

K-663



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9-94-350

На правах рукописи

УДК 621.384

КОРЕНЕВ  
Сергей Александрович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ  
ИМПУЛЬСНЫХ СИЛЬНОТОЧНЫХ  
ЭЛЕКТРОННЫХ И ИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ  
ДЛЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ

Специальность: 01.04.20 — физика пучков заряженных  
частиц и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Дубна 1994

Работа выполнена в Лаборатории сверхвысоких энергий  
Объединенного института ядерных исследований

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических  
наук, профессор

Александр Вгорович  
Лигачев

доктор технических наук,  
старший научный сотрудник

Рубен Цолакович  
Оганесян

доктор технических наук,  
профессор, академик РЭТА

Владимир Иннокентьевич  
Переводчиков

Ведущая организация:


Московский радиотехнический институт РАН, г. Москва.

Защита состоится "\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 199 г. в \_\_\_\_ час. на  
заседании Специализированного Совета Д-047.01.06 при  
Лаборатории сверхвысоких энергий ОИЯИ, г. Дубна, Московской  
области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ

Автореферат разослан "\_\_\_\_" \_\_\_\_\_ 199 г.

Ученый секретарь  
Специализированного совета  
кандидат физико-математических наук

  
В.Г. Кривожижн

#### АКТУАЛЬНОСТЬ

В настоящее время технологии высокого уровня, основанные на нелинейном взаимодействии импульсного источника энергии с твердым телом, физика быстротекающих процессов, физика плазмы вызывают потребность в сильноточных импульсных электронных и ионных источниках и ускорителях. Открытие взрывной электронной эмиссии сделало коренной переворот в физике и технике сильноточных пучков. В результате для исследователей стали доступны сильноточные импульсные электронные источники. Идеи, основанные на таких пучках, как источниках энергии, породили развитие новых направлений в ускорительной технике, физике плазмы, в радиационных технологиях, физике твердого тела, модификации материалов и т.д.

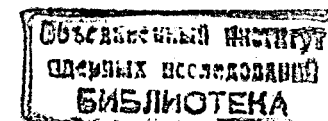
Однако, несмотря на кажущуюся простоту этого типа эмиссии до сих пор остаются актуальными вопросы получения стабильных электронных пучков, пригодных для линейных индукционных ускорителей, получения микросекундных электронных пучков. С этими задачами тесно связана другая задача по поиску новых материалов для взрывоэмиссионных катодов.

Развитие физики и техники сильноточных ионных источников - ускорителей прямого действия также сделало коренной перелом не только в возможностях этого нового инструмента для исследований, но и в самой физике сильноточных ионных пучков.

Прикладные исследования, ведущие во многих направлениях, вызывают острую потребность в простых и надежных в эксплуатации сильноточных импульсных ионных источниках.

#### ОСНОВНЫЕ ЦЕЛИ РАБОТЫ

Основными целями работы являлись разработка, исследование и создание сильноточных импульсных электронных и ионных источников и их использование в экспериментах по модификации материалов, а также обобщение экспериментальных результатов, полученных автором в этой области.



1. Создана экспериментальная универсальная установка для формирования как электронных, так и ионных импульсных пучков, позволяющая проводить эксперименты по модификации материалов обоими типами заряженных частиц.

2. Найден класс материалов для стабильных взрывоэмиссионных катодов и изучены их эмиссионные свойства.

3. Для формирования электронных пучков микросекундной длительности предложено использовать материалы с низкой электрической прочностью на основе высокотемпературных сверхпроводников.

4. Для получения микросекундных электронных пучков предложены и исследованы плоские катоды с плазменным эмиттером на основе незавершенного и скользящего разрядов по поверхности магнитоэлектриков.

5. Обнаружено новое физическое явление в вакуумном диоде - импульсная взрывная ионная эмиссия при его питании импульсом напряжения положительной полярности. По аналогии со взрывной электронной эмиссией этот тип ионной эмиссии был назван взрывной ионной эмиссией.

6. Исследованы эмиссионные свойства анодной плазмы для получения ионов проводящих материалов.

7. Предложена схема ионного диода для получения ионов диэлектрических материалов.

8. Обнаружен новый тип вакуумной конденсации - взрывная ионная вакуумная конденсация в вакуумном ионном диоде со взрывной ионной эмиссией. На ее основе разработаны установки для получения пленок и покрытий с ионным перемешиванием, а также получены пленки на различных подложках, в том числе и пленки высокотемпературных сверхпроводников.

9. Предложен и исследован метод увеличения электрической прочности вакуумных зазоров между электродами из высокотемпературных сверхпроводников. В его основу положена поверхностная модификация высокотемпературных сверхпроводников ионами меди.

10. Предложен и исследован метод увеличения критического тока высокотемпературных сверхпроводников при его импульсной

модификации импульсным сильноточным электронным пучком. Показано, что ионная модификация при кинетической энергии ионов от 200 до 600 кэВ приводит к уменьшению критического тока высокотемпературных сверхпроводников на основе иттриевой и висмутовой керамик.

#### ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ

1. Найденный класс материалов и разработанная технология изготовления взрывоэмиссионных катодов позволили разработать источники электронов для поверхностной модификации материалов (Болгария, ЛИЯТНС; Дубна, ОИЯИ), модернизировать инжекторы двух линейных индукционных ускорителей электронов ЛСВЭ ОИЯИ.

2. Использование скользящего и незавершенного разрядов по поверхности магнитоэлектриков позволили осуществить получение микросекундных электронных пучков в планарных диодах.

3. Новый тип ионной эмиссии позволил разработать новый класс простых ионных источников для поверхностной модификации материалов.

4. Новый тип вакуумной конденсации позволил разработать установки для напыления различных пленок и покрытий на различные подложки и получить стабильные пленки, например пленки высокотемпературных сверхпроводников.

#### АПРОБАЦИЯ И ПУБЛИКАЦИИ

Материалы диссертации докладывались на 13 Международных и 16 Всесоюзных конференциях, таких как Совещание по проблемам коллективного метода ускорения (Дубна, 1982 г.), V, VI, VII, VIII, IX Всесоюзные симпозиумы по сильноточной электронике (Новосибирск - Томск, 1984, 1986, 1988 г.г., Свердловск, 1990, 1992 г.г.), I, II, III Международные конференции по электронно-лучевым технологиям (Варна, Болгария, 1985, 1988, 1991 г.г.), III Международная конференция по модификации материалов импульсами энергии и пучками частиц (Дрезден, Германия, 1989 г.), I Всесоюзная конференция по модификации конструкционных материалов пучками заряженных частиц (Томск, 1988 г.), VIII Международная конференция по мощным пучкам (BEAMS'90, Новосибирск, 1990 г.), VI Международная конференция

по радиационным эффектам в изоляторах ( Веймар, Германия, 1991 г. ), V Международный симпозиум по электронно-лучевым ионным источникам и их применениям ( Дубна, 1991 г. ), VIII Международная конференция по ионной модификации материалов (IBMM'92, Гейдельберг, Германия, 1992 г.), V Международная конференция по ионным источникам (Пекин, Китай, 1993 г.) и др. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на научно-методических семинарах ОНМУ, ОНМО, ЛСВЭ ОИЯИ, на заседаниях Патентного Совета ОИЯИ. Плазменный источник электронов удостоен серебряной медали ВДНХ СССР. Также импульсный источник электронов для поверхностной модификации материалов демонстрировался на Международной выставке "Наука-88". На основании исследований предложены технические решения, новизна и оригинальность которых подтверждена 36 авторскими свидетельствами на изобретения; 22 изобретения СССР и одно изобретение ЧСФР из которых включены в данную работу. Также по материалам диссертации опубликовано в виде статей, препринтов, сообщений ОИЯИ, докладов, тезисов докладов 54 работы.

#### ВКЛАД АВТОРА

Автору принадлежит определяющая роль в постановке задач, планировании и постановке экспериментов, анализе и интерпретации результатов экспериментов, представленных в работе; автор лично обнаружил новое физическое явление - импульсную сильноточную ионную эмиссию при запитке диода положительным импульсом напряжения и вакуумную конденсацию при исследовании ионного диода.

#### ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы и изложена на 142 страницах машинописного текста, иллюстрирована 85 рисунками.

#### НА ЗАЩИТУ ВНОСЯТСЯ СЛЕДУЮЩИЕ ТЕЗИСЫ

1. Экспериментально обнаружено новое физическое явление - взрывная ионная эмиссия в вакуумном диоде при положительной

полярности импульса напряжения.

2. Экспериментально открыт новый тип вакуумной конденсации в вакуумном диоде со взрывной эмиссией ионов, использование которого открывает возможность получения пленок и покрытий с ионным перемешиванием.

3. Найден класс материалов для взрывоэмиссионных катодов для источников электронов наносекундного и микросекундного диапазонов на основе углеродно-волоконистых материалов и высокотемпературных сверхпроводников, работающих при комнатной температуре.

4. Экспериментально обнаружены незавершенный и скользящий разряды по поверхности магнетодиэлектриков; использование этих разрядов в планарных диодах позволяет формировать микросекундные электронные пучки.

5. Облучение импульсным сильноточным электронным пучком высокотемпературных сверхпроводников позволяет увеличить их критический ток в несколько раз.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрены особенности взрывной электронной эмиссии и источников электронов с плазменными катодами на основе незавершенного и скользящего разрядов по поверхности диэлектриков, а также сделан краткий анализ наиболее близких по физике и технике сильноточных импульсных ионных источников - ускорителей прямого действия. Также сформулированы проблемы, решению которых посвящена диссертация, сформулирована цель работы, кратко изложено содержание всех глав диссертации, а также приведены тезисы, выносимые на защиту.

В главе I дается краткое описание экспериментальной установки для исследования формирования импульсных сильноточных электронных и ионных пучков и комплекса диагностической аппаратуры. За время работы над диссертацией было разработано несколько экспериментальных установок.

Установка состоит из генератора импульсного напряжения с высоковольтным выпрямителем, диода (источника частиц) с вакуумной системой, системой управления и диагностики, рис.1.

В качестве генератора импульсного напряжения (ГИН) используются как промышленные генераторы Аркадьева-Маркса



Рис. 1. Структурная схема установки для исследования формирования импульсных электронных и ионных пучков.

типа ГИН - 400, ГИН - 500, так и специально разработанные для получения импульса напряжения длительностью до 5 мкс. В генераторах использовались газонаполненные разрядники с внешним управлением в первой ступени. При этом для повышения рабочей частоты неуправляемых разрядников был использован эффект притяжения заряженных струй к поверхности ферромагнетика для быстрого обрыва дуги [1]. В управляемых разрядниках была разработана новая схема поджигающего узла тригatrona [2] с целью увеличения ресурса стабильной работы разрядника, в которой диэлектрическая втулка заменена на магнетодиэлектрическую, а поджигающий электрод выполнен из углеродно-волоконного материала.

Для увеличения ресурса работы тригatronного разрядника и возможности повышения частоты срабатывания разработан разрядник [3], в котором использован принцип разнесения поджигающих разрядов по азимуту.

Кроме тригatronного типа разрядников были разработаны управляемые разрядники на основе скользящего разряда по поверхности диэлектрика [4].

Регулировка длительности выходного импульса напряжения ГИНа осуществлялась при помощи срезающего разрядника или включения параллельно выходу ГИНа сопротивления. Для работы установки в режиме генерации электронных пучков на выходе ГИНа импульс напряжения имеет отрицательную полярность, а ионных пучков - положительную полярность.

Основные параметры ГИНов:

- 1) амплитуда выходного импульса напряжения.....100 - 700кВ;
- 2) длительность импульса .....до 5 мксек;
- 3) энергозапас..... до 1000 Дж;
- 3) частота следования импульсов.....до 5 Гц.

Диод планарного и коаксиального типов содержит стандартные узлы и элементы.

Исходя из временных и амплитудных параметров электронного и ионного пучков была разработана стандартная диагностическая аппаратура для измерения токовых характеристик, энергетических спектров, зарядности ионов и др.

Кроме того для анализа поверхности катодов, анодов, облучаемых образцов применялся сканирующий электронный микроскоп JSM - 840 (Japan), Оже - спектрометр, ВИМС и др. ядерно-физические приборы и методики.

ГЛАВА II посвящена разработке и исследованию импульсных источников электронов со взрывоэмиссионными (ч. 1) и плазменными разрядными катодами (ч. 2 и ч. 3).

На основе проведенных в диссертации исследований взрывоэмиссионных катодов можно выделить несколько групп материалов, которые по своим физическим свойствам могут быть использованы в качестве инициаторов катодной плазмы для взрывоэмиссионных катодов:

- 1) углеродные материалы;
- 2) материалы высокотемпературных сверхпроводников, работающих при комнатной температуре;
- 3) волокнистые проводящие материалы.

Первые две группы материалов характеризуются низкой электрической прочностью вакуумных зазоров между двумя электродами или одного из этих материалов при запитке импульсным напряжением, что приводит к облегчению условий формирования катодной плазмы. Последняя группа материалов

обладает высоким геометрическим коэффициентом усиления электрического поля.

К материалам на основе углеродных материалов относится графит. Для формирования однородной катодной плазмы, увеличения токоотбора пучка электронов в [5] предложено применение металлической сетки, а в [6] углеродной сетки, которые устанавливаются на поверхность графита. При напряжении на диоде  $U \cong 100 - 300$  кВ получен достаточно однородный электронный пучок по поперечному сечению [7].

Рассмотрение факторов, влияющих на ресурс работы катода, показывает, что загрязнение поверхности графита металлическими соединениями от анода и металлической сетки являются определяющими факторами по сравнению с эрозией поверхности катода при энергии в пучке электронов  $< 100$  Дж. Потеря эмиссионных свойств катода - уменьшение тока пучка электронов вследствие появления многофакельной структуры катодной плазмы по указанной причине наступает при  $N = 10^5$  включений при использовании металлического анода. Для устранения этого недостатка в [6] предложен сетчатый анод из углеродных волокон. Эффект достигается за счет термической стойкости углеродных волокон и ресурс возрастает при тех же параметрах электронного пучка примерно в сто раз.

Другая проблема в этой области состоит в получении микросекундных электронных пучков и в разработке катода со взрывной эмиссией большого поперечного сечения. Для этих целей в катоде [8] сопротивления типа ТВО собраны в пакет и обрезаны с одной стороны, которая является инициатором катодной плазмы. Свойства резистивного элемента (объемная проводимость) устраняют эффект экранировки электрического поля в районе первичного катодного факела, а его зернистая структура приводит к получению высокой напряженности электрического поля на катоде для формирования катодной плазмы.

Материалы с неоднородной структурой поверхности включают в себя очень большой класс материалов с искусственной и естественной острой структурой. Для получения искусственной острой структуры может использоваться трековая методика, которая впервые была применена для этого в Германии, а для взрывоэмиссионного катода была использована Акапьевым Г.Н. в

ЛЯре ОИЯИ. Исследования такого катода показали, что токоотбор пучка электронов удовлетворяет закону Чайльда-Ленгмюра, а плотность острий не влияет на величину электронного тока [9, 10]. Ресурс работы, в среднем, для катода данного типа составляет около  $10^3$  включений.

К материалам с естественной квазимногоострийной структурой можно отнести и новые материалы, такие как высокотемпературные сверхпроводники, см. рис. 2. Анализ поверхности сверхпроводников на основе  $Y-Ba-Cu-O$ ,  $Bi-Sr-Ca-Cu-O$  показывает гранулированную структуру, свойства которой могут быть использованы для формирования катодной плазмы.

Для исследования этих материалов в качестве взрывоэмиссионных эмиттеров была разработана серия катода, см. рис. 3.

Измерения эмиссионных характеристик этих катода показали, что существенной разницы в токоотборе пучка электронов для охлажденного до азотной температуры катода и катода при комнатной температуре нет [11]. Величина электронного тока в обоих случаях удовлетворяет закону Чайльда-Ленгмюра.

Условия зажигания катодной плазмы показывают низкую напряженность электрического поля, которая составляет для иттриевой керамики  $\cong 10^5$  В/см, а для висмутовой  $\cong 6 \cdot 10^4$  В/см [12].

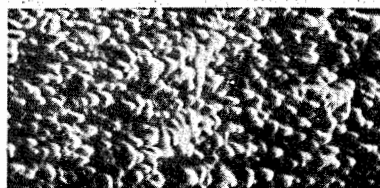


Рис. 2. Фотография поверхности высокотемпературного сверхпроводника на основе иттриевой керамики.

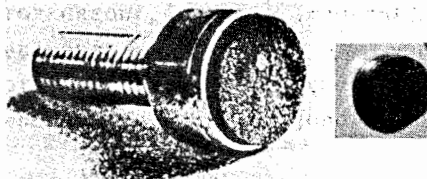


Рис. 3. Взрывоэмиссионные катоды на основе ВТСП.

Эти низкие значения напряженности электрического поля означают возможность формирования катодной плазмы на катоде при больших зазорах между анодом и катодом и, следовательно, получение микросекундных электронных пучков. Эксперименты показали, что при расстоянии между анодом и катодом 3 см максимальная длительность импульса тока пучка электронов составляла 2.8 мксек [13].

Исследования ресурса работы катодов на основе этих материалов показывают, что в наносекундном диапазоне число срабатываний составляет  $10^5$  включений. Анализ поверхности этих материалов после длительной работы показывает, что гранулы в процессе зажигания катодной плазмы переплавляются с сохранением структуры в целом.

В этой главе диссертации подробно рассматриваются катоды на основе волокнистых проводящих структур, к которым относятся углеродно-волокнистые материалы, Nb-Ti сверхпроводящие кабели, Mo волоконные структуры.

*Углеродно-волокнистые катоды* представляют повышенный интерес в связи с их потенциальными возможностями. Волокно состоит из многочисленных микрофибрилл, длина которых составляет около 100 нм, а диаметр несколько нм. Малые размеры микрофибрилл и диаметра волокон приводят к получению на них высокого геометрического коэффициента усиления электрического поля и к формированию катодной плазмы при относительно больших расстояниях между анодом и катодом.

Материалы с высоким коэффициентом усиления электрического поля позволяют решить задачу регулировки плотности мощности в пучке электронов путем изменения зазора между анодом и катодом в электронной пушке диодного типа. Многочисленные эксперименты во взрывных катодах показали, что токоотбор пучка электронов подчиняется закону Чайльда-Ленгмюра, что позволяет использовать зазор между анодом и катодом в качестве регулирующего параметра плотности тока пучка электронов, что является важным для технологического оборудования на основе электронных пучков.

Для катода в работе [14] было предложено использовать углеродную ткань, свернутую в рулон. Для увеличения допустимой длительности импульса тока пучка путем уменьшения продольной

скорости катодной плазмы за счет эффектов притягивания заряженных струй к поверхности магнитных материалов в техническом решении [15] предложено выполнять инициатор катодной плазмы в виде слоев углеродной ткани, разделенных ферромагнитными прокладками.

Потребность во взрывоэмиссионном катоде на основе углеродных волокон привела к необходимости разработки специальной технологии изготовления катода, на основе которой можно было бы легко механически обрабатывать торцевую часть катода, которая является инициатором катодной плазмы.

Методика изготовления катода из волокнистого углепластика включает следующие технологические операции: приготовление заготовки, механическая обработка заготовки, частичная карбонизация [16]. Также была проведена оптимизация катода по степени карбонизации [17].

На основе этой методики было изготовлено несколько катодов различной геометрии с 40% -ной степенью карбонизации матрицы из феноло-формальдегиновой смолы.

Исследования этого катода в различных источниках электронов показали хорошие его характеристики. Так при его использовании в инжекторе СИЛУНД -20, получен стабильный и качественный пучок [18], основные его параметры приведены в таблице №1.

Таблица № 1

Ток катода, А	$\Delta I_k / I_k$ , %	Ток на выходе инжектора, А	Ток после 5 секции, А	$\Delta I / I$ , %	$U_1$ , кВ	$U_5$ , мВ
700	$\pm 1.4$	400	400	$\pm 13$	300	3

На рис. 4 приведены серии осциллограмм тока пучка электронов за коллиматором с различным диаметром отверстия в нем для различных взрывоэмиссионных катодов, в качестве инициаторов катодной плазмы в которых используются выше рассмотренные материалы.

*Металлические волокна* представляют интерес для катодов со

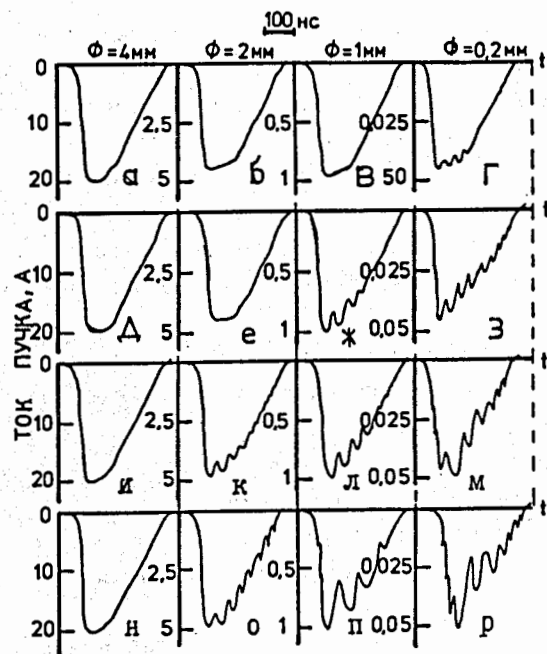


Рис. 4. Серия осциллограмм тока пучка электронов за коллиматором при  $D = 10$  мм,  $U = 150$  кВ для катода из волокнистого углепластика (а - г), катода из углеродной ткани, свернутой в рулон (д - з), графитового катода с металлической сеткой (и - м) и металлического катода (н - р). Диаметр отверстия отверстия  $d$ : а, д, и, н - 4; б, е, к, о - 2; в, ж, л, п - 1; г, з, м, р - 0.2 мм.

взрывной эмиссией с технологической точки зрения: механической обработки торцевой поверхности катода. Для этих целей подходит сверхпроводящий кабель, например НТ-50 с ниобий-титановыми волокнами [ 19, 20, 21 ]. Сверхпроводящий кабель представляет

собой медную или алюминиевую матрицу, в которой расположены тонковолокнистые жгуты из сплавов Nb-Ti или Nb<sub>3</sub>Sn, диаметр волокон может составлять от долей микрона до нескольких микрон. Также число волокон в кабеле может достигать до  $10^5$ . При травлении медной или алюминиевой матрицы можно обнажить волокна, которые имеют равномерное расположение. Эти волокна могут выполнять функцию многоострижных инициаторов катодной плазмы.

Для микросекундного диапазона разработан другой катод [13], в котором проволочки из кабеля НТ-50 устанавливались через токоограничивающие резисторы в разъем, что позволяло получить катод практически любой площади, набирая в пакеты разъемы. В микросекундном диапазоне при плотности тока электронов  $< 50$  А/см<sup>2</sup> ресурс работы составляет  $10^4$  включений при напряжении 100 - 300 кВ. Основная причина ограничения ресурса работы волокнистого инициатора катодной плазмы на основе этих волокон состоит в проплаве поверхности этого волокна.

Другой термически стойкий материал, который использовался в качестве инициаторов катодной плазмы, был четырехкомпонентный сплав Ni-Mo-Al-Ta в виде ромбических волокон [22]. Эксперименты показали, что данный катод может стабильно работать при напряжении 100 - 300 кВ, т. к. отсутствует эрозия поверхности волокон молибдена.

Для устранения эффекта экранировки электрического поля в районе первичного факела найдено техническое решение диода со взрывным катодом [23]. В катод, включающий металлическую подложку и многоострижный инициатор катодной плазмы, введена диэлектрическая вставка между ними, металлизированная с двух сторон и с контактными площадками на стороне обращенной в сторону анода, при этом каждый острейший инициатор катодной плазмы электрически подключен к контактной площадке. Основная идея состоит в создании на поверхности катода большого количества конденсаторов, на один выход которых подключен острейший инициатор катодной плазмы. Это приводит к развязке каждого инициатора катодной плазмы по условиям зажигания катодной плазмы и к такому распределению напряжения на диоде, при котором на катодном узле возникает напряжение достаточное для формирования катодной плазмы. Проведенные эксперименты



показали возможность получения широкого по сечению пучка электронов при напряжении на диоде 100 - 300 кВ.

В [24] предложен катод на основе фотостимулированной взрывной эмиссии, в котором инициатором катодной плазмы является микроканальная пластина. Она имеет высокий выход вторичных электронов при сравнительно низком напряжении порядка одного-двух киловольт. Этот эффект используется для формирования катодной плазмы. Исследования поперечной структуры электронного пучка показали, что такие катоды имеют повышенную однородность плотности тока и  $\Delta j/j_{\max}$  составляет около 5% при напряжении на источнике электронов 100 - 300 кВ.

Для повышения эффективности токоотбора за счет использования конденсированного газа в качестве инициатора катодной плазмы был предложен плазменный диод в [25] и экспериментально исследован в [22].

В данной главе также рассматриваются конструкции источников электронов со взрывной эмиссией для поверхностной модификации материалов, которые были разработаны и успешно использовались в различных экспериментах.

В качестве материала инициатора катодной плазмы наиболее широкое применение нашли углеродно-волоконистые материалы за счет двух их основных свойств - высокого геометрического коэффициента и высокой их термической стойкости [26, 27, 28, 29, 30, 31].

Зависимости плотности тока пучка электронов  $j$  от расстояния между катодом и анодом (облучаемой трубой)  $D$  приведена на рис. 5 а и б. Измерения азимутальной неоднородности плотности тока  $j/j_{\max}$  показали, что она не превышает 15%, а продольная неоднородность не превышает 20% на длине катода.

Зависимость плотности тока пучка электронов для планарного диода представлена на рис. 6.

На основе отдельных пучков углеродных волокон разработан катод большой площади для электронной пушки микросекундного диапазона для поверхностной модификации материалов [31]. В нем используется эффект токоограничивающих резисторов, включенных в цепь каждого инициатора катодной плазмы. Эксперименты показали, что при напряжении 100 - 300 кВ и плотности тока

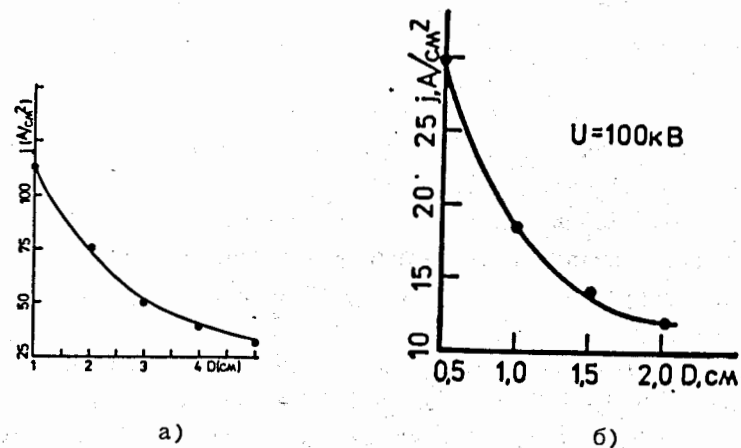


Рис. 5 а, б. Зависимость плотности тока пучка  $j$  электронов коаксиальных электронных пушек для прямого (а) и обращенного диода (б) от расстояния  $D$  между анодом и катодом при напряжении на пушке 160 кВ (а) и 100 кВ (б).

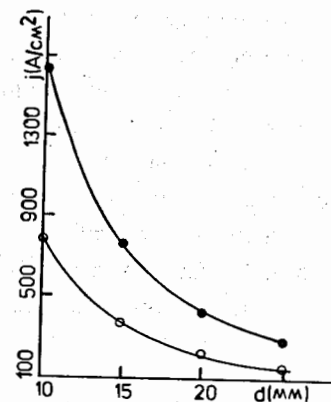


Рис. 6. Зависимость плотности тока пучка электронов  $j$  от расстояния между анодом и катодом  $D$  при напряжении на планарной пушке:  $\circ$  - 100 кВ;  $\bullet$  - 150 кВ.

пучка электронов микросекундной длительности  $j=50\text{А/см}^2$ , ресурс стабильной работы катода составляет около  $10^5$  включений.

В триодном источнике электронов для модификации материалов с целью регулировки плотности тока по поперечному сечению управляющая сетка выполнена в виде системы параллельно изолированных проволочных или пластинчатых электродов, каждый из которых включен в цепь анода через отдельный регулируемый резистор [32].

В 2.2. рассмотрены источники электронов с плазменными катодами на основе скользящего разряда по поверхности диэлектрика и магнитодиэлектрика.

При формировании электронного пучка в такой системе возможны два варианта вытягивания электронного пучка:

1. перпендикулярно скользящему разряду, который уже сформирован;
2. соосно со скользящим разрядом по поверхности диэлектрика.

Особый интерес представляют пассивные схемы таких источников электронов, в которых отсутствует дополнительный генератор импульсного напряжения для зажигания разряда.

На рис. 7 приведена структурная схема такого источника электронов, которая представляет собой два последовательно соединенных конденсатора  $C_1$ ,  $C_2$ . Из этой простой схемы видно, что они образуют емкостный делитель напряжения. Первый конденсатор  $C_1$  образован цилиндрическим электродом 2 и стенкой цилиндрической вакуумной камеры 4 с вакуумным промежутком, второй конденсатор  $C_2$  - цилиндрическим электродом 2 и катодным электродом 1 с диэлектрической вставкой 3 (или частью проходного высоковольтного изолятора 5). Для формирования катодной плазмы необходимо получить напряженность  $E_1$  электрического поля на катодном электроде, которая превышает пороговую напряженность зажигания скользящего разряда по поверхности диэлектрика, и не допустить сквозного пробоя диэлектрика:

$$E_{ck} > E_1 = \frac{U}{r_0 [\ln r_2/r_1 + \ln r_1/r_0]} > E_{пор} \quad (1)$$

где:  $U$  - напряжение на источнике электронов;

$\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость диэлектрической вставки;  $r_0$  - радиус катодного электрода 1;  $r_1$  - радиус цилиндрического электрода 2;  $r_2$  - внутренний радиус цилиндрической вакуумной камеры 4

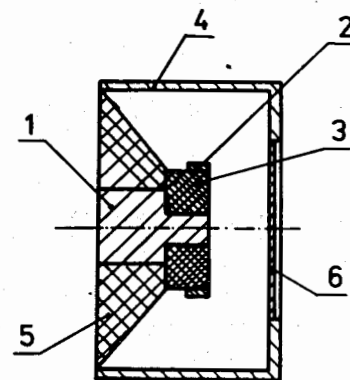


Рис. 7. Структурная схема источника электронов:  
1 - катодный электрод; 2 - цилиндрический электрод;  
3 - диэлектрическая вставка; 4 - вакуумная камера;  
5 - проходной высоковольтный изолятор; 6 - анод.

Для формирования однородного СКРПД в работах [33, 34, 35] используется тонкий слой вещества с малой работой выхода (окиси бария) по поверхности диэлектрика. В этом случае формируется однородный скользящий разряд и устраняется искровой характер разряда.

Другая схема с использованием диэлектрика из магнитодиэлектрика (феррита марки 200НН, 300НН и др.) для увеличения допустимой длительности импульса тока пучка электронов рассмотрена в [36]. Эта схема диода использует эффект притяжения заряженных струй (скользящего разряда) к поверхности ферромагнетика и позволяет уменьшить продольную компоненту скорости катодной плазмы до  $10^5$  см/сек. При этом экспериментально впервые показано формирование скользящего

разряда по поверхности магнитоэлектрика.

На основе скользящего разряда по поверхности диэлектрика и магнитоэлектрика можно получать профилированные пучки электронов [37].

Кроме рассмотренных схем источников электронов со СКРПД с целью расширения диапазона регулировки плотности тока пучка электронов путем изменения расстояния между анодом и катодом в этой главе рассмотрены источники электронов с плазменными эмиттерами на основе скользящего разряда, сформированного при межвитковом пробое в катушке индуктивности по поверхности диэлектрика. В этом случае формирование катодной плазмы осуществляется независимо от расстояния между анодом и катодом. В первом варианте [38] используется индуктивный делитель напряжения, а в другой [39] — трансформатор Тесла, а плазменный катод собран на основе вторичной обмотки этого трансформатора Тесла и полосковой линии, которая образована его вторичной обмоткой. При этом полосковая линия представляет собой конденсатор во вторичном контуре трансформатора Тесла. В работе [40] было впервые предложено использовать скользящий разряд по поверхности диэлектрика и магнитоэлектрика в диоде с магнитной изоляцией. В отличие от взрывоэмиссионной катодной плазмы эмиттер электронов на основе скользящего разряда в таком диоде принципиально позволяет получать электронные пучки миллисекундного диапазона за счет уменьшения радиальной скорости катодной плазмы в сторону анода.

В разделе 2.3. рассматриваются источники электронов с плазменными катодами на основе незавершенного разряда по поверхности диэлектриков и магнитоэлектриков.

Для упрощения высоковольтной развязки катодного узла путем устранения дополнительного генератора импульсного напряжения для зажигания разряда предложена и исследована пассивная схема диода [41, 42, 43].

На рис. 8 приведена структурная схема диода. В нем катодный узел состоит из металлической подложки 1, диэлектрической вставки 2, металлической мелкоструктурной сетки 3. Анодом 4 является тонкая металлическая фольга или металлическая сетка. Эту схему можно рассматривать как два

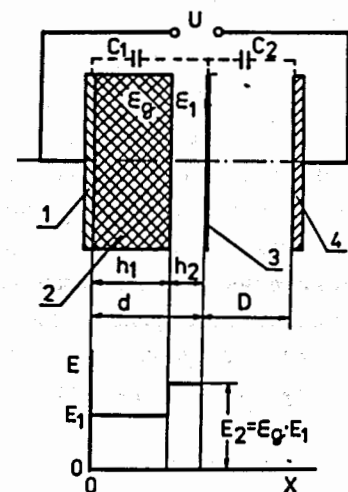


Рис. 8. Структурная схема диода.

- 1 — металлическая сетка; 2 — диэлектрическая вставка;  
3 — металлическая мелкоструктурная сетка; 4 — анод.

последовательно соединенных конденсатора  $C_1$  и  $C_2$ .  $C_1$  образован металлической подложкой 1 и металлической мелкоструктурной сеткой 3 с диэлектрической вставкой 2 между ними, и следовательно эти элементы можно рассматривать как емкостный делитель напряжения. А из этого следует, что подбирая его параметры, можно получить на катодном узле напряжение, которого достаточно для зажигания катодной плазмы — эмиттера электронов. Наиболее универсальным пороговым параметром зажигания незавершенного разряда по поверхности диэлектрика является пороговая напряженность  $E_{2\text{пор}}$  электрического поля в

воздушном зазоре между металлической мелкоструктурной сеткой и диэлектрической вставкой. При давлении остаточного газа  $P \approx (1 - 5) \cdot 10^{-5}$  Торр значение  $E_{2пор.}$  составляет  $1.2 \cdot 10^6$  В/см [44].

Таким образом условие формирования незавершенного разряда по поверхности диэлектрика ( НРПД ) в плоской геометрии электродов имеет вид:

$$E_2 = U_{C1} \varepsilon_g K / (\varepsilon_g h_2 + h_1) > E_{2пор.} = 1.2 \cdot 10^6 \text{ [В/см]} \quad (2).$$

При этом необходимо отметить, что для источника электронов можно использовать также коаксиальную и коническую геометрии электродов катодного и анодного узлов.

Также не имеется ограничений на диэлектрические материалы. Например, применение магнетодиэлектриков, для которых также наблюдается этот разряд [45], позволяет увеличить допустимую длительность импульса тока пучка электронов в планарной конструкции диода [46].

Из коммутационных характеристик диода определены продольные скорости движения катодной плазмы в сторону анода  $V_n$ , которые представлены в таблице № 2 для различных материалов диэлектрической вставки.

Из этих данных следует, что допустимая длительность импульса тока пучка электронов, определяемая временем переключения диодного промежутка катодной плазмой, при расстоянии между анодом и катодом  $D = 1$  см равна  $t = D/V_n = (143 - 10000)$  нсек.

Таблица № 2

Материал диэлектрика	Капролон	Винипласт	Стекло-текстолит	Феррит 300НН
$V_n, \text{ см/с}$	$7 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^6$	$10^5$

Анализ причин, влияющих на ресурс работы такого катода показал, что, в основном, эрозия диэлектрической вставки

ограничивает его ресурс. Ресурс работы рассмотренного катода составляет  $N \approx 10^5$  включений при напряжении на диоде 100 - 300 кВ.

В главе III рассматриваются импульсные источники ионов на основе взрывной ионной эмиссии.

В 1985 году во время экспериментов по формированию катодной плазмы на углеродных волокнах было обнаружено новое физическое эмиссионное явление - импульсная ионная эмиссия с поверхности анодной плазмы, формируемой при запитке вакуумного диода импульсом напряжения положительной полярности [47]. По аналогии со взрывной электронной эмиссией она была названа взрывной ионной эмиссией. На рис. 9 приведена структурная схема ионного диода.

Для зажигания анодной плазмы необходимо на аноде получить некоторую пороговую напряженность электрического поля.

На рис. 10 показано свечение анодной плазмы на углеродно-волокнутом инициаторе анодной плазмы при давлении остаточного газа в диоде  $P \approx 5 \cdot 10^{-5}$  Торр. Микрофотографии поверхности анода (инициатора анодной плазмы) и катода со сканирующего электронного микроскопа приведены на рис. 11а,б. Они показывают проплавы острий на аноде, аналогичный проплаву острий на катоде как при взрывной электронной эмиссии. Для наглядной иллюстрации на рис. 11в показано отдельное острие на поверхности анода. На поверхности катода этого не наблюдается.

Анализ теплового разогрева острия - инициатора анодной плазмы аналогичен анализу теплового режима автоэмиссионного катода, с разницей только в источнике заряженных частиц. Пролавы остриевых структур показывают их нагрев до высоких температур, которые соответствуют температуре плавления. Импульсный характер питания диода, импульсный разогрев инициаторов анодной плазмы, импульсное адиабатическое формирование анодной плазмы позволяют делать вывод о взрывном механизме формирования анодной плазмы, а скачок в импульсе тока пучка ионов, по аналогии со взрывной эмиссией, только дополняет выводы о взрывном характере ионной эмиссии.

Эксперименты по определению условий зажигания анодной плазмы показали, что пороговая напряженность электрического поля для многих материалов инициаторов анодной плазмы [48,49] должна

составлять при давлении остаточного газа от  $10^{-6}$ - $10^{-4}$ торр :

$$E_{\text{пор}} \approx 10^7 \text{ [V/cm]} \quad (3).$$

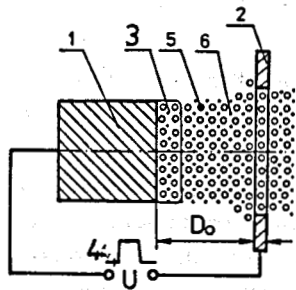
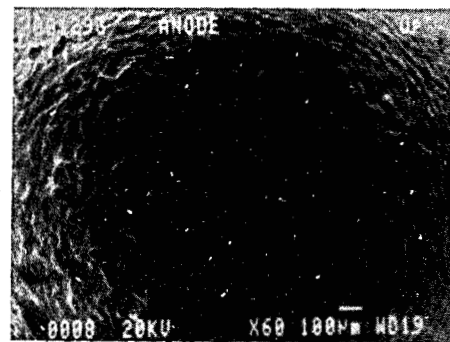


Рис. 9. Схема диода:  
1 - анод; 2 - катод;  
3 - анодная плазма;  
4 - генератор импульсного  
напряжения; 5 - паровая  
компонента распыленного  
материала анода; 6 - ионы.

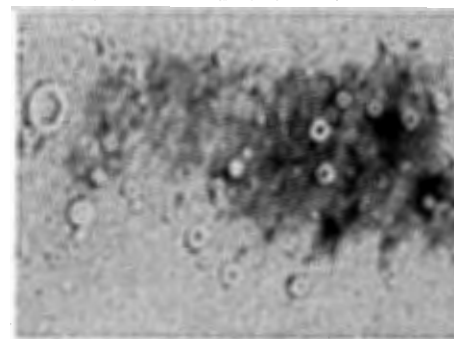


Рис.10. Фотография  
свечения анодной плазмы.



а)

Рис. 11а,б. Фотографии  
поверхности медного  
анода и катода  
ионного диода.



б)



Рис.11в. Фотография  
проплавленного  
острия на аноде.

При этом, как во всех импульсных источниках ионов с плазменным эмиттером, токоотбор пучка ионов осуществляется с границы движущейся в сторону катода анодной плазмы, пока не произойдет закорачивание диода анодной плазмой. И в этом случае видна аналогия с источниками электронов со взрывной электронной эмиссией. Для многих материалов скорость анодной плазмы составляет порядка  $(1 - 10) \cdot 10^6$  см/с. Для уменьшения продольной скорости анодной плазмы применимы методы, которые применяются для увеличения допустимой длительности импульса тока электронного пучка введением в цепь инициаторов анодной плазмы токоограничивающих резисторов [50].

Для получения стабильного токоотбора необходимо также вводить токоограничивающие резисторы в цепь каждого или группы инициаторов анодной плазмы.

В случае формирования анодной плазмы в несогласованном режиме диода с генератором импульсного напряжения (наличие колебательных эффектов в разрядном контуре) наблюдается режим генерации пакета пучков ионов и электронов, следующих один за другим [51].

Величина ионного тока удовлетворяет закону Чайльда-Ленгмюра.

При формировании анодной плазмы наблюдается интенсивное распыление материала анода (инициатора анодной плазмы), которое на несколько порядков превосходит распыление инициатора катодной плазмы при взрывной электронной эмиссии. Этот эффект можно использовать для напыления различных пленок и покрытий, как однокомпонентных так и многокомпонентных [52]. Временная диаграмма этих процессов представлена на рис. 12. Из нее видно, что возможны два режима напыления пленок:

1) когда длительность импульса напряжения  $t_u$  меньше допустимой длительности импульса тока пучка ионов  $t_b$ , определяемой временем переключения диода анодной плазмой;

2) когда  $t_u > t_b$ .

В первом случае скорости распыления материала анода меньше, чем во втором случае, что объясняется отсутствием вакуумной дуги между анодом и катодом. Однако в обоих случаях наблюдается эффект модификации пленки ионным пучком, что приводит к получению перемешанных пленок.

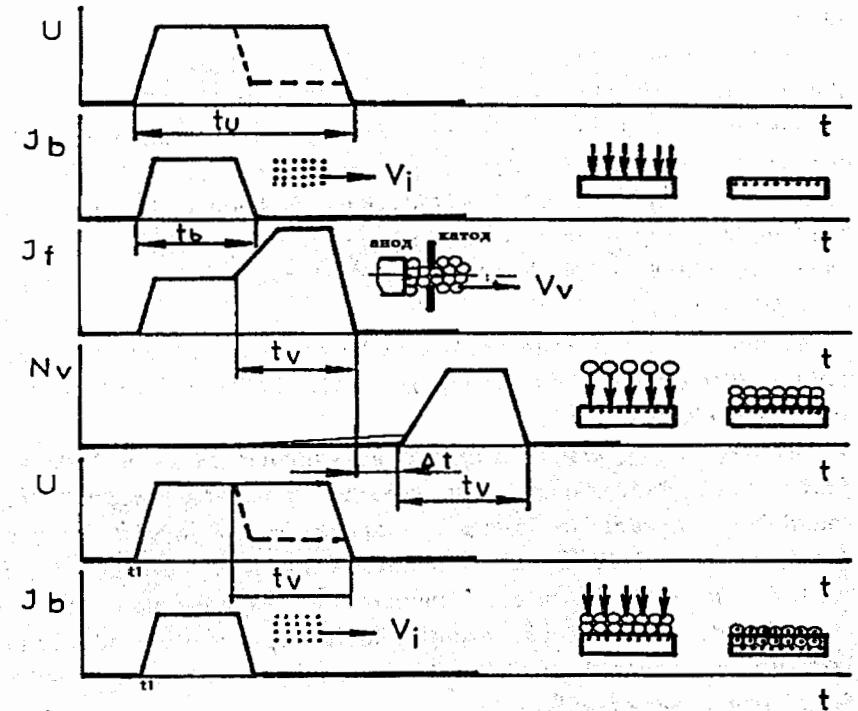


Рис. 12. Временные диаграммы напыления пленок и их ионной модификации в импульсном взрывоэмиссионном ионном вакуумном диоде.  $U$  - напряжение на диоде;  $J_b$  - ток ионного пучка;  $J_f$  - полный ток в диоде;  $N_v$  - плотность паровой фазы материала инициатора анодной плазмы;  $V_i$  - поток ионов;  $V_v$  - поток пара;  $t_u$  - длительность импульса напряжения;  $t_b$  - длительность импульса тока пучка;  $t_v$  - время распыления инициатора анодной плазмы при закорачивании диода анодной плазмой;  $\Delta t$  - время задержки между окончанием импульса полного тока в диоде и моментом прихода паровой компоненты на подложку;  $t_1$  - начало следующего импульса напряжения и тока пучка.  $\dots\dots$  - ионы;  $oooo$  - паровая компонента материала инициатора анодной плазмы.  $o \rightarrow$  - паровое осаждение на подложку;  $\cdot \rightarrow$  - ионное облучение.

Сорт ионов определяется материалом инициатора анодной плазмы.

Для получения ионов диэлектрических материалов можно использовать схему диода с диэлектрическим покрытием инициатора анодной плазмы (анода) [53]. Диэлектрическое покрытие позволяет рассматривать диод как конденсатор с двумя слоями диэлектрика: диэлектрическое покрытие на аноде и вакуумный зазор между этим покрытием и катодом.

Для получения ионов  $Si$  использовался винипласт,  $K - KCl$ ,  $F$  - тефлон и др.

На основе этого типа ионной эмиссии была разработана серия ионных источников ионов углерода [49], ионов металлов [54, 55, 56], диэлектриков [53].

Данные источники состоят из вакуумного диода и генератора импульсного напряжения. Для питания наиболее предпочтителен генератор Аркадьева-Маркса, параметры которого наименее влияемы на свойства анодной плазмы и параметры ионного пучка.

Для получения ионов металлов разработано несколько источников, как с одноострийными анодами, так и с ленточными анодами с набором острых инициаторов анодной плазмы с резистивной развязкой.

На рис. 13а,б приведены фотографии ионных источников на рабочее напряжение до 50 кВ (а) и до 700 кВ (б), а на рис. 14 а и б - их эмиссионные характеристики.

Ресурс работы ионного источника этого типа зависит от теплофизических свойств инициаторов анодной плазмы и для их большинства составляет  $10^3 - 10^5$  включений.

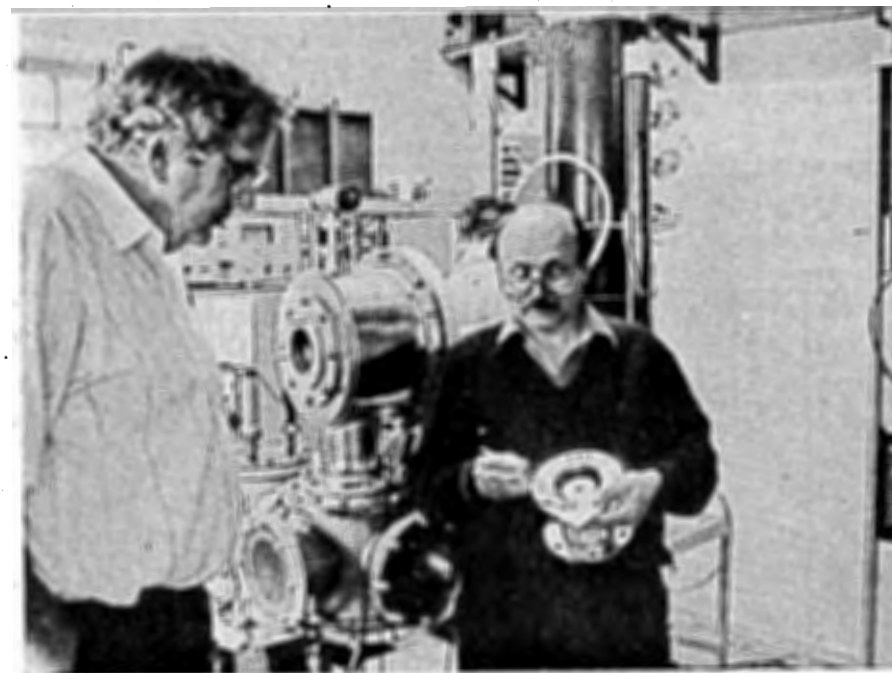
Для получения ионов различных элементов был разработан ионный источник [57], в котором используется электронный пучок для дополнительного распыления материала инициатора анодной плазмы.

Глава IV посвящена описанию экспериментов по модификации материалов, которые были проведены с помощью разработанных импульсных электронных и ионных источников

Для поверхностного упрочнения инструментальных сталей был предложен ионно-электронный метод [58]. Его смысл заключается в том, что первичное облучение проводится ионами углерода с



а)



б)

Рис. 13 а,б. Общий вид ионных источников

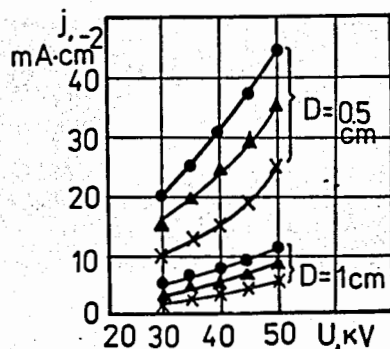


Рис. 14а. В.а.х. ионного диода при расстоянии между анодом и катодом  $D = 0,5; 1,0$  см : о - ионы Al;  $\blacktriangle$  - ионы Ti; X - ионы In.

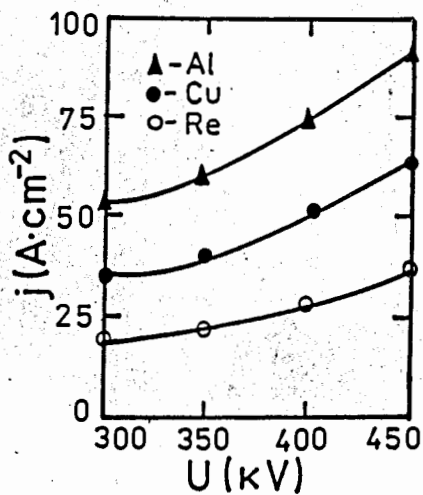
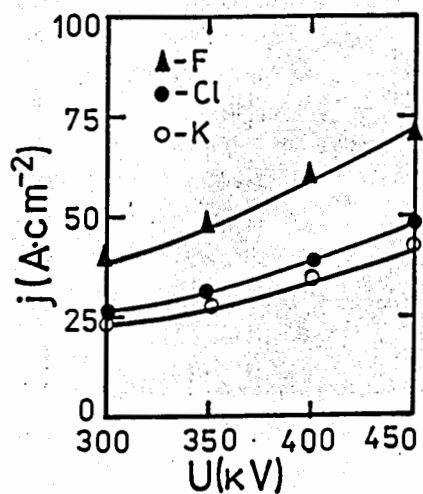


Рис. 14б. Эмиссионные характеристики ионного диода

целью внедрения ионов углерода, а затем электронным пучком осуществляется поверхностный переплав с целью создания карбидов. Эксперименты по поверхностному упрочнению сталей марок У8, М42 показали возможность получения высоких коэффициентов поверхностной микротвердости, достигающих до 70.

Были проведены успешные эксперименты по отжигу полупроводниковых детекторов ядерного излучения на основе силицидов PtSi/Si [59,60,61].

Также проводились исследования по модификации низкотемпературных и высокотемпературных сверхпроводников. С целью снижения ВЧ потерь путем уменьшения шероховатости поверхности сверхпроводника были проведены эксперименты по поверхностному проплаву сверхпроводящей ленты  $Nb_3Ge$  на ленте из нержавеющей стали [62,63,64].

Модификация высокотемпературных сверхпроводников сильноточными электронными и ионными пучками проводилась с целью получения новых свойств высокотемпературных сверхпроводников.

Одной из проблем этих материалов является деградация сверхпроводящих свойств иттриевой керамики типа  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ . Этим реакциям способствует гранульная структура прессованного сверхпроводника. Для устранения этого негативного эффекта был предложен и экспериментально исследован метод стабилизации поверхности высокотемпературного сверхпроводника который заключается в создании на поверхности керамики защитного проплавленного слоя импульсным электронным пучком в адиабатических условиях, который затрудняет проникновение влаги в его внутрь [65,66]. Этот метод позволяет замедлить деградацию этого сверхпроводника до 8 месяцев.

Другая задача в высокотемпературной сверхпроводимости состоит в поиске методов увеличения критических токов. В диссертации предложено для решения этой актуальной задачи использовать импульсный проплав с помощью сильноточного электронного пучка с целью увеличения зоны контактов зерен керамики в условиях сохранения ее стехиометрии.

Электрические измерения показывают уменьшение ее удельного сопротивления и увеличение критического тока, см. рис. 15 [67,68,69,70,71].



Облучение ионами дает другой эффект, который вызывает деградацию сверхпроводящих свойств и уменьшение критического тока, см. рис. 15.

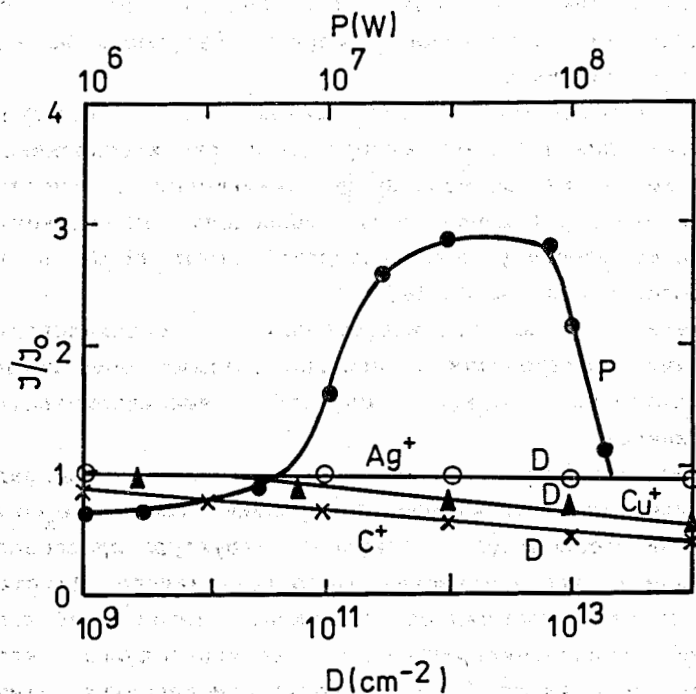


Рис. 15. Зависимость отношения критического тока после облучения ( $J$ ) к току до облучения  $J_0$  от мощности пучка электронов  $P$  и от дозы облучения  $D$  ионами:  $Ag$ ,  $Cu$ ,  $C$ .

При облучении электронами необходимо учитывать глубину пробега вещества [72]. Эти эффекты в большей степени относятся к титанату стронция, у которого диэлектрическая проницаемость имеет большие значения, и он используется в качестве подложек для пленок высокотемпературных сверхпроводников. В результате проникновения электронов возникает внутренний электрический

пробой, который вызывает разрыв пленки на подложке.

Измерение параметров высокотемпературных сверхпроводников проводилось на аппаратуре, описанной в [69, 73].

Исследование электрического пробоя в вакуумных условиях между электродами из ВТСП представляет особый интерес в связи с потенциальными применениями новых материалов в электротехнических устройствах, в ускорительной технике.

В работе [13] было найдено, что облучение ионами меди приводит к увеличению электрической прочности вакуумных зазоров между электродами из высокотемпературных сверхпроводников.

Используя метод вакуумной ионной взрывной конденсации, в ходе работы были проведены эксперименты по напылению различных пленок металлов, диэлектриков, высокотемпературных сверхпроводников [74, 75, 76].

Особый интерес вызывает напыление пленок с ионным и электронным перемешиванием. Экспериментальная установка позволяет реализовать эти режимы.

Скорости напыления зависят от свойств материала и от энергии в генераторе импульсного напряжения и составляют от 0.001 мкм/импульс до 0.5 мкм/импульс для различных материалов при напряжении на ионном диоде 150 - 400 кВ.

В заключении приводятся основные результаты, полученные в диссертации.

1. Обнаружено новое физическое явление - импульсная взрывная ионная эмиссия из плазменного эмиттера на основе вакуумного разряда, инициируемого положительным импульсом напряжения. По аналогии со взрывной электронной эмиссией этот тип ионной эмиссии был назван взрывной ионной эмиссией.
2. Исследованы эмиссионные свойства анодной плазмы для получения ионов проводящих материалов.
3. Предложена и исследована схема ионного диода для получения ионов диэлектрических материалов.
4. Обнаружен новый тип вакуумной конденсации - взрывная ионная вакуумная конденсация. С ее использованием получены различные пленки и покрытия, в том числе и пленки высокотемпературных сверхпроводников.

5. Найден класс материалов для взрывоэмиссионных катодов и изучены их эмиссионные свойства.

6. Для формирования электронных пучков микросекундной длительности можно использовать материалы с низкой электрической прочностью на основе высокотемпературных сверхпроводников, работающих при комнатных температурах.

7. Экспериментально обнаружены незавершенный и скользящий разряды по поверхности магнитодиэлектриков; эти разряды можно использовать в качестве плазменных эмиттеров для получения микросекундных электронных пучков в вакуумных диодах.

8. Предложен и исследован метод увеличения электрической прочности вакуумных зазоров между электродами из высокотемпературных сверхпроводников. В его основу положена поверхностная модификация высокотемпературных сверхпроводников ионами меди.

9. Предложен и исследован метод увеличения критического тока высокотемпературных сверхпроводников при его импульсной поверхностной модификации импульсным электронным пучком. Эффект имеет место при поверхностном проплаве. Показано, что ионная модификация приводит к уменьшению критического тока высокотемпературных сверхпроводников.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Корнев С.А. Разрядник, Авторское свидетельство СССР № 1271312, Бюл. Открытия и Изобретения (ОИ) № 42, с.272, 1986.
2. Корнев С.А. Тригатронный разрядник, Авторское свидетельство СССР, № 1364192, Бюл. ОИ № 48, с.282, 1987.
3. Корнев С.А. Управляемый разрядник. Авторское свидетельство СССР № 1749946, Бюл. ОИ № 27, стр.197, 1992.
4. Корнев С.А. Разрядник со скользящим разрядом. Авторское свидетельство СССР № 1461290, Бюл. ОИ № 7, с.276, 1989.
5. Корнев С.А. Катод со взрывной эмиссией. Авторское свидетельство СССР, № 976804, Бюл.: "Открытия и изобретения", № 30, с.197, 1984.
6. Корнев С.А. Диод со взрывоэмиссионным катодом. Авторское свидетельство СССР №1501819, Бюл. ОИ №30, с.28, 1989.
7. Корнев С.А. Увеличение токоотбора с графитового катода. ПТЭ, 1983. № 6, с.133. К вопросу об увеличении токоотбора с

графитового катода. Препринт ОИЯИ № 9-83-46, Дубна, 1983.

8. Корнев С.А. Катод со взрывной эмиссией. Авторское свидетельство СССР № 1438512, Бюл. ОИ №35, с.303, 1989.
9. Акапьев Г.Н., Корнев С.А. Эмиссионные характеристики пленочного взрывоэмиссионного катода, изготовленного с помощью трековой методики. В кн.: Труды VII Всесоюзного симпозиума по сильноточной электронике, Томск, 1988, ч.2, с.46.
10. Акапьев Г.Н., Корнев С.А. Взрывоэмиссионный катод, изготовленный с помощью трековой методики. Препринт ОИЯИ № 13-88-347, Дубна, 1988; ПТЭ, № 4, 1989, p. 155.
11. Korenev S.A. The emission characteristics of YBCO cathode. JINR Rapid Communication N 4 [30]-88, Dubna, 1988, p. 87.
12. Korenev S.A. Experiments on the influence of copper ions on the properties of high temperature superconductors Y-Ba-Cu-O. Proc. III International Conference on Ion Implantation and Ion Equipment, Elenite, Bulgaria, 1990, p. 267.
13. Korenev S.A., Mihov M.K. Microsecond electron beams generation in the diode with explosive cathodes. Proc. VIII International Conference on High Power Particle Beams, BEAMS'90, Novosibirsk, 1990, V.1, p.592.
14. Корнев С.А., Балалыкин Н.И., Енчевич И.Б., Михов М.К. Сильноточная электронная пушка с углеродно-волоконистым катодом. В кн.: Тезисы V Всесоюзного симпозиума по сильноточной электронике. Изд-во ИСЭ СО АН СССР, Томск, 1984, ч.1, с.45.
15. Корнев С.А. Катод со взрывной эмиссией. Авторское свидетельство СССР № 1143246, Бюл. ОИ № 7, с.209, 1985.
16. Корнев С.А., Баранов А.М., Костюченко С.В., Черненко Н.М. Катод со взрывной эмиссией на основе волокнистого углепластика. Препринт ОИЯИ № 13-88-292, Дубна, 1988; ПТЭ, № 5, с.194.
17. Корнев С.А., Баранов А.М. Катод со взрывной эмиссией. Авторское свидетельство СССР № 1552910, Бюл.ОИ № 11, с.26, 1990.
18. Азорский Н.,..... Корнев С.А....Саранцев В.П. и др. Использование взрывного углеродно-волоконистого катода в электронном ускорителе СИЛУНД -20. В кн.: Труды VII Всесоюзного симпозиума по сильноточной электронике, Томск,

1988, ч.1, с.55.

19. Вавра И., Коренев С.А. Электронный источник со взрывоэмиссионным катодом сверхпроводящего кабеля. В кн.: Труды VII Всесоюзного симпозиума по сильноточной электронике, Томск, 1988 ч.2, с.258.
20. Vavra I., Korenev S.A. The method of preparation of multipoint cathode. Авторское Свидетельство ЧСФР №267170. Бюл. Изобретения за рубежом, №7, с. 4, 1990.
21. Вавра И., Коренев С.А. Катод на основе сверхпроводящих кабелей. Препринт ОИЯИ № 13-87-751, Дубна, 1987; ПТЭ, 1989, № 3, с.145.
22. Вавра И., Коренев С.А. Характеристики Мо волокнистого эмиттера в режиме взрывной электронной и ионной эмиссии. В кн.: Труды VIII Всесоюзного симпозиума по сильноточной электронике, Свердловск, ИЭФ, 1990, ч.1, с.82.
23. Коренев С.А. Взрывоэмиссионный диод. Авторское свидетельство СССР № 1438511. Бюл. ОИ № 42, с. 263, 1988.
24. Коренев С.А. Ускоритель электронов. Авторское свидетельство СССР № 1075937. Бюл. ОИ № 7, с. 263, 1984.
25. Коренев С.А., Вавра И. Плазменный диод, Авторское свидетельство СССР № 1362343. Бюл. ОИ № 24, с. 27, 1988.
26. Коренев С.А., Балалыкин Н.И., Енчевич И.Б., Михов М.К. Электронная пушка для поверхностной обработки материалов. Препринт ОИЯИ № 313-84-461, Дубна, 1984; ПТЭ, 1985, №6, с.190.
27. Балалыкин Н.И., Енчевич И.Б., Михов М.К., Коренев С.А. Электронная пушка для поверхностной обработки внутренних поверхностей цилиндрических деталей. Препринт ОИЯИ № 313-85-29, Дубна, 1985; В кн.: Труды Международной конференции по электронно-лучевым технологиям. Изд-во БАН, София, НРБ, 1985, с.109.
28. Балалыкин Н.И., Енчевич И.Б., Михов М.К., Коренев С.А. Электронный источник для технологий. в кн.: Труды V Всесоюзного совещания по использованию ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. НИИЭФА, Ленинград, 1985, ч.1, с.78.
29. Коренев С.А., Балалыкин Н.И., Енчевич И.Б. Коаксиальный источник электронов для поверхностной обработки внешних поверхностей цилиндрических деталей. Препринт ОИЯИ № 13-88-416

ОИЯИ, Дубна, 1988; В кн.: Труды II Международной конференции по электронно-лучевым технологиям. Изд-во БАН, София, НРБ, 1988, т. 1, с.211.

30. Коренев С.А. Импульсные электронные источники для поверхностной модификации материалов. Тезисы докладов I Всесоюзной конференции по модификации конструкционных материалов пучками заряженных частиц, Томск, 1988. т. 1., с. 28.
31. Коренев С.А. Импульсная электронная пушка для поверхностной модификации материалов. Труды III Международной конференции по электронно-лучевым технологиям. Изд-во БАН, София, 1991, с. 607.
32. Коренев С.А. Электронная пушка для обработки материалов. Авторское свидетельство СССР № 1501829. Бюл. ОИ № 30, с.28, 1989.
33. Коренев С.А. К вопросу о генерации электронных пучков в плазменном диоде. Труды конференции по проблемам коллективного метода ускорения. ОИЯИ № Д9- 82-664, Дубна, 1982, с. 217.
34. Коренев С.А. Диод на основе скользящего разряда по поверхности диэлектрика. Сообщение ОИЯИ № 18-82-99, ОИЯИ. Дубна, 1982.
35. Коренев С.А. Высоковольтный диод. Авторское свидетельство СССР № 1022338. Бюл. ОИ № 21, с. 268, 1983.
36. Коренев С.А. Высоковольтный вакуумный диод. Авторское свидетельство СССР № 1139307. Бюл. ОИ № 5, с. 203, 1985.
37. Коренев С. А. Импульсный источник электронов. Авторское свидетельство СССР № 1545826. Бюл. ОИ № 7, с. 249, 1990.
38. Коренев С.А. Импульсный источник электронов. Авторское свидетельство СССР № 1314855. Бюл. ОИ №20, с. 252, 1987.
39. Коренев С.А. Импульсный источник электронов. Авторское свидетельство СССР № 1326096. Бюл. ОИ № 27, с. 283, 1987.
40. Коренев С.А. Плазменный диод с магнитной изоляцией. Авторское свидетельство СССР № 1237055. Бюл. ОИ № 21, с. 284, 1986.
41. Коренев С.А. Формирование электронных пучков в сильноточном диоде. Сообщение ОИЯИ № 9-81-573, Дубна, 1981.
42. Коренев С.А. Исследование плазменного диода во внешнем магнитном поле. сообщение ОИЯИ №9-81-703, Дубна, 1981.

43. Коренев С.А. Исследование высоковольтного диода с плазменным катодом. В кн.: Избранные проблемы физики конденсированных и плазменных сред. Киев, КИЯИ, препринт № 82-8, Киев, 1982.
44. Коренев С.А., Рубин Н.Б. Формирование пристеночной плазмы в протяженных вакуумных каналах. Препринт ОИЯИ № 9-82-13; Журнал Технической Физики, Том 53, № 10, 1983, с. 1928.
45. Коренев С.А. Формирование незавершенного разряда по поверхности магнитодиэлектрика. Препринт ОИЯИ № 18-82--99, Дубна, 1982.
46. Коренев С.А. Плазменный диод. Авторское свидетельство СССР № 1362435, Бюл. ОИ № 8, с. 260, 1983.
47. Коренев С.А. Взрывная эмиссия многозарядных ионов. Труды II семинара молодых ученых ОИЯИ в области экспериментальной физики. ОИЯИ № P15-85-862, 1985, с. 4.
48. Коренев С.А. Импульсный взрывоэмиссионный диод. Труды III Всесоюзного семинара по плазменной электронике. Харьков, 1988, с. 93.
49. Korenev S.A. Pulse explosive ion beam source with one pulse supply for surface modification of materials. Preprint JINR N R13-89-390, Dubna, 1989; Proc.: III Intern. Conference "Energy Pulse and Particle Beam Modification of Materials" ( EPM'89 ), 1989, Dresden, p. 448 - 450.
50. Korenev S.A. Pulse explosive emission ion source. Proc.: III International Conference on Ion Implantation and Ion Equipment, Elenite, Bulgaria, 1990, p. 352 - 358.
51. Браун И., Коренев С.А., Михов М.К. Особенности взрывной ионной эмиссии. Тезисы докладов IX Российского симпозиума по сильноточной электронике, 1992, с. 18.
52. Коренев С.А. Импульсная взрывная ионная вакуумная конденсация. Препринт ОИЯИ № P13- 89-615, Дубна, 1989.
53. Korenev S. Production dielectric ions in ion source with explosive emission. Proc. VIII International Conference on Ion Sources. Beijing, 1993, p.19.; Review Scientific Instruments, April, 1994, p. 147.
54. Боровков Д.Л.,..., Коренев С.А. и др. Радиочастотный линейный ускоритель ионов. Сообщение ОИЯИ № P9 -91-3246 Дубна, 1991.

55. Korenev S.A. Pulse ion sources for surface modification of materials. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research B80/81, 1993, p.242.
56. Korenev S.A. Pulsed ion sources of metal for surface modification of materials. Proc. of 5th Intern. Symposium on Electron Beam Ion Sources and Their Applications, JINR, Dunma, 1992, p. 268.
57. Коренев С.А. Взрывоэмиссионный источник ионов. Авторское свидетельство СССР № 1382297. Бюл. ОИ № 10, с.259, 1988.
58. Коренев С.А., Спасов Л. Упрочнение инструментальной стали импульсным ионно-электронным пучковым методом. Труды I Российско-Китайского симпозиума по Актуальным проблемам современного материаловедения, Томск, 1992, с. 163.
59. Грубчин Л., Коренев С.А. Отжиг кремниевых детекторов ядерного излучения пучком ионов углерода. Тезисы докладов IX Российского симпозиума по сильноточной электронике, 1992, с. 350.
60. Hrubchin. L., Korenev S.A. Annealing nuclear silicon detectors PtSi-Si by pulse carbon ion beam. Book of abstracts of VIII Intern. Conference "Ion Beam Modification of Materials" (IBMM'92), Heidelberg, Germany, 1992, p. 149.
61. Hrubchin L., Guldan A., Besse T., Korenev S.A. Activities in the design of silicon detectors for ion radiation, Annual report 1992 by Electrical Engineering Institute , Bratislava, Slovakia.
62. Вавра И., Коренев С.А. Поверхностная обработка тонких пленок импульсным электронным пучком. Препринт ОИЯИ № P13-86-860, Дубна, 1986.
63. Вавра И., Коренев С.А. Поверхностная обработка тонких пленок Nb<sub>3</sub>Ge импульсным электронным пучком Препринт. ОИЯИ № 13-88-88. Труды II Международной конференции по электронно-лучевым технологиям, Болгария, т.2, с. 541, 1988.
64. Вавра И., Коренев С.А. Модификация структуры поверхности сверхпроводящей пленки Nb<sub>3</sub>Ge на ленте из нержавеющей стали. В кн.: Физика упрочнения металлов. Ленинград, 1988, с.72.
65. Korenev S.A., Valentovich D., Lushikov V.I. The stabilization of high temperature superconductors YBCO surface. JINR, Rapid Communication N2[30]-88, p. 28 -32; N4[30]-88, p.83-86,

Dubna, 1988.

66. Корнев С.А., Валентович Д. Стабилизация поверхности высокотемпературных сверхпроводников YBCO импульсным электронным пучком. Тезисы докладов I Всесоюзной конференции по модификации конструкционных материалов пучками заряженных частиц, Томск, 1988. т. 2, с. 4.
67. Korenev S.A., Chernakova A. Surface effects on the yttrium ceramics after irradiation by power pulse electron and ion beams. Proc.: Intern. Seminar on High Temperature Superconductivity, Dubna, 1989, p. 91.
68. Korenev S.A. Use of the high current ion and electron beams in the investigation of high temperature superconductors. Proc.: Inter. Seminar on High Temperature Superconductivity, Dubna, 1989, p.91-92.
69. Korenev S.A., Altynov V.A., Sikolenko V.V., Chernakova A. Experimental studies of effects of high current pulse electron and ion beams on the Y-Ba-Cu-O, Bi-Ca-Sr-Cu-O high temperature superconductors. Preprint JINR N 14-89-462; Preprint JINR N R14-89-389, Dubna, 1989; Proc.: International Seminar on high Temperature Superconductivity, Dubna, USSR, 1989, Progress in the High Temperature Superconductivity Vol. 21, p. 397-402, 1990, World Scientific, Singapore - New Jersey-London-Hong-Kong; Proc.: III International Conference "Energy Pulse and Particle Beam Modification of Materials" ( EPM'89 ), 1989, Dresden, p. 480 -482.
70. Korenev S.A., Sikolenko V.V. Experiments on high temperature superconductors Y-Ba-Cu-O, Bi-Ca-Sr-Cu-O. Proc.: Intern. Seminar on High Temperature Superconductivity, Dubna, 1989, p. 90.
71. Korenev S.A. Pulse radiation effects in high temperature superconductors. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research B65, 1992, p. 550.
72. Корнев С.А. Определение допустимых нагрузок на титанат стронция при облучении электронным пучком. Труды VIII Всесоюзной конференции по физике диэлектриков, Томск, т. 5, 1988, с. 103.
73. Корнев С.А., Сиколенко В.В. Импульсный метод измерения критического тока высокотемпературных сверхпроводников.

Сообщение ОИЯИ № P13-93-471, Дубна, 1994.

74. Korenev S.A., Borovkov D.L., Zubarev E.v., Kostjuchenko S.V. Installation for ion plasma deposition of films and layers. Proc. First Russian-Chinese Symposium "Actual problems of modern materials science", Moscow-Tomsk, 1992, p.163.
75. Корнев С.А., Валентович Д., Сиколенко В.В. Электрические характеристики покрытий иттриевой керамики, полученных ионной конденсацией. Труды I Всесоюзной конференции по ВТСП, Харьков, 1988, т.3., с.166.
76. Корнев С.А., Сиколенко В.В., Штанько С.П. Электрические характеристики пленок высокотемпературных сверхпроводников, полученных в импульсном взрывоэмиссионном диоде. Труды 2 Всесоюзной конференции по ВТСП, Киев, 1989, т.2, с.214.

Рукопись поступила в издательский отдел  
30 августа 1994 года.