

На правах рукописи

РГБ ОД
19 КОН/2000

ОБРУЧНИКОВ Александр Евгеньевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ
МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА В АРГОНЕ И ДЕЙТЕРИИ**

Специальность 02.00.04 - физическая химия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена на кафедре молекулярной физики
Ивановского государственного университета

Научный руководитель:

доктор химических наук, профессор

Зайцев Владимир Владимирович

Официальные оппоненты:

доктор химических наук, профессор

Светцов Владимир Иванович

кандидат физико-математических наук

Приходько Андрей Степанович

Ведущая организация:

ОАО Центральный научно-исследовательский технологический институт "ТЕХНОМАШ", г. Москва.

Защита состоится 31 мая 2000 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета К 063.84.07 при Ивановском государственном университете по адресу: 153025, Иваново, ул. Ермака, д. 39, к. 453.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного университета.

Автореферат разослан 30 апреля 2000 г.

Отзывы просим направлять по адресу:
153025, Иваново, ул. Ермака, д. 39.

Ученый секретарь
диссертационного совета К 063.84.07

к.ф.-м.н.



Машков А.В.

Р332 23 02

~~ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ~~

Актуальность темы.

Одним из перспективных направлений в области развития новых и ологически безопасных источников энергии является получение энергии помощью управляемого термоядерного синтеза. Наиболее перспективными устройствами для осуществления этого синтеза являются установки типа ТОКАМАК. Одной из проблем, связанных с работой таких устройств является распыление внутреннего покрытия вакуумной камеры. Одним из перспективных материалов для такого покрытия является углерод, но его распыление ведет к осаждению пленок, содержащих углеводороды, а следовательно к поглощению дейтерия и трития из газовой фазы. Для всестороннего исследования этого явления необходимо изучить закономерности процесса распыления углерода в дейтерий - тритиевой плазме. Изучение этого процесса в самом ТОКАМАКе - является весьма дорогостоящим экспериментом, поэтому актуальным является изучение закономерностей распыления углерода в водородной плазме в более простых устройствах и применение выявленных закономерностей к процессам распыления в ТОКАМАКе. Использование для моделирования процессов распыления углерода ионами дейтерия плазмы магнетронного разряда представляется предпочтительным, так как он позволяет работать в нужном диапазоне давлений (1 - 5 Па) и в широком диапазоне потоков ионов на мишень. В настоящее время не существует достаточно полного теоретического описания, позволяющего построить полноценную модель процессов, происходящих в магнетронном разряде, поэтому приведенная в данной работе эмпирическая модель и расчет на ее базе процессов, происходящих в объеме магнетронной распылительной системы (МРС) при распылении графитовой мишени ионами дейтерия представляются актуальными.

Предложенный подход к моделированию магнетронного разряда представляет интерес и в плане традиционного применения магнетронного распыления - нанесения тонких пленок с желаемыми свойствами, поскольку МРС является в настоящее время основным инструментом для осаждения пленок в производстве изделий микроэлектроники. В связи с этим, изучение процесса получения и свойств тонких пленок также является актуальным.

Целью работы являлось построение адекватной модели разряда в МРС и вычисления на ее базе распределения концентраций атомарного дейтерия, а также применение результатов моделирования для оптимизации процесса получения тонких пленок TiO_2 , напыленных на сегнетозлектрическую подложку и экспериментальное исследование их свойств.

Научная новизна:

1. Установлены особенности влияния изменения давления на зондовые характеристики в плазме аргона при разряде в МРС и уточнена методика вычисления параметров плазмы при пониженных давлениях.

2. Предложена приближенная модель разряда в МРС (распределение температуры и концентрации электронов по объему зоны свечения) и на основе произведен расчет концентраций активных частиц в плазме аргона и дейтерия в диапазоне токов разряда 0,08 - 1,5 А и давлений 0,2 - 25 Па.

3. Показано, что эффект “стягивания” разряда к мишени с увеличением давления может быть объяснен различиями в распределении по расстоянию от мишени концентраций возбужденных атомов из-за изменения температуры электронов.

4. Обнаружены пьезоэлектрические свойства пленки TiO_2 , нанесенной на сегнетоэлектрическую подложку (триглицинсульфат), в том числе при температурах, более высоких, чем точка Кюри подложки. Подобный эффект запрещен для объемного монокристалла, так как он имеет точечную группу $4/m\bar{3}m$. Выполнено исследование диэлектрических свойств пленки TiO_2 в диапазоне частот 10^4 - 10^6 Гц.

Достоверность получаемых результатов достигалась комплексным применением экспериментальных методов и модельных расчетов. Абсолютные значения погрешностей экспериментов и расчетов не превышали известные из литературных данных.

Практическая ценность работы.

Полученные результаты могут быть использованы для расчета концентраций и потоков активных частиц в МРС, а следовательно и для моделирования процессов эрозии в ТОКАМАКе, для оптимизации процесса илучения тонких пленок с желаемыми свойствами, а также при построении моделей физико-химических процессов в разряде МРС.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и симпозиумах:

VIII Всесоюзная конференция по физике газового разряда, Рязань (1993), 37th microsymposium on biodegradable polymers: chemical, biological & environmental aspects, Prague (1996), итоговой научной конференции ИВТ Иванова (1997), 3 Российской конференции “Высокие технологии в промышленности России”, Москва (1997), 1 Всероссийской научной конференции “Молекулярная физика неравновесных систем”, Иваново (1999), international symposium on diamond films and related materials, Kharl (1999), 6 международной конференции “Высокие технологии в промышленности России”, Москва (2000).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ

Структура и объем работы:

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы. Общий объем диссертации - 120 страниц, рисунков - 58, таблиц - 12. Библиография включает 125 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируется цель работы, показана научная новизна и практическая ценность.

Литературный обзор состоит из двух частей.

В первой части рассмотрена общая концепция разряда в планарной МРС, зависимость его вольт-амперных характеристик (ВАХ) от индукции магнитного поля, давления и материала мишени, влияние на разряд реактивного газа, результаты зондовых исследований разряда. Подробно описаны результаты моделирования ВАХ, распределения полей и электронной компоненты магнетронного разряда различными методами, потоков распыленного вещества. Приведены результаты экспериментальных проверок результатов моделирования. На основании анализа литературных данных сделан вывод, что единая теоретическая модель разряда в МРС отсутствует, а наиболее привлекательные приемы теоретического моделирования требуют сложного предварительного исследования конфигурации магнитного поля в МРС и дают приемлемое согласие между наблюдаемыми и вычисляемыми величинами, но хорошо согласуются лишь в небольшом диапазоне изменения внешних параметров разряда (ток, давление), а применяемый в них метод Монте-Карло требует больших вычислительных ресурсов. Кроме того, в литературе отсутствуют результаты детальных комплексных исследований влияния внешних параметров на распределение заряженных частиц и профиль функции распределения электронов по энергиям.

Во второй части обзора рассмотрены физико-химические свойства TiO_2 : структурные особенности, оптические, фотокаталитические и диэлектрические свойства. Представлен подробный обзор методов гермического окисления, вакуумное испарение, катодное и магнетронное апыление) и условий (состав, давление газов, температура подложки) нанесения тонких пленок TiO_2 на аморфные и кристаллические подложки. Показано преимущество магнетронного распыления для получения тонких пленок TiO_2 для применения в микроэлектронике.

Во второй главе рассмотрены конструктивные особенности оборудования, методики проведения экспериментов, описание порядка расчетов.

Экспериментальной задачей изучения магнетронного разряда было измерение лэнгмюровским зондом температуры и концентрации электронов (T_e и n_e) в зоне магнитной ловушки при разных токах разряда и давлениях газа. При проведении эксперимента использовался простой планарный магнетрон с внутренним диаметром зоны эрозии 60 мм и внешним диаметром 105 мм (площадь - 58 см²), величина магнитной индукции на поверхности катода составляла 0.1 Тл. Напыления пленок TiO₂ проводилось на аналогичном планарном магнетроне, несколько меньшим по габаритным размерам (с большей плотностью тока на мишень).

В качестве цилиндрических зондов использовались вольфрамовые проволочки \varnothing 0,063 и \varnothing 0,05 мм. В плазме магнетронного разряда происходит интенсивное распыление материала катода и осаждение его на все поверхности, в том числе и на зонд. В случае распыления металлов это может привести к значительным токам утечки между проводящей частью зонда и изолятором, запыленным металлом. Для предотвращения этого явления использовалась конструкция с защитным экраном (рис.1).

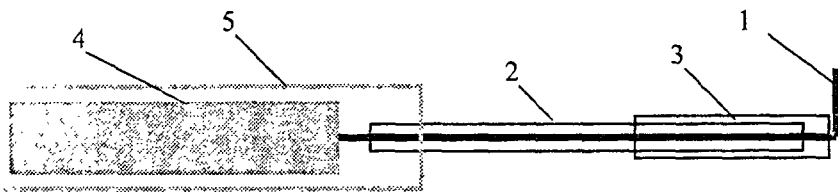


Рис.1. Схема зонда.

- 1 - вольфрамовая проволока 2 - стеклянный капилляр
 3 - защитный экран (стеклянный капилляр)
 4 - медный держатель 5 - фторопластовый изолятор

Моделирование распределения концентраций активных частиц МРС производилась на основе экспериментальных данных о T_e и n_e в точке магнитной ловушки над зоной максимальной эрозии и литературных данных о распределении этих величин по всему объему ловушки. Исходя из симметрии разряда относительно оси магнетрона, для описания распределения T_e и n_e его представляли как аксиальное и радиальное. На основании литературных данных: радиальное распределение n_e описывалось как $n_e \cos(r)$ для внутренней по отношению к зоне максимальной эрозии области и $n_e \cos^4(r)$ для внешней, где $r = -1,5 - 1,5$ рад (0 - над зоной максимальной эрозии), радиальное уменьшение температуры принималось линейным и малым, оно составляло на границах 5% от максимального - над зоной максимальной эрозии, считалось, что в аксиальном направлении T_e линейно увеличивает-

на 30%, а n_e линейно увеличивается вдвое от анодной границы ловушки к катодному пространству. Температура газа в зоне свечения взята на основании расчетов их литературы равной 500К без учета радиального и аксиального градиентов.

В нашем приближении размеры ловушки считались не зависящими от внешних параметров (ток разряда, давление и род газа, материал мишени). Поскольку разряд в МРС осесимметричен, то расчеты проводились по юскому сечению. Сечение зоны генерации (ловушки) было выбрано как прямоугольник, расположенный на высоте 2 мм от катода, высотой 15 мм, стоящий от оси симметрии на 30 и длиной 23 мм. В этом случае объем зоны генерации составлял 87 см^3 . Данное сечение разбивалось на ячейки по 40 элементов в радиальном и по 15 в аксиальном направлении и считалось, что T_e и n_e в пределах ячейки не изменяется. На основании этих данных для каждой ячейки производился расчет констант скоростей процессов и решалась система кинетических уравнений.

Для расчетов равновесных концентрации $\text{Ar } 4s$ и $4p$ и скорости образования ионов Ar^+ плазме аргона в качестве начальных параметров задавалась концентрация атомов аргона в основном состоянии, которая не менялась в процессе вычислений, так как сумма концентраций всех прочих состояний была по сравнению с ней незначительной. Расчет производился методом итераций до достижения стационарных значений по всем концентрациям. За начальные условия также вводились параметры плазмы (T_e , n_e) на анодной границе магнитной ловушки над зоной максимума эрозии.

В случае расчетов процессов в плазме дейтерия использовались те же предположения о параметрах зоны генерации, что и для расчетов в аргоне. На первом этапе вычислялась скорость образования атомарного дейтерия в области генерации в предположении, что концентрация молекул D_2 постоянна, полученное аксиальное распределение скорости генерации над зоной максимума эрозии аппроксимировалось квадратичной зависимостью (если пренебречь слабым радиальным изменением температуры электронов (5%), то радиальное распределение скорости генерации в ячейке оказывается зависящим от отношения концентрации электронов в ней к максимальной концентрации на данном расстоянии от мишени (над зоной максимума эрозии). Далее методом итераций производился расчет диффузии атомов из зоны генерации в объем разрядной камеры с рекомбинацией на стенках. При этом производилась коррекция скорости образования атомов из-за уменьшения концентрации молекул при постоянной сумме концентраций всех частиц ($P = \text{const}$). Расчет проводился до достижения равенства скорости образования атомов в ловушке скорости рекомбинации их на стенках.

Измерение толщины пленок диоксида титана производилось на спектрофотометре "SPECORD" по зависимости пропускания от длины волны при нормальном падении. Подложкой служило стекло с высоким показателем преломления. Для расчета спектра пропускания света T от длины волны λ при нормальном падении света на систему "пленка - подложка" была использована следующая расчетная формула:

$$T(\lambda) = \frac{8n_0 n_1(\lambda)^2 n_2}{\left[n_1(\lambda)^2 + n_2^2 \right] \left[n_0^2 + n_1(\lambda)^2 \right] + 4n_0 n_1(\lambda)^2 n_2 + \left[n_0^2 - n_1(\lambda)^2 \right] \left[n_1(\lambda)^2 - n_2^2 \right] \cos(2\delta_1(\lambda))}$$

$$\delta_1(\lambda) = 2\pi n_1(\lambda) \frac{d}{\lambda}$$

где d - толщина пленки, $n_0 = 1.7$ - показатель преломления подложки, $n_2 = 1$ - показатель преломления среды, $n_1(\lambda)$ - зависимость показателя преломления пленки от λ .

Эта формула использовалась для определения толщины полученных тонких пленок по лучшему совпадению экспериментальных и расчетных данных в предположении, что оптическая дисперсия пленок подобна дисперсии, приведенной в литературе для объемного монокристалла анатаза.

Пленки TiO_2 получались при распылении титановой мишени в реактивной атмосфере ($Ar + O_2$) при токе разряда 600 мА, общем давлении 0,33 Па и доле кислорода до зажигания разряда 40% объемных.

В качестве подложек использовались пластины полярного (b) среза сегнетоэлектрического кристалла - триглицинсульфата (ТГС, $(NH_2-CH_2-COOH)_3 \cdot H_2SO_4$), легированного при выращивании L- α - аланином (CH_3-CHNH_2-COOH) для обеспечения макроскопически униполярного состояния. ТГС имеет низкую температуру фазового перехода "сегнетоэлектрик - параэлектрик" $T_c = 322$ К, поэтому для предотвращения нагрева подложек (и сохранения их униполярного состояния) они устанавливались в водоохлаждаемом держателе, и их температура контролировалась термпарой.

Исследование пьезоэлектрического эффекта выполнено статическим методом, заключающемся в создании в исследуемом образце однородного механического напряжения σ и измерении индуцированного им заряда. В экспериментах механическое напряжение создавалось грузами известного веса нормально плоскости пленки. Для исключения влияния собственного пьезоэффекта сегнетоэлектрической подложки на величину поляризационного заряда, индуцируемого в пленке, измерения выполнены при температурах $T > T_c$, т.е. в параэлектрической фазе подложки.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных измерений T_c и p_c в плазме МРС в аргоне и дейтерии и результаты расчетов:

- распределения концентраций возбужденных состояний $Ag\ 4s$ и $4p$ в аргоне в зоне магнитной ловушки;
- скорости образования ионов аргона;
- распределения концентраций атомарного дейтерия.

Исследование разряда в аргоне было проведено для выяснения вопроса о достоверности предположений о распределении T_e и n_e в зоне магнитной ловушки. Достоверность выявлялась путем вычисления скорости генерации ионов аргона в магнитной ловушке и сравнении ее с разрядным током. Расчеты показали хорошее согласие между этими величинами в области давлений меньших 5 Па. Длина проводящей части зонда составляет 4,8 мм, \varnothing - 0,05 мм. Измерения проводились при фиксированном положении зонда - на высоте 7 мм над мишенью, примерно на трети высоты ветвящейся области, сама мишень - вольфрамовая пластина толщиной 1 мм помещалась на графитовую пластину толщиной 10 мм, которая лежала на поверхности катода. Зонд помещался над зоной максимума эрозии - при радиусе 42 мм параллельно магнитному полю. Ток разряда поддерживался

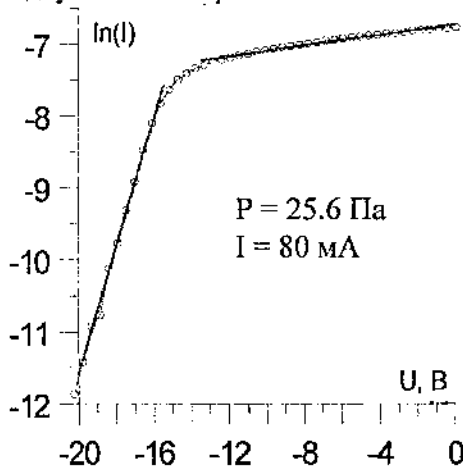


Рис. 2. Зондовая характеристика МРС в аргоне.

постоянным, равным 80 мА. Изменялся вид зависимости зондовой характеристики от давления. При исследовании было выявлено, что при относительно высоком (10 - 25 Па) давлении аргона зондовая характеристика выглядела классическим образом с ясно различимыми областями тока электронного и ионного насыщения и линейным в полулогарифмических координатах изменением электронной ветви характеристики (рис. 2). При уменьшении давления характеристика становится все более близкой к прямой в линейных координатах и к гладкой кривой в полулогарифмических, что затрудняет выявление потенциала пространства в области зонда и соответственно расчет температуры и плотности электронов. Уточнение значения потенциала пространства было выполнено по равенству нулю второй производной зондового тока по напряжению, полученной графическим дифференцированием зондовой характеристики. По второй производной также была построена функция распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ). Из ее вида можно заключить, что если при давлениях > 3 Па ФРЭЭ можно считать максвелловской, то при

меньших давлениях она становится более широкой. К сожалению, метод получения ФРЭЭ графическим дифференцированием дает значения только ядра функции, до 2 - 2,5 средних энергий и расчеты T_e и n_e велись исходя из предположений о максвелловской ФРЭЭ по наклону прямой, аппроксимирующей нормальный участок зондовой характеристики в полулогарифмических координатах. Из зондовых измерений можно сделать вывод, что при прочих равных условиях при уменьшении давления температура электронов сильно возрастает, а концентрация электронов меняется слабо.

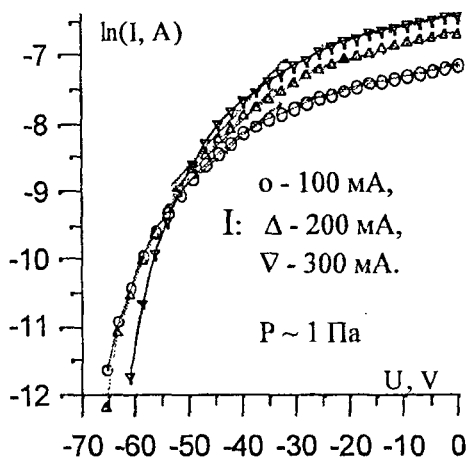


Рис. 3. Зависимости ВАХ зонда от тока разряда при разряде в дейтерии.

I, мА	100	200	300
P, Па	1,2	1,3	1,1
T_e , eV	14,7	12,6	11,3
n_e , m^{-3}	$7,8 \cdot 10^{15}$	$1,3 \cdot 10^{16}$	$1,9 \cdot 10^{16}$

Различие можно попытаться объяснить различием в коэффициентах вторичной электронной эмиссии в этих системах и меньшей долей энергии электронов, идущей на ионизацию дейтерии по сравнению с аргоном.

Ряд экспериментов был проведен в области подложки - при расположении зонда на высоте 6 см над катодом по центру мишени (практически рядом с поверхностью заземленной подложки). Эта область не играет важной роли для существования разряда, температуры электронов в ней относительно невелики. Поскольку ток на зонд в этой области был существенно ниже, чем в области ловушки, длина зонда была взята большей (12 мм) и эксперимент проводился при максимальном токе

Исследования зондовых характеристик разряда в дейтерии проводились при различных положениях зонда и параметрах разряда (то давление). Зонд расположен на высоте $h = 15$ мм над мишенью, радиусе 42 мм. Длина проводящей части зонда составляла 3,5 мм, толщина - 0,05 мм. Мишень - графитовая пластина толщиной 10 мм, лежащая на поверхности катода.

Давление дейтерия было в диапазоне 0,2 - 5 Па.

Сравнивая зондовые характеристики разрядов в аргоне и дейтерии можно сделать вывод, что темпера-

тура электронов в МРС в дейтерии при прочих равных условиях вдвое выше, а концентрация электронов сопоставима (рис. 3). Так различие можно попытаться объяснить

ряды (1.5-А). В области подложки наблюдался обратный по сравнению с обычной магнитной ловушкой характер зависимости T_e от давления: при увеличении давления электронная температура возрастала.

Поскольку пространственное распределение концентраций возбужденных частиц можно наблюдать визуально и таким образом сравнить наблюдаемое поведение плазмы с предсказываемым расчетом, то для проверки расчетной программы было выполнено моделирование распределения концентраций возбужденных состояний $Ar\ 4s$ и $4p$.

Исходные данные (T_e , n_e (на анодной границе магнитной ловушки и зоной максимума эрозии) и концентрация атомов аргона в основном состоянии n_0) приведены в таблице 1:

Таблица 1. Исходные данные для моделирования разряда в аргоне.

Давление, Па	T_e , эВ	n_e , M^{-3}	n_0 , M^{-3}
17.6	1,22	$1,32 \cdot 10^{16}$	$2,6 \cdot 10^{21}$
3.5	2,5	$6 \cdot 10^{15}$	$5,0 \cdot 10^{20}$
0.95	3,75	$4,8 \cdot 10^{15}$	$1,35 \cdot 10^{20}$

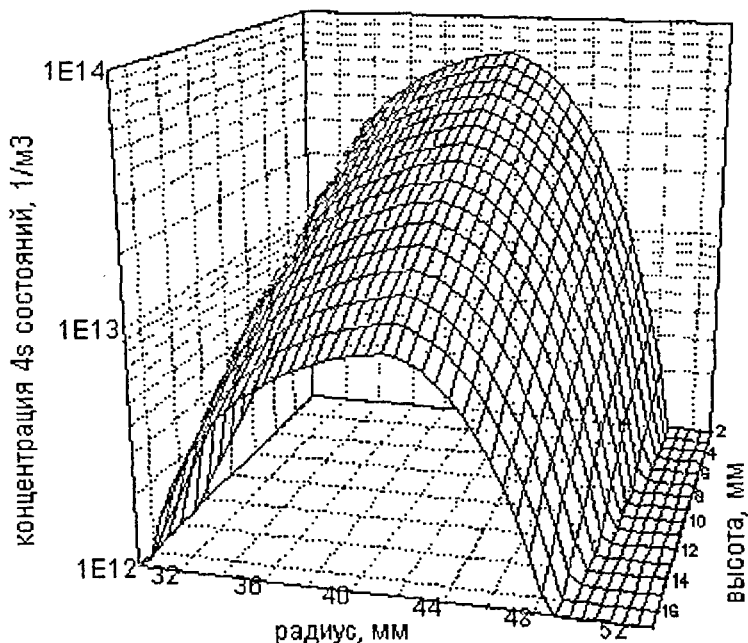


Рис. 4. Концентрация $Ar\ 4s$ состояний при давлении 3.5 Па. $I = 80\ mA$, $U = 340\ V$.

Результат расчета распределения Ar 4s состояний в зоне магнитной ловушки в полулогарифмическом масштабе приведен на рис. 4. Распределение возбужденных состояний такое же, что и наблюдается визуально: более яркое свечение при приближении к катоду и к максимуму зоны эпии.

Проанализировав изменение концентраций с изменением давления, можно попытаться объяснить эффект “стягивания” разряда при повышении давления - при более низких давлениях (~ 1 Па) визуально разряд жется размытым, а при повышении (~ 10 Па) у катода образуется более яркое свечение. Результаты моделирования показывают, что при низком давлении концентрации возбужденных состояний у катодно-анодной границы отличаются примерно вчетверо, то при более высоком давлении это отличие составляет величину большую чем полтора порядка. Этот результат может объясняться в случае большего давления влиянием увеличения электронной температуры при приближении к катоду на скорость генерации возбужденных состояний, так как в случае мейеровского распределения резко возрастает концентрация электронов с энергией выше потенциала возбуждения ϕ_v . В случае низкого давления электронная температура находится ближе к ϕ_v энергии и ее рост не приводит к такому резкому росту концентрации электронов с энергией выше ϕ_v .

Расчет скорости образования ионов аргона позволяет оценить применимость выбранного распределения температур и концентраций электронов, а также температуры нейтральных атомов в зоне магнитной ловушки, поскольку, пренебрегая процессами объемной рекомбинации, возможность сравнить общее число генерированных ионов с разрядным током. Результаты расчетов показали, что расчетные значения при давлениях были ниже наблюдаемых, но при давлениях < 5 Па ошибка невелика и связана скорее всего с занижением измеренной концентрации электронов зондом вследствие направленного дрейфа электронов в разряде и погрешностями в используемом выражении для константы скорости ионизации. Расчеты показали, что выбранное распределение можно считать применимым для моделирования разряда в дейтерии при давлении < 5 Па.

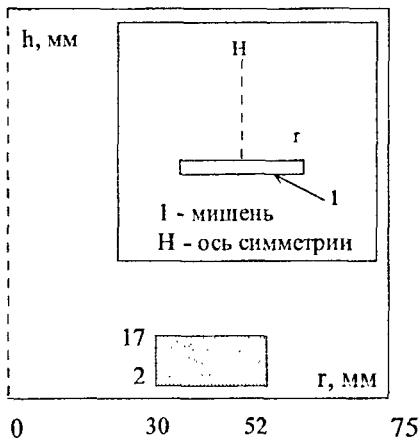
Расчет распределения концентрации атомарного дейтерия в I опирался на следующие предположения:

- вклад в гибель атомов объемных процессов ассоциации типа $2D + D_2 \rightarrow 2D_2$; $D + D \rightarrow D_2$ пренебрежимо мал;

γ - коэффициент рекомбинации на стенке, равный отношению энного числа молекул, покидающих поверхность к числу атомов, прищих на поверхность в единицу времени равен 0,18.

Расчет проводился исходя из геометрических параметров реального трона и сводился к определению профиля концентрации в плоскости, одающей через ось симметрии. Рассматривалась диффузия атомов в кости, ограниченной осью симметрии, мишенью и стенками магнетрона.

Геометрические параметры магнетрона приведены на рис. 5, где за-тененный участок - зона генерации атомов - магнитная ловушка



($2 \leq h \leq 17, 30 \leq r \leq 52$). Эта плоскость разбивалась на ячейки по 1 мм^3 и считалось, что концентрация атомов в пределах ячейки одинакова и диффузия идет в этой плоскости из ячейки в ячейку из зоны генерации к стенкам. Поглощение или перенос атомов поперек оси отсутствуют, диффузионные потоки атомов за пределы плоскости отсутствуют, рекомбинация идет только в ячейках, примыкающих к катоду и стенкам.

рис. 5. Размеры магнетрона, мм.

Расчеты проводились для давления 1,3 и 0,2 Па. Длина свободного бега атомов определялась по известной формуле:

$$\lambda = \frac{1}{\pi\sqrt{2}n_D d_1^2 + \pi n_{D_2} d_{12}^2 \sqrt{1 + \frac{m_1}{m_2}}}$$

n - концентрация, d_1 - эффективный диаметр атома дейтерия, будем ать равным половине эффективного диаметра молекулы равного $8 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, $d_{12} = 0,5(d_1 + d_2)$, где d_2 - диаметр молекулы, m_1, m_2 - массы а и молекулы. Для давления 1,3 Па при низкой концентрации атомар- дейтерия $\leq 10\%$ получим $\lambda \sim 28 \text{ мм}$, при высокой (90%) получим $\lambda \sim \text{см}$. Эти величины меньше характерных размеров магнетрона, поэтому данном давлении режим движения атомов считался вязкостным.

В этом режиме перемещение атомов зависит от коэффициента диффуз D , который рассчитывался с использованием потенциала Ленарда - Джонса, по теории Энского и Чепмена. В этом случае:

$$D = \frac{3}{8nm} \frac{\sqrt{\pi m_{12} kT}}{\pi d_{12}^2 \Omega_{12}^{(1,1)*}(T_{12}^*)} = 2.66 \cdot 10^{-2} \frac{\sqrt{T^3 (M_1 + M_2) / (2M_1 M_2)}}{P d_{12}^2 \Omega_{12}^{(1,1)*}(T^*)}, \text{ где}$$

индексы 1,2 обозначают атом и молекулу, T - температура (К), $T^* = kT$, приведенная температура, P - давление (Па), M - масса, $\Omega_{12}^{(1,1)*}(T^*)$ - приведенный интеграл столкновений. Для $P=1,3$ Па получается $D=38,6$ м²/с.

Результат расчета - распределение концентрации атомарного дейтерия - приведен на рис. 6:

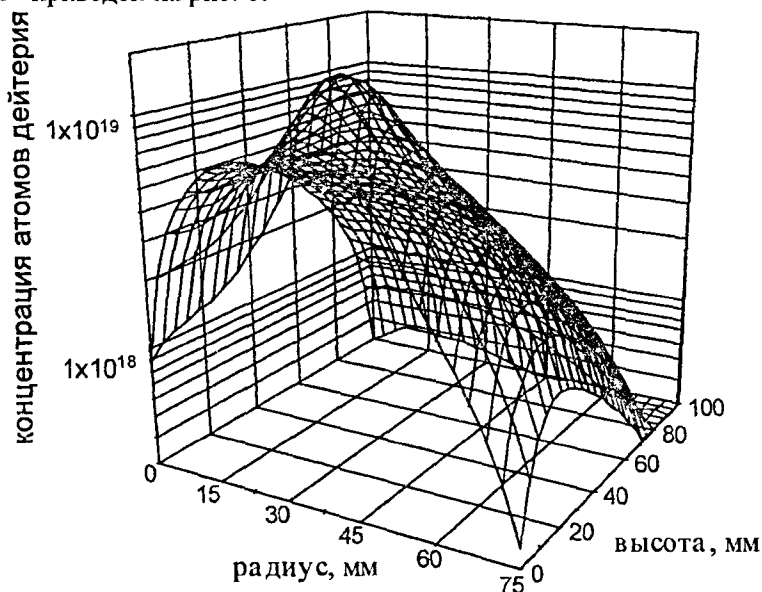


Рис. 6. Распределение концентрации атомарного дейтерия, м⁻³ при $P = 1.3$ Па.

Из расчетов следует, что при данных внешних условиях (на анодной границе разряда над зоной максимума эрозии $P=1,3$ Па, $I=1,5$ А, $T_e=10,1$ эВ, $n_e=5,37 \cdot 10^{16}$ м⁻³):

- максимальная концентрация атомов составила $1.65 \cdot 10^{19}$ м⁻³ при концентрации нейтральных частиц $1.9 \cdot 10^{20}$ м⁻³, или 8.7%;

--- пик концентрации атомов и само пространственное распределение итрации немного смещены в радиальном направлении к оси магнетрона от области максимума генерации, приходящейся подобно максимуму концентрации электронов на $r=42$ мм; аксиально пик смещен сильнее, рно к середине зоны генерации на высоту $h=10$ мм;

- основным каналом гибели атомов дейтерия (~ 80%) является реинация на мишени (концентрация атомов в слое перед катодом на больше, чем концентрация в слоях перед корпусом магнетрона;

При уменьшении давления (расчет был выполнен для 0,2 Па) длина дного пробега становится больше характерных размеров системы и м движения атомов считали молекулярным. Распределение концент и в этом случае было качественно подобно приведенному на рис. 6, со, из-за более высокой T_e резко возросла скорость генерации атомов осительная концентрация атомарного дейтерия достигала в миниму- 88%.

Расчеты констант скоростей ионизации атомов и молекул показали, корости образования, а следовательно и соотношения потоков ионов D^+ на мишень можно считать примерно втрое большим нежели соот- ние концентраций атомов и молекул в зоне генерации.

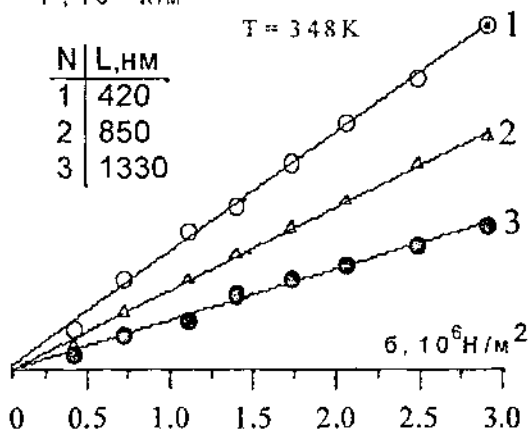
В четвертой главе приведены результаты исследования диэлектриче- ских свойств пленок TiO_2 , напыленных на сегнето- электрическую подложку.

Для пьезоэлектрика между поверхностной плотностью индуцирован- ного заряда q (K/m^2), образующегося при прямом пьезоэффекте на поверх- ности поляризованного кристалла, и механическим напряжением σ (H/m^2) должна существовать пря- мо пропорциональная за- висимость.

$$P, 10^{-6} K/m^2$$

$$T = 348 K$$

N	L, нм
1	420
2	850
3	1330



7. Зависимость плотности заряда от механического напряжения при различных толщинах пленки.

На рис. 7 приведены зависимости плотности поляризационного ряда q от напряжения σ при различных толщинах пленок.

Для известных в тонких пленках аллотропных форм TiO_2 (ру анатаз) характерны centrosymmetric точечные группы, для кото пьезоэлектрический эффект запрещен. Тем не менее, линейная зави мость свидетельствует, что наблюдаемая поляризация действительно о ловлена пьезоэлектрическим эффектом. Отметим, что пленки TiO_2 , ос денные при температуре подложек $T > T_c$, не обладают пьезоэлектричес эффектом, и известно, что электростатические эффекты могут играть с ную роль на всех стадиях образования пленки. В этом случае образова макроскопически ацентричной пленки с выраженным дальним порядк возможно при высокой поляризуемости структурных единиц и, как с ствие, следует ожидать высоких значений диэлектрической проницаем ти.

На рис. 8 приведен типичный вид диаграмм Коул-Коула для ис дованных гетероструктур в диапазоне частот 10 кГц-1 МГц и темпер: 297-370К.

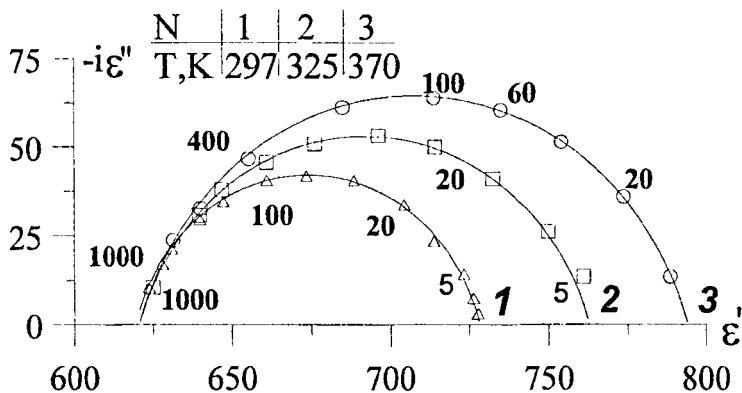


Рис. 8. Зависимость комплексной диэлектрической проницаемости в пленке TiO_2/TGS при различных температурах. Значения частот - в кГц, $L=850$ нм.

Такие значения диэлектрической проницаемости подтвержд предположение о возможной высокой величине ее в пленок TiO_2 , зн тельно большей, чем известные значения для объемных кристаллов же состава. Подобное различие нельзя объяснить ни экспериментал погрешностью, ни эффектами диэлектрической нелинейности в тон пленках.

Полученные результаты позволяют предположить, что пленки диэлектриков на сегнетоэлектрических подложках являются перспективными материалами для тонкопленочной электроники, в которых могут быть получены как эффекты, обусловленные влиянием подложки, так и высокие электрические характеристики.

Основные результаты работы.

В результате выполнения диссертационной работы:

1. Произведено зондовое исследование плазмы МРС в аргоне с углеродной мишенью в диапазоне давлений 1 - 25 Па и в дейтерии с углеродной мишенью в диапазоне давлений 0,2 - 4 Па.

2. На основании зондовых исследований T_e , n_e и предложенной модели разряда в МРС:

- рассчитаны распределения $Ag\ 4s$ и $4p$ возбужденных состояний ионов и скорости генерации ионов аргона в зоне магнитной ловушки МРС и показана их зависимость от изменения давления;

- рассчитано распределение атомарного дейтерия по объему магнетрона.

3. Выполнено исследование диэлектрических свойств пленок TiO_2 , нанесенных на сегнетоэлектрическую подложку ТЭС и произведено исследование ее диэлектрических свойств при изменении частоты в диапазоне $10^4 - 10^6$ Гц.

Были установлены:

1. Особенности влияния изменения давления на зондовые характеристики в плазме аргона в МРС и уточнена методика вычисления параметров разряда при пониженных давлениях.

2. Дано объяснение эффекту "стягивания" разряда к мишени с увеличением давления, который может быть объяснен различиями в распределении по высоте концентраций возбужденных атомов из-за изменения плотности температуры электронов.

3. Пространственное распределение атомарного дейтерия по объему МРС в диапазоне 0,2 - 1,3 Па.

4. Наличие пьезоэлектрического эффекта у пленки TiO_2 , нанесенной на сегнетоэлектрическую подложку (триглицинсульфат), в том числе при температурах, более высоких, чем точка Кюри подложки.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Зайцев В.В., Обручников А.Е. К вопросу о механизме деионизации неравновесной плазмы. // Тез. докл. VIII Всесоюзной конференции по физике газового разряда. Рязань. 1996. с. 36-37.

2. Zaitsev V.V., Obruchnikov A.E. Pelipets O.V. On the composition of the gas phase during the deposition of thin films with complicated composition // 37th microsposium on biodegradable polymers: chem., biol. & environmental aspects. Prague. 1996. p.274-275.

3. Зайцев В.В., Сандлер В.А., Обручников А.Е. К вопросу об исследовании оптических свойств диэлектрических тонких пленок. // Материалы итоговой научной конференции ИвГУ, Иваново, 1997, с. 62.

4. Зайцев В.В., Сандлер В.А., Обручников А.Е. Индуцированный пьезоэлектрический эффект в тонких пленках // Материалы итоговой научной конференции ИвГУ, Иваново, 1997, с. 63-64.

5. Зайцев В.В., Сандлер В.А., Обручников А.Е. Техника осаждения диэлектрических тонких пленок в магнетронной системе с реактивной рабочей средой // Материалы итоговой научной конференции ИвГУ, Иваново, 1997, с. 65-66.

6. Сандлер В.А., Зайцев В.В., Обручников А.Е., Копытова Н.В., Индуцированный пьезоэлектрический эффект и диэлектрические свойства эпитаксиальных пленок TiO_2 , осажденных на сегнетоэлектрическую подложку // Труды Украинского вакуумного общества, 1997, Т. 3, с. 316-320

7. Зайцев В.В., Обручников А.Е., Копытова Н.В. Вольтамперные кинетические характеристики магнетронного разряда // Материалы 2 Российской конференции "Высокие технологии в промышленности России". Москва, 1997, с. 64-68.

8. Зайцев В.В., Обручников А.Е. Подход к разработке системы зондовой характеристики плазмы магнетронного разряда // Материалы 1 Всероссийской научной конференции "Молекулярная физика неравновесных систем" Иваново. 1999. С.120-121.

9. Обручников А.Е., Комаров Д.А., Зайцев В.В. Измерение температуры и концентрации электронов в плазме магнетронного разряда. // Proceedings of 4th international symposium on diamond films and related materials Kharkov. 1999. P. 331-332.

10. Зайцев В.В., Обручников А.Е., Комаров Д.А., Захаров А.П. Измерение параметров электронной компоненты в плазме магнетронного разряда в аргоне и дейтерии // Материалы 6 международной конференции "Высокие технологии в промышленности России". Москва. 2000. с. 24-