

Отзыв

на автореферат диссертации Кодирзода Заъфари Абдуламина «Структура электромагнитного поля и резонансы в высокочастотных емкостных разрядах низкого давления», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – «физика плазмы».

В диссертации Кодирзода Заъфари Абдуламина рассматриваются электродинамические свойства высокочастотного емкостного (ВЧЕ) разряда низкого давления. Этот тип разряда широко используется во множестве технологических процессов, в том числе при производстве современных процессоров и микросхем памяти. Повышение производительности установок потребовало увеличения размера обрабатываемых подложек, что вынудило исследователей пересмотреть подход к описанию электродинамики разряда, отказавшись от модели плазменного конденсатора. При этом для описания разряда необходимо использовать модель длинных линий. Автор представил электродинамическую модель разряда и впервые аналитически рассчитал амплитуды распространяющихся и затухающих мод в двух многомодовых длинных линиях, состоящих из плазмы и слоев пространственного разряда.

Следующим шагом был расчет импедансов, вносимых каждым из типов мод, а также расчет импеданса разряда в целом. Нераспространяющиеся моды поля вносят индуктивный импеданс, а импеданс, вносимый поверхностной волной, зависит от соотношения длины линии и длины поверхностной волны. Полученные кривые зависимости импеданса от плотности электронов позволяют оценить устойчивость разряда при заданной плотности электронов.

Последним шагом было численное моделирование пространственного распределения электромагнитного поля и импеданса с помощью программы Comsol Multiphysics. Сравнение результатов аналитических расчетов и численного моделирования, показало их хорошее совпадение. Полученные Кодирзодой З.А. результаты следует считать **актуальными новыми и интересными**.

По работе можно сделать следующие вопросы и замечания.

1) Из проведенных в работе расчетов следует, что дисперсия поверхностной волны, благодаря которой энергия доставляется в центральные области разряда, зависит от плотности плазмы, толщины слоя и частоты волны. Слой пространственного заряда обладает нелинейной

вольтамперной характеристикой и является динамическим объектом, толщина которого изменяется, следуя за напряженностью электрического поля и зависит от ее значения. Нелинейность вольтамперной характеристики должна приводить к генерации гармоник. Автор описывает слой пространственного заряда как статический объект с постоянной толщиной. Насколько оправданным является этот подход?

2) Необходимо отметить достаточно упрощенную постановку модели разряда, представленную для численных расчетов. Из автореферата следует, что решалась только система уравнений Максвелла для реальной геометрии разрядной камеры. При этом не рассматривалась система диффузионно-дрейфовых уравнений, описывающих поведение заряженных частиц в плазме и слоях. На наш взгляд, учет этих уравнений позволил бы более строго провести сопоставление результатов аналитических и численных расчетов.

Данные замечания не умаляют полученных автором результатов. Работа выполнена на высоком научном уровне и опубликована в ведущих журналах по специальности. Постановка электродинамической задачи, ее аналитическое решение и проведенное численное моделирование свидетельствует о высокой научной квалификации автора. Диссертация представляет собой законченное научное исследование и удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова». Диссертант Кодирзода Заъфари Абдуламин безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – «физика плазмы».

д.ф.-м.н., профессор

Тимеркаев Борис
Ахунович

к.ф.-м.н., доцент

Сайфутдинов Алмаз
Ильгизович

Контактные данные:

Телефон: +78432310224.

E-mail: btimerkaev@gmail.com, as.uav@bk.ru

Место работы: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева-КАИ». Ул. Карла Маркса, 10, Казань, Республика Татарстан, 420111

Под зав.	Тимеркаев В. А., Сайфутдинов А. И.
и КНИТУ	