

Отзыв

**официального оппонента на диссертацию на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук
Швыдкого Георгия Вячеславовича на тему :
«Характеристики высокочастотного емкостного разряда
в квазирадиальном магнитном поле»
по специальности 1.3.9 – «Физика плазмы»**

Развитие плазменных технологий и перспективы их широкого внедрения требуют не только совершенствования существующих методов генерации низкотемпературной плазмы и эффективного управления ее параметрами, но и разработки новых подходов.

Несмотря длительную историю исследований, ВЧ разряды продолжают оставаться предметом интенсивных фундаментальных и прикладных исследований, т.к. являются эффективным методом генерации низкотемпературной плазмы, имеющим много весьма перспективных практических приложений.

Актуальность задачи генерации направленных плазменных потоков при волновом воздействии на плазму продиктована, прежде всего, необходимостью разработки эффективных безэлектродных способов генерации плазмы и создания плазменной тяги.

Среди большого разнообразия видов разрядов в электромагнитных полях высокочастотного диапазона особый интерес представляет возможность получения плазмы низкого давления в инновационной модификации ВЧЕ-разряда при наличии внешнего радиального магнитного поля. Исследования по данному направлению были начаты на кафедре физической электроники МГУ в рамках гранта РФФИ (НК 13-02-01089) в 2013 году.

Данный подход рассматривается как инновационная модель эффективного плазменного источника для космических и наземных технологий, тем самым стимулирует изучение физических свойств разряда такого типа. Несмотря на

почти десятилетнюю историю исследований ВЧЕ разряда с внешним радиальным магнитным полем, они еще не дали исчерпывающих ответов на многие вопросы и экспериментально изучены недостаточно полно. Отсутствуют комплексные исследования влияния различных схем реализации разряда, типа рабочего газа, частоты питающего разряд ВЧ поля, индукции магнитного поля на параметры генерируемого плазменного потока.

Изучение этих и других вопросов, получение систематических экспериментальных данных о параметрах низкотемпературной плазмы, создаваемой в разряде такого типа, является основным объектом исследований представленной диссертации. Ответы на многие вопросы позволят рассматривать его применение в качестве возможного варианта СПД. В этой связи тема диссертационной работы Швыдкого Г.В., которая посвящена исследованию механизма генерации низкотемпературной плазмы в плазменных системах с замкнутым дрейфом электронов (СЗДЭ), является безусловно актуальной.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и основных выводов и включает в себя 161 страницу текста, 79 рисунков, 1 таблицу и списка цитируемой литературы из 109 наименований.

Во введении формулируются основные цели и задачи работы, поставленные для ее достижения, отмечается актуальность исследований и дается краткое изложение результатов диссертации.

Первая глава посвящена анализу возможности использования модификации ВЧЕ разряда в качестве ускорителя с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения (УЗДП). Большая часть главы посвящена физике классического ВЧЕ-разряда, поведению его ВАХ, электротехнических характеристик и плазменных параметров в зависимости от схемы организации разряда.

Во второй главе представлено описание экспериментального стенда на котором выполнялась данная работа. Приведено краткое описание используемых диагностик и методик обработки экспериментальных результатов.

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований по изучению поведения интегральных характеристик разряда и локальных параметров плазмы в зависимости от схемы реализации разряда и изменения рабочих параметров.

Четвертая глава диссертации посвящена моделированию и анализу поведения электрофизических характеристик модифицированного ВЧЕ разряда при изменении схемы организации разряда и изменении разрядных условий. Проведено сравнение результатов моделирования с экспериментально полученными.

В заключении представлены основные результаты и выводы по работе.

Основная цель, которой посвящена диссертационная работа состояла в систематическом экспериментальном исследовании процессов, имеющих место в ВЧЕ-разряде при наличии радиального магнитного поля в зависимости от варьируемых разрядных условий (схема организации разряда, частота ВЧ генератора, уровень поглощенной мощности, величина индукции магнитного поля в пределах разрядного канала, расхода и типа плазмообразующего газа). Представленные в ней экспериментальные результаты свидетельствуют о четком влиянии ряда означенных параметров на выходные параметры генерируемого плазменного потока.

Экспериментально показано увеличения потенциала плазмы при переходе от схемы с разомкнутым по постоянному току подключением рабочего электрода к варианту замкнутого состояния, приводящем к росту плотности генерируемой плазмы и увеличению средней энергии ускоренных ионов. Эффективность работы замкнутой схемы возрастает при подаче дополнительного постоянного напряжения на рабочий электрод. Полученные результаты показывают преимущество такой схемы реализации разряда, так как позволяют посредством изменения соотношения мощностей, вкладываемых в разряд по постоянному или ВЧ току варьировать плотность и энергию ионной компоненты.

Значительное внимание в работе уделено изучению поведения импеданса разряда при изменении схем реализации разряда и рабочей частоты в типичных

экспериментальных условиях для последующего сравнения результатов с математической моделью, базирующейся на классической столкновительной проводимости плазмы поперек магнитного поля. На основе сравнительного анализа выявлено, что наблюдаемые экспериментально токи существенно выше, нежели значения, полученные на численной модели. Показано, что модельное увеличение частоты столкновения, приводит к тому, что расчетные значения токов и тенденции их изменений при варьировании разрядных условий совпадают с экспериментально наблюдаемыми.

Полученные результаты существенно расширили представление о процессах, имеющих место в разрядах такого типа с учетом схемы его реализации, и несомненно представляют как фундаментальный, так и практический интерес.

Переходя к общей оценке диссертации, нужно отметить, что написана она четко, ясно и в ней мало технического брака. В тексте встречается некоторое число опечаток и элементов разговорной лексики. Следует также отметить некую небрежность при вводе обозначений, без их описания (V_{disp} , V_{dc} , I_{dc} и др.), написания размерностей (МГц, МНЗ) и приведенных значений физических величин (1356 МГц). В списке цитированной литературы приведены работы, на которые в тексте отсутствуют ссылки: [97]. Ряд ссылок в тексте диссертации даны на работы, в которых отсутствуют вопросы, обсуждаемые в тексте. Так, на стр. 84 написано «...электронного токов на зонд [47].», хотя в указанной работе отсутствует обсуждение зондовых измерений. На стр. 89, где обсуждается применение спектрометрических измерений дана ссылка на [49], в которой отсутствуют даже упоминание о таких измерениях.

Имеются некоторые замечания по стилю изложения материала в диссертационной работе.

На мой взгляд, материал первой главы, где должно было быть показано текущее состояние исследований ВЧЕ-разряда в присутствии радиального магнитного поля (работы по этому направлению идут с 2013 года), практически полностью посвящен ВЧЕ-разряду без магнитного поля. Обсуждаемые вопросы

ориентированы на определение условий, влияющих на эффективность работы ВЧ ускорителя с замкнутым дрейфом электронов без привязки к реализуемой в эксперименте конфигурации разряда несомненно важны и логично изложены. Однако, обширный материал по исследуемой проблеме, опубликованный ранее, использован крайне скупо. Отсутствуют положения предшествующих исследований для сопоставления с полученными экспериментальными результатами и определения их взаимосвязей. Вывод приведенный в конце первой главы «...Обзор литературы показал возможность и перспективность использования ЕВЧР вместо разряда постоянного тока для получения ускоренного пучка ионов в геометрии СПД.» немного удивляет, т.к. эта возможность была показана ранее [Задириев И. И.: дис.канд. физ.-мат. наук: 01.04.08 – М., 2017].

Материал второй главы, посвященный постановке эксперимента и применяемым диагностикам, а также методикам обработки результатов измерений, представлен весьма ограничено. Отсутствуют данные о том, как, чем и с какой точностью проводились измерения магнитного поля, и какая составляющая индукции магнитного поля приведена на рис. 27. Отсутствуют данные о диапазоне используемых мощностей генераторов ВЧ. Весьма поверхностно представлена информация о методике обработки зондовых характеристик, погрешностях и расчету корректирующего множителя (стр. 83) для определения концентрации и температуры с учетом локализации зонда в разрядном канале, хотя эти измерения являются практически основными в исследовании. Описание спектральных измерений приведено весьма скупо. Отсутствует какая-либо информация о калибровке, пространственном разрешении и обосновании применяемой корональной модели. Аналогичные вопросы возникают и для диагностики ионной компоненты методом задерживающего потенциала.

Материал представленный, в 3-ей главе, несколько перегружен фактическим материалом различной значимости, поэтому несколько затрудняется выделение основных результатов на фоне второстепенных. Бóльшая

часть графических зависимостей приведена без указания схемы реализации разряда, давления плазмобразующего газа, возможной ошибки результата измерений. Отсутствуют первичные экспериментальные данные (зондовые характеристики, обзорные оптические спектры излучения, энергетические спектры) в привязке к изменяемым параметрам разряда, что способствовало бы большей убедительности в правомерности полученных выводов. Практически все экспериментальные результаты приведены в виде интегральных характеристик (ионный ток насыщения, интенсивность излучения, средние энергии). Ряд параметров приведен в относительных единицах, хотя не оговорена их нормировка. В тексте диссертации отсутствуют данные по абсолютным значениям температур и приводятся исключительно качественные пояснения. Ввиду того, что схема реализации разряда являлась практически определяющим фактором в определении эффективности разряда, необходимо было бы приводить однотипные измерения для различных схем его реализации.

В целом диссертация Швыдкого Г.В. представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, выполненную на высоком экспериментальном уровне. Приведенные недостатки не умаляют достоинств работы, выявленные закономерности получены с помощью широкого комплекса средств диагностики и достоверность результатов не вызывает сомнений. Основные результаты работ изложены в научных статьях, индексируемых в международных реферативных базах, содержание диссертации достаточно полно отражено в автореферате.

Как по общему уровню, так и по ценности полученных результатов представленная диссертационная работа Швыдкого Г.В. «Характеристики высокочастотного емкостного разряда в квазирадиальном магнитном поле» соответствует требованиям, предъявляемым Положением о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Автор рассмотренной диссертации Швыдкой Георгий

Вячеславович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 - Физика плазмы.

Официальный оппонент, Андреев Виктор Викторович, к.ф.м.н., доцент, заместитель директора института физических исследований и технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов».

117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.6, +7(495)955-09-20, andreev-vv@rudn.ru

(подпись)

(Андреев В.В.)

(расшифровка подписи)

Дата « ____ » _____ 20 ____ г.

Подпись В.В. Андреева ~~удостоверено~~

Ученый секретарь

Ученого совета РУДН

В.М.Савчин

~~Печатная~~ ~~организации~~