

ГЕНЕРАЦИЯ УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ И РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В РАЗРЯДАХ ПОВЫШЕННОГО ДАВЛЕНИЯ

Под редакцией В.Ф. Тарасенко

Scientific & Technical Translation



ИЗДАТЕЛЬСТВО

Томск 2015

Г 34 Генерация убегающих электронов и рентгеновского излучения в разрядах повышенного давления / под ред. В.Ф. Тарасенко. – Томск : STT, 2015. – 568 с.

ISBN 978-5-93629-544-7

Генерация убегающих электронов и рентгеновского излучения при импульсных разрядах повышенного, высокого и сверхвысокого давления является фундаментальным физическим явлением, которое влияет на характеристики пробоя различных газов. Цель данной коллективной монографии суммировать основные результаты, полученные при изучении генерации пучков убегающих электронов и рентгеновского излучения в неоднородном электрическом поле. Кроме того, в монографию включены материалы по использованию пучков убегающих электронов как в виде отдельных глав, так и специальных разделов в главах.

В написании монографии участвовали представители научных групп из различных институтов Российской Федерации, которые внесли значительный вклад в развитие данного направления. Часть глав написана совместно представителями разных организаций и научных групп. Исследования показывают, что генерация убегающих электронов и рентгеновского излучения приводит к пробоям промежутков в неоднородном электрическом поле за счет формирования волн ионизации, а также к формированию диффузных разрядов при повышенных давлениях воздуха, азота и других газов. Применение газовых диодов с наносекундными генераторами дает возможность сравнительно просто получать пучки высокоэнергетических электронов с субнаносекундной и пикосекундной длительностью импульса.

Монография состоит из 24 глав, которые отражают современное состояние проблемы генерации пучков убегающих электронов и рентгеновского излучения. Совокупность представленных в монографии данных позволит специалистам по газовым разрядам, а также аспирантам, магистрам и студентам глубже понять природу процессов, происходящих при наносекундном и субнаносекундном пробое в неоднородном электрическом поле газов повышенного, высокого и сверхвысокого давления.

УДК 537.527.9; 537.533; 537.53

Издание коллективной монографии выполнено за счет гранта
Российского научного фонда (проект № 14-29-00052).

ISBN 978-5-93629-544-7

- © А.Л. Александров, Н.А. Ашурбеков, Е.Х. Бакиш, Е.В. Балзовский, С.А. Баренгольд, Д.В. Белопловтов, А.М. Бойченко, П.А. Бохан, С.Н. Буранов, А.Г. Бураченко, В.В. Горохов, М.В. Ерофеев, Д.Э. Закревский, С.Н. Иванов, К.О. Иминов, В.И. Карелин, В.Ю. Кожевников, А.В. Козырев, И.Д. Костыря, Е.И. Липатов, В.В. Лисенков, М.И. Ломаев, С.В. Митько, А.С. Насибов, В.И. Орешкин, Е.В. Орешкин, В.М. Орловский, В.Н. Очкин, П.Б. Репин, Д.В. Рыбка, В.В. Рыжов, Н.С. Семенюк (Олейник), В.И. Соломонов, Д.А. Сорокин, В.Ф. Тарасенко, А.Н. Ткачев, А.А. Тренькин, И.В. Швейгертер, В.А. Шкляев, С.И. Яковленко, 2015
- © ФГБУН "Институт сильноточной электроники СО РАН" (ИСЭ СО РАН), 2015
- © Оформление STT™, 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений	16
Предисловие	17
ГЛАВА 1. Сверхкороткий лавинный электронный пучок и рентгеновское излучение при импульсных разрядах в неоднородном электрическом поле	23
1.1. Введение	24
1.2. Экспериментальная аппаратура, методики и их анализ	26
1.3. Пространственные формы разряда при формировании с.л.э.п.	31
1.4. О длительности импульса с.л.э.п.	33
1.5. Об амплитуде тока сверхкороткого лавинного электронного пучка	36
1.6. О синхронизации импульса с.л.э.п. с импульсом напряжения и тока через промежуток	39
1.7. О распределении электронов по энергиям	41
1.8. О рентгеновском излучении из газового диода	43
1.9. О наибольших амплитудах тока с.л.э.п. при атмосферном давлении воздуха	45
1.10. О механизме генерации убегающих электронов в газах повышенного давления	47
1.11. Выводы	49
Литература к главе 1	50
ГЛАВА 2. Нелокальный критерий убегания электронов	55
2.1. Введение	56
2.2. Физика явления убегания электронов в газах	58
2.2.1. Размножение и убегание электронов в сильном поле	58
2.2.2. Нелокальный критерий убегания электронов	63
2.2.3. Критерии зажигания самостоятельного разряда	72
2.3. Заключение	74
Литература к главе 2	75

ГЛАВА 3.	Генерация убегающих электронов в однородном самостоятельном газовом разряде при давлении до 1 атм и устройства на его основе	79
3.1.	Генерация электронных пучков в открытом разряде	80
3.2.	Разрядные ячейки для реализации “открытого” разряда	88
3.3.	Генерация электронных пучков в “открытом” разряде со встречными электронными пучками в планарной геометрии	90
3.4.	Механизм развития тока электронного пучка	92
3.5.	Исследование коммутационных свойств устройств на основе открытого разряда	95
3.6.	Моделирование пробоя в высоковольтном открытом разряде с субнаносекундным фронтом нарастания тока в гелии	100
3.7.	Кинетическая модель пробоя	102
3.8.	Результаты моделирования	105
3.9.	Заключение	111
	Литература к главе 3	112
ГЛАВА 4.	Генерация высокоэнергетичных электронов и рентгеновского излучения в разрядах, развивающихся в режиме микроструктурирования токовых каналов	115
4.1.	Введение	116
4.2.	Экспериментальные исследования	117
4.2.1.	Экспериментальная аппаратура	117
4.2.2.	Электрические характеристики, пучки высокоэнергетичных электронов и рентгеновское излучение	118
4.2.3.	Микроструктура токовых каналов	120
4.3.	Физическая модель генерации высокоэнергетичных электронов	122
4.3.1.	Формирование микроструктуры	122
4.3.2.	Компактные группы микроканалов	127
4.3.3.	Ввод энергии и разогрев газа в микроканалах	131
4.3.4.	Тепловое расширение микроканалов и снижение плотности нейтралов	132
4.3.5.	Убегание электронов в микроканалах с пониженной плотностью газа	133
4.4.	Заключение	135
	Литература к главе 4	135
ГЛАВА 5.	Генерация субнаносекундных импульсов убегающих электронов в гелии, азоте и SF ₆ при напряжении на промежутке ~25 кВ	137
5.1.	Введение	138
5.2.	Экспериментальная установка и методики измерений	139

5.3.	Амплитудно-временные характеристики разряда и пучка	141
5.4.	О влиянии предыонизации промежутка и магнитного поля на параметры с.л.э.п.	146
5.5.	Основные закономерности генерации пучков электронов при малых напряжениях на промежутке	148
5.6.	Заключение	150
	Литература к главе 5	150
ГЛАВА 6.	Рентгеновское излучение и сверхкороткий лавинный электронный пучок в импульсно-периодическом режиме	153
6.1.	Введение	154
6.2.	Экспериментальные установки и методики	155
6.3.	Рентгеновское излучение и пучок электронов в импульсно-периодическом режиме при напряжении генератора ~200 кВ	159
6.4.	Нагрев азота при импульсно-периодическом режиме	163
6.4.1.	Формирование ОРИПЭЛ в импульсно-периодическом режиме	163
6.4.2.	Влияние нагрева азота при импульсно-периодическом режиме на характеристики с.л.э.п.	164
6.4.3.	Влияние фронта импульса напряжения на характеристики с.л.э.п. и рентгеновского излучения	166
6.4.4.	Определение температуры азота в разрядном промежутке	167
6.4.5.	Анализ режимов генерации с.л.э.п. и рентгеновского излучения в импульсно-периодическом режиме	168
6.5.	Генерация пучка электронов при отраженных импульсах напряжений на промежутке	170
6.5.1.	Формы разряда в гелии и воздухе	170
6.5.2.	Рентгеновское излучение и с.л.э.п. в гелии и воздухе	171
6.5.3.	Анализ результатов, полученных на третьей установке	174
6.6.	Заключение	175
	Литература к главе 6	175
ГЛАВА 7.	Убегающие электроны в субнаносекундных разрядах в азоте высокого и сверхвысокого давления	179
7.1.	Введение	180
7.2.	Экспериментальная установка для регистрации убегающих электронов в газах высокого и сверхвысокого давления	182
7.3.	Результаты экспериментов и их обсуждение	184

7.4.	Проверка применимости классического критерия перехода электронов в режим убегания в газах высокого и сверхвысокого давления	188
7.5.	Исследование коммутационных характеристик азота в субнаносекундном диапазоне	190
7.6.	Заключение	194
	Литература к главе 7	194
ГЛАВА 8.	Генерация высокоэнергетических электронов в наносекундных газовых разрядах с полым катодом	197
8.1.	Введение	198
8.2.	Формы полого катода	199
8.3.	Динамика формирования и развития поперечного наносекундного разряда со щелевым катодом	201
8.3.1.	Результаты экспериментального исследования поперечного наносекундного разряда со щелевым катодом	201
8.3.2.	Динамика формирования и развития поперечного наносекундного разряда со щелевым катодом	203
8.4.	Генерация высокоэнергетических электронов в наносекундных разрядах со щелевым катодом	208
8.4.1.	Эмиссия электронов с катода и поддержание наносекундного разряда со щелевым катодом	208
8.4.2.	Высокоэнергетические электроны в наносекундных разрядах со щелевым катодом: механизмы формирования и энергетические характеристики	211
8.4.3.	Режимы движения ускоренных электронов в разрядной плазме и формирование электронных пучков	214
8.5.	Анизотропия процессов электронного возбуждения в наносекундных разрядах с полым катодом	220
8.5.1.	Поляризация атомных ансамблей в ионизованных газах	220
8.5.2.	Эффекты поляризации спонтанного излучения в плазменно- пучковых разрядах со щелевым катодом	221
8.5.3.	Механизм поляризации атомных состояний в наносекундных разрядах с полым катодом ...	223
8.6.	Результаты экспериментального исследования заселенностей возбужденных состояний атомов в наносекундных разрядах со щелевым катодом	227
8.6.1.	Техника и методика измерения концентрации возбужденных атомов в наносекундных разрядах	227
8.6.2.	Результаты экспериментального исследования концентраций метастабильных атомов в наносекундном разряде со щелевым катодом	229

8.6.3.	Роль метастабильных атомов в кинетике возбужденных атомов наносекундных разрядов со щелевым катодом	230
8.7.	Заключение	236
	Литература к главе 8	237
ГЛАВА 9.	Генерация пучков убегающих электронов из плазменного катода в воздушном разряде атмосферного давления	241
9.1.	Введение	242
9.2.	Экспериментальная установка с плазменным катодом для формирования электронного пучка в воздухе	244
9.3.	Электрический разряд и электронный пучок в свободном воздушном промежутке	246
9.4.	Электрический разряд и электронный пучок в воздушном промежутке, ограниченном диэлектрической трубкой	247
9.5.	Плазменный катод	249
9.6.	Энергетические параметры пучков убегающих электронов	252
9.7.	Выводы	253
	Литература к главе 9	253
ГЛАВА 10.	Генерация субнаносекундных пучков электронов в газонаполненных и вакуумных диодах	255
10.1.	Введение	256
10.2.	Формирование субнаносекундного пучка убегающих электронов при атмосферном давлении	257
10.3.	Спектры рентгеновского излучения и пучка убегающих электронов при наносекундном разряде в воздухе атмосферного давления	259
10.4.	Импульсный однородный пробой	265
10.5.	Пробой газовых промежутков в неоднородном электрическом поле при субнаносекундном фронте импульса напряжения	272
10.6.	Граница раздела областей дрейфа и убегания электронов, вне границы области с таунсендовским режимом ионизации	276
10.7.	Природа аномальных электронов в вакуумных диодах	279
10.8.	Генерация пучков электронов с регулируемой амплитудой тока более 400 А и длительностью 1–0.2 нс	286
10.9.	Заключение	291
	Литература к главе 10	292
ГЛАВА 11.	Возбуждение генерации лазерного излучения в полупроводниковых мишенях газового диода субнаносекундным электронным пучком	297
11.1.	Введение	298
11.2.	Полупроводниковая мишень газового диода	299

11.3. Зависимость лазерного излучения от параметров электронного пучка и полупроводниковой мишени	300
11.4. Потери энергии ЭП на отражение, вторичную эмиссию ионизацию	302
11.5. Зависимость эффективности излучения ПМ от коэффициентов отражения зеркал резонатора	303
11.6. Спектры генерации	304
11.7. Выбор диаметра электронного пучка	305
11.8. Эксперименты по возбуждению лазерного излучения субнаносекундным электронным пучком	306
11.9. Возбуждение полупроводниковых мишеней электронным пучком при изменении давления газа в камере ГД	311
11.10. Заключение	315
Литература к главе 11	315
ГЛАВА 12. Теоретическое моделирование явления генерации убегающих электронов в импульсном газовом разряде высокого давления	317
12.1. Введение	318
12.2. Анализ убегания электронов в коротком импульсном поле	321
12.3. Нуль-мерная модель генерации убегающих электронов	324
12.4. Одномерная гибридная модель генерации убегающих электронов	328
12.5. Заключение	332
Литература к главе 12	333
ГЛАВА 13. Генерация убегающих электронов в лазерной плазме	335
13.1. Введение	336
13.2. Описание модели	338
13.3. Результаты расчетов	340
13.3.1. Влияние параметров горячей области	342
13.3.2. Влияние воздушного зазора	342
13.3.3. Влияние внешнего магнитного поля	344
13.4. Исследование способов уменьшения расходимости пучка убегающих электронов	348
13.4.1. Результаты сравнительного исследования	348
13.5. Заключение	352
Литература к главе 13	352
ГЛАВА 14. Численное моделирование импульсного пробоя газа методом частиц-в-ячейках	355
14.1. Введение	356
14.2. Методы частиц-в-ячейках (PIC) и Монте-Карло (MC)	357

14.3. Численное моделирование начальной стадии развития пробоя	361
14.4. Численное моделирование в электромагнитной постановке	364
14.5. Моделирование экспериментальной установки	368
14.6. Заключение	370
Литература к главе 14	370
ГЛАВА 15. Компьютерное моделирование динамики пучка убегающих электронов	371
15.1. Введение	372
15.1.1. Убегающие электроны в плазме	372
15.1.2. Убегающие электроны в газовых разрядах	373
15.1.3. Пробой на убегающих электронах	376
15.2. Тормозное излучение быстрых электронов в длинных газовых разрядах	378
15.2.1. Расчет тормозного излучения электронов	379
15.2.2. Динамика электрона, инжектированного с головки адонаправленного стримера	380
15.3. Моделирование формирования пучка убегающих электронов в длинных газовых разрядах	383
15.3.1. Инжекция электронов с головки стримера	384
15.3.2. Модель эволюции пучка убегающих электронов	385
15.3.3. Упругие столкновения электронов с атомами	386
15.3.4. Результаты численных расчетов	389
15.4. Лавины убегающих электронов в газовых разрядах с большим перенапряжением	392
15.4.1. Моделирование процесса формирования лавины УЭ	392
15.4.2. Моделирование эволюции пучка убегающих электронов в газовых разрядах с большим перенапряжением	395
Литература к главе 15	399
ГЛАВА 16. Генерация широкоапертурных электронных пучков в инертных газах среднего давления	403
16.1. Введение	404
16.2. Генераторы электронных пучков на основе барьерного разряда	406
16.2.1. Экспериментальная установка	406
16.2.2. Конструкция генераторов	406
16.2.3. Электрическая схема установки	407
16.3. Параметры электронных пучков	408
16.3.1. Плотность тока пучка	408
16.3.2. Структура пучка	410
16.3.3. Энергетическая эффективность генерации электронного пучка	413
16.3.4. Генерация рентгеновского излучения	414

16.4. Применение широкоапертурного электронного пучка для накачки лазера на ксеноне	417
16.4.1. Методы возбуждения газоразрядных сред при оптимальных параметрах электронов	417
16.4.2. Конструкция Хе-лазера с барьерным разрядом	419
16.4.3. Определение тока разряда и напряжения на ускорительном промежутке	420
16.4.4. Электрические характеристики барьерного разряда	421
16.4.5. Видимое свечение газа в камере	421
16.4.6. Лазерные характеристики	422
16.4.6. Оптимальные условия возбуждения быстрыми электронами	422
16.5. Заключение	424
Литература к главе 16	424
ГЛАВА 17. Динамика ионизационных процессов в азоте, воздухе и SF ₆ высокого давления при субнаносекундном пробое, инициируемом убегающими электронами	427
17.1. Введение	428
17.2. Экспериментальная установка и методики	429
17.3. Анализ условий эксперимента	430
17.3.1. Критерий убегания электронов в газах	430
17.3.2. Эффективность генерации характеристического рентгеновского излучения в легких газах	431
17.3.3. Волна ионизации в промежутке с неоднородным электрическим полем	432
17.3.4. Эффективное время высвечивания второй положительной системы азота при повышенных давлениях	432
17.3.5. Связь между интенсивностью излучения (2 ⁺) системы азота и развитием пробоя	433
17.4. Экспериментальные результаты	435
17.4.1. Формирование диффузного разряда	435
17.4.2. Амплитудно-временные характеристики напряжения на газовом диоде и тока через промежутки	436
17.4.3. УФ-излучение из промежутка	438
17.5. Обсуждение результатов	442
17.6. Заключение	445
Литература к главе 17	445
ГЛАВА 18. Появление убегающих электронов за катодом при субнаносекундном пробое воздуха атмосферного давления	449
18.1. Введение	450
18.2. Экспериментальная аппаратура и методики	451

18.3. Экспериментальные результаты и их обсуждение	453
18.4. Теоретические оценки основных параметров распределения электрического поля в промежутке	457
18.5. Заключение	459
Литература к главе 18	459
ГЛАВА 19. Рентгеновское излучение при коронном разряде в воздухе атмосферного давления	461
19.1. Введение	462
19.2. Экспериментальные установки и методики измерений	463
19.3. Экспериментальные результаты	466
19.4. Рентгеновское излучение при переходе от диффузного разряда к коронному	470
19.5. Обсуждение результатов	472
19.6. Заключение	473
Литература к главе 19	473
ГЛАВА 20. Методики и датчики для измерений субнаносекундных и пикосекундных импульсов тока пучка, тока через разрядный промежуток и напряжения	475
20.1. Введение	476
20.2. Генераторы наносекундных и субнаносекундных импульсов высокого напряжения	478
20.3. Регистрирующая аппаратура	480
20.4. Измерение импульсов высокого напряжения короткой длительности	481
20.4.1. Численный эксперимент	481
20.4.2. Натурные измерения	482
20.5. Измерение импульсов тока через разрядный промежуток с помощью шунтов	487
20.6. Измерение амплитуды и длительности сверхкороткого лавинного электронного пучка	489
20.6.1. Регистрация пикосекундных импульсов тока с.л.э.п.	490
20.6.2. Регистрация субнаносекундных импульсов тока с.л.э.п.	491
20.7. Синхронизация импульсов с.л.э.п., тока через промежуток и напряжения на газовом диоде	492
20.8. Заключение	493
Литература к главе 20	493
ГЛАВА 21. Люминесценция кристаллов при возбуждении сверхкоротким лавинным электронным пучком	495
21.1. Введение	496
21.2. Методика измерений и аппаратура	497
21.3. Импульсная катодолюминесценция алмазов	499
21.3.1. Алмазные образцы	499

21.3.2. Интегральные спектры импульсной катодолюминесценции алмазов	499
21.3.3. Импульсная катодолюминесценции алмазов с временным разрешением	500
21.3.4. Спектры времени затухания импульсной катодолюминесценции алмазов	502
21.4. Импульсная катодолюминесценция диэлектрических кристаллов	503
21.4.1. Образцы флюорита, кальцита, сподумена и граната	503
21.4.2. Интегральные спектры импульсной катодолюминесценции кристаллов	503
21.4.3. Кинетика затухания импульсной катодолюминесценции кристаллов	504
21.4.4. Анализ результатов кинетики затухания импульсной катодолюминесценции в сподумене и гранате	505
21.5. Заключение	507
Литература к главе 21	507
ГЛАВА 22. О влиянии давления гелия, неона, водорода и азота на амплитуду и длительность тока пучка в газовом диоде	509
22.1. Введение	510
22.2. Экспериментальная аппаратура и методики	511
22.3. Влияние давления гелия на параметры пучка электронов	513
22.4. Обсуждение результатов, полученных при изменении давления гелия	517
22.5. Режимы эффективной генерации пучка убегающих электронов при уменьшении давления гелия, водорода и азота	518
22.6. Выводы	522
Литература к главе 22	522
ГЛАВА 23. Генерация сверхкороткого лавинного электронного пучка в SF_6	525
23.1. Введение	526
23.2. Экспериментальная аппаратура и методики измерений	529
23.3. Экспериментальные результаты и их обсуждение	531
23.4. О параметрах пучка убегающих электронов в SF_6	539
23.5. Заключение	540
Литература к главе 23	540
ГЛАВА 24. Применение пучка убегающих электронов для предыонизации в лазерах высокого давления	543
24.1. Введение	544

24.2. Экспериментальная установка и методики измерений	546
24.3. Генерация пучка убегающих электронов при высоком давлении	548
24.4. Формирование объемного разряда	550
24.5. CO ₂ -лазер атмосферного давления с предыонизацией пучком убегающих электронов	551
24.6. CO ₂ -лазер высокого давления с предыонизацией пучком убегающих электронов	553
24.7. Заключение	555
Литература к главе 24	555
Об авторах	557
Summary	567

ПОЯВЛЕНИЕ УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ ЗА КАТОДОМ ПРИ СУБНАНОСЕКУНДНОМ ПРОБОЕ ВОЗДУХА АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

В.Ф. Тарасенко^{1,2}, И.Д. Костыря¹, А.В. Козырев^{1,2}, Д.В. Белоплотов^{1,2}

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН. Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3.
E-mail: kozyrev@to.hcei.tsc.ru

² Национальный исследовательский Томский государственный университет.
Россия, 634030, г. Томск, пр. Ленина, 36

Исследованы условия появления убегающих электронов в воздухе атмосферного давления за сетчатым катодом и алюминиевой фольгой в направлении, противоположном от плоского анода. На промежуток подавались импульсы высокого напряжения от генератора СЛЭП-150 с амплитудой ≈ 140 кВ длительностью на полувывсоте ≈ 1 нс и фронтом 0.3 нс. Установлено, что при использовании катодов из сеток с различной прозрачностью с противоположной от анода стороны регистрируется пучок убегающих электронов, при этом фольга из алюминия, установленная за катодом на расстоянии 3 мм и более, не влияет на генерацию убегающих электронов в направлении, обратном от анода. Показано, что ток пучка в обратном от анода направлении и рентгеновское излучение из газового диода по-разному зависят от межэлектродного зазора. Установлено, что на величину тока пучка быстрых электронов, регистрируемого за катодом, существенно влияет материал анода. При сетчатом катоде и плоском аноде по кривым ослабления восстановлены спектры убегающих электронов, генерируемые как в прямом (на анод), так и обратном направлении (от анода). Рассчитано распределение напряженности электрического поля в промежутке и за сетчатым катодом. Показано, что на поверхности проволок сетки, обратной от анода, достигаются напряженности электрического поля, достаточные для генерации убегающих электронов. Зарегистрированы экспозиционные дозы рентгеновского излучения за импульс до 3.5 мР.

18.1. ВВЕДЕНИЕ

Генерация убегающих (быстрых) электронов и рентгеновского излучения оказывает существенное влияние на пробой промежутков с электродами, имеющими малый радиус кривизны, см. работы [1–21], опубликованные в последние годы, и ссылки в работах [1–21]. За счет усиления электрического поля на микро неоднородностях катода в газах повышенного давления достигаются электрические поля, достаточные для появления первых электронов за счет автоэлектронной эмиссии. Так как электрическое поле для возникновения тока автоэлектронной эмиссии больше, чем критическое поле для убегания электронов, то часть автоэмиссионных электронов переходит в режим убегания. Убегающие электроны и рентгеновское излучение, возникающее за счет торможения быстрых электронов на аноде и в газе, обеспечивают у катода и в промежутке формирование диффузного разряда. Причем при субнаносекундной длительности фронта импульса напряжения, а также при оптимальной конструкции газового диода и катода за анодом из тонкой фольги регистрируется ток пучка с амплитудой в сотни ампер [9, 12, 20]. Однако многие аспекты данного явления сильно зависят от условий эксперимента и остаются не выясненными до настоящего времени. В частности, требуется проведение новых как экспериментальных, так и теоретических работ для установления механизма генерации пучков убегающих электронов в плотных газах в различных условиях.

Интересный режим генерации пучка убегающих электронов был реализован в работе [22, 23]. П.А. Бозаном и А.Р. Сорокиным было показано, что в неоне и гелии при низких давлениях и сетчатом катоде наблюдается генерация пучков убегающих электронов в обратном (ПУЭО) от анода направлении. Амплитуда им-

пульса напряжения, подаваемого на сетчатые электроды, в [22, 23] составляла несколько киловольт. Пучок быстрых электронов регистрировался за сетчатым катодом в направлении, противоположном аноду, и за сетчатым анодом в прямом направлении. При зазоре между катодом и анодом 0.5 мм предельные давления, при которых регистрировался ПУЭО, составили для неона 38 Торр и для гелия 90 Торр. Генерация ПУЭО объяснялась формированием объемного заряда, вызываемого инжектированными из промежутка за сетчатый катод ионами. В работе [8], при увеличении амплитуды импульса напряжения и сокращения фронта, пучок убегающих электронов в обратном направлении был зарегистрирован в воздухе атмосферного давления. В подобных условиях при работе с трубчатым катодом было установлено, что пучок электронов генерируется в угол, превышающий 2 П [3]. Однако подробные исследования условий генерации и параметров пучка убегающих электронов в воздухе атмосферного давления за катодом не было проведено.

В данной главе приведены результаты экспериментального исследования условий, при которых наблюдается генерация пучка убегающих электронов не только в направлении анода, но и в обратном от анода направлении (см. также работы [24, 25]). При этом с пикосекундным временным разрешением зарегистрированы временные формы импульса тока пучка убегающих электронов за катодом воздушного разрядного промежутка, измерено число таких электронов и их распределение по энергиям, а также экспозиционная доза рентгеновского излучения при анодах из Al, нержавеющей стали и Ta. Кроме того, рассчитано распределение напряженности электрического поля в разрядном промежутке и за катодом.

18.2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АППАРАТУРА И МЕТОДИКИ

В экспериментах использовался генератор СЛЭП-150, с помощью которого за анодом из алюминиевой фольги толщиной 10 мкм в воздухе атмосферного давления ранее было получено $\sim 6 \cdot 10^{10}$ электронов [20]. Конструкция СЛЭП-150 описана в [14, 20], а также в главе 1 и главе 20 данной коллективной монографии. При регистрации ПУЭО на высоковольтный электрод газового диода подавался импульс напряжения U положительной полярности. Амплитуда U в падающей волне составляла ≈ 140 кВ, а длительность импульса на полувывсоте ≈ 1 нс. Длительность фронта импульса напряжения определялась обострителем разрядником и составляла 0.3 нс. Конструкция газового диода при экспериментах с положительной полярностью импульса напряжения показана на рисунке 18.1а.

Анод (4) газового диода диаметром 36 мм был изготовлен в виде плоского диска толщиной

3 мм с закругленными краями. Поверхность анода, обращенная к катоду, была выполнена из Al, нержавеющей стали или Ta. Катод (7) был изготовлен в виде сетки из параллельных стальных проволок диаметром 0.2 мм, с шагом 4 или 8 мм натянутых на плоском стальном кольце (5), толщина которого равнялась 3 мм. Отверстие в центре кольца имело диаметр 68 мм. Кольцо крепилось к фланцу газонаполненного диода. Также в качестве катода использовались плетеные сетки из проволоки диаметром 0.24 и 0.23 мм с размерами ячеек 1×1 и 0.5×0.5 мм соответственно. С другой стороны кольца устанавливалась алюминиевая фольга (8), за которой располагались коллекторы с различными диаметрами приемной части для регистрации электронов. Фольга имела толщину 10 мкм и крепилась к фланцу газового диода. Расстояние между сеткой и фольгой l равнялось 3 мм. За счет дополнительных колец (5) l

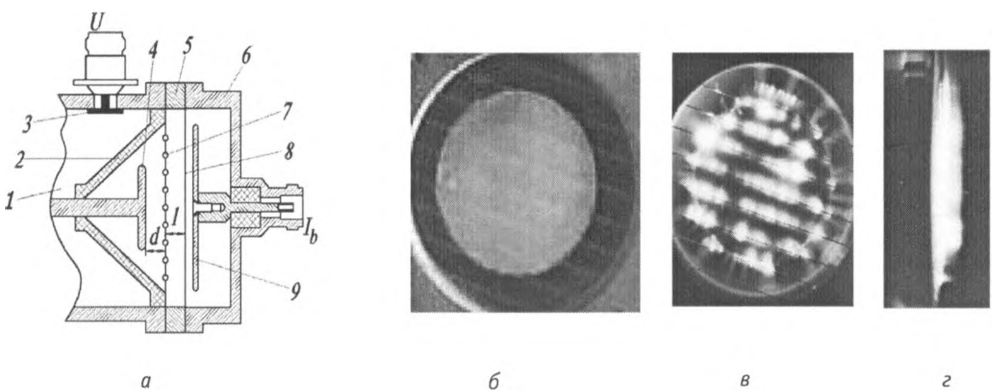


Рис. 18.1. Конструкция газового диода, подключенного к генератору СЛЭП-150 (а): 1 – коаксиальная передающая линия генератора, 2 – изолятор газового диода, 3 – емкостной делитель напряжения, 4 – анод в виде диска, 5 – металлическое кольцо, 6 – корпус коллектора, 7 – сетка, 8 – фольга, 9 – приемная часть дискового коллектора диаметром 56 мм. Фотографии газового диода без коллектора, металлического кольца и фольги со стороны сетки-катода (б, в) и сбоку (z). Фотографии газового диода без разрядной плазмы (б) и с плазмой за один импульс (в, z). Расстояние между проволоками 4 мм

могло увеличиваться до 6, 9 и 12 мм. Межэлектродный зазор d мог изменяться от 1 до 10 мм. При использовании свежизготовленных катодов и анодов перед проведением измерений каждый из электродов тренировался в течение нескольких десятков импульсов.

В большинстве экспериментов измерения ПУЭО и РИ проводились при положительной полярности генератора СЛЭП-150. Дополнительно в ряде экспериментов полярность генератора изменялась на отрицательную, плоский анод (при положительной полярности) заменялся на сетчатый катод, а сетка-катод (при положительной полярности) заменялась на алюминиевую фольгу, которая после смены полярности генератора становилась анодом. В этих экспериментах сетчатый катод был изготовлен из параллельных стальных проволок диаметром 0,2 мм, натянутых с шагом 4 или 8 мм на стальное кольцо диаметром 40 мм. Анодом в этом случае служила фольга из алюминия толщиной 10 мкм, которая армировалась сеткой с прозрачностью 90%. В этих условиях в газовом диоде генерировался сверхкороткий лавинный электронный пучок (с.л.э.п.) [1–3, 8, 20], который измерялся с помощью коллектора.

Для записи электрических сигналов использовались цифровые осциллографы реального времени, в том числе LeCroy WaveMaster 830Zi-A с полосой пропускания до 30 ГГц и с шагом дискретизации 12,5 пс. Экспозиционная

доза рентгеновского излучения определялась с помощью дозиметра Arrow-Tech, Inc (Model 138). Автографы пучка электронов и рентгеновского излучения регистрировались на фотопленке РФ-3.

Измерение полного числа электронов за фольгой проводилось коллектором с диаметром плоской приемной части 56 мм, который показан на рисунке 18.1. С помощью фильтров разной толщины, изготовленных из алюминиевой фольги, определялись кривые ослабления электронного пучка. Фильтры устанавливались вплотную к алюминиевой фольге, через которую выводился ПУЭО, и соединялись по всему периметру с корпусом газового диода. Длительность импульса ПУЭО измерялась с помощью двух коллекторов разных конструкций, имеющих разное временное разрешение. В первом случае (пикосекундное разрешение) использовался коллектор с диаметром приемной части 3 мм и временным разрешением при диаметре диафрагмы 1 мм около 20 пс (см. главу 20). Во втором случае (субнаносекундное разрешение) применялся коллектор с диаметром приемной части 20 мм и временным разрешением при диаметре диафрагмы 20 мм около 80 пс. Использование диафрагмы с отверстием диаметром 1 мм позволило проводить измерения тока пучка без дополнительных ослабителей для сигнала с коллектора.

18.3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 18.2 приведены зависимости числа электронов в ПУЭО и экспозиционных доз рентгеновского излучения от межэлектродного зазора d для различных материалов анода. На зависимости числа электронов в ПУЭО для всех анодов имеется оптимальный межэлектродный зазор, который оказался наименьшим для анода из алюминия. Число электронов в ПУЭО с анодом из нержавеющей стали было больше, чем с анодом из алюминия, но меньше, чем с анодом из тантала. Это соответствует соотношению атомных номеров для этих металлов. Наибольшие амплитуды ПУЭО регистрировались при расстоянии между электродами 4 мм. Оптимальный межэлектродный зазор для получения наибольшей экспозиционной дозы рентгеновского излучения, наоборот, оказался наибольшим при аноде из алюминия.

Применение анода из тантала увеличило число электронов в обратном направлении в ≈ 4 раза ($\sim 7 \cdot 10^9$ электронов со всей поверхности фольги) по сравнению с алюминиевым анодом ($\sim 2 \cdot 10^9$ электронов). Измерение экспозиционной дозы рентгеновского излучения за катодом показало, что при аноде из тантала она также ока-

залась в ≈ 4 раза больше, чем с алюминиевым анодом. Зависимости экспозиционной дозы рентгеновского излучения от толщины алюминиевых фильтров приведены на рисунке 18.3.

При одинаковом токе пучка убегающих электронов в прямом направлении увеличение экспозиционной дозы при аноде из металла с большим атомным номером вполне понятно. Однако значительное увеличение числа быстрых электронов за катодом при использовании анода из тантала оказалось неожиданным. Данное явление в [24] было зарегистрировано впервые.

Чтобы проверить тот факт, что коллектор регистрирует именно пучок электронов из разряда, а не какие-то вторичные процессы на коллекторе или в газе под воздействием рентгеновского излучения, было исследовано влияние расстояния между катодом из сетки и "закадной" фольгой. При увеличении зазора между фольгой и сеткой с 3 до 12 мм число "обратных" электронов в разряде с анодом из тантала плавно уменьшилось в ≈ 5 раз, рисунок 18.4а.

Экспозиционная доза рентгеновского излучения при этом увеличилась на $\approx 40\%$, рисунок

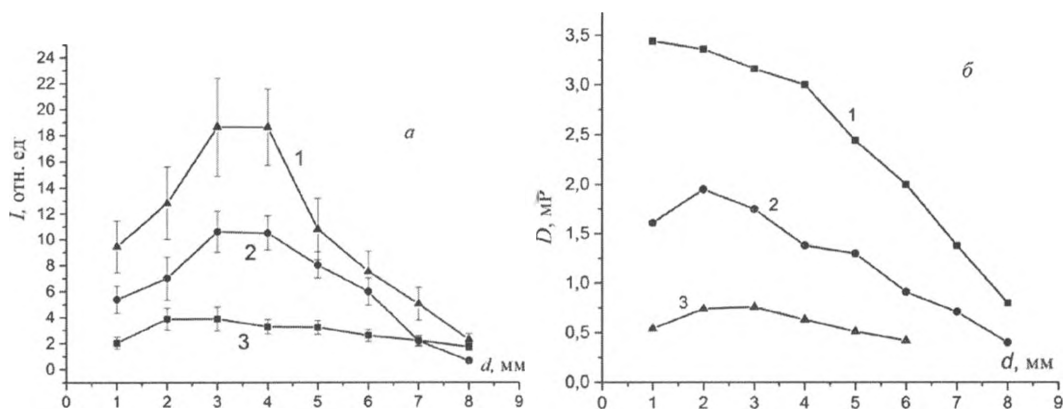


Рис. 18.2. Зависимости числа электронов в ПУЭО (а) и экспозиционной дозы рентгеновского излучения (б) от межэлектродного зазора для анода из тантала (1), нержавеющей стали (2) и алюминия (3) при разряде в воздухе атмосферного давления

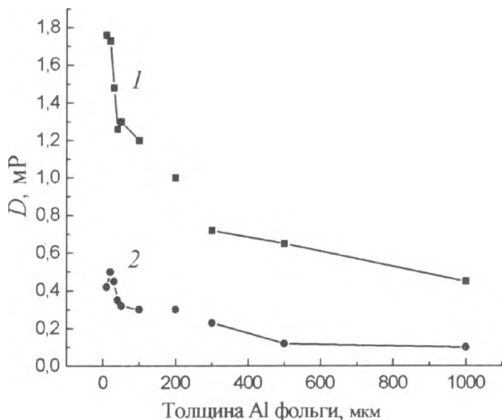


Рис. 18.3. Зависимости экспозиционной дозы рентгеновского излучения от толщины алюминиевой фольги при аноде из Ta (1) и Al (2). Дозиметр устанавливался на расстоянии 10 мм от фольги. Полярность генератора положительная

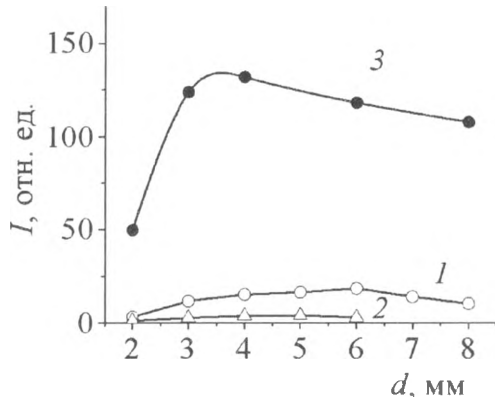


Рис. 18.5. Зависимости амплитуды ПУЭО (1, 2) и с.л.э.п. (3) от межэлектродного зазора: 1 – анод из тантала, 2 – анод из алюминия

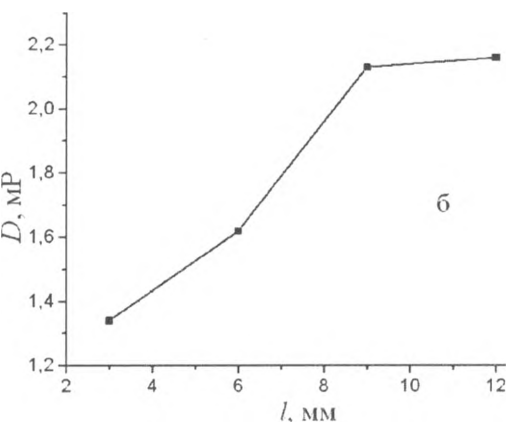
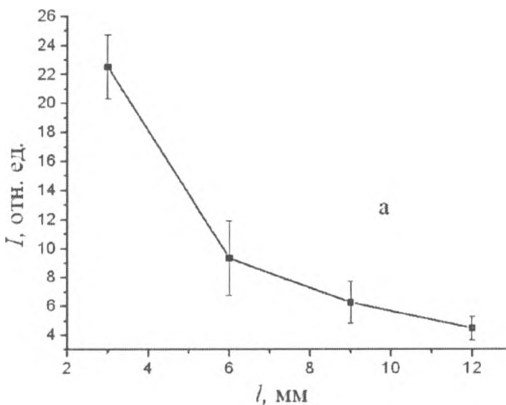


Рис. 18.4. Зависимости амплитуды ПУЭО (а) и экспозиционной дозы рентгеновского излучения (б) при аноде из Ta от величины зазора l между сеткой и фольгой. Ток пучка электронов регистрировался коллектором с приёмной частью диаметром 56 мм

18.4б. Если бы коллектор реагировал на рентгеновское излучение или регистрировал электроны, выбиваемые рентгеновскими квантами, то наблюдалась бы обратная зависимость. Уменьшение тока ПУЭО легко объясняется ослаблением и рассеиванием потока быстрых электронов на пути от сетки (в окрестности которой, как мы полагаем, они генерируются) до “закадной” фольги.

Влияние материала анода на генерацию ПУЭО наблюдается при длительности импульса тока сверхкороткого лавинного электронного пучка (с.л.э.п.) в прямом направлении ≈ 100 пс [1]. Длительность импульса с.л.э.п. ≈ 100 пс со всей поверхности фольги была зарегистрирована при использовании импульса напряжения генератора СЛЭП-150 отрицательной полярности и сетчатого катода подобной конструкции [20]. В данных экспериментах было установлено, что генерация импульсов ПУЭО и с.л.э.п. происходит примерно в одно время. Задержка с.л.э.п. относительно фронта импульса напряжения при отрицательной полярности генератора СЛЭП-150 составляет ≈ 0.3 нс. Число электронов в с.л.э.п. при этом примерно на порядок больше, чем в ПУЭО с анодом из тантала. На рисунке 18.5 приведена зависимость числа электронов от межэлектродного зазора при отрицательной полярности потенциального электрода с катодом из проволочек и зависимость ПУЭО от межэлектродного зазора при подобных условиях.

На рисунке 18.6 (осциллограммы 1, 2) показаны импульсы ПУЭО для анодов из Ta и Al полученные при пикосекундном времени

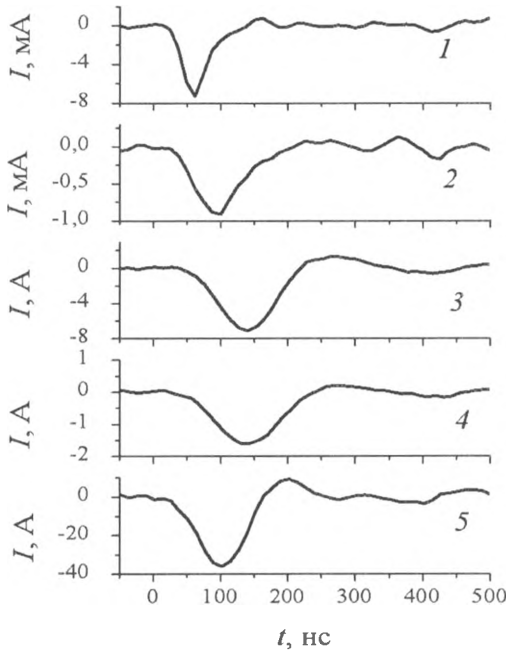


Рис. 18.6. Осциллограммы импульсов ПУЭО за отверстиями в катодной диафрагме диаметром 1 (1, 2), 20 мм (3, 4) и с.л.э.п. за отверстием в анодной диафрагме диаметром 20 мм (5). Межэлектродный зазор 4 мм, анод из Та (1, 3) и Al (2, 4, 5). При регистрации ПУЭО расстояние между сеткой и “засеточной” фольгой 3 мм

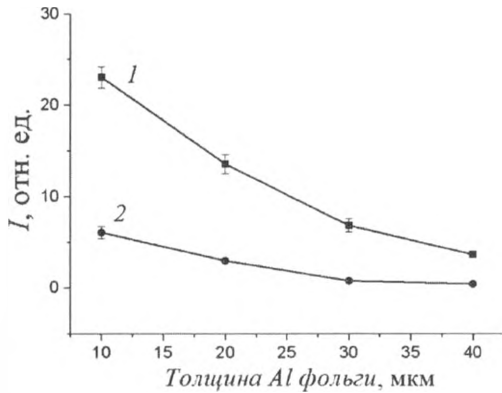


Рис. 18.7. Зависимости амплитуды ПУЭО при аноде из Та (1) и Al (2) от толщины алюминиевой фольги

разрешении системы регистрации. В этих экспериментах ток пучка регистрировался за диафрагмой из медной фольги толщиной 250 мкм с отверстием диаметром 1 мм на оси газового диода. Амплитуды ПУЭО с анодом из Та были существенно больше (≈ 8 раз), чем с анодом из Al. Однако характерные длительности импуль-

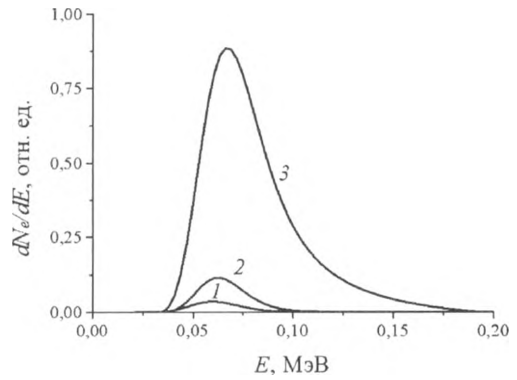


Рис. 18.8. Спектры пучков убегающих электронов за алюминиевой фольгой толщиной 10 мкм при положительной (1, 2) и отрицательной (3) полярности генератора СЛЭП-150. Анод из Al (1, 3) и Та (2)

са ПУЭО на полувысоте с анодом из Та были примерно в два раза меньше (≈ 38 пс). Увеличение числа электронов в “обратном” пучке (≈ 4 раза) с анодом из Та при регистрации ПУЭО через диафрагму с отверстием диаметром 1 мм соответствует увеличению числа электронов за всей поверхностью фольги (рис. 18.2) и току пучка с площадки фольги диаметром 20 мм (рис. 18.5, осциллограммы 3, 4). Длительность ПУЭО при увеличении отверстия в диафрагме до 20 мм увеличилась при аноде из Та до 88 пс, а при аноде из Al до 100 пс. Как мы уже отмечали, амплитуда с.л.э.п. в этих условиях была существенно больше (рис. 18.2 и рис. 18.5, осциллограмма 5), а длительность импульсов тока пучка составила на полувысоте 88 пс, как и длительность ПУЭО с анодом из Та.

Кривые ослабления электронного пучка фильтрами из Al приведены на рисунке 18.7.

Данные кривые были получены с использованием коллектора с диаметром приемной части 20 мм. На рисунке 18.8 приведены рассчитанные спектры ПУЭО с различными анодами, а также спектр с.л.э.п. (пучка электронов за анодом), полученный при отрицательной полярности импульса напряжения генератора СЛЭП-150, аноде из Al фольги и катоде из сетки, который устанавливался вместо дискового анода.

Для восстановления спектра электронов по кривым ослабления применялась методика решения обратной задачи методом регуляризации Тихонова, описанная в [10]. Приведенные спектры восстановлены за фольгой из алюминия толщиной 10 мкм, которая защищала коллектор от электромагнитных наводок. Видно, что полное число электронов в с.л.э.п. (пучок за анодом) и их максимальная энергия заметно больше, чем энергия электронов в ПУЭО. Срав-

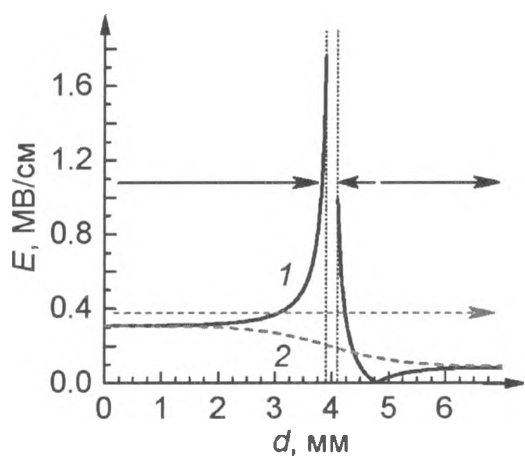


Рис. 18.9. Распределение напряжённости электрического поля между потенциальным электродом-анодом (слева) и заземлённой фольгой (справа) вдоль линии, проходящей через проволоку (1) и между проволоками (2) вблизи оси симметрии промежутка. Вертикальными пунктирными линиями обозначены границы проволоки. Стрелками указано направление вектора напряжённости электрического поля. Межэлектродный зазор и расстояние между проволоками 4 мм

нение спектров ПУЭО с различными анодами показывает, что максимум на распределении электронов по энергиям с анодом из тантала слегка сдвинут в сторону больших энергий.

Фотографии газового диода со стороны сетки-катода без разрядной плазмы и с разрядной плазмой со стороны сетки (б, в) и сбоку (з) приведены на рисунке 18.1. Снимки интегрального свечения разрядной плазмы сделаны без дополнительной фольги (8) (см. рис. 18.1а). Видно, что свечение плазмы наблюдается у проволок, из которых сделан катод (рис. 18.1в) и выходит в направлении, противоположном от анода за плоскость, в которой размещены проволоки, на расстояние до 10 мм (рис. 18.1г). Таким образом, при данной конструкции газового диода и полярности импульса напряжения происходит распространение разрядной плазмы не только по направлению к аноду, но и в противоположном от него направлении. Для такого развития разряда необходимо появление электрического поля в пространстве за сеткой.

Для выяснения этого вопроса были проведены расчеты распределения напряженности электрического поля в промежутке вдоль линии, проходящей вблизи оси симметрии промежутка. Моделирование было проведено с помощью программы ELCUT 5.1 Professional [26]. Результаты расчетов показаны на рисунке 18.9.

Из расчетов следует, что максимальная напряженность электрического поля на противоположной от анода стороне проволоки наблюдается у ее поверхности и для данных условий достигает 1 МВ/см. Наличие столь высокой напряженности электрического поля объясняет появление первых электронов у катода, в том числе на противоположной от анода стороне проволоки (между сеткой и фольгой), и переход части электронов в режим убегания. Наличие поля между сеткой и фольгой обеспечивает генерацию убегающих электронов и формирование волны ионизации, фронт которой движется в направлении, противоположном от анода (к фольге). Интегральное свечение этой плазмы хорошо видно на рисунке 18.1г. Также интенсивное излучение плазмы ОРИПЭЛ наблюдается в промежутке между сетчатым катодом и плоским анодом.

Зарегистрировать с.л.э.п. при потенциальном аноде технически очень сложно. Однако при смене полярности генератора СЛЭП-150, замене плоского потенциального анода на сетчатый катод, а также катода из сетки на алюминиевую фольгу толщиной 10 мкм, которая после смены полярности генератора становилась анодом, с.л.э.п. стабильно генерировался. Его амплитуда, как уже отмечалось выше, в воздухе атмосферного давления достигала 100 А при длительности импульса на половине его пика около 100 пс [20].

Как следует из рисунка 18.2, количество электронов в ПУЭО и экспозиционные дозы РИ существенно зависят от материала анода. При использовании анода из металла с большим атомным номером число электронов в ПУЭО и экспозиционная доза РИ возрастают. Возрастание экспозиционной дозы объясняется увеличением интенсивности тормозного рентгеновского излучения, генерируемого за счет убегающих электронов, ускоренных между сетчатым катодом и анодом, при использовании анода с большим атомным номером. Мы предполагаем, что рост числа электронов в ПУЭО при использовании анода с большим атомным номером обусловлен участием тормозного РИ в формировании волны ионизации, фронт которой движется в направлении от анода. По-видимому, РИ с анода оказывает существенное влияние на продвижение волны ионизации в направлении фольги. Согласно результатам наших работ [1, 3, 8, 10], можно утверждать, что основное число убегающих электронов при субнаносекундном фронте импульса напряженности электрического поля у поляризованного фронта волны ионизации

18.4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРОМЕЖУТКЕ

Полученные результаты по генерации ПУЭО можно также объяснить с помощью следующего расчета. На рисунке 18.10 показан потенциальный рельеф электрического поля, получающийся в вакуумном диоде такой конструкции (рис. 18.1а).

Электрический потенциал анода проваливается в пространство между сеткой и катодной фольгой, и на поверхности нитей сетки остается большая напряженность электрического поля по направлению к фольге, расположенной за катодом. Величина напряженности поля на поверхности катодных проволочек может быть приближенно рассчитана по формуле [27]:

$$\frac{|E^+|}{E_0} = \frac{L}{1 + \frac{L}{2\pi l} \ln \frac{L}{2\pi a}} \pm 1.$$

Здесь $E_0 = U/d$ – средняя напряженность поля в промежутке катод-анод, L – расстояние между проволочками в катодной сетке, l – расстояние между плоскостью решетки из проволочек и катодной фольгой, a – радиус катодных проволочек, который полагался малым $a \ll L, d, l$. Верхний знак “плюс” в формуле относится к той стороне поверхности проволочки, которая обращена к аноду, а нижний знак “минус” – к обратной стороне, обращенной к катодной фольге.

При радиусе проволочки $a = 0.11$ мм, периоде решетки $L = 4$ мм и расстоянии между сеткой и катодной фольгой $l = 3$ мм имеем величину первого слагаемого в формуле на уровне примерно 4.2. Фактор геометрического усиления поля на внутренней стороне проволочки более чем в 3 раза превышает среднюю напряженность поля в разрядном промежутке, что при уровне анодного напряжения $U = 150$ кВ обеспечивает условия для непрерывного ускорения электронов не только в сторону анода, но и в сторону катодной фольги.

Электроны, появившиеся с обеих сторон катодной сетки за счет размножения начальных

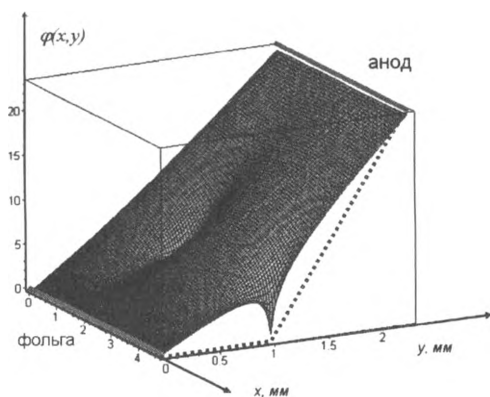


Рис. 18.10. Электростатический потенциальный рельеф (до начала ионизационных процессов в промежутке) при наличии вблизи плоского катода тонких параллельных проволочек (две проволочки на рисунке имеют координаты x, y : (2, 1) и (5, 1)). Пунктирная линия показывает ожидаемое распределение потенциала (на более поздних стадиях развития пробоя) после заполнения плазмой объема между проволочками и катодной фольгой

электронов, ускоряются как в направлении анода, так и в обратном направлении (в направлении катодной фольги). На их ускорение влияет поле положительных ионов, число которых растет. Рентгеновское излучение, генерируемое в основном при торможении быстрых электронов в теле анода, увеличивает число начальных электронов в разрядном объеме, в том числе и в окрестности проволочного катода. Количество начальных электронов в разряде, которое при прочих равных условиях пропорционально интенсивности рентгеновского излучения, при танталовом аноде больше, чем при аноде из алюминия. Поэтому сигнал с коллектора и экспозиционная доза рентгеновского излучения при танталовом аноде всегда больше.

После того как в разряде генерируется все более плотная плазма, электрическое поле вытесняется, в первую очередь, из промежутка

между катодной сеткой и фольгой, так что напряженность поля в нем уменьшается почти до нуля. Распределение потенциала на этой стадии разряда схематически показано на рисунке 18.10 пунктирной линией. В результате исчезает потенциальный барьер для быстрых электронов, движущихся от проволоочки по направлению к катодной фольге, и они могут проникнуть за фольгу. Именно этот механизм генерации быстрых электронов за катодом, как мы полагаем, имеет место в наших экспериментах. Оценка времени пересечения 3-миллиметрового зазора между сеткой и фольгой электронами с энергией 50–70 кэВ на уровне 20–30 пс также не противоречит возможности реализации описанного механизма.

Немонотонная зависимость количества ПУЭО от величины основного зазора, приведенная на рисунке 18.2, объясняется тем, что при малых зазорах начальная анизотропия напряженности поля на прямой и обратной стороне нитей сетки максимальная: напряженность поля на “анодной” стороне нити велика, а на “обратной” стороне ослаблена. При увеличении длины промежутка катод–анод напряженность поля на “обратной” стороне нитей за счет выравнивания поверхностного заряда нити сначала возрастает, а затем начинает падать с падением средней напряженности поля в основном промежутке “анод–катод”.

18.5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных экспериментов и теоретического анализа можно сделать следующие выводы:

1. Регистрация быстрых электронов за катодной фольгой разрядного промежутка, содержащего внутри тонкие проволочки под катодным потенциалом, указывает на то, что быстрые электроны генерируются вблизи поверхности проволочек, где электрическое поле имеет максимальную напряженность.
2. Два одновременно и согласованно протекающих процесса “ускорение электронов и вытеснение электрического поля из катодного пространства под проволочками” позволяют части электронов пройти в “закатодное” пространство. Малая длительность импульса тока быстрых электронов указывает, что они формируются в начальной стадии пробоя, а не являются рассеянными электронами, попавшими за катод после спада анодного напряжения.

3. Зависимость общего количества быстрых электронов от материала анода указывает на то, что тормозное рентгеновское излучение играет важную роль уже в самой начальной стадии развития пробоя, когда формируются убегающие электроны.
4. Наличие “высокоэнергетического хвоста” быстрых электронов за анодом не исключает того, что их появление за катодом может быть обусловлено превышением кинетической энергии над мгновенной высотой потенциального электрического барьера, сосредоточенного между местом их рождения и катодной фольгой. Эти результаты согласуются с данными, которые были получены в работах [8, 10].

Подготовка главы 18 выполнена в ИСЭ СО РАН в рамках гранта Российского научного фонда (проект №14-29-00052).

Литература к главе 18

1. Generation of supershort avalanche electron beams and formation of diffuse discharges in different gases at high pressure / V.F. Tarasenko, E.H. Baksht, A.G. Burachenko et al. // *Plasma Devices and Operation*. – 2008. – Vol. 16, No. 4. – P. 267–298.
2. Levko D., Krasik Ya.E., Tarasenko V.F. Present status of runaway electron generation in pressurized gases during nanosecond discharges // *International Review of Physics*. – 2012. – Vol. 6, No. 2. – P. 165–195.
3. Supershort avalanche electron beam generation in gases / V.F. Tarasenko, E.H. Baksht, A.G. Burachenko et al. // *Laser Part. Beams*. – 2008. – Vol. 26, No. 4. – P. 605–617.
4. Phenomenology of subnanosecond gas discharge at pressure below one atmosphere / H.G. Krompholz, L.L. Hatfield, A.A. Neuber et al. // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2006. – Vol. 34, No. 3. – P. 927–936.
5. Runaway – electron – preionized diffuse discharge at atmospheric pressure and its application / E.Kh. Baksht, A.G. Burachenko, I.D. Kostyrya et al. // *J. Phys. D.: Appl. Phys.* – 2009. – Vol. 42. – P. 185201.
6. Repetitive nanosecond-pulse discharge in a highly nonuniform electric field in atmospheric air: X-ray emission and runaway electron generation / T. Shao, V.F. Tarasenko, C. Zhang et al. // *Laser and Particle Beams*. – 2012. – Vol. 30, No. 3. – P. 369–378.
7. Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф. Мягкое рентгеновское излучение при наносекундном диффузном разряде в воздухе атмосферного давления // *ЖТФ*. – 2010. – Т. 80, вып. 2. – С. 111–117.
8. Supershort avalanche electron beams and x-rays in atmospheric-pressure air / V.F. Tarasenko, E.Kh. Baksht, A.G. Burachenko et al. // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2010. – Vol. 38, No. 4. – P. 741–750.
9. Эффективные режимы генерации пучков убегающих электронов в гелии, водороде и азоте / В.Ф. Тарасенко, Е.Х. Бакшт, А.Г. Бураченко и др. // *Письма в ЖТФ*. – 2010. – Т. 36, вып. 8. – С. 60–67.
10. Spectrum of fast electrons in a subnanosecond breakdown of air-filled diodes at atmospheric pressure / E.H. Baksht, A.G. Burachenko, V.Yu. Kozhevnikov et al. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2010. – Vol. 43. – P. 305201.
11. Ivanov S.N., Lisenkov V.V., Shpak V.G. Streak investigations of the initial phase of a subnanosecond pulsed electrical breakdown of high-pressure gas gaps // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2010. – Vol. 43. – P. 315204.
12. Modes of generation of runaway electron beams in He, H₂, Ne and N₂ at a pressure of 1–760 Torr / V.F. Tarasenko, E.Kh. Baksht, A.G. Burachenko et al. // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2010. – Vol. 38, No. 10. – P. 2583–2587.

13. Breakdown delay times for subnanosecond gas discharges at pressures below one atmosphere / J. Chaparro, W. Justis, H. Krompholz et al. // IEEE Trans. of Plasma Science. – 2008. – Vol. 36, No. 5. – P. 2505–2511.
14. SLEP-150M compact supershort avalanche electron beam accelerator / V.F. Tarasenko, I.D. Kostyrya, E.Kh. Baksht, D.V. Rybka // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2011. – Vol. 18, No. 4. – P. 1250–1255.
15. Diffuse discharge produced by repetitive nanosecond pulses in open air, nitrogen and helium / T. Shao, V.F. Tarasenko, C. Zhang et al. // J. of Applied Physics. – 2013. – Vol. 113, No. 3. – P. 093301.
16. Генерация мягкого рентгеновского излучения и его роль в развитии пробоя воздушного промежутка при повышенных давлениях / А.В. Козырев, В.Ф. Тарасенко, Е.Х. Бакшт, Ю.В. Шутько // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т. 37, вып. 22. – С. 26–33.
17. On the observed energy of runaway electron beams in air / G.A. Mesyats, A.G. Reutova, K.A. Sharypov et al. // Laser and Particle Beams. – 2011. – Vol. 29. – P. 425–435.
18. Spark discharge formation in an inhomogeneous electric field under conditions of runaway electron generation / T. Shao, V.F. Tarasenko, C. Zhang et al. // J. Appl. Phys. – 2012. – Vol. 111, No. 2. – P. 023304.
19. Effect of explosive emission on runaway electron generation / D. Levko, S. Yatom, V. Vekselman et al. // Journal Appl. Phys. – 2012. – Vol. 111. – P. 013304.
20. Костыря И.Д., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф. Амплитуда и длительность импульса тока сверхкороткого лавинного электронного пучка при разряде в воздухе атмосферного давления // ПТЭ. – 2012. – № 1. – С 80–85.
21. Бакшт Е.Х., Бураченко А.Г., Ерофеев М.В., Тарасенко В.Ф. Генерация сверхкороткого лавинного электронного пучка и рентгеновского излучения в импульсно-периодическом режиме // Физика плазмы. – 2014. – Т. 40, № 5. – С. 480–488.
22. Бохан П.А., Сорокин А.Р. Открытый разряд, генерирующий электронный пучок: механизм, свойства и использование для накачки лазеров среднего давления // Журнал технической физики. – 1985. – Т. 55, № 1. – С. 88–95.
23. Бохан П.А., Сорокин А.Р. Формирование электронных пучков в перезарядочном слое при разряде в газах среднего давления. // Журнал технической физики. – 1985. – Т. 55, № 6. – С. 1168–1170.
24. Появление убегающих электронов за катодом при субнаносекундном пробое воздуха атмосферного давления / И.Д. Костыря, Д.В. Рыбка, В.Ф. Тарасенко и др. // Известия ВУЗов. Физика. – 2012. – Т. 55, № 12. – С. 107–109.
25. Fast electrons behind the plane-grid cathode at nanosecond discharge in atmospheric pressure air / E.Kh. Baksht, A.V. Kozyrev, I.D. Kostyrya et al. // High Voltage Engineering. – 2013. – Vol. 39, Iss. 9. – P. 2138–2144.
26. Elcut [Электронный ресурс]. – URL: http://elcut.ru/allnews/elcut51_r.htm (дата обращения 13.10.15).
27. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1984. – 832 с.