А.И. Пушкарев Ю.И. Исакова Р.В. Сазонов Г.Е. Холодная

ГЕНЕРАЦИЯ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

В ДИОДАХ СО ВЗРЫВОЭМИССИОННЫМ КАТОДОМ





ПУШКАРЕВ Александр Иванович ИСАКОВА Юлия Иванова САЗОНОВ Роман Владимирович ХОЛОДНАЯ Галина Евгеньевна

ГЕНЕРАЦИЯ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ДИОДАХ СО ВЗРЫВОЭМИССИОННЫМ КАТОДОМ

УДК	535.11; 537.533	.3;
	537.534.3	11
ББК	22.338; 22.333	₽фи
	Γ34	— JJ —

Издание осуществлено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту 12-08-07014, не подлежит продаже

Авторский коллектив: Пушкарев А.И., Исакова Ю.И., Сазонов Р.В., Холодная Г.Е.

Генерация пучков заряженных частиц в диодах со взрывоэмиссионным катодом. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. — 240 с. — ISBN 978-5-9221-1411-0.

В монографии приведены результаты экспериментальных исследований генерации импульсных электронных и ионных пучков гигаваттной мощности в диодах со взрывоэмиссионным катодом в условиях быстрого формирования плазмы на всей рабочей поверхности катода. Рассмотрены наиболее важные физические процессы при генерации импульсных электронных и ионных пучков наносекундной длительности. Состав пучка — ионы углерода и протоны. Выполнены исследования полоскового диода плоской и фокусирующей геометрии, кольцевого плоского диода.

Для специалистов в области сильноточной электроники, генерации импульсных пучков заряженных частиц, а также для студентов и аспирантов физических специальностей: «Физика и техника низкотемпературной плазмы, плазмохимия и плазменные технологии», «Физика и техника мощных пучков заряженных частиц. Радиационно-пучковые технологии модифицирования материалов.

Ответственный редактор:

ведущий научный сотрудник Института электрофизики УрО РАН, д.т.н., профессор С.Ю. Соковнин

Рецензент:

доцент кафедры прикладной и медицинской физики Омского государственного университета им. Ф.М. Достоевского, к.ф.-м.н. В. С. Ковивчак

© ФИЗМАТЛИТ, 2013
 © Коллектив авторов, 2013

ISBN 978-5-9221-1411-0

оглавление

Предисловие	7
Глава 1. Генерация импульсных электронных пучков гигаваттной мощности	11
1.1. Генерация сильноточных электронных пучков в диодах со взрыво- эмиссионным катодом	12
 Сильноточный импульсный ускоритель электронов с согласующим трансформатором	19
1.3. Согласование двойной формирующей линии с диодом	24
Глава 2. Исследование планарного диода со взрывоэмиссионным	0.0
катодом	28
2.1. Расчет первеанса планарного диода	28
2.2. Исследование диода с графитовым катодом	30
2.3. Исследование диода с многоигольчатым катодом	30
2.4. Исследование диода с катодом из углероднои ткани	39
2.5. Исследование диода с многоострииным медным катодом	41
2.6. Блияние времени плазмоооразования на эффективность работы планарного диода	43
Глава 3. Исследование баланса заряда и энергии в диодном узле	47
3.1. Исследование потерь заряда при генерации сильноточного элек-	
тронного пучка	48
3.2. Исследование полных потерь заряда	50
3.3. Баланс энергии в диодном узле ускорителя	53
Глава 4. Исследование планарного диода в режиме ограничения эмиссии.	58
4.1. Измерение суммарной плошали эмитирующих центров	58
4.2. Моделирование изменения площади эмитирующих центров	61

Глава 5. Динамика скорости катодной плазмы в планарном диоде со взрывоэмиссионным катодом	66
5.1. Исследование диода с катодом из углерода	68
5.2. Исследование планарного диода с медным катодом	73
Глава 6. Распределение плотности энергии электронного пучка	77
6.1. Исследование распределения плотности энергии с помощью дози-	
метрическои пленки. 6.1.1. Расчет плотности энергии электронного пучка (80). 6.1.2. Пространственное распределение плотности энергии электрон- ного пучка (81).	11
6.2. Акустическая диагностика импульсного электронного пучка 6.2.1. Диагностика геометрических размеров пучка (84). 6.2.2. Из- мерение полной энергии пучка (86).	83
6.3. Тепловизионная диагностика сильноточного электронного пучка 6.3.1. Измерение распределения плотности энергии по сечению (88). 6.3.2. Контроль энергетического спектра электро- нов (91). 6.3.3. Пространственное распределение электронов с энергией в выбранном диапазоне (94).	87
Глава 7. Влияние анодной плазмы на ВАХ диода со взрывоэмис-	
СИОННЫМ КАТОДОМ	98
7.1. Исследование диода с катодом из углеродной ткани	99
7.2. Исследование диода с многоигольчатым катодом	102
7.3. Исследование баланса заряда	103
7.4. Обсуждение результатов	104
Глава 8. Генерация мощных ионных пучков	108
8.1. Ионный диод с магнитной самоизоляцией	109
8.2. Экспериментальный стенд и диагностическое оборудование	121
8.3. Калибровка диагностического оборудования	123
8.4. Конструкция диодов с магнитной самоизоляцией	126
8.5. Модернизация генератора наносекундных импульсов	128
8.6. Баланс энергии в генераторе наносекундных импульсов	130
Глава 9. Исследование динамики взрывоэмиссионной плазмы	133
9.1. Анализ траектории электронов	133
9.2. Структурирование режима работы ионного диода	138
9.3. Режим дискретной эмиссионной поверхности	140
9.4. Режим ограничения объемным зарядом	143
9.5. Исследование динамики плазмы при генерации МИП	144
9.6. Эффект плазменного сжатия	145

Глава 10. Подавление электронного тока в ионном диоде с маг- нитной самоизоляцией	148
10.1. Расчет магнитной индукции в анод-катодном зазоре	149
10.2. Расчет изменения магнитной индукции вдоль диода	151
10.3. Расчет времени дрейфа электронов и ионов	152
10.4. Влияние индуктивности заземленного электрода	158
10.5. Исследование работы диода в одноимпульсном режиме	160
10.6. Механизм подавления электронного тока	163
10.7. Выводы	165
Глава 11. Исследование состава и энергетического спектра ионно-	167
го пучка времяпролетным методом высокого разрешения	107
 Цилиндр Фарадея с магнитной отсечкой электронов	167
11.2. Цилиндр Фарадея с электрическим смещением	1/1
11.3. Исследование состава пучка	172
11.4. Определение энергетического спектра ионов	175
11.5. Исследование плотности ионного тока	176
11.6. Анализ влияния сокращения анод-катодного зазора	180
11.7. Механизм усиления плотности ионного тока	182
Глава 12. Тепловизионная диагностика МИП, формируемого дио- дом в двухимпульсном режиме	183
Глава 12. Тепловизионная диагностика МИП, формируемого дио- дом в двухимпульсном режиме	183
Глава 12. Тепловизионная диагностика МИП, формируемого дио- дом в двухимпульсном режиме	183 184
Глава 12. Тепловизионная диагностика МИП, формируемого дио- дом в двухимпульсном режиме	183 184 186
Глава 12. Тепловизионная диагностика МИП, формируемого дио- дом в двухимпульсном режиме 12.1. Методика измерения распределения плотности энергии ионного пучка. 12.2. Исследование охлаждения мишени 12.3. Исследование распределения плотности энергии МИП по сечению	183 184 186 190
 Глава 12. Тепловизнонная диагностика МИП, формируемого дио- дом в двухимпульсном режиме 12.1. Методика измерения распределения плотности энергии ионного пучка. 12.2. Исследование охлаждения мишени 12.3. Исследование распределения плотности энергии МИП по сечению 12.4. Анализ влияния электронов на нагрев мишени 12.4.1. Исследование плоского полоскового диода (192). 12.4.2. Исследование плоскового фюкусирующего диода (192). 	183 184 186 190 191
 Глава 12. Тепловизионная диагностика МИП, формируемого дио- дом в двухимпульсном режиме 12.1. Методика измерения распределения плотности энергии ионного пучка. 12.2. Исследование охлаждения мишени 12.3. Исследование распределения плотности энергии МИП по сечению 12.4. Анализ влияния электронов на нагрев мишени 12.4.1. Исследование плоскового полоскового диода (192). 12.4.2. Исследование полоскового полоскового диода (193). 12.5. Влияние взривоэмиссионной плазмы на нагрев мишени 	183 184 186 190 191
 Глава 12. Тепловизионная диагностика МИП, формируемого диодом в двухимпульсном режиме 12.1. Методика измерения распределения плотности энергии ионного пучка. 12.2. Исследование охлаждения мишени. 12.3. Исследование распределения плотности энергии МИП по сечению 12.4. Анализ влияния электронов на нагрев мишени. 12.4.1. Исследование плосково полоскового диода (192). 12.4.2. Исследование плоскового фокусирующего диода (193). 12.5. Влияние взрывоэмиссионной плазмы на нагрев мишени 12.6. Тепловизионная диагностика МИП-диода с внешней магнитной изоляцией. 	183 184 186 190 191 194 195
 Глава 12. Тепловизионная диагностика МИП, формируемого диодом в двухимпульсном режиме 12.1. Методика измерения распределения плотности энергии ионного пучка. 12.2. Исследование охлаждения мишени. 12.3. Исследование распределения плотности энергии МИП по сечению 12.4. Анализ влияния электронов на нагрев мишени. 12.4.1. Исследование плоскового диода (192). 12.4.2. Исследование плоскового диода (193). 12.5. Влияние взрывоэмиссионной плазмы на нагрев мишени. 12.6. Тепловизионная диагностика МИП-диода с внешней магнитной изоляцией. 12.7. Исследование транспортировки ионного пучка 	183 184 186 190 191 194 195 197
 Глава 12. Тепловизионная диагностика МИП, формируемого дио- дом в двухимпульсном режиме 12.1. Методика измерения распределения плотности энергии ионного пучка. 12.2. Исследование охлаждения мишени 12.3. Исследование распределения плотности энергии МИП по сечению 12.4. Анализ влияния электронов на нагрев мишени 12.4.1. Исследование поского полоскового диода (192). 12.4.2. Исследование взрывоэмиссионной плазмы на нагрев мишени 12.5. Влияние взрывоэмиссионной плазмы на нагрев мишени 12.6. Тепловизионная диагностика МИП-диода с внешней магнитной изоляцией. 12.7. Исследование транспортировки ионного пучка 12.8. Фокусировка ионных пучков в спиральном диоде 	183 184 186 190 191 194 195 197 200
Глава 12. Тепловизионная диагностика МИП, формируемого дио- дом в двухимпульсном режиме 12.1. Методика измерения распределения плотности энергии ионного пучка. 12.2. Исследование охлаждения мишени 12.3. Исследование распределения плотности энергии МИП по сечению 12.4. Анализ влияния электронов на нагрев мишени 12.4. Анализ влияния электронов на нагрев мишени 12.5. Влияние взрывоэмиссионной плазмы на нагрев мишени 12.6. Тепловизионная диагностика МИП-диода с внешней магнитной изоляцией 12.7. Исследование транспортировки ионного пучка 12.8. Фокусировка ионных пучков в спиральном диоде 12.9. Фокусировка ионных пучков, формируемых полосковым фокусиру- ющим диодом	183 184 186 190 191 194 195 197 200 204
 Глава 12. Тепловизионная диагностика МИП, формируемого дио- дом в двухимпульсном режиме 12.1. Методика измерения распределения плотности энергии ионного пучка. 12.2. Исследование охлаждения мишени 12.3. Исследование распределения плотности энергии МИП по сечению 12.4. Анализ влияния электронов на нагрев мишени 12.4.1. Исследование поского полоскового диода (192). 12.4.2. Исследование взрывоэмиссионной плазмы на нагрев мишени 12.5. Влияние взрывоэмиссионной плазмы на нагрев мишени 12.6. Тепловизионная диагностика МИП-диода с внешней магнитной изоляцией. 12.7. Исследование транспортировки ионного пучка 12.8. Фокусировка ионных пучков, формируемых полосковым фокусиру- ющим диодом 12.10. Баланс энергии в диоде с магнитной самоизоляцией 	 183 184 186 190 191 194 195 197 200 204 206
 Глава 12. Тепловизионная диагностика МИП, формируемого диодом в двухимпульсном режиме 12.1. Методика измерения распределения плотности энергии ионного пучка. 12.2. Исследование охлаждения мишени. 12.3. Исследование распределения плотности энергии МИП по сечению 12.4. Анализ влияния электронов на нагрев мишени. 12.4. Анализ влияния электронов на нагрев мишени. 12.5. Влияние взрывоэмиссионной плазмы на нагрев мишени. 12.6. Тепловизионная диагностика МИП-диода с внешней магнитной изоляцией. 12.7. Исследование транспортировки ионного пучка 12.8. Фокусировка ионных пучков в спиральном диоде. 12.9. Фокусировка ионных пучков, формируемых полосковым фокусирующим диюдом. Глава 13. Замкнутый дрейф электронов в ионном диоде с магнитной самоизоляцией. 	 183 184 186 190 191 194 195 197 200 204 206 209

Оглавление

6

13.2. Анализ магнитного поля в анод-катодном зазоре	213
13.3. Исследование времени дрейфа электронов и ионов	216
13.4. Замкнутый дрейф электронов	219
13.5. Выводы	222
Заключение	225
Список литературы	229

Предисловие

Научная область, к которой относятся материалы, изложенные в книге, — генерация электронных и ионных пучков гигаваттной мощности. В монографии представлен аналитический обзор и результаты комплексных экспериментальных исследований генерации импульсных электронных и ионных пучков, формируемых диодом со взрывоэмиссионным катодом. Взрывная эмиссия обеспечивает эффективное формирование плотной плазмы на рабочей поверхности катода. В таких условиях процесс плазмообразования не ограничивает генерацию мощного электронного или ионного пучка.

За последние 30-40 лет в России и за рубежом опубликовано много статей и докладов на конференциях, посвященных генерации мощных пучков заряженных частии. Наиболее полно эти материалы обобщены в монографиях Г.А. Месяца «Импульсная энергетика и электроника», В.М. Быстрицкого и А.Н. Диденко «Мощные ионные пучки» и «Charged Particle Beams» S. Humphries. С момента выхода этих книг были выполнены обширные исследования по генерации наносекундных пучков ионов и электронов. Результаты опубликованы в отдельных работах, что затрудняет оценить закономерности явлений, протекающих при генерации мощных пучков заряженных частиц в диодах со взрывоэмиссионным катодом.

Несмотря на значительный прогресс в разработке источников таких пучков, многие процессы в диодах со взрывоэмиссионным катодом изучены недостаточно. В частности, нет сравнения экспериментальных значений плотности ионного и электронного тока с расчетными по соотношению Чайлда-Ленгмюра, экспериментальные данные скорости разлета графитовой взрывоэмиссионной плазмы отличаются более, чем в 10 раз - от 1,5 см/мкс до 19 см/мкс, нет анализа эффективности магнитной изоляции электронов в используемых ионных диодных системах, механизма подавления электронной компоненты полного тока и др. Кроме того, большинство исследований выполнено в условиях ограничения формирования взрывоэмиссионной плазмы из-за низкой скорости нарастания ускоряющего напряжения, не превышающей 10¹² В/с. При этом процесс генерации лимитируется плазмообразованием и в формировании электронного или ионного пучка принимает участие только часть диода. Это значительно затрудняет понимание основных физических процессов, определяющих работу диода.

Представленные в монографии экспериментальные исследования выполнены с использованием генератора наносекундных импульсов на основе двойной формирующей линии (ДФЛ). Такой генератор формирует импульс напряжения с крутизной переднего фронта $(1-2) \times 10^{13}$ В/с. Это обеспечивает быстрое формирование взрывоэмиссионной плазмы на всей рабочей поверхности катода. В таких условиях характеристики диода определяются только процессами в анод-катодном зазоре и не зависят от эмиссионной способности потенциального электрода. Это позволяет изучать фундаментальные процессы при генерации импульсного электронного и ионного пучка гигаваттной мощности по интегральным вольт-амперным характеристикам диода с высоким временным разрешением, менее 0,1-0,4 нс.

Эксперименты по генерации импульсных электронных пучков выполнены на ускорителе ТЭУ-500. Параметры ускорителя: кинетическая энергия электронов равна 450-500 кэВ; выведенный ток - 8-10 кА; длительность импульса — 60 нс; частота следования до 5 имп./с; энергия в импульсе до 200 Дж. Отличительной особенностью конструкции генератора ТЭУ-500 является использование повышающего трансформатора, включенного между двойной формирующей линией и диодом. Выполненные исследования показали, что в случае предварительного намагничивания сердечника согласующего трансформатора снижение амплитуды импульса напряжения, формируемого генератором наносекундных импульсов (ДФЛ и трансформатор), компенсирует уменьшение импеданса диода за счет разлета взрывоэмиссионной плазмы при генерации электронного пучка. Это позволяет улучшить согласование диода с генератором напряжения. На таком экспериментальном стенде выполнены исследования процессов плазмообразования и основных характеристик электронного пучка (распределение плотности энергии по сечению пучка, первеанс и импеданс диода и др.). Исследования были выполнены для наиболее простой конфигурации диода. Мы использовали плоский катод диаметром 45-60 мм. В качестве анода брали плоскую сплошную пластину или плоскую решетку из нержавеющей стали с прозрачностью 70%.

Результаты комплексных исследований генерации сильноточных электронных пучков в диоде со взрывоэмиссионным катодом были использованы для анализа процессов генерации мощных ионных пучков (МИП). В монографии даны результаты исследования процесса генерации и параметров импульсного ионного пучка гигаваттной мощности, формируемого диодом со взрывоэмиссионным катодом в режиме магнитной самоизоляции. Исследования проведены на ускорителе TEMI-4M в режиме формирования двух импульсов – первый (плазмообразующий) отрицательный (300-500 нс, 100-150 кВ) и второй (генерирующий) положительный (150 нс, 250-300 кВ). Плотность энергии ионного пучка 0,2-5 Дж/см² (для разных диодов), состав пучка – ионы углерода и протоны. Выполнены исследования полоскового

8

диода плоской и фокусирующей геометрии, кольцевого плоского диода. Показано, что на первом импульсе происходит эффективное плазмообразование на всей рабочей поверхности графитового катода. Получено аналитическое выражение, описывающее изменение электронного тока с момента формирования отдельных эмиссионных центров до образования сплошной плазменной поверхности на катоде. В дальнейшем электронный ток удовлетворительно описывается соотношением Чайлда-Ленгмюра при учете сокращения А-К-зазора плазмой, скорость расширения которой постоянна и равна 1,3±0,2 см/мкс. Выполнен анализ траекторий движения электронов в А-К-зазоре в условиях магнитной самоизоляции на первом импульсе.

Экспериментальные исследования и моделирование процесса генерации МИП показали, что при генерации ионного пучка (на втором импульсе) выполняется условие магнитной отсечки электронов по всей длине диода и магнитная индукция превышает критическую величину более, чем в 3 раза. Но из-за высокой скорости дрейфа электронов время нахождения электронов и протонов в анод-катодном зазоре отличается незначительно и меньше времени ускорения основной части МИП — ионов углерода С⁺. Это указывает на низкую эффективность магнитной самоизоляции в диодах выбранной конструкции. В то же время якспериментально обнаружено, что при генерации ионного потока происходит подавление электронной компоненты полного тока в 1,5-2 раза для кольцевого диода. Предложена новая модель ограничения эмиссии электронов, объясняющая снижение электронов.

Выполнены исследования плотности тока, состава и энергетического спектра мощного ионного пучка. Для измерения параметров МИП использована времяпролетная диагностика на основе цилиндра Фарадея с магнитной отсечкой. Используемое диагностическое оборудование позволяет определить состав пучка (тип ионов и кратность ионизации), абсолютные значения плотности тока ионов и энергетический спектр для каждого типа ионов с погрешностью не хуже ±10%. Выполнен расчет плотности тока ионов углерода (по соотношению Чайлда-Ленгмюра) с учетом расширения взрывоэмиссионной плазмы, кратность ионизации зарядовой компенсации электронно-ионных потоков в межэлектродном зазоре. Показано, что плотность тока ионов углерода, формируемого в плоском диоде с графитовым потенциальным электродом, в 5-7 раз превышает расчетные значения. Представлена феноменологическая модель усиления плотности ионного тока в диоде с магнитной самоизоляцией.

Разработана тепловизионная методика оперативного контроля распределения плотности энергии по сечению импульсного ионного пучка гигаваттной мощности. Она также позволяет измерять полную энергию МИП, оптимизировать работу ионного диода и контролировать режим облучения мишени. Пространственное разрешение составляет 0,9-1 мм, чувствительность типового тепловизора обеспечивает регистрацию теплового отпечатка за один импульс при плотности энергии выше 0,02 Дж/см². Для корректного использования тепловизионной методики при контроле параметров МИП выполнен анализ влияния высокоэнергетических электронов, взрывоэмиссионной плазмы и др. на нагрев мишени.

Для увеличения эффективности генерации ионного потока предложена спиральная геометрия диода. В новой конструкции ионного диода с магнитной самоизоляцией впервые удалось реализовать замкнутое движение электронов в А-К-зазоре без внешнего магнитного поля. Это привело к росту эффективности преобразования энергии, подводимой к диоду, в энергию ускоренных ионов углерода с 5–9% (в диодах с незамкнутым дрейфом) до 30–40%. Замкнутое движение электронов обеспечивает увеличение эффективности генерации ионов С⁺ в 40–50 раз по сравнению с предельной эффективностью для биполярного потока, ограниченного объемным зарядом. Это более чем в 4 раза выше, чем в других известных конструкциях диодов с магнитной самоизоляцией. Аналогично полосковым диодам со взрывоэмиссионным катодом, спиральный диод имеет ресурс работы более 10⁷ импульсов.

Предлагаемое издание является первым, в котором обобщены результаты экспериментальных исследований генерации импульсных электронных и ионных пучков гигаваттной мощности в диодах со взрывоэмиссионным катодом в условиях быстрого формирования плазмы на всей рабочей поверхности катода. Это позволило выявить наиболее важные физические процессы при генерации импульсных электронных и ионных пучков наносекундной длительности.

Монография рассчитана на специалистов в области сильноточной электроники, генерации импульсных пучков заряженных частиц. Она может быть использована в качестве учебного пособия для студентов и аспирантов физических специальностей, в курсах лекций «Физика и техника низкотемпературной плазмы, плазмохимия и плазменные техснологии», «Физика и техника мощных пучков заряженных частиц. Радиационно-пучковые технологии модифицирования материалов».

Глава 1

ГЕНЕРАЦИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ ГИГАВАТТНОЙ МОЩНОСТИ

Использование импульсного электронного пучка для инициирования плазмохимических процессов [1, 2], накачки газовых лазеров, генерации СВЧ-излучения [3] и в других областях требует разработки экономичного электронного ускорителя, обладающего большим ресурсом работы и высокой стабильностью рабочих параметров. Любые непроизводительные потери энергии ведут к нагреву, деструкции и преждевременному разрушению конструкционных узов ускорителя.

К ускорителям электронов, предназначенных для использования в установках и технологических линиях крупномасштабного промышленного производства, в отличие от исследовательских, предъявляют особые требования. Промышленный ускоритель должен иметь:

- достаточно большую мощность выведенного в атмосферу пучка электронов, чтобы обеспечить заданную производительность радиационно-химической установки, отвечающую уровню современного промышленного производства;
- высокую степень надежности всех узлов, чтобы обеспечить бесперебойную работу установки в соответствии с заданным графиком работы;
- компактные собственную конструкцию и радиационную биологическую защиту, позволяющие размещать установки в типовых производственных помещениях;
- высокий коэффициент преобразования электрической энергии в энергию электронного пучка;
- вспомогательное оборудование, обеспечивающее необходимую геометрию облучения объектов с заданной равномерностью распределения интенсивности электронного потока по облучаемой поверхности объектов при высоком коэффициенте использования электронного излучения и т. д.

Для достижения этих требований необходимы комплексные исследования основных физических процессов генерации сильноточных электронных пучков.

1.1. Генерация сильноточных электронных пучков в диодах со взрывоэмиссионным катодом

Импульсные пучки электронов с высокой плотностью тока (более 100 А/см²) формируют в основном ускорители со взрывоэмиссионным катодом. Они получили большое распространение благодаря простоте конструкции, применению электродов практически любой конфигурации, широкому диапазону получаемых плотностей тока. Одним из распространенных типов таких ускорителей являются ускорители с полупроводниковым прерывателем тока (ППТ).

В таблице 1 представлены параметры наносекундных ускорителей с полупроводниковым прерывателем тока [4].

Установка	<i>U</i> , кВ	W, Дж	$T_{\rm H}$, нс	F, Гц
Малахит	250	3	50	300 — постоянно, 3 000 — пачка
Технологический	350	7	25	100 — постоянно
Контроль	30-120	0,2	15-20	100 — постоянно, 10 000 — пачка
УРТ-0,2	200	1,75	35	250
УРТ-0,5	500	6,25	50	200
УРТ-1	900	25	60	50
Без названия	400	7	40	200

Таблица 1. Параметры разработанных в ИЭФ УрО РАН ускорителей электронов с полупроводниковым прерывателем тока [4]

U — максимальное ускоряющее напряжение; W — энергия пучка в импульсе; $T_{\rm H}$ — длительность импульса на полувысоте, F — частота следования импульсов.

Компактный сильноточный наносекундный ускоритель с ППТ был разработан в Институте электрофизики УрО РАН для экспериментов по удалению токсичных органических примесей из воздуха. Основные параметры ускорителя: энергия электронов — до 400 кэВ; ток пучка от 0,25 до 1,1 кА; длительность импульса 30-40 нс; частота повторения импульсов — длительный режим до 200 Гц, 30-секундный режим до 1 кГц; размеры пучка 80×850 мм². Плотность тока до 16 А/см².

Электронные пучки, формируемые ускорителями с системой питания с ППТ, имеют и недостатки. Самый серьезный из них — их немоноэнергетичность. Вызвано это тем, что эти ускорители являются ускорителями прямого действия и энергия ускоряемых электронов зависит от приложенного к анод-катодному (A-K) промежутку напряжения. В спектр формируемого пучка включаются электроны, формирующиеся на фронте и спаде импульса напряжения. Наличие этих низкоэнергетических электронов приводит, как правило, к негативным последствиям. В силу меньшей проникающей способности они сильнее поглощаются в выходной фольге ускорителя и поверхностных слоях облучаемого объекта, вызывая увеличение термической нагрузки на фольгу и изменяя распределение поглощенной дозы в материале мишени по глубине. Кроме того, в данных ускорителях в основном используются катоды, обеспечивающие плотность тока не более 40 А/см². Параметры других импульсных электронных ускорителей приведены в табл. 2 [5].

Ускоритель	Энергия электронов, кэВ	Ток пучка, кА	Длительность импульса, нс	Частота повторения, Гц	Ссылка
Sinus-200	350 200*	3,5 2*	3	0,1 1000*	[6]
Sinus-700	1000 800*	10 8*	30	0,1 200*	[6]
Sinus-7	2000 1500*	20 15*	40	0,1 100*	[6]
Синус-5	700	6	50	100	[7]
Синус-6	400	8	25	100	[7]
б/н	700	5	10	100	[8]
Рита-150	150	0,5	10	15	[7]
РАДАН-220	200	-	3	10 50*	[9]
РАДАН-303	300	6	4-5	10 100*	[9]
RHEPP II	2 000	25	60	120	

Таблица 2. Параметры импульсно-периодических ускорителей

*Значения для кратковременного режима работы.

Исследования диода со взрывоэмиссионным катодом при генерации импульсных электронных пучков с плотностью тока выше 20 А/см² проводятся начиная с 1970-х годов. Установлено, что электронный ток ограничивается эмиссионной способностью катода или объемным зарядом в анод-катодном зазоре [3, 10]. При микровзрывах на катоде образуется плотная плазма. Она содержит одно-, двух-, трех- и более зарядные ноны, имеет температуру 6–7 эВ и неоднородное распределение в пространстве. Непосредственно в прикатодной области концентрация частиц в ней составляет 10^{14} см⁻³ и более, а затем спадает обратно пропорционально квадрату расстояния [11, 12]. В результате электронной бомбардировки на аноде формируется плазма, концентрация которой зависит от флюенса электронного потока и длительности импульса.

С момента приложения напряжения к диоду до формирования сплошной плазменной поверхности на катоде электронный ток ограничивается эмиссионной способностью катода [13]. В дальнейшем электронный ток диода ограничивается только объемным зарядом электронов в А-К-зазоре. Очевидно, что режим ограничения тока объемным зарядом более предпочтителен для стабильной работы диода. В этом режиме ток определяется только геометрией диода и ускоряющим напряжением. В этом режиме распределение электронного тока по сечению пучка будет более однородным.

В режиме ограничения объемным зарядом, в нерелятивистском приближении плотность электронного тока определяется соотношением Чайлда-Ленгмюра [14]:

$$J_{\rm e} = \frac{4\alpha\varepsilon_0\sqrt{2e}}{9\sqrt{m}} \cdot \frac{U^{3/2}}{d_0^2} = 2,33 \cdot 10^{-6} \frac{\alpha U^{3/2}}{d_0^2},$$

где d_0 — анод-катодный зазор, ε_0 — электрическая постоянная, m, e — масса и заряд электрона, α — коэффициент усиления плотности тока.

В наших экспериментальных условиях основная часть объемного заряда электронов, эмиттированных с поверхности катода, сконцентрирована в области толщиной менее 0,1–0,3 мм. При ускоряющем напряжении 400 кВ энергия электрона в области пространственного заряда не превышает 15 кэВ. Поэтому при расчете электронного тока в режиме ограничения объемным зарядом влияние релятивизма электронов можно не учитывать.

Если в анод-катодном зазоре присутствует встречный поток ионов с анода (биполярный поток), то объемный заряд электронов частично компенсируется и коэффициент усиления плотности тока может достигать значения $\alpha = 1,86$. Для диода со взрывоэмиссионным катодом необходимо учитывать сокращение A-K-зазора при расширении плазменной поверхности [10]:

$$J_{\rm e}(t) = 2,33 \cdot 10^{-6} \frac{\alpha U^{3/2}}{(d_0 - vt)^2},$$
 (1.1)

где v — скорость расширения плазмы.

Тогда первеанс диода с плоским взрывоэмиссионным катодом, радиусом r, в режиме ограничения объемным зарядом равен

$$P(t) = \frac{J_e \cdot S}{U^{3/2}} = \frac{2,33 \cdot 10^{-6} \alpha \pi r^2}{(d - vt)^2}.$$
 (1.2)

Данное соотношение получено при одномерном решении уравнения Пуассона без учета влияния краевых эффектов. Имеющиеся в литературе экспериментальные данные о вкладе периферии катода в полный электронный ток диода со взрывоэмиссионным катодом противоречивы. В работе [15] показано, что вольт-амперная характеристика для системы с плоскими электродами и одиночным катодным факелом, сформированном на месте искусственно созданного микровыступа (U = 20-40 kB, d = 0,3-1 мм), в начальный период удовлетворительно описывается соотношением

$$I = 44.6 \cdot 10^{-6} U^{3/2} \left(\frac{v \cdot t}{d}\right)^2 = 6 \cdot 2.23 \cdot 10^{-6} U^{3/2} \frac{S}{d^2}.$$
 (1.3)

Это соотношение получается из уравнения (1.1) при условии, что площадь катода равна $\pi(vt)^2$, а ток диода в 6 раз превышает расчитанное по соотношению Чайлда–Ленгмюра значение.

Первые систематические исследования первеанса планарного диода с плоским графитовым катодом выполнены в 1974 году [16]. Было получено, что полный первеанс диода равен сумме первеанса плоской части катода и первеанса периферийной области. Первеанс плоской части катода описывался соотношением (1.2) при $\alpha = 1$, без учета влияния анодной плазмы. Для данных, приведенных в статье [16] (fig. 4), расчет первеанса планарного диода выполнен с учетом увеличения площади графитового катода и сокращения А-К-зазора из-за разлета взрывоэмиссионной плазмы. Результаты моделирования показаны на рис. 1, скорость плазмы равна 1,6 см/мкс. Момент времени, соответствующий началу разлета плазмы, выберем как время начала роста тока (t = 23 нс).



Рис. 1. Изменение экспериментального (1) и расчетного (2) первеанса

Электронный ток с периферийной области катода составлял 30-40% полного тока электронов. Но приведенные авторами данные показывают, что плотность электронного тока однородна по сечению, увеличение плотности тока на краях диода не превышает 3-5%. При увеличении А-К-зазора с 3.7 мм до 6 мм скорость взрывоэмиссионной плазмы уменьшалась с 2,8 до 2,5 см/мкс. Кроме того, отмечено, что при зазоре меньше 3,5 мм анодная плазма вызывала увеличение первеанса диода толко через 60-70 нс после начала генерации электронного пучка. Исследования выполнены при изменении импеданса планарного диода от 11 Ом и выше для генератора наносекундных импульсов с выходным сопротивлением 4,7 Ом, т.е. в режиме рассогласования генератора и нагрузки.

В 1975 г. были выполнены исследования импеданса плоского диода импульсного электронного ускорителя [17]. Амплитуда напряжения, прикладываемого к диоду, составляла 788 кВ, ток пучка 17 кА, расстояние между электродами диода 11,5 см. Получено, что в течение начальных 400 нс экспериментальные данные имеют большой разброс и не позволяют оценить динамику скорости плазмы. При последующих 2 мкс ток диода подчинялся соотношению, которое учитывает уменьшение эффективного A-К-зазора с постоянной скоростью 2–4 см/мкс, что соответствует соотношению (1.1) без влияния периферии катода.

Результаты математического моделирования и экспериментального исследования работы планарного диода со взрывоэмиссионным катодом при формировании дискретной эмиссионной поверхности представлены в работах [18, 19]. При анализе процессов получено удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных (с постоянной скоростью расширения графитовой плазмы, равной 2 см/мкс) значений средней плотности тока при 100 нс. Расчет выполнен без учета краевых эффектов.

В работе [20] представлены результаты исследования первеанса планарного электронного диода с плоским графитовым катодом диаметром 6,7 см. Исследования выполнены на ускорителе KALI-5000 (генератор Маркса и двойная формирующая линия, 280 кВ, 18 кА, длительность импульса 100 нс). Также, как и в работе [16], полный первеанс диода описывался суммой первеанса плоской части диода и первеанса периферийной части. Для данных, представленных нам автором, расчет первеанса планарного диода выполнен с учетом увеличения площади графитового катода и сокращения А-К-зазора из-за разлета взрывоэмиссионной плазмы. Результаты моделирования показаны на рис. 2.

Расчет первеанса выполнен по соотношению (1.2) для биполярного потока (а = 1,86) при суммарной скорости расширения анодной и катодной плазмы (скорости перемыкания А-К-зазора), равной 15 см/мкс. Получено, что с увеличением А-К-зазора скорость взрывоэмиссионной плазмы увеличивается. Электронный ток с периферийной части превышает 30-40% полного тока, хотя авторы отмечают высокую однородность плотности тока по сечению и отсутствие усиления плотности тока по периферии диода. В работе [20] расчет первеанса диода выполнен не по величине электронного тока, а по показаниям пояса Роговского, регистрирующего полный ток диодного узла. Кроме того, авторы отмечают присутствие биполярного предимпульса амплитудой ±90 кВ, который может вызвать формирование плазмы и обеспечить значительное сокращение А-К-зазора до прихода основного



Рис. 2. Изменение экспериментального (1) и расчетного (2) первеанса. Кривая 3 — отношение первеанса периферийной части к экспериментальным значениям

импульса напряжения. Поэтому рассчитывать скорость расширения плазмы по соотношению Чайлда-Ленгмюра некорректно.

В работе [21] авторы представили результаты дальнейших исследований процесса генерации электронного тока в диоде со взрывоэмиссионным катодом. Параметры сильноточного электронного пучка (СЭП): ускоряющее напряжение 180 кВ, ток 26 кА, длительность импульса 100 нс. Для устранения паразитного влияния предмипульса в диодный узел был введен дополнительный разрядник, разделяющий катод и генератор наносекундных импульсов. Полный первеанс диода рассчитывали как сумму первеанса плоской части катода и первеанса периферийной области. Авторы отмечают, что удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных значений первеанса наблюдается только в конце импульса.

Результаты исследования первеанса планарного диода с многоострийным взрывоэмиссионным катодом представлены в работе [22]. Диаметр графитовых игл равен 1,5 мм, длина — 5 мм, расстояние между иглами — 9 мм, общий диаметр катода — 70 мм. Использован высоковольтный генератор наносекундных импульсов (500 кВ, 50 Ом, 400 нс) с индуктивным накопителем. При изменении A-K-зазора от 17 до 24 мм первеанс диода при начальных 200 нс удовлетворительно описывался соотношением (1.2) для униполярного потока носителей заряда в A-K-зазоре (v = 1 см/мкс, α = 1). Авторы отмечают, что вклад периферии планарного диода в полный электронный ток проявляется только через 200 нс после начала импульса напряжения и не превышает 5–10%. Влияние анодной плазмы на увеличение полного тока диода проявляется только через 250 нс от фронта импульса. Исследования выполнены при изменении импеданса диода в начальные 300 нс от 50 до 60 Ом, т. е. в режиме согласования генератора наносекундных импульсов и диода.

В работе [23] представлены результаты исследования первеанса планарного диода со взрывоэмиссионным катодом. Исследования выполнены на ускорителе КАLI-1000, амплитуда импульса напряжения 300 кВ, длительность импульса 100 нс. Ускоритель КALI-1000 состоит из трансформатора Тесла и передающей линии. Электронный диод состоит из планарного графитового катода диаметром 70 мм и медного сетчатого анода диаметром 24 см. Размеры А-К-зазора изменяли в пределах 3–12 мм. Экспериментально получено, что первеанс диода не превышает 40–50 % первеанса, рассчитанного по соотношению (1.2) при $\alpha = 1,86$ и суммарной скорости расширения анодной и катодной плазмы, равной 3–6 см/мкс.

Краевые эффекты наиболее полно должны проявляться в цилиндрическом диоде («труба в трубе»). В работе [24] представлены результаты исследования первеанса цилиндрического диода с графитовым взрывоэмиссионным катодом диаметром 11 см и шириной 2 см. Исследования цилиндрического диода выполнены на ускорителе KALI-5000 в двухимпульсном режиме при генерации первого положительного импульса (142 кВ, 7,3 кА) и последующего отрицательного импульса (143 кВ, 11.2 кА). Авторы отмечают хорошее совпадение экспериментальных и расчетных значений первеанса при генерации электронного пучка на втором импульсе. Расчет выполнен по соотношению Ленгмюра-Блоджетт для плотности электронного тока между бесконечно длинными цилиндрами при ограничении тока объемным зарядом. Вклад краевых эффектов в генерацию электронного пучка незначителен. Отношение длины окружности катода к его площади в цилиндрическом диоде составляет 3,1 см⁻¹. Для плоского диода диаметром 6,6 см, исследования первеанса которого приведены в работе [23], отношение длины окружности к площади меньше в 5 раз. Поэтому вклад краевых эффектов должен быть значительно больше. Но это не подтверждается экспериментально [25].

При разработке сильноточных импульсных ускорителей электронов с полным током пучка более 10 кА существенной проблемой является согласование импеданса диода с низкоомным волновым сопротивлением одиночной или двойной формирующей линии ускорителя [26]. Для этих целей применяют передающие трансформирующие линии [27, 28]. В работе [29] исследована схема с использованием индукторной секции, установленной между двойной формирующей линией (ДФЛ] и электронным диодом. Секция включалась по схеме повышающего согласующего автотрансформатора с коэффициентами трансформации 2. Авторы отмечают высокий предимпульс на диоде при зарядке ДФЛ, что не позволяло обеспечить вывод пучка через тонкие разделительные фольги в атмосферу. За время паузы между предимпульсом и основным импульсом напряжения (300–500 нс) взрывоэмиссионная плазма заполняет А-К промежуток и при формировании основного импульса напряжения на диоде приводит к контрагированию электронного пучка в анод-катодном промежутке и дуговой стадии разряда формирующей линии. При этом происходит сильная эрозия материала тонкой анодной фольги, что приводит к ее разрушению и выходу из строя электронного ускорителя. Кроме того, наличие предимпульса снижает эффективность передачи энергии формирующей линии в энергию электронного пучка при генерацию основного импульса напряжения.

Несмотря на значительный прогресс в разработке источников импульсных электронных пучков гигаваттной мошности, многие процессы в диодах со взрывоэмиссионным катодом изучены недостаточно. В частности, нет сравнения экспериментальных значений плотности электронного тока с расчетными по соотношению Чайлда-Ленгмюра. экспериментальные данные скорости разлета графитовой взрывоэмиссионной плазмы отличаются более, чем в 10 раз - от 1,5 см/мкс до 19 см/мкс, нет анализа эффективности преобразования подводимой к диоду энергии в кинетическую энергию электронов и др. Кроме того. большинство исследований выполнено в условиях ограничения формирования взрывоэмиссионной плазмы из-за низкой скорости нарастания ускоряющего напряжения, не превышающей 1012 B/c. При этом процесс генерации лимитируется плазмообразованием и в формировании электронного или ионного пучка принимает участие только часть диода. Это не позволяет выявить основные физические процессы, определяющие работу диода.

1.2. Сильноточный импульсный ускоритель электронов с согласующим трансформатором

При разработке сильноточных импульсных ускорителей электронов с энергией в импульсе более 10 Дж и полным током пучка более 10 кА существенной проблемой является согласование импеданса диода с низкоомным волновым сопротивлением одиночной или двойной формирующей линии ускорителя. Волновое сопротивление цилиндрической формирующей линии равно

$$\rho = \frac{138}{\sqrt{\varepsilon}} \log \frac{D}{d} = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon}} \ln \frac{D}{d},$$

где D и d-диаметры внешнего и внутреннего электродов формирующей линии.

При генерации импульса ускоряющего напряжения амплитудой более 200-400 кВ диаметры электродов формирующей линии должны отличаться на 8–10 см и быть более 25–30 см для предотвращения электрического пробоя. Волновое сопротивление при этом не превышает 2–3 Ом. Согласованное сопротивление нагрузки для двойной формирующей линии равно сумме волновых сопротивлений одиночных формирующих линий.

Импеданс диода при условии, что он работает в режиме ограничения тока объемным зарядом и размер А-К промежутка уменьшается за счет разлета взрывоэмиссионной плазмы, равен (см. соотношение (1.1))

$$R(t) = \frac{U(t)}{I_{\rm e}(t)} = \frac{(d_0 - vt)^2}{2,33 \cdot 10^{-6} \pi r^2 \sqrt{U(t)}}.$$
 (1.4)

Для планарного диода радиусом r для генерации электронного пучка площадью более 15 см² импеданс 3-4 Ом будет при A-К-зазоре менее 3 мм. При скорости расширения взрывоэмиссионной плазмы 2-3 см/мкс и длительности импульса 100 нс произойдет перемыкание A-К-зазора плазмой уже в течение импульса. Это приведет к дуговой стадли разряда формирующей линии и разрушению диода. Поэтому для эффективной передачи энергии из ДФЛ в диод необходимо использовать согласующее устройство [30].

Для исследования процессов конверсии газофазных химических соединений, инициируемых импульсным сильноточным пучком, нами был разработан сильноточный импульсный ускоритель электронов ТЭУ-500 [31, 32]. Отличительной особенностью конструкции данного импульсного электронного ускорителя является согласующий автотрансформатор. Он обеспечивает согласование низкоомной водяной двойной формирующей линии с высокоомным импедансом планарного диода [33]. При повышении напряжения в 2 раза и отсутствии потерь энергии величина тока на выходе автотрансформатора уменьшится в 2 раза. Тогда выходное сопротивление генератора наносекундных импульсов (ДФЛ + автотрансформатор) возрастет в 4 раза. Схема ускорителя ТЭУ-500 приведена на рис. 3.

Газонаполненный генератор импульсного напряжения (ГИН) 1, собранный по схеме Аркадьева-Маркса, содержит семь ступеней конденсаторов К75-74 (40 кВ, 47 нФ) по два в каждой ступени. Собственная индуктивность ГИН ~ 1,5 мКН. ДФЛ 2 с деионизированной водой в качестве диэлектрика имеет емкость плеч $C_1 = C_2 = 6,5$ нФ. Суммарная емкость двойной формирующей линии равна выходной емкости ГИН. ДФЛ коммутируется газовым разрядником 3 (зазор 11 мм, давление до 8 атм. технического азота).

Согласующий автотрансформатор помещен в масляном объеме 4 и содержит четыре сердечника 5 ($360 \times 150 \times 25$ мм³ из пермаллоевой ленты 50HП × 0,01). Вокруг сердечников уложено 12 одиночных витков 6, которые равномерно (по азимуту) распаяны к электроду ДФЛ. Сердечники и витки крепятся с помощью диэлектрической



Рис. 3. Принципиальная схема ускорителя ТЭУ-500: 1 — газонаполненный генератор импульсного напряжения; 2 — ДФЛ; 3 — газовый разрядник; 4 масляный объем; 5 — четыре сердечника согласующего автотрансформатора; 6 — согласующий трансформатор; 7 — катододержатель; 8 — корпус ускорителя; 9 — катод; 10 — анод; 11 — конденсатор; 12 — тиристор; 13 индуктивность намагничивания; 14 — развязывающая индуктивность; 15 шунтирующее сопротивление; 16 — защитный диод; 17 — дроссель насыщения; 18 — управляющий вывод тиристора

втулки и боковых пластин, расположенных на катододержателе 7. К анод-катодному промежутку диода (9 — катод, 10 — анод) дополнительно к виткам 6 автотрансформатора подключен виток, образованный катододержателем 7 и корпусом ускорителя 8. Таким образом, диод (A-K промежуток) оказывается включенным по автотрансформаторной схеме с повышением напряжения в 2 раза относительно выходного напряжения ДФЛ.

Для насыщения ферромагнитного сердечника трансформатора до стадии формирования основного импульса напряжения введен узел принудительного намагничивания. Он состоит из конденсатора 11, тиристора 12, индуктивности намагничивания 13, развязывающей индуктивности 14, шунтирующего сопротивления 15, защитного диода 16 и дросселя насыщения 17.

Система питания ускорителя работает следующим образом: начальное магнитное состояние сердечника автотрансформатора задается током, протекающим по цепи индуктивностей 13 и 14, катододержателя 7 и витков 6 при разряде конденсатора 11. Конденсатор 11 предварительно заряжается от внешнего источника до напряжения, обеспечивающего протекание тока намагничивания 150-200 А. После зарядки конденсатора на управляющий вывод 18 тиристора 12 узла намагничивания подается импульс запуска с блока управления ускорителем. Тиристор открывается, и начинается процесс разрядки конденсатора. В момент перехода тока из цепи тиристора 12 в цепь диода 16 (см. рис. 3) дроссель насыщения 17 формирует импульс на запуск генератора импульсного напряжения, после срабатывания которого начинается формирование основного импульса напряжения.

На рисунке 4 показан внешний вид ускорителя.



Рис. 4. Внешний вид ускорителя ТЭУ-500

Габлица З. Параметры ускор	ителя
нергия электронов	450-500 кэВ
Зыведенный ток электронов	до 12 кА

Энергия электронов	450-500 кэВ
Выведенный ток электронов	до 12 кА
Длительность импульса (на полувысоте)	60 нс
Частота следования импульсов	до 5 имп./с
Энергия в импульсе	до 200 Дж

На рисунке 5 показаны диодный узел ускорителя и расположение диагностического оборудования. Для измерения тока, протекающего в нагрузке генератора наносекундных импульсов, использовали пояс Роговского с обратным витком. Для измерения напряжения использовали емкостной делитель, расположенный в маслонаполненной камере, и дифференциальный делитель напряжения, расположенный в вакуумном объеме [34]. Полный ток электронного пучка измеряли цилиндром Фарадея, который откачивали вместе с диодной камерой до давления 0,05-0,1 Па [35].