

УДК 533.9.01

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭФЕКТА «ЗАГРУЗКИ» РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ НА ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЧ-ПЛАЗМОТРОНА РЕЗОНАТОРНОГО ТИПА**д-р техн. наук С.В. БОРДУСОВ, С.И. МАДВЕЙКО****(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)**

Представлены результаты исследований влияния различного количества и разной толщины объектов обработки, расположенных в объеме разрядной камеры, на плазмообразование в СВЧ-плазмотроне на базе резонатора прямоугольной формы. В качестве материала обрабатываемых объектов использовались пластины из монокристаллического кремния, ситалла и нержавеющей стали. Изучались оптико-спектроскопическая и интегральная оптическая светимость СВЧ-разряда низкого вакуума.

Введение. Новые задачи и высокие требования субмикронной микро- и наноэлектроники стимулируют поиск новых способов направленного плазменного воздействия на обрабатываемые конденсированные среды и их изучение. В последние годы наблюдается все более широкое промышленное применение в процессах производства изделий электронной техники сверхвысокочастотного (СВЧ) разряда, так называемой микроволновой плазмы. Неравновесная плазма СВЧ-разрядов позволяет осуществлять плазмохимические процессы при низкой температуре газа, но при более высокой температуре электронов. Такие особенности работы СВЧ-генераторов плазмы, как отсутствие электродов, возможность осуществления режима, при котором нагрузка не влияет на работу СВЧ-генератора, высокий КПД преобразования тока промышленной частоты в СВЧ-ток, обуславливают пристальное внимание к ним исследователей и практиков [1 – 3]. Поэтому значительный интерес представляет изучение как технологических процессов обработки материалов плазмой СВЧ-разряда, так и влияния объектов обработки (материала, объема, формы и размеров поверхности и др.) на электрические, физические и химические свойства плазмы.

Методика эксперимента. Эксперименты проводились в малогабаритной СВЧ-плазменной установке, газоразрядная система которой выполнена на базе резонатора прямоугольной формы. Конструктивно установка выполнена в виде переносного блока настольного типа. Установка может использоваться на операциях очистки подложек, удаления фоторезистивных покрытий, лаков и мастик, плазмохимического осаждения пленок, модификации поверхности материалов, деталей сложной формы. Генератором СВЧ-энергии служил магнетрон М-105, имеющий высокую долговечность и обладающий высокой надежностью в работе. Генерируемая магнетроном мощность составляла 650 Вт. Диссектор был отключен и выведен в положение, не создающее дополнительного отражения СВЧ-волны, поступающей в резонатор через отверстие связи. Плазменный разряд зажигался в цилиндрической вакуумируемой кварцевой трубе-реакторе с наружным диаметром 200 мм и длиной 310 мм, расположенной в центре резонатора с внутренними размерами 345 × 250 × 380 мм вдоль продольных сторон резонатора. СВЧ-энергия поступала в резонатор через прямоугольное отверстие связи, расположенное своей длинной стороной вдоль резонирующих стенок параллельно оси кварцевой трубы-реактора. Рабочим газом в камере плазмотрона являлся атмосферный воздух при давлении 46 и 106 Па, непрерывно прокачиваемый через кварцевую камеру. Использование атмосферного воздуха обусловлено тем, что он может использоваться для удаления фоторезиста с поверхности полупроводниковых пластин, а также в виде составной части смесей технологических газов. Выбор давления связан с условиями проникновения электрической составляющей СВЧ-волны внутрь объема формируемого им разряда. Величина напряженности электрической составляющей электромагнитной волны в центральной области СВЧ-разряда при давлении 46 Па примерно в 2 раза выше, чем при давлении 106 Па. В качестве объектов обработки в экспериментах использовалось различное количество пластин (от 1 до 12 шт.):

- в первой группе – монокристаллические кремниевые пластины Ø 76 мм и толщиной 0,3 мм;
- во второй – ситалловые пластины прямоугольной формы размером 60 × 48 мм и толщиной 0,6 мм;
- в третьей – пластины из нержавеющей стали Ø 76 мм и толщиной 0,5 мм;
- в четвертой – в камеру помещали по одной пластине монокристаллического кремния Ø 76 мм различной толщины (0,9 мм; 1,9 мм; 3,9 мм; 7,9 мм; 12,4 мм). Пластины располагались вдоль натекания газового потока в центральной области реакционно-разрядного объема.

Исследование проводилось с использованием методик оптической эмиссионной спектроскопии и регистрации интегральной оптической светимости плазмы СВЧ-разряда.

В связи с тем, что конструкции СВЧ-разрядных устройств для предотвращения утечек вредного для здоровья человека-оператора электромагнитного излучения выполняются практически полностью закрытыми, метод оптической эмиссионной спектроскопии как средство контроля за протеканием плазменных процессов является практически единственным бесконтактным диагностическим инструментом, позволяющим получать достоверную оперативную и объективную информацию о многих процессах плазменной обработки материалов, составе и свойствах газового разряда.

Проведение спектральных исследований осуществлялось с использованием фотоэлектрической системы на базе спектрографа SL 40-2-2048 ISA. Спектрометр имеет широкий рабочий спектральный диапазон (200...1100 нм) и достаточную разрешающую способность (0,2 нм). Программа для визуального отображения и записи спектров позволяет не только детально сравнивать до трех спектров одновременно, но и регистрировать временные зависимости характерных элементов спектров излучения (атомных линий, молекулярных полос) в ходе плазмохимических процессов и обрабатывать алгоритм оперативного спектрального контроля.

Оптическое интегральное свечение СВЧ-разряда регистрировалось с помощью световода, размещаемого в находящемся в боковой стенке корпуса разрядного устройства отверстии. Световой пучок из световода проецируется на фотоэлектронный умножитель (ФЭУ-112). Электрический импульс с ФЭУ через делитель подается для записи на ПЭВМ с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) ЛА-1,5 РСІ. При проведении экспериментов фиксировалось оптическое излучение перпендикулярно оси разрядной системы. В процессе эксперимента на АЦП ЭВМ также подавались сигналы анодного тока магнетрона и с детектора СВЧ-излучения. Эксперименты проводились при работе магнетрона на плазменную и активную нагрузки.

Результаты и их обсуждение. По данным зарегистрированных спектров разряда в воздухе проведена расшифровка их характерных линий и полос. В процессе изучения влияния режимов плазмообразования на особенности поведения компонент спектра плазмы СВЧ-разряда установлен специфический характер проявления эффекта «загрузки» при работе с кремниевыми пластинами. Спектральные исследования свечения линии О ($\lambda = 777,46$ нм) воздушного СВЧ-разряда в прямоугольном резонаторном плазмотроне показали на сильную зависимость их интенсивности от количества кремниевых пластин (рис. 1, а) и от толщины кремниевых пластин (рис. 2).

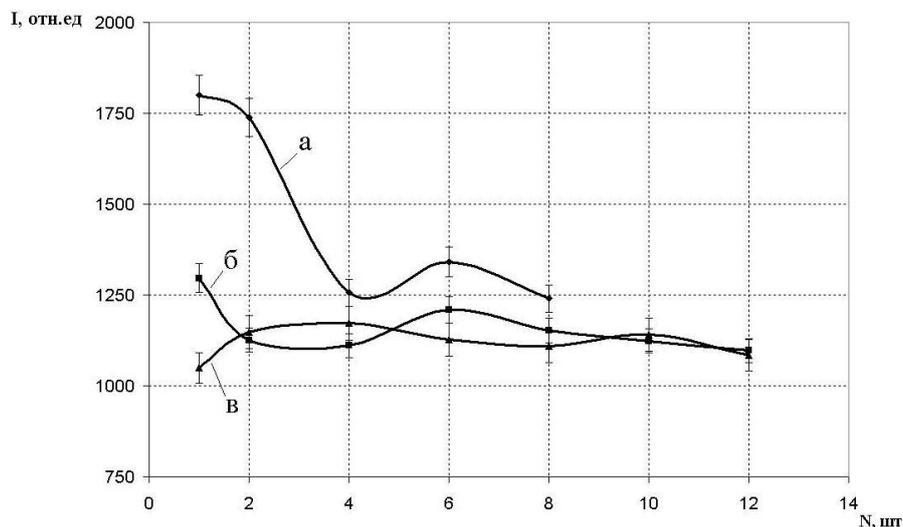


Рис. 1. Характер изменения интенсивности свечения линии О ($\lambda = 777,46$ нм) спектра СВЧ-разряда в атмосфере воздуха (46 Па) в зависимости от количества располагаемых в разрядной зоне:

а – кремниевых пластин \varnothing 76 мм и толщиной 0,3 мм;

б – ситалловых пластин размером 60×48 мм и толщиной 0,6 мм; в – стальных пластин \varnothing 76 мм и толщиной 0,5 мм

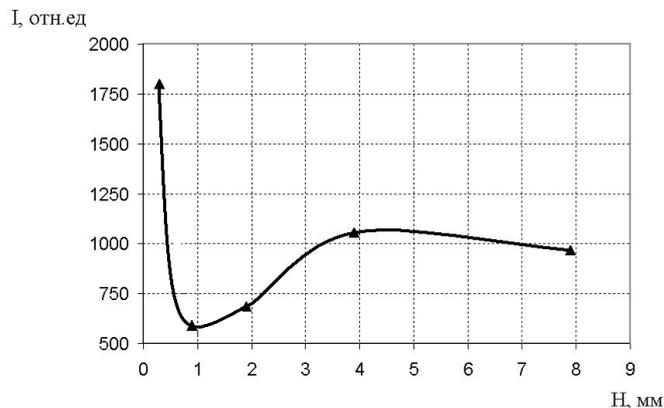


Рис. 2. Характер изменения интенсивности свечения линии О ($\lambda = 777,46$ нм) спектра СВЧ-разряда в атмосфере воздуха (46 Па) в зависимости от толщины располагаемых в разрядной зоне пластин монокристаллического кремния

На рисунке 1, а представлены данные, полученные при проведении экспериментов при помещении в камеру пластин монокристаллического кремния от 1 до 12 штук толщиной 0,3 мм и диаметром 76 мм. Рисунок 2 иллюстрирует результаты, полученные при проведении экспериментов с пластинами монокристаллического кремния толщиной от 0,9 мм до 12,4 мм и диаметром 76 мм, помещаемыми в разрядную камеру по одной. Эксперименты проводились при давлении в камере плазмотрона 46 Па. Аналогичный вид зависимостей был получен и при давлении 106 Па. Зависимости имеют сложный характер, что, по нашим предположениям, является следствием как эффекта частичного поглощения поступающей в область СВЧ-резонатора мощности электромагнитной волны материалом с высоким значением тангенса угла диэлектрических потерь (кремний), так и изменением добротности резонатора, а также условиями согласования разрядной области с волноводным трактом [4]. В частности, немонотонный характер зависимостей может быть объяснен влиянием кремния на волновое сопротивление ионизированной токопроводящей среды и структуру стоячих волн в области резонирующего объема.

Экспериментальные данные показывают, что характеристики картин оптических спектров СВЧ-разряда в значительной степени зависят как от режимов плазмообразования [5], так и от электрофизических параметров разрядной области.

Для контроля за изменением параметров разряда проводилось также изучение интенсивности свечения линии Ag ($\lambda = 420,3$ нм), добавляемого в воздух. Добавка Ag в воздух составляла не более 2 % по объему, что, как известно [6], не вызывает изменения параметров разряда основного плазмообразующего газа (T_e и N_e). Кроме того, в ряде работ [7, 8] показано, что с увеличением концентрации молекулярного кислорода в разряде интенсивность свечения линий Ag падает, поэтому интенсивность свечения линии Ag ($\lambda = 420,3$ нм) может служить индикатором степени диссоциации молекулярного кислорода в разряде. Эксперименты показали, что интенсивность свечения линий Ag ($\lambda = 420,3$ нм) падает с увеличением количества кремниевых пластин. Установлено также, что при определенных режимах плазмообразования превышение количества Si пластин некоторой величины приводит к проявлению нестабильности разряда и даже к его погасанию. По нашему мнению, это происходит за счет того, что СВЧ-поля в случае наличия в объеме плазмы материалов с высокими диэлектрическими потерями взаимодействуют с ними, приводя к уменьшению величины вкладываемой в разряд СВЧ-мощности.

Помещение в камеру слабо поглощающих СВЧ-энергию материалов не приводит к существенному изменению интенсивности спектральных линий и полос (см. рис. 1, б, в). Наблюдаемые незначительные изменения их интенсивности (качественно совпадающие с поведением линии O с длиной волны $\lambda = 777,46$ нм) обусловлены гибелью частиц плазмы СВЧ-разряда на поверхности вносимых диэлектрических и металлических пластин, переотражением СВЧ-волн в плазменном объеме, что приводит к изменению параметров разряда, а также протеканием обменных процессов на поверхности раздела «ионизированный газ – твердое тело».

В работе [9] применительно к высокочастотному (ВЧ) газовому разряду на частоте $f = 13,56$ показано, что скорость генерации плазменных частиц не зависит от площади пластин, загруженных в реактор, в том случае, если сохраняются одинаковые разрядные условия (давление и скорость прокачки газа, мощность ВЧ-волны и т.д.).

Поскольку эксперименты по контролю за состоянием СВЧ-разряда по линии Ag ($\lambda = 420,3$ нм) показали, что столь значительное изменение интенсивности свечения атомарного кислорода не может быть объяснено его расходом на окисление пластин, то полученные данные можно интерпретировать следующим образом: величина СВЧ-мощности, затрачиваемая на поддержание разряда, зависит от количества находящихся в зоне подвода СВЧ-энергии пластин монокристаллического кремния, хорошо поглощающего СВЧ-энергию.

Эксперименты по анализу регистрируемых с помощью ФЭУ одиночных сигналов не позволили установить тенденцию изменения интегрального оптического свечения газового разряда ввиду того, что, как показано на рисунке 3, форма и амплитуда интегрального оптического свечения плазмы СВЧ-разряда в атмосфере воздуха имеют большой разброс. Как показали результаты обработки экспериментальных данных, разброс значений амплитуды интегрального оптического свечения находится в пределах ± 20 % от всей величины амплитуды сигнала.

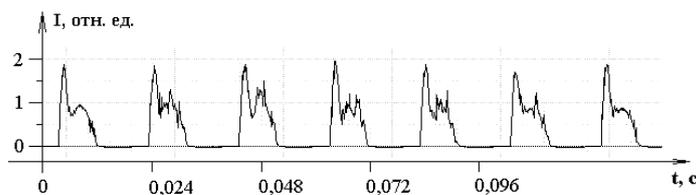


Рис. 3. Форма импульса оптического свечения плазмы СВЧ-разряда в атмосфере воздуха

Заключение. Анализ полученных экспериментальных результатов позволяет сделать вывод о том, что величина СВЧ-мощности, затрачиваемая на поддержание СВЧ-разряда, зависит от количества находящихся в зоне обработки кремниевых пластин. Этот эффект может быть объяснен как частичным поглощением СВЧ-мощности материалом пластин, обладающим высоким тангенсом угла диэлектрических потерь, так и изменением добротности резонатора и условиями согласования разрядной области с волноводным трактом. Этот эффект наряду с эффектом проникновения СВЧ-поля в объем зоны разряда [10] необходимо учитывать при организации процессов СВЧ-плазмохимической обработки и анализе результатов обработки материалов и структур, подверженных воздействию СВЧ-энергии.

Установлено также, что повышение количества кремниевых пластин может приводить к проявлению сильной нестабильности разряда и даже к погасанию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бордусов, С.В. Плазменные СВЧ-технологии в производстве изделий электронной техники / С.В. Бордусов. – Минск: Бестпринт, 2002. – 452 с.
2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/0963-0252>.
3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://jjar.ipap.jp/>.
4. Диденко, А.Н. СВЧ-энергетика / А.Н. Диденко, Б.В. Зверев. – М.: Наука, 2000. – 264 с.
5. Мадвейко, С.И. Исследование условий плазмообразования в разрядной камере СВЧ-плазмотрона с аппликатором резонаторного типа / С.И. Мадвейко, С.В. Бордусов, А.П. Достанко // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы IV междунар. науч.-техн. конф., Минск, 21 октября 2009 г. – С. 56 – 57.
6. Виноградов, Г.К. Исследование механизмов возбуждения частиц в тлеющем разряде в тетрафторметалле / Г.К. Виноградов, Д.И. Словецкий, Т.В. Федосеева // ТВТ. – 1983. – Т. 21, № 4. – С. 652 – 660.
7. Spectroscopic diagnostics of CF₄-O₂ plasmas during Si and SiO₂ etching processes / R. d'Agostino, etc. // J. Appl. Phys. – 1981. – V. 52, № 3. – P. 1259 – 1265.
8. Gottacho, R.A. Optical techniques in plasma diagnostics / R.A. Gottacho, T.A. Miller // Pure and Appl. Chem. – 1984. – V. 56, № 2. – P. 189 – 208.
9. The relation between eych rate and optical emission intensity in plasma etching / H. Kawata, etc. // J. Electrochem. Soc. – 1982. – V. 129, № 6. – P. 1325 – 1329.
10. Research of effects, characteristic for excitation of microwave discharge in the large-sized reactionary-digit chamber of the resonator type plasmatron / S.V. Bordusov [etc.] // Proc of the XVII Int. Symp. on Physics of Switchig Arc, Brno, Czech Republic, 2007. – V. 1. – P. 29 – 31.

Поступила 28.04.2010

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE EFFECT OF "LOADING" THE DISCHARGE CHAMBER ON THE OPTICAL CHARACTERISTICS OF THE MICROWAVE RESONATOR TYPE PLASMATRON

S. BORDUSOV, S. MADVEYKA

The results of researche of the influence of various quantity and different thickness of processed objects located in the volume of the discharge chamber on plasma formation in a plasmatron on the base of the rectangular form resonator are presented. The materials of processed object were monocrystalline silicon, sitall and stainless steel. Optical spectroscopic and integrated optical light-characteristics of the microwave discharge of low vacuum were studied.