

## ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА БАЗЕ ВЧ ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДА ДЛЯ РЕАКТИВНОГО ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР

С.В. Дудин

*Харьковский национальный университет имени В.Н.Каразина, Украина*

Поступила в редакцию 25.08.2009

В обзоре обобщаются результаты экспериментальных исследований ВЧ индукционного разряда, полученные в течение последних лет, представлены математические модели разряда, позволяющие повысить эффективность разработки нового плазменного технологического оборудования. Особое внимание уделяется однородности потока ионов из плазмы на обрабатываемую поверхность. Кроме того, описана конструкция плазмохимического реактора, основанного на ВЧ индукционном разряде, и изложены результаты разработки современных технологических процессов травления наноструктур с его помощью.

**Ключевые слова:** ВЧ индукционный разряд, плазмохимический реактор, плазменное травление.

У огляді узагальнюються результати експериментальних досліджень ВЧ індукційного розряду, одержані протягом останніх років, представлені математичні моделі розряду, що дозволяють підвищити ефективність розробки нового плазмового технологічного обладнання. Особлива увага приділяється однорідності потоку іонів із плазми на оброблювану поверхню. Крім того, описана конструкція плазмохімічного реактора, заснованого на ВЧ індукційному розряді, і викладені результати розробки сучасних технологічних процесів травління наноструктур із його допомогою.

**Ключові слова:** ВЧ індукційний розряд, плазмохімічний реактор, плазмове травління.

In the review results of experimental researches of RF ICP, carried out for the last few years are summarized, mathematical models of the discharge are presented, allowing to increase efficiency of development of the new plasma process equipment. Special attention is paid to homogeneity of ion current from the plasma to the processed surface. Besides the construction of plasma-chemical reactor based on RF ICP is described, and results of development of modern technological processes of nanostructure etching are presented.

**Keywords:** RF inductive discharge, ICP, plasma-chemical reactor, plasma etching.

### ВВЕДЕНИЕ

За последние 15 лет ВЧ разряд индукционного типа (ВЧИР) получил широкое распространение в разнообразных технологических применениях и стал одним из основных инструментов технологии микро- и нанoeлектроники. На его основе созданы реакторы плазмохимического травления, источники плазмы, активаторы реактивных газов и т.п. [1 – 6]. Обладая относительной простотой технической реализации этот тип разряда позволяет создавать однородную плазму высокой плотности в больших объемах, демонстрируя при этом прекрасную масштабируемость. При помощи дополнительного ВЧ смещения поток ионов из плазмы ВЧ индукционного разряда (ВЧИР) может быть легко ускорен в направлении обрабатываемой по-

верхности, причем достигается непосредственное управление энергией ионов, начиная от 20 эВ и до сотен эВ. Поскольку ВЧИР является безэлектродным, на его основе можно создавать устройства, работающие с химически активными и агрессивными газами, достигая при этом высокой химической чистоты обработки. Вот далеко неполный перечень достоинств ВЧИР, обеспечивших его повсеместное применение.

История индукционного разряда насчитывает почти столько же лет, что и изобретение электричества: первое сообщение Хитторфа о “безэлектродном кольцевом разряде” относится к 1884 году. Но только в 1970-х годах с изобретением индукционных плазмотронов атмосферного давления ВЧИР нашел широкое технологическое применение. В

конце 1980-х возник повышенный интерес к индукционным разрядам низкого давления в связи с растущими потребностями микроэлектроники при производстве элементов субмикронных размеров. К 2000 г плазменные реакторы, основанные на ВЧИР стали де-факто стандартом в ионно-плазменном травлении при производстве микроэлектронных устройств.

В западной литературе начало “эры” индукционного разряда обычно связывают с первыми патентами 1990 г [7]. Например, в обзоре [6] было сказано, что первые системы для плазменной обработки на базе ВЧИ разряда были разработаны в Японии и США в конце 80-х – начале 90-х годов 20 века и приведены ссылки на патенты, заявки на которые были поданы в 1989 г. В то же время, в Отраслевой научно-исследовательской лаборатории диагностики плазменных технологических процессов (ОНИЛ ДПТП) Харьковского государственного университета (сейчас Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина) еще с начала 80-х годов проводились систематические фундаментальные и прикладные исследования ВЧИ разряда и способов формирования интенсивных низкоэнергетичных потоков ионов, результатом которых явилась разработка серии плазменных технологических систем на базе ВЧИР с диаметром разрядной камеры от 50 до 300 мм для осуществления процессов плазмохимического, реактивного ионно-плазменного и ионно-лучевого травления [8 – 10], а заявки на соответствующие патенты были поданы еще в 1987-89 гг [11 – 13]. Таким образом, эти работы во многом опередили время, однако информационная изолированность Советского Союза привела к тому, что они были неизвестны в мире. В тот период были разработаны и изготовлены экспериментальные специализированные установки “Контур-02”, “Контур-04”, “Каштан-5”, “Контур-05” и “Контур-06”, и проведен цикл работ по апробации и технологическому обеспечению этих установок для производства элементов оптоэлектроники, быстродействующих микроэлектронных приборов, финишной полировки лазерной оптики, плазменного проявления многослой-

ного кремнийорганического резиста, размерного травления кремния и т. д.

Поскольку, после развала СССР отечественная микроэлектронная промышленность, которая была основным заказчиком этих работ, оказалась в глубоком кризисе, в 90-е годы интенсивность прикладных работ в ОНИЛ ДПТП снизилась, однако деятельность в области ВЧИ плазменных устройств не прекратилась. В эти годы был проведен ряд фундаментальных исследовательских работ [14 – 23], выполнение которых позволило выйти на более высокий уровень понимания физических процессов в ВЧ индукционном разряде и перейти от эмпирического подхода при конструировании плазменных технологических устройств к осознанному, обоснованному выбору параметров их элементов.

Наиболее полно результаты описанных работ в области ВЧИР вплоть до начала 2000-х годов отражены в обзорах [18, 24]. Однако, активная деятельность в этом направлении продолжается и по сей день, и с момента публикации этих работ получено много новых результатов, что и явилось побудительным мотивом для написания настоящей статьи. В последние годы вектор научной активности сместился в направлении разработки математических моделей разряда, пригодных для моделирования реальных технологических устройств в процессе их разработки, изучения импеданса плазмы, исследования факторов, влияющих на однородность плазменной обработки, и, наконец, выполнения хозяйственных работ в рамках межотраслевой научно-технической программы “Программа развития наиболее конкурентоспособных направлений микроэлектроники в Украине”, что позволило выйти на новый виток разработки современных плазменных технологических устройств и технологий. Ниже представлены основные результаты этих работ, включая не вошедшие в другие публикации.

## **ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДИК**

Описанные в данном разделе экспериментальные исследования были выполнены в Лаборатории диагностики плазменных технологических процессов кафедры физических технологий физико-технического факультета

ХНУ имени В.Н.Каразина в процессе разработки универсального модуля для плазмохимического и реактивного ионно-плазменного травления. Это устройство является развитием конструкций плазменных реакторов, описанных в [9 – 13].

Принципиальная схема и фотография плазменного реактора изображены на рис. 1. Газоразрядная камера с металлическими стенками имеет радиус  $R = 7$  см и высоту  $L = 6$  см. Крышка камеры из термостойкого стекла и медный индуктор охлаждается потоком воздуха с помощью вентилятора, расположенного на крышке камеры. В нижней части камеры находится электрод-подложкодержатель из нержавеющей стали (диаметр рабочей области – 100мм), на котором во время травления располагается обрабатываемая полупроводниковая пластина. Высокочастотная энергия вводится в плазму при помощи трехвиткового индуктора, который через согласующее устройство подключен к ВЧ генератору с рабочей частотой 13,56 МГц. Подводимая ВЧ мощность может меняться в диапазоне 50 – 500 Вт. ВЧ мощность на охлаждаемый проточной водой подложкодержатель подается от того же генератора, что и на индуктор, при этом используется дополнительное согласующее устройство с переменной

индуктивностью, что позволяет плавно регулировать ВЧ смещение на подложкодержатель. Рабочий объем откачивается турбомолекулярным насосом до остаточного давления порядка  $10^{-5}$  Торр. Рабочее давление находится в пределах от  $2 \cdot 10^{-4}$  до 5 Торр. Посадочное место реактора рассчитано на сопряжение со стандартным высоковакуумным постом. В данной работе в качестве вакуумной системы использовался вакуумный пост, укомплектованный турбомолекулярным насосом 01AB-1500 и дополненный блоком питания Lenze 8200 Vector, адаптированным для работы в условиях ВЧ помех. Необходимость использования нового блока была обусловлена невозможностью работы штатного блока питания БП-267 совместно с ВЧ генератором. Даже небольшой уровень ВЧ помех приводил к немедленному выходу блока из строя. Применение блока Lenze 8200 Vector позволило полностью решить эту проблему. Помимо устойчивости к высокочастотным помехам, данный блок питания позволил значительно уменьшить время выхода насоса на рабочий режим: с 15 – 20 минут на штатном блоке питания до 3 – 4 минут при использовании блока Lenze 8200 Vector. Дополнительным полезным свойством этого блока питания является возможность принудительной

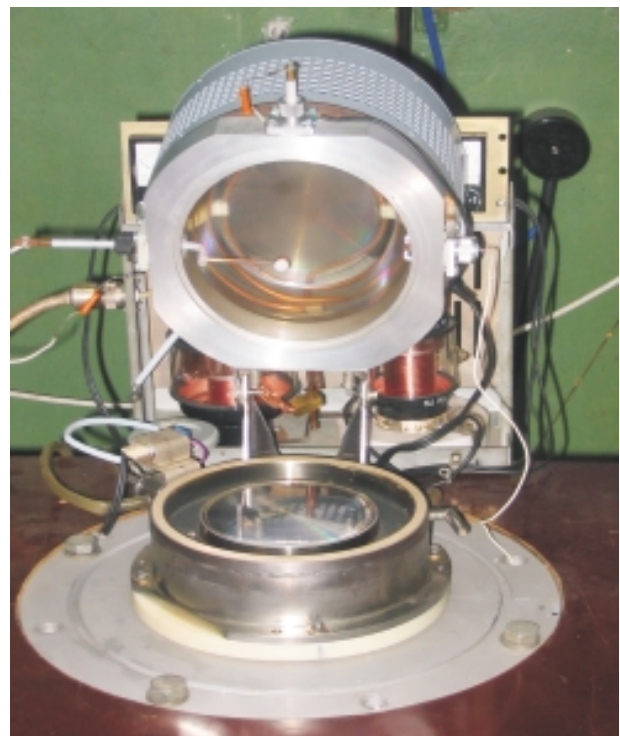


Рис. 1. Принципиальная схема и фотография плазмохимического реактора.

остановки ротора турбомолекулярного насоса. При этом кинетическая энергия ротора выделяется в тормозном резисторе. Время полной остановки насоса составляет не более 3 минут. Описанная система откачки обеспечивает время достижения остаточного давления  $10^{-4}$  Тор не более 10 минут,  $10^{-5}$  Тор – около 30 минут.

Измерения радиальных профилей плотности тока ионов на обрабатываемую поверхность проводились с помощью подвижного плоского зонда размерами  $1 \times 1$  см с 5 мм охранным кольцом из слюды для предотвращения краевых эффектов. Также были проведены измерения радиальных параметров плазмы с помощью подвижного ленгмюровского цилиндрического зонда диаметром 0,2 мм и длиной 2 мм. Подвижный ленгмюровский зонд перемещался в плоскости на расстоянии 40 мм от подложкодержателя.

Измерение и обработка зондовых характеристик проводились при помощи универсального измерителя параметров газоразрядной плазмы “Плазмометр” [25, 26], разработанного в лаборатории диагностики плазменных технологических процессов ХНУ и предназначенного для автоматизированного измерения ключевых стационарных параметров лабораторной и технологической газоразрядной плазмы и их пространственных распределений. Измеряемыми параметрами были: потенциал плазмы, плавающий потенциал, плотность электронов и положительных ионов, температура и энергетический спектр электронов. Прибор работал под управлением компьютера, оснащенного сервисным программным обеспечением, позволяющим полностью автоматизировать процесс измерения и обработки информации. В основу Плазмометра положен метод ленгмюровского зонда с комбинированной электронной и численной обработкой зондового сигнала зонда. Данными, снимаемыми с зонда электронным контроллером, являются ВАХ и зависимости производных зондового тока от потенциала зонда, измеряемые по усовершенствованной модуляционной методике, позволяющей достичь высокой чувствительности (вплоть до  $3 \div 4$  порядков по амплитуде) при измерении высокоэнергетичного “хвоста” функции рас-

пределения электронов по энергии даже в нестационарной плазме.

### **АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ В РЕАКТОРЕ НА БАЗЕ ВЧ ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДА**

Высокое, повторяемое качество продукции могут гарантировать только устройства, в которых технологический процесс полностью автоматизирован. При этом одним из ключевых факторов в достижении стабильного качества является оперативный контроль параметров технологического процесса и его подробное протоколирование. Решение этой задачи в установках плазмохимического травления на базе ВЧ разрядов требует разработки специальных измерительных устройств, а также обычно осложнено высоким уровнем высокочастотных помех.

Для работы с описанным плазменным реактором была специально разработана автоматизированная система мониторинга технологического процесса плазмохимического травления в реакторе на базе ВЧ индукционного разряда, позволяющая в условиях интенсивных ВЧ помех измерять основные параметры процесса, отображать на экране компьютера их текущие значения и временные зависимости, а также записывать протокол технологического процесса [27].

Блок-схема ВЧ питания и подключения измерительной системы показана на рис. 2. Высокочастотная мощность подводится к реактору от ВЧ генератора ГТВЭ-1000 (частота 13,56 МГц, мощность 0-1000 Вт) при помощи согласующего устройства (СУ), которое обеспечивает согласование фиксированного вещественного выходного сопротивления генератора с переменным комплексным импедансом плазменной нагрузки. Данное согласующее устройство одновременно обеспечивает ВЧ питанием как индуктор, создающий плазму в объеме реактора, так и электрод-подложкодержатель, что обеспечивает ускорение ионов плазмы в направлении обрабатываемой поверхности.

Помимо давления газа и мощности ВЧ генератора, которые измеряются стандартными промышленными измерительными прибора-

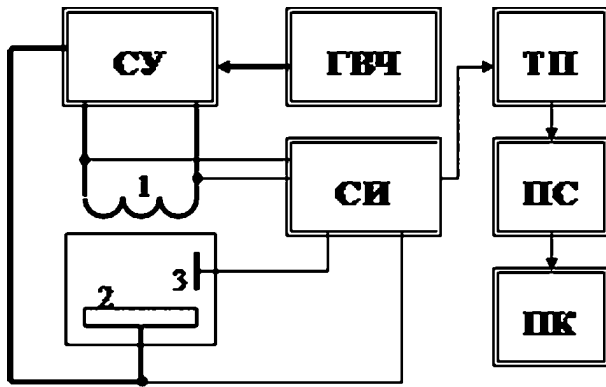


Рис. 2. Блок-схема подключения ВЧ питания и измерительной системы. 1- индуктор, 2 – электрод-подложкодержатель, 3 – плоский зонд, ГВЧ – генератор высокой частоты, СУ – согласующее устройство, СИ – система измерения, ТП – терминальная плата, ПС – плата сопряжения, ПК – персональный компьютер.

ми, в данной системе необходимо контролировать еще 4 специфических параметра:

- амплитуда ВЧ напряжения на индукторе  $U_{ind}$ ;
- амплитуда ВЧ напряжения на электродо-подложкодержателе  $U_{AC}$ ;
- постоянное напряжение автосмещения на электродо-подложкодержателе  $U_{DC}$ ;
- плотность тока ионов из плазмы ВЧ индукционного разряда  $j_i$ .

Во избежание искажения сигналов и излучения высокочастотных помех проводники, которыми измерительная система подключается к ВЧ цепям, должны быть минимально возможной длины. В связи с этим система измерения разбита на несколько блоков: делители напряжения и детекторная часть расположены непосредственно на установке максимально близко к источникам измеряемых сигналов; затем сигнал (уже в виде постоянного напряжения) поступает на плату сопряжения с компьютером, расположенную на расстоянии нескольких метров от установки. Поскольку в системе присутствуют значительные ВЧ напряжения (до нескольких киловольт) и ВЧ токи (десятки ампер), особое внимание должно быть уделено защите от высокочастотных помех. Обязательным условием является экранирование детекторных цепей и ВЧ развязка между ними и платой сопряжения с компьютером.

Для измерения амплитуды ВЧ напряжений на индукторе и потенциальном электроде в работе [27] были разработаны амплитудные

детекторы ВЧ напряжения, выполненные по схеме емкостного делителя напряжения с последующим выпрямлением сигнала при помощи диодно-конденсаторной выпрямительной схемы с удвоением входного напряжения. Следует отметить, что при измерении напряжения на индукторе возникает следующая специфическая проблема: измеряемой величиной является переменная разность потенциалов между его выводами, причем ни один из них не подключен к корпусу, на обоих выводах присутствует ВЧ напряжение, которое может достигать нескольких киловольт. В то же время, выходной сигнал должен быть привязан к “земле”. Для решения этой проблемы в работе [27] была разработана специальная измерительная схема, позволяющая измерять дифференциальное ВЧ напряжение на индукторе в диапазоне 0,5 – 5 кВ.

При измерении постоянного напряжения автосмещения электрода-подложкодержателя основной проблемой является наличие на электроде ВЧ напряжения с амплитудой, превышающей измеряемое постоянное напряжение. Для блокирования переменной составляющей в [27] применен простейший RC фильтр, который позволяет снизить амплитуду ВЧ сигнала до уровня десятков милливольт.

Описанные выше решения обеспечивают возможность подключения системы измерения к персональному компьютеру. В работе [27] компьютер был подключен к системе измерения с помощью платы согласования PCI-1710HG производства компании Advantech, которая позволяет оцифровывать с 12-битным разрешением до 16 потенциальных или до 8 дифференциальных сигналов в диапазоне напряжения от 10 мВ до 10 В. Входными сигналами для платы сопряжения с компьютером являются 4 сигнала, приведенных к стандартному уровню напряжения 0 – 5 В: постоянное и переменное напряжение на электродо-подложкодержателе, амплитуда напряжения на выводах индуктора и ток плоского зонда. Для повышения помехозащитности все входы включены по дифференциальной схеме.

Опыт эксплуатации установок с ВЧ разрядами показывает, что их специфической особенностью является большой уровень высо-

кочастотных помех, что может являться серьезной проблемой при измерениях. Зачастую конструирование системы измерения осложняется тем фактом, что корпус реактора, корпус согласующего устройства и общий провод системы измерения оторваны по высокой частоте от “земли” установки. К этому прибегают, чтобы избежать появления “земляных петель”, приводящих к повышению уровня ВЧ помех. Таким образом, измеряемые сигналы (напряжение 1 – 5 В) могут быть замаскированы ВЧ наводкой, превышающей по амплитуде полезный сигнал на 1 – 2 порядка.

Для подавления этих помех в работе [27] были применены RC фильтры, смонтированные на терминальной плате PCLD-8710 производства компании Advantech. Все 8 фильтров имеют идентичную конструкцию и состоят из резистора сопротивлением 750 кОм, включенного последовательно с источником сигнала, и конденсатора емкостью 0,1 мкФ, шунтирующего аналоговые входы на аналоговую “землю” платы. Таким образом постоянная времени фильтра составляет порядка 0,1 секунды, что позволяет эффективно подавить как ВЧ помехи частотой 13,56 МГц, так и сетевые помехи частотой 50 Гц. Высокоомные резисторы на всех аналоговых входах выполняют еще и защитную функцию. Поскольку в данной системе присутствуют высокие напряжения (до нескольких киловольт), существует потенциальная возможность попадания этого напряжения на входы платы аналогового ввода при сбоях, неисп-

равностях и т.п. В этом случае аналоговые входы платы, рассчитанные на максимальное напряжение 10 В, неизбежно выйдут из строя. В выбранной конфигурации системы фильтров абсолютно все цепи (включая “земляные”) подключаются к плате через высокоомные резисторы, благодаря чему, даже при попадании на вход фильтра напряжения в несколько киловольт, входной ток не превысит нескольких миллиампер, что является безопасным для выбранной платы.

Подключение к измерительной системе компьютера, естественно, требует разработки специального программного обеспечения. В частности, в [27] описано программное обеспечение, обслуживающее измерительную систему технологической установки с реактором ВЧ индукционного типа. Функции программного обеспечения сводятся к масштабированию входных сигналов, построению временных зависимостей и их записи в файл. В течение технологического процесса на экране компьютера в реальном масштабе времени отображаются измеренные значения основных параметров системы, а также их зависимость от времени. Система позволяет также записывать протокол технологического процесса на жесткий диск компьютера. На рис. 3. в графическом виде представлен записанный протокол процесса травления оксида кремния на временной зависимости хорошо видны основные стадии процесса: на 3 секунде был включен ВЧ генератор, на 20 секунде произошел пробой плазмы, затем следует процесс начального формирования парамет-

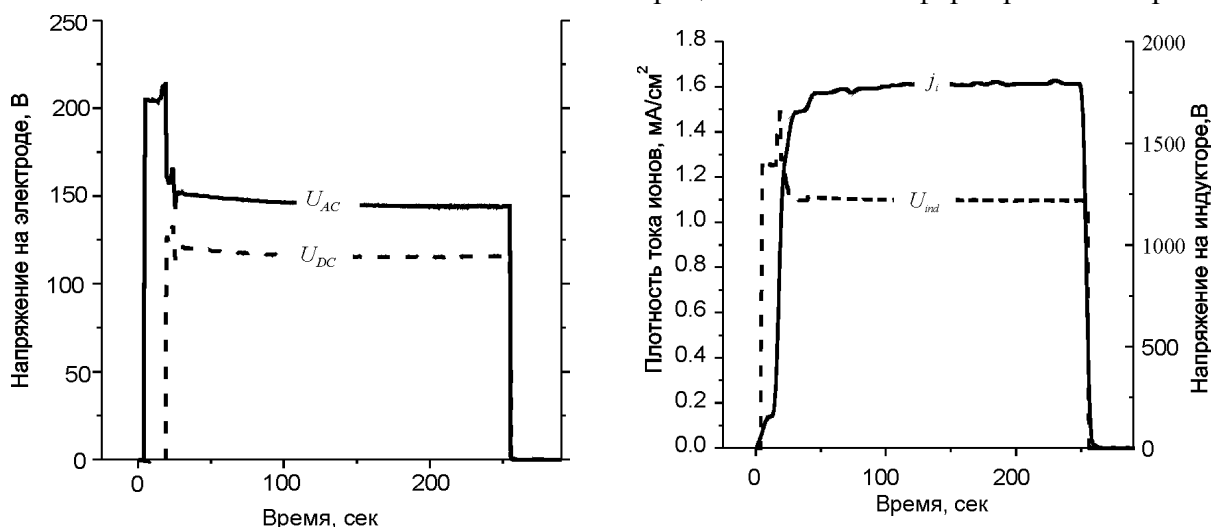


Рис. 3. Записанный протокол процесса травления оксида кремния.

ров разряда в течение 10 – 20 сек, и стабильная фаза процесса травления.

Таким образом, применение описанной системы позволяет подробно изучить все стадии технологического процесса плазменного травления, включая быстротекущие переходные процессы, повысить точность и надежность измерения параметров разряда. Графическое представление временных зависимостей параметров разряда позволяет оценить стабильность основных технологических факторов, а запись протокола процесса может быть полезна при анализе результатов травления.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данном разделе представлены результаты систематических экспериментальных исследований реактора для плазмохимического травления на базе ВЧ индукционного разряда. Проведены измерения интегральных параметров разряда (давления, напряжения на индукторе, вводимой ВЧ мощности), зондовые измерения пространственного распределения локальных параметров плазмы (плотность плазмы, температура и функция распределения электронов по энергии) и радиальных профилей плотности тока ионов на обрабатываемую поверхность. Измеренные зависимости существенно отличаются для инертного газа (Ar) и молекулярных ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CF_4$ ). Проведено сравнение полученных результатов с расчетами, выполненными с использованием глобальной пространственно усредненной модели и двумерной гидродинамической модели.

## ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ИОНОВ ИЗ ПЛАЗМЫ ВЧ ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДА НА ОБРАБАТЫВАЕМУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

Прежде всего, подчеркнем, что плотность тока ионов из плазмы на обрабатываемую поверхность  $j$  и ее радиальное распределение являются одними из важнейших характеристик 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  $j$ . 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.

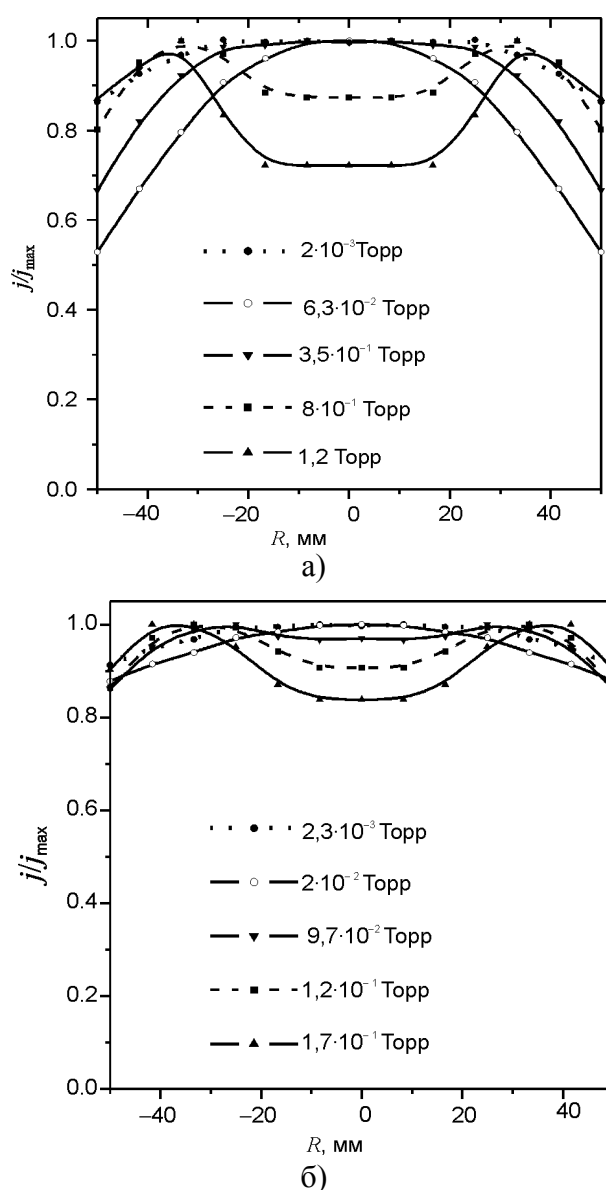


Рис. 4. Типичные радиальные профили ионной плотности тока  $j$  на поверхности подложкодержателя. а) – рабочий газ – аргон, б) – рабочий газ – фреон ( $CF_4$ ).

Типичные радиальные профили плотности ионного тока насыщения  $j$  из плазмы на поверхность подложки представлены на рис. 4 для различных давлений аргона и фреона ( $\text{CF}_4$ ) при подводимой ВЧ мощности 100 Вт. Измерения, выполненные при различных значениях ВЧ мощности показали, что в диапазоне мощностей 50 – 500 Вт плотность ионного тока  $j$  пропорциональна мощности, а форма радиального профиля  $j(r)$  практически не изменяется.

Как видно из рис. 4а, при использовании в качестве рабочего газа аргона для давления  $p < 350$  мТорр профиль плотности ионного тока  $j$  выпуклый, с максимумом на оси разряда; для  $p > 350$  мТорр появляется минимум на оси камеры, с максимумами вне оси. В этом диапазоне отношение максимальной плотности тока к плотности тока на оси увеличивается с давлением. Примечательным является немонотонное поведение степени неоднородности ионного тока при изменении давления. При уменьшении давления ниже  $10^{-3}$  Торр профиль становится более выпуклым и однородность ухудшается. Наилучшая однородность ( $\pm 6\%$ ) достигается при давлении около  $2 \cdot 10^{-3}$  Торр, а затем, при увеличении давления однородность снова ухудшается (до  $\pm 22\%$  при давлении  $6 \cdot 10^{-2}$  Торр). Дальнейший рост давления приводит к улучшению однородности вплоть до  $\pm 6\%$ , но при давлениях выше 1 Торр однородность ионного потока вновь ухудшается вследствие появления минимума в центре.

Ухудшение однородности ионного потока на обрабатываемую поверхность при высоком давлении легко объяснимо, если принять во внимание тот факт, что вследствие уменьшения электронной теплопроводности при высоких давлениях индукционный разряд вырождается в тор, находящийся в прииндукторной области. В то же время, аналогичное явление при давлении между  $10^{-3}$  и  $10^{-2}$  Торр объяснить сложнее. По-видимому, это связано с немаксвелловским характером ионизации вблизи индуктора, где есть большое электрическое поле, и колебательная энергия электронов становится сопоставимой с тепловой. Дополнительная энергия электронов

обуславливает повышение скорости ионизации в прииндукторной области, в связи с чем наблюдается подъем плотности тока ионов на периферии подложкодержателя.

На рис. 4б показаны аналогичные зависимости для фреона. Очевидна более высокая однородность в сравнении с аргоном во всем диапазоне давлений. Неоднородность в лучшем случае составляет  $\pm 4\%$ , в худшем –  $\pm 7\%$ . Здесь необходимо отметить, что диапазон давлений, в котором возможно существования разряда для фреона значительно уже, чем для аргона. С учетом этого, поведение радиального профиля ионного тока при использовании фреона в качестве рабочего газа качественно подобно случаю аргона с некоторыми количественными отличиями. Минимум в центре начинает появляться уже при давлениях, превышающих  $5 \cdot 10^{-2}$  Торр, то есть почти на порядок ниже, чем для аргона. Этот факт, также, как и невозможность горения разряда на фреоне при давлениях выше  $2 \cdot 10^{-1}$  Торр, тогда как на в аргоновой атмосфере индукционный разряд может существовать при давлениях выше 5 Торр, можно объяснить наличием у молекулярных газов достаточно больших сечений возбуждения молекулярных колебаний при энергиях в единицы электронвольт. Это приводит к тому, что энергия, поглощаемая плазмой от поля индуктора, расходуется, в основном, на возбуждение молекулярных колебаний вблизи индуктора, и количество электронов с энергией, достаточной для ионизации, резко сокращается, особенно в центре разряда. У аргона же, напротив, отсутствуют сечения неупругих процессов вплоть до энергии 11,5 эВ, что при температуре электронов около 2 эВ, характерных для высоких давлений, означает возможность передачи энергии теплового движения электронов на значительные расстояния без потерь.

На рис. 5 представлены зависимости ионного тока насыщения плоского зонда  $j$  и амплитуды ВЧ напряжения на индукторе  $U_{ind}$  от давления рабочего газа при ВЧ мощности  $P = 200$  Вт для различных газов. Очевидно, что эти зависимости принципиально различны для аргона и молекулярных газов. Мы



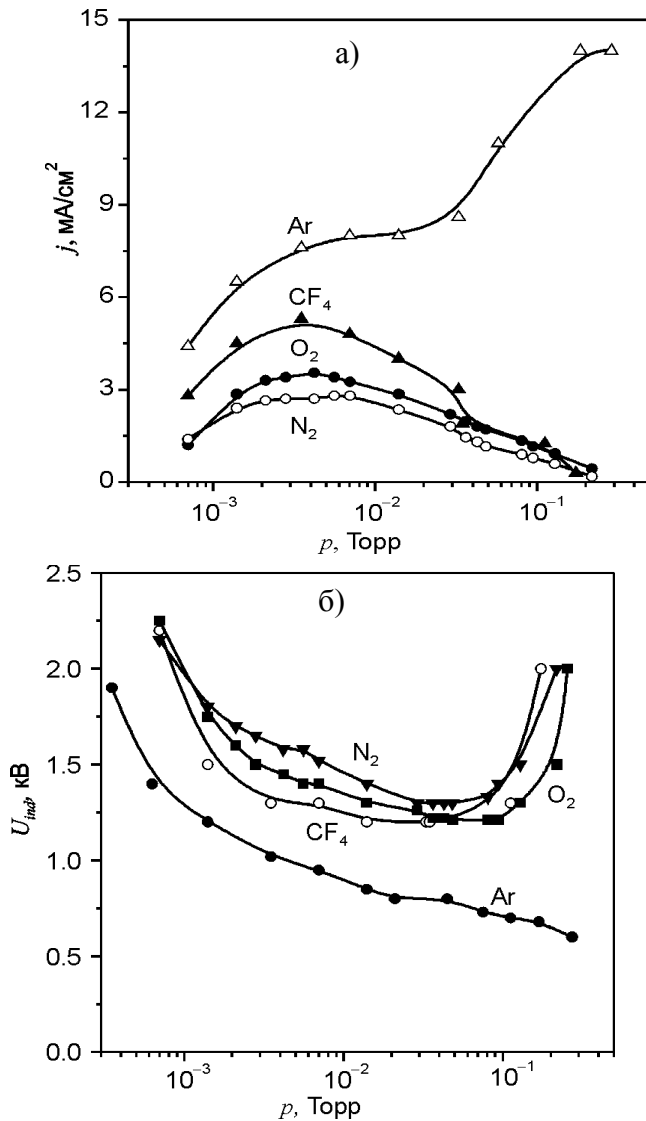


Рис. 5. а) зависимости ионного тока насыщения стеночного зонда  $j$ , от давления рабочего газа при ВЧ мощности  $P = 200$  Вт для различных газов. б) амплитуда ВЧ напряжения на индукторе  $U_{ind}$  от давления рабочего газа при ВЧ мощности  $P = 200$  Вт для различных газов.

имеем монотонное увеличение  $j$  и уменьшение  $U_{ind}$  с ростом давления для аргона, тогда как для молекулярных газов и при высоком и низком давлениях ионный ток насыщения зонда монотонно уменьшается. Для аргона ионный ток всегда выше,  $U_{ind}$  всегда ниже, а область эффективной ионизации – на порядок выше по шкале давлений.

### ЗОНДОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ВЧ ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДА

В предыдущем разделе основное внимание было уделено изучению потока ионов из плазмы на обрабатываемую поверхность, который

является тем “инструментом”, который производит необходимое воздействие на нее. Однако, понимание закономерностей формирования этого потока невозможно без понимания процессов, происходящих в объеме плазмы. Данный раздел посвящен экспериментальному изучению параметров плазмы и их пространственных распределений.

Рис. 6 показывает эволюцию функции распределения электронов по энергии (ФРЭЭ) при изменении давления аргона в газоразрядной камере. Из рисунка видно монотонное уменьшение средней энергии электронов с ростом давления. При давлениях ниже 2 мТорр электронный энергетический спектр становится явно двухтемпературным, при более высоких давлениях, он является максвелловским с подавленным высокоэнергетичным “хвостом”, и при самых высоких давлениях его форму подобна распределению Дрювестейна. Функцию распределения при низких давлениях можно условно разделить на три части: два экспоненциальных (линейных в логарифмическом масштабе) участка, которым можно поставить в соответствие “максвелловские” температуры, и быстро спадающий “хвост”, как и при остальных давлениях. Двухтемпературная ФРЭЭ была обнаружена также и в других системах с ВЧ индукционным разрядом низкого давления, в частности в источнике отрицательных ионов ВАТМАН, разработанном в Институте физики плазмы им. Макса Планка [26].

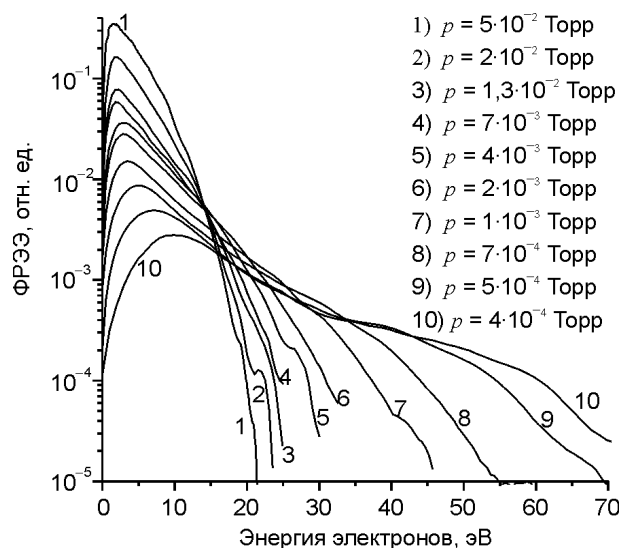


Рис. 6. Эволюция функции распределения электронов по энергии (ФРЭЭ) при изменении давления в газоразрядной камере.

На рис. 7 для сравнения приведены энергетические спектры электронов для двух давлений водорода. Аналогично рис. 6, функция распределения электронов, максвелловская с высокой точностью при средних и высоких давлениях, становится явно двухтемпературной при низких давлениях.

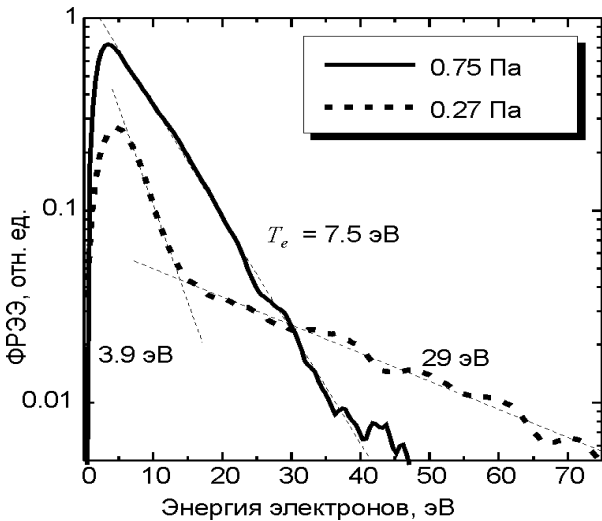


Рис. 7. Максвелловское распределение электронов по энергиям, характерное для средних давлений, и двухтемпературная ФРЭЭ, типичная для низких давлений. Измерено в источнике отрицательных ионов ВАТМАН. Рабочий газ – водород.

Рис. 8 показывает зависимости потенциала плазмы  $\phi_{pl}$  и электронной температуры  $T_e$  в центре камеры от давления аргона. При низких давлениях график электронной температуры раздваивается вследствие двухтемпературного характера ФРЭЭ.

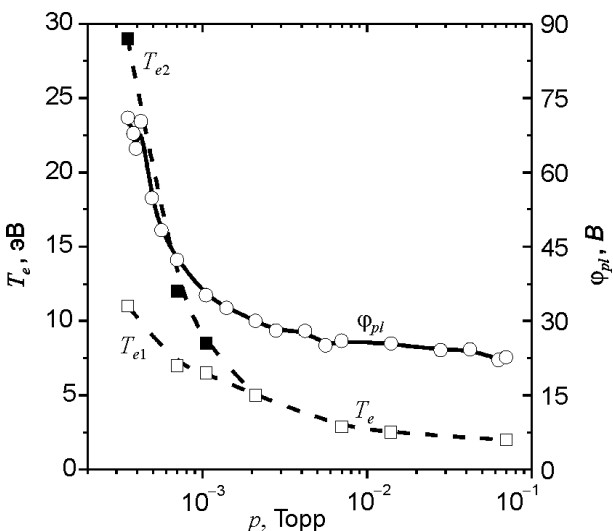


Рис. 8. Потенциал плазмы  $\phi_{pl}$  и температура электронов  $T_e$  в центре камеры. При низком давлении график  $T_e$  раздваивается из-за двухтемпературного характера ФРЭЭ.

Типичные радиальные профили плотности плазмы на расстоянии 40 мм от подложкодержателя представлены на рис. 9 для различных давлений аргона. Измерения были выполнены при ВЧ мощности 100 Вт. Было установлено, что для аргона в диапазоне мощностей 50–500 Вт плотность плазмы пропорциональна мощности, и форма радиального профиля плотности плазмы практически не изменяется. Как видно из рис. 9, для давления  $p = 2,1 \cdot 10^{-2}$  Торр профиль ионной плотности плазмы является выпуклым, с максимумом в центре, а при  $p = 6 \cdot 10^{-2}$  Торр появляется провал в центре. При дальнейшем увеличении давления максимум опять перемещается в центр, и для давлений больше  $p = 1,4 \cdot 10^{-1}$  Торр профиль становится вогнутым, с максимумом вблизи индуктора. Относительно высокая однородность плазмы достигается при давлении  $p \approx 200$  мТорр. Очевидно, что характер эволюции радиального распределения плотности плазмы при изменении давления в камере коррелирует с аналогичной зависимостью для плотности тока ионов на подложкодержатель (рис. 4), с той лишь разницей, что появление минимума плотности плазмы на оси разряда происходит при более низком давлении. Это можно объяснить тем, что торообразная структура разряда, уже сформированная при давлениях  $2 - 3 \cdot 10^{-1}$  Торр, еще не приводит к образованию провала в центре радиального распределения плотности тока, поскольку тор находится на достаточно большом расстоянии над подложкодержателем, и у потока ионов, распространяющегося во все стороны от максимума плотности плазмы, есть возможность равномеризоваться на пути к обрабатываемой поверхности.

На рис. 9 также показаны радиальные распределения температуры электронов при различных давлениях аргона. Видно, что при низких давлениях электронная температура приблизительно постоянна по всему объему камеры, тогда как при высоких давлениях  $T_e$  имеет максимум в прииндукторной области, в которой происходит ввод ВЧ мощности в плазму.

При замене аргона молекулярными газами ( $N_2, O_2, CF_4$ ) зависимости пространственных

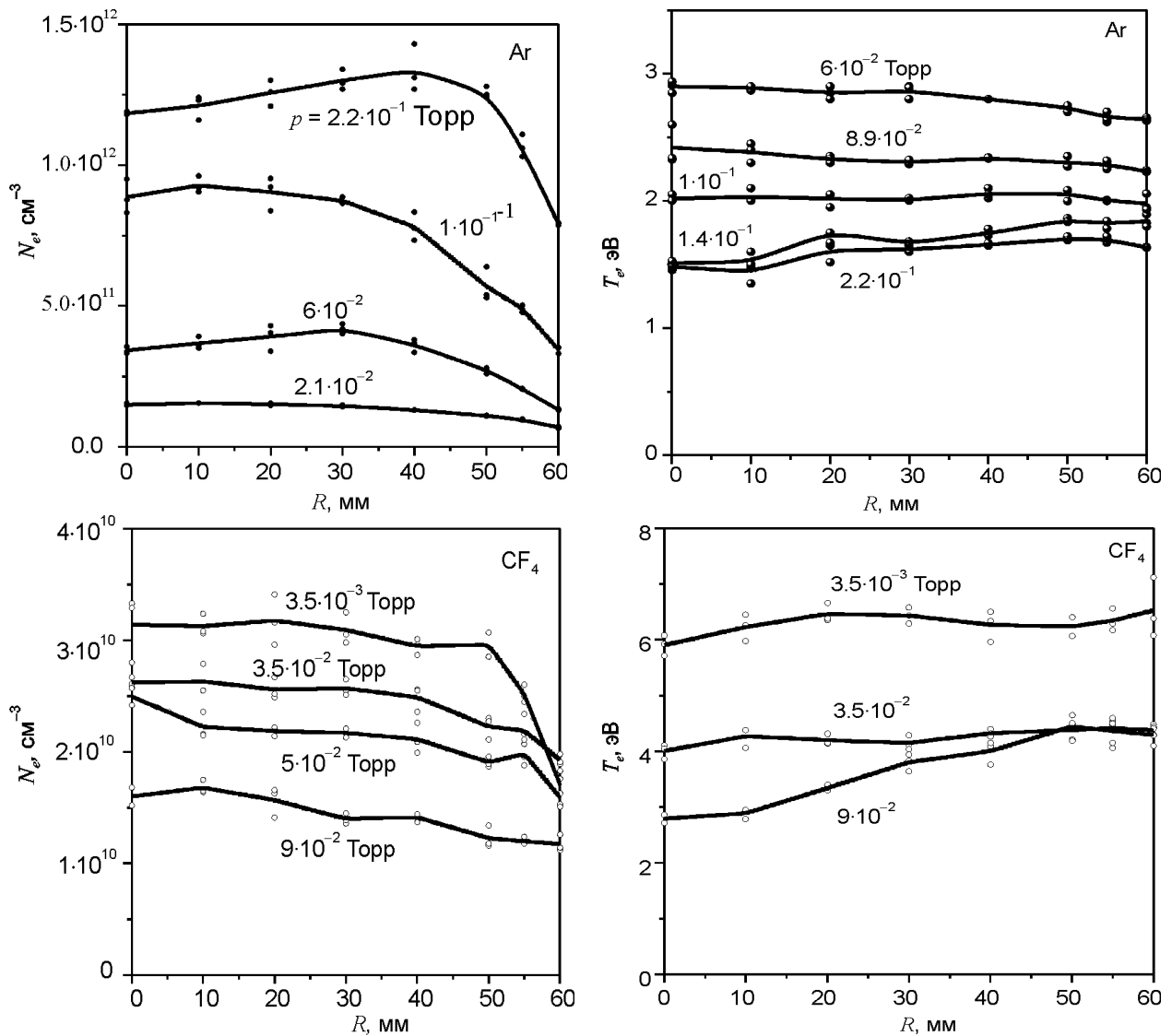


Рис. 9. Типичные радиальные профили плотности плазмы и температуры электронов на расстоянии 40 мм от подложкодержателя. ВЧ мощность – 100 Вт.

распределений параметров плазмы от давления нейтрального газа меняется. Экспериментальные зависимости электронной температуры и плотности от расстояния до оси в плоскости  $z = 40$  мм для различных значений давления  $\text{CF}_4$  в газоразрядной камере реактора представлены на рис. 9 в сравнении с аналогичными зависимостями для аргона. В области низких давлений  $p < 50$  мТорр пространственное распределение температуры электронов достаточно однородно. С ростом давления наблюдается рост  $T_e$  в прииндукторной области. Такое изменение профиля связано с локализацией области нагрева электронов ВЧ полем. Как видно из рис. 9, распределение плотности электронов по радиусу гораздо более однородно, чем аналогичное распределение для аргона в широком

диапазоне давлений. Это находится в соответствии с радиальным профилем тока ионов (рис. 4), но для объяснения этого факта необходимы более детальные исследования. По-видимому это связано с электроотрицательностью фтора и фторсодержащих газов, которая приводит к образованию большого количества отрицательных ионов, которые существенно меняют картину физических процессов в разряде. Зондовые измерения фиксируют наличие в разряде отрицательных ионов с плотностями, в некоторых случаях превышающими плотность электронов в несколько раз, однако для получения детальной количественной информации об этом требуются дополнительные эксперименты.

Принципиально разный баланс частиц в разряде с использованием аргона и фреона

подтверждает также рис. 10, на котором показаны зависимости электронной плотности  $n_e$  в центре камеры от давления аргона и  $\text{CF}_4$ . Так же, как и для ионного тока из плазмы, мы видим значительное превышение количества заряженных частиц в аргоновой плазме, что выглядит естественным, учитывая повышенные неупругие потери энергии в молекулярных газах, что приводит к снижению доли мощности, идущей на ионизацию, особенно при высоких давлениях.

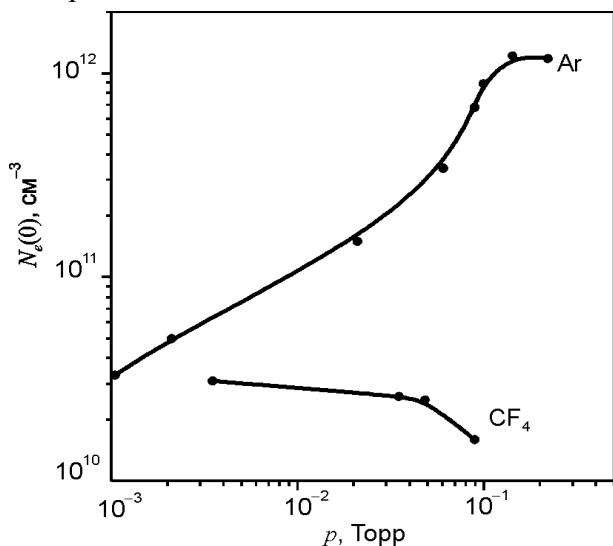


Рис. 10. Графики зависимости плотности электронов при  $R = 0$ ,  $Z = 40$  мм от давления газа в камере. Подводимая ВЧ мощность – 100 Вт.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЧИ РАЗРЯДА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

При конструировании плазменных технологических устройств одним из ключевых факторов является формирование пространственных распределений заряженных и химически активных частиц в объеме газоразрядной камеры. При этом наибольший интерес представляет распределение потоков частиц 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, рождения и ухода заряженных частиц сложны и нелинейны, а равномерный ввод энергии в ВЧИ плазму практически невозможен вследствие скинирования поля индуктора, которое

имеет вихревую природу. Поэтому точный ответ на вопрос о пространственных распределениях параметров заряженных частиц в конкретном устройстве может дать только экспериментальное их измерение. Однако, эксперимент лишь констатирует ситуацию, а разработка новых плазменных устройств предполагает последовательные изменения конструкции с постепенным приближением к желаемому результату. Таким образом, эмпирический путь разработки конструкции плазменного реактора требует изготовления различных вариантов элементов реактора и может оказаться долгим, трудоемким и дорогостоящим.

Очевидно, что хорошим инструментом для разработки плазменных технологических устройств могут быть математические модели газового разряда, но только при условии, что они позволяют быстрое интерактивное изменение параметров и геометрии системы, а также имеют высокую доказанную достоверность полученных результатов. Сложность задачи не позволяет надеяться на ее аналитическое решение либо установление точных функциональных закономерностей. Наиболее адекватным подходом в данном случае является построение численной двумерной (технологические устройства, как правило, имеют вращательную симметрию) компьютерной модели, которая не имеет ограничений по конфигурации камеры, индуктора, сложности сечений элементарных процессов в различных газах. 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. Таким исследованиям пространственных распределений параметров плазмы и однородности потока ионов на обрабатываемую поверхность и посвящен этот раздел.

Прежде чем приступать к моделированию систем со сложной геометрией целесообразно добиться достоверных (подтверждаемых экспериментально) результатов при моделировании простых систем. Такая модель была

описана в статье [28], где исследуется вопрос однородности потока ионов на торец газоразрядной камеры цилиндрической формы и пространственных распределений параметров плазмы в камере, а также влияние расположения индуктора (на торце или на боковой стенке камеры) на эти распределения.

Экспериментальное измерение радиальных распределений плотности ионного тока из ВЧИ плазмы на торец цилиндрической камеры длиной 10 см и диаметром 20 см при различных давлениях аргона при расположении индуктора на боковой стенке камеры продемонстрировало следующие характерные особенности:

- рост абсолютного значения  $j$  по всему сечению при снижении давления газа в диапазоне  $0,1 - 10^{-3}$  Торр;
- высокая однородность  $j$  на 60% радиуса при  $p \approx 20$  мТорр;
- появление максимума  $j$  на периферии разряда при  $p > 20$  мТорр, и их относительное увеличение с ростом давления;
- появление максимума  $j$  в центре разряда при  $p < 20$  мТорр;
- при  $p < 5$  мТорр форма профиля  $j$  не изменяется, а изменяется лишь его абсолютная величина.

Измерения были проведены при ВЧ мощности 250 Вт. Было установлено, что в диапазоне мощностей 100 – 700 Вт величина  $j$  пропорциональна мощности, а профили  $j(r)$  практически не изменялись. Зависимости  $j$  в центре разряда ( $r = 0$ ) от давления демонстрируют наличие максимума при  $p = 1 - 2$  мТорр, который наблюдался и в других работах [16, 17].

Для описания ВЧИ разряда в [28] была построена двумерная математическая модель основанная на численном решении уравнений амбиполярной диффузии и теплопереноса, а также уравнений для электромагнитного поля. Результаты расчетов показывают, что при расположении индуктора на боковой стенке камеры в центре камеры образуется провал плотности вследствие амбиполярного ухода заряженных частиц на торцы камеры, тогда как ионизация происходит преимущественно в прииндукторной области, где происходит поглощение энергии электрического

поля плазмой. При высоких давлениях электронная теплопроводность ограничена столкновениями и энергия, передаваемая индуктором в плазму, не достигает областей, далеких от индуктора. В этом случае плазма индукционного разряда существует в виде тора, что и приводит к формированию распределения плотности тока на подложкодержатель с провалом в центре. При низких давлениях, когда электронная теплопроводность велика, энергия от индуктора равномерно распределяется по всей камере, что приводит к формированию распределений с максимумом в центре. В то же время, при расположении индуктора на торце камеры распределения как плотности плазмы, так и плотности тока на торец при любых давлениях имеют максимум на оси камеры.

Дальнейшее развитие описанный подход получил в работах [29 – 32], где описана двумерная гидродинамическая модель для интерактивной разработки технологических устройств на базе индуктивного разряда. В этой работе представлено разработанное программное обеспечение для моделирования устройств, содержащих плазму индуктивного газового разряда. Входными данными являются геометрия камеры, вводимая мощность, давление рабочего газа. В результате расчёта получаются напряжение на индукторе, распределение тока ионов по поверхности разрядной камеры, установившиеся пространственные распределения электрического поля, плотности плазмы, и электронной температуры. Распределения искомых величин визуализируются непосредственно после вычисления. Результаты счета тщательно сверялись с экспериментальными данными. Рассчитанные распределения плотности и температуры плазмы, а также распределения ионного тока на обрабатываемую поверхность являются достаточно реалистичными. Графический интерфейс, скорость расчета и непосредственная визуализация результата дают возможность использовать данное обеспечение для интерактивной разработки технологических установок.

На рис. 11 показаны примеры расчета пространственных распределений плотности плазмы при различных давлениях газа. По-

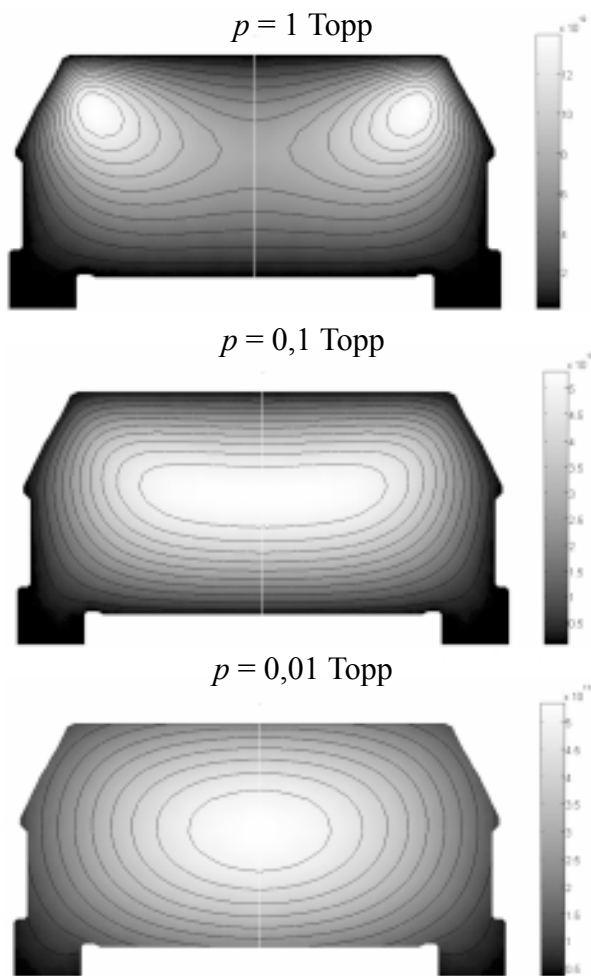


Рис. 11. Эволюция пространственного распределения плотности плазмы и температуры электронов по результатам численного моделирования индукционного разряда в ПХТ реакторе при различных давлениях аргона.

казанные распределения показывают трансформацию формы разряда от торообразной при высоком давлении до “яйцеобразной” при низком. Рассчитанные при помощи описанной модели радиальные профили  $j$  при

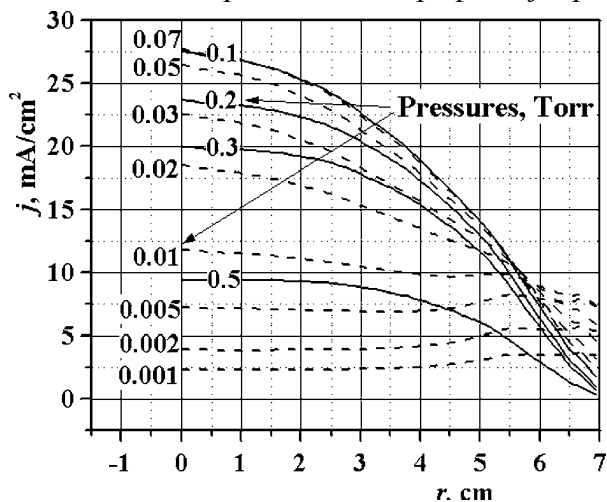


Рис. 12. Рассчитанные радиальные профили  $j$  при различных давлениях аргона.

различных давлениях аргона показаны на рис. 12. Видна эволюция формы распределения плотности тока от выпуклой до вогнутой.

Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными (рис. 13) позволяет сделать вывод о достаточно высокой достоверности модели.

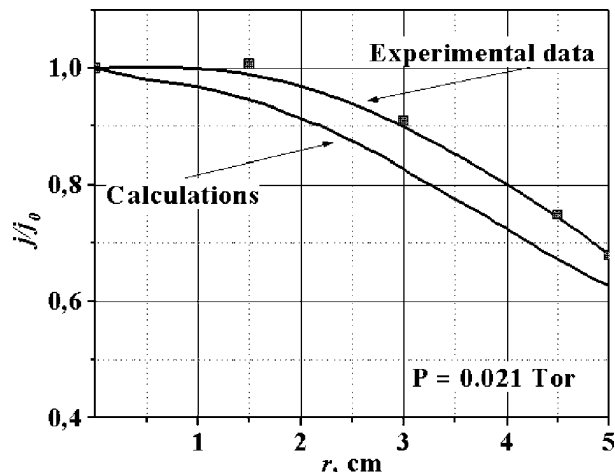


Рис. 13. Нормированные рассчитанные радиальные профили  $j$  в сравнении с результатами эксперимента.

Оценить достоверность моделирования позволяет также рис. 14, на котором показаны плотность ионного тока  $j$  на поверхность подложки в центре камеры (при  $r = 0$ ), а также плотность электронов  $N_e$  и температура “холодной” группы электронов  $T_e$  в центре камеры в зависимости от давления аргона. На рисунке экспериментальные результаты представлены в сравнении с результатами расчетов при помощи “глобальной” и двумерной гидродинамической модели. Можно выделить два диапазона по давлению рабочего газа в камере:

- 1) область низкого давления, где средняя длина свободного пробега заряженных частиц сопоставима или больше характерного размера плазмы, то есть движение частиц является, главным образом, бесстолкновительным;
- 2) область высокого давления, где средняя длина свободного пробега меньше характерного размера плазмы, движение частиц является столкновительным, и справедливо диффузионное приближение.

Из рис. 14 также видно, что эти две области давлений ограничивают диапазон применимости различных математических моделей: при низких давлениях справедлива гло-

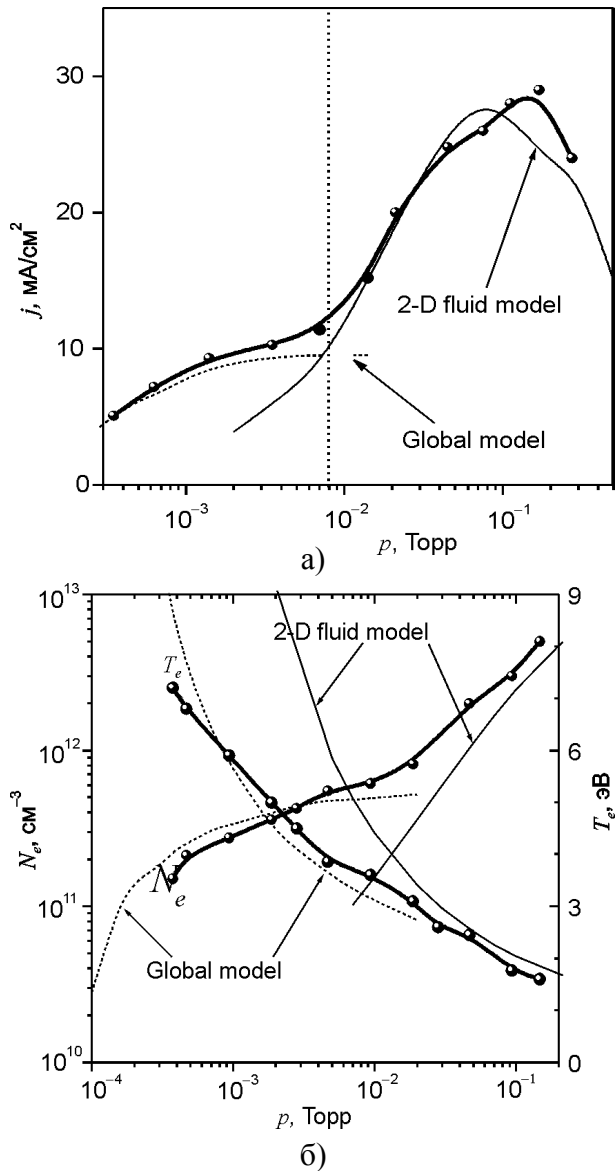


Рис. 14. а) – зависимость плотности ионного тока  $j$  на поверхность подложки в центре камеры (при  $r = 0$ ) от давления аргона; б) – плотность электронов  $N_e$  и температура “холодной” группы электронов  $T_e$  в центре камеры в зависимости от давления аргона при ВЧ мощности 500 Вт. Экспериментальные результаты представлены жирными линиями.

бальная модель (Global model) [1], при более высоких – двумерная гидродинамическая модель (2-D fluid model) [31].

### ИССЛЕДОВАНИЯ ИМПЕДАНСА ИНДУКТОРА, СВЯЗАННОГО С ПЛАЗМОЙ

Одним из основных элементов любой системы с ВЧИ разрядом является согласующее устройство (СУ). Как правило СУ представляет собой резонансный колебательный П-контур и обеспечивает согласование фиксированного выходного импеданса (50 или

75 Ом) ВЧ генератора (ГВЧ) с комплексным импедансом плазмы. Электрическая схема СУ относительно проста, и при расчете элементов СУ можно использовать элементарные электротехнические законы. Однако, благодаря индуктивной связи, импеданс плазмы является составной частью импеданса индуктора в цепи СУ, который в свою очередь зависит от параметров плазмы. Соответственно, настройка элементов СУ, а так же амплитуды ВЧ тока и напряжения индуктора зависят от параметров разряда – давления и сорта рабочего газа, поглощаемой разрядом ВЧ мощности и т.д. Поэтому расчет ВЧ цепи СУ с плазменной нагрузкой представляет собой достаточно сложную задачу.

Решению этой задачи посвящены работы [33, 34], в которых описаны экспериментальные и теоретические исследования импеданса индуктора в источнике плазмы ВЧ индукционного типа. В этих работах представлены результаты измерений напряжения на индукторе, эффективных индуктивности и сопротивления, а также получены простые выражения для расчета эффективного импеданса индуктора, которые хорошо согласуются с экспериментальными результатами. Целью работы [34] было экспериментальное и теоретическое исследование возмущения импеданса индуктора, возбуждающего плазму ВЧИ разряда с невысокой плотностью, при низком давлении рабочего газа. Поскольку эта работа сфокусирована на проблемах разработки эффективного СУ, в ней сделан акцент не на собственном импедансе плазмы, а на импедансе индуктора, связанного с плазмой (далее – эффективный импеданс индуктора).

Согласно [34] эффективная индуктивность индуктора  $L_s = L_0 - \Delta L$  (где  $\Delta L$  – возмущение индуктивности индуктора, обусловленное плазменной нагрузкой), может быть определена как:

$$L_s = \frac{C_2 + C_p}{\omega^2 C_2 \cdot C_p} + \frac{C_1 \cdot R_k^2}{1 + (R_k \cdot \omega C_1)^2} - L_x,$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – емкости переменных конденсаторов СУ,  $C_p$  – емкость проходного конденсатора,  $L_x$  – индуктивность подводящих проводников. Эффективное сопротивление ин-

дуктора, обусловленное плазменной нагрузкой и эквивалентное включению последовательно с индуктором резистора  $R_s$  можно определить через подводимую ВЧ мощность:

$$R_s = 2 \cdot \frac{P_{rf}}{I_{in}^2},$$

где  $I_{in} = \frac{U_{in}}{\omega L_s}$  – ток, текущий в цепи индуктора.

Помимо экспериментальных измерений в работе [34] был проведен теоретический анализ взаимосвязи импеданса индуктора с параметрами системы и были получены выражения для эффективного импеданса, напряжения и тока индуктора:

$$R_s = \frac{\omega^2 M^2 \cdot R_{pl}}{R_{pl}^2 + (\omega L_e)^2}, \quad L_s \approx L_0,$$

$$U_{in} = I_{in} \cdot |R_s + i\omega L_0|, \quad I_{in} = \sqrt{\frac{2P_{rf}}{R_s}},$$

где  $L_0$  – индуктивность индуктора,  $M$  – взаимная индуктивность индуктора и плазменного витка  $R_{pl}$  – сопротивление плазменного витка. Особо следует отметить, что в полученных выражениях для эффективного импеданса индуктора отсутствует индуктивность плазменного витка, что упрощает расчет, поскольку точное определение геометрической индуктивности сопряжено с определенными трудностями, обусловленными неоднородностью плазмы, скин-эффектом и неоднородным распределением магнитного поля в плазме, что в свою очередь приводит к зависимости этой величины от параметров плазмы.

Результаты экспериментальных измерений  $U_{in}$  и расчетов величин  $R_s$  и  $L_s$  из экспериментальных значений  $C_1$ ,  $C_2$  и  $U_{in}$  ( $P_{rf} = 70$  Вт) показаны на рис. 15 в сравнении с теоретическими результатами. На рис. 15а представлены зависимости напряжения на индукторе от давления рабочего газа  $p$  при фиксированной мощности, подводимой к плазме  $P_{rf} = 70$  Вт, рассчитанные с использованием представленных выше выражений. Видно практически полное совпадение экспериментальных и теоретических результатов. На рис. 15(б, в) представлены графики зависимости эффек-

тивного сопротивления индуктора и безразмерной величины  $L_s$  от давления рабочего газа. Можно отметить хорошее согласие теоретических кривых и экспериментальных данных в диапазоне давлений ниже  $5 \cdot 10^{-3}$  Торр, в котором реализуется бесстолкновительный режим; при более высоких давлениях длина свободного пробега ионов становится сопоставимой с размерами разрядной камеры, и бесстолкновительный подход теряет свою применимость.

## АНИЗОТРОПНОЕ ТРАВЛЕНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Одним из ключевых этапов производства современных микро- и нанoeлектронных компонентов является формирование топологического рисунка в металлических и диэлектрических слоях, нанесенных на поверхность кремниевой пластины, причем характерный размер этих элементов составляет десятки – сотни нанометров. Обычно для этого используется технология фотолитографии, в которой рисунок формируются путем травления поверхности через маску из фоторезиста с предварительно сформированным изображением [35]. В настоящее время наибольшее распространение получило плазменное травление в атмосфере галогенсодержащих газов с использованием органических фоторезистов. Однако, органические фоторезисты обладают рядом недостатков. Они имеют ограниченную стойкость к воздействию плазмы и температуры, а минимальные размеры элементов ограничены собственным размером полимерной молекулы.

В связи с этим в настоящее время в мире активно ведется поиск неорганических фоторезистов, свободных от этих недостатков. Одним из перспективных направлений является использование многослойных структур  $Bi/In$ . Так, в работе [36] экспериментально исследован процесс нанесения, экспонирования и проявления неорганической двухслойной маски  $Bi/In$  с последующим жидкостным или плазмохимическим травлением. Локальный нагрев маски в атмосфере кислорода сфокусированным лазерным лучом до температуры  $110$  °С, соответствующей точке эвтектики, обеспечивает переход от двух-



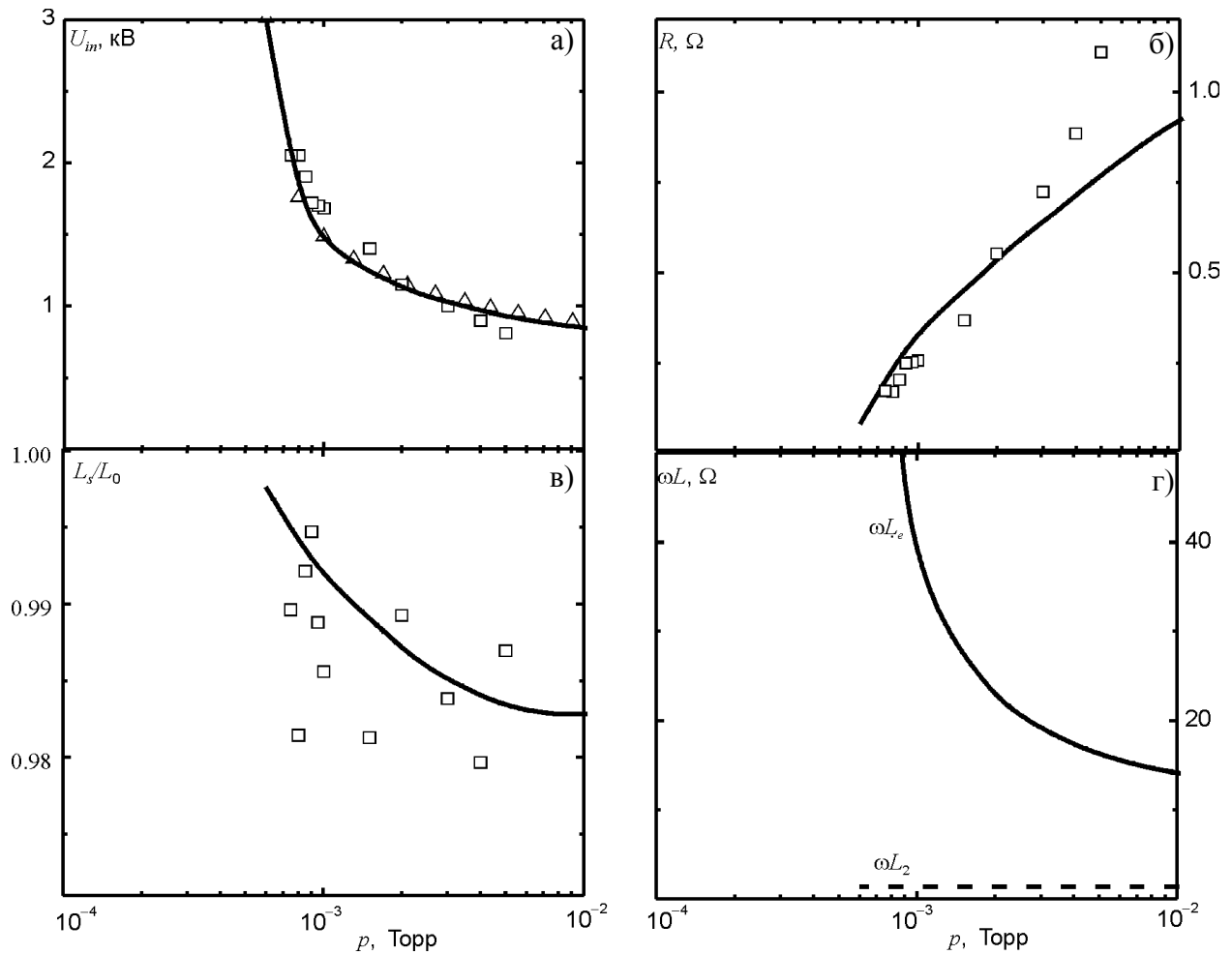


Рис. 15. Электрические характеристики ВЧ цепи индуктора. — экспериментальные результаты;  $\Delta$  — теоретическая кривая.

слоистой структуры к однослойному оксидному слою. Затем для получения рисунка незасвеченные участки могут быть удалены посредством селективного травления. Скорость травления самой маски  $\text{Bi/In}$  оказалась на два-три порядка ниже скорости травления органической маски. Кроме того, ее термическая устойчивость также выше, чем у полимерного резистного слоя. В результате стало возможным увеличение скорости плазменного травления, уменьшение толщины маскирующего слоя, что особенно актуально при анизотропном глубинном травлении.

Однако, размеры элементов, полученных в экспериментальных исследованиях, описанных в [36], составляли порядка нескольких микрометров. В то же время, наибольший интерес вызывает изучение возможности применения маски из  $\text{Bi}$  ( $\text{Bi/In}$ ) для травления элементов размером менее 1 мкм, что и было предметом исследований, описанных в [37]. Очевидно, что получение лазерного луча,

сфокусированного до таких размеров, и формирование рисунка с субмикронным разрешением является очень сложной самостоятельной задачей, поэтому в настоящей работе была применена другая оригинальная методика формирования наноразмерных элементов из висмута на поверхности кремния.

В работе [37] в качестве подложки использовались пластины монокристаллического кремния, покрытые пленкой  $\text{SiO}_2$  толщиной 250 нм. Выбор островков висмута в качестве маски обусловлен тем, что указанный металл имеет низкую температуру плавления ( $271^\circ\text{C}$ ), что позволяет получать наноразмерные структуры путем плавления пленок на подложках без значительной термической нагрузки последних. Кроме того, фазовая диаграмма  $\text{Bi}$  с  $\text{Si}$  характеризуется практически полным отсутствием растворимости в твердом состоянии с образованием эвтектики, близкой по составу и температуре плавления к чистому висмуту. Методика формирования

островков Вi на SiO<sub>2</sub> подложке была следующей. Из молекулярного пучка, образующегося при термическом испарении Вi (99,999%), конденсировалась сплошная пленка. После этого подложка со сплошной пленкой Вi нагревалась до температуры ~280 °С. При таких условиях на SiO<sub>2</sub> подложках формировались металлические островки, имеющие близкую к равновесной форму и огранку.

Травление оксида кремния через полученную маску проводилось на установке с описанным выше реактором плазмохимического и реактивного ионно-плазменного травления, построенном на базе комбинированного индукционно-емкостного разряда. Рабочим газом во всех экспериментах был CF<sub>4</sub>. Выбор режимов травления был обусловлен следующими соображениями. Пробные эксперименты показали, что если вводимая в плазму мощность превышает 100 Вт, происходит быстрое испарение островков висмута вследствие перегрева. В то же время, использование более низкой мощности сужает диапазон существования разряда по давлению газа. Поэтому во всех экспериментах ВЧ мощность равнялась 100 – 150 Вт. Известно, что травление SiO<sub>2</sub> с практически приемлемой скоростью требует бомбардировки ионами с энергией не менее 100 эВ, однако рост энергии ионов приводит к увеличению энерговклада в образец, в связи с чем потенциал подложкодержателя устанавливался на уровне –120 В, что, с учетом потенциала плазмы, обеспечивало энергию ионов порядка 150 эВ. Травление при разных давлениях показало, что анизотропный профиль травления с вертикальными стенками и точной передачей геометрии маски в протравленный слой наблюдается при давлениях в камере ниже 5 мТорр. При более высоких давлениях появляется боковое подтравливание под маской.

Анализ результатов показал, что принципиальным вопросом в описываемых экспериментах являлся теплоотвод от капель висмута в процессе плазменного травления. Поскольку травление сопровождается относительно высоким энерго вкладом в поверхность, а теплоотвод газом и излучением неэффективны (давление газа не превышало 10<sup>-2</sup> Тор,

температура не более 300 °С), основным каналом отвода энергии от капель являлся поток тепла от капель через кремниевую пластину к охлаждаемому подложкодержателю. В данном случае “узким местом” является контакт между частицей и подложкой, площадь которого невелика вследствие плохого смачивания, что приводит к их сильному разогреву и испарению. При этом, естественно, первыми испаряются самые мелкие капли, затем все более крупные. Экспериментально была установлена максимально допустимая плотность потока энергии на поверхность, составляющая примерно 0,5 Вт/см<sup>2</sup>. Необходимо отметить, что если время травления не превышало 1 минуты, этот предел можно было превышать в 2 – 3 раза без заметного уменьшения размера частиц.

На рис. 16 показан результат травления в течение 1,5 мин при мощности 100 Вт (скорость травления 100 нм/мин). Сформированы элементы цилиндрической формы с характерным размером 100 нм. Хорошо виден анизотропный профиль травления с вертикальными стенками и частицы висмута, сохранившиеся неизменными после травления. Плохое смачивание висмутом оксида кремния приводит к тому, что края маски не прилегают непосредственно к обрабатываемой поверхности, что потенциально может приводить к размыванию краев структур и неверной передаче геометрии маски. Однако, высокая анизотропия травления, достигнутая в описанном режиме, позволяет преодолеть этот недостаток. Рис. 16 демонстрирует хорошее воспроизведение размера маски на протравленной структуре, несмотря на наличие существенного краевого зазора.

Таким образом, в работе [37] показана принципиальная возможность формирования элементов структуры размером порядка 100 нм в слое SiO<sub>2</sub> при помощи реактивного ионно-плазменного травления с использованием наноразмерной островковой маски из висмута. Достигнутая при этом скорость травления 100 – 200 нм/мин с высокой анизотропией и хорошим воспроизведением геометрии маски иллюстрирует перспективность использования таких масок в современных микро- и нанoeлектронных технологиях.

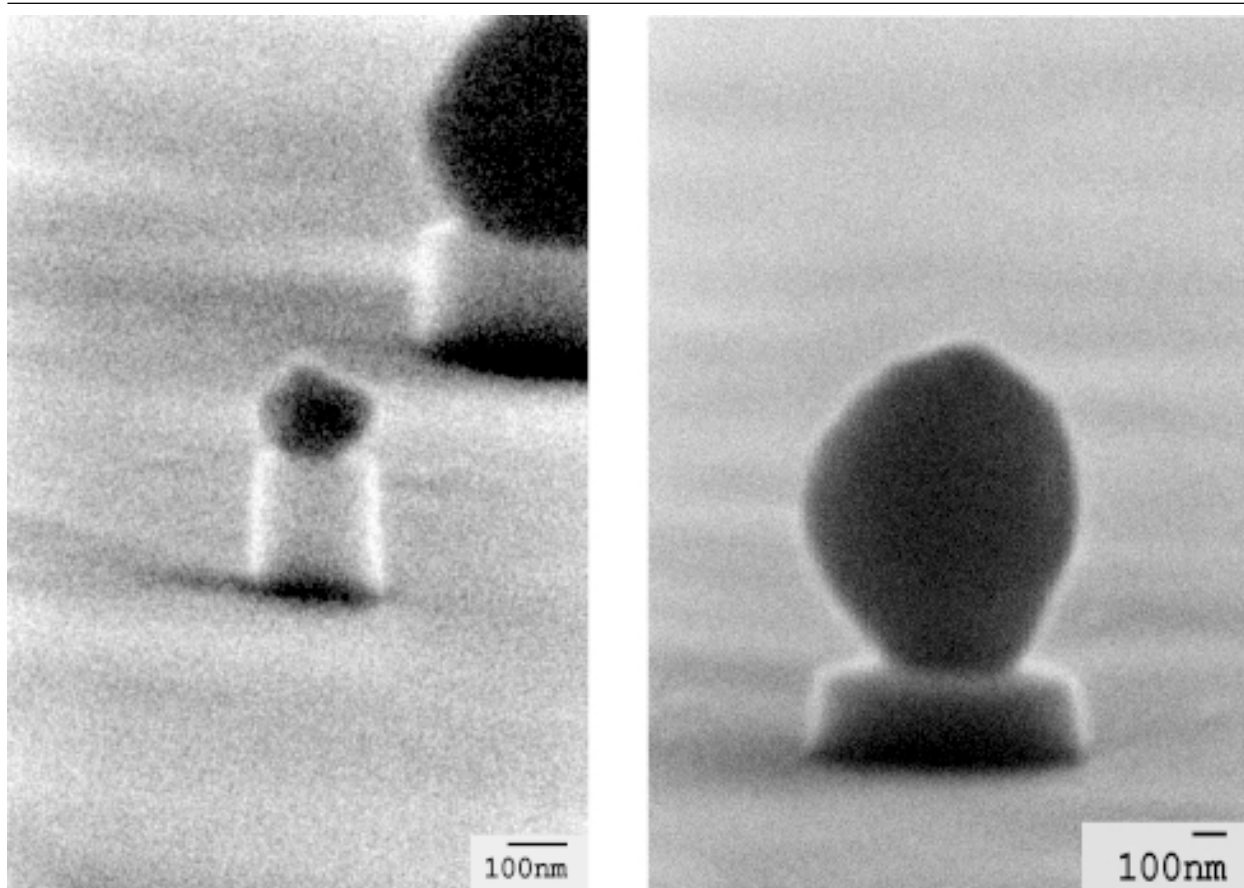


Рис. 16. Микроснимки наноструктуры, формирующейся на  $\text{SiO}_2$  подложке в результате реактивного ионно-плазменного травления.

### ПЛАЗМЕННОЕ ТРАВЛЕНИЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ НИТРИДА ГАЛЛИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

В течение последнего десятилетия полупроводниковые материалы класса  $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$ , в частности, полупроводники на основе нитридов металлов третьей группы получили широкое распространение и теперь играют одну из основных ролей в широком диапазоне современных полупроводниковых устройств. Это семейство, состоящее из соединений  $\text{InN}$ ,  $\text{GaN}$ ,  $\text{AlN}$  и их комбинаций, теперь массово применяется в светодиодах, которые испускают свет от ультрафиолетового до желтого и в синих лазерах. Кроме широкого применения в оптоэлектронике нитридные полупроводники также используются в высокочастотных, высокотемпературных и мощных микроэлектронных устройствах.

Однако, как следствие многих из свойств, которые делают нитридные полупроводники привлекательными в вышеупомянутых электронных и оптоэлектронных применениях,

они оказались материалами, сложными для травления. Высокая химическая инертность и очень прочные связи в кристаллической решетке являются отличительными признаками нитридов элементов третьей группы в сравнении с другими полупроводниками. Энергии связи для  $\text{GaN}$ ,  $\text{InN}$  и  $\text{AlN}$  составляют 8,92 эВ/атом, 7,72 эВ/атом и 11,52 эВ/атом, соответственно. Неудивительно, что условия травления нитридов значительно отличаются от кремния, арсенида галлия и фосфида индия, полупроводников с хорошо изученными процессами травления. Поэтому для разработки эффективных механизмов травления нитридов необходимы обширные научные исследования. Ниже кратко представлены некоторые результаты предыдущих исследований.

Вследствие ограниченных возможностей жидкостного травления нитридных полупроводников [38] основные усилия технологов были направлены на разработку методов “сухого” плазменного травления. Основным методом, применяемым для “сухого” травления

GaN, является реактивное ионно-плазменное травление (РИПТ). Для образования плазмы используются высокочастотные разряды емкостного [39], индукционного [40], магнетронного [41] типов, а также СВЧ разряд с электронно-циклотронным резонансом [39]. Анализ литературы позволяет сделать однозначный вывод, что для достижения приемлемых скоростей травления нитрида галлия необходимо использовать разряды с плотной плазмой, в частности, ВЧ разряд индукционного типа.

Результаты экспериментов по отработке режимов травления нитрида галлия при помощи описанного в настоящей работе реактора на основе комбинированного индукционно-емкостного разряда представлены в работе [42]. Целью этой работы была разработка технологии травления многослойной гетероструктуры на основе GaN. Такая задача возникает при изготовлении сверхярких белых светодиодов, которые являются одними из наиболее перспективных источников света в связи с высокими КПД и сроком службы. На сегодняшний день в технологически развитых государствах ставится цель замены традиционных источников света светодиодами, в связи с чем совершенствование технологии изготовления последних является чрезвычайно актуальным. Основными требованиями при травлении меза-структур для светодиодов являются: высокая скорость травления, высокая анизотропия и гладкие стенки профиля травления, возможность травления всех слоев многослойной эпитаксиальной структуры в одном процессе.

В работе [42] был проведен анализ наличие летучих продуктов реакции между травителем и обрабатываемым веществом при использовании различных газов, а также проанализировано большое количество известных к настоящему времени результатов по травлению нитридов галлия, алюминия и индия. В результате анализа этих результатов были сделаны следующие выводы:

- В качестве газа-травителя целесообразно использовать хлор- или метилсодержащие газы;
- Для достижения приемлемой скорости травления необходимо использовать разряды с высокой плотностью плазмы (индук-

ционный разряд, разряд с ЭЦР), применение ВЧ разряда емкостного типа нецелесообразно;

- Для разрыва достаточно прочной связи в кристаллической решетке нитрида галлия необходима бомбардировка ионами высоких энергий (как минимум 200 – 300 эВ);
- Для достижения высокой скорости травления рабочее давление должно быть достаточно низким (1 – 3 мТорр).

Выбор рабочего газа в [42] был обусловлен следующими соображениями. Как показал анализ литературных данных, скорость травления при использовании фторсодержащих газов очень низка, поскольку фтор не образует с галлием летучих соединений. Наибольшие скорости травления достигаются при использовании хлорсодержащих газов, однако в данном случае материалом маски являлся диоксид кремния, который хорошо травится атомами хлора, и получить необходимую селективность травления практически невозможно. Кроме того, высокая агрессивность хлорсодержащих газов и продуктов реакции предъявляет повышенные требования к химической стойкости оборудования и существенно снижает его ресурс. В связи с этим в качестве травителя были выбраны смеси на основе метана  $\text{CH}_4$ . Согласно литературным данным, при использовании метана в ICP с подачей ВЧ потенциала на подложкодержатель достигается скорость травления 50 – 150 нм/мин, что является вполне приемлемым, поскольку для задачи травления меза-структур светодиодов означает время травления 5 – 10 минут.

В описанных в [42] экспериментах по травлению GaN давление в камере составляло 3 – 6 мТорр, подводимая ВЧ мощность 150 – 300 Вт, автосмещение подложки – порядка –250 В. Необходимо отметить, что выбранное давление находится в диапазоне наиболее эффективного плазмообразования, т.е. максимума зависимости плотности ионного тока из плазмы от давления.

Для получения меза-структур сверху на пластинах была нанесена маска из диоксида кремния толщиной 0,15 мкм. Необходимая глубина травления составляет 0,5 мкм. Исходными образцами для травления были многослойные эпитаксиальные структуры, выра-

щенные на сапфировых подложках толщиной 430 мкм. Структура содержала следующие основные слои:

1.  $p$ -GaN (Mg) – 0,12 мкм,
2.  $p$ -AlGaN (Mg) – 0,03 мкм,
3. InGaN/GaN МКЯ,
4.  $n$ -GaN (Si) – 3 мкм.

Результаты травления в при напряжении смещения образца –240 В и подводимой мощности 150 Вт представлены на рис. 17а. Изображения получены при помощи растрового электронного микроскопа Jeol JSM-840. Скорость травления оказалась небольшой и составила 20 нм/мин (глубина травления порядка 300 нм). Стенки протравленной структуры не вертикальные с углом наклона 60 – 70 градусов, что обусловлено, по-видимому, эрозией в течение процесса краев маски, имеющих меньшую толщину, чем основная часть.

Для повышения скорости травления была увеличена до 200 Вт ВЧ мощность, вводимая в индукционный разряд, и повышена до 300В величина потенциала автосмещения подложки. Полученные в этом режиме результаты представлены на рис. 17б, где одновременно видны как протравленная ступенька в верхней части рис., так и слой непротравленного GaN на сколе пластины в нижней его части. Селективность травления GaN по отношению к SiO<sub>2</sub> оказалась порядка 6:1. Скорость травления повысилась до 50 нм/мин. Протравленная была поверхность доста-

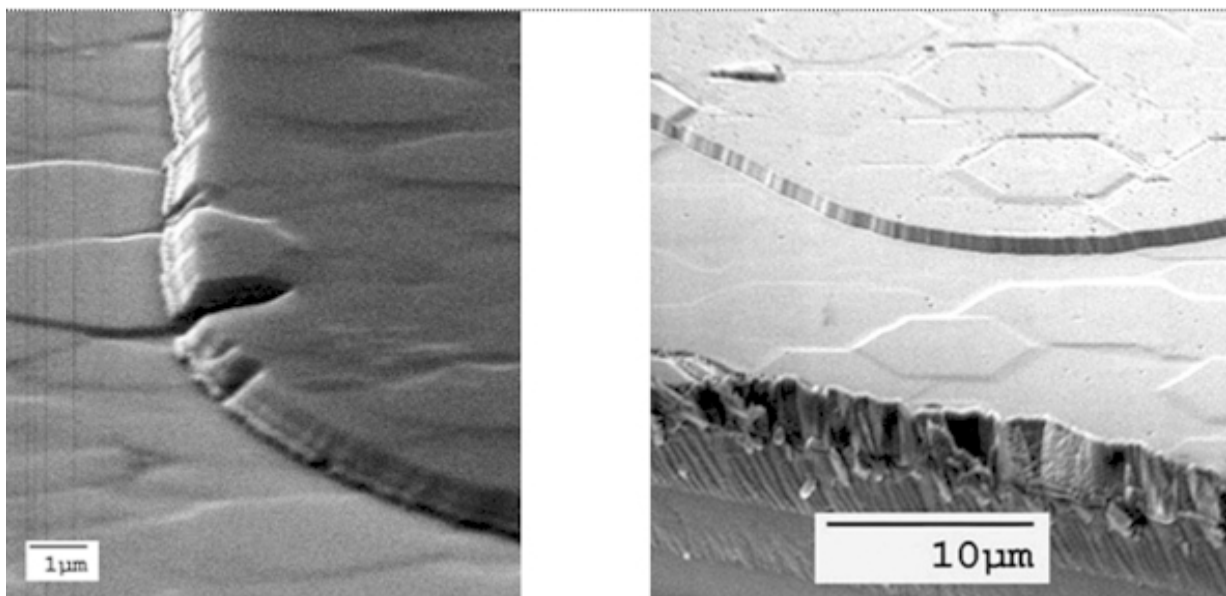
точно гладкой, без дефектов, несмотря на интенсивную ионную бомбардировку.

Таким образом, в работе [42] были отработаны технологические режимы анизотропного травления многослойных структур на базе GaN для нужд современной оптоэлектроники с использованием комбинированного индукционно-емкостного разряда в смеси метана с водородом, то есть без использования агрессивных соединений, которые содержат хлор и фтор. Получена скорость травления до 100 нм/мин. и селективность относительно SiO<sub>2</sub> на уровне 6:1, что демонстрирует пригодность данной технологии для использования в производстве белых светодиодов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог описанным в настоящем обзоре работам, проведенным в течение последних лет, можно кратко сформулировать их основные результаты:

Комплексное экспериментальное и теоретическое изучение физических и радиотехнических характеристик ВЧ индукционного разряда позволило оставить в прошлом эмпирический подход и перейти на качественно новый уровень разработки плазменных технологического оборудования. Разработанные математические модели доведены до уровня достоверного численного эксперимента и являются эффективным инструментом для разработки практических устройств.



а)

б)

Рис. 17. Результат травления GaN в различных режимах.

Результатом этих исследований явилась разработка модуля для плазмохимического и реактивного ионно-плазменного травления, оптимально сочетающего преимущества ВЧИ разряда, как плазмообразующей ступени, с возможностью управления энергией ионов при помощи подачи ВЧ напряжения на подложкодержатель. Модуль совместим с промышленными вакуумными технологическими системами и может быть использован для их модернизации путем замены морально устаревшего плазменного реактора. Современная система автоматизированного измерения и управления, которой оснащен модуль, позволяет применять его в самых современных технологиях.

Так, например, с помощью этого реактора отработана технология анизотропного травления оксида кремния. Доказана возможность получения элементов с размером менее чем 100 нм в кремнии и оксиде кремния, что отвечает современному мировому уровню. Отработаны также технологические режимы анизотропного травления многослойных структур на базе GaN для нужд современной оптоэлектроники. Получена скорость травления до 100 нм/мин. и селективность относительно SiO<sub>2</sub> на уровне 6:1, что демонстрирует пригодность разработанного реактора для использования в производстве белых светодиодов. Травление проводится без использования агрессивных соединений, которые содержат хлор и фтор.

К сожалению, объем статьи не позволил описать некоторые интересные направления деятельности, например разработка источников ионов на базе ВЧ индукционного разряда [43, 44], однако мы надеемся сделать это в будущем.

В заключение хочется выразить уверенность, что технологические системы на базе ВЧ разряда индукционного типа, изучению которого посвящена настоящая работа, являются актуальными и востребованными не только сегодня, но имеют также прекрасные перспективы в будущем, а следовательно исследования в этом направлении необходимо продолжать.

Данная работа была выполнена по программам Министерства образования и науки Украины (№№ г.р. 0100U003301,

0103U004209, 0106U001574, 0102U005322), при финансовой поддержке Министерства промышленной политики Украины (НИОКР № г.р. 0102U005322).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Lieberman M. A. and Lichtenberg A. J. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing, 2nd ed. Wiley, New York, 2004.
2. Rius G., Llobet J., Esplandiú M.J., Sole L., Borri X., Perez-Murano F. Microelectronic Engineering. – 2009. – Vol. 86. – P. 892.
3. Minoru Sugawara, Barry L. Stansfield, Plasma etching: fundamentals and applications. Oxford University Press, USA, 1998.
4. J. Reece Roth. Industrial Plasma Engineering: Vol. 2: Applications to Nonthermal Plasma Processing. CRC Press, 2001.
5. Chen F.F., Chang J.P. Lecture notes on Principles of plasma processing Kluwer, 2002. – P. 249.
6. John H Keller. Inductive plasmas for plasma processing. Plasma Sources Sci. Technol. – 1996 – Vol. 5. – P. 166-172
7. Ogle J S 1990 US Patent 4,948,458
8. Бизюков В.И., Будянский А.М., Покроев А.Г., Фареник В.И. Экспериментальная автоматическая установка плазмохимического травления индивидуальной обработки “Контур-02” с реактором комбинированного типа//Межотраслевой научно-технический семинар “Физические основы и новые направления плазменной технологии в микроэлектронике”. Мат. семинара. – Харьков. – 1989. – С. 99-100.
9. Будянский А.М., Качанов Ю.А., Фареник В.И. Экспериментальная установка ПХТ “Контур-04” с индукционным возбуждением разряда //Межотраслевой научно-технический семинар “Физические основы и новые направления плазменной технологии в микроэлектронике”. Мат. семинара. – Харьков. – 1989. – С. 105-106.
10. Будянский А.М., Зыков А.В., Фареник В.И. ВЧ индукционный источник низкоэнергетичных ионов//Межотраслевой научно-технический семинар “Физические основы и новые направления плазменной технологии в микроэлектронике”. Мат. семинара. – Харьков. – 1991. – С. 26-27.
11. Будянский А.М., Зыков А.В., Фареник В.И. Высокочастотный источник ионов. Патент РФ №1570549 от 27.06.1993 г., Патент Украины №2426 от 15.02.94 г.

12. Будянский А.М., Фареник В.И. и др. Устройство для плазмохимического травления материалов. А.С. СССР №1573896 от 22.02.90 г. (Заявка №43516008 приоритет от 28.12.1987 г.).
13. Будянский А.М. и др. Способ плазмохимического удаления пленок фоторезиста. А.С. СССР №1653484 от 01.02.91 г. (Заявка №4750949 приоритет от 23.10.1989 г.).
14. Будянский А.М., Зыков А.В. Статические вольтамперные характеристики ВЧИ разряда// II Межотраслевой научно-технический семинар “Физические основы и новые направления плазменной технологии в микроэлектронике”. Материалы семинара. – Харьков. – 1991. – С. 22.
15. Budyansky A., Zykov A. Static current-voltage characteristics for radio-frequency induction discharge//IEEE ICOP'S 95. – 1995. – P. 146.
16. Дудин С.В., Зыков А.В., Положий К.И. Энергетическая оптимизация распылительных систем на базе ВЧ индукционно-емкостного разряда//Письма в ЖТФ. – 1996. – Т. 22, Вып. 19. – С.54-59.
17. Дудин С.В., Зыков А.В., Положий К.И., Фареник В.И. Энергетическая цена иона в комбинированном индукционно-емкостном ВЧ разряде//Письма в ЖТФ. – 1998. – Т. 24, № 22. – С. 33 39.
18. Майшев Ю., Фареник В., Будянский А., Дудин С., Зыков А., Положий К., Данилов Н. Исследования высокочастотного индукционного разряда низкого давления для создания широкоапертурных источников ионов с высокой однородностью тока пучка//Труды Физико-технологического института РАН. – 1999. – Т.15. – С. 33 59.
19. Зыков А.В., Положий К.И. Стационарные состояния ВЧ индукционного разряда низкого давления вблизи порога погасания//Письма в ЖТФ. – 2000. – Т. 26, Вып. 11. – С. 68-74.
20. Farenik V., Zykov A., Dudin S., Ushakov A., Polozhiy K. Energetic Optimization of an RF Sputtering System//23rd EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics. Abstracts of Invited and Contributed Papers, Kiev, (Ukraine). – 1996. – P. 451.
21. Дудин С.В., Зыков А.В. Положий К.И. Энергетическая цена иона в комбинированном индукционно-емкостном ВЧ разряде//Материалы международной конференции “Физика плазмы и плазменные технологии”, Минск. – 1997. – Т.4. – С. 728.
22. Дудин С.В., Зыков А.В., Положий К.И. Реактивное ионно-плазменное травление TiN в комбинированном ВЧ индукционно-емкостном разряде//Труды Украинского вакуумного Общества. – 1997. – Т. 3. – С. 488-491.
23. Zyкова A.V., Lyubomirov S.V., Dudin S.V. and Polozhiy K.I.. The synthesis of Multilayer Bioinert-Bioactive Coatings by Reactive Ion-Beam Synthesis Method (RIBS)//10th International Conference on Surface Modification of Metals by Ion Beams. Gatlinburg. Tennessee. – 1997. – TUamP-16.
24. Фареник В.И. Высокочастотные разряды низкого давления в технологии малоэнергоемкого вакуумно-плазменного травления микроструктур//Физическая инженерия поверхности. – 2004. – Т. 2, № 1. – С.117.
25. Дудин С.В., Яцков А.П., Фареник В.И. Оборудование для зондовой диагностики и контроля плазменных технологических процессов. Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2002. – № 3. – С. 43-50.
26. McNeely P., Dudin S., Christ-Koch S., Fantz U. A Langmuir probe system for high power RF-driven negative ion sources on high potential// Plasma Sources Sci. Technol. – 2009. – Vol.18. – P. 014011.
27. Дудин С.В. Автоматизированная система оперативного контроля процесса плазмохимического травления в реакторе на базе ВЧ индукционного разряда//Физическая инженерия поверхности.–2008. – Т. 6, № 3-4. – С.155-159.
28. Denysenko I., Dudin S., Zykov A. et al. Ion flux uniformity in inductively coupled plasma sources//Physics of Plasmas. – 2002. – Vol. 9, No. 11. – P. 4767-4775.
29. Gapon A., Dahov A., Dudin S., Zykov A., Azarenkov N. 2D fluid model for interactive development of ICP technological tools. 11<sup>th</sup> Intern. conference-school on plasma physics and controlled fusion. Alushta, Ukraine. – 2006.
30. Dudin S., Zykov A., Dahov A., Farenik V. Experimental research of ICP reactor for plasma-chemical etching. 11<sup>th</sup> Intern. conference-school on plasma physics and controlled fusion. Alushta, Ukraine. – 2006.
31. Gapon A., Dahov A., Dudin S., Zykov A., Azarenkov N. 2D fluid model for interactive development of ICP technological tools//Problems of Atomic and Technology. – 2006. – No. 6. – P. 186-188.
32. Dudin S., Zykov A., Dahov A., Farenik V. Experimental research of ICP reactor for plasma-chemical etching. 11<sup>th</sup> Intern. conference-school on plasma physics and controlled fusion. Alushta, Ukraine. – 2006.

- mical etching//Problems of Atomic and Technology. – 2006. – No. 6. – P. 189-191.
33. Рафальский Д.В., Положий К.И. Влияние скин-эффекта на импеданс ВЧ индукционного разряда//”Вестник Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина”, серия физическая “Ядра, частицы, поля”. – 2007. – № 763, Вып. 1(33). – С. 69-74.
  34. Рафальский Д.В., Дудин С.В., Положий К.И. Возмущение импеданса индуктора, взаимодействующего с плазмой низкой плотности// Физическая инженерия поверхности. 2008. – Т. 6, № 3-4. – С.155-159.
  35. Плазменная технология в производстве СБИС/под ред. Н. Айнспрука, Д. Брауна. – Г.: Мир, 1987. – 470 с.
  36. Advances in Resist Technology and Processing XXI, edited by John L. Sturtevant, Proceedings of SPIE (Bellingham). – 2004. – Vol. 5376.
  37. Крышталь А.П., Дудин С.В., Дахов А.Н., Коллендовский М.М. Формирование упорядоченных наноразмерных структур на поверхности SiO<sub>2</sub>//Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія “Фізика”. – 2007. – № 783, Вып. 10.
  38. Charles R.Eddy, Etch processing of III-V nitrides, MRS Internet J. Nitride Semicond. – 1999. – Res. 4S1, G10.5.
  39. Gethard Franz, Franz Rinner, Reactive ion etching of GaN and GaAs: radially uniform processes for rectangular, smooth sidewalls//J. Vac. Sci. Technol. Jan/Feb 1999.
  40. Vartuli C.B., Lee J.W. et al. ICP dry etching of III-V nitrides. OSTI, 1997.
  41. Pearton S.J., Vartuli C.B. et al. Plasma chemistries for dry etching GaN, AlN, InGaN and InAlN. OSTI, 1996.
  42. Дудин С.В. Плазменное травление гетероструктур на основе нитрида галлия при изготовлении оптоэлектронных устройств//Физическая инженерия поверхности. – 2006. – Т4, №1-2. – С.117.
  43. Дудін С.В., Зиков О.В., Рафальський Д.В. Енергоефективне джерело іонів. Патент України на корисну модель № 42072, МПК (2009) H01J 27/16, опуб. 25.05.2009.
  44. Dudin S.V., Rafalskyi D.V. Two modes of ion extraction in single-grid ion source. The Third Central European Symposium on Plasma Chemistry. Book of Abstracts. Kyiv, Ukraine, 2009.

*Дудин Станислав Валентинович – начальник НИЛ ДПТП с 1997 года, с 2002 – доцент кафедры физических технологий ХНУ имени В.Н. Каразина (по совместительству).*

© С.В. Дудин, 2009.