

## ОТЗЫВ

Члена диссертационного совета на диссертацию Мурильо Хиллер Оскара Габриэля «Формирование функции распределения ионов вблизи поверхности при отрицательном потенциале в газоразрядной плазме», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 - Физика плазмы.

Тема диссертационной работы Мурильо Хиллер Оскара Габриэля, безусловно, является **актуальной**. Во всех физических и технических плазменных устройствах около поверхности электродов существует скачок потенциала. В этой области отсутствует квазинейтральность, а функции распределения заряженных частиц являются сильно неравновесными. Кроме того, во многих случаях в пристеночном слое необходимо учитывать резонансную перезарядку ионов и ионизацию. При физических исследованиях параметров плазмы с помощью зондовых измерений для корректной интерпретации экспериментальных данных требуется знать функцию распределения ионов по скоростям (ФРИ) с хорошей точностью. Из технических устройств следует отметить устройства, где происходит взаимодействие разогнанных из плазмы ионов с поверхностью электрода, например, при обработке поверхностей, имплантации и плазменном напылении.

Сложность изучения приэлектродного слоя связана с тем, что здесь необходимо решать самосогласованную систему, состоящую из кинетических уравнений для заряженных частиц и уравнения Пуассона. Часто для практики нужно знать только такие характеристики ионного потока на стенку, как концентрация и средняя энергия ионов. Для бесстолкновительного слоя их можно определить, воспользовавшись известным критерием Бома, который был получен примерно 70 лет назад. Однако при наличии столкновений заряженных частиц он не работает. Попытки модернизировать этот критерий так, чтобы учесть столкновения, оказались не слишком успешными и не позволили интерпретировать данные многих экспериментов. Решения кинетических уравнений при грубых упрощениях не позволили вычислить структуру квазинейтрального предслоя и параметров ионного потока в нем, что не позволило адекватно описывать экспериментальные данные.

Диссертант последовательно решал задачу о построении ФРИ в приэлектродном слое. Сначала он решил кинетическое уравнение Больцмана для случая резонансной перезарядки ионов. При этом он рассматривал реальные сечения перезарядки, а также реальный вид ФРИ в невозмущенной плазме. Кинетическое уравнение было сведено к системе, состоящей из одного дифференциального уравнения первого порядка и одного интегро-дифференциального уравнения первого порядка. Эта система уравнений решалась методом последовательных приближений. Было также исследовано влияние формы функции распределения электронов на характер решения. Все это позволило с хорошей точностью рассчитать поток ионов на поверхность и его энергию, что и требуется во многих плазменных объектах. Затем задача была обобщена на случай, когда вектор электрического поля направлен под произвольным углом к поверхности электрода, что важно при интерпретации зондовых измерений. Проведено сравнение расчетной ФРИ и параметров возмущенного слоя с известными из литературы экспериментальными данными. Показано, что полученная теоретически ФРИ в широком диапазоне условий хорошо описывает экспериментально измеренные ФРИ. Далее диссертант учел ионизацию в возмущенном пристеночном слое, что важно в некоторых случаях. Здесь

09/2 - 150 от 04.03.2020

задача свелась к системе четырех дифференциальных уравнений, которая решалась методом последовательных приближений. Показано, что ионизация в возмущенном пристеночном слое может заметно влиять на структуру как квазинейтрального предслоя, так и пристеночного слоя, где существенно нарушается квазинейтральность.

В диссертации получены следующие результаты, обладающие несомненной **новизной**. Построена теория, которая позволяет рассчитывать ФРИ вблизи поверхности электрода при отрицательном потенциале между плазмой и электродом при произвольной ориентации между нормалью к возмущающей поверхности и электрическим полем. В теории учтены основные физические процессы, существующие в слое между разрядной плазмой и электродом: резонансная перезарядка, ионизация в возмущенном пристеночном слое, реальная ФРИ в невозмущенной плазме, зависимость сечения рассеяния от энергии, а также влияние вида функции распределения электронов.

К **достоинствам диссертации** можно отнести широкое использование аналитических и численных методов, современных программных пакетов, физическую интерпретацию полученных результатов, а также сравнение теории с экспериментальными данными.

По работе имеется два **замечания**.

1. Диссертация не свободна от ошибок, связанных с употреблением запятых в пунктуации.
2. В начале стр. 91 имеется опечатка при ссылке на формулу – вместо ссылки (64) нужна ссылка на уравнение (70).

Сделанные замечания ни в коей мере не умаляют достоинств диссертанта и диссертации, полученные результаты свидетельствуют о высоком уровне проведенных исследований и полученных результатов.

Диссертация Мурильо Хиллер Оскара Габриэля на тему: «Формирование функции распределения ионов вблизи поверхности при отрицательном потенциале в газоразрядной плазме» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 01.09.2016 № 6821/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель **Мурильо Хиллер Оскар Габриэль заслуживает присуждения ученой степени** кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 - Физика плазмы. Пункт 11 указанного Порядка диссертантом не нарушен.

Член диссертационного совета  
доктор физико-математических наук,  
снс, зам. руководителя отделения Физики Плазмы,  
Атомной Физики и Астрофизики  
ФТИ им. А.Ф. Иоффе

2 марта 2020 г.

  
В.И. Кузнецов

Подпись Кузнецова В.И. удостоверение  
зав. отделом кадров ФТИ им. А.Ф. Иоффе

