

УДК 537.52

## Пространственное распределение параметров электронной компоненты азотной плазмы электродного микроволнового разряда при пониженных давлениях

Ю. А. Лебедев, Г. В. Крашевская, М. А. Гоголева

*Метод двойного электрического зонда использован для измерения пространственных распределений концентрации заряженных частиц, температуры электронов и постоянного потенциала в электродном микроволновом разряде в азоте при давлении 1 Торр. Показано, что вблизи электрода/антенны концентрация заряженных частиц превышает критическое значение. Концентрация и неоднородность разряда растут с увеличением микроволновой мощности.*

PACS: 51.50.+v, 52.25.-b, 52.40.Fd, 52.50.Dg, 52.50.Sw, 52.70.Ds

*Ключевые слова:* микроволновая плазма, микроволновый разряд, зондовая диагностика, неравновесная плазма, микроволновая антенна.

### Введение

Электродный микроволновый разряд — это разряд, создаваемый в окрестности конца электрода/антенны в камере, размеры которой превышают размеры светящейся области разряда. Интерес к исследованию электродного микроволнового разряда (ЭМР) [1—3] вызван рядом причин. Во-первых, ЭМР является представителем сильно неоднородных разрядов и важным является изучение влияния неоднородности плазмы на физико-химические процессы, а также влияния различных факторов на процесс в нем. Кроме того, основной энергоклад в разряд осуществляется вблизи электрода/антенны, т. е. плазма создается вблизи поверхности. Таким образом, удастся интенсифицировать воздействие плазмы на поверхность, и здесь необходимо изучать свойства приэлектродной плазмы для определения потоков активных нейтральных и заряженных частиц на поверхность.

Исследование такого разряда дает возможность изыскания новых методов управления параметрами плазмы. Так, было показано, что малые добавки, обычно используемые в оптической ак-

тинометрии плазмы, влияют на свойства ЭМР [4, 5]. В работе [6] было показано, что ЭМР может быть использован в качестве плазменного катода, поэтому возникает необходимость исследования его характеристик в присутствии внешнего постоянного электрического поля. Настоящая статья описывает результаты некоторых исследований, проводимых в этом направлении.

Ранее методом эмиссионной спектроскопии были проведены исследования электродного микроволнового разряда в водороде и азоте в постоянном электрическом поле [6—8]. Было показано, что постоянное поле изменяет структуру и форму разряда. Были получены напряженности СВЧ-поля. Новая задача связана с изучением влияния внешнего постоянного поля на параметры электронной компоненты.

На первом этапе было проведено детальное исследование параметров электронной компоненты плазмы электродного СВЧ-разряда методом двойного электрического зонда без внешнего постоянного поля. Первые результаты зондовых измерений были описаны в [9, 10], однако экспериментальная установка, использованная в этой работе, позволяла исследовать только радиальное распределение концентрации и температуры электронов и только в одном сечении разряда. В дальнейшем экспериментальная установка была модернизирована и результаты новых зондовых исследований приведены в настоящей статье.

### Экспериментальная установка и методика измерений

Эксперименты проводились на установке, детально описанной в [1—3]. Разрядная камера

Лебедев Юрий Анатольевич<sup>1</sup>, зав. лабораторией.

Крашевская Галина Витальевна<sup>1,2</sup>, доцент.

Гоголева Мария Александровна<sup>1</sup>, инженер.

<sup>1</sup>Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН (ИНХС РАН).

Россия, 119991, Москва, Ленинский проспект, 29.

Тел. 8 (495) 955-43-22. E-mail: lebedev@ips.ac.ru;

masha\_g@list.ru

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31.

E-mail: krashevskaya-gv@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15 января 2015 г.

© Лебедев Ю. А., Крашевская Г. В., Гоголева М. А., 2015

установки представляет собой стальной цилиндр диаметром 15 см, имеющий 4 окна в цилиндрической стенке для наблюдения разряда. Электрод-антенна (5-мм медная цилиндрическая трубка) вводится в камеру с верхнего торца вдоль оси цилиндра (ось разряда) через вакуумный уплотнитель. Электрод-антенна изолирован по постоянно-му току от заземленной камеры, что позволяет независимо изменять его потенциал. Электромагнитная волна с мощностью до 200 Вт и частотой 2,45 ГГц подается в разрядную камеру через коаксиально-волноводный переход. Измерения проводились при давлении 1 Торр и расходе газа  $80 \text{ см}^3/\text{мин}$  при нормальных условиях.

Параметры электронной компоненты плазмы исследовались методом двойных электрических зондов [11—13].

Использование зондовой методики для диагностики микроволновой плазмы сопряжено с рядом специфических трудностей [13]. Они связаны как с возмущением СВЧ-поля зондами, так и с влиянием СВЧ-поля на вольт-амперную характеристику зонда (ВАХ). Возмущение может приводить к возникновению плазмы у зонда. Влияние СВЧ-поля на ВАХ приводит к завышению вычисленной по ВАХ энергии электронов. Это наиболее ярко проявляется при использовании однозондовой методики. В двухзондовом методе это влияние слабее, поскольку расстояние между зондами мало и различие в напряженностях СВЧ-поля в местах их расположения может быть сделано малым. В качестве фильтров в двухзондовой методике используются резисторы, включенные последовательно с зондами.

Одной из причин некорректности зондовых результатов может являться нарушение условия малости диаметра зонда по сравнению с длиной свободного пробега частиц плазмы. При этом ток на поверхность призондового слоя и, соответственно, на зонд отличается от хаотического тока в условиях невозмущающего зонда. В работе [14] исследована работа зонда с размерами, сходными с нашими, в плазме в том же диапазоне давлений. Данные этой работы позволяют предположить, что в наших условиях геометрическими искажениями результатов зондовых измерений можно пренебречь. Отметим еще, что влияние столкновений в призондовом слое на величину температуры электронов, определенной по ВАХ зонда, в случае двухзондовой методики оказывается меньшим, чем в случае измерений одиночным зондом [15].

Разработанная система двухкоординатного перемещения зондов помещена внутри бокового

вакуумированного металлического цилиндра, закрепленного на фланце одного из окон установки.

Использовался двойной зонд, изготовленный из 100-мкм вольфрамовой проволоки, помещенной в тонкие кварцевые капилляры. Длина рабочей части зонда составляет 2,1 мм, расстояние между зондами 2,8 мм. В качестве СВЧ-фильтров применялись 20 кОм резисторы, включенные последовательно с зондами. Перемещение зондов в вертикальном и радиальном направлениях обеспечивается электродвигателями, помещенными в зондовой камере. Диапазон перемещения зондов в вертикальном (аксиальном) направлении составляет 30 мм с минимальным шагом 0,1 мм, в горизонтальном (радиальном) направлении — 23 мм с минимальным шагом 0,15 мм. В качестве зондового напряжения использовался синусоидальный сигнал частотой 10 Гц и амплитудой  $\pm 1,25 \text{ В}$ , получаемый от генератора импульсов произвольной формы GWINSTEK APG-72225 и увеличенный до  $\pm 40 \text{ В}$  повышающим трансформатором. Трансформатор выполнял и функцию развязки цепей источника напряжения и зондов.

Осциллограммы зондового тока (сигнал с измерительного сопротивления величиной 5,6 кОм) и напряжения регистрировались с помощью цифрового запоминающего осциллографа фирмы Tektronix TPS2024 с изолированными каналами, что позволило обеспечить при измерениях гальваническую развязку зонда с «землей». С помощью встроенных функций осциллографа проводилось усреднение сигнала осциллограмм по 128 периодам и, в конечном итоге, строилась ВАХ зонда.

Температура электронов определялась методом «эквивалентного сопротивления» и «полулогарифмического графика» [13]. Оба метода дали совпадающие результаты. Концентрация заряженных частиц определялась по формуле для ионного тока насыщения [13] с учетом того, что основным ионом является ион  $\text{N}_4^+$  [16].

## Результаты и обсуждение

Ниже приведена часть результатов, полученных зондовым методом. Основное внимание уделено аксиальным распределениям параметров, которые невозможно было получить в установке, описанной в [10]. Радиальные распределения, полученные в настоящей работе, согласуются с данными, приведенными в [10].

Видно (рис. 1), что в окрестности электрода концентрация заряженных частиц превышает критическое значение (для частоты 2,45 ГГц имеем  $n_{cr} \sim 7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ) и монотонно уменьшается при уда-

лении от торца электрода (положение  $L = 0$ ) вдоль оси разряда. В радиальном направлении концентрация заряженных частиц более резко падает при увеличении расстояния от оси. Температура электронов монотонно уменьшается вдоль оси, а именно, от 4,5 эВ у электрода до 1,5 эВ вне светящейся области разряда.

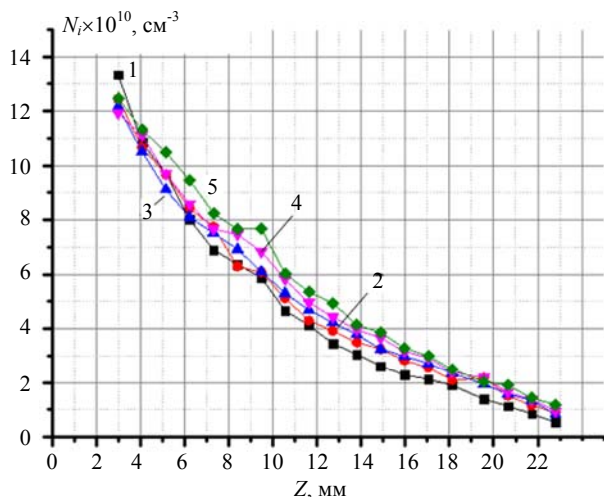


Рис. 1. Распределение плотности плазмы в осевом направлении (за ноль принято положение торца антенны), при различной вкладываемой в разряд СВЧ-мощности: 1 — 60 Вт, 2 — 70 Вт, 3 — 80 Вт, 4 — 90 Вт, 5 — 100 Вт

Вне светящейся области разряда ВАХ зонда симметрична относительно нулевого тока, и эта область изотропна [10]. При введении зондов в светящуюся область разряда ВАХ зондов сдвигается вдоль оси напряжений, что свидетельствует о существовании различия в плавающих потенциалах в местах расположения зондов. Рис. 2 показывает аксиальную зависимость разности потенциалов зондов при разных падающих микроволновых мощностях. При малых мощностях разность потенциалов монотонно уменьшается вдоль оси разряда. При увеличении мощности неоднородность разряда по постоянному потенциалу растет, причем вблизи электрода его величина уменьшается, а на периферии практически не изменяется. Приведенные данные указывают на значительную напряженность постоянного поля в разряде (расстояние между зондами порядка 3 мм). Заметим, что никаких особенностей не наблюдается ни на кривых концентрации заряженных частиц, ни температуры электронов. Нет провала и на радиальном распределении постоянного потенциала (рис. 3). Неоднородность плазмы по постоянному потенциалу коррелирует с аксиальной зависимостью интенсивности излучения разряда в видимом диапазоне, которая имеет провал в центральной области. Эта спектральная область соответствует излучению первой положительной системы азота.

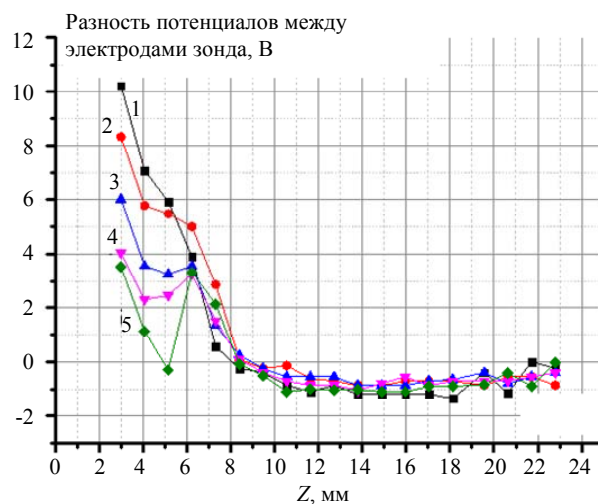


Рис. 2. Распределение разности потенциалов между зондами вдоль оси разряда и нулевого тока на зонд при различной вкладываемой в разряд СВЧ-мощности: 1 — 60 Вт, 2 — 70 Вт, 3 — 80 Вт, 4 — 90 Вт, 5 — 100 Вт

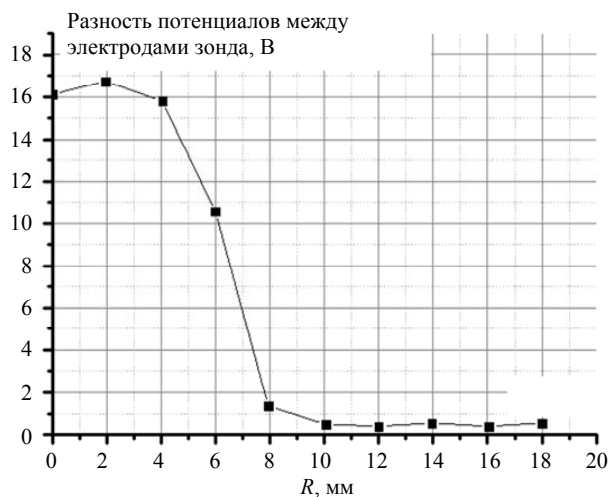


Рис. 3. Распределения разности потенциалов между зондами при нулевом токе на зонд в радиальном направлении при падающей мощности 60 Вт на расстоянии 4 мм от торца электрода

Это первые результаты и для их объяснения необходимы дополнительные эксперименты и проведение двумерного моделирования.

### Заключение

Использование разработанной системы двухкоординатного перемещения двойного электрического зонда позволило впервые получить информацию об аксиальном распределении концентрации заряженных частиц, температуры электронов и напряженности постоянного поля в электродном микроволновом разряде в азоте при давлении 1 Торр и разных падающих мощностях. Показана неоднородность разряда по напряженности постоянного поля в аксиальном направлении, которая растет при увеличении падающей мощно-

сти. Для объяснения полученных результатов необходимы дальнейшие экспериментальные исследования с использованием эмиссионной спектроскопии и моделирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Lebedev Yu. A., Mokeev M. V., Solomakhin P. V., et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. V. 41. P. 194001.
2. Lebedev Yu. A., Tatarinov A. V., Shakhatov V. A. et al. // J. Phys.: Conf. Series. 2010. V. 207. P. 012002.
3. Энциклопедия низкотемпературной плазмы / Под общей ред. В. Е. Фортова. Тематический том VIII-1 Химия низкотемпературной плазмы / под ред. Ю. А. Лебедева, Н. А. Платэ, В. Е. Фортова. — М.: Янус-К, 2005. С. 435—462.
4. Lebedev Yu. A., Mavludov T. B., Epstein I. L., et al. // Plasma Sources Sci. Technol. 2012. V. 21. P. 015015.
5. Lebedev Yu. A., Tatarinov A. V., Titov A. Yu., et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2014. V. 47. P. 335203.
6. Лебедев Ю. А., Татаринов А. В., Эпштейн И. Л. // ТВТ. 2007. Т. 45. С. 325.

7. Лебедев Ю. А., Юсупова Е. В. // Физика плазмы. 2012. Т. 38. С. 677.
8. Лебедев Ю. А., Эпштейн И. Л., Юсупова Е. В. // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52. С. 167.
9. Бардош Л., Лебедев Ю. А. // Журнал технической физики. 1998. Т. 68. С. 29.
10. Бардош Л., Лебедев Ю. А. // Теплофизика высоких температур. 2000. Т. 38. С. 552.
11. Чен Ф. Электрические зонды / Диагностика плазмы. Под ред. Хаддлстоуна Р. и Леонарда С. — М.: Мир. 1967. С. 94.
12. Шотт Л. Электрические зонды / Методы исследования плазмы: под ред. В. Лохте-Хольтгревена. — М.: Мир. 1971. С. 459.
13. Иванов Ю. А., Лебедев Ю. А., Полак Л. С. Методы контактной диагностики в неравновесной плазмохимии. — М.: Наука, 1981.
14. Schulz G. J., Brown S. C. // Phys. Rev. 1955. V. 98. P. 1642.
15. Чан П., Талбот Л., Турян К. Электрические зонды в неподвижной и движущейся плазме. — М.: Мир. 1978.
16. Lebedev Yu. A., Tatarinov A. V., Epstein I. L. // Plasma Sources Sci. & Technol. 2007. V. 16. P. 726.

## Spatial distribution of the electron component parameters in nitrogen plasma of a microwave electrode discharge at reduced pressure

Yu. A. Lebedev<sup>1</sup>, G. V. Krashevskaya<sup>1,2</sup>, and M. A. Gogoleva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis RAS  
29 Leninsky av., Moscow, 119991, Russia  
E-mail: lebedev@ips.ac.ru; krashevskaya-gv@mail.ru

<sup>2</sup>National Research Nuclear University «MEPhI»  
31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia  
E-mail: masha\_g@list.ru

Received January 15, 2015

*The double probe method was used to measure the spatial distributions of charged particle density, electron temperature, and DC potential in the electrode microwave discharge in nitrogen at a pressure of 1 Torr. It is shown that charged particle concentration exceeds a critical value near the electrode/antenna. Concentration and axial nonuniformity of the discharge increases with increasing microwave power.*

PACS: 51.50.+v, 52.25.-b, 52.40.Fd, 52.50.Dg, 52.50.Sw, 52.70.Ds

**Keywords:** microwave plasma, microwave discharge, probe diagnostics, nonequilibrium plasma, microwave antenna.

#### REFERENCES

1. Yu. A. Lebedev, M. V. Mokeev, P. V. Solomakhin, et al., J. Phys. D: Appl. Phys. **41**, 194001 (2008).
2. Yu. A. Lebedev, A. V. Tatarinov, V. A. Shakhatov, et al., J. Phys.: Conf. Series. **207**, 012002 (2010).
3. *Encyclopedia of Low Temperature Plasma* / Ed. V.E. Fortov. *Topical Volume VIII-1 Chemistry of Low Temperature Plasma* / Ed. Yu. A. Lebedev, N. A. Plate, V. E. Fortov (Moscow: Yanus-K, 2005). P. 435 [in Russian]
4. Yu. A. Lebedev, T. B. Mavludov, I. L. Epstein, et al., Plasma Sources Sci. Technol. **21**, 015015 (2012).

5. Yu. A. Lebedev, A. V. Tatarinov, A. Yu. Titov, et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **47**, 335203 (2014).
6. Yu. A. Lebedev, A. V. Tatarinov, I. L. Epstein, *High Temp.* **45**, 325 (2007).
7. Yu. A. Lebedev and E. V. Yusupova, *Plasma Physics Reports* **38**, 677 (2012).
8. Yu. A. Lebedev, I. L. Epstein, and E. V. Yusupova, *High Temp.* **52**, 167 (2014).
9. L. Bardosh and Yu. A. Lebedev, *Tech. Phys.* **68**, 29 (1998).
10. L. Bardosh and Yu. A. Lebedev, *High. Temp.* **38**, 552 (2000).
11. F. Chen, *Electric Probes* / in *Book: Diagnostics of Plasma*, P.94. Eds. by Khaddlone P. and Leonard C. (Mir, Moscow, 1967) [in Russian].
12. L. Shott, *Electric Probes* / in *Book: Methods of Plasma Investigation*, P. 459. Ed. by W. Lochte-Holtgreven. (Mir. Moscow, 1971) [in Russian].
13. Yu. A. Ivanov, Yu. A. Lebedev, and L. S. Polak, *Methods of Contact Diagnostics in Nonequilibrium Plasma Chemistry* (Nauka, Moscow, 1981) [in Russian].
14. G. J. Schulz and S. C. Brown, *Phys. Rev.* **98**, 1642 (1955).
15. P. Chung, L. Talbot, and K. Touryan, *Electric Probes in Stationary and Flowing Plasmas: Theory and Application*. (Mir, Moscow, 1978) [in Russian].
16. Yu. A. Lebedev, A. V. Tatarinov, and I. L. Epstein, *Plasma Sources Sci. & Technol.* **16**, 726 (2007).