

Влияние внешнего магнитного поля на радиальное распределение ионного тока насыщения зонда в высокочастотном индуктивном источнике плазмы

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

В работе представлены результаты измерений радиального распределения ионного зондового тока насыщения в высокочастотном индуктивном источнике плазмы диаметром 46 см при изменении величины индукции внешнего магнитного поля B 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. В качестве рабочего газа использовался аргон, давление которого изменялось от 0,1 до 30 мТорр. Показано, что наложение внешнего магнитного поля позволяет управлять радиальным распределением зондового ионного тока насыщения. Выявлены оптимальные условия создания протяженных участков однородной плазмы диаметром более 30 см.

Ключевые слова: индуктивный, емкостной, высокочастотный, разряд, плазма, ионный ток насыщения, индукция внешнего магнитного поля.

Введение

В настоящее время высокочастотные (ВЧ) источники плазмы низкого давления широко используются в области земных и космических технологий [1–7]. Плазма индуктивного ВЧ-разряда применяется для травления, напыления и осаждения покрытий, в процессах поверхностной модификации материалов, в качестве активной среды космических электрореактивных двигателей и источников света.

Многообразие реализаций и модификаций устройств на основе индуктивного ВЧ-разряда делает актуальным изучение физических особенностей разряда. В целом, практическое использование индуктивного ВЧ-разряда, развитие и оптимизация характеристик источников плазмы (ИП)

на его основе требуют нахождения ключевых внешних факторов влияния на разряд, позволяющих управлять его основными параметрами, прежде всего, плотностью и концентрацией плазмы, а также их пространственным распределением. Последнее особенно важно для ИП, широко применяемых в полупроводниковой промышленности, где необходимы высокие плотность и однородность плазмы.

В последние годы в микроэлектронике наблюдается тенденция к увеличению диаметра обрабатываемых пластин. Предполагается, что устройства будущего будут изготавливаться на пластинах всё больших размеров. Таким образом, развитие технологий микроэлектроники требует создания гибко управляемых плазменных рабочих процессов, позволяющих получать протяженные участки равномерной плотной плазмы. Применение устройств на основе индуктивного ВЧ-разряда позволяют создавать такую среду.

В настоящее время в литературе описаны три подхода к решению проблемы получения однородной плазмы [1, 8–13]. *Первый подход* связан с искусственным уменьшением коэффициента диффузии электронов вблизи стенок источника плазмы путем использования периферийного магнитного поля [8]. В работе [8] представлен ИП, где в качестве узла ввода мощности используется плоская антенна. На внешней цилиндрической поверхности реактора расположены магниты, создающие магнитное поле, индукция которого быстро падает с удалением от стенок. Основная идея состоит в том, что в присутствии периферий-

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 19 мая 2017 г.

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

ного магнитного поля замедляется уход электронов на стенки реактора, который неизбежно происходит вследствие их хаотического движения. Это приводит к выравниванию радиального распределения плотности плазмы. В частности, в работе [8] получено равномерное распределения плазмы с концентрацией порядка 10^{11} – 10^{12} см⁻³ на подложках диаметром 20 см.

Вторым подходом к получению протяженной области однородной плазмы является нахождение формы и расположения антенны, приводящих к оптимизации распределения ВЧ-полей на поверхности и в объеме источника плазмы [9, 10].

Третий подход состоит в использовании внешнего, преимущественно аксиального магнитного поля, проникающего внутрь плазмы [11–13]. Магнитное поле, с одной стороны, позволяет менять локализацию областей максимальных значений ВЧ-поля, а с другой стороны, понижает коэффициент диффузии поперёк магнитного поля.

В настоящее время, несмотря на большое количество предложенных методов получения протяженных областей однородной плазмы, вопрос о влиянии внешнего магнитного поля на радиальное распределение параметров плазмы, в частности, на радиальное распределение зондового ионного тока насыщения, изучен далеко не полностью. В связи с этим целью данной работы являлось изучение влияния индукции внешнего магнитного поля на радиальное распределение зондового ионного тока насыщения в технологическом плазменном реакторе диаметром 46 см.

Экспериментальная установка и методика измерений

Схема экспериментальной установки была ранее 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 выполнен из стекла толщиной 20 мм и диаметром 40 см, нижний фланец выполнен из нержавеющей стали.

В нижнем фланце выполнены технологические отверстия для ввода диагностического оборудования и смонтирован газопровод, 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 вблизи верхнего и нижнего фланцев расположены два электромагнита, позволяющие создавать в объеме плазменного реактора

расходящееся, сходящееся и однородное магнитное поле.

Поддержание разряда в плазменном реакторе осуществляется 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 поступает на вход системы согласования. К выходу системы согласования подсоединялась соленоидальная антенна, поддерживающая разряд в источнике плазмы.

Измерения ионного тока насыщения i_+ проводилось с помощью двух подвижных цилиндрических зондов Ленгмюра: один из них находился на расстоянии 1 см от нижнего фланца, а второй зонд располагался в центральном сечении газоразрядной камеры на расстоянии 15 см от верхнего фланца. Диаметр зондов составлял 0,3 мм, длина 7 мм. Для регистрации зондового ионного тока насыщения на зонды подавалось напряжение – 60 В относительно нижнего фланца источника плазмы.

В данной работе были получены радиальные распределения i_+ при изменении индукции внешнего магнитного поля B в центральном сечении источника плазмы ($z = 15$ см) и у нижнего фланца. Результаты измерений были выполнены в диапазоне давлений аргона 0,1–30 мТорр и на рабочих частотах 2, 4 и 13,56 МГц. Величина магнитного поля изменялась в диапазоне 0–50 Гс.

Результаты измерений

На рис. 1 показаны типичные радиальные распределения ионного тока насыщения при различных значениях индукции внешнего магнитного поля. Из рис. 1 видно, что увеличение B сопровождается изменением пространственного распределения ионного тока насыщения. При отсутствии магнитного поля значения ионного тока максимальны на оси источника плазмы. Рост B сначала приводит к выравниванию величин i_+ по радиусу источника, а затем к появлению провала в центральных областях разряда. При одних и тех же значениях B провал тем сильнее, чем выше рабочая частота разряда. Необходимо отметить, что на рабочей частоте 13,56 МГц однородное радиальное распределение ионного тока удается получить только вблизи нижнего фланца источника плазмы. В центральном сечении ($z = 15$ см) распределение $i_+(r)$ получается асимметричным относительно оси вращения ИП, по-видимому, вследствие влияния емкостной связи между плазмой и элементами узла ввода ВЧ-мощности.

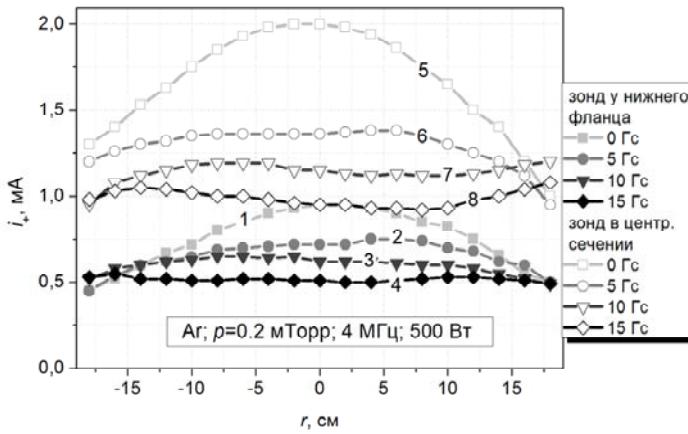


Рис. 1. Пространственное распределение ионного тока насыщения при различных значениях индукции внешнего магнитного поля. Полые значки – зонд в центральном сечении источника плазмы ($z = 15$ см), сплошные – у нижнего фланца. Давление аргона 0,2 мТорр, мощность ВЧ-генератора 500 Вт, рабочая частота 4 МГц. Кривые 1,5 – без магнитного поля; 2,6 – 5 Гс; 3,7 – 10 Гс; 4,8 – 15 Гс.

На рис. 2 показана зависимость размера R_{unif} области однородности (в пределах $\pm 5\%$) зондового ионного тока насыщения от магнитного поля. Как видно, с ростом давления максимальный размер области однородности плазмы смещается в область больших магнитных полей. При этом, как

показали эксперименты, качественный характер изменения зависимости $i_s(r)$ с увеличением B сохраняется. Наилучшее по однородности распределение удастся получить при давлениях 0,1–8,5 мТорр и индукции магнитного поля $B = 5–15$ Гс. Здесь значения R_{unif} превышают 30 см.

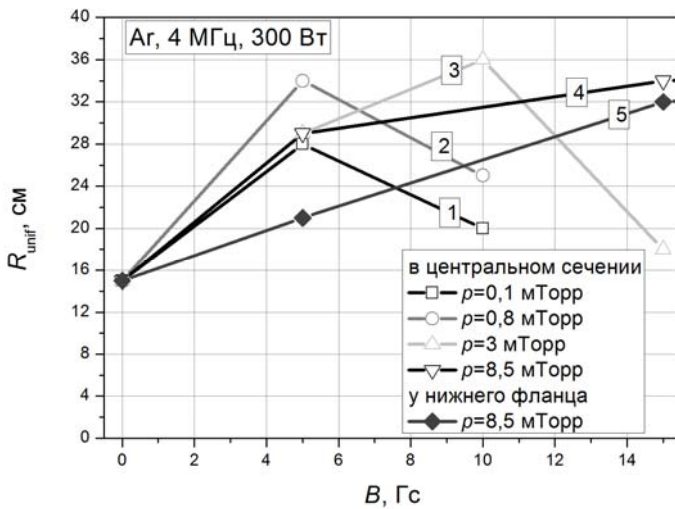


Рис. 2. Зависимость диаметра области однородности ионного тока в центральном сечении (полые значки) и вблизи нижнего фланца (сплошные значки) от магнитного поля. Аргон, частота генератора 4 МГц, мощность ВЧ-генератора 300 Вт. Линия 1 – 0,1 мТорр; 2 – 0,8 мТорр; 3 – 3 мТорр; 4,5 – 8,5 мТорр.

Результаты расчетов

Рассмотрим, как меняется характер проникновения ВЧ-полей в плазму при изменении величины индукции внешнего магнитного поля. На рис. 3 показаны радиальные зависимости ВЧ-полей, рассчитанные на основании теоретической модели индуктивного источника плазмы, помещенного во внешнее магнитное поле [12, 13]. Результаты расчетов показали, что существуют значения внешнего магнитного поля, при которых ВЧ-поля проникают вглубь плазмы. Это происходит в области резонансного возбуждения связанных между собой геликонов и косых ленгмюровских волн. Выход из резонанса приводит к усилению полей вблизи стенок источника плазмы.

Очевидно, что основными факторами, влияющими на однородность плазмы, являются длина свободного пробега электронов, их лармо-

ровский радиус, геометрические размеры плазмы, положение и ширина области локализации максимальных значений ВЧ-полей.

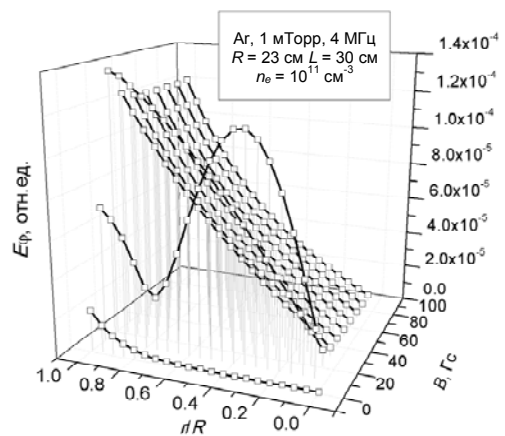


Рис. 3. Пространственное распределение азимутального электрического поля 4 МГц, 1 мТорр.

В индуктивном ВЧ-разряде без магнитного поля ключевым внешним условием, позволяющим влиять на пространственное распределение параметров плазмы, является давление рабочего газа. В работе [16] показано, что при давлениях менее 100 мТорр длина релаксации электронов по энергиям больше не только размера скин-слоя, но и типичных значений радиуса ИП. В этом случае электроны набирают энергию в скин-слое, а расходуют ее во всем объеме источника плазмы, т. е. реализуется нелокальный режим поглощения мощности. При наложении на разряд внешнего аксиального магнитного поля движение электронов в радиальном направлении становится ограниченным. Это означает, что появляется ещё один параметр – ларморовский радиус, изменение величины которого позволяет осуществить переход к локальному в радиальном направлении режиму ввода мощности, когда электроны набирают энергию и теряют ее локально в области той же радиальной координаты. Необходимо отметить, что реализация локального в радиальном направлении режима вложения мощности оказывается возможной даже при низких давлениях, когда характерная длина свободного пробега электронов существенно превышает не только толщину скин-слоя, но и радиус источника плазмы.

Типичные значения ларморовского радиуса для электронов с энергией, лежащей в диапазоне 1–100 эВ, показаны на рис. 4. Как видно, уже при магнитном поле 5 Гс ларморовский радиус электронов оказывается существенно ниже радиуса источника плазмы. Более того, ларморовский радиус оказывается меньше характерного размера области вложения ВЧ-мощности. Из рис. 3 видно, что наложение внешнего магнитного поля сопровождается существенными изменениями области локализации ВЧ полей в плазме. В области сильных ВЧ-полей происходит интенсивный нагрев электронов. При наложении на разряд внешнего магнитного поля движение электронов поперек магнитного поля затруднено, поэтому изменение области локализации ВЧ-полей приводит к значительным изменениям радиального распределения плотности плазмы, а, следовательно, и зондового тока насыщения. Это открывает широкие возможности управления радиальным распределением ионного тока при изменении величины индукции внешнего магнитного поля.

Расчеты показывают, что увеличение давления выше 10 мТорр приводит к ухудшению проникновения ВЧ-полей в плазму. В этом случае использование внешнего магнитного поля для получения протяженных областей однородной плазмы нецелесообразно.

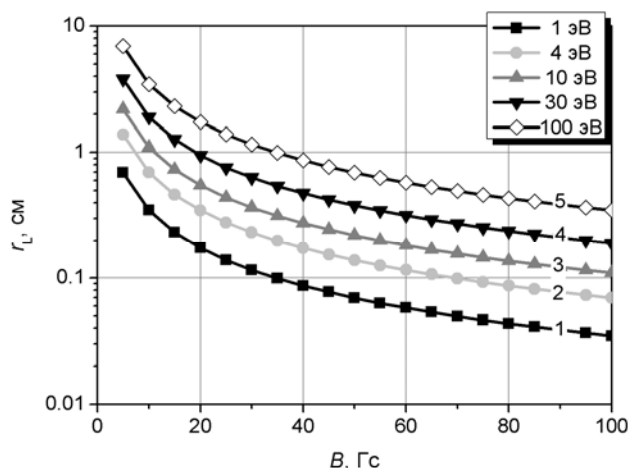


Рис. 4. Значения ларморовского радиуса электронов с энергией, лежащей в диапазоне 1–100 эВ. Кривая 1 – 1 эВ, 2 – 4 эВ, 3 – 10 эВ, 4 – 30 эВ, 5 – 100 эВ.

Заключение

В работе представлены результаты исследования влияния величины индукции внешнего магнитного поля на пространственное распределение ионного тока насыщения в источнике плазмы диаметром 46 см. Показано, что изменение величины внешнего магнитного поля позволяет управлять пространственным распределением ионного тока насыщения. Наибольшие по размеру области однородной плазмы (диаметром более 30 см) получены на частоте 4 МГц при использовании однородного магнитного поля с индукцией 5–15 Гс.

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. and Kornblit A. // J. Vac. Sci. Technol. A. 2013. Vol. 31. No. 5. P. 050825.
4. Chen F. F. High Density Plasma Sources. Ed. by O. A. Popov — Park Ridge, New Jersey: Noyes Publications, 1996.
5. Conrads H. and 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- нанотехнологиях. — М.: МИЭТ, 2009.
8. Hopwood J., Guarnieri C. R., Whitehair S. J., and Cuomo J. J. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1993. Vol. 11(1). P.152.
9. Collins K. US patent 6444084. Applied Materials SantaClara, USA. 2002.

10. Wang S., Hoffman, D.J., Cui C., Ye Y., Delgado G., Mcparland D., Miller M. L., Buchberger Jr. D.A., Shannon S. C. US patent 6652712. Applied Materials SantaClara, USA. 2003.
11. Кралькина Е. А. // УФН. 2008. Т. 178. № 5. С. 519.
12. Вавилин К. В., Рухадзе А. А., Ри М. Х., Плаксин В. Ю. // Физика плазмы. 2004. Т. 30. № 8. С. 739.
13. 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.
14. Kral'kina 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. No. 1. 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.
16. Кралькина Е. А., Неклюдова П. А., Павлов В. Б., Вавилин К. В., Тараканов В. П. // Вестник МГУ. Серия 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 2014. № 1. С. 79.

PACS: 52.80.-s, 52.80.Pi

The effect of an external magnetic field on the radial distribution of the ion saturation current of a probe in a high-frequency inductive plasma source

P. A. Nekliudova, E. A. Kral'kina, K. V. Vavilin, I. I. Zadiryev, and A. M. Nikonov

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

Received May 19, 2017

The measured dependencies of the probe ion saturation current radial distribution on external magnetic field value in the range 0–50 Gs in a radio-frequency inductive plasma source with a diameter of 46 cm are presented in the work. The measurements were carried out at operating frequencies of 2, 4 and 13.56 MHz at fixed power of the radio-frequency power source. RF power source's power was varied in a range of 100–500 W. The working gas was argon in the pressure range 0,1–30 mTorr. It is shown that the variation of an external magnetic field makes it possible to control the radial distribution of the probe ion saturation current. The optimal conditions for creating extended sections of a homogeneous plasma with a diameter of more than 30 cm are revealed.

Keywords: Inductive, capacitive, radio-frequency, discharge, plasma, saturated ion current, external magnetic field value.

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 O. 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. J. Hopwood, C. R. Guarnieri, S. J. Whitehair, and J. J. Cuomo, *J. Vac. Sci. Technol. A*. **11** (1), 152 (1993).
9. K. Collins, US patent 6444084. Applied Materials SantaClara, USA. (2002).
10. S. Wang, D. J. Hoffman, C. Cui, Y. Ye, G. Delgado, D. Mcparland, M. L. Miller., Jr. D. A. Buchberger, S. C. Shannon, US patent 6652712. Applied Materials SantaClara, USA. (2003).
11. E. A. Kral'kina, *Phys. Usp.* **51** (5), 493 (2008)..
12. K. V. Vavilin, A. A. Rukhadze, M. Kh. Ri, and V. Yu. Plaksin, *Plasma Phys. Rep.* **30** (8), 687 (2004).
13. 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).
14. E. A. Kral'kina, A. A. Rukhadze, V. B. Pavlov, K. V. Vavilin, P. A. Nekliudova, A. K. Petrov, and A. F. Alexandrov, *Plasma Sources Sci. Technol.* **25** (1), 015016 (2016).
15. E. A. Kral'kina, P. A. Nekliudova, V. B. Pavlov, and K. V. Vavilin, *Moscow Univ. Phys. Bull.* **69** (1), 92 (2014).
16. E. A. Kral'kina, P. A. Nekliudova, V. B. Pavlov, K. V. Vavilin, and V. P. Tarakanov, *Moscow Univ. Phys. Bull.* **69** (1), 86 (2014).