

С. В. ДУДИН, В. А. ЛИСОВСКИЙ, А. Н. ДАХОВ, В. М. ПЛЕТНЁВ

Украина, Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина
E-mail: alex.dakhov@gmail.comДата поступления в редакцию
07.09 2010 г.Оппонент к. ф.-м. н. О. А. ФЕДОРОВИЧ
(Ин-т ядерных исследований, г. Киев)

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ РЕАКТОР С АСИММЕТРИЧНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ ДЛЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Исследованы пространственное распределение параметров плазмы и однородность потока ионов, направленного на обрабатываемую поверхность в плазмохимическом реакторе. Полученные результаты могут быть использованы в технологиях производства микроэлектронных приборов.

Высокочастотный (ВЧ) емкостный газовый разряд в камерах с асимметричными электродами широко используется в различных технологических процессах для плазменного травления и модификации различных материалов, осаждения нитридных, оксидных, алмазоподобных и других тонких пленок, стерилизации медицинских инструментов и т. д. [1—3].

При конструировании плазменных технологических устройств на основе ВЧ емкостного разряда одной из ключевых задач является формирование пространственного распределения заряженных и химически активных частиц в объеме газоразрядной камеры. Наибольший интерес представляет распределение потоков частиц, направленных на обрабатываемую поверхность, а основной задачей, как правило, является достижение высокой однородности этих потоков. Решение этой задачи осложняется тем, что разрядная камера в технологических устройствах может иметь достаточно сложную геометрию, процессы передачи энергии в плазме, зарождения и ухода заряженных частиц сложны и нелинейны, а равномерный ввод энергии в плазму практически невозможен. Поэтому точный ответ на вопрос о пространственном распределении параметров заряженных частиц в конкретном устройстве может дать только экспериментальное их измерение, которое лишь констатирует сложившуюся ситуацию. Разработка же новых плазменных устройств предполагает последовательные изменения конструкции с постепенным приближением к желаемому результату. То есть эмпирический путь разработки конструкции плазменного реактора требует изготовления различных вариантов элементов реактора и может оказаться долгим, трудоемким и дорогостоящим.

Работа была выполнена при поддержке Министерства промышленной политики Украины (НИОКР № г.р. 0108U009822)

Очевидно, хорошим инструментом для разработки плазменных технологических устройств могут быть математические модели газового разряда, позволяющие изменять параметры и геометрию системы. Сложность задачи не позволяет надеяться на возможность ее аналитического решения либо установление точных функциональных закономерностей. Наиболее адекватным подходом в данном случае является построение численной двумерной компьютерной модели (технологические устройства, как правило, имеют симметрию вращения). В то же время, современный уровень развития физики газового разряда не позволяет создавать математические модели, абсолютно точно описывающие реальные устройства. Поэтому единственно возможным подходом в данном случае являются комплексные теоретические и экспериментальные исследования.

Настоящая работа посвящена исследованиям пространственного распределения параметров плазмы и однородности потока ионов, направленного на обрабатываемую поверхность в плазмохимическом реакторе на базе ВЧ емкостного разряда с асимметричными электродами.

Конструкция реактора и условия экспериментов

Исходя из результатов двумерного компьютерного моделирования плазмы внутренняя геометрия камеры была выбрана такой, чтобы обеспечить максимальную однородность параметров плазмы вблизи обрабатываемой поверхности в условиях низкого давления рабочего газа, при котором траектории ионов близки к прямолинейным, что позволяет проводить травление с высокой анизотропией.

На рис. 1 показана схема газоразрядной камеры реактора. Расстояние между электродами выбрано равным 40 мм, что примерно равно радиусу подложкодержателя. Это обеспечивает возможность работы при достаточно низком давлении рабочего газа. К тому же, при таком зазоре между электродами можно обеспечить достаточно однородную подачу технологического газа к обрабатываемой пластине и откачивание продуктов травления.

Охлаждение газоразрядной камеры и подложкодержателя — водяное. Подложкодержатель с диаметром рабочей поверхности 100 мм выполнен составным. Его обращенная в плазму верхняя часть, которая должна быть устойчива к распылению и воздей-

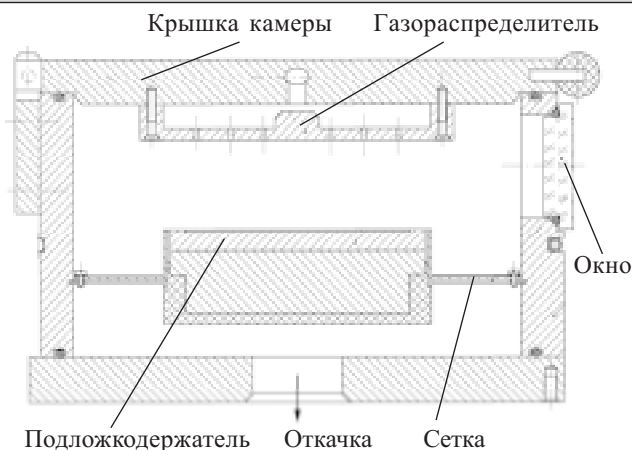


Рис. 1. Схема газоразрядной камеры

ствию химически активных радикалов, изготовлена из нержавеющей стали. Нижняя часть выполнена из алюминиевого сплава, поскольку ее основной задачей является равномерный отвод тепла и передача его трубке водяного охлаждения.

Необходимость достижения высокой однородности травления пластин требует как равномерного распределения по поверхности электрода параметров плазмы, так и равномерного напуска реактивного газа. Эта задача решается с помощью системы распределенного газонапуска — цилиндрического резервуара, расположенного непосредственно над обрабатываемой пластиной. Рабочий газ в разрядную камеру поступает через большое количество отверстий, равномерно распределенных по поверхности системы.

В этой конструкции была реализована схема с асимметричными электродами (площадь рабочей поверхности подложкодержателя примерно на порядок меньше площади поверхности газоразрядной камеры), которая позволяет получить постоянное напряжение на электроде без подключения дополнительного источника питания, а также избежать нежелательной бомбардировки стенок реактора высокоэнергетическими ионами. Такие меры снижают загрязнение обрабатываемых пластин и повышают энергетическую экономичность реактора.

К подложкодержателю через разделительный конденсатор прикладывается ВЧ-напряжение амплитудой 0—500 В, тогда как сама газоразрядная камера заземлена. Благодаря наличию разделительного конденсатора и асимметрии электродов на подложкодержателе появляется отрицательное напряжение автосмещения [3]. Измерение амплитуды ВЧ-напряжения на потенциальном электроде проводится с использованием амплитудного детектора ВЧ-напряжения с емкостным делителем. Для блокирования переменной составляющей при измерении постоянного напряжения автосмещения потенциального электрода применен RC-фильтр, который позволяет снизить амплитуду ВЧ-сигнала до уровня десятков милливольт.

Измерение плотности потока ионов из плазмы проводится с помощью одиночного плоского зонда площадью 1 см², расположенного на боковой стенке га-

зоразрядной камеры. На зонд подается постоянное напряжение –25 В относительно камеры, что обеспечивает работу на участке ионного насыщения зондовой характеристики. Непосредственное измерение плотности потока ионов, направленного на обрабатываемую поверхность, обычно затруднено, поскольку подложкодержатель находится под высоким ВЧ- и постоянным напряжением. Однако величина и радиальное распределение плотности ионного потока представляет значительный интерес при обработке технологических процессов. Поэтому была проведена серия экспериментов, в которых ВЧ-напряжение подавалось на корпус газоразрядной камеры, а для измерения радиального распределения плотности ионного тока на заземленном подложкодержателе применяли ряд радиально расположенных плоских зондов размером 5×5 мм, ионный ток насыщения с которых измерялся при помощи многоканального аналого-цифрового преобразователя PC-1710HG производства компании Advantech. Для предотвращения собирания электронов и в этом случае зонды находились под потенциалом –25 В относительно подложкодержателя.

Откачка воздуха из реактора осуществлялась при помощи турбомолекулярного насоса 01АБ-1500. Поток рабочего газа в реактор регулировался при помощи контроллера потока массы SEC-4400 производства компании HORIBA STEC с максимальным газопотоком 200 станд. см³/мин. Измерение давления газа в диапазоне 10⁻⁴—10⁰ Торр проводилось при помощи емкостного манометрического преобразователя Tylan General CDL 0106, подключенного непосредственно к реактору через диагностическое окно.

Результаты математического моделирования плазмы в реакторе

Достижение высокой однородности концентрации заряженных и химически активных частиц в плазме и их потоков, направленных на обрабатываемую поверхность, является одной из целей при разработке и оптимизации плазменных технологических устройств. Для лучшего понимания процессов, происходящих в асимметричном ВЧ-разряде, было выполнено моделирование с помощью кода OOPIC Pro code (Tech-X Corporation, http://www.txcorp.com/products/OOPIC_Pro/) для зазора между плоскими электродами $L = 4$ см, при различных значениях приложенного ВЧ-напряжения и давления аргона. OOPIC Pro является двумерным кодом, работающим на основе метода «частица в ячейке» (particle-in-cell, PIC). Он создан для моделирования процессов в плазме, пучках заряженных частиц, с разнообразными граничными условиями. OOPIC Pro использует алгоритм Монте-Карло для моделирования столкновения заряженных частиц с молекулами газа, включая такие эффекты, как ион-нейтральная перезарядка, упругое рассеяние электронов, неупругие столкновения электронов с молекулами газа, приводящие к их возбуждению и ионизации газа. Временной шаг при моделировании был выбран равным $4 \cdot 10^{-10}$, а температура нейтрального газа 0,04 эВ. Начальная однородная концентрация электронов и положительных ионов была

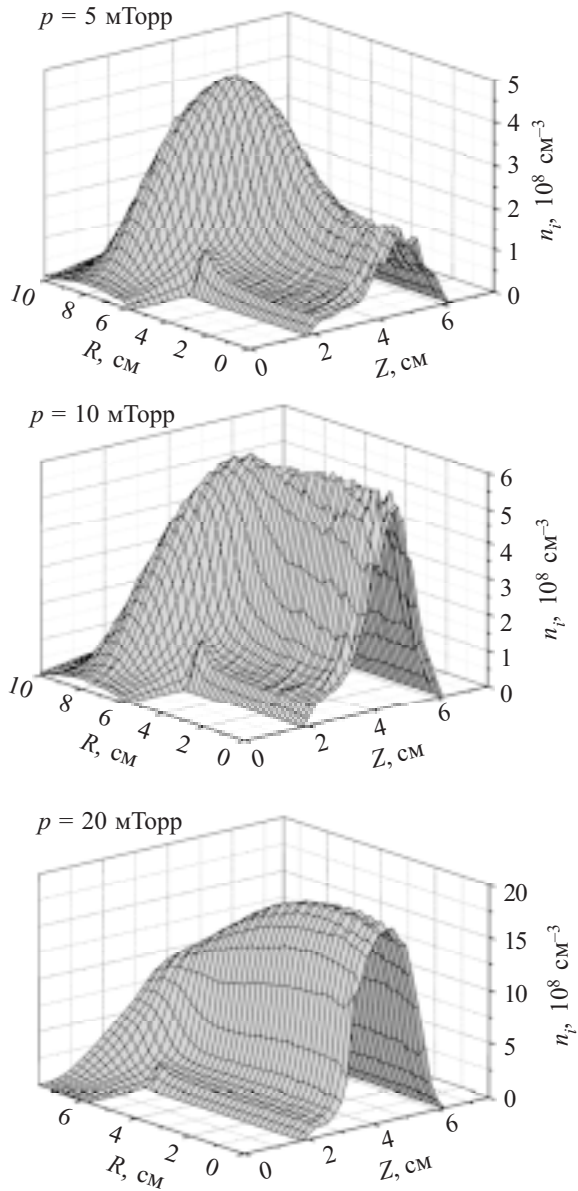


Рис. 2. Пространственное распределение плотности плазмы в объеме реактора, полученное для различных значений давления аргона при ВЧ-напряжении на электроде 200 В

равна 10^8 cm^{-3} . Учитывалась также вторичная ион-электронная эмиссия с поверхности электродов, при этом коэффициент эмиссии принимался равным 0,1.

На рис. 2, где представлены результаты численного моделирования, видно, что при высоком давлении максимум плотности плазмы лежит на оси разряда, тогда как при низком — смещается на периферию. Для плазменных технологических процессов, требующих повышенной однородности распределения параметров плазмы по площади электродов, оптимальное давление p аргона составляет около 10 мТорр.

Экспериментальное исследование условий зажигания и поддержания асимметричного ВЧ-разряда

Для оптимизации плазменных технологических процессов необходимо знать условия пробоя газа в разрядном устройстве (кривую зажигания), область

существования разряда, ограниченную кривой погасания, а также режимы горения разряда. Поэтому исследование характеристик асимметричного высокочастотного емкостного разряда представляет значительный интерес.

На рис. 3 представлены кривые зажигания U_{br} и погасания U_{ext} , измеренные в исследуемой камере для аргона, фреона и кислорода. Кривая зажигания симметричного ВЧ-разряда на левой ветви обычно имеет область неоднозначной зависимости ВЧ пробойного напряжения от давления газа. Такая неоднозначность позволяет поджечь ВЧ-разряд не только при повышении, но и при понижении ВЧ-напряжения при фиксированном давлении газа слева от минимума ВЧ-кривой зажигания [4—7]. Для случая когда зазор между плоскими электродами достаточно большой кривая

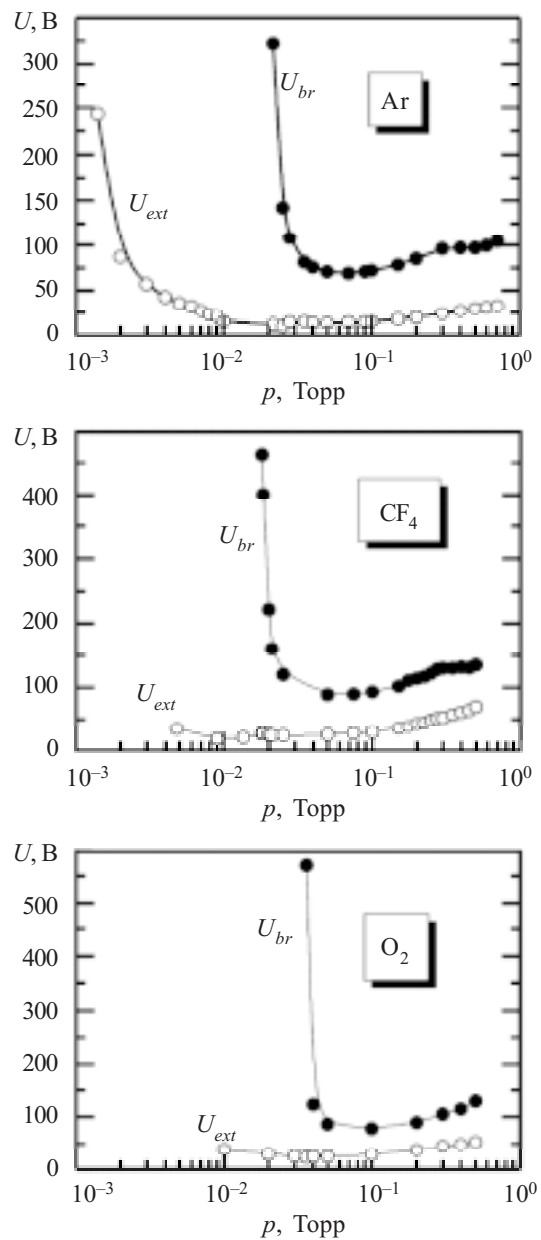


Рис. 3. Кривые зажигания U_{br} и погасания U_{ext} разряда в исследуемой камере в различных газах

зажигания ВЧ-разряда представляет собой повернутую на 45° относительно оси параболу, у которой на верхней и нижней ветвях ВЧ пробойное напряжение возрастает с повышением давления газа. Эти ветви сходятся в точке поворота, в которой амплитуда смещения электронов в ВЧ электрическом поле равна половине расстояния между электродами [8, 9]. Такое поведение кривой зажигания для плоских параллельных электродов, полностью перекрывающих поперечное сечение разрядной трубки, связано с повышенными потерями электронов в условиях, соответствующих верхней ветви кривой зажигания, из-за ухода электронов на электроды и стенки трубки вследствие дрейфа и диффузии.

В асимметричной камере, как видно из рис. 3, верхняя ветвь и, соответственно, область неоднозначности отсутствуют. Левая ветвь кривой зажигания представляет собой практически вертикальную линию, т. е. зажигание разряда возможно только при достаточно высоком давлении (например, для аргона при $p > 0,02$ Торр). Отсутствие стенки трубки, ограничивающей зазор между плоскими электродами, а также наличие заземленных стенок разрядной камеры большего диаметра приводит к снижению потерь заряженных частиц, а также к возможности зажигания ВЧ-разряда не только между плоскими электродами, но и в области вне этого зазора.

Из трех исследованных газов наиболее высокое пороговое давление для зажигания ВЧ-разряда в асимметричной камере, наблюдается для кислорода. Это связано, по-видимому, с процессом «прилипания» свободных электронов к молекулам кислорода, что затрудняет пробой газа.

Исследуемая разрядная камера подобна широко используемой зарубежной камере “GEC cell” (Gaseous Electronics Conference reference cell) [10]. В связи с этим полученные результаты могут быть полезны при разработке и оптимизации широкого класса плазменных технологических процессов для этого типа разрядных камер.

Из рис. 3 следует также, что в исследуемой камере возможно поддержание горящего разряда при гораздо более низком давлении ($p \geq 1$ мТорр), при котором положительные ионы, образовавшиеся в объеме плазмы, редко сталкиваются с молекулами газа и бомбардируют электроды и полупроводниковые пластины практически по нормали к их поверхности. Это позволяет проводить в данной камере процессы анизотропного травления полупроводниковых материалов.

В случае симметричного разряда он может гореть только в зазоре между плоскими электродами, при этом значительная часть заряженных частиц теряется не только на поверхности электродов, но и на стенках диэлектрической трубки, ограничивающей разряд. И чем ниже давление газа, тем выше эти потери.

В случае асимметричного незамкнутого разряда возможно его поддержание не только в зазоре между плоскими электродами, но и вне этого зазора, на периферии камеры. В данной области разряда потери электронов вследствие дрейфа и диффузии на стенки камеры меньше, чем в зазоре между электродами, что позволяет поддерживать горение разряда при бо-

лее низком давлении газа и существенно влияет на однородность плазмы.

Режимы горения асимметричного ВЧ-разряда

Для исследования режимов горения асимметричного ВЧ-разряда была измерена плотность тока положительных ионов, направленного на зонд, расположенный на заземленной стенке камеры, для различного давления газа. Из рис. 4 видно, что при низком давлении газа горение разряда возможно только при достаточно высоком ВЧ-напряжении ($U_{rf} > 150$ В), в то время как при более высоком давлении возможно поддержание разряда при $U_{rf} = 15$ В (что согласуется с результатами на рис. 3). Кривая для давления 4 мТорр описывает поведение плотности j_p тока на пристеночный зонд с ростом ВЧ-напряжения. Как показывают наблюдения, при низком давлении аргона сначала разряд имеет форму кольца, расположенного вне зазора между плоскими электродами. При значениях $U_{rf} < 120$ В плотность тока возрастает с повышением ВЧ-напряжения. Затем наблюдается небольшое уменьшение плотности тока, когда разряд заполняет и зазор между электродами. Дальнейший рост ВЧ-напряжения сопровождается монотонным повышением плотности тока на пристеночный зонд. При более высоком давлении газа разряд во всем диапазоне ВЧ-напряжений заполняет всю ка-

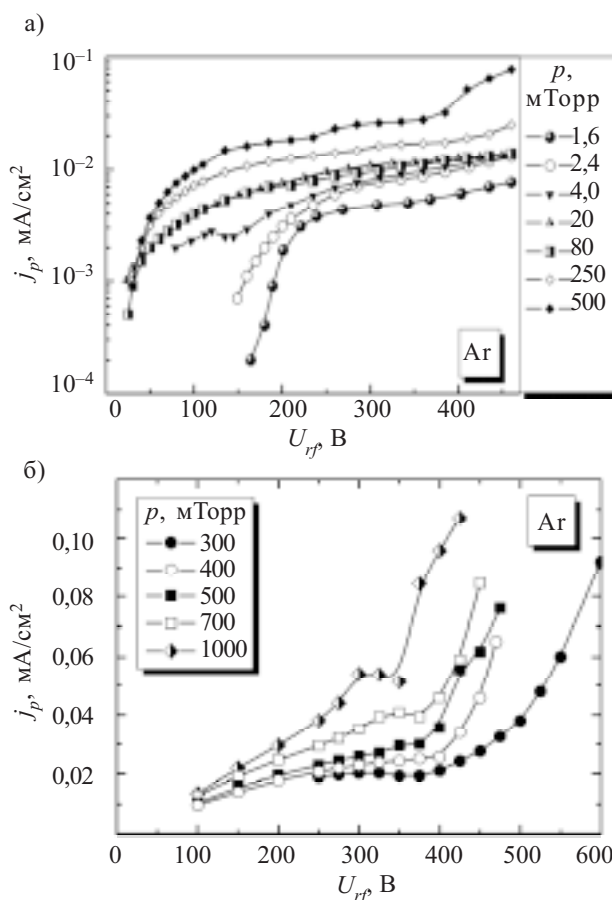


Рис. 4. Зависимость плотности тока ионов на пристеночный зонд от ВЧ-напряжения при низких (а) и высоких значениях давления аргона (б)

меру, наблюдается монотонное повышение плотности ионного тока с ростом ВЧ-напряжения.

На кривых, представленных на рис. 4, б, при больших значениях ВЧ-напряжения появляется характерный излом, соответствующий переходу ВЧ-разряда из α -режима (слаботочного) в γ -режим (сильноточный). В α -режиме электроны приобретают энергию, достаточную для ионизации атомов газа в ВЧ-поле в квазинейтральной плазме, при этом эмиссия электронов с поверхностей электродов в поддержании разряда большой роли не играет. Проводимость приэлектродных слоев мала, а ток между плазмой и электродами замыкается, в основном, током смещения. Кроме того, в α -режиме электроны заполняют приэлектродный слой в течение анодной фазы. В катодной фазе движущаяся граница расширяющегося слоя выталкивает эти электроны обратно в плазму, при этом они могут приобретать энергию благодаря повышенному электрическому полю в слое. Скорость ионизации газа электронами, вытесненными расширяющейся границей слоя, может значительно превышать скорость ионизации электронами, получившими энергию от ВЧ электрического поля в плазменном объеме.

В γ -режиме в приэлектродных слоях развиваются электронные лавины, ионизация газа электронным ударом происходит, в основном, вблизи границы «приэлектродный слой — квазинейтральная плазма», при этом эмиссия электронов с поверхности электродов существенно увеличивает количество электронов и влияет на поддержание разряда. Приэлектродные слои в γ -режиме обладают значительной проводимостью и по характеристикам подобны катодному слою тлеющего разряда постоянного тока. Известно [11—20], что ВЧ-разряд при среднем давлении газа переходит из α - в γ -режим скачкообразно (что видно на рис. 4, б на кривой для 1000 мТорр), при этом значительно возрастают плотность плазмы в разрядном объеме и амплитуда ВЧ-тока. При более низком давлении ВЧ-разряд переходит из одного режима в другой плавно, без скачков.

Из рис. 4 следует также, что плотность тока на пристеночный зонд остается практически неизменной при изменении давления газа в диапазоне от единиц до примерно 100 мТорр. Более подробно этот эффект виден на рис. 5. По-видимому, в этом диапазоне давления газа более плотная плазма концентрируется в зазоре между плоскими электродами, а вне этого зазора скорость ионизации газа электронами снижается. Но с ростом давления газа снижается скорость диффузионного ухода заряженных частиц на стенки камеры вследствие амбиполярной диффузии. По-видимому, в определенном диапазоне давления газа скорость ионизации близка к скорости диффузионного ухода, что и приводит к постоянству плотности тока ионов на пристеночный зонд с изменением давления. С повышением давления газа выше 100 мТорр в зазоре между электродами рождается все больше заряженных частиц, плотность плазмы возрастает во всем объеме разрядной камеры, увеличивается и поток ионов на стенки камеры. Особенно ярко этот эффект выражен при достаточно высоком ВЧ-напряжении, когда разряд горит в сильноточном режиме.

Важной характеристикой асимметричной разрядной камеры является постоянное напряжение автосмещения, которое возникает из-за различия потоков электронов и ионов на электроды различной площади. В случае когда ВЧ-электрод имеет меньшую площадь, чем все заземленные поверхности камеры (как в нашем случае), между электродами возникает постоянное напряжение, при этом меньший по площади электрод приобретает отрицательный потенциал [12]. Эта особенность асимметричного ВЧ емкостного разряда позволяет значительно увеличить поток положительных ионов на ВЧ-электрод и расположенные на нем обрабатываемые пластины, что повышает скорость ионно-плазменного травления. Из рис. 6 видно, что напряжение автосмещения увеличивается практически линейно с ростом ВЧ-напряжения. Некоторые особенности процессов, наблюдаемые на этих кривых (например, для давления 500 мТорр и

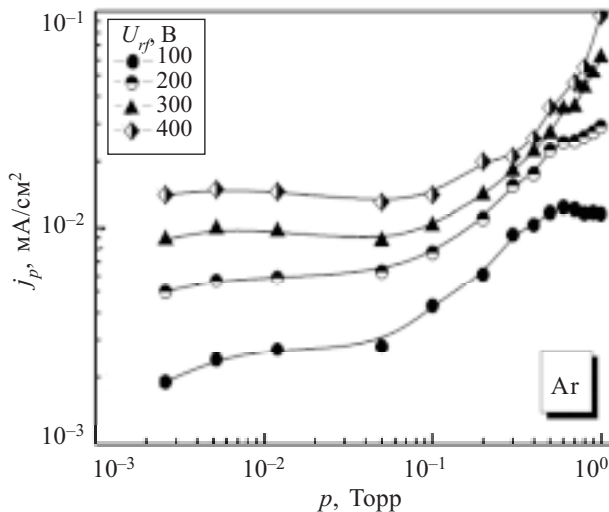


Рис. 5. Зависимость плотности тока ионов на пристеночный зонд от давления аргона при различных значениях приложенного ВЧ-напряжения

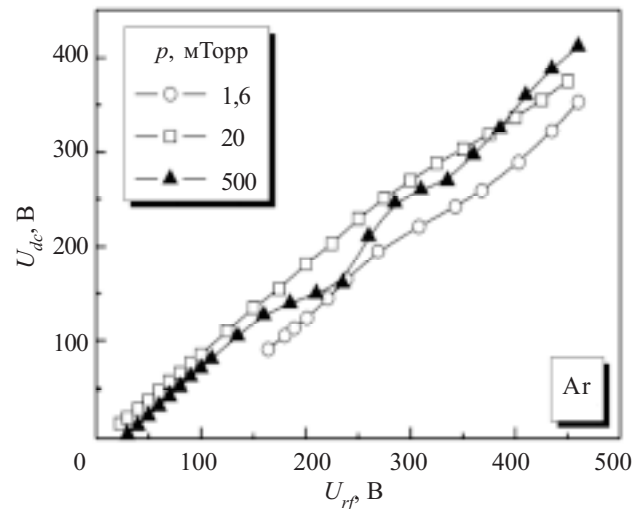


Рис. 6. Зависимость постоянного напряжения автосмещения U_{dc} от ВЧ-напряжения при различном давлении аргона

ВЧ-напряжения 240 В) можно объяснить переходом ВЧ-разряда из слаботоочного в сильноточный режим и сопровождающей его перестройкой разрядной структуры.

Радиальное распределение плотности потока ионов из плазмы ВЧ-разряда на обрабатываемую поверхность

Следует отметить, что плотность j тока ионов из плазмы на обрабатываемую поверхность и ее радиальное распределение относятся к важнейшим характеристикам плазмохимического реактора с прикладной точки зрения, а достижение высокой плотности тока при условии максимальной однородности является одной из основных задач при конструировании плазменных технологических устройств. В связи с этим, при изучении физических и технологических параметров описанного реактора особое внимание было уделено именно изучению закономерностей формирования радиальных профилей распределения j . При этом измерения проводились с использованием в качестве рабочего газа как аргона, наиболее удобного для экспериментальных исследований и моделирования, так и молекулярных химически активных газов, широко используемых в технологии.

Как видно из рис. 7, а, при давлении аргона 55 мТорр и ВЧ-напряжении на электроде в диапазоне 25—225 В характер радиального распределения плотности тока ионов практически не меняется, неоднородность плотности тока по радиусу составляет порядка $\pm 5\%$, а абсолютная величина j монотонно растет с ростом ВЧ-напряжения. На этом же рисунке

пунктирной линией показаны также результаты расчета, полученные для значения ВЧ-напряжения 200 В с помощью кода ООРИС, которые, как видно, хорошо согласуются с экспериментальными данными. Наблюдаемый небольшой максимум вблизи центра электрода можно объяснить небольшим градиентом давления газа, возникающим вследствие радиального характера движения потока газа при откачке.

Подобный характер поведения радиального профиля распределения j при изменении давления виден на рис. 7, б. В диапазоне давлений 50—500 мТорр форма профиля остается качественно неизменной, а величина j монотонно растет с ростом давления аргона. Если же в качестве рабочего газа используется фреон (рис. 7, в, г), радиальный профиль j при изменении давления изменяется иначе. При низком давлении, как и для аргона, плотность тока практически постоянна по радиусу. При более высоком давлении разряд становится торообразным, в связи с чем профиль распределения плотности тока становится сильно неоднородным. Абсолютная величина плотности тока на оси разряда изменяется немонотонно с ростом давления фреона.

Появление неоднородности ионного потока на обрабатываемую поверхность при высоком давлении газа можно объяснить тем, что с ростом давления область интенсивного свечения плазмы и интенсивной ионизации смещается к краю подложкодержателя, где присутствует сильное ВЧ электрическое поле в зазоре между подложкодержателем и заземленным экраном. Неоднородность ионизации определяется длиной релаксации энергии, поглощенной электро-

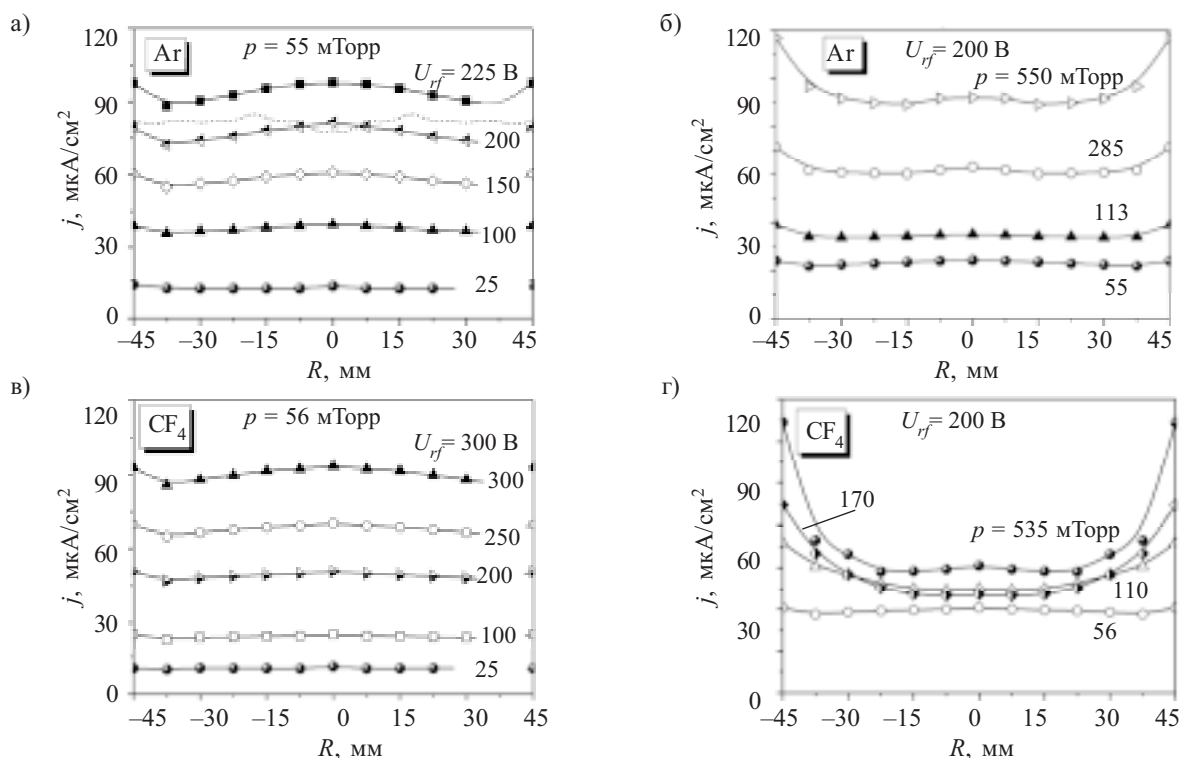


Рис. 7. Типичные радиальные профили плотности j ионного тока на поверхность подложкодержателя, полученные при различных значениях ВЧ-напряжения на электроде (а, в) и разным давлением (б, г) рабочего газа в камере: а, б — аргона; в, г — фреона

нами в области сильного ВЧ-поля. Известно, что длина релаксации энергии различна для молекулярных и атомарных газов [20]. Так, например, при использовании CF_4 энергия, поглощаемая плазмой от электрического поля, расходуется, в основном, на возбуждение молекулярных колебаний [3] вблизи области сильного поля, а в центре разряда количество электронов с энергией, достаточной для ионизации, сокращается. При использовании аргона электроны с энергией до 11,5 эВ испытывают только упругие столкновения с атомами, в которых потери энергии электронов очень малы. Следовательно, длина релаксации энергии электронов в аргоне больше, чем в молекулярном газе CF_4 , что приводит к уменьшению неоднородности плазмы.

Выводы

Таким образом, в результате математического моделирования газового разряда и исследования пространственного распределения параметров плазмы предложена конструкция газоразрядной камеры плазмохимического реактора, позволяющая при достаточно низком давлении рабочего газа проводить анизотропное травление обрабатываемой поверхности с повышенной скоростью.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Roth J. R., Industrial plasma engineering. Vol. 2. Applications to Nonthermal Plasma Processing.— Bristol, Philadelphia: Institute of physics, 2001.
2. Sugawara M. Plasma etching: fundamentals and applications.— Oxford: Oxford University Press, 1998.
3. Lieberman M. A., Lichtenberg A. J. Principles of plasma discharges and materials processing.— Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
4. Левитский С. М. Исследование потенциала зажигания высокочастотного разряда в газе в переходной области частот и давлений // Журнал технической физики.— 1957.— Т. 2, № 5.— С. 970—977.
5. Кропотов Н. Ю., Лисовский В. А., Егоренков В. Д. и др. Особенности пробоя газа низкого давления в высокочастотном однородном поле // Письма в ЖТФ.— 1988.— Т. 14, № 4.— С. 359—363.
6. Lisovskiy V. A., Yegorenkov V. D. RF breakdown of low-pressure gas and a novel method for electron drift velocity

determination in gases // J. Phys. D: Appl. Phys.— 1998.— Vol. 31, N 23.— P. 3349—3357.

7. Lisovskiy V. A., Booth J.-P., Landry K. et al. Similarity law for RF breakdown // Europhysics Letters.— 2008.— Vol. 82, N 1.— P. 15001 (1—5).

8. Lisovskiy V. A., Booth J.-P., Landry K. et al. Electron drift velocity in argon, nitrogen, hydrogen, oxygen and ammonia in strong electric fields determined from RF breakdown curves // J. Phys. D: Appl. Phys.— 2006.— Vol. 39, N 4.— P. 660—665.

9. Lisovskiy V. A., Booth J.-P., Landry K. et al. The effect of discharge chamber geometry on the ignition of low-pressure RF capacitive discharges // Physics of Plasmas.— 2005.— Vol. 12, N 9.— P. 093505 (1—8).

10. Olthoff J. K., Greenberg K. E. The Gaseous Electronics Conference RF Reference cell — an introduction // J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.— 1995.— Vol. 100, N 4.— P. 327—340.

11. Кропотов Н. Ю., Лисовский В. А., Егоренков В. Д. и др. Особенности вольт-амперных характеристик слаботочной формы высокочастотного разряда Е-типа // Письма в ЖТФ.— 1989.— Т. 15, № 21.— С. 17—21.

12. Райзер Ю. П., Шнейдер М. Н., Яценко Н. А. Высокочастотный емкостный разряд: Физика. Техника эксперимента. Приложение.— М.: Изд-во МФТИ «Наука-Физматлит», 1995.

13. Яценко Н. А. Связь высокого постоянного потенциала плазмы с режимом горения высокочастотного емкостного разряда среднего давления // Журнал технической физики.— 1981.— Т. 51, № 6.— С. 1195—1204.

14. Belenguer Ph., Boeuf J. P. Transition between different regimes of RF glow discharges // Phys. Rev. A.— 1990.— Vol. 41, N 8.— P. 4447—4459.

15. Godyak V. A., Khanneh A. S. Ion bombardment secondary electron maintenance of steady RF discharge // IEEE Trans. Plasma Sci.— 1986.— Vol. PS-14, N 2.— P. 112—123.

16. Райзер Ю. П., Шнейдер М. Н. Структура приэлектродных слоев высокочастотного разряда и переход между двумя его формами // Физика плазмы.— 1987.— Т. 13, № 4.— С. 471—479.

17. Godyak V. A., Piejak R. B., Alexandrovich B. M. Electrical characteristics of parallel-plate RF discharges in argon // IEEE Trans. Plasma Sci.— 1991.— Vol. 19, N 4.— P. 660—676.

18. Vidaud P., Durrani S. M. A., Hall D. K. Alpha and gamma RF capacitive discharges in N_2 at intermediate pressures // J. Phys. D: Appl. Phys.— 1988.— Vol. 21, N 1.— P. 57—66.

19. Lisovskiy V. A., Booth J.-P., Yegorenkov V. D. et al. Modes and the alpha-gamma transition in RF capacitive discharges in N_2O at different RF frequencies // Physics of Plasmas.— 2006.— Vol. 13, N 10.— P. 103505.

20. Райзер Ю. П. Физика газового разряда.— М.: Наука, 1987.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

8-й Беларуско-Российский Семинар

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ И СИСТЕМЫ НА ИХ ОСНОВЕ

г. Минск, 17—20 мая 2011

Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси

Направления работы семинара:

- Лазерные диоды
- Лазеры с электронным и оптическим возбуждением
 - Источники и приемники излучения
- Полупроводниковые материалы и гетероструктуры
 - Оптоэлектронные устройства

<http://www.semiconductor-lasers-and-systems.by/ru>