

ОТЗЫВ

официального оппонента Александра Николая Леонидовича

на диссертацию Богдановой Марии Андреевны

на тему: «Особенности формирования энергетического спектра ионов на поверхности электрода в реакторах плазмохимического травления», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, по специальности 01.04.15 – «Физика и техника наноструктур, атомная и молекулярная физика»

Диссертационная работа Богдановой М.А. посвящена экспериментальному изучению процессов, формирующих энергетический спектр ионов, их поток и состав вблизи поверхности управляемого электрода в реакторах плазмохимического травления на основе высокочастотных разрядов низкого давления. Эта тематика имеет прямое отношение к современным задачам микроэлектроники. Поэтому актуальность работы Богдановой М.А. не вызывает сомнений.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формируются цели исследования, описывается объект исследования, излагаются выносимые на защиту основные положения, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также приводится краткое изложение содержания диссертационной работы.

Первая глава носит обзорный характер. В ней описывается роль плазмы в окружающем мире, и подчеркивается важность плазменных процессов в производстве современных микросхем. Рассматриваются различные стадии обработки поверхности в плазменных технологиях, и указывается на необходимость контроля характеристик ионов, поступающих из плазмы на обрабатываемую поверхность. Формулируются проблемы, которые при этом необходимо решить применительно к разным модификациям реакторов плазменного травления.

Во второй главе изучается поток ионов из плазмы двухчастотного индукционного ВЧ разряда в аргоне и молекулярном водороде на электрод. При этом источник плазмы является удаленным. В качестве диагностических методов используется зонд Ленгмюра (измерение параметров плазмы) и сеточный анализатор с задерживающим потенциалом.

Кроме того, поток ионов контролируется методом импульсной модуляции автосмещения, который не приводит к возмущению плазмы. С помощью оценки потока ионов на основе измерений параметров плазмы и второго метода удастся провести верификацию метода импульсной модуляции автосмещения.

В третьей главе представлены результаты исследования энергетических спектров ионов вблизи электрода в асимметричном индукционном ВЧ разряде в аргоне и молекулярном водороде. Предлагается осуществить диагностику этих спектров на основе аналитической модели движения ионов в бесстолкновительном слое, которая позволяет связать характеристики ионов на поверхности электрода с параметрами слоя и свойствами плазмы в объеме. Эта диагностика тестируется при сравнении полученных результатов с измерениями сеточным анализатором с задерживающим потенциалом. Определяются критические давления, выше которых эта модель не работает, и необходимо учитывать столкновения ионов с нейтральными частицами в слое.

В четвертой главе рассматривается влияние столкновений ионов с нейтральными частицами в предслое и слое на соотношение, связывающее поток ионов на электрод и плотность плазмы в объеме. Исследования проводятся для емкостного ВЧ разряда в аргоне, азоте и ксеноне. На основе измерений методом импульсной модуляции автосмещения и зондовыми методами (плоский зонд на поверхности и ленгмюровский зонд в объеме), а также с помощью численного моделирования в рамках модели МЧЯ МК определяется коэффициент пропорциональности, связывающий поток ионов на стенку и плотность плазмы в объеме. Делается вывод о том, что этот коэффициент зависит от давления и не зависит от плотности плазмы. Этот вывод позволяет в дальнейшем достаточно легко параметризовать связь между потоком на стенку и характеристиками плазмы.

Пятая глава посвящена изучению ионного состава асимметричного емкостного ВЧ разряда в смесях аргона с водородом. Этот состав определяется в объеме с помощью масс-спектрометрии, а на поверхности электрода - извлекается из энергетических спектров ионов, полученных с помощью сеточного анализатора с задерживающим потенциалом. Из измерений следует, что добавление водорода приводит к изменению сортов ионов: ионы Ar^+ уступают место ионам H_3^+ и ArH^+ . Экспериментальные данные сравниваются с результатами расчета ионного состава методом МЧЯ МК. Делается вывод об адекватности теоретического подхода, а также о том, что процессы в слое слабо влияют на состав ионов.

В шестой главе проводится сравнение энергетических спектров ионов на электрод, полученных по предложенной схеме быстрого расчета и измеренных сеточным

анализатором с задерживающим потенциалом. При этом рассматривается асимметричный емкостной ВЧ разряд в аргоне, азоте и ксеноне. Наблюдаемые в полученных спектрах пики приписываются столкновениям ионов с нейтральными частицами и влиянию приложенного ВЧ смещения. Результаты расчета, несмотря на его простоту, достаточно точно описывают основные зависимости спектра ионов на электроде от параметров слоя и характеристик разряда в объеме. Это позволяет в будущем использовать данный подход при разработке невозмущающей диагностики энергетических спектров ионов в реакторах плазмохимического травления.

В заключении приведены основные результаты и выводы диссертационной работы.

Степень обоснованности научных положений и выводов, полученных соискателем, достаточно высокая.

Новизна и обоснованность выводов не вызывает сомнений. Достоверность полученных результатов подтверждается использованием надежных экспериментальных методов и согласием эксперимента с надежными расчетами.

Результаты диссертационной работы достаточно полно опубликованы в журналах из перечня ВАК РФ, большинство – в высокорейтинговых международных журналах.

По представленной работе можно сделать следующие **замечания**.

1. Для большинства экспериментальных результатов не приведены на графиках погрешности измерений. Этот вопрос недостаточно освещен и в тексте диссертационной работы.

2. На рис. 2.4 приведены результаты измерения плотности электронов в плазме индукционного ВЧ разряда, полученные с помощью нескольких экспериментальных методов. Различие между этими данными достигает порядка величины. Остается непонятно, с чем это связано.

3. В диссертационной работе приводятся результаты расчетов методом частиц в ячейке с учетом столкновений методом Монте-Карло. В то же время практически отсутствует описание этого метода в тексте, из которого трудно понять, кто проводил эти расчеты.

В целом замечания не затрагивают основных выводов работы, выполненной на высоком научном уровне.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.04.15 – «Физика и техника наноструктур, атомная и молекулярная физика», удовлетворяет критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена

согласно п. 3.1 этого Положения. Соискатель Богданова Мария Андреевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.15 – «Физика и техника наноструктур, атомная и молекулярная физика».

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук,
профессор, главный научный сотрудник, Лаборатория импульсных плазменных систем,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»

Александров Николай Леонидович



06 декабря 2019 г.

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.08 – Физика плазмы

Адрес места работы:

141700, Россия, Московская обл., г. Долгопрудный,
Институтский переулок 9, Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт
(государственный университет)»

Телефон: e-mail:

Сайт Московского физико-технического института: www.mipt.ru

Подпись Александрова Н. Л. заверяю:

Ученый секретарь Федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт
(государственный университет)» (МФТИ)

к.ф.-м.н.

06 декабря 2019 г.



Ориг. Иван Иванович Скалько

141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9,