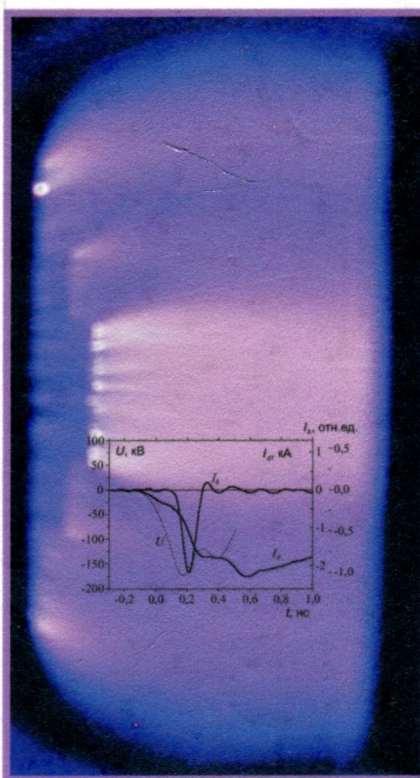


ГЕНЕРАЦИЯ УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ И РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В РАЗРЯДАХ ПОВЫШЕННОГО ДАВЛЕНИЯ

Под редакцией В.Ф. Тарасенко



ФГБУН «Институт сильноточной электроники СО РАН» (ИСЭ СО РАН)

ГЕНЕРАЦИЯ УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ И РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В РАЗРЯДАХ ПОВЫШЕННОГО ДАВЛЕНИЯ

Под редакцией В.Ф. Тарасенко

Scientific & Technical Translations



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. Бакшт,
Е.В. Балзовский, С.А. Баренгольц, Д.В. Белошлютов,
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. Швейгерт, 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 напряжения 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 промежуток	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 катодолюминесценция 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