

*Автаева С.В.*

**ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЧЕ РАЗРЯДА В АРГОНЕ**

*Avtaeva S.V.*

**EFFECT OF MAGNETIC FIELD ON ELECTRICAL AND OPTICAL  
CHARACTERISTICS OF THE CCRF DISCHARGE IN ARGON**

*В статье исследовано влияние внешнего магнитного поля на характеристики высокочастотного (13.56 МГц) емкостного разряда в аргоне. Изучены электрические характеристики разряда, концентрация заряженных частиц, температура электронов, спектр и интенсивность излучения разряда, распределение интенсивности излучения вблизи ВЧ электрода. Для измерения усредненных по времени параметров плазмы использовались электротехнические методы, двойной ленгмюровский зонд и оптическая эмиссионная спектроскопия.*

*In the article an effect of external magnetic field on characteristics of the capacitive coupled radio frequency (13.56 MHz) discharge in argon is studied. Electrical characteristics of the discharge, charged particle density, electron temperature, the discharge spectrum and emission intensity and distribution of the emission intensity near the RF electrode are studied. Electrical methods, a double Lengmuir probe and optical emission spectroscopy were used to measure time-averaged plasma parameters.*

**1. Введение.** В связи с постоянным уменьшением размеров элементов в сверх больших интегральных микросхемах, для изготовления структур все чаще используется реактивное ионное травление (РИТ) и роль этой технологии постоянно возрастает [1]. Однако скорость РИТ обычно меньше, чем при плазменном травлении, и РИТ часто приводит к нежелательным радиационным повреждениям и/или загрязнениям поверхности, которые должны впоследствии удаляться [2]. Поэтому необходимы методы обработки, дающие более высокие скорости обработки и меньшее количество повреждений обрабатываемой поверхности. Высокочастотные емкостные (ВЧЕ) разряды, активированные магнитным полем, позволяют получить высокие скорости травления и малые энергии бомбардировки ионов. Уменьшение энергии ионов приводит к снижению количества повреждений и уменьшает потребность в отжиге радиационных повреждений. Реактивное ионное травление в ВЧЕ разрядах, активированных магнитным полем, называют магнитно активированным реактивным ионным травлением (МАРИТ).

В МАРИТ системах для повышения эффективности ионизации и, следовательно, плотности плазмы используется как параллельное, так и перпендикулярное к поверхности

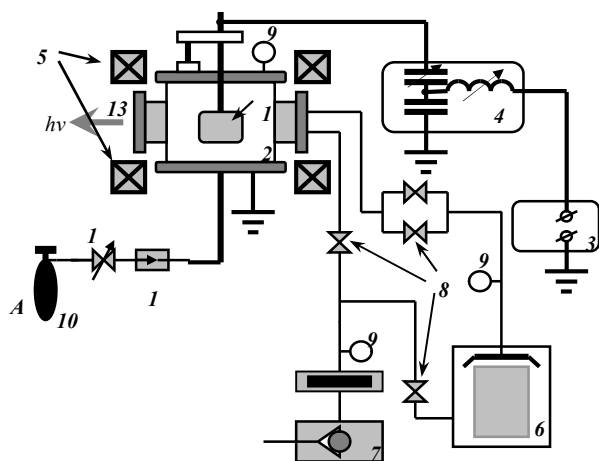
нагруженного электрода магнитное поле. С помощью магнитного поля умеренной величины (~250 Гс) возможно повышение плотности плазмы до десяти раз [3]. Как результат, ионные потоки увеличиваются на порядок величины, соответственно, скорость травления повышается. Вследствие значительной диссоциации исходных молекул плазмохимические процессы в системах активированных магнитным полем могут отличаться от процессов в системах РИТ. Активация ВЧЕ разряда магнитным полем приводит к дрейфу электронов в направлении  $E \times B$ , следовательно, подвижность электронов в радиальном направлении уменьшается. Также можно ожидать, что наложение магнитного поля уменьшит потери на стенках и будет стимулировать объемный нагрев электронов, возбуждение и ионизацию в желаемых областях, прилегающих к электродам. Присутствие магнитного поля делает магнетронные системы существенно отличными от прочих традиционных систем [4].

ВЧЕ разряды, активированные магнитным полем, могут поддерживаться при более низких давлениях газа, что позволяет увеличить отношение потока ионов к потоку химически активных радикалов у поверхности электрода. МАРИТ системы обеспечивают хорошую селективность (как следствие наличия больших потоков радикалов и низких энергий ионов), в то время как появление больших высоконаправленных ионных потоков способствует хорошей анизотропии. Лучшая направленность ионов является результатом уменьшения толщины слоя и понижения давления [1]. Таким образом, МАРИТ системы открывают новые возможности использования взаимодействия низко-энергетичных плазменных потоков с поверхностью.

Плазмохимические процессы с использованием магнетронного ВЧЕ разряда, как и любые другие, определяются параметрами плазмы, которые зависят от параметров установки, таких как давление, расход и состав газа, вводимая в разряд мощность, величина магнитного поля [5, 6]. Поэтому для такой сложной системы важно изучение соотношений между процессами в плазме и действующими параметрами установки. В статье исследовано влияние внешнего

магнитного поля на характеристики ВЧЕ разряда в аргоне. Для измерения усредненных по времени параметров плазмы использовались электротехнические методы, оптическая эмиссионная спектроскопия и двойной лэнгмюровский зонд.

**2. Экспериментальная техника.** Исследовался ВЧЕ разряд магнетронного типа в асимметричном реакторе (Рис. 1). ВЧЕ разряд горел между центральным электродом и стенками цилиндрической разрядной камеры, которая была заземлена. На электрод подавался ВЧ сигнал от ВЧ генератора с частотой 13.56 МГц через согласующее устройство. ВЧ электрод, полый внутри, имел размеры  $1.6 \times 10 \times 10$  см и охлаждался с помощью масла. Диаметр рабочей камеры 30 см, высота 25 см. Проходящая и отраженная ВЧ мощности измерялись рефлектометром. Две магнитные катушки создавали магнитное поле, направленное перпендикулярно ВЧ электрическому полю. Остаточное давление в рабочей камере  $10^{-4} \div 10^{-5}$  Тор. Расход газа регулировался игольчатым накателем и контролировался датчиком расхода газа.



**Рис. 1.** Схема высокочастотного реактора: 1 - ВЧ электрод, 2- разрядная камера, 3 - ВЧ генератор, 4 - согласующее устройство, 5 - электромагнитные катушки, 6 - диффузионный насос, 7 - форвакуумный насос, 8 - магнитные клапаны, 9- датчики давления, 10 - газовый баллон, 11 - игольчатый накататель, 12 - датчик расхода газа, 13 - кварцевое окно.

Для измерения ВЧ напряжения разряда использовались емкостной делитель напряжения и ВЧ- осциллограф. Постоянное напряжение самосмещения у нагруженного электрода выделялось LC-фильтром с низкой резонансной

частотой. ВЧ ток измерялся поясом Роговского, размещенным вокруг провода, подводящего ВЧ напряжение к центральному электроду. Пояс Роговского был откалиброван ВЧ током через безэмкостное, безиндуктивное сопротивление  $R=75$  Ом.

Регистрирующая оптическая система включала монохроматор МДР-23 и фотоэлектронный умножитель ФЭУ-79 с автоматизированной системой регистрации спектров, собранной на базе персонального компьютера. Для регистрации пространственного распределения интенсивности излучения разряда вблизи ВЧ электрода использовалась сканирующая система, состоящая из щели и световода, передвигаемых параллельно плоскости диагностического окна реактора с помощью электродвигателя.

Для измерения средней энергии электронов и концентрации заряженных частиц в камеру был помещен неподвижный двойной электрический зонд из молибденовой проволоки диаметром 0.14 мм, длина собирающих концов зонда составляла 7 мм, расстояние между зондами равнялось 10 мм. Зонд устанавливался перпендикулярно направлению магнитного поля и ВЧ электроду на расстоянии 1 см от ВЧ электрода. На зонд подавалось пилообразное напряжение, меняющееся с частотой 2 В/с в диапазоне от -60 до +60 В. Регистрация ВАХ зонда производилась самописцем, на который подавалось напряжение с измерительного сопротивления, включенного в электрическую цепь зонда. Для фильтрации ВЧ составляющей зондового тока в электрическую цепь зонда включался ВЧ фильтр.

**3. Электрические характеристики ВЧЕ разряда магнетронного типа в аргоне.** В эксперименте измерялись ВЧ ток и ВЧ напряжение разряда, а также постоянное напряжение самосмещения в зависимости от величины постоянного магнитного поля. Вольтамперная характеристика (ВАХ) ВЧЕ разряда магнетронного типа в аргоне показана на рис. 2. (а). Как и для обычного ВЧЕ разряда при низких давлениях ВАХ магнетронного ВЧЕ разряда в исследуемом диапазоне разрядных условий имеет растущий характер. Это, по-видимому, свидетельствует о том, что почти все напряжение падает на приэлектродных слоях, которые обладают растущей ВАХ [7].

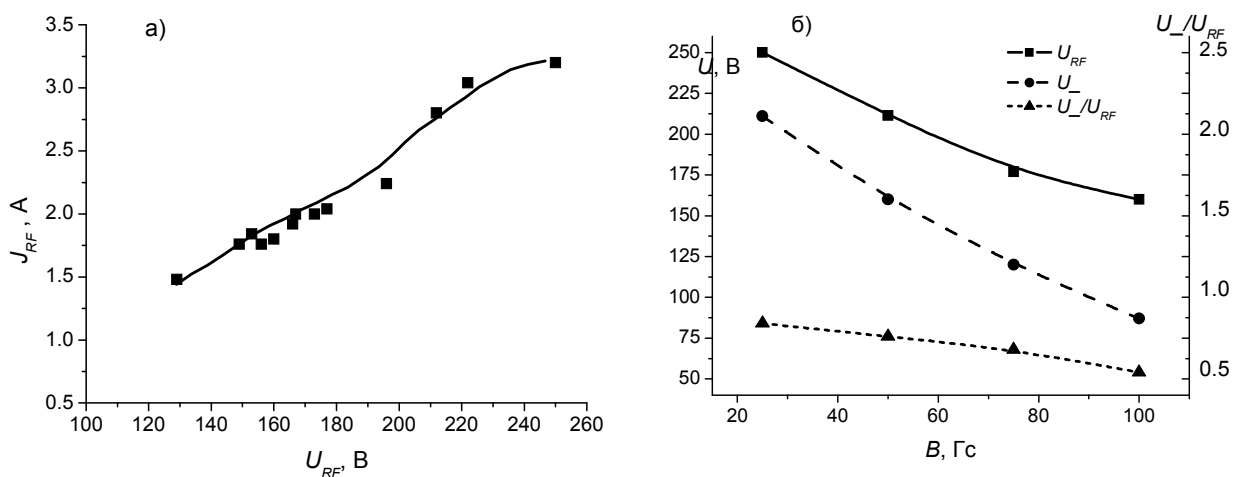


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика магнетронного ВЧЕ разряда (а) и зависимость ВЧ напряжения ( $U_{RF}$ ), напряжения самосмещения ( $U_-$ ) и отношения ( $U_-/U_{RF}$ ) от величины магнитного поля при  $P=2$  Па,  $W=80$  Вт (б).

Поскольку исследуемый ВЧЕ разряд асимметричен (отношение площадей электродов –  $S_{B\perp}/S_{\perp} \sim 0.1$ ), большая часть этого напряжения падает в слое вблизи нагруженного (ВЧ) электрода. ВЧ напряжение разряда  $U_{RF}$ , напряжение самосмещения вблизи нагруженного электрода  $U_-$  и отношение ( $U_-/U_{B\perp}$ ) в зависимости от величины внешнего магнитного поля представлены на рис. 2 (б). Увеличение величины постоянного магнитного поля приводит к падению напряжения и уменьшению тока ВЧЕ разряда. Последнее, по-видимому, является результатом увеличения активной составляющей сопротивления разрядного промежутка [8-11], что приводит к уменьшению сдвига фаз между током и напряжением и, следовательно, при неизменной мощности к уменьшению тока и напряжения.

Разница в подвижности электронов и ионов в плазме приводит к необратимому уходу части электронов в электроды и образованию приэлектродных слоев. При различии в площадях электродов вблизи электрода с меньшей площадью образуется постоянное отрицательное напряжение самосмещения по отношению к электроду большей площади. Отношение ( $U_-/U_{RF}$ ) с ростом магнитного поля уменьшается, что связано с уменьшением разницы в подвижностях электронов и ионов из-за уменьшения подвижности электронов в магнитном поле в направлении  $[\vec{E} \times \vec{B}]$ . Об уменьшении постоянного напряжения самосмещения в ВЧЕ разрядах магнетронного типа сообщалось также в [8-10].

**4. Концентрация заряженных частиц и температура электронов.** Для определения усредненных по периоду значений концентрации заряженных частиц и температуры электронов

использовался двойной электрический зонд. Расчеты концентрации и температуры электронов проводилась согласно методике, предложенной в [12].

Температура электронов определялась согласно выражению

$$kT_e = \frac{ei_0^+}{2\left(\frac{di}{du}\right)_0 - di^+/du}, \quad (1)$$

где  $i_0$  ионный ток при  $u=0$ ,  $(di/du)_0$  наклон вольт-амперной характеристики при нулевом потенциале зонда и  $di^+/du$  наклон линейной части зондовой характеристики при больших потенциалах зонда  $u$ .

Концентрация заряженных частиц определялась из ионного тока насыщения

$$I_i = 0.4 \cdot S_i \cdot en \cdot \left(\frac{2kT_e}{m_i}\right)^{1/2} \quad (2)$$

где  $I_i$  ионный ток,  $S_i$  действующая поверхность зонда и  $m_i$  масса ионов.

Для определения толщины слоя объемного заряда у поверхности зонда использовался закон степени «трех вторых» для плотности тока на зонд [13].

Влияние магнитного поля на концентрацию заряженных частиц и температуру электронов показано на рис. 3. Увеличение индукции магнитного поля приводят к росту концентрации заряженных частиц в межэлектродном промежутке, температура электронов мало зависит от магнитного поля. Полученные зависимости концентрации заряженных частиц от величины магнитного поля согласуются с данными работ

[8-11, 13-16]. Температура электронов в ВЧЕ разрядах в магнитном поле изучена много меньше, чем концентрации заряженных частиц, что обусловлено трудностями ее измерения. В [8] для температуры электронов в переходной области плазма-слой зондовым методом получено значение  $\sim 12$  эВ. Следует отметить, ошибка измерения температуры электронов двойным зондом может быть значительной из-за влияния магнитного поля на наклон вольтамперной характеристики двойного зонда при нулевом потенциале.

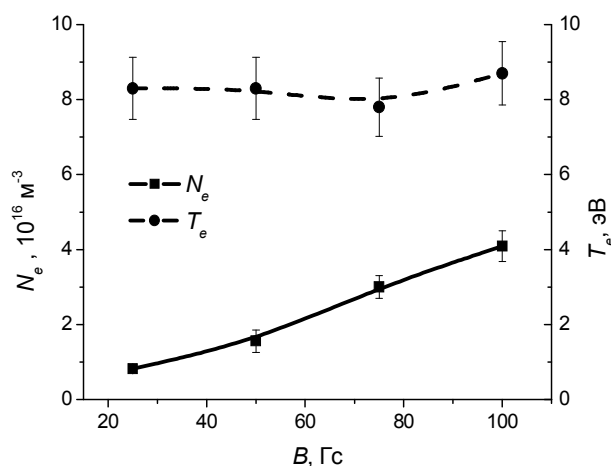


Рис. 3. Зависимости концентрации заряженных частиц и температуры электронов от величины магнитного поля,  $P=2$  Па,  $W=80$  Вт.

Увеличение концентрации электронов с ростом магнитного поля обусловлено

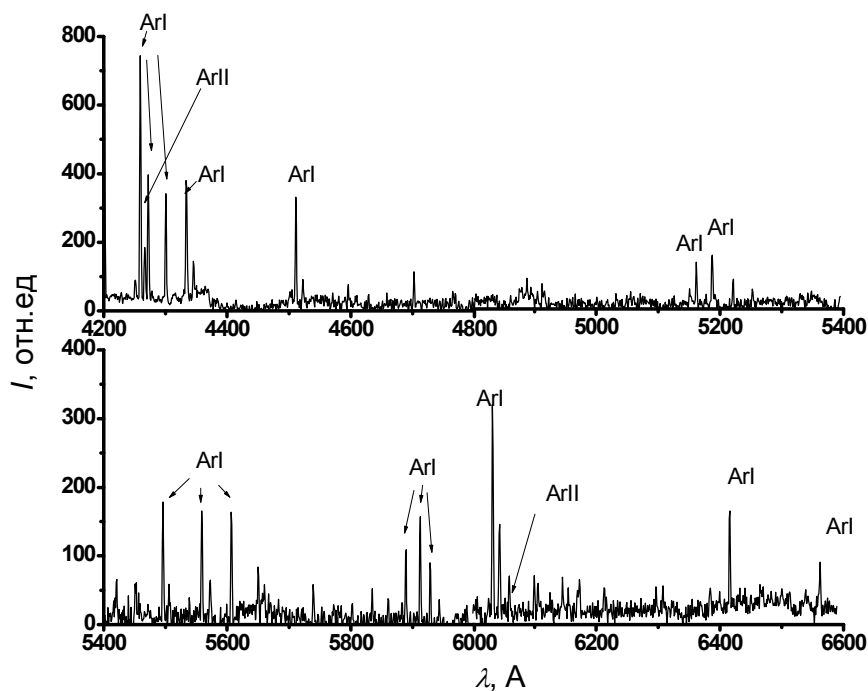


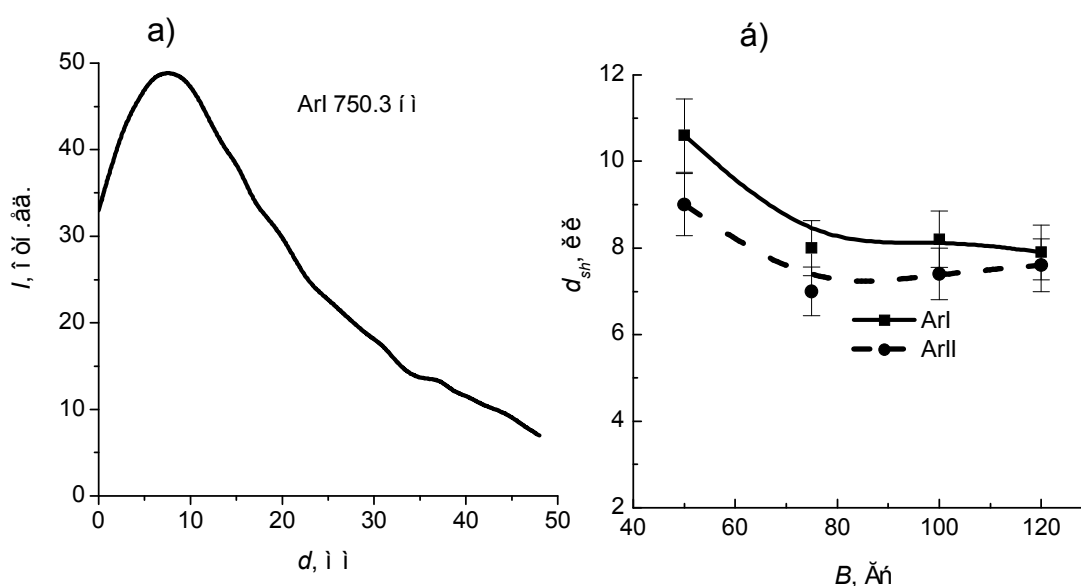
Рис. 4. Обзорный спектр излучения ВЧЕ разряда в аргоне в диапазоне длин волн 4200-6600 Å.  $B=200$  Гс,  $W=100$  Вт,  $P=7$  Па.

замагничиванием электронов магнитным полем и, как следствие, уменьшением потерь заряженных частиц на стенках разрядной камеры. Таким образом, среднее время жизни электронов в разряде растет и, как результат, имеет место более интенсивная ионизация газа. Равновесная концентрация достигается при более высокой плотности электронов.

### 5. Оптические измерения. Вид спектра излучения ВЧЕ разряда в аргоне в диапазоне длин волн от 4200 Å до 6600 Å представлен на рис. 4.

При горении ВЧЕ разряда в таких газах как аргон или азот можно заметить, что при давлении ниже 0.1 Тор оптическое излучение из плазмы далеко от однородного вдоль оси разряда. Подобный эффект наблюдается и в магнетронном ВЧЕ разряде. Неоднородность оптического излучения ясно указывает на неоднородность локальных условий в плазме. Проведены измерения пространственного распределения излучения спектральных линий атомов аргона Ar I с длиной волны 750.3 нм и ионов аргона Ar II (434.8 нм) вблизи ВЧЕ электрода ( $\pm 46$  мм). Типичное экспериментально измеренное пространственное распределение интенсивности линии Ar I (750.3 нм) у поверхности ВЧ электрода показано на рис. 5(a). Для линии ионов аргона Ar II 434.8 нм пространственное распределение интенсивности имело аналогичный вид. На рисунке видно, что интенсивность линий максимальна на некотором расстоянии от электрода.

Физическая причина существования максимумов интенсивности излучения вблизи электродов ВЧЕ разряда заключается в следующем [7]. В середине ВЧЕ разряда в плазме положительного столба велики активная составляющая тока и плотность плазмы, но относительно низко электрическое поле. В слоях, напротив, имеется сильное поле, но низка средняя за период плотность электронов, или иначе, ток имеет в основном реактивный характер, будучи сдвинутым по фазе относительно поля. Поэтому энерговыделение  $W = \langle jE \rangle \sim \langle n_e E^2 \rangle$  (здесь  $j$  – плотность тока,  $E$  – напряженность электрического поля), будучи произведением растущей и падающей функций, проходит через максимум вблизи средней границы слоя пространственного заряда. Соответственно здесь наблюдаются максимальные скорости ионизации и возбуждения газа. В связи с вышесказанным, положение максимума интенсивности вблизи электрода может быть использовано для оценки средней (за период) толщины приэлектродного слоя вблизи ВЧ электрода [7].



**Рис. 5.** Типичный вид пространственного распределения интенсивности излучения спектральной линии Ag I 750.3 нм,  $W=80$  Вт,  $P=1$  Па,  $B=100$  Гс - (а) и средняя толщина слоя пространственного заряда у ВЧ электрода в зависимости от величины магнитного поля,  $P=0.1$  Па,  $W=80$  Вт - (б).

Измеренная по положению максимума интенсивности излучения средняя толщина слоя пространственного заряда вблизи нагруженного (ВЧ) электрода в зависимости от величины магнитного поля показана на рис. 5(б). Толщина слоя пространственного заряда уменьшается с ростом магнитного поля и составляет величину от  $\sim 7$  до 11 мм. Толщина слоя пространственного заряда, в первом приближении, пропорциональна амплитуде колебаний электронов в ВЧ поле, которая в свою очередь пропорциональна скорости дрейфа электронов в электрическом поле и, следовательно, подвижности электронов. Поскольку подвижность электронов уменьшается с ростом магнитного поля, полученный результат представляется закономерным. Об уменьшении толщины слоя пространственного заряда у ВЧ электрода с ростом магнитного поля сообщалось так же в работе [11].

На рис. 6 показаны зависимости интенсивности атомной Ag I 750.3 нм и ионной Ag II 434.8 нм линий от индукции внешнего магнитного поля  $B$ .

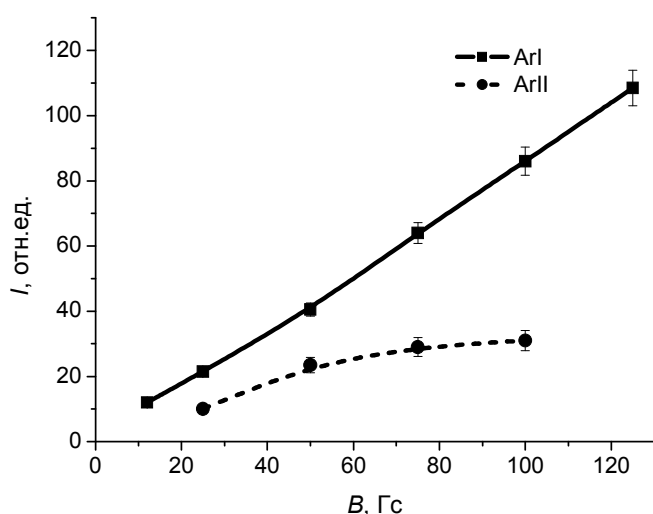


Рис. 6. Зависимости интенсивностей спектральных линий атомов и ионов аргона от величины магнитного поля,  $P=2$  Па,  $W=80$  Вт.

очередь вызывает увеличение скоростей возбуждения и ионизации нейтрального газа электронами. Концентрация электронов увеличивается примерно в 4 раза при увеличении магнитного поля от 25 до 100 Гс. В то же время подвижность электронов в радиальном направлении уменьшается значительно.

Магнитное поле уменьшает подвижность электронов примерно на множитель  $\sim [1 + (\omega_c/\nu)^2]^{-1}$ , где  $\omega_c$  - круговая циклотронная частота электронов и  $\nu$  - частота столкновений электронов. Для магнитного поля в диапазоне 25÷100 Гс  $\omega_c \approx (0.42 \div 1.7) 10^9$  рад/с. Частота столкновений электронов с атомами аргона в диапазоне давлений 1-10 Па  $\nu \approx (4 \cdot 10^7 \div 4 \cdot 10^8)$  с<sup>-1</sup>. Таким образом, в диапазоне давлений 1÷10 Па и магнитном поле 100 Гс  $\omega_c/\nu \sim 40 \div 4$ . Поэтому можно ожидать заметного уменьшения подвижности электронов в радиальном направлении. В результате активное сопротивление плазмы возрастает а разрядный ток уменьшается, сдвиг фаз между током и напряжением также уменьшается.

В то же самое время ионы, вследствие их малой массы, менее подвержены влиянию магнитного поля. Относительное уменьшение подвижности электронов по сравнению с подвижностью ионов уменьшает потребность в постоянном напряжении самосмещения у нагруженного электрода, отношение  $U_-/U_{RF}$  уменьшается (рис. 2. (б)).

В первом приближении амплитуда колебаний электронов  $A \approx (\mu_e E_a)/\omega$  [7], где  $\mu_e$  - подвижность электронов,  $E_a$  - амплитуда напряженности электрического поля и  $\omega$  - круговая частота колебаний электронов в ВЧ поле. Уменьшение подвижности электронов приводит к уменьшению амплитуды колебаний электронов в ВЧ поле и, следовательно, к уменьшению толщины приэлектродного слоя (рис. 5(б)). Увеличение концентрации электронов приводит к увеличению скорости возбуждения электронных состояний атомов и ионов электронами, интенсивность спектральных линий увеличивается (рис. 6).

#### Литература:

1. Lieberman M.A. and Lichtenberg A. J. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing. Wiley, New York. 1994.
2. Gorowitz B. and Saia J. VLSI Electronics Microstructure Science. V.8. Plasma Processing for VLSI, Ed. by N.G. Einspruch, D.M. Brown. Academic Press, INC. 1984.
3. Yeom G. Y. and Kushner M. J. //J. Vac. Sci. Technol. 1989. V. A 7. P.987.
4. Avtaeva S.V. and Otorbaev D.K. In book: Gas Discharges - Fundamentals & Applications. Ed. by J. de Amorim Filho. Transworld Research Network. Kerala, India, 2007. P. 149.
5. Данилин Б.С., Киреев В.Ю. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. М.: Энергоатомиздат, 1987.
6. Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. М.: Энергоатомиздат, 1989.
7. Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н., Яценко Н.А. Высоочастотный емкостной разряд: Физика. Техника эксперимента. Приложения. М.: Наука. 1995.

Для обеих спектральных линий наблюдался рост интенсивности при увеличении индукции магнитного поля. Рост магнитного поля вызывает рост концентрации электронов и, как следствие, увеличение скорости возбуждения атомов аргона, что в свою очередь приводит к увеличению интенсивности спектральных линий.

**6. Обсуждения.** Наложение на ВЧ разряд магнитного поля приводит к дрейфу электронов в направлении  $[\vec{E} \times \vec{B}]$ , в результате подвижность электронов в радиальном направлении уменьшается. Таким образом, потери электронов на стенках разрядной камеры уменьшаются, приводя к повышению концентрации электронов в объеме разрядной камеры (рис. 3), что в свою очередь вызывает увеличение скоростей возбуждения и ионизации нейтрального газа электронами.

8. Lin I. // J. Appl. Phys. 1985. V. 58. P. 2981.
9. Hutchinson A.W., Turner M.M., Doyle R.A., and Hopkins M.B. //Trans. Plasma. Sci. 1995. V. 23. P. 636.
10. Liebermann M.A., Lichtenberg A.J., and Sava S.E.// IEEE Trans. Plasma. Sci. 1991. V. 19. P.189.
11. Kushner M.J.//J. Phys. D.: Appl.Phys. 2003. V. 94. P. 1436.
12. Биберман Л., Панин Б. //ЖТФ. 1951. Т. 21. № 1. С. 12.
13. Козлов О. В. Электрический зонд в плазме. М.: Атомиздат. 1969. С.21.
14. Yeom G.Y., Thornton J.A. and Kushner M.J.// J. Appl. Phys. 1989. V. 65. P.3825.
15. Yeom G.Y., Thornton J.A. and Kushner M.J.// J. Appl. Phys. 1989. V. 65. P. 3816.
16. Park J.-C. and Kang B. //IEEE Trans. Plasma. Sci. 1997. V. 25. P. 499.

**Рецензент: д.ф.-м.н., профессор Кулумбаев Э.Б.**

---