

Влияние внешнего магнитного поля на эффективность поглощения высокочастотной мощности в пространственно ограниченном индуктивном источнике плазмы

П. А. Неклюдова, Е. А. Кралькина, К. В. Вавилин, И. И. Задириев, А. М. Никонов

В работе представлены результаты измерений эквивалентного сопротивления плазмы в высокочастотном индуктивном источнике плазмы диаметром 46 см при изменении величины индукции внешнего магнитного поля от 0 до 50 Гс, выполненные на рабочих частотах 2, 4 и 13,56 МГц и фиксированной мощности ВЧ-генератора в диапазоне 100–500 Вт. Эксперименты проводились с использованием аргона в диапазоне давлений 0,1–30 мТорр. При наложении внешнего магнитного поля были обнаружены области резонансного поглощения ВЧ-мощности, соответствующие условиям резонансного возбуждения связанных между собой геликонов и косых ленгмюровских волн. Показано, что наложение на разряд внешнего магнитного поля, соответствующего областям резонансного поглощения ВЧ-мощности при рабочих частотах более 2 МГц, позволяет оптимизировать поглощение ВЧ-мощности плазмой. Эффект увеличивается с ростом рабочей частоты.

Ключевые слова: индуктивный, высокочастотный, разряд, плазма, эквивалентное сопротивление, индукция внешнего магнитного поля.

Введение

В настоящее время плазменные технологии широко используются в полупроводниковой промышленности. Одной из основных тенденций развития микроэлектроники является уменьшение размеров разрабатываемых устройств. Кроме того, предполагается, что устройства будущего будут изготавливаться на пластинах всё больших размеров. Развитие современных технологий микроэлектроники требует использования новых материалов, гибкого и тонкого управления процессами производства микросхем.

Одним из важнейших вопросов организации плазменного технологического процесса является

разработка источников плазмы, обладающих свойствами, оптимальными для данного технологического процесса, например, высокой однородностью, заданными плотностью плазмы, энергией заряженных частиц, концентрацией химически активных радикалов.

Анализ показывает, что наиболее перспективными для применения в промышленных технологиях являются индуктивные высокочастотные (ВЧ) источники плазмы, так как они позволяют получать высокую плотность плазмы при относительно невысоком уровне ВЧ-мощности, при этом обрабатывать не только проводящие, но и диэлектрические материалы, использовать в качестве рабочих химически активные газы [1–7]. Очевидно, что развитие ионно-пучковых и плазменных технологий неизбежно приводит к повышению требований к возможностям и параметрам источников плазмы, дает новый толчок к переосмыслению концепций и усовершенствованию устройств.

Одной из важнейших задач физики и техники индуктивных источников плазмы является нахождения энергоэффективных режимов их работы. Это связано с тем [8–13], что в случае индуктивного ВЧ-разряда низкого давления, как правило, не вся мощность ВЧ-генератора поглощается плазмой. Значимая часть мощности теряется во внешней цепи разряда, а именно, в системе согласования и антенне. В связи с этим целесообразно выявить внешние условия, позволяющие

Неклюдова Полина Алексеевна, младший научный сотрудник, к.ф.-м.н.

Кралькина Елена Александровна, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.

Вавилин Константин Викторович, ведущий инженер, к.ф.-м.н.

Задириев Илья Игоревич, инженер.

Никонов Александр Михайлович, аспирант. Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, физический факультет МГУ.

Россия, 111991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2. Тел. +7 (495) 939-47-73.

E-mail: neklydova_pa@mail.ru; ekralkina@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29 мая 2017 г.

© Неклюдова П. А., Кралькина Е. А., Вавилин К. В., Задириев И. И., Никонов А. М., 2017

оптимизировать поглощение ВЧ-мощности плазмой.

В работах [8–10] была предложена методика определения доли ВЧ-мощности, поглощенной плазмой, и введено понятие эквивалентного сопротивления плазмы. Эквивалентное сопротивление плазмы, имеющее размерность сопротивления, характеризует меру способности плазмы поглощать ВЧ-мощность. В работах [11–13] на основании экспериментальных и теоретических исследований, численного моделирования показано, что наложение внешнего магнитного поля на плазму индуктивного ВЧ-разряда приводит при определенных значениях магнитного поля к резонансному возбуждению связанных между собой геликонных и косых ленгмюровских волн. Это сопровождается изменением закономерностей проникновения ВЧ-полей в плазму и возрастанию эффективности поглощения ВЧ-мощности плазмой. Таким образом, величина внешнего магнитного поля является одним из важнейших внешних факторов, позволяющих оптимизировать энергозатраты в плазму. Вторым фактором, как показывают аналитические выражения [11–13], может служить рабочая частота ВЧ-генератора.

Необходимо отметить, что известные из литературы экспериментальные данные [13] получены для источников плазмы относительно небольшого радиуса (не более 10 см) при фиксированной частоте ВЧ-генератора. Современные плазменные реакторы, однако, требуют создания более протяженных областей плазмы. Для того чтобы заполнить имеющийся в литературе пробел, в настоящей работе были изучена зависимость эффективности поглощения ВЧ-мощности плазмой от величины индукции внешнего магнитного поля в технологическом источнике плазмы диаметром 46 см в диапазоне рабочих частот 2–13,56 МГц.

Экспериментальная установка и методика измерений

Схема экспериментальной установки подробно описана в [14, 15]. Плазменный реактор цилиндрической формы изготовлен из кварцевого стекла диаметром 46 см и высотой 30 см. Верхний торцевой фланец плазменного реактора содержит стеклянное окно толщиной 20 мм диаметром 40 см, нижний фланец выполнен из нержавеющей стали. В нижнем фланце смонтирован газопровод, выполнены технологические отверстия для ввода диагностического оборудования, а также отверстия для откачки объема источника плазмы с помощью турбомолекулярного и форвакуумного насосов. На боковой поверхности источника плазмы расположена охлаждаемая спиральная антенна,

соединенная через систему согласования с ВЧ-генератором. На внешней боковой поверхности плазменного реактора расположены два электромагнита, позволяющие создавать в объеме плазменного реактора расходящееся, сходящееся и однородное магнитное поле.

Поддержание разряда в плазменном реакторе осуществлялось с помощью одного из трёх ВЧ-генераторов YSR-10AF, работающих на частоте 2, 4 или 13,56 МГц соответственно и позволяющих плавно регулировать мощность в диапазоне от 0 до 1000 Вт. Мощность от ВЧ-генератора поступала на вход системы согласования. К выходу системы согласования подсоединялась соленоидальная антенна, поддерживающая разряд в источнике плазмы.

Диагностический стенд позволял измерять мощность ВЧ-генератора P_{gen} , отдаваемую во внешнюю цепь, ток I , текущий через антенну, ВЧ-напряжение V на концах антенны.

Для анализа закономерностей энергозатрат в разряд в данной работе определялось эквивалентное сопротивление плазмы. Методика его измерения подробно описана в работах [14, 15].

В индуктивном разряде мощность ВЧ-генератора P_{gen} делится между двумя нагрузками: антенной, обладающей активным сопротивлением R_{ant} , и плазмой, характеризуемой эквивалентным сопротивлением R_{pl} . При этом выражение для баланса мощности во внешней цепи генератора принимает вид:

$$P_{gen} = \frac{1}{2} I_{ant}^2 (R_{ant} + R_{pl}). \quad (1)$$

Пользуясь формулой (1), легко получить выражение, позволяющее определить эквивалентное сопротивление плазмы индуктивного разряда R_{pl} :

$$R_{pl} = \frac{2P_{gen}}{I_{ant}^2} - R_{ant}. \quad (2)$$

Сопротивление антенны R_{ant} можно найти по формуле:

$$R_{ant} = \frac{2P_{gen}^0}{I_{ant0}^2}, \quad (3)$$

измерив мощность ВЧ-генератора P_{gen}^0 и ток антенны I_{ant0} без разряда. Формула (3) верна в предположении, что в отсутствие разряда вся мощность ВЧ-генератора расходуется во внешней цепи.

Мощность ВЧ-генератора в работе определялась как разность между падающей и отраженной мощностями. Ток, текущий через антенну I_{ant} , определялся с помощью пояса Роговского.

Для численного расчета эквивалентного сопротивления использовались формулы, полученные в [11, 12] на основании решения электродинамической задачи о возбуждении ВЧ-полей в пространственно-ограниченном индуктивном источнике плазмы.

Эксперименты проводились с использованием аргона в диапазоне давлений 0,1–30 мТорр, диапазоне ВЧ-мощностей 100–500 Вт, рабочие частоты равнялись 2, 4 или 13,56 МГц, величина магнитного поля изменялась в диапазоне 0–50 Гс.

Результаты измерений и расчетов

Рассмотрим результаты измерений зависимости эквивалентного сопротивления плазмы R_{pl} от величины индукции магнитного поля B , выполненные при рабочих частотах 2, 4 и 13,56 МГц и фиксированной мощности ВЧ-генератора 300 Вт, представленные на рис. 1. Как видно, эквивалентное сопротивление немонотонно зависит от магнитного поля. При рабочей частоте 2 МГц магнитное поле оказывает относительно слабое влияние на способность плазмы поглощать ВЧ-мощность. Рост рабочей частоты сопровождается значительным увеличением эквивалентного сопротивления и смещением области, где поглощение ВЧ-мощности максимально, в область больших B . Так, при частоте ВЧ-генератора 13,56 МГц при рассмотренных магнитных полях значений R_{pl} , лежащих за максимумом эквивалентного сопротивления, достичь не удалось.

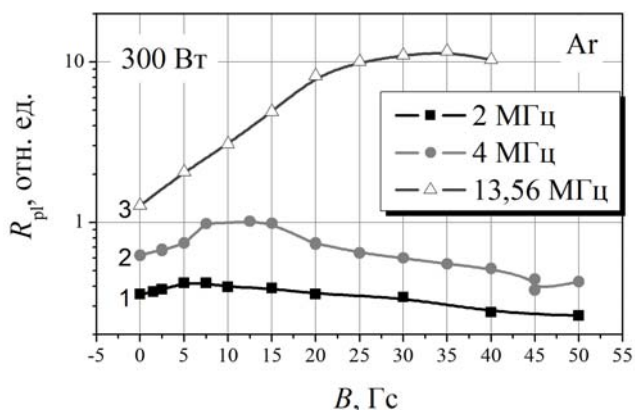


Рис. 1. Зависимость эквивалентного сопротивления плазмы от величины индукции внешнего магнитного поля при рабочих частотах: 1 – 2 МГц, 2 – 4 МГц и 3 – 13,56 МГц. Давление аргона 0,1 мТорр, мощность ВЧ-генератора 300 Вт.

На рис. 2 показана зависимость эквивалентного сопротивления плазмы от мощности ВЧ-генератора. Как видно, увеличение мощности ВЧ-генератора сопровождается увеличением эквивалентного сопротивления плазмы и смещением области резонансного поглощения мощности в область больших B (см. рис. 2).

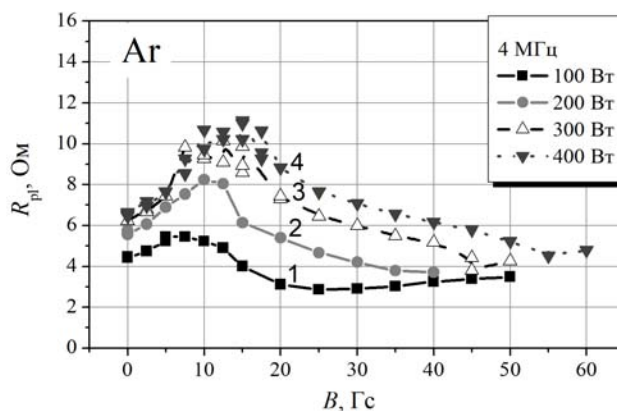


Рис. 2. Зависимость эквивалентного сопротивления плазмы от величины индукции внешнего магнитного поля при различных мощностях ВЧ-генератора и рабочих частотах 4 и 13,56 МГц. Давление аргона 0,1 мТорр. 4 МГц: 1 – 100 Вт, 2 – 200 Вт, 3 – 300 Вт, 4 – 400 Вт; 13,56 МГц: 5 – 300 Вт.

Обзор литературы, выполненный в [13], показывает, что сопротивления антенны в типичных экспериментах с индуктивным ВЧ-разрядом составляет 0,1–3 Ом. Сравнение указанной величины с найденными значениями эквивалентного сопротивления показывают, что эффективность поглощения ВЧ-мощности плазмой разряда можно существенно повысить, используя внешнее магнитное поле и повышая рабочую частоту.

Для того чтобы найти физическую причину немонотонного характера поглощения ВЧ-мощности, экспериментальные данные были сопоставлены с результатами численного расчета эквивалентного сопротивления плазмы по формулам, полученным в [11, 12], где была решена электродинамическая задача о возбуждении ВЧ-полей в пространственно ограниченных индуктивных источниках плазмы с внешним магнитным полем. Результаты расчета эквивалентного сопротивления при условиях, близких к условиям эксперимента, показаны на рис. 3. Можно видеть, что так же, как в эксперименте, наблюдается немонотонная зависимость эквивалентного сопротивления от индукции внешнего магнитного поля. R_{pl} увеличивается с увеличением с рабочей частотой, а рост концентрации плазмы приводит к смещению максимума эквивалентного сопротивления в область больших магнитных полей.

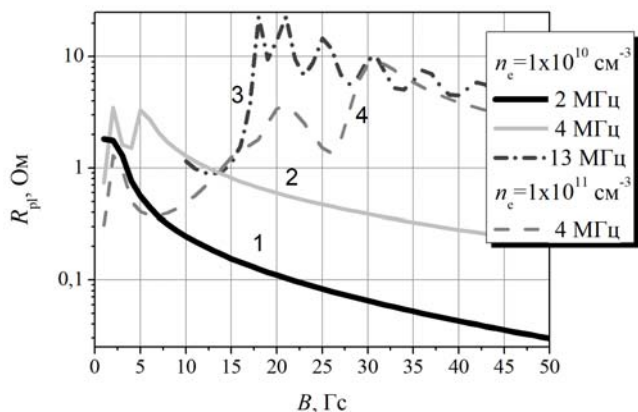


Рис. 3. Зависимость эквивалентного сопротивления плазмы от величины индукции внешнего магнитного поля (результаты расчетов). Давление аргона 1 мТорр. Концентрация плазмы $n = 1 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ (кривая 1 – 2 МГц, 2 – 4 МГц, 3 – 13 МГц) и $n = 1 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ (кривая 4 – 4 МГц).

Дополнительные расчеты показали, что положение локальных максимумов эквивалентного сопротивления (см. рис. 3) соответствуют условиям резонансного возбуждения волн в плазме. Возбуждаемые волны можно сопоставить с геликоноподобной и косой ленгмюровской волнами.

Сравнение данных рис. 1 и 2 с данными рис. 3 показывает, что экспериментальные и расчетные данные находятся в качественном согласии друг с другом. Это дает основание полагать, что наблюдаемое в экспериментах увеличение способности плазмы поглощать ВЧ-мощность связано с резонансным возбуждением геликонов и косых ленгмюровских волн.

Заключение

В работе представлены результаты исследования влияния величины индукции внешнего магнитного поля на эффективность поглощения ВЧ-мощности плазмой индуктивного ВЧ-разряда в источнике диаметром 46 см. Показано, что эквивалентное сопротивление плазмы растет с увеличением рабочей частоты и немонотонно зависит от индукции внешнего магнитного поля. Положение максимума смещается в область больших магнитных полей при увеличении рабочей частоты и плотности плазмы. Оценки показывают, что положение максимумов эквивалентного сопротивления плазмы соответствуют областям резонансного

возбуждения геликонов и косых ленгмюровских волн.

Суммируя результаты, полученные в настоящей работе, можно сделать вывод, что, наложение на разряд внешнего магнитного поля, соответствующего областям резонансного поглощения ВЧ-мощности при рабочих частотах более 2 МГц, позволяет оптимизировать поглощение ВЧ-мощности плазмой. Эффект увеличивается с ростом рабочей частоты.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-60187 мол_а_дк.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lieberman M. A., Lichtenberg A. J. Principles of plasma discharges and materials processing. – Hoboken. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
2. Chamber P., Braithwaite N. Physics of Radio-Frequency Plasmas. – N. Y., 2011.
3. Donnelly V. M., Kornblit A. // J. Vac. Sci. Technol. 2013. Vol. A. 31. No. 5. P. 050825.
4. Chen F. F. High Density Plasma Sources. Ed. by Oleg A. Popov. – Park Ridge, New Jersey: Noyes Publications, 1996.
5. Conrads H., Schmidt M. // Plasma Sources Sci. Technol. 2000. Vol. 9. P. 441.
6. Hopwood J. // Plasma Sources Sci. Tech. 1992. Vol. 1. P. 109.
7. Галперин В. А., Данилкин Е. В., Мочалов А. И. Процессы плазменного травления в микро- нанотехнологии. — М.: МИЭТ, 2009.
8. Piejak R. B., Godyak V. A., Alexandrovich B. M. // Plasma Sources. Sci. Technol. 1992. Vol. 1. P. 179.
9. Godyak V. A., Piejak R. B., Alexandrovich B. M. // J. of Appl. Phys. 1999. Vol. 85. 2. P. 703.
10. Godyak V. A., Piejak R. B., Alexandrovich B. M. // Plasma Sources. Sci. Technol. 1994. Vol. 3. P. 169.
11. Вавилин К. В., Рухадзе А. А., Пу М. Х., Плаксин В. Ю. // Физика плазмы. 2004. Т. 30. № 8. С. 739.
12. Александров А. Ф., Бугров Г. Э., Вавилин К. В., Керимова И. К., Кондранин С. Г., Кралькина Е. А., Павлов В. Б., Плаксин В. Ю., Рухадзе А. А. // Физика плазмы. 2004. Т. 30. № 5. С. 434.
13. Кралькина Е. А. // УФН. 2008. Т. 178. № 5. С. 519.
14. Kralikina E. A., Rukhadze A. A., Pavlov V. B., Vavilin K. V., Nekliudova P. A., Petrov A. K., and Alexandrov A. F. // Plasma Sources Sci. Technol. 2016. Vol. 25. P. 015016.
15. Кралькина Е. А., Неклюдова П. А., Павлов В. Б., Вавилин К. В. // Вестник МГУ. Серия 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 2014. № 1. С. 84.

Effect of an external magnetic field on the efficiency of absorption of high-frequency power in a spatially limited inductive plasma source

P. A. Nekliudova, E. A. Kralkina, K. V. Vavilin, I. I. Zadiryev, and A. M. Nikonov

Department of Physics, Moscow State University
Bld. 2, 1 Leninskie gory, Moscow, 111991, Russia
E-mail: nekludova_pa@mail.ru; ekralkina@mail.ru

Received May 29, 2017

The equivalent plasma resistance dependencies on the external magnetic field (0–50 Gs) measured in a radio-frequency inductive plasma source with a diameter of 46 cm at the working frequencies 2, 4 u 13.56 MHz and fixed RF power source's power which was varied in a range of 100–500 W are represented in this paper. Experiments were carried out in argon in the pressure range 0.1–30 mtorr. The presence of external magnetic field leads to the appearance of resonance domains of the RF power absorption. The location of domains of efficient power absorption corresponds to the conditions of the linked helicons and Trivelpiece-Gould waves resonance excitation. It is shown that it is possible to optimize RF power coupling to plasma at the magnetic fields corresponding to the resonance RF power absorption and at working frequencies 2 MHz and higher. The effect enhances with the rise of working frequency.

Keywords: Inductive, radiofrequency, discharge, plasma, equivalent resistance, external magnetic field.

REFERENCES

1. M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg *Principles of plasma discharges and materials processing* (Hoboken. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005).
2. P. Chamber and N. Braithwaite, *Physics of Radio-frequency Plasmas* (N. Y., 2011).
3. V. M. Donnelly and A. Kornblit, *J. Vac. Sci. Technol. A.* **31** (5), 050825 (2013).
4. F. F. Chen, *High Density Plasma Sources* Ed. by Oleg A. Popov (Park Ridge, New Jersey: Noyes Publications, 1996).
5. H. Conrads and M. Schmidt, *Plasma Sources Sci. Technol.* **9**, 441 (2000).
6. J. Hopwood, *Plasma Sources Sci. Tech.* **1**, 109 (1992).
7. V. A. Galperin, E. V. Danilkin, and A. I. Mochalov, *Processes of Plasma Etching in Micro- and Nanotechnologies* (BINOM, Moscow, 2010) [in Russian].
8. R. B. Piejak, V. A. Godyak, and B. M. Alexandrovich, *Plasma Sources. Sci. Technol.* **1**, 179 (1992).
9. V. A. Godyak, R. B. Piejak, and B. M. Alexandrovich, *J. of Appl. Phys.* **85** (2), 703 (1999).
10. V. A. Godyak, R. B. Piejak, and B. M. Alexandrovich, *Plasma Sources. Sci. Technol.* **3**, 169 (1994).
11. K. V. Vavilin, A. A. Rukhadze, M. Kh. Ri, and V. Yu. Plaksin, *Plasma Phys. Rep.* **30** (8), 687 (2004).
12. A. F. Aleksandrov, G. É. Bugrov, K. V. Vavilin, I. F. Kerimova, S. G. Kondranin, E. A. Kral'kina, V. B. Pavlov, V. Yu. Plaksin, and A. A. Rukhadze, *Plasma Phys. Rep.* **30** (5), 398 (2004).
13. E. A. Kral'kina, *Phys. Usp.*, **51** (5), 493 (2008).
14. E. A. Kralkina, A. A. Rukhadze, V. B. Pavlov, K. V. Vavilin, P. A. Nekliudova., A. K. Petrov, and A. F. Alexandrov, *Plasma Sources Sci. Technol.* **25**, 015016 (2016).
15. E. A. Kralkina, P. A. Nekliudova, V. B. Pavlov, K. V. Vavilin, *Moscow Univ. Phys. Bull.* **69** (1), 92 (2014).