

УДК 533.9...15

## Изучение поведения температуры электронов аргоновой плазмы импульсно-периодического микроволнового резонансного разряда

В. В. Андреев, И. Василеска, М. А. Корнеева

*В работе представлена конструкция и результаты испытания импульсно-периодического резонансного плазменного источника с рабочей частотой 2,45 ГГц на основе магнитной ловушки пробочного типа с постоянными магнитами. Исследовались изменения параметров разряда и температуры электронов аргоновой плазмы в широком диапазоне изменения давления рабочего газа от  $1 \cdot 10^{-4}$  до  $4 \cdot 10^{-3}$  Торр и падающей мощности СВЧ до 600 Вт. Температура электронов в разряде определялась методом относительных интенсивностей (ЭОС) и двойным зондом в указанном диапазоне изменений падающей мощности и давления. Полученные методом ЭОС зависимости в пределах экспериментальных погрешностей находятся в хорошем количественном и качественном согласии с результатами, полученными методом двойного зонда.*

PACS: 52.50.Sw

*Ключевые слова:* ЭЦР-разряд, оптическая эмиссионная спектроскопия, зондовые измерения, двойной зонд.

### Введение

Явления резонансного взаимодействия магнитоактивной плазмы с электромагнитным излучением играют фундаментальную роль в физике плазмы. Несмотря на долгую историю изучения данной проблемы, исследования в области давлений газовой смеси, соответствующих нисходящей ветви зависимости поля пробоя и примыкающих к минимальным значениям напряженности поля, которые реализуются в большом количестве прикладных задач и разработанных технологий, продолжают интенсивно исследоваться. Результаты таких исследований [1, 2] свидетельствуют об эффективном преобразовании энергии электромагнитного излучения в тепловую энергию частиц плазмы разряда и позволяют достаточно просто осуществлять контролируемое управление плазменными параметрами.

### Постановка эксперимента

Экспериментальная установка представляет собой осесимметричную систему, в которой ци-

линдрический  $TE_{111}$ -резонатор помещен в магнитное поле пробочной ловушки, создаваемой постоянными магнитами с системой магнитного замыкания (рис. 1, а). Разряд генерируется в цилиндрической кварцевой колбе (сорт КУ), установленной в резонатор соосно. Резонатор возбуждается от магнетронного СВЧ-генератора на частоте 2,45 ГГц посредством дифракционной связи резонатора с волноводным СВЧ-трактом. Добротность резонатора с кварцевой колбой составляет 600. Высокочастотный тракт оснащен направленными ответвителями (Vegatel — DC900/2500-15), позволяющими контролировать величину падающей и отраженной СВЧ-мощности в рабочих режимах. Коэффициент стоячей волны (КСВ) в тракте не превышает значения 2.

Для изучения основных физических процессов, имеющих место в создаваемой плазме, предусмотрен импульсно-периодический режим работы магнетронного генератора. Реализованная схема модулятора позволяет варьировать длительность и частоту повторения прямоугольных импульсов нагрева в широких пределах, а именно, длительность импульса варьировалась от 0,07 до 5,4 мс, пауза — от 0,2 до 7,1 мс (скважность — от 5 до 10). Передний и задний временные фронты СВЧ-импульсов, определяемые быстродействием применяемых в модуляторе высоковольтных IGBT-ключей, составляют не более 1,3 мкс. Максимальная импульсная выходная — 600 Вт.

Магнитное поле пробочного типа (рис. 1, б), создается постоянными дисковыми магнитами (полюсами) из  $SmCo_5$  с кольцевой системой магнитного замыкания, изготовленной из магнито-

---

Андреев Виктор Викторович, доцент.

Василеска Ивона, студент.

Корнеева Мария Анатольевна, аспирант.

Российский университет дружбы народов (РУДН).

Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.

Тел.: 8 (495) 955-08-27, 8 (495) 955-09-24.

E-mail: vvandreev@mail.ru; ivonavasileska@yahoo.com;

korneevama@mail.ru

---

Статья поступила в редакцию 18 марта 2015 г.

© Андреев В. В., Василеска И., Корнеева М. А., 2015

мягкого материала (пермалой). Изменение величины и профиля магнитного поля осуществляется перемещением полюсов при помощи микрометрической подачи. Измерения осуществлялись при значении индукции в минимуме ловушки (875 Гс), соответствующему значению электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) для рабочей частоты 2,45 ГГц.

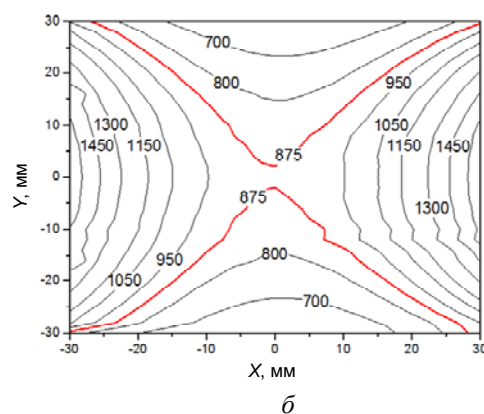
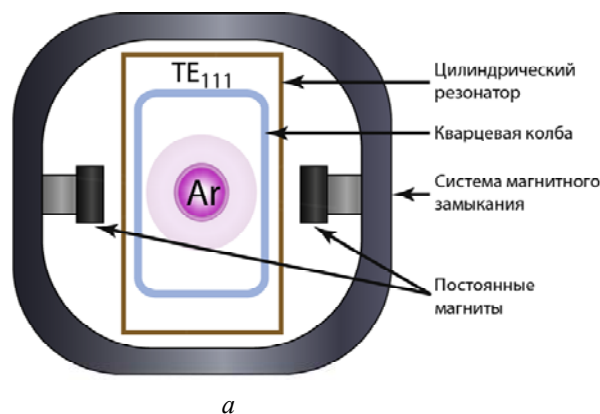


Рис. 1. Принципиальная схема установки (а) и линии равного магнитного поля (б) в Гс.

Разрядная камера была снабжена вакуумно-плотным портом с увиолевым окном, используемым для наблюдения и измерений оптического излучения плазмы разряда, а также портами для вакуумных и зондовых измерений. Фоновое давление в рабочем объеме обеспечивается диффузионным насосом и составляет  $4 \cdot 10^{-5}$  Торр. Подготовка плазмообразующей смеси газов и ее напуск в рабочий объем обеспечиваются пьезоэлектрическим натекателем СНА-2.

Для изучения динамики развития импульсного разряда исследования проводились с высоким временным разрешением, что обеспечивалось системой синхронизации, состоявшей из задающего импульсного генератора Г5-82, обеспечивающего импульсно-периодическую работу модулятора СВЧ-генератора.

Для изучения протекающих процессов с привязкой по времени использовались различные диагностические средства. Регистрация временных зависимостей интегральной интенсивности излучения из плазмы в диапазоне длин волн  $\lambda = 380\text{--}1100$  нм производилась скоростным фотодиодом (быстродействие 2 нс). Детектор падающей и отраженной мощности обеспечивали контроль уровня поглощенной в разряде СВЧ-мощности. Сигнал из резонатора через линейный амплитудный СВЧ-детектор с петлевой антенной поступал на вход осциллографа, что позволяло контролировать временную зависимость амплитуды поля.

Изучение спектральных характеристик излучения без привязки по времени осуществлялось

с помощью монохроматора-спектрографа MS3504i с компенсацией астигматизма. Регистрация спектра излучения из рабочей камеры проводилась с использованием кварцевого световода с рабочей апертурой  $22^\circ$ , сопряженного с одной стороны с MS3504i, а с другой — с вакуумно-уплотненным увиолевым стеклом, расположенным на расстоянии 30 см от плазменной границы. Спектрограф

оснащен зеркальным объективом с фокусным расстоянием  $f = 301,3$  мм и имеет обратную линейную дисперсию 2,37 нм/мм. Диагностика плазмы проводилась с решеткой 1200 штр/мм и шириной щели 30 мкм. Спектр регистрировался с помощью ФЭУ с фиксированным напряжением питания и временем накопления данных. Весь спектрометрический тракт с сохранением всех параметров системы регистрации был прокалиброван по спектральной и абсолютной чувствительности: по длине волны — ртутной лампой ДРС 50-1; эталоном яркости служила малогабаритная вольфрамовая ленточная лампа СИРШ6-40.

Наряду с методами ЭОС-диагностики (определения температуры электронов по относительным интенсивностям спектра излучения) для подтверждения полученных результатов в работе использовался (традиционный для безэлектродных разрядов) двойной зонд, позволяющий проводить измерения и при наличии магнитного поля, что актуально в данных проводимых экспериментах. Зонд был изготовлен из молибденовой проволоки диаметром 0,4 мм, длина открытой поверхности — 3,5 мм, расстояние между зондами — 1,6 мм.

Вся система зондовых измерений была автоматизирована (рис. 2). Напряжение (-60 — +60 В) в цепи зонда задавалось от источника Agilent 6644A, управляемого картой NI USB-6008. Ток в цепи зонда осциллографировался и обрабатывался программно-аппаратными средствами. Синхронизация осуществлялась по сигналу с фотодетектора. Подключение регистрирующего устройства (осциллограф Textronix TDS 2024B) и цепей управле-

ния питанием зонда было реализовано при помощи гальванических развязок (EL200-4) и автономного источника питания.

При этом время распада плазмы с изменением давления и мощности в исследованном диапазоне существенно не изменялось и составляло ~ 1,6 мс.

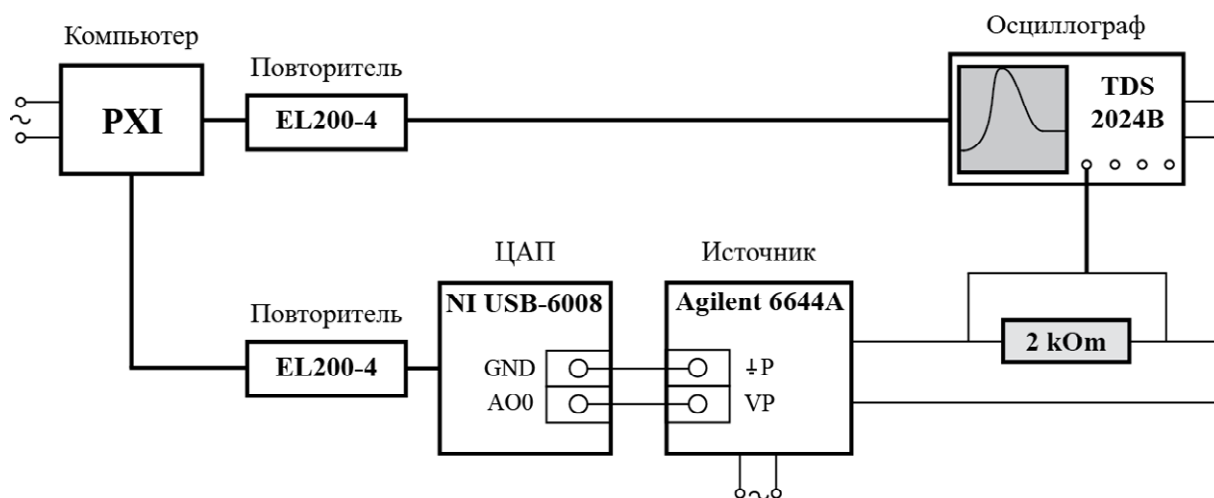


Рис. 2. Автоматизированная система зондовых измерений

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Наличие СВЧ-разряда определялось как визуально, так и по сигналам с амплитудного СВЧ-детектора и фотодиода, установленных в портах резонатора. Осциллограммы соответствующих сигналов представлены на рис. 3 (здесь давление  $2 \cdot 10^{-3}$  Торр, мощность 200 Вт). На них отчетливо виден момент пробоя, сопровождающийся резким снижением напряженности поля в резонаторе и последующим установлением плато, характеризующегося установившимся интегральным свечением разряда. При развертке в 5 мкс (на рис. 3 слева) по сигналу с фотодиода можно определить, что пробой возникал через 7 мкс после начала импульса. Одновременно с этими сигналами измерялись уровни падающей и отраженной разрядом СВЧ-мощности. В диапазоне высоких давлений процент поглощенной в разряде мощности составлял более 90 % (на рис. 3 ~92 %), а вблизи нижней границы рабочего диапазона давлений это значение резко снижалось до 40—60 %.

Аналогичные измерения были проведены при различных давлениях и выходных мощностях СВЧ-генератора. Отмечен факт, что время установления разряда увеличивается с ростом давления, но практически не зависит от вкладываемой мощности. Так, при низких давлениях ( $7 \cdot 10^{-4}$  Торр) время установления стационарной фазы разряда составляло ~ 1 мс. Увеличения давления приводило к росту времени, например, при давлении  $4 \cdot 10^{-3}$  Торр его величина составляла уже 1,7 мс.

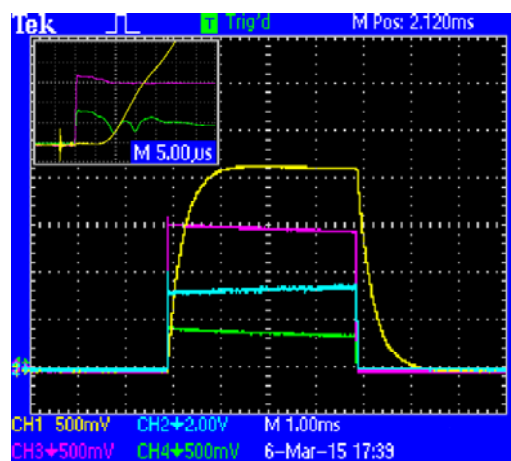


Рис. 3. Осциллограммы сигналов: желтый (CH1) — фотодетектор, синий (CH2) — петлевая антенная, фиолетовый (CH3) — детектор падающей мощности, зеленый (CH4) — детектор отраженной мощности. В левом верхнем углу — увеличенное начало импульса с разверткой 5 мкс

Для определения максимальной глубины погружения зонда снималась зависимость сигнала с амплитудного детектора от положения зонда. Выявлено, что оптимальное положение составляет от 1,5 до 2,5 см от стенки резонатора. Такая глубина погружения не расстраивает резонатор, что подтверждается синхронными измерениями сигнала с амплитудного СВЧ-детектора. Таким образом, дальнейшие измерения проводились при глубине погружения зонда в рабочую камеру не свыше 2 см. Снятие зондовых характеристик проводилось синхронно с импульсами СВЧ-нагрева в фазе установившегося разряда. Развертка зондового тока по

времени показала, что в пределах одного СВЧ-импульса температура сохраняется (в пределах погрешности).

По результатам зондовых измерений были определены зависимости поведения температуры электронов от рабочих параметров разряда: вкладываемой мощности и давления плазмообразующего газа (рис. 4). Измерения производились в диапазоне мощностей от 60 до 280 Вт для трех значений давления.

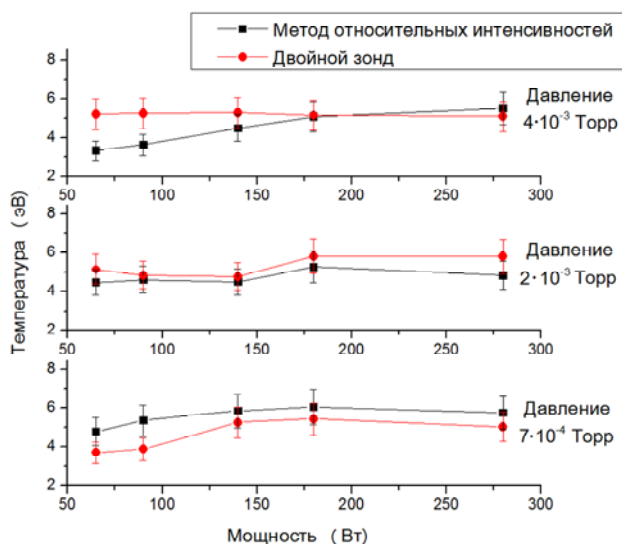


Рис. 4. Зависимость температуры электронов от вкладываемой мощности и давления

Изучение спектра излучения аргоновой плазмы показало, что при фиксированном давлении интенсивность большинства регистрируемых линий возрастает с увеличением вкладываемой в разряд мощности. Учитывая особенности оборудования, применяемого для ЭОС, и специфики проводимых экспериментов, наиболее применимым и удобным методом контроля плазменных параметров ( $n_e$  и  $T_e$ ) при изменении разрядных условий является метод относительных интенсивностей. В большинстве случаев интенсивность является функцией  $n_e$  и  $T_e$ . Тем не менее, как показано в [3, 4], если интенсивности двух линий Ag слабо зависят от  $n_e$ , то отношение интенсивностей этих линий будет функцией только  $T_e$  и может быть использовано для ее определения. Например, такими линиями являются 480,6 нм ( $Ag^+$ ) и 750,3 нм (Ar). Метод определения  $T_e$  по указанным линиям в сходных условиях в рамках корональной модели представлен в [3]. Экспериментальные результаты измерений по состояниям возбуждения показали, что ни модель термодинамического равновесия (ТР), ни модель локального ТР не применимы.

Однако применение только столкновительно-радиационной или только корональной модели к низкотемпературной аргоновой плазме в условиях ЭЦР оказывается некорректным, поскольку ни одна из этих моделей не даст полного описания [5]. Тем не менее, данные модели могут быть применены отдельно для различных групп уровней аргона, при этом интересующие нас линии будут описываться именно корональной моделью, поскольку энергии этих уровней существенно отличаются от энергии ионизации [5].

Температура определялась в условиях, аналогичных зондовым измерениям (рис. 3). Используемый при расчетах нормировочный фактор, включающий в себя сечения возбуждения уровней, был принят равным двум (т. е.  $C = 2$ , см, работу [3]). Представленные на рис. 3 результаты, полученные на основе разных диагностических средств и методов, отражают поведение температуры генерируемой плазмы в зависимости от рабочих режимов разряда. Видно, что экспериментальные результаты достаточно хорошо согласуются между собой. Из них можно сделать вывод, что температура практически не зависит от давления в рабочем диапазоне, но снижается при уменьшении мощности ниже 150 Вт.

## Заключение

В рабочих режимах генерируемого резонансного импульсно-периодического разряда (ЭЦР-разряда) увеличение давления и вкладываемой в разряд СВЧ-мощности приводит к качественным и количественным изменениям параметров разряда и создаваемой плазмы. Показана высокая эффективность поглощения вкладываемой в разряд мощности и резкое возрастание интенсивностей характерных спектральных линий и интегрального потока излучения в области верхней границы изучаемого диапазона давлений. Отмечено постоянство температуры электронов при изменении рабочих параметров в изучаемых диапазонах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. High Density Plasma Sources Ed. O.A.Popov — NJ: Noyes Publications, 1995.
2. Electron cyclotron emission and electron cyclotron heating Ed. Grrizzi — Paris: World Scientific, 2002.
3. Shatas A. A., Hu Y. Z., Irene E. A. // J. Vac. Sci. Technol. A 1992. V. 10. P. 3119.
4. Boffard J. B., Lin C. C., DeJoseph C. A. J. // J. Phys. D: Appl. Phys., 2004. V. 37. P. R143.
5. Vries N., Iordanova E., Hartgers A., et al. // J. Phys. D: Appl. Phys., 2006. V. 39. P. 4194.

## Light spectroscopy and probe measurements of electron temperature in Ar plasmas of pulse-periodic microwave discharge

V. V. Andreev, I. Vasileska, and M. A. Korneeva

Peoples' Friendship University of Russia (PFUR)  
6 Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russia  
E-mail: vvandreev@mail.ru; ivonavasileska@yahoo.com; korneevama@mail.ru

Received March 18, 2015

*A permanent-magnet, pulse-periodic 2.45 GHz ECR plasma source has been constructed and tested in the range of  $1 \cdot 10^{-4}$ — $4 \cdot 10^{-3}$  Torr argon with net pulsed microwave input power up to 600 W. Optical emission spectroscopy (EOS), photometry and probes for different purposes were used to investigate trends of plasma parameters changes within processing parameters. The electron temperature has been measured by using a Langmuir probe and relative intensities of the emission over a wide range of pressure and for various levels of the h.f. power applied to the discharge. The obtained EOS results agree to temperatures measured directly by the double probe within the limits of the experimental errors.*

PACS: 52.50.Sw

*Keywords:* ECR discharge, optical emission spectroscopy, Langmuir probe measurements, dual Langmuir probe.

### REFERENCES

1. *High Density Plasma Sources*, Ed. by O. A. Popov (NJ: Noyes Publications, 1995).
2. *Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Heating*, Ed. by Grrizzi (Paris: World Scientific, 2002).
3. A. A. Shatas, Y. Z. Hu, and E. A. Irene, *J. Vac. Sci. Technol. A* **10**, 3119 (1992).
4. J. B. Boffard, C. C. Lin, and C. A. J. DeJoseph, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **37**, R143 (2004).
5. N. Vries, E. Iordanova, A. Hartgers, et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **39**, 4194 (2006).