

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Кожевникова Василия Юрьевича «Теория быстропротекающих процессов взаимодействия сильных электрических полей с неравновесными потоками электронов в плотных газах, полупроводниках и вакууме», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки в диссертационном совете Д 003.031.02 при ИСЭ СО РАН.

Актуальность темы. Тема диссертационной работы Кожевникова В.Ю. – теоретическое исследование быстропротекающих электрофизических процессов, сопутствующих взаимодействию неравновесных потоков электронов в плотных газах (при атмосферном давлении), полупроводниках и вакууме с сильным электрическим полем, методами физической кинетики. Следует отметить, что применение методов физической кинетики для описания неравновесных процессов в плазме, полупроводниках и плотной плазме имеет длительную историю. Смотрите, например, классические монографии: Ю.Л. Климонтович. Статистическая теория неравновесных процессов в плазме. – М.: Изд. МГУ, 1964; В.П. Силин. Введение в кинетическую теорию газов. – М.: Наука, 1971; И. Шкаровский, Т. Джонстон, М. Бачинский. Кинетика частиц плазмы. – М.: Атомиздат, 1969; И.М. Дыкман, П.М. Томчук. Явления переноса и флуктуации в полупроводниках. – Киев: Наукова Думка, 1984. Так в двух последних монографиях рассмотрены также условия генерации потоков «горячих» (ускоренных) электронов в сильных электрических полях в низкотемпературной частично ионизированной плазме и полупроводниках. Существенным отличием работы Кожевникова В.Ю. от указанных монографий является её принципиальная направленность на численное решение кинетического уравнения Больцмана, как в плотных газах, так и в полупроводниках и вакууме, а также на выяснении роли неравновесных потоков (т.к. называемых убегающих) электронов в формировании условий токопрохождения в указанных средах. Роль убегающих электронов в формировании токопрохождения в газах существенна, как показывают эксперименты (смотрите ссылки, приведенные в диссертации). Поэтому тема диссертационной работы Кожевникова В.Ю., направленной «на разработку и вычислительную реализацию современных теоретических моделей формирования субнаносекундных электрических разрядов в газах высокого давления и детальное пространственно-временное описание процессов взаимодействия электрических полей с электронами в таких разрядах», несомненно, актуальна.

Выше сказанное также позволяет сделать вывод о соответствии темы диссертации Кожевникова В.Ю. паспорту специальности 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки.

Диссертация Кожевникова В.Ю., объемом 235 страниц текста, состоит из введения; пяти глав, первая из которых - обзорная; заключения; списка литературы из 328 наименований. Ознакомление с диссертацией позволяет утверждать, что сформулированные Кожевниковым В.Ю. положения, выносимые на защиту, раскрыты и обоснованы, в основном, в 3-й, 4-й и 5-й главах диссертации. Ниже, по ходу анализа их основного содержания, мы выделяем наиболее значимые, на наш взгляд, результаты диссертанта.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы; сформулированы цели и задачи; показаны научная новизна, достоверность полученных результатов, их научная и практическая значимость, а также приведены научные положения, выносимые автором на защиту, и информация о личном вкладе диссертанта и апробации результатов работы.

Первая глава - обзорная. В разделе 1.1 на основе анализа литературных источников сделан обзор элементарных, по мнению автора диссертации, представлений о физической природе «убегания» электронов в газах. В разделе 1.2 на основе литературных источников кратко рассмотрены экспериментальные методы исследования убегающих электронов и проанализированы их ограничения. В разделе 1.3 диссертант делает краткий обзор существующих теоретических методов исследования убегающих электронов (аналитических и численных) и высказывает свое мнение об их недостаточной адекватности для исследования неравновесных потоков электронов в газах. В заключении к главе автор делает вывод о необходимости использования для этих целей методов физической кинетики.

Глава 2, занимающая 1/3 от всего текста диссертации (78 страниц), носит обзорно-методический характер. Раздел 2.1 посвящен описанию и реализации математического способа восстановления энергетического спектра пучков убегающих электронов по экспериментальным данным кривых ослабления. В подразделе 3.1.2 автор описывает на основе литературных источников понятие некорректно поставленной задачи математической физики. В подразделе 2.1.3 автор описывает регуляризацию решения уравнения Фредгольма I рода, к которому, в конечном счете, сводится задача о восстановлении энергетического спектра быстрых электронов, на основе известного метода регуляризации некорректно поставленных математических задач, предложенным Тихоновым и Арсениным в работе [219] из списка цитированной в диссертации литературы. Для решения полученных в результате конечно-разностной дискретизации интегрального уравнения Фредгольма I рода системы линейных алгебраических уравнений диссертант использует программы линейной алгебры, реализованные в пакете Matlab. Верификация описанной выше процедуры диссертантом проводится на восстановлении спектра электронного пучка, полученного в вакуумном диоде, по кривым ослабления в металлических фольгах различной толщины. Можно, в конечном счете, согласиться с утверждением автора, «что способ восстановления спектра короткого электронного пучка вакуумного диода по его ослаблению в фольгах различной толщины путем решения некорректной задачи методом регуляризации Тихонова дает физически обоснованные <...> результаты при минимальных априорных предположениях». В подразделе 2.1.5 производится восстановление энергетического спектра быстрых электронов газового диода для двух типов катодов: шарового и трубчатого. Результат восстановления представлен на рис. 2.8. Восстановленный энергетический спектр быстрых электронов газового диода убедительно показывает существование электронов с энергией, превышающей максимальное напряжение на диоде. В разделе 2.2 диссертант подробно описывает методы численного решения уравнения макроскопических моделей разряда. В качестве макроскопических моделей разряда автор рассматривает уравнения непрерывности для концентрации частиц i -го сорта, в которых источник частиц записывается в виде суммы скоростей реакций, записанных «в форме коэффициентов Таунсенда», умноженных на модуль потока частиц i -го сорта. Сам же поток имеет вид суммы дрейфового члена, пропорционального напряженности электрического поля, и диффузионного, пропорционального градиенту концентрации частиц. Коэффициенты подвижности и диффузии в макроскопической модели полагаются постоянными. Подраздел 2.2.1 посвящен описанию так называемого метода линий, позволяющего свести одномерное уравнение непрерывности, записанного в цилиндрической системе координат, к системе обыкновенных дифференциальных уравнений путем дискретизации с помощью метода конечных разностей. В подразделе 2.2.2 автор подробно описывает метод конечных разностей и обсуждает способы конечно-разностных аппроксимаций первых и вторых производных. Подраздел 2.2.3 посвящен подробному описанию метода WENO, относящегося к классу нелинейных методов конечных объемов и конечных разностей, которые позволяют с высокой точностью аппроксимировать решения конвективных задач «в гладких областях и существенно без нефизических осцилляций в местах разрывов решений». Автор подробно обсуждает известные в литературе аппроксимации различной степени гладкости. Ограничиваясь применением к решению одномерных в декартовой системе координат уравнений непрерывности для электронов и ионов в дрейфово-диффузионном приближении методов WENO третьего и пятого порядков точности, автор подробно описывает получение с помощью него аппроксимаций конвективного потока. В подразделе 2.2.4 описана модель формирования областей (доменов) сильного электрического поля в полупроводниковых диодах Ганна. В подразделе 2.2.5 проводится численное моделирование автогенераторов Ганна, т.е. фактически исследуется пригодность методов WENO третьего и пятого порядка точности к решению задач, содержащих области с сильно отличающимися значениями напряженности электрического поля. Автор убедительно показал, что методы WENO, по крайней мере, в случае одномерных задач позволяют с высокой точностью моделировать физические явления, в которых возможно существование сильных разрывов (гидродинамических или электромагнитных). Подраздел 2.3 посвящен подробному описанию методов численного решения уравнения Больцмана. Вначале, в подразделе 2.3.1 автор проанализировал известные в литературе методы расщепления уравнения Больцмана, поскольку в общем случае фазовое пространство частиц, описываемых уравнением Больцмана, шестимерно, и выбрал на основе его используемый в диссертации метод Странга. В

подразделе 2.3.2 анализируются известные в литературе методы решения транспортной части уравнения Больцмана (уравнения Власова) и выбирается в качестве используемого в диссертации метод Ченга-Кнорра, в котором для аппроксимации функций распределения используется их интерполяция кубическими сплайнами. В подразделе 2.3.3 анализируются методы учета столкновений и формулируется общая стратегия построения численного решения уравнения Больцмана. Автор диссертации ограничивается рассмотрением двумерного фазового пространства: одномерного по координатам и одномерного по скоростям, а также случаем нерелятивистского уравнения Больцмана, в котором не учитывается магнитное поле, создаваемое потоками заряженных частиц. Для нахождения распределения электрического поля в пространстве автором используется одномерное уравнение Пуассона, в котором плотности зарядов определяются интегрированием функций распределения по скоростям. Дополнительно к уравнению Пуассона автор записывает уравнение, являющееся фактически определением плотности полного тока, равного плотности тока смещения и тока конвенции заряженных частиц (транспортного тока). Для учета столкновений автор предлагает использовать модельные интегралы столкновений в форме интегралов Бхатнагара-Гросса-Крука (БГК) с постоянным временем столкновений τ , которое в общем случае может зависеть от состояния газа и напряженности электрического поля. В конце подраздела формулируется стратегия получения численного решения системы одномерных нерелятивистских уравнений Максвелла-Больцмана. В подразделе 2.3.4 приводятся результаты апробации численных методов кинетического уравнения на тестовых задачах вакуумной электроники, для решения которых можно не учитывать вклад столкновений. Показано, что сформулированная методология численного решения действительно позволяет решать задачи вакуумной электроники путем решения одномерной системы уравнений Пуассона-Власова. В подразделе 2.4 формулируются выводы к главе 2.

Основные результаты диссертации получены автором в главах 3, 4 и 5.

Глава 3 состоит из двух разделов. В разделе 3.1 исследуются разрядные процессы в плоском газовом диоде с использованием дрейфово-диффузионного приближения для случаев «медленного» и «быстрого» разрядов. И в том и другом случае ток разрядной цепи определяется балластным сопротивлением источника. В первом случае он согласно известной формуле Сато равен среднему на единицу длины разрядного промежутка конвективному току заряженных частиц. Во втором случае автор требует, чтобы сумма тока смещения и конвективного тока в любом сечении диода была равна плотности тока на аноде, определяемой площадью электрода и балластным сопротивлением источника с учетом падения напряжения на разрядном промежутке. Для решения уравнений используются методы, описанные в главе 2. Убедительно показано, что предложенные модели описывают наблюдаемые особенности развития как тлеющих, так и импульсных разрядов в плоских газовых диодах. В разделе 3.2 исследованы разрядные процессы в газовых диодах, образованных двумя соосными цилиндрическими электродами бесконечной длины, внутренний из которых – катод, а внешний – анод. Такого типа конфигурация диода позволяет моделировать неоднородное поле в разрядном промежутке. Для исследования разрядных процессов используется так называемая «минимальная модель», в которой учитываются только процессы рождения и гибели ионов, а ионный поток считается приближенно равным нулю. Модель сформулирована для случая как электроположительного, так и для случая электроотрицательного газа. Исследование быстротекущих разрядных процессов в коаксиальном газовом диоде проводится аналогично разделу 3.1 с учетом его реальной геометрии. С целью дальнейшего упрощения моделирования автор диссертации на катоде полагает равным нулю градиент концентрации электронов. Это позволило автору не проводить детального моделирования эмиссионных процессов на катоде. Для верификации предложенных моделей проведено моделирование разрядных процессов в азоте и элегазе (электроотрицательном газе) при атмосферном давлении. При этом для моделирования разряда в элегазе использовались экспериментальные зависимости коэффициентов Таундсенда, прилипания и диффузии от напряженности электрического поля. Показано, что предложенные модели достаточно хорошо описывают пространственно-временные характеристики разрядных процессов в указанных газах.

В Главе 4 автором проведено, так называемое, гибридное моделирование быстрых разрядов с убегающими электронами. В разделе 4.1 рассмотрены основные положения этого метода. Автором

предполагается, что (1) влиянием убегающих электронов в силу малости их концентрации на динамику газоразрядных процессов можно пренебречь; (2) рожденные за счет вторичных ионизационных процессов электроны в момент своего рождения имеют максвелловское распределение; (3) они приобретают направленную скорость, ускоряясь в электрическом поле, создаваемом частицами плазмы разряда; (4) ускоренные электроны гибнут за счет упругих столкновений с атомами газа. Эти допущения позволили автору процесс моделирования разделить на два этапа. На первом этапе решаются уравнения для медленных частиц разрядной плазмы и находятся ее макроскопические характеристики. На втором этапе решается кинетическое уравнение для убегающих электронов. В разделе 4.2 рассмотрены разрядные процессы в планарном газовом диоде с убегающими электронами. Для расчета тока убегающих электронов, регистрируемого за анодной фольгой, автором используется известная эмпирическая формула для кривой ослабления энергии электронов в фольге, предложенная Т. Табатой. Убедительно показано, что предложенная методика позволяет рассчитать как ток убегающих электронов, регистрируемый за анодной фольгой, так и их мгновенный энергетический спектр. В разделе 4.3 исследована динамика убегающих электронов в коаксиальном газовом диоде, а также влияние на нее степени неоднородности распределения концентрации начальной плазмы. Проведено также сравнение восстановленного по экспериментальным кривым ослабления и рассчитанного с использованием теоретической функции распределения убегающих электронов энергетического спектра. Установлено, что теоретический энергетический спектр существенно уже, чем экспериментальный. Установлено существенное влияние степени однородности начальной концентрации разрядной плазмы на форму импульса тока убегающих электронов и их энергетический спектр.

Глава 5 посвящена полностью кинетическому моделированию быстрых разрядов с убегающими электронами. При этом движением ионов полностью пренебрегается. Кинетическое уравнение для них учитывает лишь изменение концентрации за счет упругих и неупругих столкновений. Фазовое пространство для электронов по-прежнему двумерно. Несмотря на присутствие в кинетическом уравнении релятивистского фактора автор, по-прежнему, учитывает в нем лишь ускоряющую силу электрического поля. Для расчета напряженности электрического поля автором используется уравнение Пуассона. В разделе 5.2 автор довольно подробно описывает конкретные формулировки интегралов упругих и неупругих столкновений и способов их упрощений. В разделе 5.3, содержащем основные научные результаты данной главы, моделируются быстрые разрядные процессы в коаксиальном диоде. Как и в главе 4 кинетическое уравнение для электронов дополняется требованием, чтобы сумма плотностей тока смещения и тока электронов равнялась плотности тока, определяемой балластным сопротивлением внешней цепи с учетом падения напряжения на разрядном промежутке. Предложен упрощенный подход расчета интеграла ионизационных потерь, заключающийся в предположении, что первичный электрон рождает при столкновении два электрона, один из которых медленный, а другой быстрый. Проведено сравнение результатов исследования быстрых разрядных процессов в коаксиальном газовом диоде при одних и тех же его геометрических размерах и параметрах внешней цепи, полученных с помощью гибридного и полностью кинетического моделирования. Установлено, что формы импульса тока убегающих электронов, полученных с помощью гибридного и полностью кинетического моделирования, существенно отличаются друг от друга. Форма импульса тока и число убегающих электронов, рассчитанные в рамках полностью кинетического моделирования, хорошо согласуются с экспериментом. В разделе 5.4 в рамках решения одномерной модельной задачи кратко проанализирована возможность ускорения электрона до энергий, превышающих максимальное значение напряжения в межэлектродном промежутке.

В *Заключении* формулируются основные результаты диссертационной работы.

Автореферат включает необходимые сведения о диссертации Кожевникова В.Ю. и полностью соответствует её содержанию. Сама диссертационная работа структурирована по правилам ВАК, содержит требуемые формальные разделы, в достаточной степени иллюстрирована и дает полное представление о проведенных исследованиях и их результатах. Все полученные автором научные результаты обладают несомненной научной новизной и практической ценностью. Они могут быть использованы для анализа результатов экспериментов по изучению взаимодействия неравновесных

потоков заряженных частиц с газом высокого давления и плотной плазмой, проводимых в научных организациях Российской академии наук, Госкорпорации "Росатом", НИЦ "Курчатовский институт", а также при создании современной электрофизической аппаратуры. Её результаты могут быть использованы также при подготовке высококвалифицированных специалистов в области электрофизики, физики плазмы и физической электроники. Достоверность полученных результатов хорошо обоснована тщательностью выбора численных методов решения уравнений предложенных автором физико-математических моделей, а также технических параметров проводимых компьютерных экспериментов. Следует также отметить, что личный вклад автора диссертации в проделанную работу не вызывает сомнения.

Как это типично для любой серьёзной научно-квалификационной работы, по диссертации Кожевникова В.Ю. можно сделать некоторые замечания:

1. На с. 5 в тексте введения, где перечисляются научные организации, чьи сотрудники внесли вклад в науку об убегающих электронах в плотных газах высокого давления, отсутствует упоминание об вкладе сотрудников Института электрофизики УрО РАН (ИЭФ УрО РАН). По моему мнению, экспериментальные и теоретические работы сотрудников ИЭФ УрО РАН, несомненно, достойны упоминания и цитирования.
2. В разделе 1.1 литературного обзора должна была быть, по моему мнению, процитирована работа: Н.М. Зубарев, С.Н. Иванов. Механизм генерации убегающих электронов при высоких (от единиц до десятков атмосфер) давлениях газа. // Физика плазмы, 2018, том 44, №4, с. 397-606. DOI: 10.7868/S0367292118040108, в которой авторы предложили механизм генерации убегающих электронов в неоднородном поле и газах при давлениях, существенно превышающих атмосферное.
3. На с. 26 вместо официального сокращенного названия Института электрофизики УрО РАН – ИЭФ УрО РАН автор использует: ИЭ УрО РАН. На с. 63 в 11 строке пропущен предлог «в».
4. С. 66, 3 строка сверху: Чему в цифрах соответствует утверждение: «При неоправданно низких значениях $\alpha \dots$ »?
5. С. 112, уравнение (2.81): следовало бы в тексте диссертации обсудить применимость предположения о двухмерности фазового пространства (x, v) .
6. С. 112, ф. (2.82): данное соотношение не закон Ампера, поскольку содержит член, являющийся током смещения, который ввел Максвелл значительно позже Ампера. Закон Ампера содержит лишь ток переноса. На самом деле, соотношение (2.82) (и аналогичные ему соотношения (3.6), (3.8), (3.9)) является требованием, чтобы сумма плотностей тока смещения и тока переноса равнялась плотности тока на аноде, определяемой внешней цепью, ее балластным сопротивлением и падением напряжения на разрядном промежутке. Целесообразно было бы обсудить применимость этого и аналогичных требований, поскольку эти соотношения представляют собой, по существу, граничные условия для плотности тока на аноде.
7. На с. 119 утверждается: «Результаты, представленные на рисунке 2.18, иллюстрируют хорошее согласие с оценками, приведенными в литературе, как для области стационарного токопрохождения, так и в переходной области». Возникает вопрос о количественной мере этой «хорошести». Следовало бы привести на рис. 2.18 хотя бы границы этих оценок со ссылками на соответствующую литературу.
8. С. 162, рис. 4.4б: теоретический и восстановленный по экспериментальным кривым ослабления спектры построены в разных физических единицах по оси ординат: теория – число/эВ, эксперимент – относительные единицы. Это, по моему мнению, не позволяет адекватно сравнивать спектры.
9. На с. 171 утверждается: «На качественном уровне данные расчетов согласуются с результатами, приведенными в работе [A.V. Gurevich, G.A. Mesyats, K.P. Zybin, et al. // Phys.

Rev. Lett., 2012, V. 109, No. 8], в которой в субнаносекундном разряде в диоде, имеющем стржевой катод, отчетливо наблюдалась двухмодовая форма импульса тока и энергетического спектра убегающих электронов». Следовало бы в тексте диссертации дать сравнение.

10. С. 219: в ссылаках [144], [150] пропущены инициалы одного из соавторов, а именно, С.А. Шунайлова.

Сделанные замечания не снижают общее положительное впечатление о работе Кожевникова В.Ю. и они не затрагивают содержание основных научных положений, выносимых на защиту, поскольку носят в основном рекомендательный характер. Я полагаю, что ответы на заданные вопросы не составят для него проблемы и дадут специализированному совету Д003.031.02 дополнительные основания для позитивной оценки диссертационной работы. Не вызывает также сомнения, что полученные Кожевниковым В.Ю. результаты будут востребованы научным сообществом для дальнейших применений в национальных и мировых исследовательских центрах.

Общее заключение. Диссертационная работа «Теория быстропротекающих процессов взаимодействия сильных электрических полей с неравновесными потоками электронов в плотных газах, полупроводниках и вакууме», представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной на высоком профессиональном уровне. Результаты автора, Кожевникова В.Ю., в области моделирования быстропротекающих электроразрядных процессов в газах высокого давления довольно хорошо известны мировой научной общественности. Достоверность полученных результатов, их научная новизна, фундаментальная и практическая ценность не вызывают никаких сомнений. Совокупность выполненных исследований по разработке методов и моделей быстропротекающих процессов взаимодействия сильных электрических полей с неравновесными потоками электронов в плотных газах, полупроводниках и вакууме можно квалифицировать как новое научное направление, имеющее важное значение для создания новых типов современной электрофизической аппаратуры. Таким образом, представленная работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а её автор, Кожевников Василий Юрьевич, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки.

Отзыв составлен официальным оппонентом, главным научным сотрудником лаборатории нелинейной динамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН), доктором физико-математических наук, старшим научным сотрудником Волковым Николаем Борисовичем.

Официальный оппонент,
д.ф.-м.н., 01.04.13 – электрофизика, старший научный сотрудник,
главный научный сотрудник
лаборатории нелинейной динамики ИЭФ УрО РАН
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 106
8-(343)-267-86-60, nbv@iep.uran.ru

Н.Б. Волков

Ученый секретарь ИЭФ УрО РАН,
к.ф.-м.н.
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 106
8-(343)- 267-88-18, ss@iep.uran.ru



Е.Е. Кокорина

21 ноября 2019 г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН)
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 106
8-(343)-267-87-96, ss@iep.uran.ru