

ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

о диссертационной работе Богдановой Марии Андреевны
«Особенности формирования энергетического спектра ионов
на поверхности электрода в реакторах плазмохимического травления»,
представленной на соискание учёной степени кандидата
физико-математических наук по специальности 01.04.15
«Физика и технология наноструктур, атомная и молекулярная физика».

Научную работу М. А. Богданова начала еще студенткой на кафедре атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники физического факультета МГУ в 2011 году. После окончания с отличием физического факультета МГУ М.А.Богданова продолжила работу над темой представленной диссертации в аспирантуре физического факультета МГУ в 2014 – 2018 годах и далее после окончания аспирантуры. Данная работа была успешно завершена к настоящему времени. За время работы над диссертацией, М.А.Богдановой был выполнен большой объем экспериментальных и теоретических исследований, результаты которых опубликованы в ведущих зарубежных журналах и представлены на международных и российских конференциях. Диссертационная работа посвящена исследованию энергетического спектра ионов в реакторах плазмохимического травления. Известно, что плазменные источники широко используются в микротехнологии, а управление составом, потоком и энергией ионов, взаимодействующих с поверхностью, позволяет обеспечить высокую степень контроля процессом травления с возможностью обеспечить слоевое травление с размером слоя вплоть до атомарного уровня (atomic layer etching). Требования к точности контроля технологического процесса становятся жёстче при развитии технологий с топологическим размером < 20 нм. Метод плазмохимического травления материала называют ионно-стимулированным благодаря ионам, взаимодействие которых с поверхностью материала существенно определяет скорость, анизотропию и селективность процесса травления. Добиться высокой точности такого процесса можно с помощью прецизионного *in situ* контроля энергии и потока бомбардирующих ионов на поверхности обрабатываемого материала. В данной работе рассматривается проблема повышения точности контроля энергетического спектра ионов и её возможное решение с помощью изучения процессов в плазме - как в объёме, так и в переходных областях, называемых предслоем и слоем - в условиях, реализуемых в технологических реакторах. Именно эти процессы отвечают за формирование энергетического спектра ионов, их поток и состав. На основе результатов проведённого исследования может быть выведен наиболее оптимальный способ *in situ* управления ионами в технологическом процессе.

Коротко, основные результаты, полученные М.А.Богдановой. в рамках данной диссертации, могут быть сформулированы следующим образом:

1. Благодаря экспериментальным методам определения потока ионов на электрод, таким как метод оценки из измерений параметров плазмы зондом Ленгмюра, а также из прямых измерений сеточным анализатором с задерживающим потенциалом (RFEA), был верифицирован новый не возмущающий плазму *in situ* метод измерения потока ионов на электрод - метод импульсной модуляции автосмещения.
2. В ходе исследования влияния процессов в предслое и слое на ионный поток было установлено наличие эффекта собирания ионов в Ar-плазме. Был также проведён анализ методов определения ионного потока, учитывающих и не учитывающих данный эффект.
3. С помощью экспериментального исследования формы, положения и ширины энергетического спектра ионов на электроде с помощью сеточного анализатора (RFEA) в зависимости от таких разрядных параметров, как давление и сорт газа, амплитуда и частота подаваемого на электрод ВЧ-смещения, был верифицирован новый не возмущающий плазму *in situ* метод оценки энергетических спектров ионов на электроде. Был проведён анализ влияния соударений ионов в слое и предслое на форму энергетического спектра ионов на основе собранных экспериментальных данных.
4. Проведён анализ зависимости профиля плазмы в области слоя и предслоя от давления с помощью МК МЧЯ модели собирания ионного тока плоским зондом (электродом). Зависимость профиля плазмы в области слоя и предслоя от давления была получена с помощью экспериментального определения потока ионов на электрод двумя независимыми методами – методом импульсной модуляции автосмещения и плоским зондом, размещённым на поверхности электрода; а также экспериментального определения плотности плазмы в центре разряда зондовыми методами (зонд Ленгмюра и hairpin-зонд). Установлено, что коэффициент k , определяющий соотношение между потоком ионов на электрод и плотностью плазмы в центре разряда, главным образом определяется давлением и сортом газа и нечувствителен к плотности плазмы.
5. Была проведена верификация МК МЧЯ модели симметричного ВЧ ССР разряда для расчёта ионного состава в объёме плазмы в Ar/H₂ смесях с помощью оценки ионного состава в объёме плазмы из измерений масс-спектрометром и из измерений энергетических спектров ионов сеточным анализатором (RFEA) на поверхности электрода.

6. Проведено исследование влияния процессов в объёме плазмы и в слое на ионный состав Ar/H₂ плазмы, в результате которого установлено, что процессы в слое не имеют значительного влияния на ионный состав в рассматриваемых условиях.
7. Была верифицирована схема быстрого расчёта энергетических спектров ионов на основе метода МК с помощью сеточного анализатора (RFEA) в зависимости от таких разрядных параметров, как сорт газа, амплитуда и частота подаваемого на электрод ВЧ-смещения;
8. С помощью схемы быстрого расчёта спектров, а также серии прямых измерений анализатором RFEA было проведено исследование эффекта асимметрии разряда на энергетический спектр ионов на поверхности электрода.

Результаты проведенной М.А.Богдановой работы углубляют понимание процессов, происходящих как в плазменном слое, так и в объёме, в условиях, реализуемых в технологических реакторах. Основной особенностью таких разрядов является асимметрия, приводящая к возникновению нелинейности в слое. Результаты данной работы по изучению влияния нелинейности слоя на движение ионов будут также полезны для дальнейшего исследования разрядов, использующих эффект электрической асимметрии в целях управления энергетическим спектром ионов (*waveform tailoring*). В данной работе также исследуется вопрос о применимости и адекватности результатов различных численных и аналитических подходов в случае асимметричных двухчастотных ВЧ разрядов. С практической точки зрения, результаты, полученные в рамках данного исследования, могут быть использованы для разработки комплекса методов *in situ* диагностик энергии и потока ионов при варьировании внешних параметров разряда. Интеграция такого комплекса позволит осуществить прецизионную отладку плазмохимического процесса травления и повысить его воспроизводимость.

Богдановой М. А. принадлежит основная идея диссертационной работы, заключающаяся в осуществлении комплексного подхода к изучению процессов в плазме реакторов травления в условиях, реализуемых в современных технологических реакторах. Этот подход включает в себя как экспериментальные, так и «быстрые» численные методы. Такой подход даёт возможность выявить физически обоснованные тренды и соотношения между разрядными параметрами и потоком и энергией ионов, на основе которых может быть разработан комплекс не возмущающих плазму *in situ* диагностик для контроля над ионными процессами на поверхности формирующихся наноструктур в режиме реального времени. М.А.Богданова принимала активное участие в постановке всех включённых в диссертационную работу исследований. Представленные экспериментальные результаты получены либо самой М.А.Богдановой, либо при её активном участии. Для данной рабо-

ты М.А.Богданова наладила ряд ключевых диагностик плазмы, включая не возмущающий плазму метод *in situ* диагностики ионного потока – метод импульсной модуляции авто-смещения и метод прямых измерений энергетических спектров ионов на поверхности ВЧ-нагруженного электрода с помощью сеточного анализатора с задерживающим потенциалом. М.А.Богданова использовала различные аналитические и численные модели для интерпретации результатов эксперимента. Кроме того, М.А.Богданова принимала участие в автоматизации применявшихся здесь диагностик плазмы, включая автоматизацию научного оборудования, измерительного процесса, обработки полученных данных и сохранения их в электронную базу данных лаборатории. Также, М.А.Богданова участвовала в проектировании подвижной системы hairpin-зонда, что позволило провести измерения радиального профиля плотности плазмы; приняла участие в сборке сеточного анализатора с задерживающим потенциалом (RFEA) и плоского зонда. Автор подготовила публикации по всем полученным в рамках изложенного исследования результатам, а также представила результаты на нескольких научных конференциях.

Таким образом, можно заключить, что в представленной М.А.Богдановой диссертационной работе получены новые результаты, безусловно представляющие как теоретический, так и практический интерес. Нужно отметить, что в процессе работы над диссертацией М.А.Богданова зарекомендовала себя, как инициативный и творческий исследователь, которая выросла в высоко квалифицированного специалиста. Её характеризуют ответственность и организованность при проведении исследований, интуиция экспериментатора, умение работать с научной литературой и приобретать новые знания и навыки.

Рекомендую диссертацию Богдановой Марии Андреевны «Особенности формирования энергетического спектра ионов на поверхности электрода в реакторах плазмохимического травления» к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.15 «физика и технология наноструктур, атомная и молекулярная физика».

Научный руководитель

Заведующий отделом микроэлектроники НИИЯФ МГУ,
доктор физико-математических наук, профессор


Рахимов А.Т.

Подпись заведующего отделом микроэлектроники
НИИЯФ МГУ профессора Рахимова А. Т. заверяю.

Ученый секретарь Ученого совета НИИЯФ МГУ



Сигаева Е.А.