мм.

Для формирования однородного скользящего разряда (стабилизация разряда) по поверхности диэлектрика между двумя электродами без обратного токопровода предложено покрывать поверхность диэлектрика тонким слоем вещества с малой работой выхода ($\psi \leq 2$ эВ). Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенного метода формирования однородного скользящего разряда.

Для инженерных разработок диодов, работающих при давлении остаточного газа $P \sim 10^{-3}$ Па с катодами на основе скользящего разряда по поверхности диэлектрика, необходимо использовать следующее условие:

$$3 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{В}}{\text{см}} \right] \geq \frac{U}{r_0 (\epsilon \ln r_2 / r_1 + \ln r_1 / r_0)} \geq 10^5 \left[\frac{\text{В}}{\text{см}} \right], \quad (4)$$

где: U - напряжение на диоде; r_0 - радиус катодного электрода; ϵ - диэлектрическая проницаемость диэлектрика; r_1 - радиус цилиндрического электрода; r_2 - радиус цилиндрической вакуумной камеры. Это условие позволяет выбрать геометрию диодных элементов, при которых происходит пассивное формирование катодной плазмы. Поперечная неоднородность плотности тока пучка электронов не превышает $\sim 15\%$ в диодах с катодом на основе незавершенного разряда по поверхности диэлектрика и $\sim 20\%$ в диодах с катодом на основе скользящего разряда по поверхности диэлектрика.

Четвертая глава посвящена исследованию и разработке источников электронов со взрывоэмиссионными катодами при напряжении на диоде

$U \approx 100 + 300$ кВ. На основе анализа физических явлений во взрывоэмиссионном диоде был предложен катод со взрывной эмиссией /7/, рис. 4, который был исследован /8/. В нем до начала формирования катодной плазмы на катоде формируется однородное электрическое поле с помощью мелкоструктурной металлической сетки, а выполнение инициатора катодной плазмы из проводящего материала с высоким значением коэффициента газовыделений (например, графита) в совокупности приводит к формированию однородной катодной плазмы, из которой производится

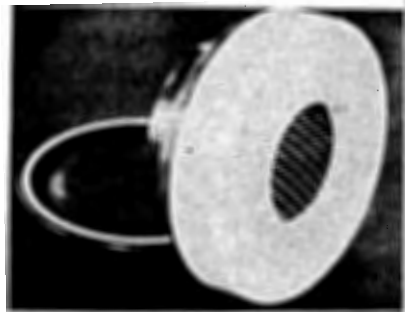
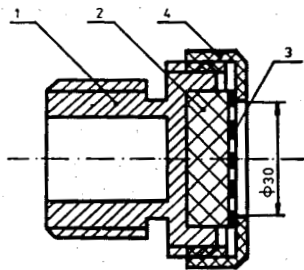


Рис.4. Конструкция и общий вид катода:

1 - металлическая подложка; 2 - графитовая вставка (вещество с высоким коэффициентом газовыделений); 3 - металлическая мелкоструктурная сетка; 4 - диэлектрическая крышка.

тока отбор пучка электронов. На рис.5 приведены вольтамперные характеристики диода, а на рис.6 интегральные фотографии свечения катодной плазмы в диодном промежутке. Этот катод позволяет формировать довольно однородные электронные пучки по поперечному сечению (поперечная неоднородность плотности тока не превышает $\sim 15\%$ большого сечения).

Применение углеродной ткани в качестве инициатора катодной плазмы позволило разработать электронные пушки для вакуумной технологии с перестраиваемыми параметрами (регулировка плотности тока пучка электронов) [9,10,11] благодаря высокому коэффициенту усиления электрического поля $K \geq 100$ на волокнах ткани (на микрофибриллах). На рис. 7 приведен общий вид планарного катода, а на рис. 8 - конструкция коаксиальной электронной пушки. Планарный катод применяется в источнике электронов планарного типа для обработки плоских поверхностей материалов, а коаксиальный диод - для обработки внутренних поверхностей цилиндрических деталей (труб). Зависимости плотности тока j от расстояния между анодом и катодом d (рис.8) поясняют возможности разработанных электронных источников.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

I. Разработана установка и комплекс диагностической аппаратуры для экспериментального исследования генерации электронных пучков.

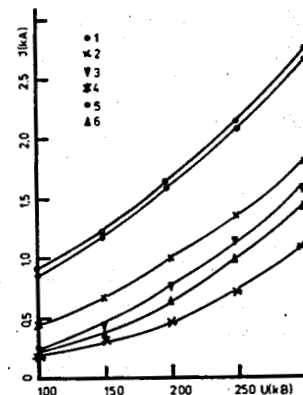


Рис.5. Вольтамперные характеристики диода при зазоре между анодом и катодом 1 см (кривые 1,2,3,4) и 0,5 см (кривые 5,6): 1 - катод из графита с металлической сеткой; 2 - катод из графита; 3 - катод из отожженного графита; 4 - катод из отожженного графита с металлической сеткой; 5 - катод из графита; 6 - катод из отожженного графита.

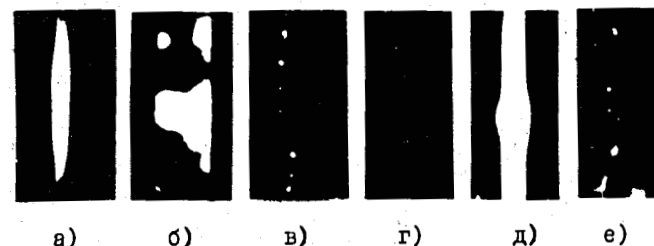


Рис. 6. Фотография катодной плазмы в промежутке между анодом и катодом (перпендикулярно оси диода) при зазоре между анодом и катодом 1 см (фотографии а,б,в,г) и 0,5 см (фотографии д,е): а) - катод из графита с металлической сеткой; б) - катод из графита; в) - катод из отожженного графита; г) - катод из отожженного графита с металлической сеткой; д) - катод из графита; е) - катод из отожженного графита.

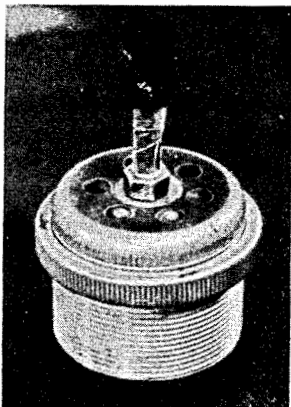


Рис.7. Общий вид катода на основе углеродной ткани планарного типа.

Рис.8. Электронный источник коаксиального типа: 1 - вакуумная камера; 2 - изолятор; 3 - катодный электрод; 4 - катод; 5 - анод (облучаемая труба).

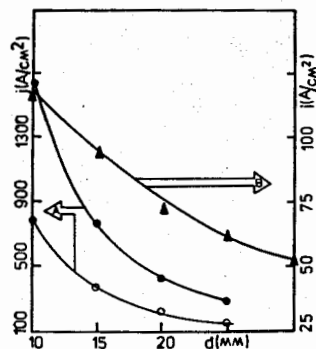
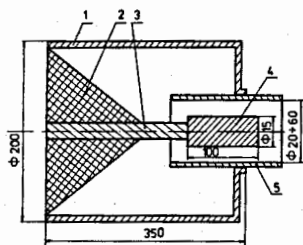


Рис.9. Зависимость плотности тока пучка электронов j от расстояния между анодом и катодом d при напряжении на диоде: \circ - 100 кВ; \bullet - 150 кВ для диода планарного типа А; \blacktriangle - 100 кВ для диода коаксиального типа В.

2. Предложены и исследованы схемы пассивных диодов (источников электронов) с плазменными катодами на основе незавершенного и скользящего разрядов по поверхности диэлектрика. При напряжении на диоде $U \approx 100 + 300$ кВ плотность электронного тока, отбираемого с катода на основе незавершенного разряда по поверхности диэлектрика, $j \approx 100 + 400$ А/см², а с катода на основе скользящего разряда по поверхности диэлектрика $j \approx 400 + 1000$ А/см². В диоде с последним типом катода устранены осцилляции на импульсе тока пучка электронов. Приведены необходимые формулы для инженерного расчета этих диодов.

3. Предложен и экспериментально проверен способ формирования однородного скользящего разряда по поверхности диэлектрика между двухкоаксиальными электродами без обратного токопровода при давлении остаточного газа $P \sim 10^{-3} + 10^{-1}$ Па путем нанесения на поверхность диэлектрика тонкого слоя вещества с малой работой выхода ($\phi \leq 2$ эВ).

4. Предложен и исследован графитовый катод со взрывной эмиссией, усовершенствованный путем введения в него металлической мелкоструктурной сетки. Предложенный катод позволяет увеличить токоотбор пучка в 2 + 3 раза до значений $j \sim 130 + 380$ А/см² ($U = 100 + 300$ кВ, $D = 1$ см).

5. Предложены и исследованы плоские и цилиндрические взрывные катоды на основе углеродной ткани. Они позволяют осуществлять регулировку плотности тока при напряжении на планарном диоде $U \approx 150$ кВ от $j = 200$ А/см² до $j = 1600$ А/см², а на коаксиальном диоде при $U = 160$ кВ $j = 25 + 120$ А/см² путем изменения расстояния между анодом и катодом.

6. Разработано три варианта плазменных источников электронов со сменными катодами для решения прикладных задач. Созданные источники электронов в настоящее время используются в экспериментах по облучению сложных полупроводниково-металлических структур.

Содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Корнев С.А. Формирование электронных пучков в сильноточном диоде. Сообщение ОИЯИ 9-81-573, Дубна, 1981.
2. Корнев С.А. Исследование плазменного диода во внешнем магнитном поле. Сообщение ОИЯИ 9-81-703, Дубна, 1981.
3. Корнев С.А. Исследование высоковольтного диода с плазменным катодом. В кн.: Актуальные вопросы физики конденсированных и плазменных сред. КИЯИ АН УССР, КИЯИ-82-8, Киев, 1982, с.11.

4. Коренев С.А. К вопросу о генерации электронных пучков в плазменных диодах. В кн.: Труды Совещания по проблемам коллективного метода ускорения. ОИЯИ Д9-82-664, Дубна, 1982, с. 215.
5. Коренев С.А., Рубин Н.Б. Формирование в вакуумных протяженных каналах пристеночной плазмы. Препринт ОИЯИ 9-82-13, Дубна, 1982; ЖТФ, 1983, т.53, №10, с.1928.
6. Коренев С.А. Диод с плазменным катодом на основе скользящего разряда. Сообщение ОИЯИ 9-82-758, Дубна, 1982.
7. Коренев С.А. Катод со взрывной эмиссией. Авторское свидетельство СССР №976804 от 21.07.1982 г., Былл. "Открытия и изобретения", 1984, №30, с.197.
8. Коренев С.А. К вопросу об увеличении токоотбора с графитового катода. Препринт ОИЯИ 9-83-46, Дубна, 1983. Увеличение токоотбора с графитового катода. ПТЭ, 1983, №6, с.133.
9. Коренев С.А., Балалыкин Н.И., Енчевич И.Б., Михов М.К. Сильноточная электронная пушка с углеродно-волоконистым катодом. В кн.: Тезисы У Всесоюзного симпозиума по сильноточной электронике. Изд-во ИСЭ СО АН СССР, Томск, 1984, ч.1, с.45.
10. Коренев С.А., Балалыкин Н.И., Енчевич И.Б., Михов М.К. Электронная пушка для поверхностной обработки материалов. Препринт ОИЯИ Р-13-84-461, Дубна, 1984; ПТЭ, 1985, №5, с.190.
11. Балалыкин Н.И., Енчевич И.Б., Коренев С.А., Михов М.К. Электронная пушка для поверхностной обработки внутренних поверхностей цилиндрических деталей. Препринт ОИЯИ Р13-85-29, Дубна, 1985; В кн.: Труды Международной конференции по электронно-лучевым технологиям. Изд-во Болгарской Академии наук, София, НРБ, 1985, с.109.

Рукопись поступила в издательский отдел
6 мая 1987 года.