

ФИЗИКА

УДК 533.9.01

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОХОЖДЕНИЯ ЭНЕРГИИ СВЧ-ПОЛЯ В ПЛАЗМУ ВОЗБУЖДАЕМОГО РАЗРЯДА

*д-р техн. наук С.В. БОРДУСОВ, С.И. МАДВЕЙКО**(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)*

Изучение вопроса о проникновении СВЧ-волны ($f = 2,45 \pm 0,05$ ГГц) в центр возбуждаемого ею газового разряда в кислороде в плазмотроне, построенном на базе резонатора прямоугольного типа, проводилось применительно к задаче СВЧ-плазмохимической обработки кремниевых пластин. Исследование выполнялось тремя независимыми методами: с использованием термомпар; по данным показаний введенного в разряд «активного зонда»; измерением электрическими зондами электропроводности пространства, изолированного от плазменного объема. Результаты проведенных экспериментов указывают на то, что при уровнях плотности потока СВЧ-мощности в разрядном объеме порядка $0,06 \dots 0,08$ Вт/см³ происходит проникновение СВЧ-поля в объем зоны разряда. Этот эффект необходимо учитывать при организации процессов плазмохимической обработки (влияние СВЧ-поля на параметры обрабатываемых структур, «загрузочный» эффект, проектирование распределенной системы подвода СВЧ-энергии к зоне обработки, формирующуюся определенную структуру распределения СВЧ-поля в зоне плазмообразования и т.д.) и анализе результатов обработки материалов и структур, подверженных воздействию СВЧ-энергии.

Введение. В процессе проведения экспериментов по удалению фоторезиста с поверхности кремниевых пластин при групповой обработке установлен специфический характер проявления эффекта «загрузки». Это является следствием как частичного поглощения поступающей в область СВЧ-резонатора мощности электромагнитной волны материалом с высоким значением тангенса угла диэлектрических потерь (кремний), так и изменения добротности резонатора. Поэтому по мере увеличения количества обрабатываемых в камере плазмотрона полупроводниковых пластин необходимо увеличивать мощность подводимого СВЧ-излучения. Поскольку СВЧ-магнетроны средней мощности технологического назначения имеют максимальную мощность порядка $0,8 \dots 1,5$ кВт, возникает необходимость поиска стимулирующих воздействий на процесс групповой СВЧ-плазмохимической обработки материалов.

В связи с требованием повышения эффективности промышленного производства микроэлектронных устройств актуальной является задача разработки плазменных источников, обеспечивающих проведение процессов на обрабатываемых поверхностях большой площади и с высокими технологическими характеристиками [1 – 3]. Этим требованиям отвечают СВЧ-плазменные разряды, основным преимуществом которых является возможность формирования плазменных объемов со сравнительно высокой электронной плотностью ($n_e \approx 10 \cdot 10$ см⁻³) и большого диаметра (до $15 \dots 20$ см). Достоинством этих разрядов является также отсутствие электродов, исключающее загрязнение реакционной среды и бомбардировку обрабатываемых материалов энергетическими ионами. Важно и более простое согласование разрядного объема с источником СВЧ-энергии по сравнению с ВЧ-плазменными устройствами при относительной простоте устройств генерации СВЧ-мощности.

Однако развитие микроволновой плазменной техники и технологии сдерживается отсутствием промышленных общедоступных СВЧ-плазменных установок, дефицитностью многих элементов и устройств СВЧ-генераторных приборов, модуляторов, циркуляторов, согласованных нагрузок и т.п. Кроме того, при создании СВЧ-технологического оборудования необходимо правильно конструировать и изготавливать тракты передачи СВЧ-мощности, обеспечивающие выполнение требований безопасной эксплуатации техники, использующей микроволновое излучение.

Поскольку эффективность процессов плазмообразования и поддержания стабильного газового разряда в значительной степени связана с величиной напряженности электрической составляющей электромагнитного поля $E_{эфф}$ в зоне разряда [4; 5], особый интерес представляют СВЧ-плазмтроны резонаторного типа, в которых значительное возрастание напряженности поля электромагнитной волны в зоне плазмообразования обеспечивается не повышением мощности источника СВЧ-энергии, а за счет конструктивных решений системы формирования СВЧ-поля. При этом возможны следующие варианты конструктивно-технических решений с использованием устройств резонаторного типа: с частичным заполнением плазмой резонирующего объема, с заполнением плазмой всего резонирующего объема и с разделением резонирующего и реакционного объемов вакуум-плотной перегородкой с элементами электромагнитной связи [6].

В научном плане СВЧ-устройства резонаторного типа с характерным размером разрядной области, превышающим длину возбуждающей плазму электромагнитной волны, изучены недостаточно. Сведения о систематических исследованиях параметров, качественного состава и свойств плазмы СВЧ-разрядов объемом более 6000 см^3 в реакционно-разрядных камерах резонаторного типа в области низких давлений в литературе отсутствуют. Известные технические решения устройств резонаторного типа требуют всестороннего исследования с целью совершенствования и оптимизации их конструктивного исполнения, разработки инженерных методов расчета элементов разрядных узлов и выработки научно обоснованных рекомендаций по их применению в различных процессах вакуумно-плазменной обработки материалов.

Особый интерес при разработке процессов СВЧ-плазменной обработки материалов представляет вопрос о проникновении СВЧ-полей в область газового разряда. Этот эффект необходимо учитывать по следующим причинам:

- 1) СВЧ-поля в случае наличия в объеме плазмы материалов с высокими диэлектрическими потерями могут взаимодействовать с ними, приводя к уменьшению величины СВЧ-мощности, вкладываемой в разряд;
- 2) СВЧ-волны могут переотражаться в плазменном объеме, приводя к изменению параметров разряда; СВЧ-поля в этом случае могут инициировать протекание плазменных реакций на поверхности разряда «ионизированный газ – твердое тело».

Методика эксперимента. Изучение вопроса о проникновении СВЧ-волны с $f = 2,45 \pm 0,05 \text{ ГГц}$ в центр возбуждаемого ею газового разряда проводилось для кислородного разряда в плазмотроне с резонатором прямоугольного типа СВЧ-плазменной установки, внешний вид которой представлен на рисунке 1.

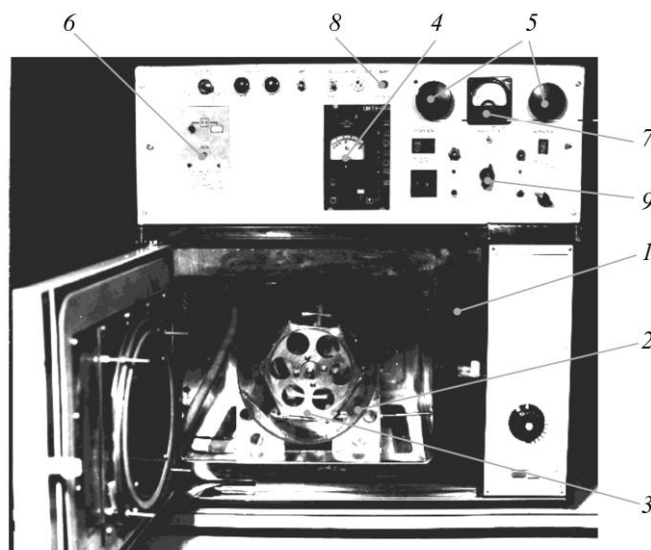


Рис. 1. Макетный образец малогабаритной СВЧ-плазмохимической установки с аппликатором на базе резонатора прямоугольной формы:

- 1 – прямоугольный резонатор; 2 – кварцевый реактор; 3 – подложкодержатель; 4 – вакуумметр 13 ВТЗ-003;
- 5 – натекатели; 6 – датчик расхода газа ДРГ-3; 7 – датчик индикации горения разряда;
- 8 – световод визуального контроля разряда; 9 – система автоматики, задающая длительность циклов обработки

Установка может использоваться на операциях очистки подложек интегральных микросхем, удаления фоторезистивных покрытий, лаков и мастик, плазмохимического осаждения пленок, модификации поверхности материалов, деталей и узлов сложной формы [7 – 9].

При проведении экспериментов величина удельной подводимой к разряду мощности находилась в диапазоне $0,06 \dots 0,08 \text{ Вт/см}^3$. Выбор плазмообразующего газа обусловлен перспективой технологического применения исследуемого плазмотрона, а режимы исследования (давление газа, мощность и т.д.) – условиями оптимальной организации технологического процесса удаления фоторезиста с точки зрения разрядных условий и конструктивной особенности СВЧ-плазмохимической установки (в частности, габаритных размеров СВЧ-генератора).

Исследование проводилось тремя независимыми методами: с использованием термопар; по данным показаний активного зонда, вводимого в разряд; измерением электрическими зондами электропроводности пространства, находящегося внутри плазменного объема, но электрически изолированного от него.

В качестве датчиков температуры использовались термопары хромель-копель. Исходя из условий снижения инерционности показаний термопар, приближения их температуры к температуре объекта измерения, механической прочности и конструктивных особенностей устройства ввода термопар в разряд,

диаметр проволок был выбран равным 0,2 мм. Контактный спай выполнялся в соответствии с общепринятыми требованиями и при работе с капсулами имел сферическую форму. Диаметр спая составлял 0,5 мм. Обработка результатов измерений проводилась в соответствии с методикой, изложенной в [10]. Для снижения погрешности измерений соединительные и компенсационные проводники не использовались, свободные концы термопар подключались непосредственно к регистрирующим приборам, в качестве которых использовались самописцы типа КСП-4.

Исследования нагрева порошкообразного кремния и ситалла в объеме плазмы СВЧ-разряда СВЧ-полем и под действием термического нагрева от разогретой спирали и в термошкафу проводились с использованием конструкций, представленных на рисунках 2 и 3. Кремний и ситалл были выбраны как тестовые материалы, первый хорошо поглощает СВЧ-поле и нагревается, а другой СВЧ-энергию не поглощает.

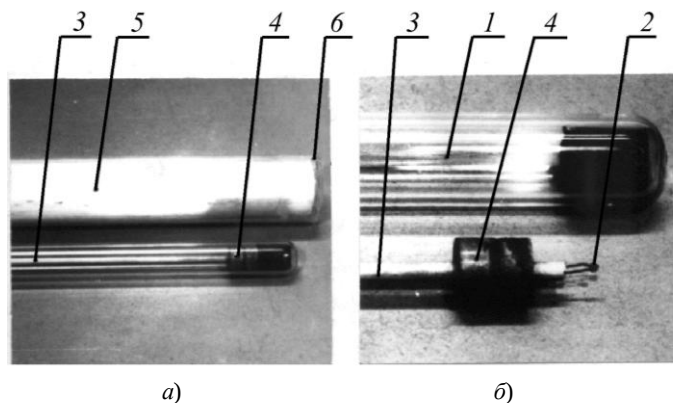


Рис. 2. Диагностическая система для исследования нагрева порошкообразных материалов при атмосферном давлении:

- а – общий вид; б – термопара в увеличенном масштабе;
1 – кварцевая трубка; 2 – термопара; 3 – керамическая трубка;
4 – фторопластовые шайбы; 5 – фторопластовый чехол; 6 – кварцевый экран

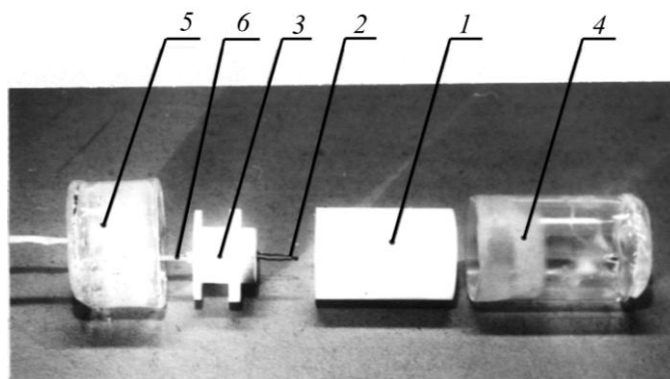


Рис. 3. Капсула для исследования нагрева порошкообразных материалов:

- 1 – фторопластовая капсула; 2 – термопара; 3 – крышка; корпус 4 и крышка 5 кварцевого чехла;
6 – термостойкие диэлектрические трубки

В первой конструкции (см. рис. 2) определенное количество предварительно взвешенного порошка засыпалось в кварцевую трубку 1, герметично заваренную с одного конца. Порошок уплотнялся, затем измерялся и рассчитывался его объем в уплотненном состоянии. В порошок вводился спай термопары 2, пропущенной через керамическую трубку 3, осевое положение которой в кварцевом цилиндре жестко фиксировалось с помощью нескольких фторопластовых шайб 4. Фторопластовые шайбы, кроме того, служили для уменьшения теплоотвода из порошка, препятствовали изменению его плотности и занимаемого объема. Для повышения термостабилизации и снижения нагрева порошка за счет конвекции и теплопередачи из плазмы на всю длину кварцевого цилиндра в разрядной камере надевались фторопластовый чехол 5, с толщиной стенки 7 мм и экран 6 из кварцевого стекла. Вакуумное уплотнение проводилось по наружной поверхности кварцевой трубки 1. Данная конструкция использовалась для выяснения вклада нагрева материалов в объеме плазмы СВЧ-разряда за счет энергии СВЧ-поля и установления факта проникновения СВЧ-поля в центр разрядного объема. Для аналогичных целей служила и конструкция, представленная на рисунке 3. Ее отличие от предыдущей в том, что порошок находился при том же ва-

кууме, что и газ в разрядной камере. Объем порошка, засыпаемого во фторопластовую капсулу 1, был строго фиксирован. Для предотвращения возникновения разряда в капсуле она полностью заполнялась уплотненным порошком и плотно закрывалась крышкой 3. Детали кварцевого чехла 4 и 5 служили для защиты фторопласта от плазменного воздействия. Концы термопар находились в термостойких диэлектрических трубках.

Обработка результатов измерений проводилась с помощью формулы [11]:

$$P_{cp} = \frac{Q_T}{t} = \frac{C_{t^0} \Theta}{t}, \quad (1)$$

где P_{cp} – измеряемая средняя мощность СВЧ-сигнала, Вт; Q_T – количество теплоты, Дж; C_{t^0} – теплоемкость рабочего тела, Дж/°С; Θ – приращение температуры рабочего тела, °С; t – время, с.

В данном случае мы пренебрегали излучением теплоты в окружающую среду и предполагали, что нагрев порошка происходит только за счет СВЧ-энергии. Эти допущения являются вполне обоснованными теоретически, так как толщина стенок фторопластовых конструкций составляла 7 мм, толщина кварца – 2 мм, а расчеты проводились по данным измерений, полученным в течение первых 10...15 с. Для расчетов ослабления СВЧ-сигнала, доходящего до центра разряда, использовалась следующая формула [12]:

$$P = E^2 f \cdot \frac{\epsilon_r \cdot tg\delta}{1,8 \cdot 10^{10}}, \quad (2)$$

где P – удельная СВЧ-мощность, рассеиваемая в единице объема диэлектрика, Вт/м³; E – напряженность электрической составляющей электромагнитной волны, В/м; f – частота волны, Гц; ϵ_r – диэлектрическая проницаемость материала порошка; $tg\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь материала.

В качестве электрического зонда, измеряющего локальное значение электрической составляющей электромагнитного поля, использовался отрезок гибкого коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 50 Ом (рис. 4), внешний проводник которого выполнен из медной трубки, а внутренний – из одножильного медного провода. Пространство между проводниками заполнено гибким диэлектриком – фторопластом. С одной стороны кабеля 1 сформирован активный зонд, представляющий собой отрезок центрального внутреннего проводника диаметром 1,4 мм, выступающего из внешнего проводника на $l = 5$ мм, что много меньше длины волны исследуемых колебаний. Зонд вводился в реакционно-разрядную камеру через герметичные вводы, расположенные по торцам плазмотронов. Для защиты активного зонда от воздействия плазмы на него надевался фторопластовый колпачок 2, который закрывался кварцевым чехлом 3. На втором конце кабеля смонтирован 50-омный кабельный разъем, посредством которого активный зонд соединялся либо с ваттметром МЗ-28, либо через аттенуатор с детекторной секцией МЗ3402-3, сигнал с которой подавался на вход запоминающего осциллографа С8-ИЗ. На зонде наводился СВЧ-сигнал, величина которого пропорциональна амплитуде составляющей электрического поля, направленной вдоль выступающего центрального проводника.

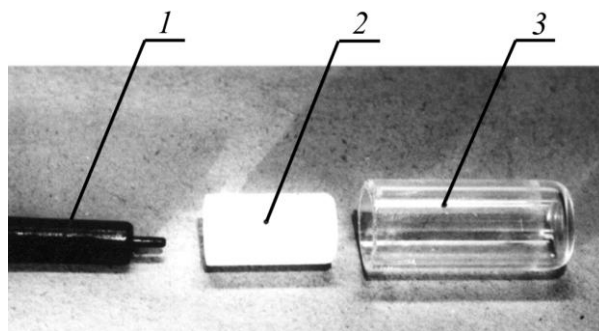


Рис. 4. Внешний вид зонда
для измерения локального распределения электрической составляющей СВЧ-поля:
1 – коаксиальный кабель; 2 – фторопластовый колпачок; 3 – кварцевый чехол

Локальные измерения электропроводности электрически изолированного замкнутого объема внутри плазмы проводились зондами, выполненными в виде плоских электродов 1 из нержавеющей стали размером 10×10 мм² (рис. 5), расположенными симметрично на фиксированном расстоянии друг от друга. Проволочные концы 2 зондов пропускались через керамическую трубку, помещенную в металлический чехол 3 из нержавеющей стали. С торца, выходящего за пределы разрядной камеры, самовулканизирую-

щимся компаундом КЛТ-30 производилось вакуумное уплотнение и электрическая изоляция входа проволочек в стальную трубку. Вакуумное уплотнение ввода трубки в разрядную камеру с возможностью возвратно-поступательного перемещения осуществлялось с помощью несложной системы прижимов, находящихся на торцевых крышках плазмотронов со стороны откачки газов. Проволочные выводы 2 и нерабочие стороны электродов 1 покрывались смесью пудры Al_2O_3 и силикатного клея. Этот состав после высыхания образовывал прочное диэлектрическое покрытие, обладающее хорошим сцеплением с нержавеющей сталью. Так как изучаемый разряд имеет пульсирующий характер, то все измерения проводились с помощью запоминающего осциллографа С8-13, на который подавался сигнал с измерительного резистора $R = 10,11 \text{ Ом}$, включенного в цепь протекания зондового тока. В ряде экспериментов по анализу взаимодействия СВЧ-полей с плазмой возбуждаемого ими разряда электрические зонды 1 закрывались кварцевым чехлом 4, плотно входящим во фторопластовый фиксатор 5, одетый на стальную трубку 3. Таким образом, осуществлялась изоляция зондов от плазмы разряда в реакционной камере. Эксперименты с такой конструкцией позволяли проанализировать механизм возбуждения разряда в центре разрядной камеры.

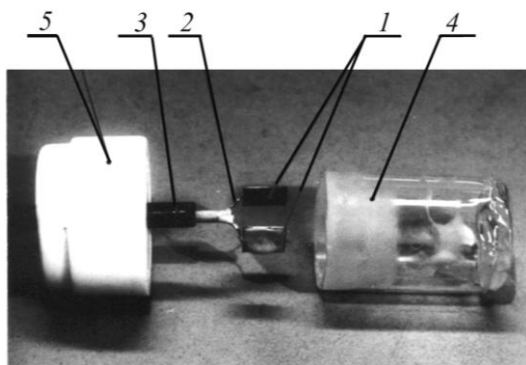


Рис. 5. Диагностическая система измерения электропроводности плазмы:
1 – плоские электроды; 2 – проволочные выводы зондов; 3 – металлический чехол;
4 – кварцевый чехол; 5 – фторопластовый фиксатор

Результаты и их обсуждение. Факт проникновения СВЧ-энергии в центр разрядного объема для типовых технологических режимов обработки пластин подтверждается экспериментальными результатами.

Результаты обработки данных по динамике и степени нагрева порошкообразного кремния во фторопластовой капсуле (см. рис. 3) в реакторе установки с прямоугольным резонатором, пример которой приведен на рисунке 6, показали, что рассчитанное по формуле (1) отношение СВЧ-мощности, поглощаемой кремнием без возбуждения разряда и в плазме разряда в O_2 при давлении $p = 133 \text{ Па}$, составляет 3,3.

Воспользовавшись формулой (2), можно рассчитать, что напряженность электрической составляющей поля в месте нахождения кремния при наличии разряда в 1,83 раза меньше, чем в поле волны без разряда. В расчетах был учтен эффект нагрева порошка кремния в интервале времени с момента поступления СВЧ-мощности в разрядный объем до возникновения разряда и после его погасания.

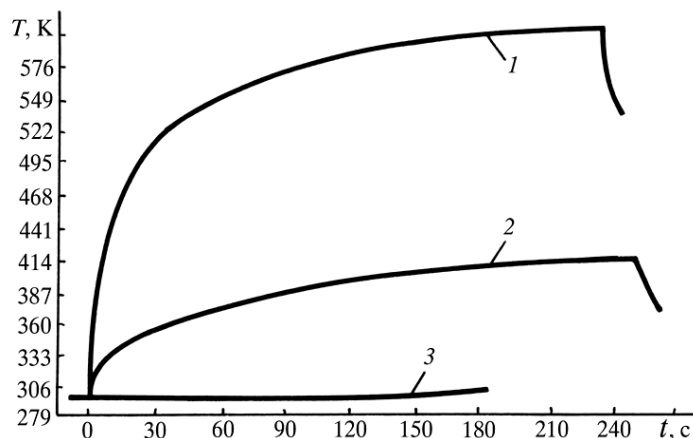


Рис. 6. Динамика нагрева порошка кремния во фторопластовой капсуле:
1 – под действием СВЧ-поля в воздухе, $W = 650 \text{ Вт}$;
2 – в кислородном разряде, давление $p = 140 \text{ Па}$, $W = 650 \text{ Вт}$; 3 – в термощкафу при $T = 560 \text{ К}$ в воздухе

Аналогичные результаты были получены и в экспериментах с порошком кремния, находящимся в кварцевом вводе (см. рис. 2). Пример экспериментальных данных, которые использовались преимущественно при анализе тепловых потоков в разрядной камере, приведен на рисунке 7.

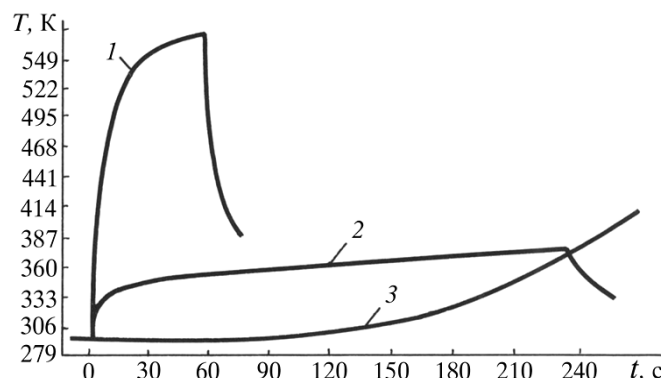


Рис. 7. Динамика нагрева порошка кремния в кварцевом вводе с фторопластовым термочехлом:
1 – под действием СВЧ-поля, $W=650$ Вт; 2 – в кислородном разряде, $W=650$ Вт;
3 – нагрев от спирали, $P_{\text{нагр}}=500$ Вт

На рисунке 8 и рисунке 9 представлены показания активного зонда, введенного в реактор установки с прямоугольным резонатором, сигналы с которого регистрировались измерителем мощностью МЗ-28.

На рисунке 8 приведены показания зонда (в единицах мощности по данным МЗ-28) в диапазоне давлений кислорода при постоянной величине СВЧ-мощности, подводимой к разряду.

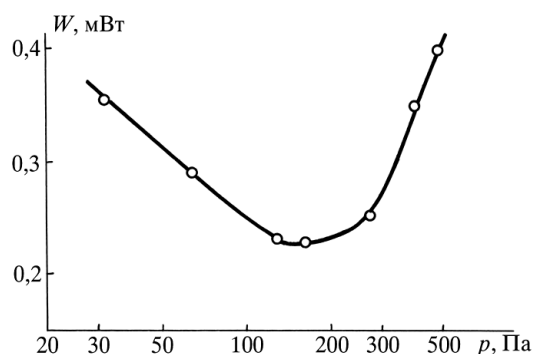


Рис. 8. Показания активного зонда в разряде O_2 в зависимости от давления газа (по данным МЗ-28)

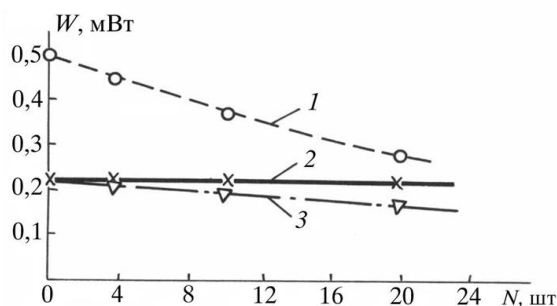


Рис. 9. Зависимость показаний активного зонда от количества кремниевых и ситалловых пластин (по данным МЗ-28):
1 – без разряда, кремниевые пластины $\varnothing 76$ мм;
2 – разряд в O_2 , давление $p=140$ Па, пластины из ситалла (60×48) мм;
3 – разряд в O_2 , давление $p=140$ Па, кремниевые пластины $\varnothing 76$ мм

Минимальное прохождение СВЧ-волны регистрируется при давлении кислорода $p \approx 140$ Па, что соответствует данным [4] об оптимальных условиях пробоя этого газа и максимальным скоростям удаления фоторезиста, полученным нами при проведении технологических экспериментов [13; 14]. Для этого дав-

ления сняты представленные на рисунке 9 показания зависимости величины СВЧ-энергии в центре разрядного объема от количества пластин при наличии и в отсутствие (при атмосферном давлении) плазмы. Поведение линий 1 и 3 объясняется тем, что происходит поглощение кремниевыми пластинами части СВЧ-энергии, поступающей в разрядную камеру. Линия 2 отражает показания активного зонда при размещении в разрядной зоне пластин из ситалла, который практически не поглощает СВЧ-энергию.

О проникновении СВЧ-энергии в центр разрядного объема свидетельствуют и результаты исследований, проведенных с электрическими зондами. На рисунке 10 показаны сигналы, полученные при проведении совместной регистрации тока через зонды и оптического свечения разряда, воспринимаемого фотоэлектронным умножителем ФЭУ-28, ориентированным через боковую поверхность реактора на зонды.

На рисунке 10, *в* показаны сигналы, полученные с электрических зондов без кварцевого чехла вокруг них (см. рис. 5). Приведенные на рисунке 10, *а* сигналы получены при наличии вокруг зонда кварцевого чехла, электрически изолирующего их от внешнего плазменного объема. Разрядные условия в обоих экспериментах одинаковы. Наличие электрического тока между зондами в случае их экранировки говорит о том, что напряженность поля СВЧ-волны, достигающего центра разрядного объема, достаточна для возбуждения самостоятельного разряда внутри кварцевого экрана и образования токопроводящего слоя между электродами зондов. В отсутствие плазмы при наличии СВЧ-поля в зоне реактора (при атмосферном давлении) измерительные приборы никаких сигналов в зондовой цепи не отмечали. Это свидетельствует о том, что регистрируемый осциллографом С8-13 сигнал обусловлен наличием плазменного тока, а не наводками от СВЧ-полей. Различия в амплитуде сигналов (и токового, и оптического) без чехла и с чехлом могут быть связаны с локальным изменением параметров плазмы (за счет рекомбинационных процессов на поверхности экрана, вторичных эмиссионных процессов и т.д.).

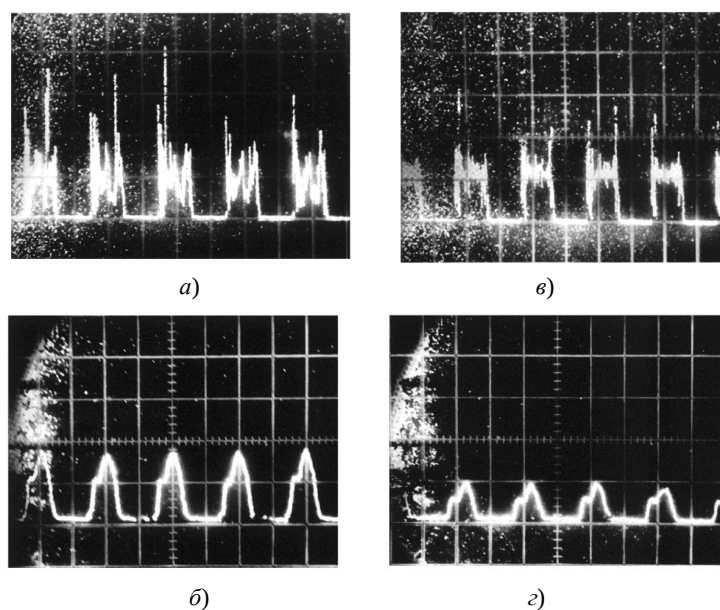


Рис. 10. Сигналы электрических зондов с кварцевым чехлом (*а*) и без чехла (*б*) и соответствующие им оптические импульсы разряда в O_2 (*в*, *з*). Давление O_2 $p = 140$ Па; мощность $W = 700$ Вт; *а*, *в* – развертка по вертикали – 20 мВ/дел.; по горизонтали – 10 мс/дел.; *б*, *з* – развертка по вертикали – 5 мВ/дел.; по горизонтали – 10 мс/дел.

Заключение. Результаты проведенных экспериментов указывают на то, что при «технологически» приемлемых уровнях плотности потока СВЧ-мощности в разрядный объем ($0,06 \dots 0,08$ Вт/см³) наблюдается проникновение СВЧ-поля в объем зоны разряда. Этот эффект необходимо учитывать при организации процессов плазмохимической обработки (влияние СВЧ-поля на параметры обрабатываемых структур, «загрузочный» эффект, проектирование распределенной системы подвода СВЧ-энергии к зоне обработки, формирующаяся определенная структура распределения СВЧ-поля в зоне плазмообразования и т.д.) и анализе результатов обработки материалов и структур, подверженных воздействию СВЧ-энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электрофизические процессы и оборудование в технологии микро- и нанoeлектроники: моногр. / А.П. Достанко [и др.]; под ред. акад. НАН Беларуси А.П. Достанко и д-ра техн. наук А.М. Русецкого. – Минск: Бестпринт, 2011. – 216 с.

2. Бордусов, С.В. Плазменные СВЧ-технологии в производстве изделий электронной техники / С.В. Бордусов; под ред. А.П. Достанко. – Минск: Бестпринт, 2002. – 452 с.
3. Microwave Discharges: Fundamentals and Applications. 3-rd International Workshop, Abbaye Royale de Fontevraud, France, 20 – 25 April, 1997 // Journal de Physique IV. – 1998. – Vol. 8, Pr. 7. – 421 p.
4. Мак-Доналд, А. Сверхвысокочастотный пробой в газах / А. Мак-Доналд. – М.: Мир, 1969. – 212 с.
5. Физические основы электрического пробоя газов / А.Ф. Дьяков [и др.]. – М.: Изд-во МЭИ, 1990. – 400 с.
6. Бордусов, С.В. Классификация СВЧ-плазмотронов для производства изделий электронной техники / С.В. Бордусов // Электронная обработка материалов. – 2002. – № 1(213). – С. 79 – 82.
7. Бордусов, С.В. Конструктивные особенности установки и технологические процессы СВЧ-плазменной обработки материалов в условиях низкого вакуума / С.В. Бордусов // Материалы, технологии, инструменты. – 2001. – Т. 6, № 4. – С. 62 – 64.
8. Plasma-Preen Cleaner/Etcher (Patent Pending) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.terrauniversal.com/cleaning-systems/plasma-preen-cleaners.php>. – Дата доступа: 01.02.2012.
9. Bordusau, S.V. Investigation of the influence of the discharge chamber “loading” effect on the optical characteristics of resonator type microwave plasmatron / S.V. Bordusau, S.I. Madveika // Acta Technica. – 2011. – № 56. – P. 284 – 290.
10. Преображенский, В.П. Теплотехнические измерения и приборы: учебник для вузов по спец. «Автоматизация теплоэнергетических процессов» / В.П. Преображенский. – 3-е изд. – М.: Энергия, 1978. – 704 с.
11. Билько, М.И. Измерение мощности на СВЧ / М.И. Билько, А.К. Томашевский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1986. – 168 с.
12. Тареев, Б.М. Физика диэлектрических материалов: учеб. пособие для вузов / Б.М. Тареев. – М.: Энергоиздат, 1982. – 320 с.
13. Бордусов, С.В. Исследование влияния эффекта «загрузки» разрядной камеры на оптические характеристики СВЧ-плазмотрона резонаторного типа / С.В. Бордусов, С.И. Мадвейко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2010. – № 8. – С. 103 – 106.
14. Мадвейко, С.И. Процесс плазмохимического удаления фоторезистивных пленок в СВЧ-плазмохимической установке с резонатором прямоугольного типа / С.И. Мадвейко // Нанотехнологии-2010: материалы междунар. науч.-техн. конф., Геленджик, 19 – 24 сент. 2010 г. – С. 227 – 229.

Поступила 08.01.2012

INVESTIGATION OF THE MICROWAVE ENERGY PENETRATION IN GAS DISCHARGE PLASMA

S. BODRUSOV, S. MADVEIKO

The investigation of the penetration of the microwave energy ($f = 2,45 \pm 0,05$ GHz) in the center of the oxygen gas discharge in the plasmatron of the resonant type was carried out on example of microwave plasma chemical processing of silicon plates. The investigation was performed by three independent methods: using a thermocouple were investigated temperature characteristics of the microwave discharge; according to data of the «active probe» which was injected in the volume of discharge chamber; using an electric probe which was placed in the volume of plasma for measuring the electrical conductivity of the space. The experimental results indicate that for the levels of microwave power flux density in the discharge volume in the range of $0.06...0.08$ W/cm³ the microwave field is entered in the volume of the discharge zone. This effect must be taken into account when organizing the processes of plasma-chemical treatment (the effect of microwave field on the parameters of the processed structures, «loading effect», the design a system for supplying microwave energy to the treatment area, forms and character of distribution of the microwave field in the gas discharge area, etc.) and for analysis results of processing of materials and semiconductor structures which may be exposed to microwave energy.