

УДК 537.525.99

Исследование параметров плазмы индуктивного ВЧ-источника плазмы диаметром 46 см. Часть I. Параметры плазмы в области скин-слоя

А.Ф. Александров, К.В. Вавилин, Е.А. Кралькина, П.А. Неклюдова, В.Б. Павлов

В работе представлены результаты экспериментального исследования эффективной температуры и концентрации электронов в области скин-слоя индуктивного ВЧ-разряда в инертных газах. Диапазон рассмотренных давлений 0,3–1000 мТорр. Результаты измерений проявили немонокотонную зависимость параметров плазмы от давления. Показано, что при давлениях, соответствующих минимуму электронной температуры, частота упругих столкновений в аргоне и криптоне ниже, чем в гелии, вследствие эффекта Рамзауэра.

PACS 52.80.— s, 52.80.Pi

Ключевые слова: индуктивный, емкостной, высокочастотный, разряд, плазма, электронная температура, концентрация

Введение

В настоящее время в связи с развитием плазменных технологий и конструированием нового поколения источников плазмы, в т.ч. на базе индуктивных ВЧ-разрядов, встает вопрос о выявлении ключевых параметров, влияющих на плотность плазмы и ее пространственное распределение, на эффективность поглощения ВЧ-мощности плазмой индуктивного ВЧ-разряда.

Основными параметрами, определяющими свойства плазмы индуктивного ВЧ-разряда, являются частоты столкновений электронов с компонентами плазмы, толщина скин-слоя d , длина свободного пробега электронов l и длина релаксации электронов по энергиям λ_e .

Существующие в настоящее время работы, посвященные исследованиям индуктивного ВЧ-разряда, можно разделить на две группы. Работы первой группы [1–3] посвящены изучению свойств разряда при низких давлениях, когда электроны набирают энергию в скин-слое, а расходуют ее во всем объеме источника плазмы, т.е. при условиях нелокальности $\lambda, \lambda_e \geq \delta$. Работы второй группы [4, 5] выполнены при повышенных давле-

ниях, при которых реализуется локальный режим $\lambda, \lambda_e \leq \delta$, т.е. режим, при котором электроны набирают и теряют энергию в пределах скин-слоя.

Цель данной работы состоит в систематическом изучении локальных параметров плазмы индуктивного ВЧ-разряда, горящего в инертных газах, при изменении давления от 0,3 до 1000 мТорр при рабочих частотах 2, 4 и 13,56 МГц. В указанном диапазоне давлений происходит существенное изменение параметров δ , λ и λ_e . Режим свободного полета заряженных частиц сменяется диффузионным, режим, характеризующийся нелокальным вводом ВЧ-мощности, сменяется режимом, где ВЧ-мощность вводится локально. Изменение режима горения разряда сопровождается существенной перестройкой пространственного распределения параметров плазмы. Кроме того, изменяются как способность плазмы поглощать ВЧ-мощность, так и соотношение между долями мощности, поступающими в разряд через индуктивный и емкостной каналы, которые, в свою очередь, влияют на параметры плазмы.

Для того чтобы разобраться в физических особенностях изменения параметров плазмы индуктивного ВЧ-разряда в широком диапазоне условий его существования, в настоящей работе были выполнены детальные исследования поведения эффективной температуры и концентрации электронов в области скин-слоя, где происходит поглощение ВЧ-мощности при изменении давления рабочих газов, частоты и мощности ВЧ-генератора. Полученные данные были использованы для оценки частоты упругих столкновений электронов с атомами инертных газов и выделения границ существования различных режимов горения разряда.

Александров Андрей Федорович, зав. кафедрой.
Вавилин Константин Викторович, ст. научн. сотр.
Кралькина Елена Александровна, вед. научн. сотр.
Неклюдова Полина Алексеевна, инженер.
Павлов Владимир Борисович, ст. научн. сотр.
Московский государственный университет
им. М.В.Ломоносова, Физический факультет.
Россия, 111991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2.
Тел.: +7 (495) 939–2574; +7 (495) 939–4773
E-mail: afalexandrov@gmail.com; ekralkina@mail.ru

Статья поступила в редакцию 7 ноября 2013 г.

© Александров А.Ф., Вавилин К.В., Кралькина Е.А., Неклюдова П.А., Павлов В.Б., 2013

**Экспериментальная установка
и методика измерений**

Схема экспериментальной установки подробно описана в [6]. Исследуемый источник плазмы представляет собой кварцевый цилиндр диаметром 46 см и высотой 30 см. В нижнем металлическом фланце выполнены отверстия для откачки объема источника плазмы с помощью турбомолекулярного и форвакуумного насосов. На верхнем металлическом фланце имеется стеклянное окно диаметром 40 см. На боковой поверхности источника плазмы расположена охлаждаемая спиральная антенна, соединенная через систему согласования с ВЧ-генератором. Диагностический стенд позволяет измерять мощность ВЧ-генератора, отдаваемую во внешнюю цепь, ток, текущий через антенну, ВЧ-напряжение на концах антенны, спектр свечения плазмы и пространственное распределение интенсивности свечения плазмы. Стандартная зондовая методика позволяет измерять концентрацию и энергетическое распределение электронов.

Эксперименты проводились с использованием гелия, неона, аргона и криптона в диапазоне давлений 0,1–500 мТорр, диапазоне ВЧ-мощностей 100–500 Вт, рабочие частоты равнялись 2, 4 или 13,56 МГц.

**Результаты измерений концентрации
и эффективная температура электронов**

На рис. 1 показано поведение концентрации электронов в области скин-слоя при изменении давления инертных газов для фиксированной мощности ВЧ-генератора 500 Вт. Как видно, наибольшая концентрация электронов достигается в криптоне, наименьшая — в гелии. Обращает на себя внимание, что существуют две области давления, характеризующиеся различным поведением плотности плазмы с изменением давления. В первой области давлений концентрация электронов увеличивается с ростом давления при всех рассмотренных мощностях ВЧ-генератора, во второй — падает. Абсолютные значения давлений в первой области меньше значений давления во второй области. Величина давления p^* , при котором возрастающий характер изменения концентрации электронов сменяется убыванием, зависит от рода газа. Так, в гелии максимум электронной плотности наблюдается при давлении 100 мТорр, в аргоне — при 30 мТорр, а в криптоне — в области 10–35 мТорр.

На рис. 2 показана зависимость эффективной температуры электронов от давления инертных газов при различных мощностях ВЧ-генератора. Как видно, рост мощности ВЧ-генератора P_{gen}

и давления инертного газа в области $p < p^*$ сопровождается понижением эффективной температуры электронов T_e . Наибольшая температура электронов наблюдается в гелии, наименьшая — в криптоне. Увеличение давления в области $p > p^*$ сопровождается медленным ростом температуры

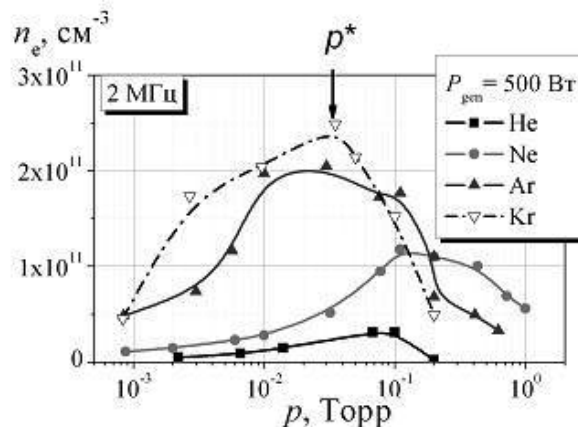


Рис. 1. Зависимость концентрации электронов от давления для гелия, неона, аргона, криптона при мощности генератора $P_{gen} = 500$ Вт. Рабочая частота 2 МГц.

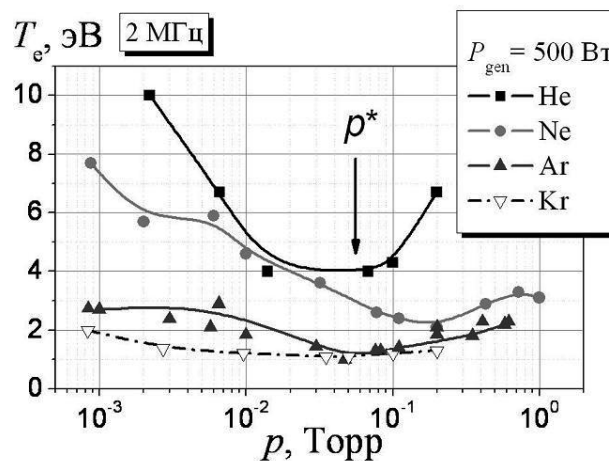


Рис. 2. Зависимости температуры электронов от давления гелия, неона, аргона, криптона при мощности генератора $P_{gen} = 500$ Вт. Рабочая частота 2 МГц.

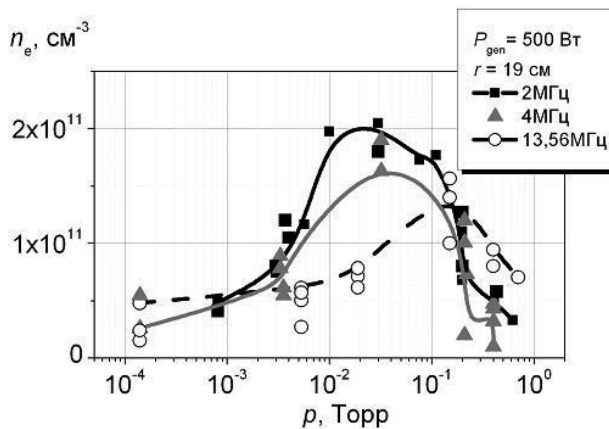


Рис. 3. Зависимости концентрации электронов ($r = 19$ см) от давления аргона для рабочих частот генератора $f = 2; 4; 13,56$ МГц при мощности генератора $P_{gen} = 500$ Вт.

электронов. Особенно сильно данный эффект выражен в гелии.

Представленные ранее зависимости были получены в индуктивном ВЧ-разряде, горящем на частоте 2 МГц. На рис. 3 собраны зависимости концентрации $n_e(p)$ электронов от давления аргона для всех рассмотренных рабочих частот ВЧ-генератора, т.е. 2, 4 и 13,56 МГц. Можно видеть, что абсолютные значения концентрации максимальны для частоты 2 МГц, наименьшие значения концентрации были получены при работе на частоте 13,56 МГц. Увеличение рабочей частоты приводит к смещению положения максимума зависимости $n_e(p)$ в область больших давлений. Так, при частоте 2 МГц максимум концентрации электронов в разряде в аргоне достигается в диапазоне давлений 0,01–0,03 Торр, а при частоте 13,56 МГц — при давлении порядка 0,2 Торр. Эффективная температура электронов с ростом давления инертных газов также проходит через минимум для всех рабочих частот. Наименьшие значения T_e характерны для рабочей частоты 2 МГц. При давлениях более 0,1 Торр эффективная температура электронов возрастает в случае всех рассмотренных частот, причем наиболее ярко этот эффект проявляется для 4 МГц.

Результаты, представленные выше, были получены при фиксированной мощности ВЧ-генератора. Естественно предположить, что немонотонный характер изменения параметров плазмы связан с перераспределением мощности ВЧ-генератора P_{gen} между плазмой и внешней цепью. Однако изменение доли мощности, поглощенной плазмой, от давления для всех рассмотренных инертных газов показало, что только в случае гелия удастся объяснить понижение концентрации плазмы с увеличением давления в области $p > 80$ Торр уменьшением ВЧ-мощности, вкладываемой в плазму. В случае более тяжелых инертных газов величина $P_{\text{pl}}/P_{\text{gen}}$ слабо зависит от давления.

где n_a — концентрация атомов, σ — эффективное сечение упругих столкновений, усредненное по измеренному энергетическому распределению электронов, m — масса электрона, M — масса иона, ν_m — частота упругих столкновений электронов с атомами, ν_{ee} — частота электрон-электронных столкновений, ν_{exc} — частота возбуждения атомов, ν_{iz} — частота ионизации атомов, ε_{exc} — энергия возбуждения атомов, ε_{iz} — энергия ионизации атомов, T_e — температура электронов, k — постоянная Больцмана.

Таким образом, в случае тяжелых инертных газов понижение плотности электронов в области давлений порядка 100 мТорр не удастся объяснить изменением величины мощности, поглощенной плазмой.

Частота упругих столкновений электронов с атомами инертных газов, длина свободного пробега и релаксации энергии электронов

Измеренные значения эффективной температуры электронов были использованы для расчета частоты упругих и неупругих столкновений по формуле:

$$\nu = n_a \int f_M(\varepsilon) \sigma(\varepsilon) \sqrt{\varepsilon} d\varepsilon$$

Необходимые для расчета сечения были взяты из работ [7–9].

Результаты расчетов частоты упругих столкновений электронов с атомами инертных газов показали, что при давлениях, превышающих 0,01 Торр, частоты упругих столкновений в аргоне и криптоне ниже, чем в гелии, несмотря на то, что максимальные значения частоты упругих столкновений выше в тяжелых инертных газах. Для объяснения полученной закономерности заметим, что минимальная эффективная температура электронов T_e в криптоне достигает значения около 1 эВ. В области минимума температуры энергия основной массы электронов находится в области рамзауэровского минимума сечений упругих столкновений. Это приводит к понижению частоты упругих столкновений тяжелых инертных газов по сравнению с гелием. Таким образом, эффект Рамзауэра является причиной понижения частот упругих столкновений в тяжелых инертных газах в области давлений 0,01–0,2 Торр.

Длина свободного пробега электронов l , а также длина релаксации энергии электронов λ_e определялись по формулам [10]:

$$\lambda = 1/(n_a \sigma),$$

$$\lambda_e = \lambda \left[\frac{2m}{M} + \frac{\nu_{ee}}{\nu_m} + \frac{2}{3} \left(\frac{e\varepsilon_{\text{exc}}}{kT_e} \right) \frac{\nu_{\text{exc}}}{\nu_m} + \frac{2}{3} \left(\frac{e\varepsilon_{iz}}{kT_e} \right) \frac{\nu_{iz}}{\nu_m} + 3 \frac{\nu_{iz}}{\nu_m} \right]^{-1/2},$$

Величина скин-слоя δ оценивалась по формуле:

$$\delta = \left(\frac{c^2 \nu}{\omega \omega_{Le}^2} \right)^{1/2}$$

Результаты расчетов λ , λ_e и δ для аргонной плазмы для рабочей частоты 2 МГц показали, что при давлениях менее 100 мТорр λ_e больше размера источника плазмы, т.е. электроны набирают энергию в скин-слое, а расходуют ее во всем объеме источника плазмы. При давлении 100 мТорр дли-

на свободного пробега сравнивается с толщиной скин-слоя, а при давлении 200 мТорр длина релаксации энергии электронов приближается к величине толщины скин-слоя. В этом случае реализуется режим локального поглощения ВЧ-мощности, когда электроны набирают энергию и теряют ее в пределах скин-слоя. Необходимо отметить, что при мощностях ВЧ генератора 400 и 500 Вт длина релаксации электронов по энергии λ_e немонотонно изменяется с давлением. Оценки показывают, что при температурах электронов, менее 1,5 эВ, основным каналом потерь энергии электронов в аргоне являются упругие столкновения [6].

Таким образом, в диапазоне давлений аргона 30–100 мТорр (см. рис. 2) основные потери энергии электронов определяются величиной сечения упругих столкновений электронов с атомами. При давлении аргона 80 мТорр и мощностях генератора 400 и 500 Вт эффективная температура электронов приближается к 1 эВ, при этом максимум ФРЭЭ оказывается в области 0,5 эВ, что соответствует минимуму эффективного сечения упругих столкновений электронов с атомами [9, 11]. Это приводит к появлению локального максимума λ_e в области минимума электронной температуры.

Заключение

Результаты исследования параметров плазмы индуктивного ВЧ-разряда, выполненного в диа-

пазоне давлений 0,2–500 мТорр показали, что эффективная температура и концентрация электронов немонотонно зависят от давления. При давлениях, соответствующих минимуму электронной температуры, в аргоне и криптоне вследствие эффекта Рамзауэра существенно понижается частота упругих столкновений электронов с атомами. Это приводит к существенному росту длины релаксации энергии электронов.

Литература

1. Godyak V.A., Piejak R.B., Alexandrovich B.M. // Plasma Sources Sci. Technol. 2002. V. 11. P. 525.
2. Godyak V.A., Alexandrovich B.M., Kolobov V.I. // Phys. Rev.E. 2001. V. 64. P. 026406.
3. Godyak V. // Phys. Plasmas. 2005. V. 12. P. 055501.
4. Кудрявцев А.А., Смирнов А.С., Цендин Л.Д. Физика тлеющего разряда. — СПб.: Лань, 2010.
5. Reed T.B. // J. Appl. Phys. 1961. V. 32. P. 821.
6. Кралькина Е.А., Неклюдова П.А., Павлов В.Б. и др. // Вест. Моск. Ун-та. Физ. Астрон. (в печати).
7. Kieffer L.J., Dunn H.G. // Review of Modern Physics. 1966. V. 38. No. 1. P. 1.
8. de Heer F.J., Jansen R.H., van der Kaay W. // J. Phys. B: Atom. Mol. Phys. 1979. V. 12. No. 6. P. 979.
9. Buckman S.J. and Lohmann B. // J. Phys. B: At. Mol. Phys. 1986. V. 19. P. 2547.
10. Lieberman M.A. and Lichtenberg A.J. Principles of plasma discharges and material processing. — N. Y., 1994.
11. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. — М.: 1992.

Plasma parameters investigation of the RF inductive plasma source with diameter 46 cm.

Part I. Plasma parameters in the skin layer

A.F. Aleksandrov, K.V. Vavilin, E.A. Kralkina, P.A. Neklyudova, and V.B. Pavlov

Moscow State University, Department of Physics
1 Leninskie Gory, Moscow, 111991, Russia
E-mail: afalexandrov@gmail.com; ekralkina@mail.ru

The experimental investigations of the effective electron temperature and the electron density in the skin layer of the inductive RF discharge in inert gases are represented in this paper. The range of pressure was 0.3–1000 mTorr. The results of research demonstrated non-monotonic plasma parameters dependence on pressure. It was shown that the elastic collision frequency in argon and krypton was lower than in helium at the pressures corresponding to the electron temperature minimum due to the Ramsauer effect.

PACS: 52.80.—s, 52.80.Pi

Keywords: inductive, capacitive, RF, discharge, plasma, electron temperature, density

Bibliography — 11 references

Received November 7, 2013