

Е.В. Берлин, В.Ю. Григорьев, Л.А. Сейдман

**Индуктивные источники высокоплотной плазмы  
и их технологические применения**

ТЕХНОСФЕРА

Москва

2018

УДК 537.5  
ББК 22.333  
Б48

**Б48 Берлин Е.В., Григорьев В.Ю., Сейдман Л.А.**

**Индуктивные источники высокоплотной плазмы  
и их технологические применения**

**Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2018. – 464с. ISBN 978-5-94836-519-0**

Тенденции развития современной технологии электронной техники заключаются в увеличении степени интеграции изделий на поверхности подложек, что связано как с увеличением диаметра применяемых в производстве подложек, так и с уменьшением геометрических размеров элементов изделий на их поверхности до 0,01–0,04 мкм. Для технологии изготовления изделий с микро- и нанoelementами использование ВЧ разряда индуктивно связанной плазмы (ICP) как плазмообразующего источника предоставляет большие преимущества. В частности, с его помощью достигают высокую плотность плазмы ( $10^{11}$ – $10^{12}$  см<sup>-3</sup>), минимальный разброс ионов по энергиям ( $\Delta e_i \leq 5$  эВ), относительно низкое рабочее давление ( $10^{-2}$ – $10^{-1}$  Па) и низкую энергетическую цену иона (30÷80) эВ/ион. Благодаря отсутствию накаливаемых узлов источник ICP обладает большим ресурсом работы с химически активными газами. Особенно важно, что он предоставляет возможность независимого управления энергией и плотностью потока ионов, поступающих на подложку. Успехи в конструировании источников ICP для целей микроэлектроники побудили разработчиков оборудования применить их и в других отраслях, например в азотировании стальных деталей, обработке полимерных пленок и нанесении специальных покрытий методами PVD и PECVD.

За последнее десятилетие источники ICP нашли широкое промышленное применение, о котором появилось большое количество новой информации. Поэтому назрела необходимость составления обзора, цель которого — систематизация основных экспериментальных результатов разработки и применения источников ICP. В книге приведено описание принципов действия, особенностей и преимуществ источников ICP и рассмотрены многочисленные варианты конструкций современных источников ICP. Приведены также примеры технологических применений описываемых источников для нанесения тонких пленок: в процессах PVD и PECVD. И кроме того, описано формирование плазмохимическим травлением трехмерных структур в различных материалах и двумерных структур в тонких пленках и связанное с такой обработкой существенное изменение свойств поверхностей различных материалов, в особенности полупроводников.

Таким образом, настоящая книга представляет собой подробное справочное руководство по конструкциям и применению источников ICP. Книга рассчитана на студентов, аспирантов, конструкторов нового технологического оборудования, использующего источники ICP, и технологов, работающих на таком оборудовании. Конструкторы найдут в ней обзор способов достижения высоких параметров источников ICP, а технологи ознакомятся с широким спектром их применения и полученных с их помощью достижений. Она также будет полезна в качестве учебного пособия для студентов старших курсов и аспирантов соответствующих специализаций.

**УДК 537.5  
ББК 22.333**

© 2018, Берлин Е.В., Григорьев В.Ю., Сейдман Л.А.

© 2018, АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление

**ISBN: 978-5-94836-519-0**

# СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	6
---------------	---

## ГЛАВА 1.

<b>Современные источники плазмы для технологических применений. Преимущества источников ICP.....</b>	<b>9</b>
--	----------

1.1. Технологические аспекты применения газоразрядной плазмы .....	9
1.1.1. Плавающий электрод в плазме .....	10
1.1.2. Плотность плазмы и ионный ток .....	11
1.1.3. Ток на электрод, находящийся под высокочастотным потенциалом .....	13
1.2. Способы и устройства формирования технологической плазмы .....	14
1.2.1. Диодный емкостный плазменный реактор .....	14
1.2.2. Индукционный ВЧ источник плазмы (ICP источник) .....	16
1.3. Свойства индукционного разряда при низком давлении.....	16
1.3.1. Зависимость плотности плазмы от вкладываемой в разряд ВЧ мощности.....	17
1.3.2. Поглощение высокочастотной мощности плазмой .....	18
1.3.3. Согласование источника ICP с цепями питания.....	20
1.3.4. Определение характерных величин разряда по его внешним параметрам .....	22

## ГЛАВА 2.

<b>Конструкции антенн источников ICP.....</b>	<b>24</b>
---	-----------

2.1. Локальные антенны источников ICP .....	24
2.1.1. Планарные антенны.....	25
2.1.1.1. Планарные антенны вне рабочей камеры (внешние антенны) .....	25
2.1.1.2. Планарные антенны, погруженные в плазму (внутренние антенны).....	64
2.1.2. Антенны с цилиндрической катушкой .....	82
2.1.2.1. Антенны с цилиндрической катушкой вне камеры (внешние антенны) .....	82
2.1.2.2. Антенны с цилиндрической катушкой, погруженной в плазму (внутренние антенны).....	87
2.2. Источники ICP для обработки деталей большой площади .....	90
2.2.1. Внешние антенны источников ICP большой площади .....	90
2.2.2. Внутренние антенны источников ICP большой площади .....	101
2.2.2.1. Планарные спиральные антенные катушки .....	102
2.2.2.2. Антенны из линейных элементов .....	103

2.2.2.3. Внутренние антенны с разомкнутыми ферромагнитными сердечниками .....	121
2.2.2.4. Антенны с постоянным магнитным полем.....	137
2.2.2.5. Источники ИСР ячеистой структуры.....	140
2.2.2.6. Источники пучков нейтральных частиц.....	154

### ГЛАВА 3.

#### **Нанесение тонких пленок с ассистированием источником ИСР .....**

**157**

3.1. Нанесение тонких пленок конденсацией паров в вакууме с ассистированием источником ИСР.....	157
3.1.1. Нанесение тонких пленок распылением мишени с помощью источника ИСР.....	158
3.1.2. Повышение степени активации распыленных частиц в процессах неактивного магнетронного нанесения .....	160
3.1.3. Повышение степени активации частиц реактивного газа в процессах реактивного магнетронного нанесения.....	168
3.1.4. Резюме .....	186
3.2. PECVD процессы осаждения тонких пленок с ассистированием источником ИСР .....	186
3.2.1. Пленки углерода.....	187
3.2.2. Пленок кремния.....	193
3.2.3. Пленок нитрида и оксида кремния .....	209
3.2.4. Пленок нитридов тугоплавких металлов.....	218

### ГЛАВА 4.

#### **Плазмохимическое травление различных материалов с помощью источников ИСР .....**

**222**

4.1. Общие принципы плазмохимического травления с помощью источников ИСР.....	222
4.2. Процессы формирования трехмерных структур в различных материалах.....	229
4.2.1. В подложках кремния .....	229
4.2.1.1. Бош процесс .....	231
4.2.1.2. Крио процесс .....	237
4.2.1.3. Одностадийные процессы без применения криогенных температур подложки .....	245
4.2.1.4. Резюме по плазмохимическому травлению кремния: .....	255
4.2.2. В карбиде кремния .....	256
4.2.2.1. Травление подложек SiC.....	256
4.2.2.2. Вытравление сквозных отверстий в подложках SiC с эпитаксиальными слоями GaN.....	270

4.2.2.3. Резюме по травлению карбида кремния: .....	273
4.2.3. В кварце .....	274
4.2.4. В сапфире .....	278
4.2.5. В нитриде галлия .....	281
4.2.5.1. Оптимизация режимов травления GaN .....	281
4.2.5.2. Селективное травление GaN .....	287
4.2.6. В арсениде галлия.....	308
4.2.7. В других сложных полупроводниках (InP, InGaP, InAs, InSb, GaSb, AlGaAsSb и InGaAsSb) .....	316
4.2.8. В полимерах.....	322
4.3. Формирование двумерных структур в тонких пленках различных материалов .....	325
4.3.1. В пленках кремния .....	326
4.3.2. В пленках нитрида кремния .....	332
4.3.3. В пленках окисла кремния.....	337
4.3.4. В пленках металлов и сплавов .....	342
4.3.5. В пленках нитридов металлов.....	351
4.3.6. В пленках окислов металлов .....	355
4.3.7. В пленках полимеров .....	366

## ГЛАВА 5.

### **Изменение свойств поверхности различных материалов при обработке в источнике ИСР .....**

**372**

5.1. Поверхность GaN.....	373
5.1.1. Обработка в плазме аргона .....	373
5.1.2. Обработка в плазме азота.....	379
5.1.3. Обработка в плазме кислорода .....	388
5.1.4. Обработка в плазме галогеносодержащих газов .....	394
5.1.5. Резюме по последствиям обработки в плазме поверхности нитрида галлия:.....	416
5.2. Поверхность GaAs и других сложных полупроводников .....	418
5.3. Поверхность кремния и окисла кремния .....	423
5.4. Поверхность полимеров.....	427
5.5. Азотирование поверхности стальных деталей .....	429
5.6. Поверхность других материалов .....	434

### **Заключение.....**

**437**

### **Список литературы.....**

**438**

## ВВЕДЕНИЕ

Тенденции развития современной технологии электронной техники заключаются в увеличении степени интеграции изделий на поверхности подложек. Степень интеграции, в свою очередь, напрямую связана как с увеличением диаметра применяемых в производстве подложек, так и с уменьшением геометрических размеров элементов изделий на их поверхности. Сегодня размеры используемых полупроводниковых подложек возросли до 450 мм, а размеры элементов, формируемых на пластине в серийном производстве, уменьшились до 0,02–0,04 мкм. В результате степень интеграции выросла до 1 млрд. и более полупроводниковых приборов на одной пластине. Кроме полупроводниковых подложек, используют диэлектрические подложки из стекла, керамики и т.п., а также гибкие полимерные подложки, из которых изготавливают дисплеи, размеры которых достигают нескольких метров.

С повышением требований к размерам элементов выпускаемой продукции растут, соответственно, требования к оборудованию и технологическим процессам, применяемым в производстве. Для новых более совершенных технологических процессов требуется создание нового технологического оборудования, использующего наиболее перспективные вакуумные ионно-плазменные процессы. В последние годы возрос интерес к системам и методам, использующим явления в ВЧ- и СВЧ-плазме [1; 2]. Обеспечивая генерацию плазмы высокой плотности (более  $10^{11} \text{ см}^{-3}$ ) и высокие скорости обработки, эти системы имеют сравнительно низкий уровень теплового и зарядового воздействия на обрабатываемые структуры, а также обеспечивают высокую чистоту процесса, поскольку работают при сравнительно низких давлениях и сводят к минимуму возможность паразитного распыления элементов внутрикамерной арматуры [1].

Для субмикронного плазмохимического травления необходимо создать плазму высокой плотности (более  $3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ ) при низком давлении (менее 1 Па), обеспечивающем высокую анизотропию травления, чтобы сформировать желаемый профиль травления на подложке. Основные требования к современным плазменным источникам включают в себя также хорошую равномерность распределения плазмы, низкую и контролируемую энергию ионов и пренебрежимое загрязнение от распыления арматуры реактора.

Использование ВЧ разряда индуктивно связанной плазмы (ИСП) как плазмообразующего источника предоставляет большие преимущества для технологии изделий с микро- и наноэлементами. В частности, высокую плотность плазмы ( $10^{11}–10^{12} \text{ см}^{-3}$ ), минимальный разброс ионов по энергиям ( $\Delta e_i \leq 5 \text{ эВ}$ ), относительно низкое рабочее давление ( $10^{-2} \dots 10^{-1} \text{ Па}$ ) и низкую энергетическую цену иона (30–80 эВ/ион). Благодаря отсутствию накаливаемых узлов, источник ИСП обладает большим ресурсом работы с химически активными газами. Кроме того, он предоставляет возможность независимого управления энергией и плотностью потока ионов, поступающих на подложку. Успехи в конструировании источников ИСП для целей микроэлектроники побудили разработчиков оборудования применить их и в других отраслях, например

в азотировании стальных деталей, обработке полимерных пленок и нанесении специальных покрытий методами PVD и PECVD.

Использование источников ICP в вакуумных технологических процессах было рассмотрено в зарубежных обзорах, сделанных различными авторами [3–6], и в одном более современном отечественном обзоре [7]. За последнее десятилетие источники ICP нашли еще более широкое промышленное применение, по которому появилось большое количество новой информации. Поэтому назрела необходимость составления нового обзора, который и предлагается вниманию читателя. Настоящий обзор ставит целью некоторую систематизацию основных экспериментальных результатов разработки и применения источников ICP, для чего использован ряд работ ведущих отечественных и зарубежных ученых в области физики и техники источников ICP. Другими словами, в предлагаемой книге мы ознакомим отечественного читателя с основными преимуществами и особенностями этих источников и с их технологическими применениями, описанными в работах по этой тематике, выполненных в основном за последние 10–15 лет.

Содержание книги распределено по главам. В главе 1 приведено описание принципов действия, особенностей и преимуществ источников ICP. В главе 2 рассмотрены многочисленные варианты конструкций современных источников ICP. В остальных главах приведены примеры технологических применений описываемых источников. В частности, в главе 3 описано применение источников ICP для нанесения тонких пленок: в процессах PVD и PECVD. В главе 4 – формирование плазмохимическим травлением трехмерных структур в различных материалах и двумерных структур в тонких пленках. Глава 5 посвящена влиянию обработки в индуктивно связанной плазме на свойства поверхностей различных материалов.

То, что некоторые выявленные зависимости дублируются в работах, выполненных различными авторами в разных лабораториях, очень ценно, так как это говорит об отсутствии влияния на них особенностей используемого оборудования и человеческого фактора. Это позволяет считать выявленные зависимости закономерностями, учитывая, что эти закономерности предсказываются теоретически в многочисленных работах по физике плазмы и моделированию работы источников ICP. Большое число использованных для обзора работ позволяет использовать данную книгу как справочник по конструкциям и технологическим применениям источников ICP.

Книга рассчитана на студентов, аспирантов, конструкторов нового технологического оборудования, использующего источники ICP, и технологов, работающих на таком оборудовании. Конструкторы найдут в ней обзор способов достижения высоких параметров источников ICP, а технологи ознакомятся с широким спектром их применения и полученных с их помощью достижений.

Примечание: в описаниях представленных здесь работ, как правило, использованы единицы измерения системы СИ, за исключением единицы измерения потока газа и температуры частиц в плазме. В системе СИ поток газа измеряется в  $\text{м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$  (ваттах). Однако эта единица крайне непопулярна, особенно в англоязычной литературе, где используют единицу измерения sccm (standard cubic centimetres per minute). Эта единица часто используется и

в России теми, кто работает на импортном оборудовании. Поэтому она оставлена в описаниях, только переведена на русский язык: кубический сантиметр в минуту при нормальных условиях, то есть при атмосферном давлении. Эта единица обычно обозначается в русскоязычной литературе как  $\text{см}^3/\text{мин}$ . Для справки и удобства пользования книгой в таблице представлены соотношения между некоторыми единицами измерения потока газа.

Соотношения между некоторыми единицами измерения потока газа.

Единицы измерения	$1 \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ (Вт)	$\text{см}^3/\text{мин}$ (sccm)	1 атм · л/ч	1 мм рт. ст. · л/с
$1 \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ (Вт)	1	600	35,7	7,5
$\text{см}^3/\text{мин}$ (sccm)	$1,7 \cdot 10^{-3}$	1	0,06	$1,25 \cdot 10^{-2}$
1 атм · л/ч	$2,8 \cdot 10^{-2}$	17	1	0,21
1 мм рт. ст. · л/с	0,133	79,8	4,74	1

Второй внесистемной единицей измерения, используемой в данной книге, является единица кинетической энергии частиц плазмы – эВ. Выраженная в этих единицах кинетическая энергия частиц часто называется их температурой. Это удобно и широко распространено при рассмотрении плазменных процессов. Чтобы перейти от этой внесистемной единицы, в формулах, использующих систему СИ и содержащих температуру частиц, например температуру электронов  $T_e$ , используют произведение  $\bar{e} \cdot T_e$ , где коэффициент  $\bar{e}$  численно определяется зарядом электрона в кулонах и равен  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж/эВ. Таким образом, коэффициент  $\bar{e}$  переводит внесистемную единицу эВ в системную единицу энергии – джоуль.



# ГЛАВА I

## СОВРЕМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ. ПРЕИМУЩЕСТВА ИСТОЧНИКОВ ИСР

В этой главе будут кратко описаны физические предпосылки устройства и работы современных источников плазмы, используемых в различных технологических процессах. Подробно физические предпосылки рассмотрены в работах [8–10]. Конкретные конструкции источников ИСР и их всевозможные применения будут рассмотрены в главах 2–5.

### 1.1. Технологические аспекты применения газоразрядной плазмы

Газоразрядная плазма имеет множество технологических применений, большинство из которых связано с использованием ее ионной компоненты. Отличие ионов от нейтральных атомов заключается в наличии у них электрического заряда, что позволяет влиять на их движение электрическими полями. В частности, возможно ускорение иона по направлению к подложке путем придания ее поверхности отрицательного относительно плазмы электрического потенциала.

В газоразрядной плазме возможны различные химические реакции: ионизация, диссоциация, рекомбинация, ассоциация в различных вариантах. Неизотермичность газоразрядной плазмы позволяет происходить реакциям, которые невозможны либо крайне медленны при той температуре, какую имеют ионы и нейтральные частицы. Например, реакция диссоциации молекулярного азота, в изотермических условиях заметно протекающая при температуре свыше 5000 К, в плазме газового разряда эффективно происходит в камере с комнатной температурой стенок.

Другой особенностью плазмы низких давлений, в которой размер разрядного объема не превышает нескольких длин свободного пробега нейтральных атомов, является то, что вероятность реакций ассоциации и рекомбинации с участием даже двух частиц существенно меньше, чем диссоциации и ионизации. В этой связи основным химическим процессом в плазме является образование свободных радикалов (в том числе в ионизованном виде), а образование новых химических соединений происходит на стенках разрядного объема.

Газоразрядная плазма воздействует на подложку:

- потоками заряженных частиц: ускоренных ионов, электронов и радикалов;
- потоками незаряженных, в том числе химически активных, частиц;
- УФ излучением.

В результате имеют место нагрев подложки, ее распыление, изменение электрического потенциала; химические реакции на поверхности, приводящие к химическому травлению подложки или росту на ее поверхности слоев сложного состава. Все эти факторы используются в эффективных технологических процессах, которые будут описаны в следующих главах. Они также могут иметь вредные нежелательные последствия, поэтому всегда должны учитываться в технологических применениях плазменных процессов.

### 1.1.1. Плавающий электрод в плазме

При низких давлениях рабочего газа плазма не находится в состоянии теплового равновесия, и электромагнитная энергия наиболее эффективно передается электронной компоненте. Поскольку масса электрона на несколько порядков ниже массы ионов и нейтральных атомов, при столкновении он передает массивной частице лишь незначительную долю своей кинетической энергии. В то время как обмен энергией между близкими по массе частицами достаточно эффективен. Поэтому говорят, что плазма находится в квазиравновесном состоянии. Под этим подразумевается, что частицы разного сорта могут иметь стационарную температуру, но она у нейтральных частиц и ионов существенно меньше, чем у электронов. Электронная температура  $T_e$ , как правило, составляет 2~5 эВ, в то время как температура ионов не превышает 0,1 эВ. Тем не менее вызванные краевыми эффектами электрические поля ускоряют положительные ионы к границам приэлектродных слоев, сообщая им энергию порядка  $\bar{e} T_e/2$  [8–10].

В работах по плазме плавающим электродом называют помещенный в плазму изолированный проводник. Поскольку суммарный стационарный ток, текущий через такой проводник, равен нулю, токи положительных и отрицательных частиц всех сортов полностью компенсируют друг друга. В противном случае заряд изолированного проводника будет изменяться до тех пор, пока условие компенсации тока не станет выполняться в силу противодействия потоку частиц преобладающего знака со стороны электрического поля. При достижении стационарного состояния электрод достигает плавающего потенциала. Ионы, падающие на электрод, находящийся под плавающим потенциалом, дополнительно получают энергию, ускоряясь разностью потенциалов на границе приэлектродного слоя, которая равна

$$\Phi = -T_e \ln \left( \frac{m_i}{2\pi m} \right)^{1/2}, \quad (1.1)$$

где  $m_i$  — масса иона,  $m$  — масса электрона.

Например, для водорода разность потенциалов равна  $2,8 T_e$ , для аргона —  $4,7 T_e$ . Суммарная энергия ионов, падающих на электрод, составит приблизительно  $5,2 T_e$ , что для обычных значений электронной температуры  $2,5$  эВ



составит от 10 до 40 эВ. Этой энергии достаточно для активации химических реакций, диссоциации соединений, десорбции молекул с поверхности. Вместе с тем она ниже пороговой энергии, необходимой для распыления материала подложки. Необходимую для процесса распыления энергию положительных ионов можно обеспечить, подавая на подложку отрицательное напряжение смещения.

При низких давлениях длина свободного пробега электронов, участвующих в процессах ионизации, с энергией порядка 10–15 эВ может быть сравнима с габаритными размерами разряда. Таким образом, даже если энергия вкладывается в плазму локально, ионизация происходит во всем объеме плазмы, что позволяет получать однородные ионные потоки на большой площади. В то же время, при таких условиях значительная доля «горячих» электронов (с энергией больше потенциала слоя) уходит на стенки вакуумной камеры. Для снижения этих потерь предпринимаются специальные меры, в основном основанные на применении магнитных полей различной конфигурации, у которых основная часть силовых линий параллельна поверхности стенок камеры.

### 1.1.2. Плотность плазмы и ионный ток

Плотность плазмы — количество заряженных частиц одного знака в единице объема. Как правило, плотность плазмы можно принять равной концентрации электронов. Плотностью плазмы, наряду с температурой электронов, определяется ее электропроводность и максимальные ионный и электронный токи, которые можно экстрагировать из нее на электрод. Ионный ток на электрод, размер которого существенно больше толщины приэлектродного слоя, определяется потоком ионов через границу плазмы. Поскольку электрическое поле проникает в плазму на глубину порядка дебаевского радиуса, заряженные частицы подходят к границе с некоторой скоростью. Величина этой скорости, называемой также Бомовской скоростью, равна

$$u_B = \left( \frac{eT_e}{m_i} \right)^{1/2}. \quad (1.2)$$

Для достижения этой скорости ион должен пройти разность потенциалов:

$$\Phi_p = \frac{m_i m_B^2}{2e} = \frac{\bar{e} T_e}{2e}, \quad (1.3)$$

где  $e$  — заряд электрона.

Или в упрощенном виде:

$$\Phi_p [\text{В}] = \frac{T_e}{2} [\text{эВ}].$$

Концентрация ионов вблизи границы слоя  $n_s$  равна

$$n_s = n_i e^{\frac{-\Phi}{\bar{e} T_e}} \approx 0,61 n_i, \quad (1.4)$$

где  $n_i$  — концентрация ионов в объеме плазмы.

Исходя из концентрации ионов в плазме  $n_i$ , легко найти плотность ионного тока, проходящего через границу плазмы:

$$j_i = en_s u_B = 0,61 en_i \left( \frac{\bar{e} T_e}{m_i} \right)^{1/2}. \quad (1.5)$$

Таким образом, плотность ионного тока  $j_i$  прямо пропорциональна плотности плазмы и обратно пропорциональна корню квадратному из массы ионов. Она также прямо пропорциональна корню квадратному из температуры электронов, однако во встречающихся на практике газовых разрядах последняя лежит в относительно узком интервале значений 2–5 эВ, поэтому  $\sqrt{T_e} \sim 1,4\text{--}2,3 \text{ эВ}^{1/2}$ . На практике можно принимать  $\sqrt{T_e} \sim 2 \text{ эВ}^{1/2}$  без существенного влияния на точность вычислений. Это бывает весьма удобно при определении параметров плазмы, поскольку измерение температуры электронов представляет собой не всегда простую задачу.

Таким образом, для сравнительных оценок различных способов и устройств генерации плазмы, а также анализа литературных данных формула (1.5) вполне пригодна. Для удобства расчета она может быть переписана в виде

$$j_i = 1,35 \cdot 10^{-6} \frac{n_i}{\sqrt{M}}, \quad (1.6)$$

где  $M$  – молярная масса иона,  $n_i$  – концентрация ионов каждого сорта в объеме плазмы.

Формулы (1.5) и (1.6) описывают ионный ток на электрод, потенциал которого относительно плазмы отрицателен. Следует, однако, заметить, что даже в наиболее простом случае разряда в инертном газе существуют неучтенные в представленном простейшем рассмотрении многозарядные ионы. На практике при использовании плазмы хотя бы уже молекулярного газа ( $\text{H}_2$  или  $\text{O}_2$ ) состав ионной компоненты становится весьма разнообразным. Для качественной иллюстрации процессов потери заряженных частиц представленное рассмотрение вполне достаточно, а более подробное выходит за рамки данной книги.

Поскольку электронный ток экспоненциально убывает при снижении потенциала, то, когда абсолютное значение последнего достаточно велико, полный ток на электрод состоит из ионов и практически полностью определяется формулой (1.5).

Если электрод является плавающим, а таковыми являются стенки разрядного объема при безэлектродном разряде и все диэлектрические тела, помещенные в плазму, то ионный ток полностью компенсируется равным ему по величине электронным. Эти токи являются основным механизмом потери заряженных частиц из плазмы.

Поскольку в приэлектродном слое около отрицательного электрода отсутствуют электроны, способные возбуждать частицы газа, визуально этот слой выглядит темной областью. Важной характеристикой является толщина приэлектродного слоя. Для большого отрицательного потенциала, когда весь ток создается ионами, толщина приэлектродного слоя у электрода, на кото-

рый подан отрицательный потенциал  $V_0$ , равна [8–10]:

$$s = \frac{\sqrt{2}}{3} \lambda_D \left( \frac{2eV_0}{\bar{e}T_e} \right)^{3/4}, \quad (1.7)$$

где  $\lambda_D = (e_0 \bar{e} T_e / e^2 n)^{1/2}$  – радиус Дебая,  $e_0$  – диэлектрическая постоянная вакуума.

Из приведенной формулы видно, что толщина слоя уменьшается с ростом плотности плазмы и увеличивается при высоких напряжениях на электроде. Существует условное разделение разрядов на разряды с плазмой «низкой» и высокой плотности. В разрядах с низкой плотностью плазмы приэлектродные слои занимают заметный объем по сравнению с расстояниями между электродами. К этой же группе относятся тлеющий разряд постоянного тока и высокочастотный емкостный разряд, для которых характерны напряжения на электродах, на порядки превышающие потенциал слоя у плавающего электрода (1.1).

### 1.1.3. Ток на электрод, находящийся под высокочастотным потенциалом

При подаче высокочастотного потенциала на погруженный в плазму электрод, изолированный по постоянному току, процессы в приэлектродном слое становятся аналогичными происходящим в емкостном высокочастотном разряде. Движение обладающих большой массой ионов не успевает заметно возмутиться за период колебаний электрического поля, поэтому они движутся под действием некоторого усредненного по времени поля. Более подвижные электроны движутся лишь то время, когда потенциал электрода положителен либо слабо отрицателен относительно плазмы. За счет этого средний по времени потенциал электрода может смещаться относительно нуля. Он определяется условием баланса зарядов в плазме: средний суммарный ток, текущий из плазмы на такие электроды, равен нулю. Поскольку электронный ток насыщения более чем на порядок превосходит ионный, то в емкостном разряде полный электронный ток на один электрод определяется полным ионным током на другой электрод. Если площади электродов, между которыми включен источник высокочастотного напряжения, равны, средний за период потенциал их одинаков и равен плавающему потенциалу в плазме. Если же площади электродов разные, то меньший по площади получает отрицательное среднее смещение относительно плазмы. Это смещение называется автосмещением или самосмещением.

Как правило, рабочий электрод должен находиться под отрицательным потенциалом, поэтому необходимо следить за тем, чтобы его эффективная площадь была меньше второго электрода. Обычно это условие легко выполняется, поскольку в качестве второго из электродов выступает сама рабочая камера. Однако надо иметь в виду, что ионный ток насыщения зависит от плотности плазмы. Большие неоднородности плотности плазмы могут образовываться при больших размерах рабочей камеры, высоких давлениях или применении магнитных полей, в том числе многополюсной системы изоля-

ции стенок. В этом случае возможна ситуация, когда «эффективная» площадь камеры может оказаться сравнимой или даже меньшей площади рабочего электрода. Тогда автосмещение на подложке исчезает или становится положительным, и ионный поток на нее прекращается.

Данный механизм одинаков как для металлических электродов, имеющих развязку по постоянному току, так и для диэлектрических поверхностей. На практике подача высокочастотного смещения используется для управления энергией ионов при обработке диэлектрических или полуизолирующих подложек. Высокочастотный ток проходит через емкость, образованную подложкодержателем и поверхностью диэлектрика, обращенной к плазме. Потенциал автосмещения обеспечивается поверхностным зарядом на подложке.

Вместе с тем при разработке и использовании высокочастотных индукционных источников плазмы этот эффект создает значительные трудности. Для увеличения индукционной связи между катушкой и плазмой необходимо снижать по возможности расстояние от витков катушки-индуктора (антенны) до плазмы, уменьшая зазор между ними. Это увеличивает емкость между витками и плазмой, поэтому через эту емкость начинает течь ток смещения. Поскольку высокочастотный потенциал на катушке может достигать нескольких киловольт, напряжение автосмещения на внешней поверхности диэлектрика также может достигать значительных величин. Это вызывает ионное распыление диэлектрика, а в реактивных процессах может приводить также и к плазмохимическому травлению. В результате происходит загрязнение плазмы продуктами распыления или травления, а также снижается срок службы генератора плазмы. Помимо распыления поверхности диэлектрика, высокое напряжение на его поверхности приводит к ускорению вторично эмитированных электронов. Эти электроны могут иметь значительную длину свободного пробега и достигать подложки, изменяя ее свойства. Различные способы практического решения этих проблем рассмотрены в главе 2.

## 1.2. Способы и устройства формирования технологической плазмы

Среди всего многообразия различных типов газового разряда для решения большинства технологических задач нашли применение лишь несколько. Наибольшее распространение в технике источников объемной плазмы получили высокочастотные источники на основе емкостного и индукционного разрядов. В этом разделе рассмотрим некоторые физические принципы построения этих основных конструкций плазменных технологических высокочастотных реакторов.

### 1.2.1. Диодный емкостной плазменный реактор

Схема диодного емкостного плазменного реактора приведена на рис. 1.1. Реактор содержит элементы, помещенные в вакуумную камеру 1: активный электрод 2, с расположенной на нем обрабатываемой подложкой 3, подключенный к ВЧ генератору 5 и заземленный электрод 4. Электрическое поле создается между пластинами, к которым приложено ВЧ напряжение.

В газовых разрядах ионы образуются за счет различных механизмов, основным из которых является ионизация электронным ударом. Энергия ионов, падающих на подложку, определяется в основном, разницей потенциалов между ней и плазмой. В первых технологических применениях газоразрядной плазмы процессы поддержания разряда и ускорения ионов были объединены (рис. 1.1) [1]. Подложка являлась катодом разрядной системы, что связывало плотность ионного тока и энергию ионов вольтамперной характеристикой разряда. Повысить плотность ионного тока в таких системах можно, лишь увеличивая давление рабочего газа, что не всегда допускается технологией.

Существует два основных механизма, за счет которых передается энергия в плазму: протекание тока и поглощение излучения. Первый из них чаще всего реализуется за счет ускорения заряженных частиц в постоянном или переменном электрическом поле. Второй представляет собой нагрев электронов плазмы электромагнитными полями. В зависимости от их частоты различают разряды постоянного тока, высокочастотные и СВЧ.

Вариант триодного емкостного реактора [1] представлен на рис. 1.2. По сравнению с диодным реактором он содержит дополнительную сетку 6, расположенную между электродами и находящуюся под плавающим потенциалом. При этом в пространстве между сеткой и активным электродом реализуется эффект «полого катода». Плотность заряженных частиц вблизи подложки в триодном реакторе увеличивается в 3–4 раза, а автосмещение на электроде уменьшается в 4–5 раз.

В отличие от низкочастотных разрядов и разрядов постоянного тока, вклад энергии переменного поля может происходить без протекания тока проводимости через электроды. При этом диэлектрические поверхности могут в зависимости от условий подвергаться электронной или ионной бомбардировке, что загрязняет плазму и поверхность обрабатываемой подложки.

## ЕМКОСТНОЙ РЕАКТОР

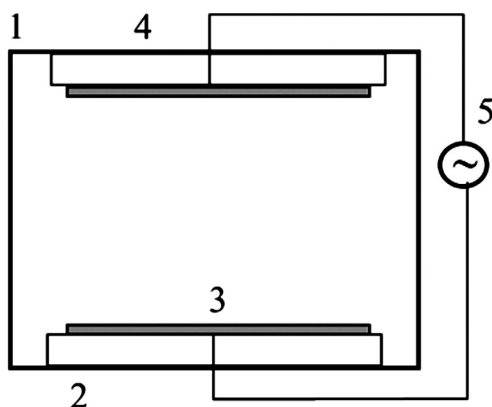


Рис. 1.1. Диодная разрядная система [1]

## ТРИОДНЫЙ РЕАКТОР

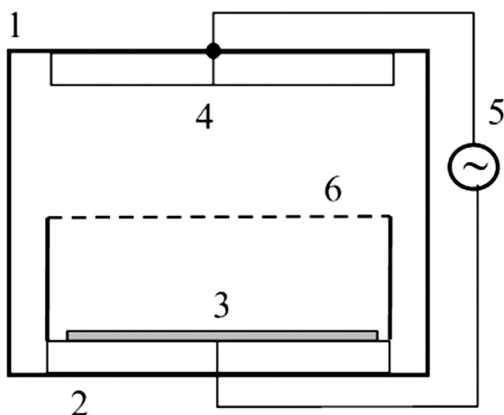


Рис. 1.2. Триодный емкостной плазменный реактор [1]

### 1.2.2. Индукционный ВЧ источник плазмы (ICP источник)

Проблема распыления деталей источника плазмы может быть существенно снижена путем применения индукционной формы высокочастотного разряда. В таких источниках энергией ионов, бомбардирующих обрабатываемое изделие, можно управлять независимо от генерации плазмы путем подведения к нему источника напряжения смещения. При его регулировке остальные

#### ИНДУКТИВНЫЙ РЕАКТОР

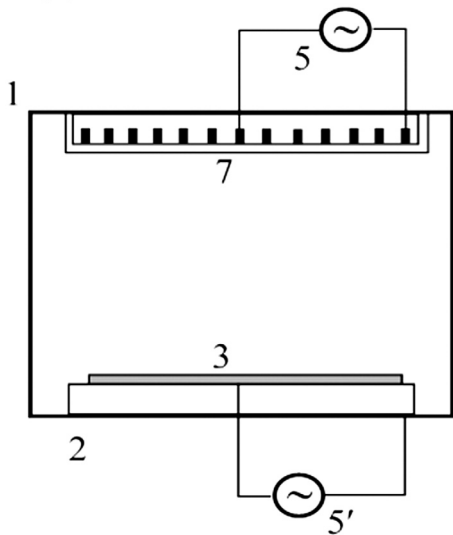


Рис. 1.3. Индуктивный плазменный реактор [1].

параметры плазмы (температура, плотность плазмы и ее потенциал относительно стенок) могут оставаться неизменными [4].

Пример такой системы приведен на рис. 1.3 [1]. Электрическое поле обычно возбуждается как поле индукции, возбуждаемое антенной в виде плоской или цилиндрической катушки индуктивности. К антенне подводится ВЧ-мощность от генератора 5. Подложка 3 обычно размещается на подложкодержателе 2, представляющем собой плоский электрод. Для независимого управления энергией ионов, бомбардирующих подложку, к подложкодержателю подводится ВЧ напряжение от дополнительного ВЧ генератора 5', частота которого может не совпадать с частотой основного генератора 5.

Благодаря достоинствам индуктивных источников в современных технологических установках все шире используются источники плазмы высокой плотности на основе ВЧ разряда, формирующие так называемую трансформаторно-связанную (или индуктивно-связанную) плазму (принятая латинская аббревиатура TCP – Transformer Coupled Plasmas или ICP – Inductively Coupled Plasma). ICP разряд позволяет травить материалы микроэлектроники с высоким разрешением (менее 0,2 мкм) и осаждать слои из паро-газовых смесей, обеспечивая при этом высокую эффективность процесса и качество получаемых слоев [1]. Таким источникам и будут посвящены дальнейшие разделы этой книги.

### 1.3. Свойства индукционного разряда при низком давлении

Недостатки емкостных высокочастотных разрядов и их вариаций с применением магнитных полей привели к поиску источников высокоплотной плазмы для низких рабочих давлений. Помимо высокой плотности и низкого



давления, общим их отличием является то, что энергия вводится в плазму посредством не электрического поля, а переменного магнитного. Это означает отсутствие больших потенциалов, приложенных к приэлектродным слоям. Энергия ионов, поступающих на подложку, составляет обычно около 20–30 В, при этом она может при необходимости легко быть изменена отдельным источником питания смещения, постоянного, средне- или высокочастотного. Таким образом, становится возможным независимое управление потоками ионов (путем манипулирования мощностью, вкладываемой в источник плазмы), радикалов (за счет изменения давления и состава газовой смеси) и энергии падающих на подложку ионов (за счет изменения смещения).

Поскольку области генерации и «использования» плазмы разнесены пространственно, встает вопрос о транспортировке плазмы в рабочий объем с минимальными потерями. Практические решения этой проблемы рассмотрены в главе 2.

### 1.3.1. Зависимость плотности плазмы от вкладываемой в разряд ВЧ мощности

Рассмотрим простую модель разряда цилиндрической формы для наиболее важного практически режима средних давлений [8]. Из формулы (1.5) видно, что плотность тока заряженных частиц на стенку прямо пропорциональна концентрации плазмы. Пусть каждая пара электрон + ион уносит из системы энергию  $E_T$ . Можно определить [8] равновесную концентрацию плазмы при данной мощности  $P_{abs}$ , вкладываемой в нее:

$$n_0 = \frac{P_{abs}}{e u_B A_{eff} E_T}, \quad (1.8)$$

где  $u_B$  – Бомовская скорость (1.2),  $A_{eff}$  – эффективная площадь стенок.

Из выражения (1.8) видно, что в отсутствие других механизмов выноса энергии из плазмы (излучения, например) плотность плазмы зави-

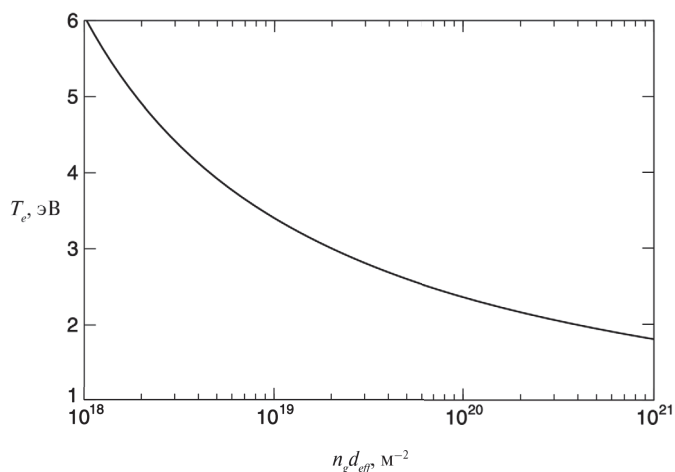


Рис. 1.4. Зависимость температуры электронов в плазме от ее параметров [8]

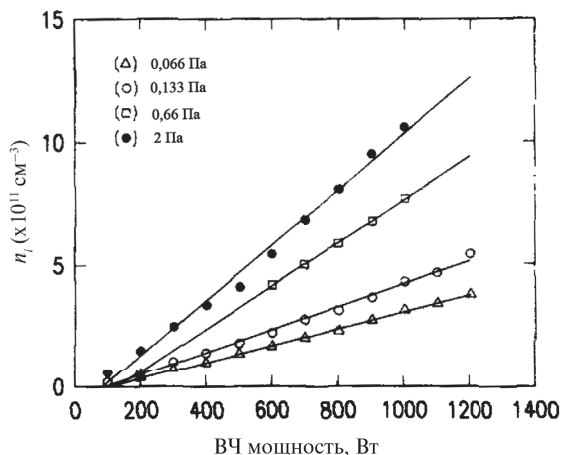


Рис. 1.5. Линейная зависимость плотности ионов  $n_i$  от ВЧ мощности разряда при различных давлениях аргона [5]

дем понятие эффективного размера плазмы  $d_{eff} = (\pi R^2 l) / A_{eff}$ , тогда температура электронов можно определить из графика на рис. 1.4 [8].

Температура электронов в данном случае получается равной 3,8 эВ, а потенциал слоя по формуле (1.1) составит 20 В. Плотность плазмы и плотность ионного тока равны соответственно  $n_i = 1,9 \cdot 10^{11}$  см $^{-3}$  и  $j = 2,8$  мА/см $^2$ .

Экспериментальные исследования хорошо подтверждают справедливость приведенных выкладок. В частности, в работе [5] приведены характерные зависимости от вкладываемой в разряд мощности и давления (рис. 1.5).

### 1.3.2. Поглощение высокочастотной мощности плазмой

В индукционной плазме мощность вихревого электрического поля передается электронам плазмы в скин-слое толщиной  $\delta$ , находящемся вблизи поверхности плазмы. Передача идет за счет механизмов столкновительной диссипации и бесстолкновительного процесса нагрева, аналогичного имеющему место в емкостных разрядах [8]. Этот механизм является определяющим при низких давлениях и достаточно высокой концентрации плазмы.

В рассматриваемых нами системах толщина скин-слоя, которым ограничено влияние полей, создаваемых генератором плазмы, не превышает нескольких сантиметров. При этом длина свободного пробега электронов при низких давлениях превышает толщину скин-слоя. Последнее обстоятельство обеспечивает эффективный вынос энергии внешнего поля нагретыми электронами, что обеспечивает высокую однородность электронной температуры по объему плазмы.

Выше было показано, что параметры плазмы определяются введенной в нее мощностью и конфигурацией камеры, при этом механизм передачи энергии в плазму не играет существенной роли, получаемая в результате плотность плазмы определяются формулой (1.8). Однако эффективность преоб-

сит от вкладываемой в нее мощности линейно. Другие механизмы становятся существенными только при больших плотностях и температурах, не встречающихся в технологических применениях, рассматриваемых в данной книге.

Рассмотрим следующий пример. Пусть имеется разряд в цилиндрическом объеме радиусом  $R = 0,15$  м и длиной  $l = 0,3$  м, не содержащий активных электродов, при концентрации молекул газа  $n_g = 3,3 \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$  и вводимой в него электрической мощности  $P_{abs} = 800$  Вт. Введем

разования электрической мощности источника питания в электромагнитные поля в разрядном объеме напротив очень сильно зависит от конструкции и исполнения конкретного генератора плазмы.

Для моделирования индукционного разряда в газе при низком давлении плазму можно рассматривать как вторичную обмотку трансформатора, как показано на рис. 1.6 [11]. Синусоидальное напряжение с действующим значением  $V_1$  и круговой частотой  $\omega = 2\pi f$  ( $f$  – частота ВЧ напряжения) приложено к первичной катушке, вызывая в ней первичный ток  $I_1$ . Первичной обмоткой трансформатора является сам индуктор с индуктивностью  $L_0$  и сопротивлением  $R_0$  (с добротностью  $Q = \omega L_0 R_0$ ), которые можно рассчитать или непосредственно измерить. Поскольку плазма представляет собой электрически проводящую жидкость, которая окружает индуктор, она может быть представлена как вторичная обмотка воздушного трансформатора, состоящая из одного витка. Ее индуктивность обозначим  $L'_2$ , а сопротивление –  $R_2$ .

Предполагается, что разряд находится в чисто индукционном режиме, то есть емкостной составляющей можно пренебречь. Это справедливо для ситуации, имеющей место на практике, когда разряд перешел в стабильный режим. Действительно, вначале инициация разряда происходит через емкостный разряд, загорающийся на межвитковой разнице высокочастотных напряжений. Затем вклад мощности через индукционный канал превосходит емкостную составляющую и формируется плотная плазма, а напряжение на приэлектродном слое снижается.

Плазму можно рассматривать как проводящую жидкость с проводимостью

$$\sigma = \frac{e^2 n_e}{m(v_{eff} + i\omega)}, \quad (1.9)$$

где  $n_e$  – плотность электронов в плазме,  $v_{eff}$  – эффективная частота столкновений электронов.

Индуктивность плазмы  $L'_2$  складывается из двух слагаемых: связанного с инерцией электронов  $L_e$ , обеспечивающего мнимую часть проводимости плазмы, и геометрической (или электромагнитной) индуктивностью  $L_2$ , обу-

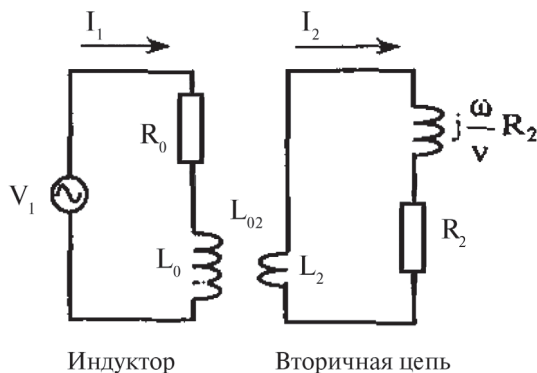


Рис. 1.6. Трансформаторное представление индукционного разряда [11]

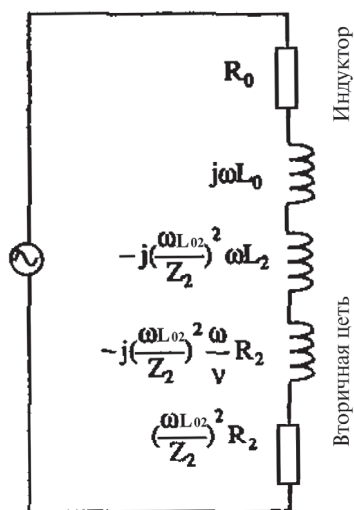


Рис. 1.7. Эквивалентная схема индукционного разряда [11]

словленной конфигурацией разрядного тока. При этом  $L_2$  индуктивно связана с первичной обмоткой через взаимную индуктивность  $L_{02}$ , в то время как  $L_e$  можно выразить как мнимую составляющую полного импеданса плазмы  $L_e = R_2/v_{eff}$ .

Связанные контуры на рис. 1.6 могут быть заменены эквивалентной схемой (рис. 1.7) путем пересчета электрических параметров элементов вторичного контура в первичный.

Вторичный контур вносит в первичный дополнительный импеданс, равный  $(\omega L_{02})^2 / Z_2$ , где  $Z_2$  – импеданс вторичного контура. Если разделить его на действительную и мнимую части, эквивалентное сопротивление первичного контура есть просто сумма сопротивления катушки  $R_0$  и слагаемого, представляющего приведенное сопротивление вторичного контура  $R_2$ :

$$R_1 = R_0 + \omega^2 k^2 L_0 L_2 R_2 / Z_2^2, \quad (1.10)$$

где  $L_{02}^2 = k^2 L_0 L_2$ ,

$$Z_2^2 = \left[ \omega L_2 + (\omega / v_{eff}) R_2 \right]^2 + R_2^2,$$

$k$  – коэффициент связи между контурами.

Тогда эквивалентная индуктивность получается аналогично:

$$L_1 = L_0 - \omega k^2 L_0 L_2 \left[ \omega L_2 + (\omega / v_{eff}) R_2 \right] / Z_2^2. \quad (1.11)$$

Уравнения (1.10) и (1.11) являются независимыми, но содержат три неизвестные величины ( $R_2$ ,  $L_2$  и  $k$ ). Аналитическое решение известно только для индуктивной катушки соленоидальной (цилиндрической) конструкции [11]. Однако, используя метод конечных элементов, можно применить указанный подход для моделирования любой конкретной системы [12].

### 1.3.3. Согласование источника ИСП с цепями питания

На высоких частотах, когда становятся существенными волновые процессы в цепях питания, может возникать отражение высокочастотной мощности от нагрузки. При этом, помимо того, что часть мощности не попадает в нагрузку, возникает также целый ряд других негативных явлений. В частности, интерференция падающей и отраженной волн формирует в кабеле стоячую волну, из-за которой токи и напряжения на отдельных отрезках питающего кабеля могут превышать номинальные. Коэффициент отражения равен

$$\Gamma = (R_0 - Z) / (R_0 + Z), \quad (1.12)$$

где  $R_0$  – волновое сопротивление высокочастотного кабеля, обычно равное 50 Ом (реже 75 Ом),  $Z$  – импеданс нагрузки.

Передача мощности без потерь от источника в нагрузку достигается только при условии их согласования:  $Z = R_0$ . Поскольку мнимая часть импеданса нагрузки обычно значительно больше действительной, а последняя существенно отличается от стандартных 50 или 75 Ом, необходимо включение между нагрузкой и кабелем специальной схемы согласования. Так как требуемый импеданс является чисто активным, необходимо полностью скомпенсировать реактивность нагрузки. То есть речь идет о колебательном контуре, настроенном в резонанс. Поскольку импеданс плазменного источника может меняться в широких пределах, основными элементами любой схемы согласования являются переменные реактивные элементы — емкости и индуктивности.

Так как рабочие токи индукционных систем составляют десятки ампер, использование переменных индуктивностей затруднено большими потерями в них, а также требующимися высокими напряжениями. Кроме того, индукционный источник плазмы представляет собой индуктивно-резистивную нагрузку, поэтому для компенсации ее реактивности требуется использовать емкости. Наиболее распространенной схемой согласующего устройства является  $\Gamma$ -образная схема (в англоязычной литературе —  $L$ -образная), состоящая из двух переменных конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ . Совместно с нагрузкой она представляет собой параллельный колебательный контур, состоящий из емкостной ветви (образованной конденсатором  $C_2$ ) и индуктивной (образованной конденсатором  $C_1$  и индуктором  $L + R$ ). Контур настраивают в резонанс, и выполняется равенство:

$$\frac{1}{\omega C_1} = \omega L - \frac{1}{\omega C_2}. \quad (1.13)$$

Эквивалентное сопротивление контура  $R_{\text{экв}}$  в этом случае будет чисто активным и равным

$$R_{\text{экв}} = \frac{z_1 z_2}{z_1 + z_2}, \quad (1.14)$$

где  $z_1$  и  $z_2$  – импедансы емкостной и индуктивной ветвей соответственно.

Исходя из равенства (1.13) и учитывая, что реактивные сопротивления обеих ветвей численно равны между собой и гораздо больше  $R$ , получим:

$$R_{\text{экв}} = \frac{1}{(\omega C_1)^2 R} = \frac{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C_2}\right)}{R}. \quad (1.15)$$

Условие согласованности генератора с нагрузкой  $Z = R_0$  с учетом формул (1.13) и (1.15) можно переписать в виде:

$$\frac{1}{(\omega C_1)^2} = RR_0, \quad (1.16)$$

$$C_2 = \frac{C_1}{\omega LC_1 - 1}. \quad (1.17)$$

Таким образом, один из конденсаторов  $C_1$  может служить для выполнения условия  $R_{\text{эфф}} = R_0$ , а другой  $C_2$  – для обеспечения выполнения условия резонанса. При этом показателем качества согласования является минимум отраженной мощности.

### 1.3.4. Определение характерных величин разряда по его внешним параметрам

Параметры элементов правого контура на эквивалентной схеме, приведенной на рис. 1.6, определяются параметрами разряда, такими как плотность плазмы, эффективная частота столкновений электронов и их температура. Следовательно, существует возможность их косвенного измерения путем регистрации параметров тока и напряжения в первичной цепи. Ниже приводится предлагаемая нами расчетная модель, при помощи которой можно косвенно измерить электрические параметры нагрузки согласующего устройства, при условии, что обеспечено согласование (что можно определить по, например, рефлектометру генератора). Следует, однако, иметь в виду, что активное сопротивление  $R$  включает в себя также и вклад от цепей самого согласующего устройства и соединений. Правильно исполненные цепи питания и согласования должны обеспечивать незначительность доли мощности, рассеиваемой в них. Иными словами, их эквивалентным сопротивлением в этом случае можно пренебречь, по сравнению с нагрузкой.

Выражения (1.19) и (1.23) тогда можно переписать в виде

$$L = \frac{1}{\omega^2} \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}, \quad (1.18)$$

$$R = \frac{1}{(\omega C_1)^2 R_0}, \quad (1.19)$$

$$I = \omega C_1 \sqrt{PR_0}, \quad (1.20)$$

$$\begin{aligned} U &= \left( U_{\text{вх}}^2 + \left( \frac{I}{\omega C_2} \right)^2 \right)^{1/2} = \left( U_{\text{вх}}^2 + \frac{P(\omega C_1)^2 R_0}{(\omega C_2)^2} \right)^{1/2} = \\ &= U_{\text{вх}} \left( \frac{C_1^2 + C_2^2}{C_2^2} \right)^{1/2} = \sqrt{PR_0} \left( \frac{C_1^2 + C_2^2}{C_2^2} \right)^{1/2}, \end{aligned} \quad (1.21)$$

где  $U_{\text{вх}} = \sqrt{PR_0}$  – напряжение на входе в согласующее устройство.

Современные автоматические согласующие устройства позволяют в режиме реального времени получать данные о величинах конденсаторов, давая, таким образом, возможность косвенного измерения электрических параметров нагрузки. Конкретные конструкции и применение согласующих устройств описаны далее в главе 2.

## ГЛАВА 2

# КОНСТРУКЦИИ АНТЕНН ИСТОЧНИКОВ ICP

Для удобства описания конструкций антенн современных источников ICP их целесообразно разделить на два типа: локальные антенны и антенны, создающие плазму у поверхности изделий большой площади.

Источники ICP с локальными антеннами предназначены для обработки объектов сравнительно небольшой площади, диаметром до 100–150 мм, например круглых полупроводниковых подложек. Тем не менее они могут быть использованы и для обработки больших площадей, если в установках периодического действия предусмотрено движение мимо антенны источника ICP подложек, установленных на карусели или барабанах, а также в установках непрерывного действия, где подложки движутся на транспортере или в шлюзовых установках. Конструкции локальных источников ICP будут рассмотрены в первом разделе данной главы.

Во втором разделе данной главы будут описаны источники ICP для обработки изделий большой площади. Необходимость в таких источниках возникла в связи с происшедшим в последние десятилетия переходом от полупроводниковых подложек диаметром 100–200 мм к подложкам диаметром 300 мм. Особенно острая необходимость в таких источниках высокоплотной плазмы возникла в производстве жидкокристаллических дисплеев с тонкопленочными транзисторами (thin film transistor-liquid crystal display (TFT-LCD) devices), размеры которых растут с каждым годом и уже достигли нескольких метров [13].

Кроме того, все виды антенн источников ICP делятся по месту расположения антенны: вне вакуумной камеры (внешние антенны) или внутри ее (внутренние антенны), каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. В этой главе будут последовательно рассмотрены все четыре типа источников ICP.

### 2.1. Локальные антенны источников ICP

Источники ICP с локальными антеннами по своей конструкции делятся на два основных типа. В источниках первого типа используются антенные катушки, витки которых расположены в одной плоскости. Они формируют плазму по одну сторону от этой плоскости. Это планарные антенны. В источниках второго типа используются антенные катушки, витки которых представляют собой цилиндрическую спираль, поэтому они называются цилиндрическими антеннами. Плазму они формируют внутри цилиндрической спирали.



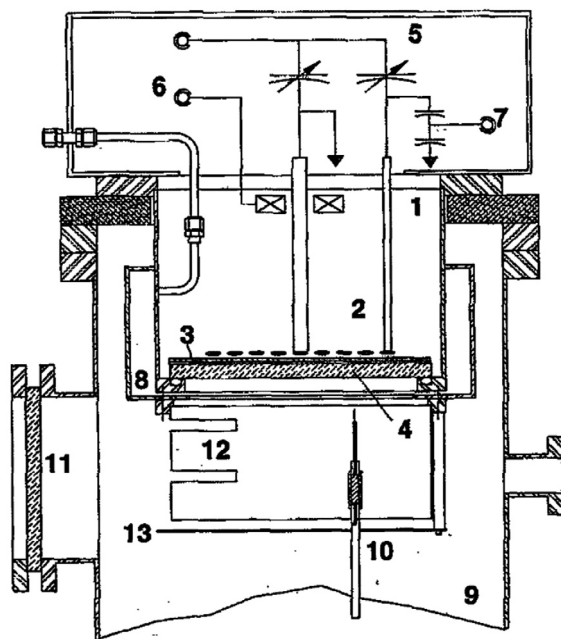
### 2.1.1. Планарные антенны

#### 2.1.1.1. Планарные антенны вне рабочей камеры (внешние антенны)

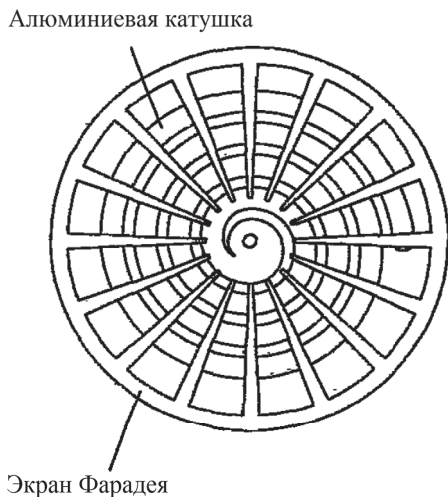
Источники ИСР с внешними планарными антеннами содержат планарную катушку, расположенную вне вакуумной камеры и возбуждающую в вакуумной камере ВЧ электромагнитное поле через герметичное диэлектрическое окно.

Один из типичных источников ИСР с внешней планарной антенной исследован в работе [14]. Его схема представлена на рис. 2.1. Катушка антенны и кварцевое окно были установлены вверху камеры (9) из нержавеющей стали диаметром 35 см и высотой 61 см. Газ напускали в камеру через кольцевой зазор вокруг периметра кварцевой платы.

На рис. 2.2 показан вид катушки антенны и экрана Фарадея со стороны вакуумной камеры через кварцевое окно. Катушка индуктивностью 1,2 мкГн содержала четыре алюминиевых витка толщиной 0,17 см и шириной 1,27 см с зазором 0,64 см. Планарная катушка располагалась на 2 см выше кварцевого окна. Заземленный экран Фарадея применили, чтобы снизить степень емкостной связи между катушкой и плазмой, путем уменьшения распространения ВЧ электрического поля (емкостных полей), в то же время позволяя



**Рис. 2.1.** Планарный ИСР источник: 1 – рабочая камера, 2 – четырехвитковая катушка, 3 – экран Фарадея, 4 – кварцевое окно, 5 – ВЧ согласующее устройство, 6 – трансформатор тока, 7 – емкостной делитель напряжения, 8 – кольцевой газовый канал, 9 – вакуумная камера, 10 – зонд Лэнгмюра, 11 – окно, 12 – металлическая вставка, 13 – нижняя плата [14]



**Рис. 2.2.** Вид снизу катушки антенны и экрана Фарадея [14]

свободно распространяться ВЧ магнитному полю. При этом зазоры и отверстия в экране были сконструированы так, чтобы позволять некоторое проникновение электрического поля для обеспечения поджига разряда. Наличие экрана Фарадея снизило удвоенную амплитуду ВЧ (13,56 МГц) потенциала плазмы с 10 В до менее чем 2 В. Кроме того, с помощью экрана распыление внутреннего кольца, окружающего вакуумный колодец около кварцевой платы, было снижено и убран локализованный разряд около открытых отверстий и пустот. Катушка и экран Фарадея были разделены диэлектрической пластиной толщиной 1,27 см и диаметром 20,3 см.

Для работы при давлениях газа в камере менее 2,7 Па вакуумная камера откачивалась криогенным насосом через затвор с варьируемым пропусканием. Для работы при больших давлениях вакуумная камера откачивалась механическим насосом с быстротой действия примерно  $5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  через автоматический затвор. К катушке антенны через согласующее устройство были подключены генератор с частотой 13,6 МГц и мощностью 500 Вт и импульсный генератор с частотой 50 МГц. Во всех экспериментах мощность отраженной волны не превышала 5% от падающей мощности.

Проведенные авторами измерения характеристик разряда в аргоне в описываемом источнике плазмы показали плотность электронов в плазме  $10^{10} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Максимум потенциала плазмы локализовался на оси источника, указывая этим на диффузионный характер распределения аргонной плазмы. Неоднородное распределение средней энергии электронов в плазме содержало максимум, находящийся на 2–3 см ниже кварцевого окна [14]. Таким образом, источник плазмы с катушкой, охлаждаемой только воздухом, при ВЧ мощности 500 Вт способен создать плазму плотностью до  $10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

Целью работы [16] было исследовать влияние различной геометрии планарной катушки и электрической схемы на распределение плотности электронов. Исследования проводили на внешней антенне с планарной спиральной катушкой, к центральному выводу которой был подключен источник питания ВЧ мощности с частотой 13,56 МГц, а другой ее вывод был соединен с корпусом установки. Авторы также опробовали другие варианты электрической схемы, в которых выводы спиральной катушки были подключены наоборот и был включен конденсатор между периферийным выводом и корпусом камеры. Сравнили свойства источника с электростатическим экраном между катушкой и плазмой и без него. Все эксперименты проводили в аргоне, измеряя свойства плазмы зондом Лэнгмюра и оптическим спектрометром.

Цилиндрическая вакуумная камера была выполнена из нержавеющей стали. Внизу по центру камеры был расположен держатель подложек, который имел диаметр 165 мм, расстояние от него до кварцевого окна толщиной 9,5 мм было 40,5 мм, два типа планарных катушек с внешним диаметром 100 мм. Были использованы: пятивитковая с индуктивностью 1,1 мкГн и одновитковая с индуктивностью 0,55 мкГн. Витки катушек были выполнены из 3-мм медных трубок, охлаждаемых водой. Между катушкой и экраном Фарадея была вставлена 3-мм кварцевая пластина для электростатической изоляции катушки. Представленные в статье зависимости учитывали ВЧ мощность в антенне. Эта мощность представляла собой разность между общей подводимой мощностью и резистивными потерями, определяемыми как  $I_{\text{кат}}^2 \cdot R_{\text{эф}}$ , где  $I_{\text{кат}}$  — ток в катушке антенны, а  $R_{\text{эф}}$  — эффективное сопротивление катушки в отсутствие плазмы. Оно равно 0,7 Ом у пятивитковой катушки и 0,34 Ом у одновитковой. Рабочее давление аргона было в диапазоне 0,33–4 Па при его потоке 5 см<sup>3</sup>/мин. При измерениях зонд Лэнгмюра двигали на расстоянии 12 мм выше держателя подложек и на 41 мм ниже катушки.

Сравнение результатов, полученных при использовании одной и пятивитковой антенн, было сделано по удвоенным амплитудам ВЧ напряжения, тока и мощности. Эти данные показаны на рис. 2.3, а–в. Общая подводимая мощность к спиральной катушке была 150 Вт и к одновитковой 300 Вт, поскольку потери мощности в ней были

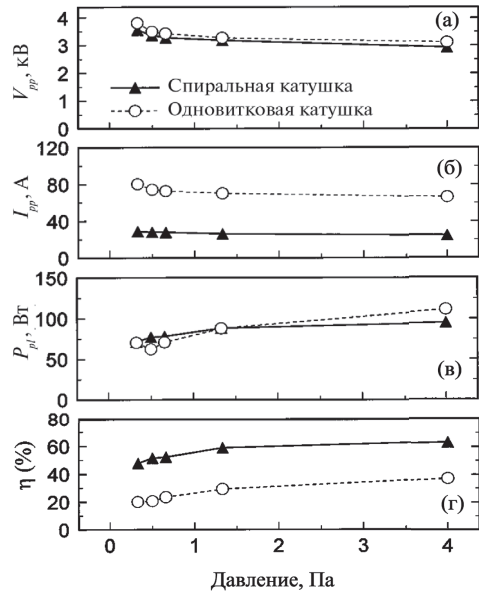


Рис. 2.3. Величины удвоенных амплитуд ВЧ напряжения (а), тока (б) и мощности (в), индуцированной в плазму, эффективность передачи мощности для двух антенн в зависимости от рабочего давления (г) [15]

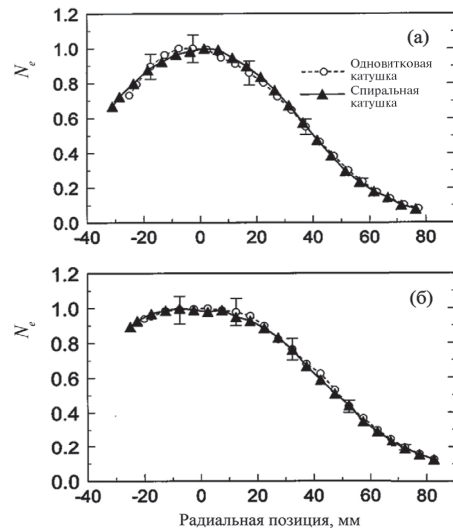
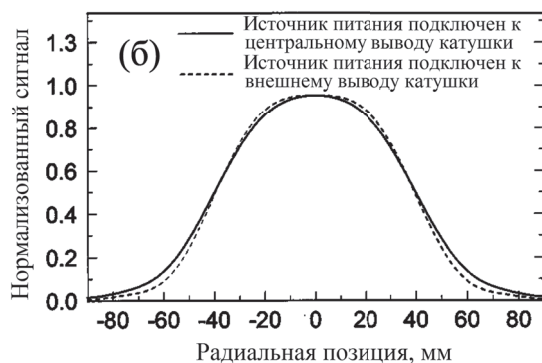
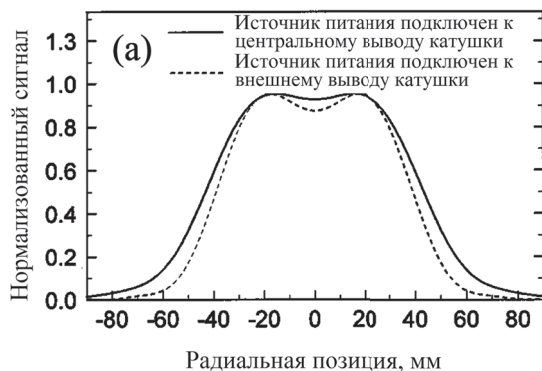


Рис. 2.4. Радиальное распределение плотности электронов —  $N_e$ , нормализованной к ее максимальной величине, измеренное на высоте 12 мм от подложкодержателя, для обоих вариантов антенн: а — при давлении 4 Па и б — при давлении 0,5 Па [15]

выше. Эффективность передачи мощности в плазму была в 2 раза ниже у одновитковой катушки по сравнению с пятивитковой (рис. 2.3, з).

Радиальное распределение плотности электронов, нормализованной к ее максимальной величине, для обоих вариантов антенн показано на рис. 2.4. Полуширина полученного распределения увеличилась с 40 мм при давлении 4 Па до 50 мм при давлении 0,5 Па одинаково для обоих вариантов антенн. Аналогичные результаты были получены при сравнительных измерениях плотности электронов зондом Лэнгмюра и оптическими спектроскопическими измерениями. Оба метода показали практически совпадающие результаты.

Электростатический экран Фарадея, как известно [14], нужен для уменьшения емкостной связи катушки с плазмой. Такое экранирование важно, так как емкостная связь увеличивает энергию ионов, из-за чего абсорбированный кислород и другие примеси могут быть освобождены с поверхности



**Рис. 2.5.** Нормализованный сигнал от оптического спектрометра, находящегося на 33 мм (а) и 12 мм (б) выше подложкодержателя, когда источник питания подключен или к центральному, или к внешнему выводу катушки (давление 1,33 Па, мощность 50 Вт при подключении в центре и 36 Вт при подключении к внешнему выводу) [15]

кварцевого окна ионным распылением. Если на внутренней поверхности окна уже есть тонкие пленки, их материал тоже может быть распылен и перенесен на подложку. Эксперимент показал, что наличие такого экрана не влияло на форму радиального распределения плотности плазмы. Однако экран влиял на распределение плотности по вертикали. При малых мощностях, когда доля емкостной связи еще значительна, сигнал оптической эмиссии из плазмы выше над подложкодержателем в случае отсутствия экрана. А при высоких мощностях в плазме замечена только небольшая разница в распределении сигнала по вертикали.

Параметры электрической цепи питания катушки влияли на азимутальную симметрию распределения плазмы. В частности, конденсатор, включенный последовательно с катушкой, очень важен. Такой конденсатор определяет положение максимума тока в стоячей волне. Наибольшие изменения индуцированного электрического поля и мощности можно наблюдать,

когда сопротивление конденсатора на используемой высокой частоте примерно равно реактивному сопротивлению катушки. Чтобы экспериментально исследовать этот эффект, к внешнему выводу пятивитковой катушки подключали конденсаторы емкостью 150 или 500 пФ. При выводе, присоединенном непосредственно к корпусу, распределение плотности имело азимутальную симметрию, а при включенном конденсаторе появилась асимметрия распределения, сильнее проявляющаяся при больших мощностях.

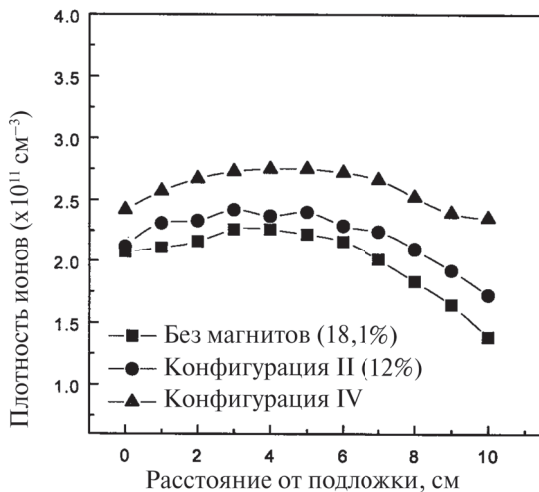
Подача ВЧ мощности на внешний вывод катушки вместо центрального повлияла на радиальное распределение вблизи катушки (рис. 2.5, *a*), тогда как распределение вблизи подложкодержателя осталось неизменным (рис. 2.5, *б*).

Авторы считают, что уникальность их источника заключается в относительно малом отношении диаметра катушки к диаметру камеры, равном 0,4. Учитывая наличие в камере двух больших оконных фланцев диаметром 203 мм и длиной 70 мм и других шести фланцев для устройств диагностики, эффективное отношение можно оценить как 0,3. В других исследованиях это отношение находится в диапазоне 0,52–0,9. Отсюда авторы сделали вывод, что это отношение и расстояние между кварцевым окном и подложкодержателем играют ключевую роль в определении радиального распределения плотности плазмы для источников без постоянных магнитов. Вторая уникальность заключается в том, что катушка окружена цилиндром из нержавеющей стали, внутренний диаметр которого всего на несколько миллиметров больше диаметра катушки, из-за чего в стенках цилиндра наводятся значительные токи. Эти наведенные токи тоже влияют на плазму. Это указывает на полезность уменьшения расстояния между кварцевым окном и подложкодержателем. Однако в промышленных установках для ионного травления это расстояние должно быть примерно равно нескольким толщинам скин-слоя. Иначе наведенные электрическое и магнитное поля в области плазмы вблизи кварцевого окна могут быть причиной структурных нарушений в подложке [16].

В заключение авторы [15] сделали вывод, что только изменением конфигурации катушки или схемы ее питания невозможно достичь повышения радиальной однородности плазмы.

Возможность улучшить однородность плазмы и повысить ее плотность с помощью введения в конструкцию источника плазмы различных конфигураций постоянных магнитов исследовали в работе [17]. Вакуумная камера с внутренними размерами  $210 \times 210$  мм<sup>2</sup> была выполнена из анодированного алюминия. ВЧ генератор с частотой 13,56 МГц был подключен к центру планарной антенной катушки. Катушка содержала четыре квадратных витка, покрытых золотом. Она была отделена от вакуумной камеры кварцевой пластиной толщиной 24 мм. Расстояние от кварцевого окна до подложки было 110 мм.

Для размещения постоянных магнитов внутри камеры использовался квадратный держатель из анодированного алюминия. Постоянные магниты размером  $6 \times 8 \times 56$  мм<sup>3</sup> имели у поверхности индукцию 3000 Гс. Из них формировали различные конфигурации. Все конфигурации создавали одну и ту же напряженность магнитного поля у стенок камеры. У конфигураций I, II и III промежуток между центрами магнитов был 56 мм, и восемь пар магнитов были размещены вдоль внутренней поверхности стенок камеры. У кон-



**Рис. 2.6.** Плотность ионов при различных конфигурациях магнитных систем, давлении аргона 0,67 Па и ВЧ мощности 600 Вт [17]

и однородность плазмы. Она была не хуже 16%, когда магнитов не было, и ухудшилась до 19 и 34%, когда использовали конфигурации I и III соответственно. Однако конфигурации II, IV, и V, наоборот, улучшили однородность до 11, 6 и 14% соответственно. Таким образом, конфигурация IV дала наилучшую однородность. Преимущество конфигурации IV связано с уменьшением потерь заряженных частиц на стенках камеры. Авторы сделали вывод, что для достижения оптимального результата по однородности плазмы с помощью магнитов важно подбирать не только расстояние между магнитами, но также и создаваемую ими напряженность магнитного поля.

Тенденции изменения однородности плотности ионов оказались такими же, как и у ионного тока насыщения (рис. 2.6). Неоднородность плотности ионов без использования магнитов была ~18,1%, а с конфигурацией магнитов IV была ~6,9%, то есть конфигурация IV обеспечивает более высокую плотность и однородность плотности ионов.

Влияние давления аргона оценивали в диапазоне 0,27–1,33 Па. Уменьшение рабочего давления уменьшало плотность ионов, однако улучшало однородность плазмы для всех конфигураций с магнитами и без них. При давлении аргона 0,27 Па неоднородность без магнитов была не хуже 10%, а с конфигурацией IV снизилась до 5,9%. Улучшение однородности плотности плазмы при уменьшении давления связано с увеличением длины свободного пробега ионов. Одновременно в центре камеры растет температура электронов с 4,5 эВ при 1,33 Па до 6,5 эВ при 0,27 Па без магнитов и от 4,0 эВ при 1,33 Па до 6,0 эВ при 0,27 Па с магнитами. В это время потенциал плазмы в центре камеры остается почти неизменным: 36–38 эВ с магнитами и 40–43 эВ без магнитов.

Влияние электромагнитов на характеристики плазмы сравнивали, когда в камере не было постоянных магнитов и когда использовали конфигурацию IV (рис. 2.7). Добавление поля электромагнитов увеличило плотность ионов в

фигураций IV и V этот промежуток был 28 мм, и использовали 14 пар магнитов. Были опробованы также и электромагниты в форме квадрата  $500 \times 500 \text{ мм}^2$ , размещенные вне камеры. Свойства плазмы измеряли зондом,двигающимся вдоль диаметра подложки на 15 мм выше ее поверхности (рис. 2.6).

Вначале влияние различных конфигураций постоянных магнитов рассматривали без включения аксиальных электромагнитов. Применение различных магнитных систем увеличивает ионный ток насыщения от 4 до 61% в зависимости от конфигурации. От этого же зависит

обоих случаях, как с постоянными магнитами, так и без них, возможно, из-за снижения подвижности электронов вдоль радиального направления. При определенных напряженностях магнитного поля наблюдались большие всплески плотности ионов.

Оценку достигнутой оптимизации магнитной системы проводили по равномерности травления пленки поликристаллического кремния толщиной 1 мкм, нанесенной на кремниевую подложку, покрытую пленкой окисла кремния толщиной 100 нм. Режим травления был: ВЧ мощность 600 Вт, давление аргона 0,67 Па, поток  $\text{Cl}_2$  30  $\text{см}^3/\text{мин}$ , смещение на подложке  $-250$  В. Результаты представлены на рис. 2.8.

Как следует из рис. 2.8, наивысшая скорость травления была достигнута при одновременном использовании и постоянных магнитов, и электромагнитов, а неравномерность травления была наилучшей: 3,6% при использовании только постоянных магнитов, тогда как без магнитов она была 5,5%. А при использовании и постоянных магнитов, и электромагнита неравномерность составила 7%.

Таким образом, было показано [17], что при использовании конфигурации IV постоянных магнитов неоднородность аргонной плазмы улучшилась с 10 до 5,9%. Включение электромагнита, однако, ухудшало однородность, но при этом плотность ионов была наивысшей, а потенциал плазмы и температура электронов становились наименьшими. Неравномерность травления пленки поликристаллического кремния была снижена с 5,5%, когда магнитов не было, до 3,6%, когда использовали постоянные магниты.

Кроме добавления слабого постоянного магнитного поля, созданного внешними катушками с током, в работах [18–20] исследовали влияние

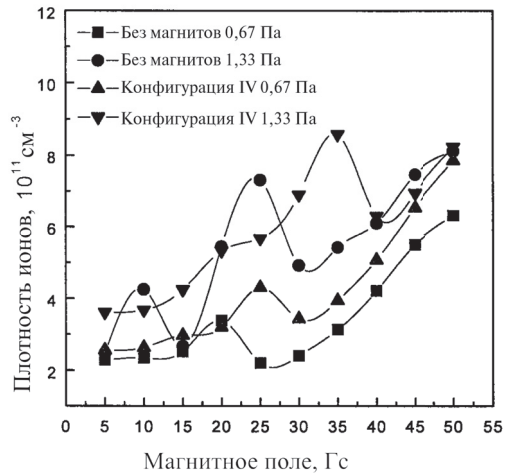


Рис. 2.7. Плотность ионов в зависимости от напряженности аксиального электромагнитного поля [17]

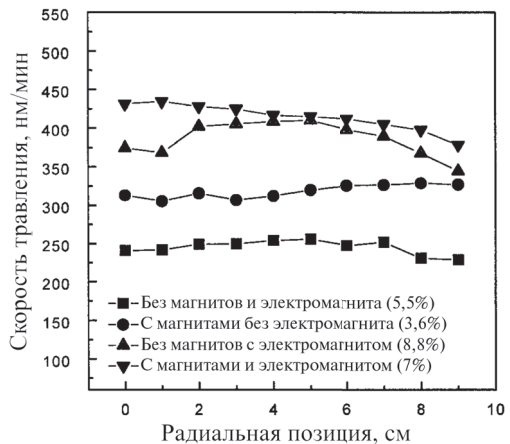
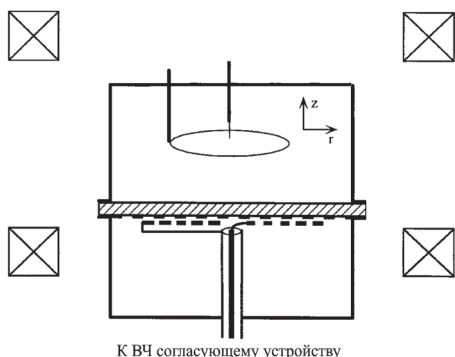


Рис. 2.8. Зависимость радиального распределения скорости травления пленки поликристаллического кремния при отсутствии и наличии постоянных магнитов в конфигурации IV и напряженности магнитного поля 20 Гс, созданного электромагнитами [17]



К ВЧ согласующему устройству

Рис. 2.9. Схема экспериментальной камеры с внешней антенной и дополнительными внешними катушками [18]

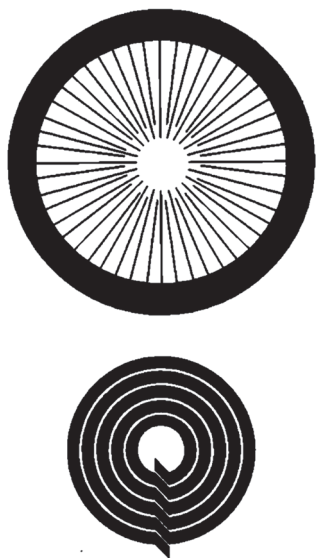


Рис. 2.10. Вид экрана Фарадея и катушки антенны [19]

ного здесь экрана Фарадея была предотвращена емкостная связь катушки антенны с плазмой, поэтому потенциал плазмы был пренебрежимо мал при отсутствии постоянного магнитного поля. При увеличении давления аргона и уменьшении питающей частоты до 6,8 МГц зависимость потенциала плазмы от магнитного поля становится монотонной (рис. 2.11).

Это более подробно показано на рис. 2.12, где результаты измерений получены при ВЧ мощности 100 Вт и давлении аргона 0,4 Па. Видна общая тенденция снижения потенциала плазмы с ростом частоты.

Подобная же тенденция видна на зависимостях потенциала плазмы от давления аргона (рис. 2.13).

на свойства внешней антенны величины частоты генератора, питающего антенну. Эксперименты проводили в камере из нержавеющей стали с внутренним диаметром 20 см и высотой 10,5 см (рис. 2.9). Однородное магнитное поле в камере 100 Гс создавалось двумя катушками с постоянным током. Диэлектрическое окно из кварца, отделяющее внешнюю антенну от вакуумной камеры, имело толщину 1,27 см и диаметр 7,5 см.

Катушка антенны содержала пять витков из медных полос толщиной 0,5 мм и шириной 6,35 мм. Ее внешний диаметр был 12,7 см, а внутренний 3,8 см. Для достижения высокой степени азимутальной симметрии создаваемого ВЧ поля была применена специальная форма витков (рис. 2.10). Катушка располагалась ниже кварцевого окна. Между ними был размещен электростатический экран (экран Фарадея) (рис. 2.10). Он был выполнен в виде печатной платы на фторопласте, в его проводнике было сделано много узких радиальных прорезей. Этот экран практически исключал емкостную связь между катушкой и плазмой.

Среднеквадратичная величина ВЧ потенциала плазмы, измеренного в центре разряда при различных ВЧ частотах и мощностях при давлении аргона 0,13 Па, показана на рис. 2.11. Потенциал плазмы, возбужденной при частоте 29 МГц, немонотонно рос при росте магнитного поля. Имелись локальные максимумы: первый при  $B = 0,5 \cdot B_c$  и второй при  $B = B_c$ , где  $B_c$  — магнитная индукция циклотронного резонанса, в данном случае  $B_c = 10,36$  Гс. Из-за примененного



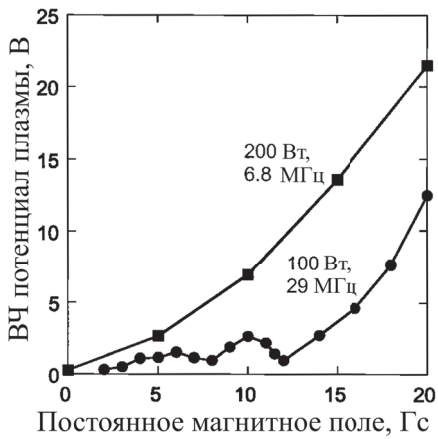


Рис. 2.11. Потенциал плазмы в центре разряда в зависимости от величины постоянного магнитного поля [18]

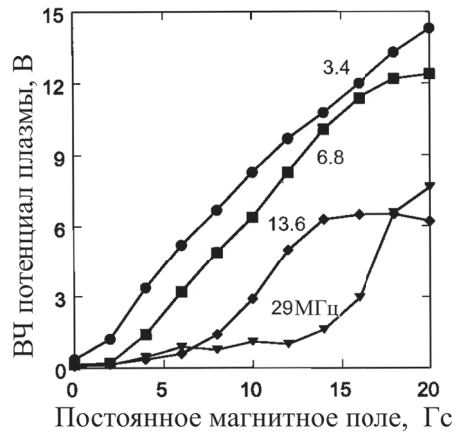


Рис. 2.12. ВЧ потенциал плазмы, измеренный в центре разряда при различных ВЧ частотах [18]

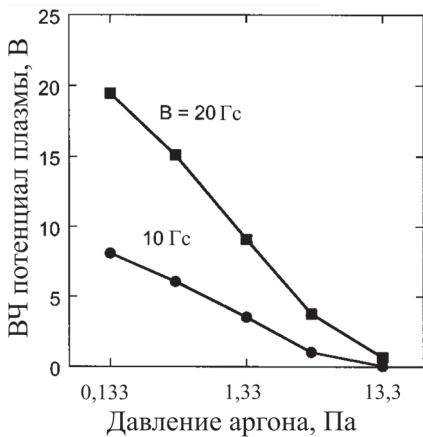


Рис. 2.13. ВЧ потенциал плазмы в зависимости от давления аргона [18]

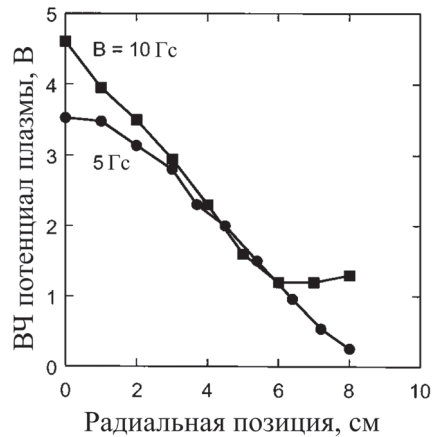
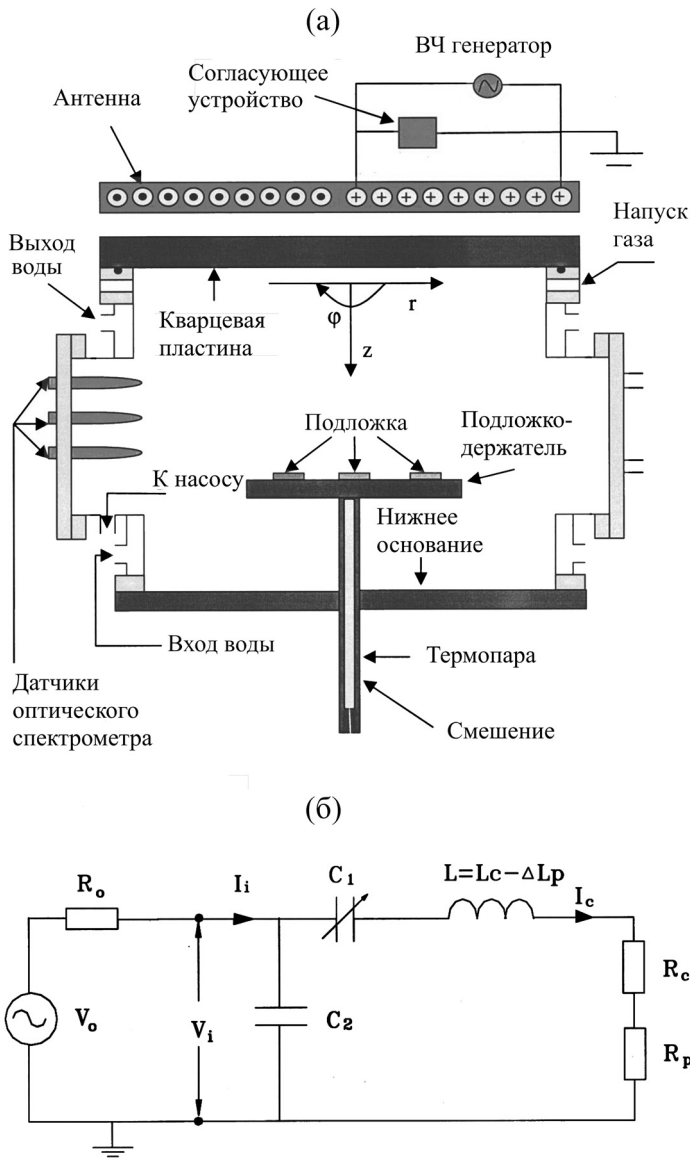


Рис. 2.14. Радиальное распределение ВЧ потенциала плазмы [18]

Введение слабого постоянного магнитного поля несколько улучшило равномерность плазмы (рис. 2.14) благодаря уменьшению ухода заряженных частиц из плазмы на стенки камеры.

Рассеивание ВЧ мощности зависит от распространения ВЧ излучения и его поглощения в плазме, которые из-за резонанса усиливаются на некоторых частотах, зависящих от геометрии камеры, параметров плазмы и величины магнитного поля. Эти же факторы влияют на величину потенциала плазмы, который, в свою очередь, определяется температурой электронов. Потенциал увеличивается при росте наложенного постоянного магнитного поля и снижается при росте давления аргона и частоты ВЧ мощности. Улучшение источника ИСР с помощью постоянного магнитного поля связано в основном с повышением эффективности передачи мощности [18–20]. Кроме того, оказалось, что при росте частоты температура электронов и их плотность снижают-



**Рис. 2.15.** Эскиз рабочей камеры (а) и эквивалентная электрическая схема (б) низкочастотного источника ICP [22]

ся [21], а эффективность передачи мощности не зависит от частоты в диапазоне 3,39–13,56 МГц [19].

Для оценки влияния величины частоты, подводимой к антенне источника ICP, на свойства разряда авторы работы [22] исследовали сравнительно низкочастотный источник ICP, работающий на частоте 500 кГц. Схема исследованного источника ICP приведена на рис. 2.15, где отмечены координатные оси, использованные при измерениях. Плазма формировалась в цилиндрической вакуумной камере из нержавеющей стали с внутренним диаметром 32 см и

длиной 20 см. Стенки камеры охлаждались проточной водой. Верхнее основание цилиндрической камеры было из плавленого кварца диаметром 35 см и толщиной 1,2 см, оно представляло собой диэлектрическое окно. Откачивалась камера со скоростью  $0,45 \text{ м}^3/\text{с}$  турбомолекулярным насосом до остаточного давления  $0,27 \text{ мПа}$ .

На 3 мм выше кварцевого окна располагалась 17-витковая планарная спиральная катушка, создающая электромагнитное поле. Катушка была выполнена из медной трубки диаметром 6,35 мм, по которой протекала охлаждающая вода. К ней через согласующее устройство подключили генератор переменного тока с частотой 500 кГц. Эквивалентная электрическая схема источника приведена на рис. 2.15, б. Здесь  $V_0$  и  $R_0$  – напряжение и сопротивление ненагруженного генератора, а  $V_i$  и  $I_i$  – напряжение и ток в согласующем устройстве,  $R_c$  и  $L_c$  – сопротивление и индуктивность катушки,  $\Delta L_p$  – частичное изменение индуктивности схемы из-за включения плазмы,  $R_p$  – сопротивление плазмы,  $I$  – ток в катушке и  $L = L_c - \Delta L_p$ . Конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  используются для согласования генератора с плазмой. В расчете мощности, переданной в плазму, мощность, рассеиваемая в катушке, определялась непосредственно. Авторы отмечают, что  $X = (V_i/I_c) \cdot \sin \phi = \omega L - (1/\omega C_1) = X_c - \Delta X_p$  – это общее сопротивление схемы, где  $X_c$  и  $\Delta X_p$  – сопротивления схемы без нагрузки и изменения сопротивления из-за включения плазмы соответственно,  $\phi$  – разность фаз между  $V_i$  и  $I_c$ .

Эксперименты проводили в широком диапазоне давлений аргона (0,3–133 Па). Заданное значение давления устанавливали до включения разряда.

Полученные изменения значения параметров представлены на рис. 2.16. Процесс начинался в точке 1, соответствующей слабому Е-режиму, поддерживаемому падением потенциала между плазмой и внешней катушкой. Разряд оставался слабым до точки 2. Соответствующее увеличение мощности  $P_p$  приводило к резкому переходу к большой плотности плазмы и визуально более яркому свечению при Н-режиме (точка 3). Как ясно видно из рис. 2.16, переход Е → Н сопровождается соответствующим ростом величины сопротивления плазмы  $R_p$  и значительным снижением тока в катушке  $I_c$  и сопротивления плазмы  $\Delta X_p$ . Далее мощность непрерывно увеличивается, и разряд переходит в Н-режим. По мере увеличения подводимой

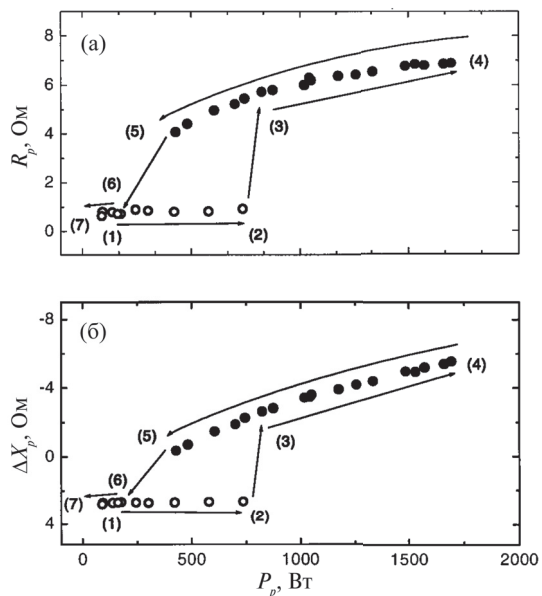
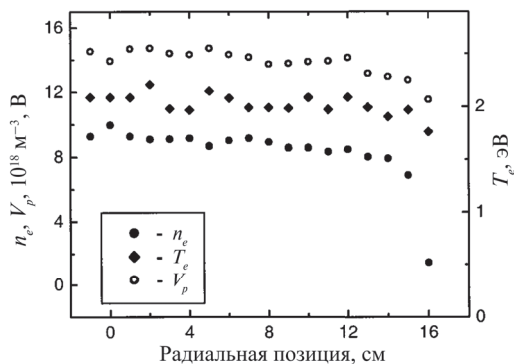
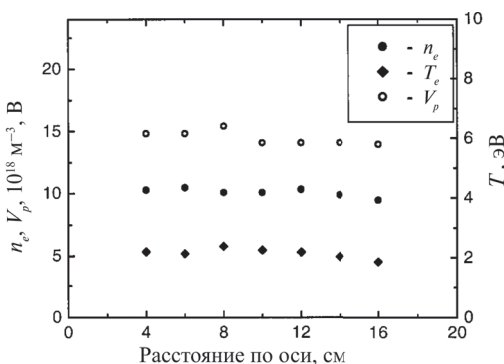


Рис. 2.16. Сопротивление плазмы  $R_p$  (а) и изменения сопротивления из-за включения плазмы  $\Delta X_p$  (б) в зависимости от мощности, поглощенной плазмой при давлении  $p_0 = 1,6 \text{ Па}$  [22]



**Рис. 2.17.** Радиальный профиль распределения электронной плотности  $n_e$ , их температуры  $T_e$  и потенциал плазмы  $V_p$  при давлении 2,9 Па в Н-режиме разряда в аргоне. ВЧ мощность 1,7 кВт [22]



**Рис. 2.18.** Аксиальный профиль распределения электронной плотности  $n_e$ , их температуры  $T_e$  и потенциал плазмы  $V_p$  при давлении 2,9 Па в Н-режиме разряда в аргоне. ВЧ мощность 1,7 кВт [22]

как одновитковую вторичную обмотку трансформатора с воздушным сердечником. Эта модель позволяет просто и эффективно конструировать ВЧ схему питания источника ИСР и способствует пониманию общих свойств этого источника.

Локальные параметры плазмы исследовали зондом Лэнгмюра, который двигали внутри камеры, получая профиль распределения (рис. 2.17). Из этих профилей можно заключить, что плазма высокой плотности ( $n_e \sim 9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ) и однородности заполняет всю камеру. Неоднородность плазмы в пределах радиуса 15 см не превышала 8%. Потенциал плазмы 13–17 В был достаточно низким, температура электронов составляла  $\sim 2,5$  эВ.

Осевое распределение тех же параметров, измеренное при радиусе, равном нулю, в тех же условиях что и на рис. 2.17, показано на рис. 2.18. Видно, что величины этих параметров снижаются вдоль оси.

мощности величина  $\Delta X_p$  уменьшается, в то время как сопротивление плазмы  $R_p$  монотонно растет (рис. 2.16).

После достижения точки 4, где  $P_p$  максимальна и ток катушки минимален, снижали подводимую мощность разряда. Разряд еще остается в Н-режиме даже после прохождения точки 3, соответствующей первоначальному переходу  $E \rightarrow H$ . Обратный переход  $H \rightarrow E$  происходит при токе в катушке  $I_c$  (точка 5), который меньше, чем при переходе  $E \rightarrow H$ . Точка 6 соответствует E-режиму. Прекращение разряда происходит в точке 7. Авторы отметили, что разряд имеет два стабильных состояния, если  $220 \text{ Вт} < P_p < 840 \text{ Вт}$ . В этом случае два набора различных величин электрических параметров соответствуют одной подводимой мощности. Описанный процесс цикличен и хорошо воспроизводим. Общие электрические параметры  $R_p$  и  $\Delta X_p$  можно использовать, чтобы получить усредненные параметры плазмы. Для этого можно использовать трансформаторную модель, интерпретирующую измеренные электрические параметры, рассматривая ВЧ катушку как первичную обмотку, а плазму

Работа источника ИСР на сравнительно низкой частоте (500 кГц) имеет несколько преимуществ: слабый скин-эффект, связанный с потерями мощности, легкая настройка согласующего устройства, высокая эффективность передачи мощности в плазму, легкая диагностика и низкое напряжение на концах катушки. Кроме того, у пониженной частоты длина волны много больше длины проводника катушки, чем исключается возникновение стоячей волны, присущей работе катушки на высокой частоте (13,56 МГц). Это открывает возможности для увеличения масштаба источника ИСР и применения его для обработки подложек большого размера без потери однородности плазмы и плотности тока ионов [23].

Другим важным преимуществом низкочастотного источника ИСР является широкий диапазон рабочих давлений (0,04–120 Па), который многообещающ для мультифункциональных технологических процессов в полупроводниковом производстве. Действительно, работа при низких давлениях благоприятна для глубокого анизотропного травления, тогда как высокие давления идеальны при создании рисунка на пленке фоторезиста.

Таким образом, при низких подводимых мощностях источники ИСР работают в режиме электростатической связи при низкой плотности плазмы, обычно называемом Е-режим [24]. С ростом подводимой мощности при некоторой пороговой величине происходит переход в режим индуктивной связи с высокой плотностью плазмы – Н-режим. Переход между этими двумя режимами сопровождается резким изменением параметров плазмы и электрических параметров источника ИСР. Более того, переходы  $E \rightarrow H$  и  $H \rightarrow E$  происходят при различных величинах тока в катушке антенны, поэтому при циклических изменениях подводимой мощности возникают нелинейные гистерезисные петли [22; 24]. Причем нелинейность характеристик плазмы приводит к появлению сильной второй гармоники тока в антенне даже при низких подводимых мощностях.

Авторы [22] продемонстрировали также, что низкочастотный источник очень эффективен при осаждении тонких пленок методом PECVD (см. далее главу 3, раздел 3.2) и при плазмохимическом азотировании (см. далее главу 5). При этом в процессе нанесения алмазоподобных пленок плотность плазмы является ключевым фактором. Действительно, заметное улучшение свойств пленок произошло при переходе от Е к Н-режиму, который сопровождался значительным ростом плотности плазмы. Результаты, полученные авторами, делают низкочастотный источник ИСР с планарной катушкой очень привлекательным для промышленного применения.

Н-режим демонстрирует яркое излучение, низкий потенциал плазмы, низкую температуру электронов, низкую их среднюю энергию и относительно высокую плотность электронов ( $\sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$ ). Многие авторы [5; 16; 22; 24] исследовали резкий переход, в ходе которого Е-режим резко превращается в Н-режим при определенной ВЧ мощности. Поэтому, когда наблюдается плавный переход, предполагают, что после Е-режима следует гибридный режим, уже после которого реализуется Н-режим. Несмотря на это, наблюдаются гистерезисные эффекты: переход  $E \rightarrow H$  происходит при других, чем переход  $H \rightarrow E$ , параметрах плазмы.

В работе [25] тоже исследовали гистерезисные переходы  $E \rightarrow H$  и  $H \rightarrow E$  в аргонной плазме источника ИСР. Авторы установили, что ширина гистерезиса

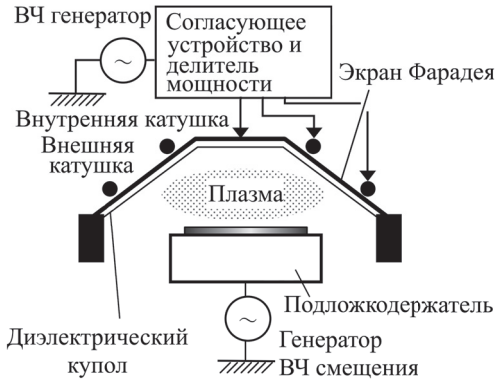


Рис. 2.19. Схема исследуемого источника ИСП [26]

ниже определенного предела, уже невозможно получить Н-режим при любом давлении.

В обычных источниках ИСП с внешней антенной, предназначенных для обработки подложек диаметром, например, до 300 мм, диаметр фланца окна составляет 300–500 мм. Из-за этого приходится использовать для окна толстый диэлектрик, например кварц толщиной 20–50 мм, чтобы он выдерживал атмосферное давление. Это ослабляет связь антенны с плазмой. Использование куполообразного окна из прочной керамики позволяет снизить толщину диэлектрика, что и использовали в работе [26]. Схема источника представлена на рис. 2.19.

ВЧ генератор (13,56 МГц) через согласующее устройство и делитель мощности был подключен к двум катушкам, внутренней и внешней, размещенным над диэлектрическим ( $Al_2O_3$ ) куполом. Эти катушки генерируют индуктивно связанную плазму большой плотности. Варьируя в них соотношение

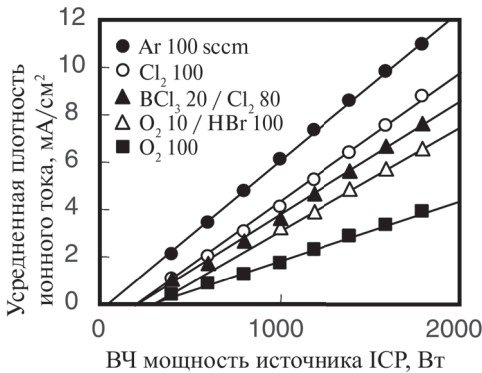


Рис. 2.20. Плотность ионного тока, усредненная по площади подложки диаметром 200 мм, для различных газов в зависимости от подводимой ВЧ мощности [26].

зисной петли уменьшается с ростом мощности разряда и при некоторой высокой мощности даже исчезает. А при фиксированной мощности разряда переходы  $E \rightarrow H$  и  $H \rightarrow E$  тем более заметны, чем выше давление аргона. Чем выше мощность разряда, тем шире диапазон давлений газа, при которых возможен Н-режим. И чем ниже мощность разряда, тем уже необходимый для поддержания Н-режима диапазон давлений газа. Когда мощность разряда становится

ниже определенного предела, уже невозможно получить Н-режим при любом давлении. В обычных источниках ИСП с внешней антенной, предназначенных для обработки подложек диаметром, например, до 300 мм, диаметр фланца окна составляет 300–500 мм. Из-за этого приходится использовать для окна толстый диэлектрик, например кварц толщиной 20–50 мм, чтобы он выдерживал атмосферное давление. Это ослабляет связь антенны с плазмой. Использование куполообразного окна из прочной керамики позволяет снизить толщину диэлектрика, что и использовали в работе [26]. Схема источника представлена на рис. 2.19. ВЧ генератор (13,56 МГц) через согласующее устройство и делитель мощности был подключен к двум катушкам, внутренней и внешней, размещенным над диэлектрическим ( $Al_2O_3$ ) куполом. Эти катушки генерируют индуктивно связанную плазму большой плотности. Варьируя в них соотношение токов с помощью делителя мощности, можно контролировать распределение плазмы по площади подложки. Обычно в других разработках [19] экран Фарадея, как правило, заземлен, чтобы предотвратить электростатическую связь между катушками и плазмой. Здесь же экран Фарадея, который покрывает керамический купол, изолирован от земли и к нему через делитель мощности подключен ВЧ генератор, иными словами, на экран подано ВЧ смещение. Высокое ВЧ напряжение на экране Фарадея контролирует энергию ионов, бомбардирующих внутреннюю поверхность диэлектрического купола, чем достигается очистка его внутренней по-

верхности. Все эксперименты проводили при потоке газов  $100 \text{ см}^3/\text{мин}$  и давлении  $1,0 \text{ Па}$ .

Описанный источник плазмы при низких напряжениях на экране Фарадея имел характеристики, обычные для источников ICP. То есть плотность ионного тока росла с ростом ВЧ мощности разряда в различных газах (рис. 2.20). На рис. 2.20 приведена плотность ионного тока, усредненная по площади подложки диаметром  $200 \text{ мм}$ , для различных газов в зависимости от подводимой ВЧ мощности.

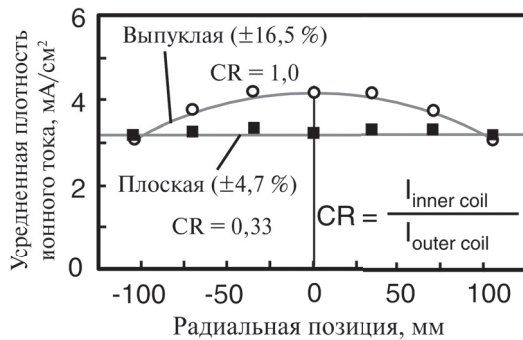
Удвоенная амплитуда напряжения ВЧ смещения на экране Фарадея ( $V_{mn}$ ) была менее  $50 \text{ В}$ . Такие простые зависимости без скачкообразных переходов благоприятны для контролируемого проведения процесса травления.

На рис. 2.21 показано распределение плотности плазмы при двух соотношениях токов в катушках. Видно, что однородность распределения меняется от  $\pm 4,7$  до  $\pm 16,5\%$  при изменении соотношения токов в катушках от  $0,33$  до  $1,0$ .

Исследование влияния ВЧ смещения экрана на плотность электронов в плазме и их температуру показало, что плотность электронов уменьшается, а их температура увеличивается с ростом  $V_{mn}$ . Одновременно увеличивается доля высокоэнергичных электронов в плазме. По мнению авторов [26], эти результаты связаны с увеличением доли емкостной связи с плазмой. Емкостно связанная плазма (ССР) генерируется в слое пространственного заряда около поверхности купола высоким ВЧ напряжением на экране Фарадея. В то же время высокое ВЧ напряжение на экране Фарадея увеличивает толщину этого слоя и тем самым увеличивает потери энергии ионов, пересекающих слой. Это приводит к снижению общей плотности плазмы, созданной в основном индуктивной связью. Описанный источник может рассматриваться как гибридный источник ICP/ССР.

В большинстве процессов травления нелетучих материалов контроль температуры электронов, то есть контроль диссоциации молекул, не так важен, так как травление определяется просто потоком ионов, плотностью продуктов реакции, температурой подложки и коэффициентом прилипания продуктов реакции к подложке. Однако для некоторых процессов травления необходимо управлять диссоциацией путем изменения температуры электронов. В данном источнике это возможно, используя зависимость температуры электронов от  $V_{mn}$ .

Во время нанесения пленок внутренняя поверхность купола находится под нулевым или малым потенциалом смещения, но условия травления меняются, когда  $V_{mn}$  повышают выше  $300 \text{ В}$ . В этом случае возможно травление внутренней поверхности купола, выполненного из окисла алюминия, которое



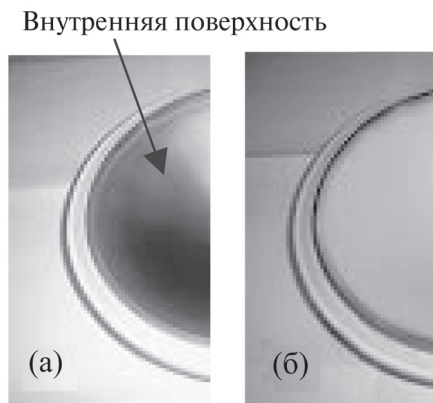
**Рис. 2.21.** Управление распределением плотности плазмы изменением соотношения токов в катушках (газ  $\text{Cl}_2$ , давление  $1,0 \text{ Па}$ , ВЧ мощность  $1 \text{ кВт}$ ) [26]

поддерживает чистоту его поверхности. Авторы [26] использовали  $V_m$  более 600 В почти во всех процессах травления, так как это обеспечивает большую плотность плазмы и достаточно высокие скорости очистки купола. Это преимущество данного источника перед обычными источниками ICP, в которых поверхности стенок камеры покрываются осадком распыленного материала.

Иногда для очистки от этих осадков, содержащих элементы Si, O и C, используются фторсодержащие газы (т.е.  $CF_4$  и  $SF_6$ ) и кислород. Однако при травлении нелетучих материалов осадок не может быть удален плазменной очисткой в этих газах, так как осадок не реагирует с галогенными газами без высокоэнергичной ионной бомбардировки. Предложенный источник может травить пленку из нелетучего материала на внутренней поверхности купола, если использовать высокие напряжения ВЧ смещения на экране Фарадея. Для этого существует два способа использования смещения на экране Фарадея. Первый заключается в том, чтобы предотвратить осаждение на поверхность купола во время проведения рабочего процесса травления, второй состоит в удалении этого осадка во время отдельной плазменной очистки.

Первый способ авторы осуществили, подавая на экран Фарадея ВЧ смещение с удвоенной амплитудой напряжения 600 В. В результате удалось предотвратить появление осадка на внутренней стороне купола. Авторы отмечают хорошую воспроизводимость этого процесса [26]. В тех же условиях, но без ВЧ смещения на экране Фарадея скорость травления начинала снижаться из-за образования осадка уже после травления 5–6 подложек (рис. 2.22, а).

Второй способ проиллюстрирован на рис. 2.22, б. Подав на экран Фарадея ВЧ смещение  $V_m = 2000$  В, удалось удалить нелетучий осадок на внутренней стороне купола, нанесенный во время предыдущих циклов травления пленок золота на 25 подложках.



**Рис. 2.22.** Удаление осадка с диэлектрического купола, полученного при травлении 25 подложек с пленкой золота. Вид поверхности купола: а – до очистки и б – после очистки [26]. Режим очистки: газ  $Cl_2$ , давление 1,0 Па, ВЧ мощность 1,5 кВт и  $V_m = 2000$  В

Таким образом, использование куполообразного окна из прочной керамики позволяет снизить толщину используемого диэлектрика, но приводит к значительному увеличению расстояния между потолком окна и подложкой. Кроме того, авторам [26] удалось прояснить роль экрана Фарадея и показать полезность подачи на него ВЧ смещения, с помощью которого можно сохранять чистой внутреннюю поверхность диэлектрического купола даже после многих процессов травления материалов, образующих нелетучие продукты реакций. В результате была достигнута высокая воспроизводимость процессов травления различных материалов, таких как Pt, Ru, Ir, NiFe, Au, Mo, Ta,  $Al_2O_3$ ,  $HfO_2$ ,  $ZrO_2$  и ИТО.



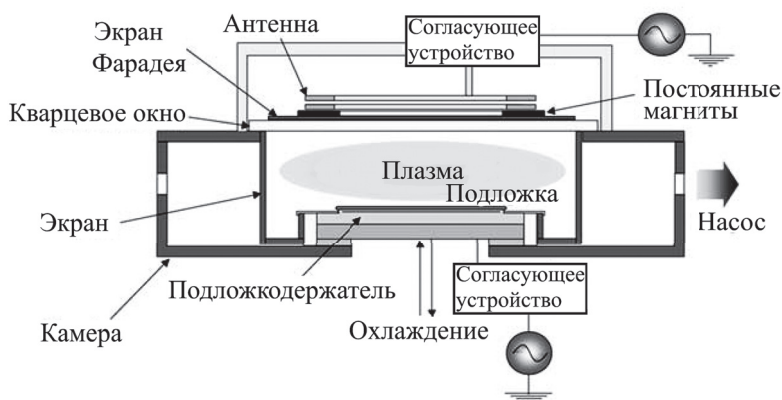


Рис. 2.23. Схема камеры для травления сегнетоэлектрика [27]

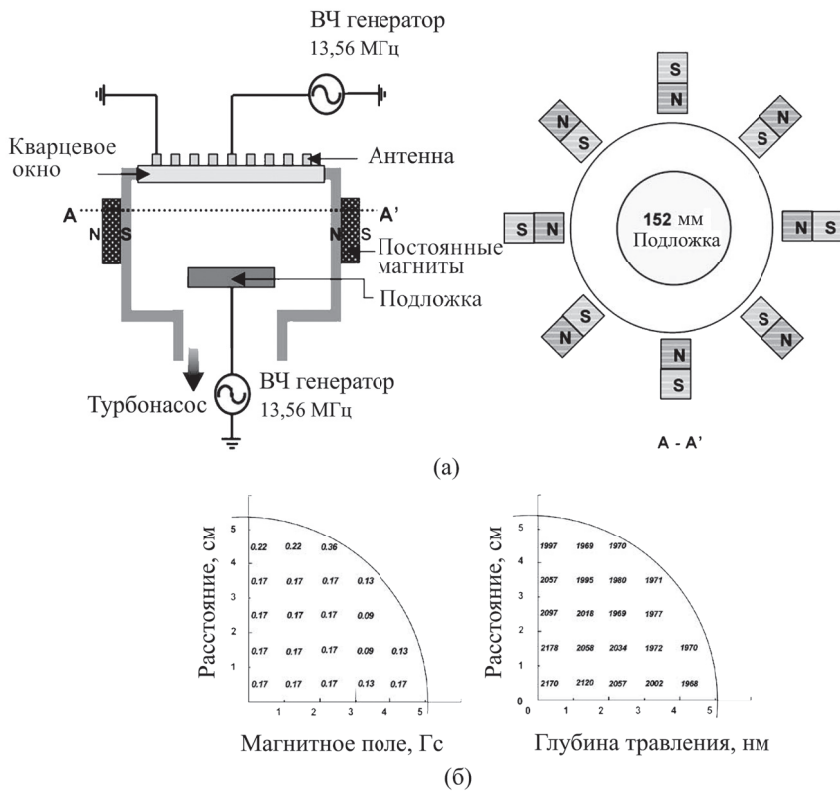
Экран Фарадея, на который подано ВЧ смещение, использовали и в работе [27] для травления пьезоэлектрических пленок PZT для MEMS. Авторы [27] использовали установку, разработанную фирмой Semiconductor Equipment Division 2, для серийного производства, состоящую из нескольких рабочих камер. Камера для травления была оснащена источником плазмы Inductively Super Magnetron (ISM), который создавал плазму высокой плотности при низком давлении (рис. 2.23). ВЧ антенна была установлена снаружи сверху камеры травления так, что ВЧ мощность через кварцевое окно вводилась в камеру, где создавала плазму. Однородность травления достигалась оптимизацией положения постоянных магнитов (рис. 2.23).

Экран Фарадея, предусмотренный между антенной и кварцевым окном, с помощью подачи на него ВЧ напряжения управлял адгезией продуктов травления, осевших на кварцевом окне. Подложку укладывали на изолированный от корпуса камеры держатель. Температура подложки поддерживалась нагретым гелием, подаваемым к ее обратной стороне. Энергию ионов меняли, регулируя подаваемую к подложке ВЧ мощность. Поскольку травлению подвергались материалы, образующие нелетучие продукты, то продукты их травления оседали на поверхностях экранов в камере. Температуру этих экранов с помощью нагревателей поддерживали постоянной, обеспечивая стабильность

Таблица 2.1

Сравнение свойств предложенного авторами источника ISM и обычного источника ИСР [27].

Свойство	ISM	Источник ИСР
Плотность плазмы, $\text{см}^{-3}$	$1 \cdot 10^{10} - 1 \cdot 10^{11}$	$5 \cdot 10^9 - 5 \cdot 10^{10}$
Рабочее давление, Па	$0,07 < P < 7$	$0,5 < P < 50$
Воспроизводимость, стабильность	Травление при низком давлении обеспечивает отсутствие обратного осаждения, что улучшает воспроизводимость	Травление при повышенном давлении приводит к обратному осаждению



**Рис. 2.24.** Схема источника ICP с постоянными магнитами (а), использованного в работе [29]; распределение магнитного поля и скорости травления SiC по площади подложки диаметром 100 мм (б)

и воспроизводимость процесса. В таблице 2.1 показаны отличия обычного источника ICP от использованного в данной работе ISM.

Было показано, что разработанные авторами [27] оборудование и технология травления трехслойных структур Pt/PZT/Pt для MEMS пригодны для применения в серийном производстве (см. главу 4).

В своей предыдущей работе [28] авторы работы [29] выяснили, что высокие скорости травления SiC могут быть получены с помощью источника ICP, улучшенного постоянными магнитами. Схема такого источника приведена на рис. 2.24. Четыре пары постоянных магнитов были размещены симметрично вне вакуумной камеры. Создаваемая ими напряженность магнитного поля была примерно 2000 Гс. Спиральная катушка антенны состояла из пяти витков, покрытых золотом. К ней подводили ВЧ мощность (13,56 МГц) от 1000 до 1800 Вт, которая передавалась через кварцевое окно толщиной 12,5 мм в камеру для генерации плазмы. Отдельный источник питания с частотой 13,56 МГц был подключен к подложке для формирования постоянного потенциала самосмещения  $-150$  В. В отличие от предыдущей работы [28], где травление вели в плазме  $SF_6$ , здесь авторы повысили эффективность трав-

ления добавлением к этому газу кислорода, долю которого в смеси меняли от 0 до 50%. Для создания плазмы  $SF_6/O_2$  в камеру напускали смесь газов при суммарном потоке  $60 \text{ см}^3/\text{мин}$ . Давление  $SF_6$  варьировали от 1,33 до 6,7 Па. Подложку не нагревали, ее диаметр был 100 мм.

На рис. 2.24, б показаны распределения напряженности магнитного поля, сформированного постоянными магнитами, и скорости травления SiC в использованном источнике плазмы. Как видно из рисунка, магнитное поле вблизи подложки близко к нулю и однородность скорости травления не хуже 5%. Действительно, отражающее магнитное поле значительно увеличивает скорости травления и стабильность плазмы, как было показано в работе [28]. Применение такого источника для плазмохимического травления описано в главе 4.

В работе [30] продемонстрированы преимущества антенн с многовитковыми катушками по сравнению с одновитковыми. Кварцевая пластина, являющаяся диэлектрическим окном, отделяла вакуумную камеру от катушки антенны. В своей работе авторы [30] сначала испытали работу нескольких катушек, расположенных над диэлектрическим окном и соединенных параллельно, как показано на рис. 2.25. Все три катушки формировали плазму. На рис. 2.26 показана измеренная индуктивность и плотность плазмы как функции числа катушек. Этот график показывает, что увеличение числа катушек приводит к снижению общей индуктивности, но одновременно падает плотность плазмы. Это, возможно, связано с взаимным подавлением электромагнитного поля, излучаемого соседними катушками.

Чтобы решить эту проблему, была предложена схема источника MSC-ICP, показанная на рис. 2.27, где несколько спиральных катушек были соединены параллельно без того, чтобы каждая катушка подавляла электромагнитное поле от другой катушки, а формировалось суммарное электромагнитное поле. Это так называемые многозаходные спирали.

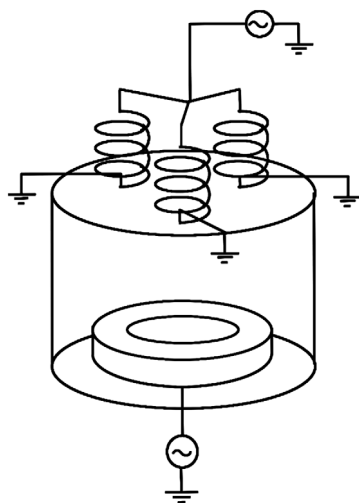


Рис. 2.25. Конфигурация из нескольких катушек, соединенных параллельно [30]



Рис. 2.26. Индуктивность нескольких катушек, соединенных параллельно, и плотность плазмы в зависимости от числа катушек [30]. Условия эксперимента: поток аргона  $30 \text{ см}^3/\text{мин}$ , его давление 1,3 Па, ВЧ мощность разряда 1000 Вт

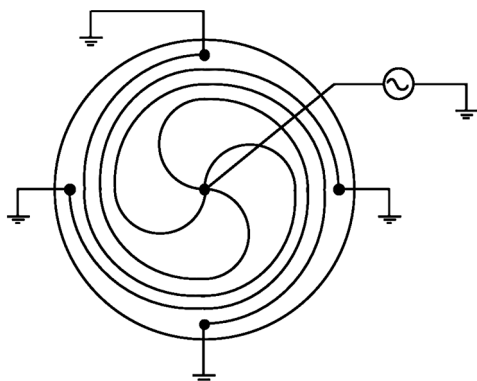


Рис. 2.27. Предложенная авторами многозаходная спиральная антенна [30]

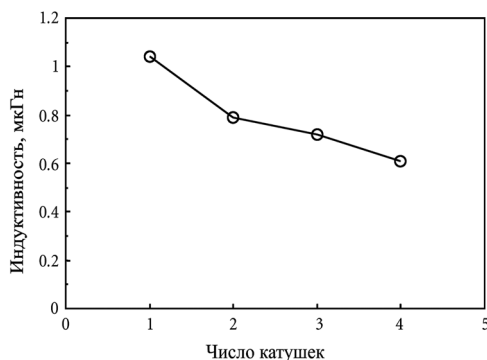


Рис. 2.28. Зависимость индуктивности антенны от числа многозаходных спиральных катушек в ней [30]

Использование нескольких катушек в виде многозаходной спирали делает возможным создавать антенны с существенно меньшей индуктивностью, чем в обычной схеме с одной катушкой [30]. Чем больше катушек задействовано в антенне, тем меньше индуктивность антенны (рис. 2.28). Индуктивность четырех спиральных катушек составляет 57% от индуктивности одиночной катушки.

Таким образом, сравнение параметров антенн с одной и несколькими катушками показало, что несколько катушек обеспечивают в 2–4 раза более плотную плазму, что объясняется более эффективной передачей ВЧ мощности в плазму, чем у одиночной катушки [30]. При этом однородность плазмы над кремниевой подложкой диаметром 200 мм была не хуже  $\pm 5\%$ .

Уже в работе [31] использовали индуктор, погруженный в магнитную систему из материала с высокой магнитной проницаемостью, чтобы усилить магнитную связанность антенны и плазмы и тем самым улучшить плотность и однородность плазмы. Кроме того, провели сравнение наружных и внутренних антенн с ферритовыми сердечниками [31; 32], разработав источник плазмы новой конструкции, который авторы назвали magnetic-pole-enhanced plasma source (MaPE-ICP), то есть источник ICP с магнитной поддержкой.

Благодаря высокой магнитной проницаемости материала полюсов магнитное поле внутри них стремится к нулю. В этом случае магнитная система увеличивает магнитную индукцию приблизительно в 4 раза вне системы, вблизи подложки. То есть она концентрирует магнитный поток у подложки и уменьшает потери в обратном ходе силовой линии. К тому же она обеспечивает высокую гибкость процесса, так как магнитное поле может быть сконцентрировано в заданной рабочей зоне. Поскольку таким способом плотность плазмы и ее распределение можно контролировать, однородность плазмы может быть распространена на большую площадь.

Масштабирование диэлектрического окна до больших площадей, как уже отмечалось, является сложной проблемой, так как, помимо его функции как передатчика мощности, оно еще должно быть герметичным и прочным. Это, в свою очередь, требует утолщения окна, чтобы оно было способно противостоять атмосферному давлению. Прямым последствием этого является

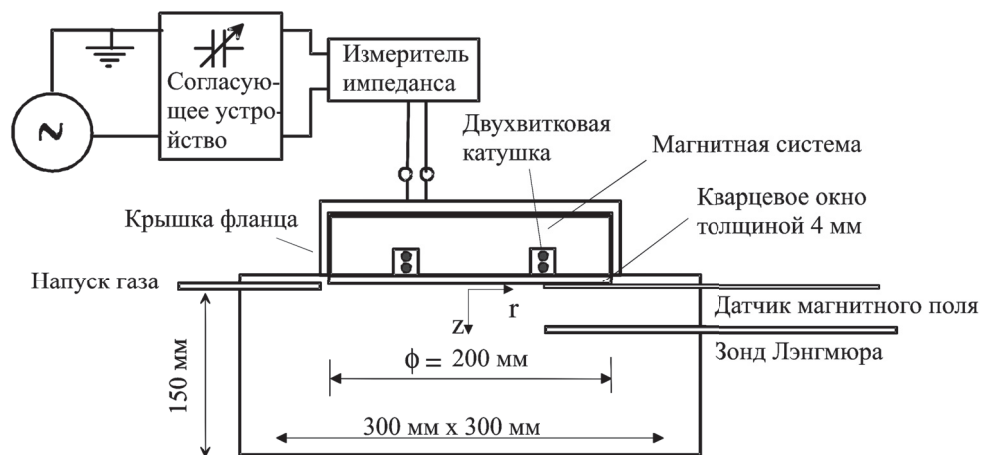


Рис. 2.29. Схема источника МаРЕ-ИСР [31]

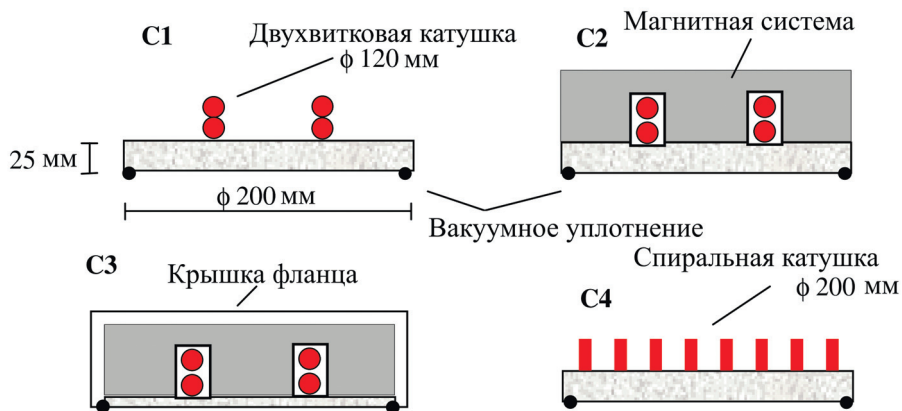
резкое снижение эффективности передачи ВЧ мощности, происходящее из-за увеличения расстояния между катушкой и плазмой.

В работе [31] предложено альтернативное решение. В ней уменьшение толщины диэлектрического окна достигнуто включением катушки и магнитной системы в герметизирующий фланец из нержавеющей стали. Ключевое преимущество использования твердой и прочной магнитной системы состоит в том, что она может работать вакуумным уплотнением, позволяя легко увеличивать площадь всей системы. Таким образом, к диэлектрическому окну уже нет требований высокой механической прочности, оно работает только как защитный барьер между катушкой и плазмой. Поэтому его толщина может быть уменьшена и тем самым увеличена индуктивная связь антенны и плазмы. Магнитная система устраняет магнитное поле на обратной стороне катушки, поэтому там не происходит потерь плазмы и мощности разряда. Для эффективной работы такой системы необходимо, чтобы материал магнитопровода имел высокую магнитную проницаемость на высоких частотах и выдерживал высокие рабочие температуры.

Схема источника МаРЕ-ИСР диаметром 200 мм приведена на рис. 2.29. Вакуумная камера из нержавеющей стали имела прямоугольную форму с размерами  $300 \times 300 \times 150$  мм<sup>3</sup>. В верхней части камеры было отверстие диаметром 200 мм, в котором располагалась катушка антенны и диэлектрическое окно. К водоохлаждаемой катушке через согласующее устройство был подключен генератор с частотой 13,56 МГц. Газ напускали через трубку, расположенную у диэлектрического окна.

Магнитная система имела диаметр 200 мм и толщину 45 мм. Магнитная проницаемость ее материала  $\mu = 14$  на частоте 5 МГц. Это был магнитомягкий материал с низкими потерями и высоким электрическим сопротивлением (более  $10^5$  Ом · см). Чтобы исследовать влияние магнитной системы на свойства плазмы, авторы опробовали четыре конфигурации антенны (рис. 2.30):

- С1 – двухвитковая цилиндрическая катушка диаметром 120 мм и с толстым (25 мм) диэлектрическим окном;



**Рис. 2.30.** Различные конфигурации антенн: C1 – двухвитковая цилиндрическая катушка диаметром 120 мм и с толстым диэлектрическим окном толщиной 25 мм; C2 – двухвитковая цилиндрическая катушка, погруженная в магнитную систему над толстым диэлектрическим окном; C3 – двухвитковая цилиндрическая катушка в МаРЕ конфигурации, то есть с магнитной системой и тонким диэлектрическим окном, оснащенная герметизирующим корпусом; C4 – классическая конфигурация с индуктором в виде планарной спиральной катушки и толстым диэлектрическим окном [31]

- C2 – двухвитковая цилиндрическая катушка диаметром 120 мм, вложенная в магнитную систему, с толстым диэлектрическим окном;
- C3 – двухвитковая цилиндрическая катушка диаметром 120 мм, вложенная в магнитную систему, с тонким (4 мм) диэлектрическим окном; эта конфигурация была снабжена крышкой-фланцем для вакуумного уплотнения; эту конфигурацию авторы назвали МаРЕ-ICP;
- C4 – четырехвитковая планарная спиральная катушка диаметром 200 мм, выполненная из широкой 20-мм медной ленты, эта конфигурация использовалась для сравнения.

Катушки с малым количеством витков одним своим выводом были соединены к корпусу камеры, чтобы минимизировать емкостную связь с плазмой. Все измерения свойств плазмы были выполнены в 3 мм от диэлектрического окна.

Как это типично для источников ICP, токи в антеннах и напряжения на них росли с увеличением подводимой ВЧ мощности. Наличие магнитной системы (конфигурация C2) снижало почти вдвое ток в катушке, необходимый для поддержания разряда, и слабо сказывалось на величине потенциала катушки. Сохранение величины потенциала на катушке, то есть сохранение степени емкостной связи, означало, что загрязнение подложки материалом, расплывшим с диэлектрического окна, не увеличилось из-за наличия магнитной системы. Магнитная система снизила ток и, соответственно, в 4 раза резистивные потери в согласующей системе, чем увеличила эффективность передачи мощности.

Интенсивность магнитного поля росла при росте ВЧ тока в антеннах из-за наличия концентратора для конфигураций C1 и C2 (рис. 2.31). Это говорит