

Физика плазмы и плазменные методы

УДК 537.525.99

Исследование параметров плазмы индуктивного ВЧ-источника плазмы диаметром 46 см. Часть III. Эффективность вложения мощности

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

В работе представлены результаты измерения эквивалентного сопротивления плазмы, являющегося мерой способности плазмы поглощать ВЧ-мощность. Рассмотрен индуктивный ВЧ-разряд в инертных газах в диапазоне давлений 1 мТорр–10 Торр. Показано, что при частотах упругих столкновений, не превышающих $3 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$, значения эквивалентного сопротивления различных газов в пределах ошибки эксперимента «ложатся» на одну кривую. При частотах столкновений более $3 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ значительный вклад в поглощение вносит емкостная составляющая разряда.

PACS: 52.80.-s, 52.80.Pi

Ключевые слова: индуктивный, емкостной, гибридный, высокочастотный, разряд, плазма, электронная температура, концентрация, эквивалентное сопротивление.

Введение

Центральным вопросом физики индуктивного разряда низкого давления является вопрос о механизмах и эффективности поглощения ВЧ-мощности плазмой. Ранее в подавляющем числе работ *a priori* полагалось, что в условиях экспериментов свойства плазмы определяются мощностью ВЧ-генератора, полностью поглощаемой плазмой. В середине 90-х годов XX века В. Годяк [1–3] с сотрудниками показали, что при низких давлениях в разрядах потери мощности во внешней цепи ВЧ-генератора становятся существенными. В тех же работах была предложена методика оценки доли ВЧ-мощности, поглощенной плазмой на основе трансформаторной модели индуктивного разряда, введена величина, имеющая размерность сопротивления, характеризующая способность плазмы поглощать ВЧ-мощность. В последующих работах [4–8] величину, имеющую размерность сопротивления, было предложено называть эквивалентным сопротивлением плазмы. В работах [4–8] была разработана общая аналитическая теория поглощения ВЧ-мощности плазмой с цилиндрической геометрией, получено аналитическое выражение для эквивалентного сопротивления, выполнено численное моделирование и экспериментальное исследование поведения эквивалентного сопротивления плазмы при низких давлениях.

Настоящая работа посвящена изучению эффективности поглощения ВЧ-мощности плазмой

индуктивного разряда в широком диапазоне давлений от 1 мТорр до 10 Торр, выявлению влияния емкостной составляющей разряда на величину эквивалентного сопротивления плазмы.

Экспериментальная установка и методика измерений

Схема экспериментальной установки подробно описана в [9]. 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 расположено 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.

Для изучения влияния емкостной составляющей индуктивного ВЧ-разряда на эквивалентное сопротивление плазмы использовался узел ввода ВЧ-мощности, позволяющий организовать гибридный ВЧ-разряд, который состоял из трехвитковой спиральной медной антенны, расположенной на внешней стороне источника плазмы, и обкладок конденсатора, расположенных на внутренней стороне верхнего и нижнего фланцев [10]. Антенна и обкладки конденсатора параллельно подключались к одному ВЧ-генератору. Между антенной и обкладками конденсатора была включена разделительная емкость C , позволяющая регулировать относительную роль индуктивного и емкостного каналов в поддержании гибридного ВЧ-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., 2014

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.

Методика определения эквивалентного сопротивления плазмы

Методика определения эквивалентного сопротивления плазмы индуктивного и гибридного ВЧ-разрядов подробно описана в [10].

ВЧ-мощность, поглощенная плазмой, определялась как разность между мощностью, отдаваемой ВЧ-генератором во внешнюю цепь, и потерями мощности в системе согласования и антенне. Для этого с помощью емкостного делителя измерялось напряжение, подводимое к антенне и конденсатору при конкретных условиях эксперимента и без разряда. Одновременно измерялся ток, текущий через индуктор, с помощью пояса Роговского [11].

Потери мощности в системе согласования P_m при отсутствии потерь мощности в индукторе, следуя [12], определялись по формуле:

$$P_m = \frac{U^2}{R_m},$$

где R_m – эффективное сопротивление, определяющее потери мощности в системе согласования. Для этого измерялись U_0 и мощность ВЧ-генератора P_{gen}^0 без разряда. В этом случае естественно приравнять P_m и P_{gen}^0 .

$$R_m = \frac{U_0^2}{P_{gen}^0}$$

Таким образом, при наличии разряда потери мощности в системе согласования можно определить по формуле:

$$P_m = \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 P_{gen}^0$$

В гибридном ВЧ-разряде, однако, мощность теряется еще и при нагреве индуктора. В связи с этим корректный учет потерь мощности во внешней цепи разряда требует сначала определения R_m при использовании только емкостной цепи разряда, а затем R_{ant} с помощью стандартной процедуры [5], где вместо значений P_{gen}^0 используются величины $P_{gen}^0 - P_m$.

Эквивалентное сопротивление плазмы индуктивного R_{pl}^i и гибридного разрядов R_{pl}^h определялось на основании формулы [4, 10]:

$$R_{pl} = \frac{2(P_{gen} - P_m)}{I_i^2} - R_{ant}$$

Результаты измерения эквивалентного сопротивления плазмы

Рассмотрим зависимость эквивалентного сопротивления плазмы R_{pl} от давления. На рис. 1 представлены зависимости эквивалентного сопротивления плазмы от вложенной в плазму мощности P_{pl} для различных давлений неона. В рассматриваемом диапазоне давлений стоит выделить 2 области. Первая – от 1 мТорр до 1 Торр, вторая

– от 1 Торр до 10 Торр. Можно видеть, что в первой области давления значения эквивалентного сопротивления растут с увеличением давления. Во второй области при малых P_{pl} происходит смещение мощности, где начинается рост R_{pl} в сторону больших значений P_{pl} . Чем выше давление, тем сильнее сдвиг. Такое поведение типично для всех рассмотренных инертных газов. Однако граница между двумя областями давления для гелия, аргона и криптона ниже, чем для неона в силу более высоких частот столкновения, характерных для перечисленных газов [13, 14].

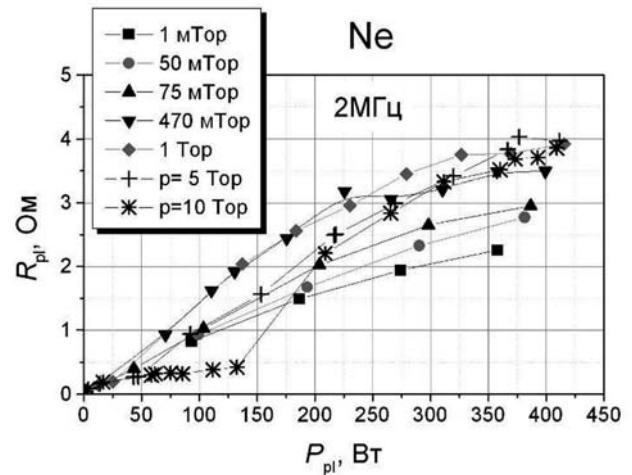


Рис. 1. Зависимость эквивалентного сопротивления плазмы от величины ВЧ-мощности, вложенной в плазму Ne, 2 МГц.

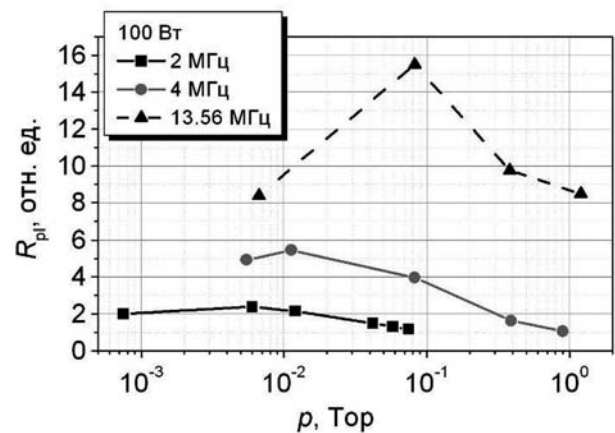


Рис. 2. Зависимость эквивалентного сопротивления плазмы от давления гелия для рабочих частот генератора 2, 4, 13,56 МГц. Мощность ВЧ-генератора $P_{gen} = 100$ Вт.

Обратимся к зависимости эквивалентного сопротивления плазмы от рабочей частоты генератора. На рис. 2 показаны данные, полученные в индуктивном разряде в гелии. Стоит обратить внимание на три характерные особенности поведения зависимости $R_{pl}(p)$. Во-первых, на рост величины R_{pl} с увеличением R_{pl} частоты. Во-вторых, на немонотонную зависимость R_{pl} от давления гелия при фиксированной величине мощности, вложенной в плазму, и, в-третьих, смещение положения максимума R_{pl} в сторону больших значений давления с увеличением рабочей частоты ω .

Оценки показывают, что максимум R_{pl} достигается при условии близости частоты столкновений и рабочей

частоты поля $\nu \approx \omega$, т.е. при условии, когда диэлектрическая проницаемость плазмы достигает максимума.

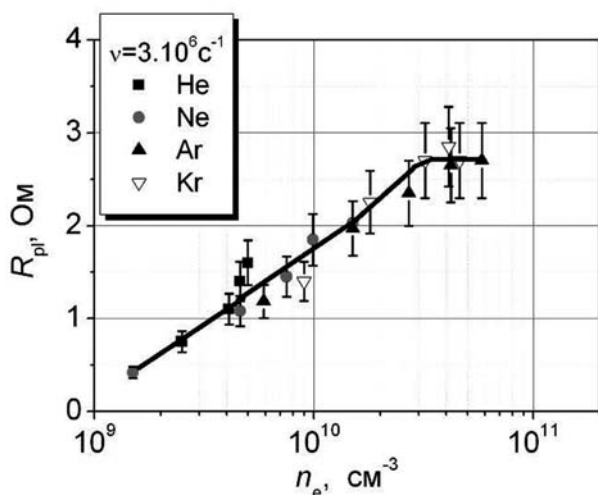


Рис. 3. Зависимость эквивалентного сопротивления плазмы от концентрации электронов при фиксированной частоте упругих столкновений $\nu = 3 \cdot 10^6 \text{ c}^{-1}$.

Эксперименты показали, что замена гелия аргоном и криптоном приводят к смещению положения максимума эквивалентного сопротивления в область больших давлений при малых (~100 Вт) вложенных мощностях. При значениях вложенной мощности порядка 400 Вт (мощность ВЧ-генератора 500 Вт) зафиксировать убывающую ветвь зависимости $R_{pl}(p)$ не удалось. Одной из причин наблюдавшегося смещения положения максимума эквивалентного сопротивления является более низкое значение частоты столкновений в тяжелых инертных газах по сравнению с гелием. Напомним, что в работе [14] было показано, что эффективная частота столкновений в гелии выше, чем в более тяжелых инертных газах, вследствие более высокой эффективной температуры электронов. Эффект тем сильнее, чем выше мощность ВЧ-генератора.

В работах [4, 7, 8] было показано, что при давлениях выше, чем 1 мТорр, основным механизмом поглощения мощности в индуктивном разряде является столкновительный механизм. Таким образом, при условиях настоящих экспериментов основными параметрами, определяющими эффективность поглощения мощности плазмой, должны быть концентрация электронов и частота столкновений. На рис. 3 представлены значения эквивалентного сопротивления плазмы R_{pl} для всех рассмотренных инертных газов, соответствующие одинаковому значению частоты упругих столкновений. Анализ показал, что при условии, что частота упругих столкновений не превышает $3 \cdot 10^7 \text{ c}^{-1}$, значения эквивалентного сопротивления различных газов в пределах ошибки эксперимента (порядка 15%) «ложатся» на одну кривую. Этот факт подтверждает столкновительный механизм поглощения ВЧ-мощности.

Увеличение частоты столкновений до 10^8 c^{-1} приводит к появлению значительного расхождения между данными, полученными в легких инертных газах (He, Ne) и Kr. В соответствии с результатами работы [13, 14] частоты столкновений от 10^8 c^{-1} и выше могут быть достигнуты при давлениях, превышающих 0.1 Торр, где усиливается

влияние емкостной составляющей разряда. В связи с этим возникло предположение, что аномальное поведение эквивалентного сопротивления плазмы криптона может быть вызвано влиянием емкостной компоненты индуктивного разряда. Для того чтобы это проверить, были выполнены эксперименты с индуктивным источником плазмы, дополненным емкостной компонентой, т.е. с так называемым гибридным разрядом [10]. Эксперименты показали, что присутствие емкостной компоненты приводит к существенному возрастанию величины эквивалентного сопротивления, особенно в случае с криптоном. Это дает основание для объяснения наблюдаемого расхождения между величинами R_{pl} , полученными для различных инертных газов при частотах столкновений $\nu > 3 \cdot 10^7 \text{ c}^{-1}$, присутствием явно выраженной емкостной составляющей разряда.

Таким образом, если максимум R_{pl} смещается в область больших, чем 0.1 Торр, давлений из-за низкой электронной температуры, то убывающая ветвь зависимости может быть «замаскирована» влиянием емкостной компоненты индуктивного разряда. Данный эффект наиболее выражен в случае тяжелых инертных газов.

Заключение

В работе представлены результаты измерения эквивалентного сопротивления плазмы, являющегося мерой способности плазмы поглощать ВЧ-мощность. Рассмотрен индуктивный ВЧ-разряд в инертных газах в диапазоне давлений 1 мТорр – 10 Торр. Показано, что при частотах упругих столкновений, не превышающих $3 \cdot 10^7 \text{ c}^{-1}$, значения эквивалентного сопротивления различных газов в пределах ошибки эксперимента «ложатся» на одну кривую. При частотах столкновений более $3 \cdot 10^7 \text{ c}^{-1}$ значительный вклад в поглощение вносит емкостная составляющая разряда.

Литература

1. Piejak R.B., Godyak V.A., and Alexandrovich B.M. // Plasma Sources. Sci.Technol. 1992. V. 1. P. 179.
2. Godyak V.A., Piejak R.B., and Alexandrovich B.M. // Plasma Sources. Sci.Technol. 1994. V. 3. P. 169.
3. Godyak V.A., Piejak R.B., and Alexandrovich B.M. // J. Appl. Phys. 1999. V. 85. P. 703.
4. Кралькина Е.А. //УФН. 2008. Т. 178, № 5. С. 519.
5. Александров А.Ф., Вавилин К.В., Кралькина Е.А. и др. //Физика плазмы. 2007. Т. 33, № 9. С. 802.
6. Александров А.Ф., Вавилин К.В., Кралькина Е.А. и др. //Физика плазмы. 2007. Т. 33, № 9. С. 816.
7. Вавилин К.В., Рухадзе А.А., Ри М.Х., Плаксин В.Ю. // Физика плазмы. 2004. Т. 30. № 8. С. 139.
8. Вавилин К.В., Рухадзе А.А., Ри М.Х., Плаксин В.Ю. // Журнал технической физики. 2004. Т. 74. № 5. С. 44.
9. Кралькина Е.А., Неклюдова П.А., Павлов В.Б., Вавилин К.В., Тараканов В.П. // Вест. Моск. Ун-та. Физ. Астрон. (в печати).
10. Чжао Ч. Влияние внешней цепи на закономерности энерговклада в гибридный ВЧ разряд низкого давления: Дисс.... канд. физ.-мат. наук. М.: 2011.
11. Диагностика плазмы /Под ред. Р. Хаддлстоуна, С. Леонарда. М., 1967.
12. Godyak V.A., Piejak R.B. // JVST. 1990. A8. P. 3833.
13. Александров А.Ф., Вавилин К.В., Кралькина Е.А., Неклюдова П.А., Павлов В.Б. // Прикладная физика. 2014. № 1. С. 9.
14. Кралькина Е.А., Неклюдова П.А., Павлов В.Б., Вавилин К.В. // Вест. Моск. Ун-та. Физ. Астрон. (в печати).

Plasma parameters investigation of the RF inductive plasma source with diameter 46 cm. Part III. Power absorption efficiency

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

Received November 7, 2013

The measurement results of the equivalent resistance, which is a measure of the ability to absorb RF power by plasma, are represented in this paper. The inductive RF discharge in inert gases in the range of pressure 1 mTorr – 10 Torr was examined. It is shown that the equivalent resistance values of the various gases «lay» on the same curve within the experiment error if the elastic collision frequency does not exceed $3 \cdot 10^7 \text{ s}^{-1}$. The capacitive component of the discharge makes significant contribution if the collision frequency is greater than $3 \cdot 10^7 \text{ s}^{-1}$.

PACS 52.80.-s, 52.80.Pi

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

References

1. R. B. Piejak, V. A. Godyak, and B. M. Alexandrovich, *Plasma Sources. Sci. Technol.* **1**, 179 (1992).
2. V. A. Godyak, R. B. Piejak, and B. M. Alexandrovich, *Plasma Sources. Sci. Technol.* **3**, 169 (1994).
3. V. A. Godyak, R. B. Piejak, and B. M. Alexandrovich, *J. Appl. Phys.* **85**, 703 (1999).
4. E. A. Kral'kina, *Usp. Phys.* **178**, 519 (2008).
5. A. F. Aleksandrov, K. V. Vavilin, E. A. Kral'kina, et al., *Plasma Phys. Rep.* **33**, 802 (2007).
6. A. F. Aleksandrov, K. V. Vavilin, E. A. Kral'kina, et al., *Plasma Phys. Rep.* **33**, 816 (2007).
7. K. V. Vavilin, A. A. Rukhadze, M. Kh. Ri, et al., *Plasma Phys. Rep.* **30**, 139 (2004).
8. K. V. Vavilin, A. A. Rukhadze, M. Kh. Ri, et al., *Tech. Phys.* **74**, 44 (2004).
9. E. A. Kral'kina, P. A. Neklyudova, V. B. Pavlov, et al., *Moscow Univ. Phys. Bull.* (in print).
10. Ch. Chzhao, *Candidate's Dissertation in Mathematics and Physics* (Moscow, 2011) [in Russian].
11. R. H. Huddlestone and S. L. Leonard, *Plasma Diagnostics* (New York, 1965; Moscow, 1967).
12. V. A. Godyak and R. B. Piejak, *JVST.* **A8**, 3833 (1990).
13. A. F. Aleksandrov, K. V. Vavilin, E. A. Kral'kina, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 1, 9 (2014).
14. E. A. Kral'kina, P. A. Neklyudova, V. B. Pavlov, et al., *Moscow Univ. Phys. Bull.* (in print).