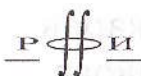


УДК 535.11; 537.533.3;  
537.534.3  
ББК 22.338; 22.333  
Г 34



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 взрыво-  
эмиссионным 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 силовоточной 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. Соколов*

Рецензент:

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



ISBN 978-5-9221-1411-0

© ФИЗМАТЛИТ, 2013  
© Коллектив авторов, 2013

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	7
<b>Глава 1. Генерация импульсных электронных пучков гигаваттной мощности . . . . .</b>	<b>11</b>
1.1. Генерация силовоточных электронных пучков в диодах со взрывоэмиссионным катодом . . . . .	12
1.2. Силовоточный импульсный ускоритель электронов с согласующим трансформатором . . . . .	19
1.3. Согласование двойной формирующей линии с диодом . . . . .	24
<b>Глава 2. Исследование планарного диода со взрывоэмиссионным катодом . . . . .</b>	<b>28</b>
2.1. Расчет первеанса планарного диода . . . . .	28
2.2. Исследование диода с графитовым катодом . . . . .	30
2.3. Исследование диода с многоигльчатый катодом . . . . .	35
2.4. Исследование диода с катодом из углеродной ткани . . . . .	39
2.5. Исследование диода с многообстрельным медным катодом . . . . .	41
2.6. Влияние времени плазмообразования на эффективность работы планарного диода . . . . .	43
<b>Глава 3. Исследование баланса заряда и энергии в диодном узле . . . . .</b>	<b>47</b>
3.1. Исследование потерь заряда при генерации силовоточного электронного пучка . . . . .	48
3.2. Исследование полных потерь заряда . . . . .	50
3.3. Баланс энергии в диодном узле ускорителя . . . . .	53
<b>Глава 4. Исследование планарного диода в режиме ограничения эмиссии . . . . .</b>	<b>58</b>
4.1. Измерение суммарной площади 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 дозиметрической пленки	77
6.1.1. Расчет плотности энергии электронного пучка (80).	
6.1.2. Пространственное распределение плотности энергии электронного пучка (81).	
6.2. Акустическая диагностика импульсного электронного пучка	83
6.2.1. Диагностика геометрических размеров пучка (84). 6.2.2. Измерение полной энергии пучка (86).	
6.3. Тепловизионная диагностика сильнооточного электронного пучка	87
6.3.1. Измерение распределения плотности энергии по сечению (88). 6.3.2. Контроль энергетического спектра электронов (91). 6.3.3. Пространственное распределение электронов с энергией в выбранном диапазоне (94).	
Глава 7. Влияние анодной плазмы на ВАХ диода со взрывоэмиссионным катодом	98
7.1. Исследование диода с катодом из углеродной ткани	99
7.2. Исследование диода с многоигльчатый 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 магнитной 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 ионного пучка времяпролетным методом высокого разрешения	167
11.1. Цилиндр Фарадея с магнитной отсечкой электронов	167
11.2. Цилиндр Фарадея с электрическим смещением	171
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 диодом в двухимпульсном режиме	183
12.1. Методика измерения распределения плотности энергии ионного пучка	184
12.2. Исследование охлаждения мишени	186
12.3. Исследование распределения плотности энергии МИП по сечению	190
12.4. Анализ влияния электронов на нагрев мишени	191
12.4.1. Исследование плоского полоскового диода (192). 12.4.2. Исследование полоскового фокусирующего диода (193).	
12.5. Влияние взрывоэмиссионной плазмы на нагрев мишени	194
12.6. Тепловизионная диагностика МИП-диода с внешней магнитной изоляцией	195
12.7. Исследование транспортировки ионного пучка	197
12.8. Фокусировка ионных пучков в спиральном диоде	200
12.9. Фокусировка ионных пучков, формируемых полосковым фокусирующим диодом	204
12.10. Баланс энергии в диоде с магнитной самоизоляцией	206
Глава 13. Замкнутый дрейф электронов в ионном диоде с магнитной самоизоляцией	209
13.1. Экспериментальный стенд	210

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 частиц. 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  $10^{12}$  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.