

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ РАЗРЯДЫ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ МАЛОЭНЕРГОЕМКОГО ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ МИКРОСТРУКТУР

В.И. Фареник

Научный физико-технологический центр МОН и НАН Украины (Харьков)

Украина

Поступила в редакцию 15.06.2004

В обзоре систематизированы основные результаты фундаментальных и прикладных исследований емкостного и индуктивного ВЧ разрядов, методы формирования интенсивных ионных потоков низкой энергии, полученные автором на протяжении 80-х – 90-х годов. Развита физическая концепция ВЧ разрядов низкого давления и ВЧ диодного эффекта в асимметричном плазменном конденсаторе. На ее основе разработана серия управляемых газоразрядных технологических систем низкой энергии для повторяемых операций в химически активных газовых средах. Диаметр вакуумных камер составляет 50-300 мм при энергии ионов от 50 до 500 эВ. Описаны различные типы экспериментально-технологических установок для плазменного, ионно-реактивного и ионно-лучевого травления при производстве микроэлектронных приборов, а также их технологическая реализация.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время интенсивное внедрение вакуумно-плазменных технологий (ВПТ) в промышленности инициировало исследования и разработку широкого спектра источников ионов (ИИ) и генераторов низкотемпературной плазмы производственного назначения, а так же создание на их основе разнообразных ионно-плазменных систем (ИПС) для травления и нанесения покрытий [1, 2]. Из получивших наибольшее распространение можно выделить ИПС на базе дуговых разрядов (установки серий «Булат», «Пуск»), разрядов постоянного тока в скрещенных ЕН полях (магнетрон, разряд Пеннинга, ускорители с анодным слоем – УАС), высокочастотного разряда емкостного (ВЧЕ разряд) и индукционного (ВЧИ разряд) типов, СВЧ разрядов, которые перекрывают по параметрам потоков частиц весь практически значимый диапазон [3 – 6, 61, 62]. Поэтому, на современном этапе развития ИПС, уже недостаточно проводить исследования и разрабатывать универсальные устройства, ориентируясь только на физические величины: рабочее давление, подводимую мощность, плотность и температуру плазмы и т.д., а целесообразно идти от конкретной технической задачи к ее технологическому решению и максимально простому и экономичному способу реализации технологии.

Одним из перспективных направлений ВПТ, повышающих качество обработки поверхности изделий микроэлектроники (размерное травление пленок), машиностроения (упрочнение приповерхностных слоев материалов, нанесение антифрикционных, жаропрочных, коррозионно-стойких и других функциональных покрытий), оптики (полировка поверхности и нанесение просветляющих покрытий), медицины (нанесение пассиви-

рующих и биосовместимых покрытий в имплантологии) является развитие методов, использующих комбинированные потоки низкоэнергетичных ($\epsilon_f < 1000$ эВ) ионов, радикалов химически активных веществ и нейтральных атомов [7].

В настоящее время, когда технология вакуумно-плазменного травления изделий из полупроводниковых материалов предъявляет все более сложные и разнообразные требования к характеристикам изделий и условиям их обработки, существующий парк узко специализированного оборудования не может в полной мере обеспечить совокупность всех необходимых технологических операций. Это связано с тем, что промышленные установки не допускают независимого изменения различных параметров разряда и, соответственно, основных факторов воздействия активной плазменной среды на обрабатываемые объекты. Актуальной становится задача разработки вакуумно-плазменных систем, реализующих широкий диапазон условий обработки, что возможно при использовании в них комбинированных устройств, позволяющих разделить механизм генерации плазмы и химически активных частиц, с одной стороны, и механизм формирования потоков ускоренных заряженных частиц, воздействующих на обрабатываемую поверхность, с другой.

При решении упомянутых выше задач сформировалось научно-техническое направление – разработка низкоэнергетичных, с малыми затратами рабочих, как правило химически активных, газов, малогабаритных ионно-плазменных и ВЧ-разрядных устройств для создания управляемого высокоэффективного плазменного малоэнергетического оборудования индивидуальной обработки пластин.

Это направление, имея стратегическое значение, связанное с необходимостью микроминиатюризации электронных приборов и увеличением диаметра пластин-носителей, является актуальным, также, в связи с решением постоянно возникающих этапных задач, которые сопровождают развитие плазменных технологий микроэлектроники, таких как, например: разработка ионных источников без накаливаемого катода для реализации процессов ионно-химической обработки, которая тождественна уменьшению физико-энергетического влияния на поверхность; необходимость нанесения пленок на гибкие носители с низкой температурой плавления; малогабаритные технологические модули для космических станций; применение, вместо кремниевых носителей, материалов группы A_3B_5 с низкой температурой деструкции; экологические проблемы, которые состоят в уменьшении выбросов вредных веществ в атмосферу, в частности фтора и другое.

В настоящее время, на пороге качественного преобразования процесса микроминиатюризации приборов и изделий электроники методами нанотехнологий, минимизация комплексного влияния активированной технологической среды на наноструктуры, при сохранении его эффективности, тем более актуальна.

Условием создания малоэнергоемкого управляемого оборудования является комплексное изучение условий и особенностей совместного существования ВЧИ и ВЧЕ разрядов в газоразрядных камерах (ГРК) различной геометрии. Это, в свою очередь, предполагает углубление знаний о ключевых характеристиках ВЧЕ и ВЧИ разрядов, как таковых, а также системы ВЧ генератор-разряд, как целого. Важно также изучить особенности функционирования систем с комбинированным ВЧ разрядом в условиях реальных процессов плазмо-химического травления (ПХТ), реактивного ионно-плазменного травления (РИПТ), реактивного ионно-лучевого травления (РИЛТ) и др.

Настоящий обзор ставит целью систематизацию основных экспериментальных и теоретических результатов, положенных в основу разработки серии малоэнергоемких газоразрядных систем для процессов ПХТ, РИПТ и РИЛТ на базе ВЧЕ и ВЧИ разрядов с ВЧ электродным смещением, а также экспериментальных технологических установок, построенных на их основе. Сюда вошли как неопубликованные ранее, по известным причинам, материалы НИР и ОКР, так и последовательно изложенные результаты ранее опублико-

ванных работ, затрагивавших отдельные аспекты проблемы и выполненных автором обзора и сотрудниками кафедры физических технологий ХНУ им. В.Н. Каразина [9, 13, 14, 19, 20, 23–25, 42, 52, 56 – 85]. Использован также ряд работ ведущих отечественных и зарубежных ученых в области физики и техники высокочастотных разрядов.

ИССЛЕДОВАНИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ВЧЕ РАЗРЯДА И ОПТИМИЗАЦИЯ ДИОДНЫХ СИСТЕМ ПХТ

Главной особенностью ВЧЕ разряда, определяющей значительную часть его физических и технологических свойств, является наличие ВЧ диодного эффекта. Диодный эффект является общим свойством плазмы, контактирующей с поверхностями, находящимися под ВЧ потенциалом. Проявляется он в образовании пристеночного слоя положительного пространственного заряда с большой постоянной разностью потенциалов плазма-стенка $V_p \gg kT_e/e$, где k – постоянная Больцмана, T_e , e – температура и заряд электронов, зависящей от амплитуды приложенного к плазме ВЧ напряжения U_0 . В условиях самостоятельного ВЧЕ разряда ВЧ напряжение электродов не только ответственно за образование приэлектродных слоев, но и служит для поддержания плазмы.

Основные особенности ВЧ диодного эффекта, позволяющие использовать его свойства для формирования и управления потоками ионов, заключаются в линейной зависимости квазистационарного потенциала плазмы от амплитуды приложенного ВЧ напряжения и в возможности сформировать основное падение потенциала вблизи поверхности одного из электродов соответствующим выбором площадей ВЧ электродов и схемы их подключения к ВЧ генератору [9].

Зондовые исследования приэлектродных профилей потенциала и плотности плазмы в ВЧ диодном слое показывают, что такие параметры слоя как ширина d , V_p и плотность ионного тока через слой j_i связаны соотношением, близким к закону «трех вторых» Чайльда-Ленгмюра, справедливому для слоя положительного пространственного заряда (ППЗ) в режиме насыщения тока ионов (сходство этих соотношений, по-видимому, объясняется одинаковыми условиями ускорения ионов постоянным и квазистационарным полями). Ниже будет дан краткий перечень основных явлений в ВЧЕ разряде, так или иначе связанных с ВЧ-диодным эффектом.

ДИОДНЫЙ ЭФФЕКТ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ИМПЕДАНС САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ВЧЕ РАЗРЯДА

Существование больших стационарных электрических полей в приэлектродных слоях ВЧЕ разряда и ускорение этими полями ионов плазмы в направлении электродов известно под названием ВЧ диодного эффекта [10], суть которого состоит в выпрямлении ВЧ емкостного тока в приэлектродных слоях пространственного заряда. Поверхность потенциальных электродов является стоком для части электронов, ускоряемых потенциальным электрическим ВЧ полем, что приводит к формированию слоев положительного пространственного заряда и, как следствие, к появлению больших стационарных положительных потенциалов квазинейтрального объема плазмы относительно стенок газоразрядной камеры (ГРК). Абсолютное значение стационарного падения потенциала в приэлектродных слоях может достигать величины порядка амплитуды приложенного ВЧ напряжения [10, 21] и составлять сотни вольт.

На частотах поля порядка $10^6 \div 10^8 \text{ с}^{-1}$ ВЧ ток в плазме протекает благодаря колебаниям электронов. Тяжелые ионы, находящиеся в плазме, за период поля можно считать покоящимися, а их вкладом в ВЧ ток пренебречь.

Прилегающий к электроду слой плазмы, имеющий ширину порядка амплитуды пространственных колебаний электронов, оказывается обедненным электронами вследствие их падения на электрод при столкновениях с его поверхностью. В результате в этой области обнажается часть ионного остова плазмы и формируется осциллирующий приэлектродный слой положительного пространственного заряда. Отличная от нуля в среднем за период поля плотность положительного пространственного заряда в слое диктует значение положительного стационарного (среднего за период поля) потенциала квазинейтральной плазмы относительно электрода.

При наличии приэлектродных слоев ППЗ пространственное распределение потенциала плазмы имеет форму потенциальной ямы для электронов. Потенциальные барьеры этой ямы, относящиеся к противоположным электродам ВЧЕ разряда, совершают в противофазе ВЧ колебания относительно своего среднего значения, равного V_p . В моменты исчезновения барьеров разрешается кратковременный импульсный сток электронов плазмы на соответствующий электрод, компенсирующий в среднем по времени постоянный ток ионов.

Таким образом, объем квазинейтральной плазмы ВЧЕ разряда, для которого характерны слабые электрические поля, амбиполярный режим диффузии заряженных частиц и достаточно высокая омическая проводимость, вследствие диодного эффекта отделен от ВЧ электродов переходными слоями, в которых нарушается квазинейтральность и сосредоточены основные падения постоянного и ВЧ полей. ВЧ ток в слоях замыкается, преимущественно, токами смещения, поэтому они имеют емкостной импеданс. Более того, емкостное сопротивление приэлектродных слоев оказывается самым большим в цепи разрядного тока, что определяет, в конечном счете, характер импеданса всего ВЧЕ разряда. Емкостный характер импеданса ВЧЕ разряда иллюстрируют приведенные на рис. 1 экспериментальные зависимости фазы ВЧ разрядного тока ϑ от приложенного напряжения U_0 .

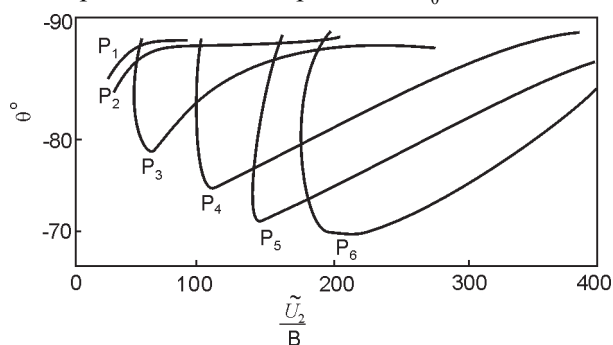


Рис. 1. Зависимость фазы ВЧ тока ϑ от приложенного к ВЧЕ разряду напряжения U_0 при различных давлениях азота N_2 . Расстояние между электродами $l = 54 \text{ мм}$; $P_1 = 3 \cdot 10^{-2} \text{ Тор}$; $P_2 = 8 \cdot 10^{-2} \text{ Тор}$; $P_3 = 2,2 \cdot 10^{-1} \text{ Тор}$; $P_4 = 6 \cdot 10^{-1} \text{ Тор}$; $P_5 = 1,4 \text{ Тор}$; $P_6 = 2 \text{ Тор}$.

УСКОРЕНИЕ ИОНОВ В ВЧ ПРИЭЛЕКТРОДНЫХ СЛОЯХ И АНАЛОГ ЗАКОНА ЧАЙЛЬДА-ЛЕНГМЮРА

В приэлектродных слоях ВЧЕ разряда нарушается амбиполярный режим диффузии зарядов. Положительные ионы, доставляемые из объема плазмы слабым амбиполярным полем, проникая в приэлектродный слой, захватываются и ускоряются приэлектродным падением стационарного потенциала плазмы V_p . Профиль ионной плотности в слое, в результате, становится существенно неоднородным по координате и резко спадает в направлении к электроду. Энергия ϵ_i ускоренных ионов, бомбардирующих электрод, в зависимости от давления газа может достигать величины eV_p и составлять сотни электронвольт.

С ускоренным движением положительных ионов в приэлектродном падении стационарного потенциала V_p связано формирование ширины приэлектродного слоя d . Вследствие диодного

эффекта поверхность ВЧ электрода в среднем по времени оказывается под большим отрицательным потенциалом относительно квазинейтральной плазмы. В отсутствие ионизации в слое собираемый электродом постоянный ионный ток не зависит от величины потенциала V_p и определяется только диффузионным потоком ионов из квазинейтральной плазмы, т.е. равняется ионному току насыщения электрода как плоского ленгмюровского зонда. Формирование профиля ионной плотности в слое и распределение постоянного потенциала также происходит во многом аналогично случаю ленгмюровского слоя в режиме ионного тока насыщения. Отличие заключается в том, что объемный заряд ионов в ВЧ приэлектродном слое частично компенсируется электронами плазмы, проникающими в процесс колебаний в слой.

Теоретические расчеты [11, 12, 13] и экспериментальные исследования показывают, что стационарные параметры ВЧ приэлектродного слоя (V_p, d) действительно связаны соотношением, подобным закону Чайльда-Ленгмюра. Упомянутое отличие приводит к тому, что ширина ВЧ приэлектродного слоя оказывается примерно в $\sqrt{2}$ раз больше ширины ленгмюровского слоя при прочих равных условиях. Известное выражение для закона Чайльда-Ленгмюра, полученное из решения уравнения Пуассона в бесстолкновительном приближении, имеет вид:

$$j_i = \frac{1}{9\pi} \left(\frac{2e}{M_i} \right)^{1/2} \frac{V_p^{3/2}}{d^2}, \quad (1)$$

где M_i – масса иона. Однако, в условиях ВЧЕ разряда, для которого характерен диапазон давлений газа $P = 10^{-2} \div 10$ Тор, приэлектродный слой не является строго бесстолкновительным, а отношение длины свободного пробега ионов λ_i к d при этих давлениях составляет $1 \div 10^{-2}$. В работе [14] получена приближенная интерполяционная формула для закона Чайльда-Ленгмюра:

$$V_p = \frac{6}{5} \left(\frac{M_i}{2e} \right)^{1/3} (6\pi j_i)^{2/3} \left(\frac{d+\lambda}{2d+\lambda} \right) \left(\frac{d+\lambda}{\lambda} \right)^{1/3} d^{4/3}, \quad (2)$$

применимая в диапазоне промежуточных давлений. Формула сшивает бесстолкновительное решение (1) с другим известным решением данной задачи для области давлений $10^{-2} - 10$ Тор, в которой справедливо приближение $\epsilon_i(x) \sim E(x)$, где $E(x)$ – напряженность постоянного электрического поля в слое.

Использование функциональной связи (1), (2) стационарных параметров ВЧ приэлектродных

слоев позволяет легко объяснить электрические свойства несимметричного ВЧЕ разряда, а также несимметричного ВЧ плазменного конденсатора, в общем случае. Учитывая, что ширина слоя d диктует его емкостное [15] сопротивление, легко рассчитать отношение ВЧ и, соответственно, стационарных напряжений в слоях, как функцию отношения площадей электродов. Так, при V -включении электродов [10] (в цепи электродов включен разделительный конденсатор) отношение приэлектродных падений потенциала выражается в виде степени от обратного отношения площадей электродов: $\Delta V_1/\Delta V_2 = (S_2/S_1)^n$, причем показатель степени n равен четырем в области низких давлений ($P < 10^{-2}$ Тор) и $5/2$ в области промежуточных давлений ($P = 10^{-2} \div 1$ Тор) газа [16, 17]. Указанное соотношение позволяет задавать распределение интенсивностей ионной бомбардировки электродов путем соответствующего выбора отношения площадей их поверхности и может быть эффективно использовано при проектировании ВЧ реакторных систем.

ИОННАЯ БОМБАРДИРОВКА ЭЛЕКТРОДОВ И РЕЖИМЫ ВЧЕ РАЗРЯДА

Для ВЧЕ разряда, таким образом, характерна интенсивная ионная бомбардировка электродов и стенок разрядной камеры. Под действием этой бомбардировки развивается вторичная ионно-электронная эмиссия, играющая важную роль в механизме разряда. Основное количество эмиссионных γ -электронов поступает с поверхности потенциальных ВЧ электродов, подвергающихся наиболее интенсивной бомбардировке. В отличие от объемных α -электронов, осциллирующих в слабом электрическом поле на дне потенциальной ямы в объеме квазинейтральной плазмы и обладающих низкой тепловой энергией ($3 \div 5$ эВ), электроны, выбитые с поверхности электрода, могут ускоряться в приэлектродном падении потенциала до энергий порядка eV_p . В зависимости от давления газа и длины свободного пробега электроны могут рассеиваться как в глубине разряда, так и в приэлектродном слое. Преобладание объемных или приповерхностных процессов в механизме поддержания плазмы определяет режим горения ВЧЕ разряда и его пространственную структуру. В литературе различают, соответственно, слаботочный α - и сильноточный γ -разряды [18]. Экспериментально обнаружено, что при $P > 1$ Тор и напряжении $U_0 = 300 \div 400$ В наблюдается скачкообразное повышение разрядного тока, свечения плазмы и перестройка приэлектродных слоев. При повышенных давлениях

переход разряда в сильноточный γ -режим сопровождается падением ВЧ напряжения электродов и образованием отрицательного наклона у статической реактивной вольтамперной характеристики (ВАХ) разряда. Такое поведение разряда объясняется резким изменением характера ионизационных процессов в приэлектродном слое. При определенных условиях возникает лавинообразное ионизационное усиление тока γ -электронов и происходит так называемый пробой приэлектродного слоя. Он сопровождается резким сокращением размеров приэлектродного слоя над всем электродом или над частью его поверхности, увеличением плотности плазмы в этих областях и уменьшением приэлектродного падения постоянного потенциала V_p . Как уже отмечалось, в отличие от α -разряда, для γ -режима характерен существенно немонотонный вид статической ВАХ. Для сравнения на рис. 2 приведены зависимости амплитуды ВЧ тока J_0 от напряжения U_0 для α - и γ -разрядов.

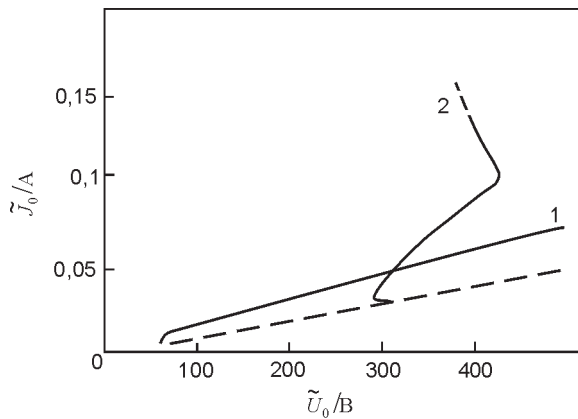


Рис. 2. Статические реактивные ВАХ ВЧЕ разряда в α - и γ -режимах. Рабочий газ – N_2 , расстояние между электродами $l = 54$ мм; Давление газа $P_1 = 6 \cdot 10^{-2}$ Тор; $P_2 = 5,5 \cdot 10^{-2}$ Тор. Пунктирная прямая – величина ВЧ тока конденсатора в отсутствии разряда.

С емкостным характером импеданса ВЧЕ разряда, а также с различным видом зависимости его собственной емкости от приложенного ВЧ напряжения в α - и γ -режимах, связаны особенности поведения этих разрядов в цепи ВЧ генератора. При поддержании ВЧ разряда на частотах 1 – 40 МГц часто возникает необходимость в согласовании образованной разрядом нагрузки с генератором. Как правило, на таких частотах выходные цепи ВЧ генераторов представляют собой резонансный контур, включающий разрядное устройство, а согласование, в частности, заключается в настройке контура в резонанс. Возбуждение ВЧЕ разряда вносит вызванную его собственной емкостью расстройку, устранить которую можно, например, соответствующим

уменьшением емкости контура C_0 . При давлениях ниже 1 Тор попытки настроить контур иногда приводят к скачкообразному уменьшению интенсивности разряда, падению ВЧ напряжения и расстройке контура. В режиме разряда при давлениях выше 3 Тор уменьшение емкости контура при попытках настройки в резонанс приводит к дальнейшей расстройке и даже к срыву разряда. Такое поведение системы генератор-разряд объясняется различным видом зависимости собственной емкости плазмы C_p от напряжения U_0 в α - и γ -режимах.

На рис. 3 кривой 1 изображена резонансная зависимость напряжения в контуре U_0 от переменной емкости контура. Зависимость 1 можно пронаблюдать, изменяя емкость контура в пределах достаточно широких, чтобы пройти резонанс. Кривые 2 и 3 изображают экспериментальную зависимость собственной емкости ВЧЕ разряда от напряжения U_0 , соответственно, в α - и γ -режиме. Ось ординат этих зависимостей изображена пунктиром, проходящим через C_0 . В условиях разряда суммарная емкость контура становится больше на величину C_p . Устойчивым состояниям системы генератор-разряд соответствуют точки А и С пересечений кривых. Характер перемещения и отрыва точек пересечения при изменении C_0 и взаимном перемещении кривой 1 и кривых 2 и 3 объясняет наблюдаемые в экспериментах явления [19].

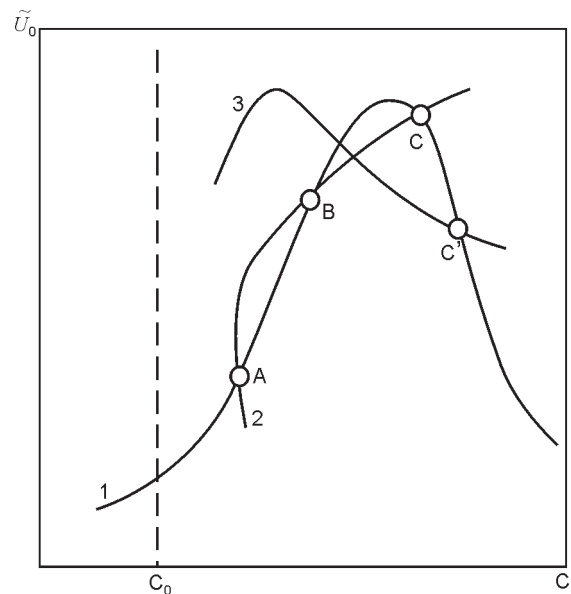


Рис. 3. Влияние собственной емкости ВЧЕ разряда в α - и γ -режиме на напряжение в контуре ВЧ генератора. Кривая 1 – резонансная зависимость ВЧ напряжения на разрядном устройстве от величины емкости контура. Кривые 2 и 3 – зависимость собственной емкости заряда в α - и γ -режимах ВЧЕ разряда от приложенного напряжения. C_0 – емкость контура в отсутствие плазмы.

При альфа-гамма переходе ВЧ емкостного разряда происходит ряд явлений в газоразрядной плазме. На осевом профиле постоянного потенциала плазмы возникает минимум, формируются стационарные двойные плазменные слои [69]. Особенностью альфа-гамма перехода ВЧ разряда низкого давления является то, что критерий пробоя приэлектродного слоя не выполняется [70, 72, 73]. При низких давлениях альфа-гамма переход в аргоне происходит скачком и имеет гистерезисный характер. При промежуточных давлениях альфа-гамма переход происходит непрерывно, без скачков, при этом появляется отрицательная дифференциальная проводимость, в центре разряда наблюдается немонотонное поведение плотности плазмы. В ВЧ разрядах в аргоне и кислороде альфа-гамма переход сопровождается возникновением низкочастотных колебаний в килогерцовом диапазоне, имеющих релаксационную природу. Область устойчивого существования альфа-режима ВЧ разряда ограничена не только со стороны средних давлений (как было показано еще Яценко [74]), но и со стороны низких давлений газа [70, 72, 73]. Альфа-гамма переход сопровождается также уменьшением температуры нейтрального газа во всем разрядном промежутке [75, 76]. В альфа-режиме профили температуры нейтрального газа имеют максимумы в центре разряда, в то время как в гамма-режиме при промежуточных давлениях температура нейтрального газа практически постоянна во всем разрядном промежутке, кроме узких приэлектродных областей.

Характеристики ВЧ асимметричного емкостного разряда в водороде (в том числе и альфа-гамма переход) были исследованы авторами [77, 78] зондовым (цилиндрическим и плоским лэнгмюровскими зондами) и оптическим методами в диапазоне частот ВЧ поля 13,56 МГц – 100 МГц. Получены зависимости потенциала плазмы, температуры электронов, плотности плазмы, постоянного напряжения автосмещения между электродами и функции распределения электронов по энергиям от приложенного ВЧ напряжения при различных давлениях газа как в слаботочном, так и в сильноточном режимах горения разряда.

ОСОБЕННОСТИ ПРОБОЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ВЧЕ РАЗРЯДА И ЕГО СТАТИЧЕСКИХ АКТИВНЫХ ВАХ

Как показали проведенные исследования, пробой газа в высокочастотном поле отличается от пробоя в постоянном электрическом поле. Экспериментально показано, что кривая зажигания ВЧЕ

разряда имеет ряд особенностей [20, 79 – 85]. Экспериментальные результаты довольно хорошо согласуются с расчетами на основе диффузионной кинетической теории ВЧ пробоя [22, 85]. Особенности пробоя ВЧ разряда выражаются в том, что на левой ветви наблюдается неоднозначная зависимость напряжения зажигания от давления, а на правой – в определенных условиях, имеется точка перегиба. На основе диффузионной кинетической теории ВЧ пробоя получены соотношения между значениями давления в точке перегиба, в точке минимума и в точке поворота кривой зажигания.

Для исследования левой ветви применялась нестандартная экспериментальная методика, что позволило выявить неоднозначность. При достаточно низком давлении (10^{-3} Тор) устанавливалась определенная величина ВЧ напряжения, а затем плавно увеличивалось давление газа в вакуумной камере до момента пробоя.

На правой ветви кривой зажигания, при малых межэлектродных расстояниях, когда минимум кривой приходится на давления, при которых $\nu \gg \omega$ (ν – частота электрон-атомных соударений, ω – частота электрического поля), имеется точка перегиба. На больших расстояниях, когда минимум кривой смещается в область низких давлений, перегиб не обнаруживается.

Из экспериментальных кривых на рис. 4, 5 следует, что для описания высокочастотного пробоя газов в исследуемой области изменения параметров применима диффузионная кинетическая теория ВЧ пробоя. Параметры, соответствующие ветвям кривой зажигания справа и слева от минимума, удовлетворяют условиям применимости

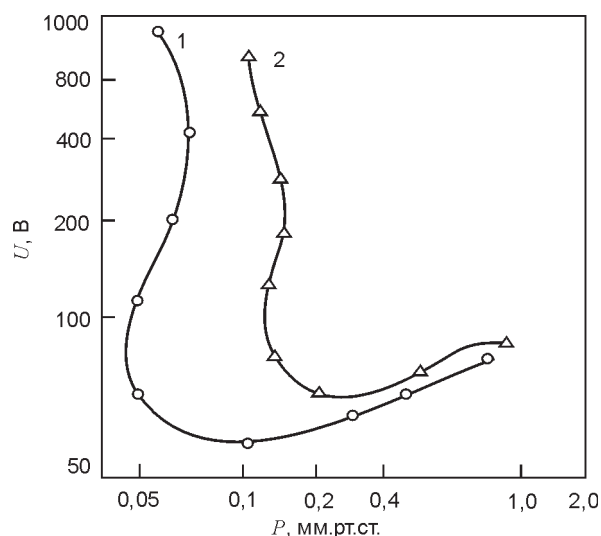


Рис. 4. Зависимость напряжения зажигания ВЧЕ разряда от давления аргона. Расстояние между электродами 1 – $l = 14$ мм; 2 – $l = 29$ мм.

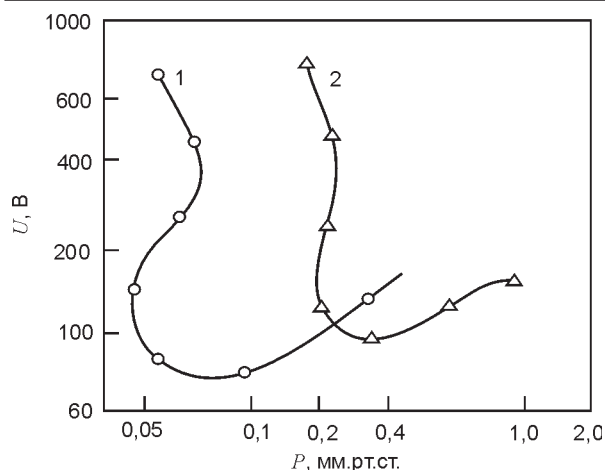


Рис. 5. Зависимость напряжения зажигания ВЧЕ разряда от давления для различных газов. Расстояние между электродами $l = 20$ мм. Газы: 1 – SF₆; 2 – H₂.

диффузионной теории $v \gg \omega$, $\lambda_e \ll d$,

$$E_{lim} \leq \frac{d m_e \omega v}{2 e}, \text{ где } \lambda_e \text{ – длина свободного}$$

пробега электрона, E_{lim} – предельная амплитуда электрического поля, при которой все электроны достигают стенок разрядной камеры за половину периода изменения поля.

Наряду с кривой зажигания ВЧЕ разряда, важной его характеристикой является статическая активная ВАХ (зависимость омической составляющей ВЧ тока $J_0 \cos \theta$ от напряжения U_0). Проведенные исследования показали, что активная вольт-амперная характеристика высокочастотного разряда резко отличается от аналогичной зависимости в разряде постоянного тока [23, 69 – 73]. Основные особенности поведения ВАХ наблюдаются в области напряжений, близких к напряжению альфа-гамма перехода ВЧЕ разряда.

При напряжении на разряде, большем потенциала альфа-гамма перехода, для некоторых газов наблюдается спад тока проводимости. Характерные зависимости приведены на рис. 6. Как видно из приведенных графиков, чем тяжелее газ, тем более заметное уменьшение тока наблюдается на вольтамперной характеристике. Минимум ВЧ тока проводимости приходится на меньшие напряжения для газа, у которого коэффициент вторичной ионно-электронной эмиссии выше. Чем ярче выражена зависимость сечения упругих соударений от энергии электронов (электрон-нейтральных), тем большее падение тока наблюдается в эксперименте.

Нетрудно убедиться, что аналогичное поведение наблюдается также и для ВЧ мощности, вкладываемой в разряд. На участках с отрицательной дифференциальной проводимостью (ОДП) на активных ВАХ ВЧ мощность в разряде может не только замедлять свой рост при повышении

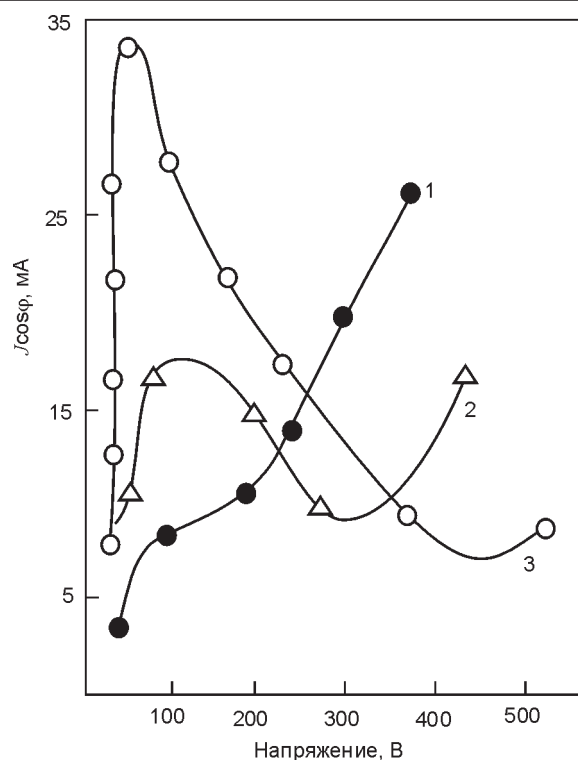


Рис. 6. Статические активные ВАХ ВЧЕ разряда при $p = 0,3$ Торр и $l = 50$ мм для различных газов: 1 – гелий; 2 – аргон; 3 – ксенон.

ВЧ напряжения, но даже падать. Это означает, что относительные энергозатраты на создание в разряде приэлектродного падения потенциала V_p , линейно зависящего от U_0 , для этих участков будут минимальными, а значит минимальными будут также затраты ВЧ мощности на создание ускоренного до соответствующей энергии потока ионов из плазмы. При равной энергетике ионной бомбардировки более экономичным будет режим разряда, соответствующий именно участкам с ОДП.

Существенное уменьшение объема разрядной камеры и ограничение объема плазмы только размерами области, находящейся между электродами непосредственно над обрабатываемой пластиной, а также использование в качестве рабочих режимов реактора области параметров, в которой наблюдается ОДП, позволило существенно снизить энергозатраты на проведение процессов ПХТ в ВЧ диодном разряде и разработать серию малоэнергоёмких реакторов ВЧЕ типа, а также, экспериментальных технологических установок на их основе.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ ПХТ НА БАЗЕ ОПТИМИЗИРОВАННОГО РЕАКТОРА ВЧ ДИОДНОГО ТИПА

На основании проведенных исследований высокочастотного емкостного разряда были разработаны технологические реакторы для плазмохими-

ческого травления различных тонкопленочных структур на пластинах диаметром 75 и 100 мм [24, 65]. Исследования проводились с целью оптимизации режимов травления по уровню потребляемой мощности, давлению и расходу рабочих газов.

Работы по изучению газовых потоков в реакторе диодного типа позволили создать плазмохимический реактор с оригинальной системой напуска рабочих газов и откачки продуктов реакции, распределенных по поверхности электрода [25]. Реактор этого типа обеспечивает высокую однородность поступления газов-реагентов и отбор продуктов плазмохимической реакции, что позволяет проводить процессы травления с неоднородностью не более 5% при диаметре образцов 100 мм и более.

Экспериментальные технологические установки «Контур-01» и «Контур-03» (рис. 7, 8), оснащенные реакторами такого типа, предназначены для индивидуального ПХТ пластин в плазме ВЧЕ разряда. В этих установках можно осуществлять травление тонких пленок нитрида кремния, поликремния, диоксида кремния, металлов, глубинное травление кремния в атмосфере рабочих газов и их смесей: аргон, водород, кислород, фреоны.

Расходы рабочих газов не более 100 мл/мин, диапазон давлений в вакуумной камере 0,1 – 1,0 Тор.

Частота высокочастотного генератора –
13,56 МГц.

Мощность генератора установки «Контур-01»
– не более 100 Вт.

Мощность генератора установки «Контур-03»
– не более 500 Вт.

Установка «Контур-03» является усовершенствованной модификацией установки «Контур-01». Основные отличия заключаются в размерах обрабатываемых пластин (100 и 75 мм), мощности генераторов, габаритных размерах. «Контур-03», при улучшенных эргономических показателях,

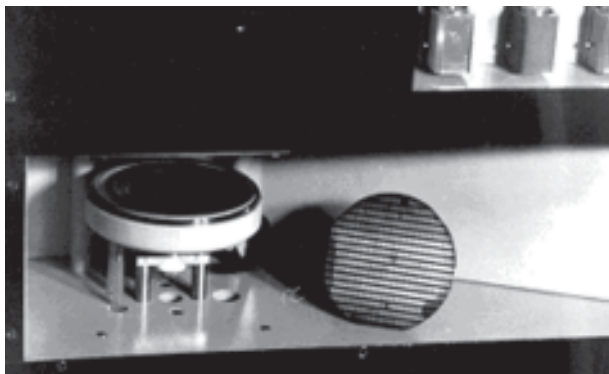


Рис.7. Реактор экспериментальной технологической установки ПХТ «Контур – 01» в открытом виде. Справа – кремниевая пластина \varnothing 100 мм



Рис. 8. Экспериментальная технологическая установка ПХТ «Контур – 03».

имеет значительно меньшие габариты. В установке применена система газонапуска, обеспечивающая большую равномерность травления, усовершенствован блок управления. Конструкция реактора обеспечивает возможность использования установки в составе линий плазмохимической обработки.

Вакуумная реакционная камера установок представляет собой два дисковых электрода, между которыми вакуумно уплотнена диэлектрическая кольцевая вставка, являющаяся боковой стенкой камеры. Рабочий объем камеры не более 100 мл. Диаметр электродов, практически, равен диаметру обрабатываемых пластин. Установки укомплектованы зондовыми датчиками контроля момента окончания процесса травления [64]. Высокая однородность обработки, быстрдействие и чувствительность зондового датчика контроля окончания травления позволяют проводить в установках процессы травления материалов с низкой селективностью. Благодаря малому энергозатрату в разряд, температура пластин, обрабатываемых даже без охлаждения электродов, не превышает нескольких десятков градусов. При травлении нитрида кремния, поликремния, диоксида кремния, кремния под маской фоторезиста изменений структуры резиста не наблюдалось.

Выходной контур генераторов установок «Контур-01, -03» выполнен таким образом, что вакуумная камера является его составной частью. Такая схема включения разрядного конденсатора позволила упростить высокочастотную систему установок.

МАЛОГАБАРИТНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ ПХТ «ТИТАН» С ОПТИМИЗИРОВАННЫМ РЕАКТОРОМ ВЧ ДИОДНОГО ТИПА

С развитием элементной базы установок ПХТ и благодаря исследованиям в области физики высокочастотного газового разряда возникла возможность создания миниатюрных настольных установок. Примером могут служить экспериментальные технологические установки типа «Титан» (рис. 9). Эти установки предназначены преимущественно для использования в научно-исследовательских и заводских технологических лабораториях.

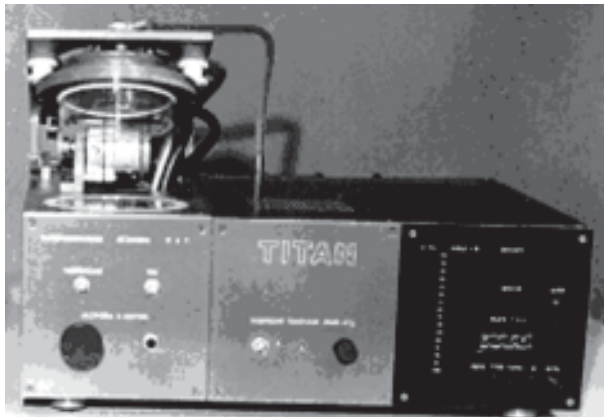


Рис. 9. Малогабаритная экспериментальная установка ПХТ серии «Титан» с оптимизированным реактором ВЧ диодного типа.

Установки серии «Титан» имеют габариты 60×30×50 см и менее. В состав установки входят следующие блоки: вакуумная реакционная камера, блок газонапуска, вакууметр, генератор высокой частоты, блок управления, блок питания, механизм открывания камеры.

Размеры обрабатываемых пластин 40, 76 и 100 мм. Пластины размещаются на нижнем потенциальном ВЧ электроде. Потенциальный электрод выполнен неподвижным, охлаждаемым водой. Верхний электрод – подвижный, охлаждаемый водой, обеспечивает открывание и закрывание вакуумной камеры. Через верхний электрод осуществляется напуск газов и вакуумная откачка. Напуск производится по периферии вакуумной камеры, а откачка продуктов плазмохимической реакции – душевая, со всей обрабатываемой по-

верхности. Такое решение системы газонапуска позволило получить высокую степень однородности травления при относительной простоте конструкции. По оси верхнего электрода расположено окно для контроля толщины стравливаемых покрытий методом лазерного интерферометра. Межэлектродное расстояние задается сменными кварцевыми кольцами разной высоты, что позволяет, кроме того, проводить диагностику процессов по оптическому излучению из плазмы.

На установках «Титан» проводились процессы травления различных тонкопленочных структур. Травление полиимидных пленок толщиной 12 – 36 мкм в атмосфере кислорода и фреона с контактной никелевой маской показало высокую скорость и анизотропию. Скорость травления достигала 5 мкм/мин.

Топология травления полностью повторяла маску. Типичный профиль травления, полученный в реакторе данного типа, приведен на рис. 10. Снимки сделаны при помощи растрового электронного микроскопа РЭМ-100У.

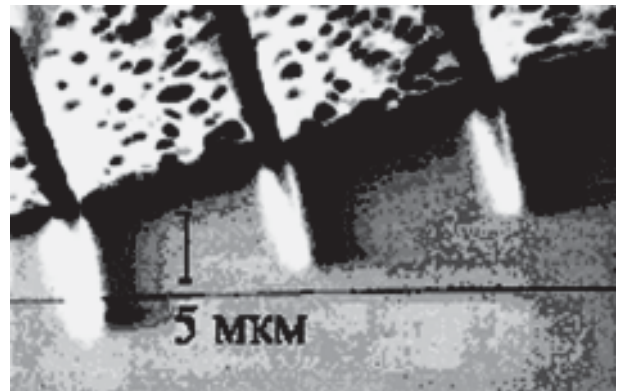


Рис. 10. Профиль травления канавок в кремнии под фоторезистивной маской, полученный в оптимизированной ВЧ диодной системе (1985 г.).

Также осуществлялось травление кремниевых структур, органического и кремний-органического фоторезистов. Скорость травления по тонким пленкам нитрида кремния, диоксида кремния, поликремния составляла 1 мкм/мин и более. Проводились процессы глубинного травления кремния. Скорость травления составляла 5 мкм/мин, глубина травления – до 100 мкм.

Несмотря на все достоинства самостоятельного ВЧЕ разряда, как инструмента для ПХТ (простота реализации, высокая однородность условий обработки на поверхности электродов, высокие скорости обработки и т.д.), возможности его использования в технологии микроэлектроники ограничены. Это объясняется как недостаточно низким рабочим давлением газа в реакторе, так и, главным образом, невозможностью раз-

дельно управлять физическим и химическим факторами воздействия плазмы ВЧЕ разряда на образец, поскольку они имеют общую зависимость от ВЧ разрядного напряжения.

Поэтому актуальной является задача создания таких комбинированных газоразрядных систем, в которых создание плазмы и ускорение ионов осуществляется независимо, а в качестве плазмообразующей ступени применяется такой тип разряда, который обеспечивал бы более низкий диапазон давлений, более широкий интервал значений плотности плазмы и минимальное значение собственного потенциала плазмы относительно стенок.

ИССЛЕДОВАНИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ВЧИ РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Тенденции развития методов вакуумно-плазменного травления (ВПТ) и вакуумно-плазменного синтеза тонких пленок предполагают повышение производительности процессов травления и нанесения, улучшения пространственной однородности потока ионов при одновременном снижении их энергии до уровня нескольких десятков электронвольт, что позволяет создавать благоприятные условия протекания химических реакций на поверхности подложки, оказывать решающее воздействие на стехиометрию пленок, минимизировать радиационные повреждения поверхности. Соответственно, эти тенденции определяют следующие общие требования, необходимые для эффективной реализации технологии ВПТ, к параметрам ИПС независимо от способа создания плазмы:

1. Возможность независимого управления величиной плотности потоков частиц j и их энергии e в широком диапазоне ($j = 0,1 \div 10$ мА/см², $e = 50 \div 500$ эВ).

2. Высокая однородность потоков на большой площади (до 1 м²).

3. Минимальное содержание примесей по массовому составу потока (менее 1%).

4. Зарядовая и токовая нейтрализация потоков заряженных частиц.

5. Возможность длительной работы с химически активными газами.

6. Низкие давления в рабочей камере (менее 10^{-2} Тор).

В известных конструкциях плазменных ИПС используются практически все типы газовых разрядов для создания плазмы в ГРК, однако безэлектродные электрические разряды, в которых передача энергии плазме осуществляется не потенциальным, а вихревым электрическим полем, в частности, ВЧИ разряд низкого давления, являются наиболее перспективными для разработки на их базе широкоапертурных ИПС низкой энер-

гии. Как будет показано в данной работе, преимущества использования ВЧИ разряда как плазмообразующей ступени ИПС низких энергий обусловлены высокой плотностью плазмы (до 10^{12} частиц/см³), минимальным разбросом ионов по энергиям ($\Delta e_i \leq 5$ эВ), относительно низким рабочим давлением ($10^{-4} \div 10^{-3}$ Тор), высокой экономичностью (энергетическая цена иона $\eta \sim (30 \div 80)$ эВ/ион), отсутствием накаливаемых узлов и, поэтому, большим ресурсом работы с химически активными газами, возможностью независимого управления энергией и плотностью заряженных частиц.

В настоящий момент эти достоинства ВЧИ разряда признаны многими исследователями в области физики низкотемпературной плазмы, что вызвало в последние годы, особенно в США и Японии, всплеск теоретических и экспериментальных работ по ВЧИ разряду и его техническим применениям [26]. Вместе с тем, систематически проводятся фундаментальные и прикладные исследования ВЧИ разряда и способов формирования интенсивных низкоэнергетичных потоков ионов, а также была проведена серия НИР и ОКР для НПО «Электроника» (г. Воронеж), НПО «Орион» и НПО Вакууммашприбор (г. Москва), НИИ «Сатурн» (г. Киев) и НФТЦ, результатом которых явилась разработка серии ИПС для осуществления процессов ПХТ, РИПТ и РИЛТ с диаметром ГРК от 50 до 300 мм, изготовление экспериментальных специализированных установок «Контур-02», «Контур-04», «Каштан 5», «Контур-05» и «Контур-06», и проведение цикла работ по апробации и технологическому обеспечению этих установок для производства элементов оптоэлектроники, быстродействующих микроэлектронных приборов, финишной полировки лазерной оптики, плазменного проявления многослойного кремний-органического резиста, размерного травления кремния и т. д.

Начало детальному рассмотрению ВЧИ разряда было положено в работах Дж. Дж. Томсона [27, 28], где была доказана возможность существования разряда, поддерживаемого вихревым индукционным ВЧ полем. В этих работах была предложена теория и установлен критерий зажигания безэлектродного разряда. Д. Таунсенд и Р. Дональдсон [29] получили в подобной системе разряд, возбуждаемый электростатическим полем соленоида и поставили под сомнение результаты, полученные Томсоном. Дискуссия между Томсоном и Таунсендом привлекла внимание многих экспериментаторов. Спор был разрешен в статье Мак Киннона [30], в которой автор показал, что, как в экспериментах Томсона имел

место кольцевой ВЧИ разряд, вызванный переменным магнитным полем, так и в опытах Таунсенда и Дональдсона был аналогичный разряд, однако, его природа маскировалась ВЧЕ разрядом, поддерживаемым потенциальным электрическим полем соленоида. Оценки, предложенные Дж. Дж. Томсоном, позже были уточнены в работах [31, 32].

Экспериментальному изучению компонент безэлектродного разряда в парах ртути была посвящена статья [33]. Авторам удалось получить кривые зажигания каждой фазы в отдельности и установить принципиальную роль потенциального электрического поля в пробое газа. Роль продольной потенциальной компоненты электрического поля E_c в пробое индукционного разряда обсуждается также в статье [34], в которой предлагается простое выражение для составляющих поля индуктора: $E_c/E_i = 2\pi R/(lN)$, где R – радиус, l – длина индуктора, N – количество витков, E_i – азимутальная вихревая (индукционная) составляющая электрического поля.

Таким образом, еще в 20 – 30 годах была однозначно установлена роль потенциальной и вихревой составляющих электрического поля в ВЧИ разряде, сформулирована его феноменологическая модель. Доказано, что ВЧИ разряд поддерживается вихревым ВЧ электрическим полем E_i , что делает независимыми процесс нагрева плазмы и уход частиц на стенки ГРК. Кольцевые электронные токи, создаваемые ВЧИ полем, не вызывают образования приэлектродных слоев пространственного заряда, как это происходит в случае постоянного или ВЧ емкостного токов, замыкающихся через стенку ГРК, поэтому, в отсутствие внешних потенциальных постоянных или ВЧ полей в ВЧИ разряде, температура электронного газа и потенциал плазмы относительно стенок ГРК определяются только балансом рождения и ухода заряженных частиц в объеме плазмы.

Для технологии ВПТ представляет интерес стационарный режим ВЧИ разряда в области низких давлений при небольшой степени ионизации рабочего газа, когда основными каналами диссипации энергии являются ионизация и ускорение рабочего вещества, а длины свободных пробега атомов и ионов значительно превосходят размеры системы. Поэтому, в последующие годы число публикаций по практическому использованию ВЧИ разряда низкого давления сильно возросло [35, 36, 37, 38].

Отметим некоторые, наиболее принципиальные результаты для понимания физики разряда и для разработки плазменных ИПС. Вычислению

электромагнитных полей в индукционном разряде при низких давлениях была посвящена работа [39]. Авторами показано, что в диапазоне давлений $10^{-4} \div 10^{-2}$ Тор, высоких частот (более 10,7 МГц) и плотности заряженных частиц $n < 10^{12}$ см⁻³, распределение полей индуктора можно считать близким к вакуумному. В работе [37] изучалось влияние потенциального электрического ВЧ поля, наведенного разностью потенциалов между витками индуктора, на энергетический спектр ионов, покидающих ВЧИ разряд низкого давления. Было установлено, что использование многосекционного проводящего экрана витков соленоида, возбуждающего ВЧИ разряд, снижает энергетический разброс ионов с величины $\Delta\epsilon_i = 20 \div 40$ эВ до $\Delta\epsilon_i \leq 5$ эВ.

Условие существования ВЧИ разряда низкого давления обсуждалось в работе [40]. В ней отмечается, что когда длина ионизации λ_i превосходит размер газоразрядной камеры D , пробой газа и создание плазмы только с помощью индуктора затруднено. Тем не менее, поддержание самостоятельного разряда при давлении рабочего газа $p \sim 10^{-3}$ Тор и ниже, когда длина свободного пробега электронов $\lambda \geq D$, индукционным способом осуществимо. Это обусловлено тем, что в плотной плазме (радиус Дебая $r_D \ll D$) электроны удерживаются в объеме ГРК пристеночными слоями нескомпенсированного пространственного заряда ионов. При отсутствии объемной рекомбинации, отражаясь многократно ($\sim (M_i/m_e)^{1/2}$ раз, где M_i и m_e – соответственно, массы иона и электрона) от слоев, электроны проходят путь в $\sim (D/\lambda)(M_i/m_e)^{1/2}$ раз превышающий длину ионизации. Поэтому, по мнению авторов, условием поддержания разряда является выполнение более слабого, чем $\lambda_i < D$ неравенства: $\lambda_i < D(M_i/m_e)^{1/2}$. В приближении максвелловской функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) и линейной аппроксимации сечения ионизации, можно получить аналитическое решение уравнения баланса рождения и ухода частиц, из которого следует, что T_e является функцией только произведения давления рабочего газа p в ГРК и характерного размера системы d [40]. При этом перепад потенциала в области квазинейтральной плазмы составляет величину порядка T_e , а потенциал плазмы относительно стенок ГРК – $\phi_{pl} = 0,5 \cdot T_e \cdot \ln(M_i/m_e)$ [41]. При снижении значения pD менее 10^{-1} Тор·см равновесная T_e повышается от величины порядка 3 эВ до $10 \div 15$ эВ, соответственно, увеличивается и ϕ_{pl} . Отметим, что равновесные состояния плазмы чисто индукционного разряда, т.е. ВЧИ разряда без внешних

потенциальных электрических полей, близки по своим параметрам плазме положительного столба тлеющего разряда [42].

КРИВЫЕ ЗАЖИГАНИЯ И АНАЛОГИ СТАТИЧЕСКИХ РЕАКТИВНЫХ ВАХ ДЛЯ ВЧИ РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Для разработки и эксплуатации различных устройств на основе ВЧИ разряда низкого давления необходимо знание его электрических характеристик, обеспечивающих поджиг разряда в заданных условиях и получение индукционной плазмы требуемой плотности. Изучению областей существования ВЧИ разряда и особенностей его пробоя в физической литературе уделено достаточно много внимания [27 – 34].

В то же время, разные авторы для описания пробоя часто используют разные физические величины (ВЧ ток или напряжение соленоида, напряженность E_i вихревого электрического поля и т. д.), характеризующих не только сам разряд, но и разрядное устройство с конкретной системой ВЧ возбуждения. Это усложняет непосредственное использование их данных.

Экспериментальные исследования самостоятельного ВЧИР проводились в отсутствие электродов в разрядной камере и ставили своей целью получение таких данных об условиях зажигания разряда и о его электрических параметрах в стационарном режиме, которые облегчали бы расчет системы ВЧ возбуждения для газоразрядных устройств с различным диаметром.

На рис. 11 показаны кривые зажигания ВЧИР в воздухе на частоте ВЧ поля $f = 13,56$ МГц в камерах с различными наружными диаметрами. Кривые зажигания строились при наличии предварительно возбужденного слаботоchnого емкостного разряда, поддерживаемого полем E_c витков соленоида. В качестве аналога напряжения, прило-

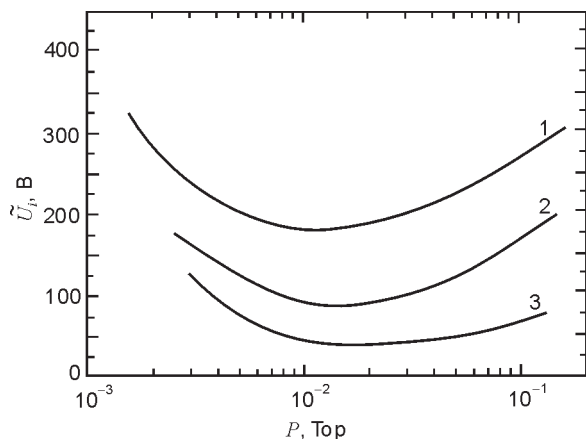


Рис. 11. Кривые поджига ВЧ индукционного разряда в цилиндрических камерах различного диаметра: D_1 – 21 см; D_2 – 12 см; D_3 – 6,5 см.

женного к разряду, как и в [33], использовалось значение U_i вихревой э.д.с., индуцируемой на внешнем периметре разрядной камеры. Величина U_i наиболее удобна для практических расчетов, поскольку позволяет легко определить оптимальное число N витков соленоида по известным характеристикам ВЧ генератора.

Гораздо меньше известно о параметрах установившегося индукционного разряда и о его электрическом импедансе в стационарном режиме. В частности, непонятна природа скачков напряжения соленоида, а также мощности W , вкладываемой в разряд, возникающих при его поджоге. Неясно, чем определяется величина этих скачков, каким образом можно управлять энерговкладом и плотностью плазмы в установившемся разряде и как его согласовать с ВЧ генератором.

Чтобы ответить на эти вопросы для ВЧИР, необходимо построить характеристику, аналогичную статической реактивной ВАХ ВЧЕ разряда. Однако, ни амплитуду, ни фазу замкнутого в объеме плазмы индукционного тока нельзя измерить непосредственно.

Поэтому в качестве аналога реактивных ВАХ для ВЧИ разряда строились его вольт-ваттные характеристики (ВВТХ), представляющие собой зависимость амплитуды напряжения U_i и омической ВЧ мощности W вкладываемой в плазму. Параметры U_i и W объективно характеризуют состояние разряда и могут быть легко измерены во внешней цепи [43, 44].

На рис. 12 а) и рис. 12 б) приведены семейства ВВТХ ВЧИ разряда в воздухе для различных разрядных камер. Крутые начальные участки зависимостей соответствуют незначительному энерговкладу в предварительно возбужденный слаботоchnый емкостный разряд, обладающий, как известно, возрастающей зависимостью параметров плазмы от приложенного напряжения. На вольт-ваттных характеристиках, отвечающих давлениям правее минимумов на кривых зажигания разряда, хорошо заметны максимумы ВЧ напряжения U_i и следующие за ними участки с отрицательным наклоном зависимости U_i от W .

Таким образом, ВВТХ индукционного разряда имеют вид, напоминающий характеристику обычного газоразрядного или полупроводникового стабилитрона постоянного тока. Способность ВЧИР стабилизировать амплитуду ВЧ разрядного напряжения требует теоретического объяснения. Кроме того, напряжение U_i в этих условиях неудобно рассматривать как независимый «внешний» параметр ВЧИР, поскольку его величина играет подчиненную роль и устанавливается в

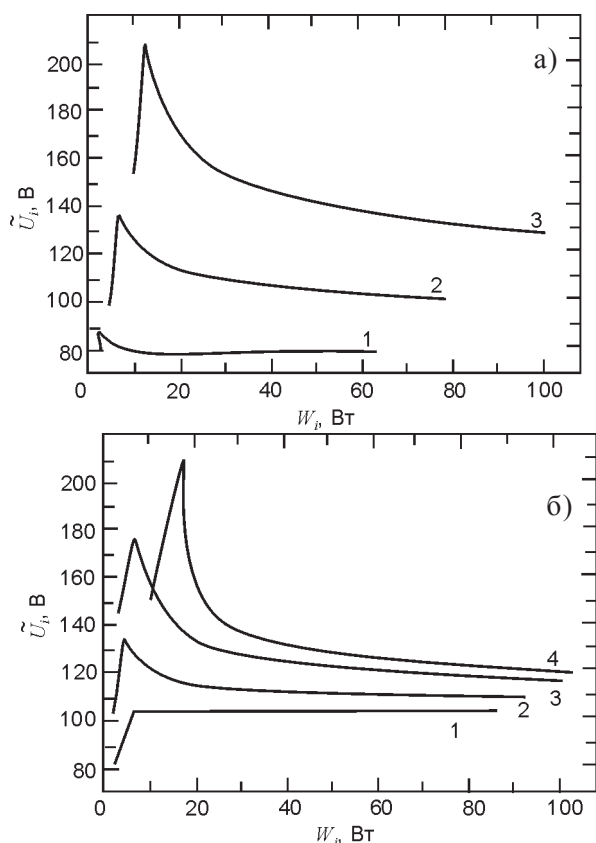


Рис. 12. Вольт-ваттные характеристики ВЧИ разряда в камерах с диаметрами $D = 12$ см (а) и $D = 6,5$ см (б) при давлениях газа: $P_1 - 0,015$ Тор; $P_2 - 0,06$ Тор; $P_3 - 0,1$ Тор; $P_4 - 0,14$ Тор.

зависимости от значения мощности W , разрядного тока и концентрации плазмы.

Форма ВВтХ индукционного разряда позволяет объяснить происхождение скачков тока и напряжения соленоида, а также параметров плазмы, возникающих при возбуждении ВЧИР. Для этого удобнее рассмотреть не ВВтХ, а зависимость «разрядного» напряжения U_i от эквивалентного омического тока разряда J_Ω , значения которого легко найти из соотношения $W = U_i J_\Omega$. Построенные таким образом для двух различных давлений зависимости $U_i(J_\Omega)$ показаны на рис. 13.

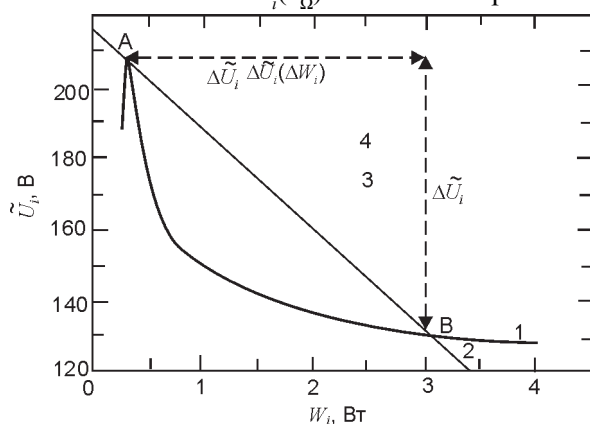


Рис. 13. Скачки токов и напряжений в системе генератор-разряд, возникающие при поджоге ВЧИ разряда. 1 – статическая вольтамперная характеристика ВЧИР; 2 – нагрузочная характеристика ВЧ генератора.

Прямой $A - B$ на этом рисунке обозначена нагрузочная характеристика ВЧ генератора, показывающая, что при фиксированном значении ВЧ э.д.с. и увеличении омического тока нагрузки происходит снижение выходного напряжения (так называемое «подсаживание»). Наклон нагрузочной характеристики определяется внутренним сопротивлением источника ВЧ э.д.с., а также добротностью контура и соленоида. Зависимость типа $A - B$ на рис. 13 легко построить, нагрузив соленоид через виток связи на достаточно мощный безиндуктивный потенциометр.

Рассмотрим аналог статической ВАХ для ВЧИ разряда, соответствующей давлению $P > 10^{-2}$ Тор, т. е. правой ветви кривой зажигания разряда.

Точкой A на рисунке обозначено состояние системы, соответствующее слаботочному ВЧЕ разряду. По мере увеличения ВЧ э.д.с. генератора происходит смещение прямой $A - B$ вверх, а также приближение точки A к точке максимума на зависимости $U_i(J_\Omega)$. В момент достижения этого максимума происходит поджиг ВЧИ разряда и скачкообразное переключение системы в состояние, соответствующее точке B . Разрядное напряжение U_i (а также напряжение и ток соленоида) при этом падает, а омический ток нагрузки, образованной разрядом, резко возрастает. При этом происходит также скачкообразное увеличение яркости свечения разряда и плотности плазмы. Величина скачков определяется формой зависимости $U_i(J_\Omega)$, а также наклоном нагрузочной характеристики генератора (т.е. его внутренним сопротивлением).

На левой ветви кривой зажигания, т.е. при давлении $P < 10^{-2}$ Тор, переход системы в режим индукционного разряда не сопровождается скачками и происходит плавно независимо от внутреннего сопротивления источника ВЧ э.д.с. Это объясняется отсутствием участка с отрицательным наклоном на ВВтХ, а также на зависимостях $U_i(J_\Omega)$ для этой области давлений.

АНАЛОГИ СТАТИЧЕСКИХ РЕАКТИВНЫХ ВАХ ДЛЯ ВЧИ ПЛАЗМЕННОГО КОНДЕНСАТОРА

Введение металлических электродов ПК в объем индукционной плазмообразующей ступени приводит к некоторому «угнетению» параметров ВЧИР, проявляющемуся в смещении кривых его зажигания в сторону больших U_p , а также в изменении вида его ВВтХ. Типичная ВВтХ индукционного разряда в электродной системе, показывающая влияние электродов, приведена на рис. 14.

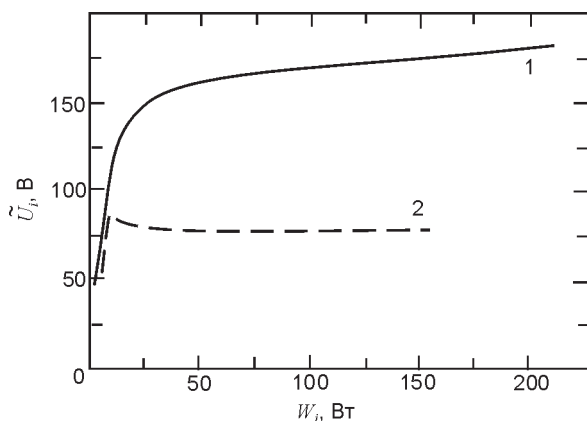


Рис. 14. Влияние проводящих электродов плазменного конденсатора на форму вольт-ваттной характеристики ВЧИ разряда в камере диаметром 12 см при давлении 0,03 Тор. 1 – вольт-ваттная характеристика разряда при наличии электродов; 2 – «невозмущенная» характеристика.

Уменьшение осевого размера камеры до 7,5 см, а также введение электродов приводит к повышению значений напряжения поджига, к более плавному переходу в режим ВЧИР, а также к появлению положительного наклона у зависимости U_i от W . На рис. 14 «возмущенная» кривая зажигания ВЧИР (сплошная линия) показана в сравнении с невозмущенной в отсутствие электродов (пунктир). Как и в случае самостоятельного ВЧЕ разряда, в плоскосимметричном конденсаторе электроды ПК можно использовать как большой двойной плоский зонд для измерений ионных токов на электроды, а также для оценок значений плотности плазмы на границах приэлектродных слоев. В данной системе, которая является несимметричным плазменным конденсатором, зондовые ВАХ ВЧ электродов, кроме того, показывают значения постоянных токов и напряжений, возникающих вследствие диодного эффекта в цепи электродов.

На рис. 15. показано типичное семейство «зондовых» ВАХ электродов ВЧ индукционного плазменного конденсатора, измеренных при различных значениях мощности W в ВЧИ разряде в воздухе при $P = 3 \cdot 10^{-2}$ Тор и ВЧ напряжения между электродами 170 В.

Все кривые имеют хорошо выраженные участки насыщения, позволяющие достаточно точно определить токи положительных ионов на электроды. Для токов ионов на электроды I_{i1}, I_{i2} и площадей электродов S_1, S_2 выполняется соотношение $I_{i1}/S_1 = j_{i1} \approx I_{i2}/S_2 = j_{i2}$, которое показывает, что плотности ионных токов на поверхности противоположных электродов имеют примерно равные значения. Последнее наблюдается в том случае, когда ВЧ соленоид расположен симметрично по отношению к электродам, а профиль

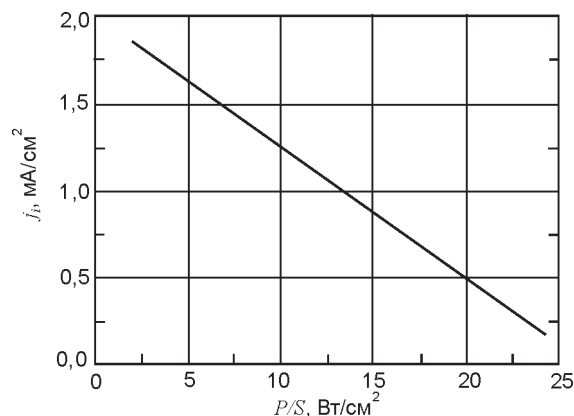


Рис. 15. Вольтамперные характеристики электродов ВЧ индукционного плазменного конденсатора как двойного плоского зонда при давлении $P = 0,03$ Тор и ВЧ мощностях в разряде: $W_1 = 100$ Вт; $W_2 = 200$ Вт; $W_3 = 300$ Вт. ВЧ напряжения между электродами: $U_1 = 170$ В; $U_2 = 190$ В; $U_3 = 210$ В.

плотности плазмы в межэлектродной области имеет симметричную форму.

Сумма токов $I_{i1} + I_{i2}$ является нижним пределом для скорости ионизации \dot{q} в объеме ВЧИ разряда. Зависимость от мощности W в условиях экспериментов была близкой к линейному закону вида:

$$\dot{q}(A) \leq (1 + 2) \cdot W \text{ (кВт)}. \quad (3)$$

Оценка (3), естественно, занижена, поскольку не учитывает стока зарядов на боковые стенки. Суммарная площадь ВЧ электродов $S_1 + S_2$ составляла около 1/6 от общей площади внутренней поверхности камеры. Поэтому для скорости ионизации в объеме ВЧИ разряда можно ожидать в несколько раз большее значение, что согласуется с данными [45]. Измерения \dot{q} позволяют оценить энергетическую цену η иона в ВЧИ разряде.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЦЕНА ИОНА В ВЧИ РАЗРЯДЕ

В результате проведения комплекса методических работ по диагностике ВЧИ разряда было установлено, что наиболее оптимальными величинами для сравнения эффективности плазмообразующих ступеней различных ИПС являются интегральные токовые и энергетические параметры: энергетическая цена иона η ; ВЧ мощность W_i , поглощаемая в объеме плазмы; ВЧ мощность W_{loss} , рассеиваемая в электрических цепях и проводящих конструктивных элементах системы; затраты мощности на ускорение ионов W_a ; их зависимости от давления и сорта рабочего газа, полной подводимой мощности W , а так же вольт-ваттные и ватт-амперные характеристики разряда [63].

Если мощность W , идущую от генератора в согласующее устройство (СУ) – падающую мощность, легко определить с помощью стандартного рефлектометра, которым сегодня оборудованы почти все промышленные ВЧ генераторы, то измерения W_{loss} встречают значительные трудности. Так, W_{loss} включает в себя омический нагрев элементов СУ – подводящих проводов, индуктора, конденсаторов, – реактивным ВЧ током, амплитуда которого может достигать нескольких десятков ампер, индукционный нагрев проводящих элементов ГРК – фланцев, электростатических экранов и т.д., электромагнитным полем, т.е. процессы, которые трудно контролировать и измерять. Величина W_{loss} нелинейно зависит от абсолютного значения W , амплитуды ВЧ напряжения на индукторе U_{in} резонансного контура, температуры радиоэлементов и может достигать более 90% падающей мощности. Именно поэтому, важным этапом в исследованиях ВЧИ разряда и в работах по оптимизации ГРК явилась разработка методики определения W_{loss} и технологии ее снижения.

Суть методики определения W_{loss} заключалась в построении семейства калибровочных кривых для U_{in} в зависимости от W на «холостом ходу» (т.е. без разряда, при минимальной отраженной ВЧ мощности и установившейся температуре) для каждого экспериментального устройства путем последовательного введения различных функциональных элементов. При этом, величина U_{in} при фиксированном W играет вспомогательную роль – является показателем настройки контура в резонанс и его добротности, критерием нагрузки контура на активное сопротивление, а так же индикатором зажигания разряда, и необходимо добиваться его максимального значения.

Экспериментальные данные по W_{loss} позволили провести достоверные вычисления η в ВЧИ разряде.

Здесь необходимо сделать следующие уточнения. Разные авторы, в зависимости от поставленной задачи, по-разному определяют энергетическую цену иона. Так, в теоретических работах (см., например, [46]) эта величина характеризует суммарные потери энергии электронами в результате упругих и неупругих столкновений при образовании одного иона в объеме разряда. В технических приложениях, например для источников ионов, энергетическая цена иона определяется как отношение полной подводимой мощности к току ионного пучка [3]. При сравнении эффективности ионно-образующих ступеней различных ИПС, как показывает практика, более

удобной характеристикой является величина $\eta = eW_i/I$, где $I = \oint_S j(\xi) d\xi$ – суммарный ток ионов

на стенки ГРК, S – площадь поверхности электродов, ограничивающих плазму, j – плотность тока ионов на границе плазмы, а W_i – поглощаемая в объеме мощность, которая включает в себя как потери энергии электронов при упругих и неупругих соударениях, так и неизбежные затраты энергии, выносимой потоками заряженных частиц на границу плазмы вследствие их теплового движения.

При таком определении энергетической цены иона, величину η для ВЧИ разряда низкого давления легко выразить через непосредственно измеряемые в эксперименте параметры I и поглощаемую разрядом мощность $W_i = W - W_{\text{loss}}$. Действительно, в условиях, когда длина релаксации энергии электронов превосходит размеры ГРК, даже при локальном нагреве электронного газа, связанного с неоднородностью распределения электромагнитного поля в плазме, диссипация энергии электронов на неупругие столкновения происходит равномерно во всем объеме ГРК, за исключением тонких пристеночных слоев пространственного заряда, и формируется плазма с высокой однородностью скорости генерации частиц. Это подтвердили многочисленные измерения распределений плотности тока ионов j на границе плазмы в ГРК различной формы и размеров. Поэтому в расчетах η можно использовать простое выражение $\eta = W_i/(j \cdot S)$, где S – площадь внутренней поверхности ГРК.

Основными результатами проведенных систематических исследований зависимостей η от W_i , p , сорта рабочего газа, размеров ГРК, а так же параметров плазмы T_e , Φ_{pl} и заряженных частиц j , ϵ_p , De_i является следующее:

1. Величина η не зависит от поглощаемой разрядом ВЧ мощности в диапазоне $W_i/S = 0,1 \div 10$ Вт/см² для характерных размеров ГРК от 50 до 400 мм. При этом плотность ионного тока j равномерно распределена по поверхности ГРК, пропорциональна W_i и может достигать десятков мА/см² (рис. 16). Верхний предел по вкладываемой в разряд мощности, как правило, ограничен выходной мощностью и степенью согласования ВЧ генератора.

2. Величина η существенно зависит от давления в ГРК и сорта рабочего газа (рис. 17). Характерным является наличие минимума $\eta_{\text{min}} = 60 \div 80$ эВ/ион при $P_{\text{opt}} = (0,8 \div 2) \cdot 10^{-3}$ Тор. Абсолютные величины η_{min} и W_{opt} зависят от сорта рабочего газа и характерного размера ГРК D , однако,

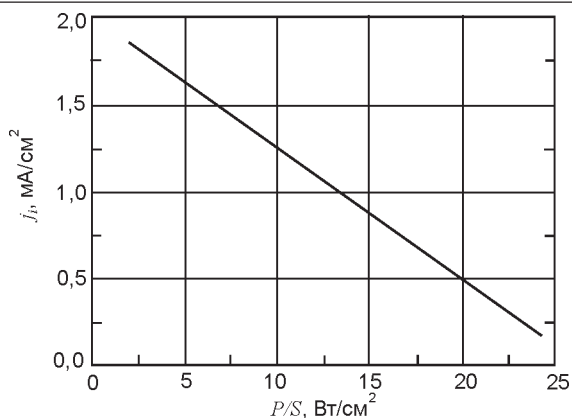


Рис. 16. График зависимости плотности тока ионов j_i на стенке ГРК в зависимости от P/S – подводимой мощности, нормированной на единицу площади поверхности ГРК. График соответствует области давления с минимальной для аргона величиной $\eta = (75 - 80)$ эВ/ион.

в исследованном диапазоне $D = 50 \div 400$ мм для Ar, O₂, N₂, CF₄ и воздуха их изменение не превышало 30%.

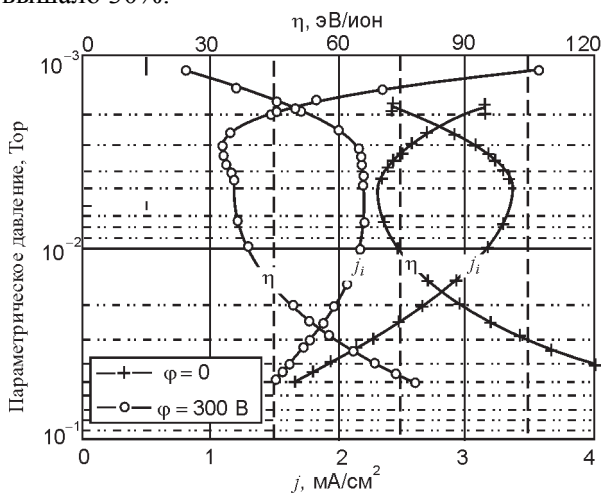


Рис. 17. Графики зависимости плотности тока ионов j_i и энергетической цены иона η от параметрического давления pd для ВЧИ разряда ($\phi = 0$ В) и для ВЧИ разряда с подачей ВЧ потенциала на электрод ($\phi = 300$ В). Значение мощности W , нормированной на единицу поверхности составляло $P/S = 0,25$ Вт/см². Рабочий газ – аргон.

Данный результат для чисто индукционного разряда, а так же абсолютные значения h хорошо согласуются с теоретическими расчетами работы [40], проведенными в приближении максвелловской функции распределения электронов по энергиям, когда поток энергии, выносимой заряженными частицами на стенки ГРК, пропорционален электронной температуре T_e . На основании этих результатов можно утверждать, что рост h при низких давлениях обусловлен повышением затрат мощности на ускорение ионов, а при высоких давлениях h увеличивается вследствие растущих потерь энергии на возбуждение и диссоциацию рабочего газа.

3. Величина η_{\min} снижается до 30 эВ/ион при воздействии на плазму потенциального электрического ВЧ поля (рис. 17, 18) и не изменяется при инъекции в плазму пучка высокоэнергетичных электронов.

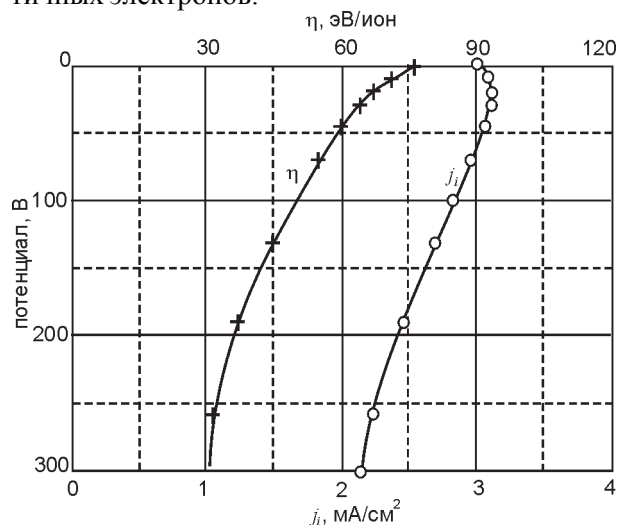


Рис. 18. График зависимости плотности тока ионов j_i и энергетической цены иона η от ВЧ потенциала на электроде при постоянном параметрическом давлении $pd = 3 \cdot 10^{-3}$ Торр·см и постоянной суммарной мощности W , нормированной на единицу поверхности ($P/S = 0,25$ Вт/см²). Рабочий газ – аргон.

На основании теоретических моделей ВЧ разряда емкостного типа [47, 48, 49] можно предположить, что снижение энергетической цены иона при росте ϕ_{pl} обусловлено увеличением доли быстрых электронов в ФРЭЭ. Такое изменение может быть связано либо со стохастическим нагревом электронного газа при его взаимодействии с ВЧ приэлектродными слоями, либо с вкладом омического нагрева в плазменной фазе емкостного слоя [48]. Однако, для окончательных выводов о природе данного явления требуется проведение экспериментальных исследований динамики ФРЭЭ при воздействии на индукционный разряд слабого потенциального ВЧ электрического поля.

4. Измерения параметров ионного потока подтвердили известные результаты [50], что энергетический разброс ионов не превышает электронной температуры $\Delta \epsilon_i \sim (3 \div 10)$ эВ, а их средняя энергия определяется потенциалом плазмы $\phi_{pl} = 0,5 \cdot T_e \cdot \ln(M_i/m_e)$ и составляет величину $\epsilon_i = (10 \div 80)$ эВ в зависимости от давления.

Представленные на рис. 16 – 18 зависимости в указанном диапазоне параметров $D, p, W/S$ являются, в значительной степени, общими для чисто индукционных разрядов низкого давления независимо от формы ГРК, но все-таки не носят универсальный характер (вопрос о параметрах подобия для безэлектродных разрядов в настоящее время еще остается открытым). Тем не менее, приведенные данные послужили доста-

точной физической основой для разработки и конструирования оптимальных ГРК для плазменных ИИ на базе ВЧИ разряда низкого давления.

ВЧ ИНДУКЦИОННЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ КОНДЕНСАТОР – УПРАВЛЯЕМАЯ ГАЗОРАЗРЯДНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ УСТРОЙСТВ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОГО ТРАВЛЕНИЯ

Выше были изложены результаты исследований электрического импеданса и диодных свойств плазменного конденсатора как в условиях самостоятельного ВЧЕ разряда, так и в случае ВЧ индукционной плазмообразующей ступени. Эти свойства, как показано выше, главным образом определяются характеристиками ВЧ приэлектродного слоя. Знание простой взаимосвязи параметров слоя в совокупности с данными об электрических и пространственных характеристиках самостоятельного ВЧИ разряда позволяет составить достаточно простую картину основных электрических и физических свойств индукционного плазменного конденсатора (ИПК) и оценить его технологические возможности.

Основным из этих свойств является возможность отдельного изменения средней энергии и плотности потока ионов, бомбардирующих электроды конденсатора. Как технологическая система плазменной обработки, такое устройство позволяет независимо управлять двумя основными факторами воздействия активной плазмы на образец: химическим (поток нейтральных радикалов) и физическим (бомбардировка положительными ионами), а также создавать оптимальные условия для обработки при заданном давлении газа. Управление характеристиками физического воздействия осуществляется при этом электрическими средствами, т.е. соответствующим выбором энерговыклада в ВЧИ разряд и ВЧ напряжения, приложенного к электродам. Поток нейтральных химически активных частиц при неизменной мощности и давлении в разряде легко управлять путем изменения состава рабочей газовой смеси. Другое свойство несимметричного ИПК позволяет сосредоточить основную мощность ионной бомбардировки на поверхности одного (рабочего) электрода, который может быть как потенциальным, так и заземленным, и снизить до минимума распыление остальных деталей устройства. Для этого достаточно площадь поверхности нерабочего электрода выбрать в 2 – 3 раза больше площади рабочего (см. выражения (2), (3)).

Относительно равномерное распределение тока ионов на внутренней поверхности ИПК по-

зволяет делать простые оценки целого ряда внутренних технологических параметров плазмы всего лишь по значениям таких «внешних» параметров как мощность W в разряде, напряжения между электродами конденсатора, объем V камеры и площадь S электродов.

ВЧ ИНДУКЦИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ИОНОВ ДЛЯ РИЛТ

Чтобы превратить ИПК в источник ионов (ИИ) низких энергий достаточно его рабочий (т.е. меньший по площади) электрод выполнить в виде сетки. Такое простейшее устройство дает ряд важных преимуществ в сравнении с аналогами [51]. Электрод – сетка при этом выполняет двойную роль. С одной стороны, он формирует ионный пучок, проникающий через ячейки сетки в область транспортировки пучка. С другой – запирает индукционную плазму в объеме источника, препятствуя проникновению разряда в область транспортировки. Поэтому, в варианте источника ионов, рабочий электрод ИПК заземлен. Это тем более удобно, т.к. существенно облегчается задача эффективного охлаждения сетки. Эмиттером ионов в этом случае служит граница квазинейтральной плазмы в приэлектродной области индукционного разряда, а приэлектродный слой с электродом – сеткой выполняют роль односеточной ионно-оптической системы (ИОС), не нуждающейся в применении катода нейтрализатора. Последнее обстоятельство объясняется тем, что в ВЧ приэлектродном слое при V -включении электродов формируется автоматически скомпенсированный по току (в среднем за период поля) пучок ускоренных ионов. Другими словами, при наличии стационарного напряжения на слое постоянный ток через него равняется нулю, что является специфической особенностью ВЧ диодного эффекта и ВЧ приэлектродного слоя.

ИОС НА ОСНОВЕ ВЧ ПРИЭЛЕКТРОДНОГО СЛОЯ

При выборе параметров односеточной ИОС необходимо знать функциональную взаимосвязь между шириной приэлектродного слоя d , стационарным падением потенциала U_0 и значением плотности ионов на границе квазинейтральной плазмы. Зондовые исследования приэлектродных профилей потенциала и плотности плазмы в ВЧ диодном слое [9] показывают, что стационарные параметры слоя d , U_0 и плотность ионного тока через слой j_i связаны соотношением, близким к закону «трех-вторых» Чайльда-Ленгмюра,

справедливого для слоя в режиме насыщения постоянного тока ионов и, поэтому, параметры ячеек электрода-сетки в зависимости от требуемой плотности тока пучка и его энергии легко оценить.

Так, при $j_i = 10 \text{ mA/cm}^2$ и разности потенциалов $U_y \approx 100 \text{ В}$ ширина слоя составляет $\sim 0,8 \text{ мм}$, т.е., изготовив эмиссионный электрод с размерами отверстий менее $0,8 \text{ мм}$, можно уменьшить «провисающий» потенциал в ячейках ИОС и радиус кривизны эмитирующего ионы плазменного мениска, что позволит снизить угол разлета частиц и их потери на стенках выходных отверстий. Повышение плотности тока или понижение энергии пучка накладывают жесткие ограничения на максимальный размер отверстий, а при расчете толщины эмитирующей сетки необходимо учитывать ряд противоречивых требований – с одной стороны, увеличение толщины электрода-сетки приводит к повышению газовой экономичности и механической прочности, с другой – растут потери ионов на стенках выходных каналов. Оценки показывают, что сетка с размером отверстий $0,4 \div 0,95 \text{ мм}$, толщиной $1,5 \text{ мм}$ и прозрачностью $\sim 50\%$ позволяет получать плотность тока пучка ионов аргона $1 \div 5 \text{ mA/cm}^2$ с энергией 100 эВ . Однако, окончательные возможности изготовленной ИОС необходимо устанавливать на основе экспериментальных данных.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИИ НА БАЗЕ ИПК И ИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ АПРОБАЦИЯ

На базе ИПК была разработана и испытана серия источников низкоэнергетичных ионов с диаметром пучка от 50 мм до 250 мм , энергией ионов $50 \div 300 \text{ эВ}$ и плотностью тока ионов до 5 mA/cm^2 [52, 58].

Индукционными ИИ с диаметром пучка 250 мм были оснащены установки «Каштан-5»

(разработанная и изготовленная в НПО «Вакууммашприбор») и «Контур-06» (разработанная и изготовленная в НФТЦ), показанные на рис. 19 а,б.

Как пример реализации технологических возможностей ВЧИ источника низкоэнергетичных ионов, приведем характеристики установки «Каштан 5», изготовленной по заказу НИИ «Сатурн» для производства СВЧ электронных приборов с субмикронными размерами элементов на подложках из соединений типа A_3B_5 (рис. 19 а). Установка имеет технологическую вакуумную камеру с четырьмя окнами диаметром 400 мм , четыре подложкодержателя диаметром 250 мм , каждый из которых охлаждается водой, вращается вокруг своей оси и может независимо устанавливаться под углом $(0 \div 60)^\circ$ к оси пучка для получения профиля «перевернутая трапеция». Подложкодержатели изолированы от земли, что позволяет контролировать процесс окончания травления по изменению тока в цепи подложкодержатель – земля [53]. Технологическая камера откачивается высоковакуумным турбомолекулярным насосом ТМН 3500 ($\varnothing 400 \text{ мм}$), изготовленным в химически стойком исполнении, и двумя механическими насосами НВР 16Д до остаточного давления 10^{-6} Тор . В установке предусмотрен ручной и автоматический режимы управления. Установка «Каштан 5» оснащена двумя источниками ионов – «Радикал М 300» [52] и односеточным ИИ на базе ВЧИ разряда с диаметром пучка 250 мм , на характеристиках которого остановимся более подробно.

Принципиальная схема индукционного ИИ представлена на рис. 19в. ВЧ напряжение частотой $13,56 \text{ МГц}$ от генератора типа УВ 1 через согласующее устройство подавалось как на внутренний экранированный индуктор 3, так и на цилиндрический корпус ГРК 4, который одновре-



Рис. 19. а) промышленная установка РИЛТ «Каштан-5», б) экспериментальная установка «Контур-06» с ионными источниками индукционного типа; в) конструкция источника.

менно являлся ВЧ электродом. Заземленным электродом системы была многочелевая сетка 1 диаметром 250 мм, прозрачностью 60% и с размерами элементарных ячеек $0,8 \times 20$ мм, изготовленная электро-эрозийным способом из листовой нержавеющей стали толщиной 1,5 мм с последующим вакуумно-термическим отжигом. Геометрические размеры ГРК: длина 80 мм, диаметр 250 мм. Диапазон изменения внешних параметров источника был следующим: давление в ГРК $p = 10^{-4} \div 10^{-2}$ Тор, амплитуда напряжения на ВЧ электроде $U_0 = 0 \div 500$ В, подводимая ВЧ мощность $P = 0,2 \div 1$ кВт.

На рис. 20 представлены основные характеристики индукционного ИИ: зависимость тока пучка ионов и напряжения на индукторе $U_{\text{инд}}$ от давления p в рабочей камере. На расстоянии 150 мм от источника неоднородность j_b составляла менее 5% на диаметре 200 мм.

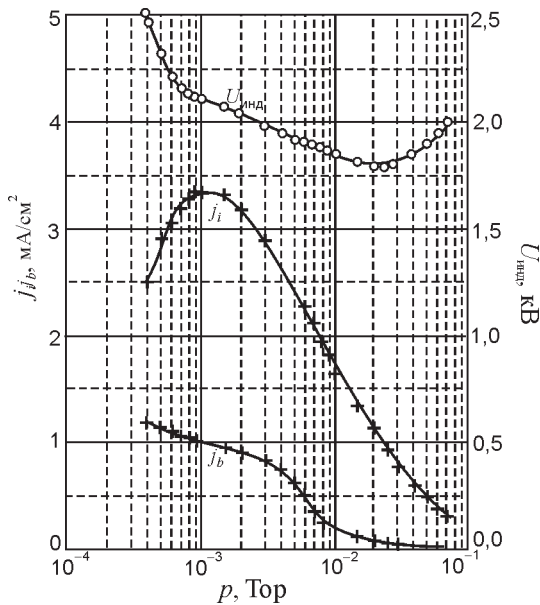


Рис. 20. Зависимость тока пучка ионов и напряжения на индукторе от давления.

Испытания и технологическая апробация установки «Каштан-5» проводились в НИИ «Сатурн». На данной установке исследовалась возможность глубинного анизотропного травления GaAs и слоев AlGaAs с целью выяснения возможности получения «границ лазерного зеркала» — вертикальной и гладкой поверхности боковой стенки, которая используется для изготовления оптоэлектронных интегральных схем, и отрабатывался процесс бездефектного травления функциональных слоев GaAs в щелях субмикронных размеров для последующего формирования на подтравленной поверхности контакта Шотки. Эта работа преследовала цель замены жидкостного травления GaAs сухим в процессе

формирования затворного электрода ПТШ. В обоих случаях в качестве газа травителя использовался молекулярный хлор, получаемый при термическом разложении хлорида меди. Этот метод позволяет получать чистый хлор в количестве, достаточном для проведения процесса, причем, величина давления газа определяется температурой. Технология получения хлора из хлорида меди подробно описана в работе [54].

Для процесса глубинного травления образцы GaAs (САГ 2БК) и гетероэпитаксиальные структуры AlGaAs покрывались слоем никеля толщиной 0,2 мкм, наносимым путем электронно-лучевого испарения, в котором через маску фоторезиста жидкостным травлением вскрывались окна.

Образцы для бездефектного травления представляли собой пластину GaAs (САГ 2БК) со сформированными омическими контактами и нанесенным на его поверхность слоем электронного фоторезиста ЭП 9 толщиной 0,5 мкм, в котором методом электронно-лучевой литографии получены окна под затворы, причем длина затворов в маске резиста составляла 0,3 мкм.

Электронный резист задубливался в течение 4 минут при $T = 120^\circ\text{C}$. После травления канавки под затвор на всю поверхность пластины напылялись Ti — 0,1 мкм, Al — 0,5 мкм и проводился процесс «взрывной» литографии.

Полученные образцы, для определения величины повреждения поверхности при РИЛТ сравнивались по показателю идеальности N и высоте барьера Шотки $\phi_{\text{ш}}$ с контрольными, полученными с использованием неразрушающего жидкостного травления.

Для проведения процесса РИЛТ использовалась установка «Каштан-5», для напыления Ti-Al — УРМЗ.279.068, экспонирование электронного фоторезиста проводилось на ZBA-20, контроль полученных структур — на электронном микроскопе ZRM-12, определение N -величины идеальности барьера Шотки определялись из вольтамперных характеристик перехода по известной методике [55].

ГЛУБИННОЕ ТРАВЛЕНИЕ GaAs

РИЛТ образцов проводилось с использованием ВЧ индукционного низкоэнергетического источника ионов при давлении газа в рабочей камере (в разрядной камере ионного источника давление не измерялось) равном $6 \cdot 10^{-4}$ Тор (режим 1) и $9 \cdot 10^{-4}$ Тор (режим 2). Расход газа при этом составлял 0,8 л/ч и 1,2 л/ч, а ионный ток на подложку 1 мА/см и 0,4 мА/см соответственно. Средняя

энергия ионов в ионном пучке составляла 350 эВ и 160 эВ. ВЧ мощность, вкладываемая в разряд ионного источника, во всех экспериментах была постоянной и равнялась 1 кВт.

Скорость травления GaAs составляла 0,3 мкм/мин для режима 1 и 0,1 мкм/мин для режима 2. Были получены канавки травления глубиной 4 мкм и 1,5 мкм. Маска Ni при этом сохранилась без повреждений и, впоследствии, легко была удалена жидкостным травлением (рис. 21).

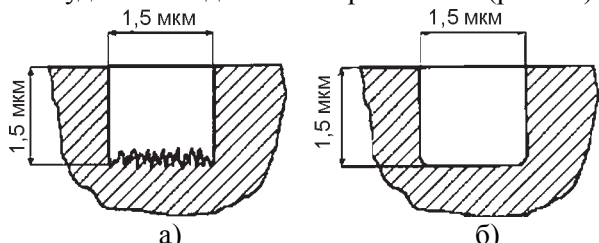


Рис. 21. Профиль канавки, протравленной в арсениде галлия в первом (а) и во втором (б) режиме.

В обоих случаях были получены строго вертикальные и прямые боковые стенки без признаков подтравливания. Дно канавки у образцов, протравленных в режиме 1 было шероховатым с явно выраженными пиками и ямками, а для режима 2 характерно гладкое дно канавки со скругленными боковыми стенками у дна канавки.

РИЛТ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР СО СЛОЯМИ

В данном процессе, в основном, изучалась скорость травления слоев AlGaAs и ее отношение к скорости травления GaAs. Режимы травления были те же, что и при глубинном травлении GaAs. Здесь следует, отметить, что отношение скоростей травления AlGaAs/GaAs в режиме 1 составило 1/5, т.е. скорость травления AlGaAs составила 0,06 мкм/мин, для режима 2 наблюдалась значительная неповторяемость результатов, от полной остановки процесса травления, до протравливания слоя AlGaAs толщиной 0,15 мкм за время 20 мин. Можно предположить, что такое значительное различие скоростей травления GaAs и AlGaAs объясняется влиянием остаточных паров воды и кислорода в рабочей камере, вызывающих окисление Al в ходе процесса травления AlGaAs до Al₂O₃, а выход Al₂O₃ при распылении намного ниже выхода AlGaAs, GaAs, Al при РИЛТ в Cl.

БЕЗДЕФЕКТНОЕ ТРАВЛЕНИЕ

Для исследования повреждений, вносимых РИЛТ, образцы подвергались обработке в режимах 1 и 2, а также в режиме 3 при давлении порядка 10³ Тор, при котором энергия ионов оценивалась в 100 эВ. Глубина травления составила около

0,3 мкм. После РИЛТ на структуры наносили барьерный Ti и высокопроводящий Al для формирования электрода-затвора ПТШ.

На сформированных структурах измеряли вольтамперные характеристики полученного диода Шотки, а по ним определяли показатель идеальности N и высоту барьера $\phi_{ш}$. Было получено, что для первого режима $N > 2$, для второго – $N = 1,45$, для третьего – $N = 1,15 \div 1,2$. Для сравнения, при жидкостном травлении контрольный образец дал значение $N = 1,06$, т.е. наблюдается явная зависимость N от энергии ионов. Термообработка в течении 30 мин при 300 °С дает некоторое улучшение значения N . Образцы, протравленные во 2 режиме и обработанные в слабом перекисно-аммиачном травителе короткое время (был снят слой порядка 0,01 мкм), дали значение N такое же, как и при полностью жидкостном химическом травлении.

Значение величины высоты барьерного контакта Шотки для режима 1 не оценивалось, для режимов 2 и 3 составило $\phi_{ш} = 0,93$ эВ и $\phi_{ш} = 0,9$ эВ соответственно. Для контрольных структур $\phi_{ш} = 0,82$ эВ. Видимо, здесь сыграло свою роль влияние загрязнений, имеющих место в нашем случае из-за несовершенства откачных средств и используемых материалов.

Таким образом, технологические испытания ВЧИ источника низкоэнергетических ионов показали, что по совокупности таких показателей, как анизотропия, скорость и селективность травления, стойкость резиста при обработке, он может быть эффективно использован для целого ряда операций в технологии изготовления полупроводниковых приборов на основе Al₃V₅. Источник показал себя надежным и удобным в эксплуатации, легко перестраивался по режимам и был стабилен в работе. Источник одинаково хорошо работал на фтор- и хлорсодержащих газах, кислороде, аргоне, азоте, водороде и их смесях. С помощью источника были разработаны лабораторные технологии глубинного и бездефектного РИЛТ, а так же РИЛТ гетероэпитаксиальных слоев.

В то же время, в некоторых технологических операциях выявлено, что поверхность полупроводникового материала требует дополнительной очистки после РИЛТ источником. Это указывает, что дальнейшее усовершенствование источника необходимо вести в направлении снижения остаточного давления в камере и поиска новых химически стойких конструкционных материалов.

СИСТЕМЫ ПХТ И РИЛТ НА БАЗЕ ИПК

Путем комплексного изучения различных ВЧ газоразрядных систем во взаимосвязи их внешних

физических, электрических и геометрических характеристик со значениями и распределениями внутренних параметров активной плазмы были установлены основные факторы ее воздействия, а также определены пути для независимого управления ими. Было показано, что наиболее просто добиться раздельного управления физическим и химическим факторами воздействия технологической плазмы можно в условиях комбинированной газоразрядной системы, представляющей собой ВЧ плазменный конденсатор с индукционным разрядом в качестве плазмобразующей ступени.

В процессе создания данных систем ПХТ требовалось не только найти конструкцию реактора, оптимально реализующую преимущества асимметричного ВЧ плазменного конденсатора и индукционного разряда, но также провести разработку системы ВЧ возбуждения, обеспечивающей независимое управление ВЧ смещением электродов и ВЧ мощностью в индукционной плазме. В ходе оптимизации устройства были разработаны экспериментальные установки «Контур-02», «Контур-04» и «Контур-05» [59, 60, 66, 67].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ПХТ «КОНТУР-02» С РЕАКТОРОМ НА БАЗЕ ИПК

В установке ПХТ «Контур-02», предназначенной для индивидуальной обработки пластин диаметром 76 мм, применен реактор универсального типа (Рис. 22). Сочетание мощной индукционной



Рис. 22. Экспериментальная технологическая установка для ПХТ и РИПТ «Контур-02», оснащенная реактором на основе ВЧ индукционного плазменного конденсатора.

разрядной ступени, обеспечивающей высокую степень ионизации и диссоциации рабочего газа с управляемым ВЧ диодным слоем на поверхности электрода-подложкодержателя, позволяет создать спектр условий, необходимый для реализации, по крайней мере, трех типов плазменной обработки.

Лабораторные испытания установки показали высокую эффективность и универсальность реактора. Скорость травления пленок диоксида кремния в условиях РИПТ составила $0,3 \div 0,5$ мкм/мин при давлении CF_4 в камере $3 \cdot 10^{-2} \div 6 \cdot 10^{-2}$ Тор и мощности в разряде $300 \div 400$ Вт.

Скорость ПХТ пленок поликремния и нитрида кремния при давлении CF_4 в камере 10^{-1} Тор составляет $1 \div 2$ мкм/мин при той же мощности в разряде и селективности, соответственно, 10 и 20.

Установка «Контур-02» снабжена управляющей ЭВМ, что позволяет автоматизировать ее работу во всех режимах обработки. Помимо только ручного или автоматического режимов управления возможно их совместное использование, что позволяет вносить коррективы в режим работы установки и присваивать новые численные значения параметрам режима в памяти ЭВМ непосредственно в процессе работы установки с пульта ручного управления.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ПХТ «КОНТУР-04» С КОМБИНИРОВАННЫМ ИНДУКЦИОННО-ЕМКОСТНЫМ РЕАКТОРОМ

Вакуумная реакционная камера установки «Контур-04» совмещает в себе два типа разрядов: высокочастотные индукционный и емкостной, расположенных последовательно друг за другом (рис. 23).

Камера универсального типа предназначена для обработки пластин диаметром до 100 мм и представляет собой кварцевый конус с индуктором снаружи и напуском рабочих газов через вершину конуса, конус расположен вертикально, плазма отсекается сеткой с протяженными отверстиями малого диаметра, под сеткой находится нижний электрод, на котором располагается обрабатываемая пластина.

Разряд в реакторе может создаваться как в объеме кварцевого конуса индукционным способом, так и в области между электродами – ВЧ электростатическим.

Режим радикального травления реализуется при низких рабочих давлениях в камере, в области горения индукционного разряда. Сетка, экранирующая плазму, в этом случае заземляется.

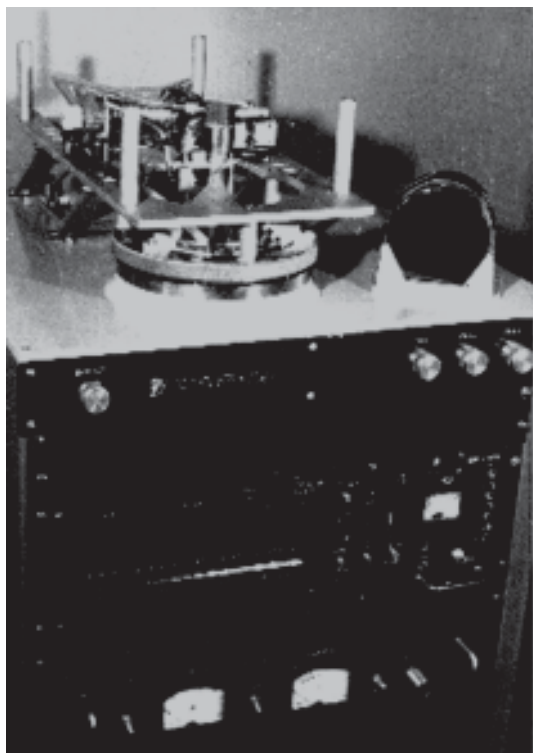


Рис. 23. Экспериментальная технологическая установка для РТ, ПХТ и РИПТ «Контур-04», оснащенная реактором с ВЧИ и ВЧЕ ступенями

На установке «Контур-04» проводились процессы травления поликремния толщиной 0,6 мкм на пленке диоксида кремния толщиной 0,4 мкм в диодном режиме работы реактора. Травление осуществлялось 2,5 мин со скоростью 0,2 мкм/мин. Травление производилось, также, в режиме с индукционным возбуждением разряда в течении 20 сек со скоростью 0,5 мкм/мин. Селективность поликремния к оксиду кремния в этом режиме более 20. В данном случае перетрав оксида кремния составил не более 50 ангстрем.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ РИПТ «КОНТУР- 05М» НА БАЗЕ ИПК

Тем не менее, испытания и эксплуатация реакторов установок «Контур-02», «Контур-04» в области давлений $10^{-2} - 10^{-1}$ Тор, показали недостаточно высокую равномерность обработки и необходимость снижения рабочего давления до 10^{-3} Тор, что обеспечивает существенное повышение неоднородности плазмы в объеме камеры и снижение напряжения на ВЧИ разряде.

Это потребовало применения более совершенной откачной системы и усовершенствования конструкции реактора.

В качестве примера технологической системы травления на базе ИПК, наиболее полно реализующей преимущества комбинированного

разряда, ниже приведено описание установки «Контур-05», как наиболее совершенной в техническом отношении.

КОНСТРУКЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА РЕАКТОРА

Конструкция комбинированного реактора должна обеспечивать оптимальное сочетание преимуществ плазменного конденсатора и ВЧ индукционного разряда. С одной стороны, в условиях плазменного конденсатора наиболее легко управлять ВЧ диодным эффектом и параметрами приэлектродных слоев. ВЧ индукционный разряд, с другой стороны, обеспечивает возможность получения плазмы в широком диапазоне ее плотностей (до 10^{12} см⁻³), при минимальных значениях ее потенциала (≤ 20 В), в области давлений газа $10^{-2} \div 10^{-3}$ Тор. Управление диодным эффектом в данном случае сводится к такому выбору соотношения площадей поверхности и схемы включения электродов плазменного конденсатора, которое обеспечивало бы, во-первых, минимальную интенсивность распыления металлических и диэлектрических частей реактора, а во-вторых – максимальную эффективность ионной бомбардировки электрода-подложкодержателя.

Размещение ВЧ электродов не должно при этом препятствовать проникновению ВЧ вихревого (т.е. индукционного) поля в объем камеры и нарушать пространственную однородность параметров ВЧИ разряда. Кроме того, в конструкции должны быть предусмотрены меры, препятствующие проникновению разряда в область напуска и откачки газа.

Устройство реактора, удовлетворяющего перечисленным требованиям, показано на рис. 24.

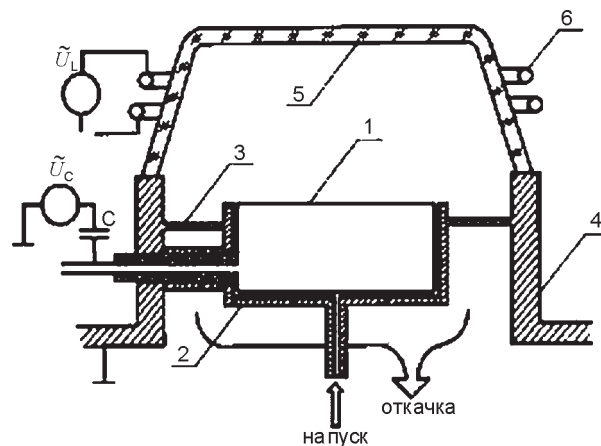


Рис. 24. Конструкция реактора на базе ИПК. 1 – потенциальный электрод-подложкодержатель; 2 – электростатический экран; 3 – сетка; 4 – корпус; 5 – диэлектрическая камера; 6 – ВЧ индуктор; U_L, U_C – источники питания индуктора и электрода.

Диэлектрическая камера реактора имеет форму усеченного конуса с диаметрами $D_1 = 160$ мм, $D_2 = 120$ мм и высотой 70 мм. ВЧ электрод-подложкодержатель диаметром 102 мм расположен в плоскости основания конуса на его оси.

Снизить интенсивность травления не предназначенных для обработки деталей реактора можно, только понизив относительно них значение потенциала плазмы. Для этого больший по площади электрод (4) конденсатора – заземлен, а меньший (подложкодержатель 1) подключен к источнику ВЧ напряжения смещения U_c через разделительный конденсатор C . Площадь контактирующего с плазмой участка электрода-подложкодержателя составляет $S < 0,5$ от площади заземленного электрода. При этом, в диапазоне значений напряжения смещения $U_c < 250$ В, постоянный потенциал плазмы относительно «земли» не превышает + 50 В, в то время, как его значение относительно электрода 1 достигает +200 В. Относительно «земли» постоянный потенциал ВЧ электрода 1 составляет при этом около –150 В.

Оба ВЧ электрода расположены по одну сторону от индуктора и объема плазмы. Такое введение электродов в камеру не приводит к значительному вытеснению магнитного поля индуктора из ее объема и не вызывает ухудшения индуктивной связи с разрядом. Рабочее напряжение ВЧИ разряда при этом увеличивается незначительно, что создает дополнительный резерв мощности ВЧ генератора для энерговклада в разряд. Индуктор независимо питается от отдельного источника ВЧ напряжения.

Проникновению ВЧ разряда в область откачки препятствует электростатический экран 2, закрывающий нерабочие участки поверхности подложкодержателя, а также кольцевая сетка 3, имеющая минимальный диаметр отверстий ($d_c = 0,3$ мм). Уменьшение диаметра отверстий сетки до такой величины продиктовано соотношением $d_c < d_s$, где d_s – ширина приэлектродного слоя над сеткой при максимальной плотности плазмы и минимальном напряжении. При соблюдении этого условия сетка исключает проникновение плазмы разряда через ее ячейки в область откачки.

С другой стороны, сетка не должна заметно снижать эффективную скорость откачки камеры. Поэтому площадь и прозрачность сетки выбраны максимально возможными.

Вакуумный зазор между ВЧ электродом 1 и экраном 2 составляет 1 мм. Такая величина зазора по изложенным выше причинам исключает существование разряда в этой области при указан-

ных ВЧ напряжениях электрода и, таким образом, надежно препятствует проникновению плазмы в область напуска.

Такая конструкция реактора при диаметре подложкодержателя $D_n = 102$ мм и наружном диаметре заземленного электрода $D_1 = 160$ мм обеспечивает при давлении $10^{-2} - 10^{-3}$ Тор в камере радиальную неоднородность ВЧИ плазмы над образцом не более 5%.

СИСТЕМА ВЧ ПИТАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ РЕАКТОРА

Для независимого управления плотностью индукционной плазмы и энергией ионной бомбардировки в ВЧ приэлектродном слое требуется независимое питание цепи индуктора, возбуждающего ВЧИ разряд, и цепи ВЧ электродов, ответственных за формирование слоев. Попытки использовать для этой цели один ВЧ генератор и общий согласующий контур сталкиваются с серьезными трудностями. Из-за взаимного влияния импедансов индуктора и плазменного конденсатора на общий резонансный контур невозможно добиться стабильности электрических параметров в одной цепи при регулировании параметров другой.

Для устранения этой трудности было разработано и изготовлено согласующее устройство, обеспечивающее независимое питание ВЧ цепей реактора от двух отдельных резонансных контуров и двух сфазированных ВЧ генераторов.

Электрическая блок-схема системы ВЧ питания реактора показана на рис. 25. В качестве основного узла системы использован стандартный промышленный ВЧ генератор типа УВ-5. При этом, часть согласующего устройства (СУ1), нагруженная через индуктор на ВЧИ разряд, питается непосредственно от его коаксиального выхода. Для настройки согласующего устройства СУ1 для дистанционного управления емкостями $C1$ и C и резонансного П-контура используются рефлектометр и органы управления генератора. Емкостью $C2$ осуществляется настройка контура в резонанс. Емкость $C1$ служит для согласования нагрузки с генератором по модулю электрического сопротивления. Алгоритм настройки контура, а также его электрическая схема не отличаются ничем от стандартных, за исключением емкости. В состоянии, соответствующем оптимальному согласованию с ВЧИ разрядом, значение емкости $C1$ примерно в 4 – 5 раз превышает емкость $C2$. ВЧ напряжения на противоположных концах индуктора, имеющие относи-

тельно «земли» разный знак, существенно отличаются при этом по амплитуде. В результате, весь индуктор, как целое, имеет относительно «земли» (и плазмы) большое ВЧ электростатическое напряжение, которое может служить источником неуправляемых стационарных полей в плазме и воздействовать на цепь питания ВЧ электродов.

Введение емкости C_k и выбор ее значения обеспечивает выравнивание амплитуд напряжений в разных плечах П-контура. При равенстве этих напряжений, их влияние на цепь ВЧ смещения электродов взаимно компенсируется. Это устраняет влияние контуров $C3L_cC4$ и $C1C_kL_iC2$ друг на друга, а также исключает необходимость электростатической экранировки объема плазмы.

Остальные элементы на рис. 25 служат для подачи и управления ВЧ смещением электродов и являются специфичными для данного реактора ПХТ.

К этим элементам относится другая часть согласующего устройства (СУ2) и блок управления ВЧ смещением электродов (БУВС). БУВС представляет собой своего рода приставку к основному ВЧ генератору, т.к. в ней отсутствует собственный задающий генератор и источник анодного напряжения выходной лампы. Использование одного общего задающего генератора, а также балансировка плеч П-контура в СУ1 делает регулировку цепей реактора независимой. Для стабилизации ВЧ напряжения и, установленного на электроде, в БУВС предусмотрена обратная связь.

Таким образом, описанная выше система ВЧ питания реактора обеспечивает независимое управление плотностью ВЧИ плазмы и напряжением смещения при раздельной стабилизации каждого из этих параметров.

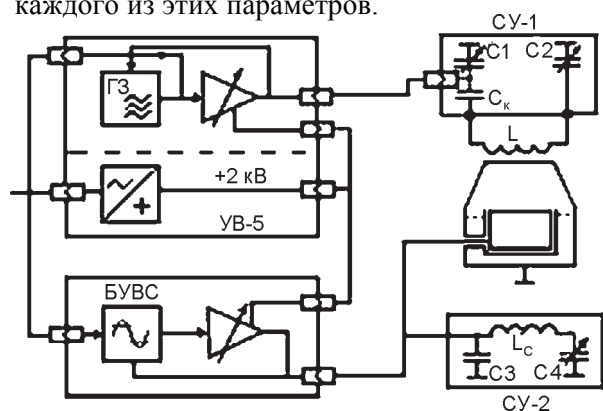


Рис. 25. Электрическая блок-схема системы ВЧ питания реактора. ГЗ – задающий генератор УВ-5; БУВС – блок управления ВЧ смещением электрода; L – ВЧ соленоид; СУ-1 – устройство согласования генератора с ВЧИ разрядом; СУ-2 – устройство согласования БУВС с импедансом ВЧ электрода.

ПРИМЕНЕНИЕ ИНДУКЦИОННОГО РЕАКТОРА ПХТ ДЛЯ ПЛАЗМЕННОГО ПРОЯВЛЕНИЯ МНОГОСЛОЙНОГО РЕЗИСТОРА

Для отработки технологии анизотропного реактивного ионно-плазменного травления (РИПТ) двухслойного резиста были использованы специально заготовленные образцы, представлявшие собой кремниевую пластину со слоем органического фоторезиста толщиной 1,2 мкм, поверх которого был нанесен слой (0,05 – 0,1 мкм) кремний-органической маски с тестовым рисунком. Рисунок, представляющий собой группы элементов различной формы (квадраты, окружности, полосы, щели) с линейными размерами 0,5; 0,8; 1,0; 1,2; 1,5; 2; 3; 4; 5 мкм, был сформирован методом оптической проекционной ультрафиолетовой литографии с последующим проявлением жидкостным травлением. Задачей ионно-плазменной обработки являлось:

- удаление на проявленных участках остатков верхнего кремний-органического слоя фоторезиста (дотрав) фторсодержащим газом до вскрытия органического слоя;
- анизотропное травление кислородом основного органического слоя до кремния.

Обработка контрольных образцов осуществлялась в цикле в трех режимах:

- 1) Травление обоих слоев без подачи ВЧ напряжения на подложкодержатель (энергия ионов ϵ , 10 – 15 эВ).
- 2) Дотравливание верхнего слоя без подачи ВЧ напряжения, травление основного слоя при амплитуде ВЧ напряжения 50, 100, 200 В (средняя энергия ионов – 30, 70 и 120 эВ соответственно).
- 3) Травление обоих слоев при подаче ВЧ напряжения амплитудой 100 В.

Контроль окончания процесса травления слоя осуществлялся визуально с последующим анализом сформированных элементов на электронном микроскопе РЭМ-100У.

В процессе обработки основные параметры реактора поддерживались постоянными и составляли:

- давление рабочего газа в реакторе, $Tор$ – 10^{-3}
- мощность, подводимая к индуктору, Вт – 200
- амплитуда ВЧ напряжения на подложкодержателе, В – 0,50, 100, 200
- рабочие газы – кислород, фреон-14.

Основные результаты проведенных исследований следующие:

- время дотравливания верхнего слоя составляло 10 – 15 секунд и слабо зависело от энергии ионов;

– средняя скорость травления основного слоя равнялась 0,2 – 0,3 мкм/мин при энергии ионов 10 – 20 эВ и увеличивалась до 1,3 – 1,5 мкм/мин при энергии ионов 100 эВ.

Равномерность травления на подложкодержателе составляла около 90%. Задубливания фоторезиста не наблюдалось.

Анализ профилей протравленных структур на электронном микроскопе дал следующие результаты: В режиме «1» наблюдался сильный боковой подтрав основного слоя резиста, характерный для радикального травления, в результате элементы с линейными размерами 0,5; 1,0; 1,5 мкм (квадраты и полосы) полностью разрушались.

В режиме «2» на всех элементах обнаружен характерный «бутылочный» профиль. Было установлено, что глубина «подтравы» зависит от времени обработки верхнего слоя, что свидетельствует о плохой селективности травления слоев фоторезиста при использовании фреона.

В третьем режиме получено хорошее разрешение всех элементов на образце. На рис. 26а показан внешний вид установки «Контур-05», а также структура тестового образца после обработки в третьем режиме (рис. 26б).

Таким образом, независимое управление плотностью потока и энергией ионов в разработанном устройстве позволило достаточно оперативно от-

рамках договора “Исследование и создание комплекса реакторных модулей для проведения основных технологических процессов вакуумно-плазменного травления при производстве современных изделий микроэлектроники и интегральных схем” начато изготовление экспериментально-технологического образца установки “Контур-05М” – автоматизированного, универсально по типам обработки ВЧ комплекса (рис. 27а,б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе изложены результаты комплексных экспериментальных и теоретических исследований ВЧ диодного эффекта, приэлектродных слоев, электрического импеданса ВЧ плазменного конденсатора в условиях самостоятельного и несамостоятельного ВЧЕИР, а также описаны разработки на базе этих исследований эффективных устройств для ионно-лучевого и плазмо-химического травления.

Зондовыми методами были измерены абсолютные значения и пространственные распределения потенциала и плотности плазмы в плоскосимметричном и несимметричном ВЧЕР, а также в ПК с ВЧИ разрядом.

Радиотехническими средствами были измерены основные электрические характеристики ВЧЕ и ВЧИ разрядов. Изучены особенности согласования этих разрядов с ВЧ генератором.

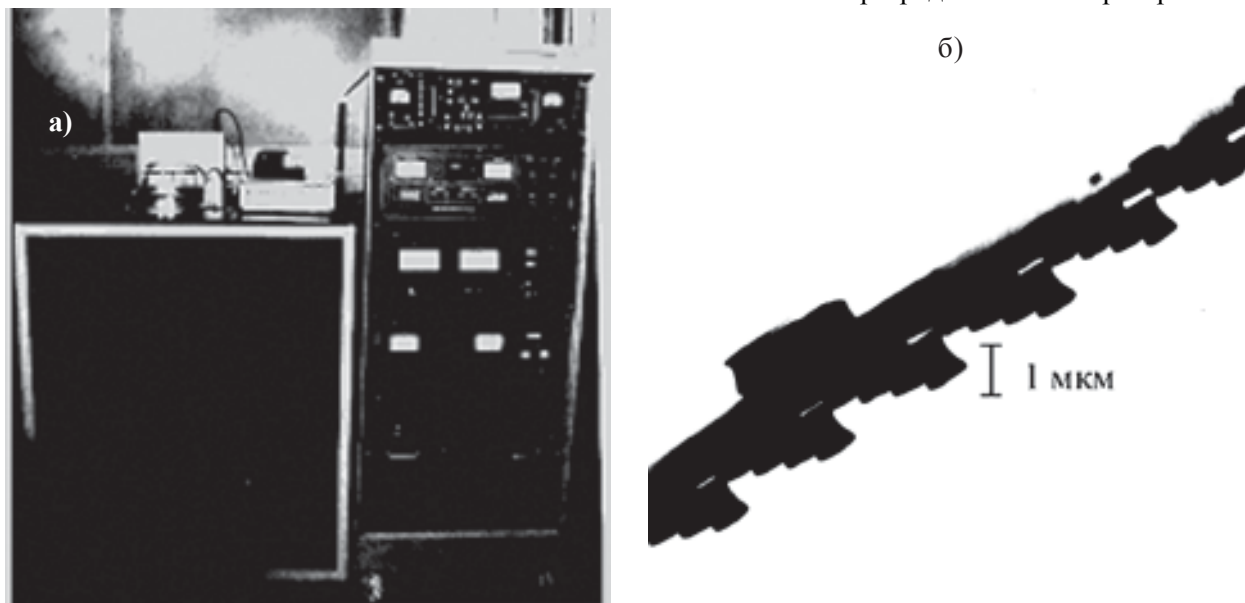
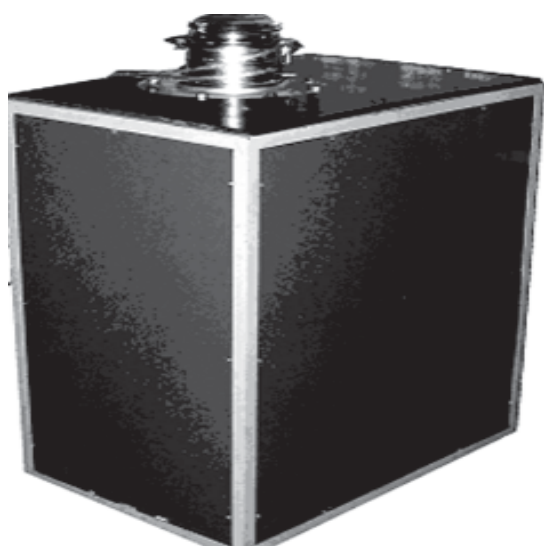


Рис. 26. а) Экспериментальная технологическая установка ПХТ и РИПТ «Контур-05» с реактором типа ИПК. б) Профили плазменного проявления в кремнийорганическом фоторезисте элементов с линейными размерами 1 мкм, полученные в реакторе.

работать технологию проявления двухслойного фоторезиста с размерами элементов менее 1 мкм.

В соответствии с межотраслевой программой развития наиболее конкурентоспособных направлений микроэлектроники в Украине в 2004 году в

Использование полученных экспериментальных данных и теоретических оценок позволило создать ВЧ индукционный ПК с независимым управлением плотностью и потенциалом плазмы и разработать на его основе источник низкочастот-



а)



б)

Рис. 27. а) Внешний вид экспериментального образца реактора на базе ВЧИЕ разряда. б) Внешний вид экспериментального образца реактора на базе ВЧИЕ разряда.

гетичных ионов, реакторы ПХТ и серию установок «Контур» на их основе.

Технологическая апробация установок показала их высокую эффективность и широкие возможности для их применения в самых различных областях современной технологии микроэлектроники. Управляемые малоэнергоёмкие установки серии «Контур» позволяют решать самые современные и сложные технические задачи в соответствии с нынешним уровнем требований к качественным и количественным характеристикам вакуумно-плазменных технологий в серийном производстве микроприборов субмикронного масштаба.

Отраженные в обзоре результаты автора были получены при выполнении госбюджетных и хоздоговорных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ на протяжении 80-х – 90-х годов и до настоящего времени в Харьковском национальном университете им. В.Н. Каразина и НФТЦ.

Автор выражает благодарность за помощь в подготовке настоящего обзора сотрудникам лаборатории компьютерных технологий НФТЦ и кафедры физических технологий ХГУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилин Б.С., Киреев В.Ю. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 125 с.
2. Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 252 с.
3. Габович М.Д. Физика и техника плазменных источников ионов. – М.: Атомиздат, 1972. – 190 с.
4. Обухов В.А., Григорян В.Г., Латышев Л.Н. Источники тяжелых ионов/ В кн.: Плазменные ускорители и ионные инжекторы/Под ред. Козлова Н.П., Морозова А.И. – М.: Наука, 1984. – С. 169-188.
5. Kaufman H.R. Technology of ion beam sources used in sputtering// J. Vac. Sci. Technol. – 1991. – Vol.15, № 2 – P. 272-276.
6. Kaufman H.R., Reader P.D. Experimental performance of ion rockets, employing electron-bombardment ion sources// Ai.AA Progress in Astronautics and Aeronautics. Electron Propulsion. –1961. – Vol. 13. – P. 3-27.
7. Майшев Ю.П. Ионные и ионно-плазменные системы и пути их развития для задач микроэлектроники//Микроэлектроника.– 1977. – Т.3, № 2 (81). – С. 21-34.
8. Плазменные технологии в производстве СБИС/ Сб. под ред. Н. Айнспрука, Д.Брауна.– М: Мир, 1987.
9. Будянский А.М., Покроев А.Г. Диодный эффект в несамостоятельном ВЧЕ разряде//Письма в ЖТФ.– 1992. –Т. 18, Вып. 1. – С. 3-6.
10. Годяк В.А., Кузовников А.А. О вентильных свойствах ВЧ разрядов//Физика плазмы.– 1975.–Т. 1, Вып. 3. – С. 496.
11. Liberman M.A. Analytical solution for Capacitive RF Sheath//IEEE Transactions on Plasma Science. – 1988. – Vol. 16, № 6. – P. 638.
12. Liberman M.A. Dynamics of a Collisional Capacitive RF Sheath//IEEE Transactions on Plasma Science.– 1989. – Vol. 17, № 2. – P. 338.
13. Будянский А.М., Покроев А.Г. Механизм ВЧ диодного слоя в ВЧ разряде//V Конференция «Взаимодействие электромагнитных излучений с плазмой». Тезисы докладов. – Ташкент. – 1989. – С. 172.
14. Будянский А.М. Закон «трех вторых» в переходном режиме плоского ленгмюровского слоя//II Всесоюзное совещание «Высокочастотный разряд в

- волновых полях». Тезисы докладов.– Куйбышев. – 1989. – С. 15.
15. Ковалев А.С. и др. Исследование структуры высокочастотного несамостоятельного разряда в потоке газа // Физика плазмы. – 1985. – Т.11, Вып. 7. – С. 882.
 16. Keller J.H., Pennebaker W.B. Electrical properties of RF sputtering system// IBM J. Res. Develop.– 1979. – Vol. 23, № 1. – P. 23.
 17. Kohler K., Coburn I.W., Horde D.E., Kay E., Keller I.H. Plasma potentials of 13.56 MHz rf argon discharges in a planar system// J. Appl. Phys. –1985.– Vol. 57, № 1. – P. 59 66.
 18. Яценко Н.А. Связь высокого потенциала плазмы с режимом горения высокочастотного емкостного разряда среднего давления// Журн. техн. физ. – 1981. – Т. 51, Вып. 6.– С. 1195.
 19. Будянский А.М. Нелинейные явления в цепи ВЧЕ разряда//II Всесоюзное совещание «Высокочастотный разряд в волновых полях». Тезисы докладов. – Куйбышев. – 1989. – С. 42.
 20. Кропотов Н.Ю., Качанов Ю.А., Лисовский В.А., Егоренков В.Д., Фареник В.И. Особенности пробоя газа низкого давления в ВЧ однородном поле// Письма в ЖТФ. – 1988. – Т.14, Вып. 4. – С. 359-363.
 21. Левитский С.М. Потенциал пространства и распыление электродов в высокочастотном разряде// Журн. техн. физ. – 1957. – Т. 27, Вып. 5. – С. 1001
 22. Kihara T. Reviews of Modern Physics. – 1952. – Vol. 24, № 1. – P. 45.
 23. Лисовский В.А. Отрицательная дифференциальная проводимость в слаботочном режиме ВЧЕ разряда// Межотраслевой научно-технический семинар «Физические основы и новые направления плазменной технологии в микроэлектронике». Материалы семинара. – Харьков. – 1991.– С. 48.
 24. Способ плазмохимического травления микроструктур: А. С. № 1443689/ Фареник В.И. 1986.
 25. Устройство для плазмохимического травления покрытия образцов: А.С. № 1355053/Фареник В.И. 1985.
 26. 25th IEEE International Conference on Plasma Science// Conference Record-Abstracts. USA. – 1998.
 27. Thomson J.J. The electrodeless discharge through gases//Phil. Mag. – 1927. – Vol. 4, № 25. – P. 1128 1141.
 28. Townsend J.S., Wykeham M.A., Donaldson R.H. Electrodeless discharge//Phil. Mag. – 1928. – Vol. 5, № 27. – P. 178-191.
 29. MacKinnon K.A. On the origin of the electrodeless discharge//Phil. Mag. – 1929. – Vol. 8, №52. P. 605-617.
 30. Бурмистров А.В., Маношкин Ю.В. Пробой газа в высоко частотном разряде//ЖТФ. – 1976. – Т. 49, Вып. 12. – С. 2517-2577.
 31. Бузыкин О.Г., Бурмистров А.В. Пробой воздуха в высокочастотном индукционном разряде//ЖТФ. – 1983. – Т. 53, Вып. 1.
 32. Smith H., Lynch W.A., Hilberry N. The electrodeless discharge in mercury vapor// Phys. Rev. – 1931. – Vol. 37. – P. 1091-1101.
 33. Contaxes N., Hatch J. High-frequency fields in solenoidal coil//J. Appl. Phys. – 1969. – Vol. 40, № 9. – P. 3548-3550.
 34. W.F.DiVergilio, H.Goede and W.Fosnight. Development of radio-frequency induction plasma generation for neutral beams. Rev.Sci.Instrum. – 1986. – № 57(7). – P. 1254-1260.
 35. DiVergilio W.F., Goede H. and Fosnight W. at all. Radio-frequency induction plasma generator 80 kV test stand operation//Rev.Sci.Instrum. – 1986. – № 57(7). – P. 261-265.
 36. Горбатов Ю.В., Зиненко В.И. Высокочастотный источник химически активных ионов//ПТЭ. – 1988. – № 5. – С. 131-133.
 37. Дьячков Б. и др. Высокочастотный источник ионов малой энергии//ПТЭ. – 1978. – №2. – С.191-193.
 38. Henriksen B.P., Keefer D.R., Clarkson M.N. Electromagnetic field in electrodeless discharge//J. Appl. Phys. – 1971. – Vol. 42, № 13. – P. 5460-5464.
 39. Бондаренко В.Г., Денисов В.П., Еремин Б.Г. и др. Индукционный разряд низкого давления//Физика плазмы. – 1991. – Т.17, № 6. – С. 756-758.
 40. Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров И.Е. Основы физики плазмы. – М.: Атомиздат, 1977. – 384 с.
 41. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. – М.: Наука, 1971. – 544 с.
 42. Дудин С.В. Нахождение энергетического спектра электронов при зондовых измерениях в плазме// ПТЭ. – 1994. – № 4. – С. 78-82.
 43. 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.
 44. Budyansky A., Zikov A. Static current-voltage characteristics for radio-frequency induction discharge// IEEE ICOP'S 95. – 1995. – P. 146.
 45. DiVergillio W.F., Goede H., Fosnight W. Development of radio-frequency induction plasma generator for neutral beams //Rev. Sci. Instrum. – 1986. – Vol. 57, № 7. – P. 1254.
 46. Liberman M.A. J. Appl. Phys. – 1986. – Vol. 65, – P. 4186.
 47. Kaganovich I.D., Tsandin L.D. The Space-Time-Averaging Procedure and Modelling of the RF Discharge// IEEE Transactions on Plasma Science. – 1992. – Vol. 20, № 2. – P. 66-75.
 48. Kaganovich I.D., Tsandin L.D. Low-Pressure RF Discharge in the Free-Flight Regime//IEEE Transactions on Plasma Science. – 1992. – Vol. 20, No 2. – P. 86-92.
 49. B.P. Wood, M.A. Lieberman, and A.J. Lichtenberg// IEEE Transactions on Plasma Science. – 1995. Vol. 23, № 1. – P. 89-96.
 50. Лавров В.М., Щемиликин С.Г. Разброс энергии ионов, выходящих из высокочастотных источников

- с экранированным разрядом//ПТЭ. – 1971. – № 4. – С.41-43.
51. Дьячков Б.А., и др. Высокочастотный источник ионов малой энергии//ПТЭ. – 1978. – № 2. – С. 191-193.
 52. 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.
 53. Aston G., Kaufman H.R. Ion beam divergence characteristics of three grid accelerator system//AiAA Pap.– 1978.– № 78-669. – P. 1-14.
 54. Aston G., Kaufman H.R. The ion optic of two-grid electron bombardment thruster//AiAA Pap.– 1978.– № 76-1029. – P. 1-16.
 55. Friesiinger J. et al. Radiofrequency Ion Beam Source RIM 10 for Material Processing//Kerntechnik. –1987. – Vol. 51. –P. 125.
 56. Будянский А.М. О механизме приэлектродных слоев в ВЧЕ разряде// Письма в ЖТФ. – 1992. – Т. 18, Вып. 1. – С. 17-20.
 57. Будянский А.М., Покроев А.Г. Диодный эффект в несамостоятельном ВЧЕ разряде//Письма в ЖТФ.– 1992.–Т. 18, Вып. 1. – С. 3-6.
 58. Высокочастотный источник ионов: А.С. № 1570549 СССР/Фареник В.И. от 08.02.90. Пат. РФ № 1570549 от 27.06.1993; Пат. Украины №2426 от 15.02.94.
 59. Устройство для плазмохимического травления материалов: А.С. СССР №1573896/ Фареник В.И. от 22.02.90.
 60. Способ плазмохимического удаления пленок фоторезиста. А.С. СССР №1653484/ Будянский А.М. от 01.02.91.
 61. Источник ионов. А.С. СССР № 976805/Фареник В.И. от 21.06.82.
 62. Источник ионов. А.С. СССР № 1144548/Фареник В.И. от 08.11.84.
 63. 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, Вып. 22. – С. 33-39.
 64. Будянский А.М., Зыков А.В., Фареник В.И. Зондовый контроль процессов вакуумно-плазменного травления в технологии микроэлектроники// Вісник Харківського університету. Серія фізична “Ядра, частинки, поля”. – 1999. – № 438, Вып. 2. – С. 23-27.
 65. Качанов Ю.А., Кропотов Н.Ю., Фареник В.И. Экспериментальные технологические установки ПХТ «Контур-01» и «Контур-03» на основе оптимизированного ВЧЕ-разряда// Межотраслевой научно-технический семинар «Физические основы и новые направления плазменной технологии в микроэлектронике». Мат. семинара. – Харьков. – 1989. – С. 118-119.
 66. 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.
 67. 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.
 68. Кропотов Н.Ю., Качанов Ю.А., Лисовский В.А., Егоренков В.Д., Фареник В.И. Особенности вольтамперных характеристик слаботочной формы высокочастотного разряда E-типа//Письма в ЖТФ. – 1989. – Т. 15, Вып. 21. – С. 17-21.
 69. Лисовский В.А., Красников О.В. Поведение постоянного потенциала плазмы в ВЧ разряде низкого давления// Письма в ЖТФ. – 1995. – Т. 21, Вып. 21. – С. 57-61.
 70. Лисовский В.А. Особенности а-g перехода в ВЧ разряде низкого давления в аргоне//ЖТФ. – 1998.– Т. 68, Вып. 5. – С. 52-60.
 71. Фареник В.И. Применение высокочастотных разрядов низкого давления для разработки малоэнергетических управляемых систем вакуумно-плазменного травления // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – 1999. – Вып. 55. “Новые решения в современных технологиях”. – С. 56-74.
 72. Лисовский В.А. Особенности альфа-гамма перехода в ВЧ емкостном разряде в кислороде низкого давления//Вісник Харківського університету. – 2002. – № 574. – С. 67-70.
 73. Lisovskiy V.A., Yegorenkov V.D. Alpha-gamma transition in RF capacitive discharge in low-pressure oxygen//Vacuum.– 2004. – Vol. 74. – P. 19-28.
 74. Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н., Яценко Н.А. Высокочастотный емкостный разряд: Физика. Техника эксперимента. Приложения. – М.: Изд-во МФТИ, Наука-Физматлит, 1995.
 75. Лисовский В.А., Мышко Е.В., Яковин С.Д. Поведение температуры нейтрального газа в ВЧЕ разряде низкого давления в воздухе//Прикладная физика. – 2001. – №. 3. – С. 20-24.
 76. Лисовский В.А., Яковин С.Д., Мышко Е.В., Красников О.В. Температура нейтрального газа в ВЧ разряде низкого давления//Вісник Харківського університету. – 2001. – № 522. – С. 87-90.
 77. Dine S., Lisovskiy V., Jolly J., Guillon J. Frequency effects in a RF capacitive discharge in hydrogen// Bulletin Am. Phys. Soc.– 2002. – Vol. 47, № 7. – P. 62.
 78. Лисовский В.А., Дине С., Жоли Ж., Гуйон Ж., Бут Ж-П. Экспериментальное исследование асим-

- метричного ВЧ емкостного разряда в водороде низкого давления//Вісник Харківського університету. – 2003. – № 601. – С. 97-100.
79. Лисовский В.А., Егоренков В.Д. Пробой газа низкого давления в комбинированных полях//Письма в ЖТФ. – 1992. – Т. 18. – С. 66-71.
80. Lisovskiy V.A., Yegorenkov V.D. Low-pressure gas breakdown in combined fields//J. Phys. D: Appl. Phys. – 1994. – Vol. 27, № 11. – P. 2340-2348.
81. Лисовский В.А. Определение коэффициентов переноса электронов в аргоне из кривых зажигания ВЧ и комбинированного разрядов низкого давления//Письма в ЖТФ. – 1998. – Т. 24, Вып. 8. – С. 49-55.
82. Лисовский В.А. Определение дрейфовой скорости электронов в водороде из кривых зажигания ВЧ разряда низкого давления// Известия ВУЗов. Физика. – 1998. – Вып. 4. – С. 108-112.
83. Lisovskiy V.A., Yegorenkov V.D. RF breakdown of low-pressure gas and a novel method for determination of electron-drift velocities in gases// J. Phys. D: Appl. Phys. – 1998. – Vol. 31, № 23. – P. 3349-3357.
84. Lisovskiy V.A., Yegorenkov V.D. Electron-drift velocity determination in CF₄ and SF₆ in a strong electric field from breakdown curves of low-pressure RF discharge//J. Phys. D: Appl. Phys. – 1999. – Vol. 32, № 20. – P. 2645-2648.
85. Lisovskiy V.A., Booth J.-P. Simulation of the ignition of a low pressure RF capacitive discharge// Physical surface engineering. – 2003. – Vol. 1, № 1. – P. 34-36.

ВИСОКОЧАСТОТНІ РОЗРЯДИ НИЗЬКОГО ТИСКУ У ТЕХНОЛОГІЇ МАЛОЕНЕРГОЕМНОГО ВАКУУМНО-ПЛАЗМОВОГО ТРАВЛЕННЯ МІКРОСТРУКТУР

В.І. Фареник

В огляді систематизовані основні результати фундаментальних і прикладних досліджень ємнісного та індуктивного ВЧ розрядів, методи формування інтенсивних іонних потоків низької енергії, отримані автором протягом 80-х – 90-х років. Розвинуто фізичну концепцію ВЧ розрядів низького тиску і ВЧ діодного ефекту в асиметричному плазмовому конденсаторі. На її основі розроблена серія керованих газорозрядних технологічних систем низької енергії для повторюваних операцій у хімічно активних газових середовищах. Діаметр вакуумних камер складає 50-300 мм при енергії іонів від 50 до 500 еВ. Описано різні типи експериментально-технологічних установок для плазмового, іонно-реактивного та іонно-променевого травлення при виробництві мікроелектронних приладів, а також їх технологічна реалізація.

HIGH-FREQUENCY DISCHARGES OF LOW PRESSURE IN VACUUM-PLASMA TECHNOLOGY OF LOW POWER-CONSUMING FOR MICROSTRUCTURE ETCHING

V.I. Farenik

The present paper systemizes the results of fundamental and applied researches of capacitively and inductively coupled RF discharges and the methods of intense low-energy ion flows formation, that were carried out by the author during 80-90's. Physical conception of RF discharges at low pressures and diode RF-sheaths effects in asymmetrical plasma capacitor were developed. The series of low-energy and controlled gas discharge technology systems for the long-time operation with chemically active gases was designed on that base. Diameter of plasmas volume constitutes 50-300 mm in ion energy range of 50 to 500 eV. Advanced archetypes of industrial set-ups for the plasma etching, reactive ion plasma etching and reactive ion beam etching for manufacturing of microelectronic devices and their technological implementation are presented.