

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФИАН

Член-корреспондент РАН

Н.Н. Колачевский



ОТЗЫВ

Ведущей организации на

Диссертацию МАМОНТОВА Юрия Игоревича

«Численное исследование транспорта ускоренных электронов в газах различной плотности»,

представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.13. электрофизика, электрофизические установки.

Диссертационная работа посвящена теоретическому исследованию кинетических процессов ускорения электронов в режиме убегания при движении в плотных газах в сильном неоднородном электрическом поле в условиях импульсного электрического разряда. Актуальность темы исследований обусловлена существенным количеством новых экспериментальных результатов, которые свидетельствуют об определяющей роли убегавших электронов в формировании разряда, полученных в различных условиях в том числе в неоднородных полях, которые могут быть описаны численными методами. Для проведения кинетического моделирования были использованы методы Монте-Карло и частиц в ячейках. Были учтены различные сечения различных процессов взаимодействия электронов с атомами среды. Для вычислений автором были разработаны оригинальные численные коды.

К наиболее значимым результатам работы можно отнести подробное численное исследование процессов ускорения электронов в режиме убегания в неоднородном электрическом поле. Получено эффективное «снижение порога убегания», определяемое структурой сечения взаимодействия электронов, когда для попадания в режим убегания достаточно ускорить электроны до некоторой энергии только в начальной области с наиболее сильным полем.

Получена скорость волны ионизации на уровне  $10^9$  см/с, что существенно превосходит среднюю скорость дрейфа медленных электронов, но соответствует энергии электронов  $\sim 100$  эВ, отвечающей максимуму сечения ионизации.

Исходя из соображений «частоты убегания» определена пороговая для убегания величина однородного электрического поля (220 кВ/см при атмосферном давлении).

Получено хорошее согласие рассчитанных функций распределения электронов по энергиям, а также средней ионизационной длины и средней скорости дрейфа электронов с предыдущими работами, что подтверждает корректность проводимых вычислений сечений взаимодействия.

Получено снижение необходимого для убегания электрического поля в геометрии с микрорельефом различной геометрии в условия увеличенного давления газа (от единиц до десятков атм), соответствующие новым экспериментальным исследованиям.

Исследована кинетика убегания электронов в двумерном неоднородном поле в сравнении с результатами новой аналитической теории. Получено снижение фракции убегających электронов при уменьшении пиковой энергии, что согласуется с характером падающего с энергией сечения взаимодействия (и, соответственно, силы торможения).

Исследованы процессы ионизационного усиления пучка электронов, генерируемых взрывоэмиссионной плазмой при давлении газа в единицы Торр. Показано, что в рассматриваемых условиях основной вклад в плотность тока вносят электроны взрывной эмиссии.

Результаты работы опубликованы в большом количестве статей в тематических научных журналах, а также представлены на ведущих научных конференциях.

Диссертация состоит из 5 Глав, Введения и Заключения

Во Введении приводятся данные о диссертационной работе, описывается актуальность, новизна, и выносимые на защиту положения.

В первой Главе приводится обзор тематических работ по теме диссертации.

Во второй Главе описывается разработанная физическая и численная модель, приводятся результаты тестовых расчетов функции распределения и средних ионизационных коэффициентов, показывающих корректность проводимых расчетов. Рассчитывается «частота убегания» в однородном поле.

В третьей Главе рассчитываются параметры убегания в условиях микронеоднородности на катоде, в том числе в условиях новых экспериментов в газе высокого давления.

В четвертой Главе проводятся расчеты в двумерном неоднородном поле в сравнении с результатами новой аналитической теории.

В пятой Главе проводятся расчеты транспорта электронов взрывоэмиссионного пучка в остаточном газе давления единицы Торр.

В Заключении формулируются полученные результаты и выводы.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

К замечаниям по тексту работы можно отнести следующее.

1. Неудачно сформулирован термин «классический критерий убегания». По существу, имеется ввиду максимальная величина силы торможения электронов, превышение которой позволяет ускорять в режиме убегания электроны, в том числе с нулевой начальной энергией. Целесообразно было бы привести зависимость силы торможения, спадающей в диапазоне энергий 100 эВ – 1 МэВ во вводной части работы. При этом основная часть работы посвящена именно убеганию электронов повышенной энергии.

2. В Главе 2 при определении критической величины критического поля из соображений «частоты убегания» (составившей 220 кВ/см) желательным было бы пояснить процедуру определения данной величины и указать, что речь идет о времени вовлечения всех электронов в режим убегания.

3. В Главе 2 при тестовых сравнениях вычисляемой функции распределения с результатами других работ, а также, например, сравнения рассчитываемых ионизационных коэффициентов, желательным было бы сделать акцент на высокоэнергетических хвостах функции распределения электронов, так как они и производят ионизацию. В этой связи было бы логичным поменять и порядок следования разделов 2.2 и 2.3.

4. Главах 3 и 4 получены важные результаты по моделированию убегания электронов в неоднородном поле. При этом непонятно какова мера этой неоднородности. В работе Кунхарда и Бышевского [106] описаны «запертые» убегающие электроны, названные так по аналогии с движением в неоднородном магнитном поле и отражением от магнитных пробок. Такие «запертые» убегающие электроны вначале ускоряются в сильном электрическом поле, но потом теряют энергию в области более слабого поля. В настоящей работе этот процесс подробно моделируется в различной геометрии неоднородного электрического поля. Однако при этом желательным было бы в большей степени систематизировать результаты, например, исходя из цитируемой работы [106].

5. Есть ряд неточностей по тексту. Например, термин ультрарелятивистский (стр. 50) применяется к электрону с энергией всего 1 МэВ, что всего вдвое превышает массу электрона. На рисунке 43 (стр. 127) приводится сравнение зависимостей для различных пар параметров.

Вместе с тем, приведенные замечания не имеют принципиального характера, и не умаляют высокого уровня работы и полученных в ее рамках научных результатов.

Диссертация Мамонтова Юрия Игоревича на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи численного моделирования кинетики ускорения электронов в сильном неоднородном поле в газе в условиях импульсного разряда, и удовлетворяет требованиям п. 9 действующего Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук (постановление Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.13. электрофизика, электрофизические установки.

Отзыв подготовлен на основе обсуждения материалов диссертации, представленных Мамонтовым Ю.И. на заседании Ученого совета Отдела физической электроники ФИАН 17 ноября 2022 (протокол 11/22, присутствовали 7 из 7 членов совета).

Заведующий Лабораторией теории плазменных явлений

Отдела физической электроники ФИАН

Доктор физико-математических наук

С.А. Урюпин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

119991 Москва, Ленинский проспект, 53

mmtsv@lebedev.ru

+7 499 1326846

Подпись заверяю

Ученый секретарь ФИАН

Кандидат физико-математических наук



А.В. Колобов