

УДК 537.525.99

## Математическое моделирование индуктивного ВЧ-разряда, помещенного во внешнее магнитное поле, посредством программы KARAT

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

*В работе представлены результаты математического моделирования PIC-методом пространственного распределения параметров плазмы и ВЧ-полей в индуктивном ВЧ-разряде, помещенном во внешнее магнитное поле. Показано, что с ростом величины внешнего магнитного поля происходит смещение максимальных значений плотности плазмы по радиусу к стенкам источника плазмы, а по оси разряда — от антенны в центральные части разряда. Закономерности изменения плотности плазмы коррелируют с изменениями пространственного распределения ВЧ-поля.*

PACS: 52.80.-s, 52.80.Pi, 52.65.-y

*Ключевые слова:* индуктивный, высокочастотный, разряд, плазма, магнитное поле, геликон, косая ленгмюровская волна, PIC-метод.

### Введение

В настоящее время в литературе [1—7] большое внимание уделяется исследованию индуктивного ВЧ-разряда, помещенного во внешнее магнитное поле. Большой интерес к исследованию разряда вызван, во-первых, возможностью получения плотной плазмы при относительно невысоких энергозатратах, что востребовано в большом количестве практических приложений, а, во-вторых, многообразием физических процессов, протекающих в разряде. В работе [8] для целей ионного стимулирования вакуумно-дугового нанесения покрытий, т. е. для создания потока ионов, величина которого соответствует высоким скоростям осаждения, предложено использование индуктивного ВЧ-разряда, помещенного во внешнее магнитное поле. Величина магнитного поля выбирается из условий резонансного возбуждения геликоновых волн [8].

В работе [9] выполнено экспериментальное исследование параметров плазмы «геликонного разряда» в макете ВЧ гибридной плазменной системы, предназначенной для напыления покрытий с помощью магнетрона в присутствии стимулирующего ионного облучения. Результаты экспериментов показали, что при наложении на разряд однородного магнитного поля с индукцией более 30 Гс в источнике плазмы формируется «плазменный столб» с резко очерченными границами в радиальном направлении. Рост магнитного поля позволяет значительно увеличить ионный ток у нижнего фланца источника, где должна располагаться подложка с обрабатываемым образцом.

Настоящая работа посвящена математическому моделированию физических процессов в индуктивном ВЧ-разряде, помещенном во внешнее магнитное поле, с целью объяснения закономерностей, обнаруженных экспериментально [9].

### Методика вычислений

Математическое моделирование индуктивного ВЧ-разряда низкого давления в аргоне проводилось PIC-методом с помощью программы KARAT [10]. Математической моделью, лежащей в основе кода, являются уравнения Максвелла с различными материальными уравнениями, в т.ч. в виде кинетического уравнения, решаемого методом частиц (PIC-метод). В данной работе использовалась двумерная осесимметричная версия, в которой учитываются все компоненты скорости частиц. При расчете рассматривалось два варианта счетных областей. В первом случае она представ-

Александров Андрей Федорович, заведующий кафедрой.  
Вавилин Константин Викторович, старший научный сотрудник.  
Кралькина Елена Александровна, ведущий научный сотрудник.  
Павлов Владимир Борисович, старший научный сотрудник.  
Петров Александр Кириллович, аспирант.  
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова.

Россия, 111991, Москва, Ленинские горы, 1/2.  
Тел. 8 (495) 939-47-73. E-mail: alpetrov57@gmail.com  
Тараканов Владимир Павлович, старший научный сотрудник.  
Институт теплофизики экстремальных состояний ОИВТ РАН.  
Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13/19.

Статья поступила в редакцию 28 сентября 2015 г.

© Александров А. Ф., Вавилин К. В., Кралькина Е. А., Павлов В. Б., Петров А. К., Тараканов В. П., 2015

ляла собой цилиндр длиной 14 см и радиусом 3,5 см. Во втором случае длина составляла 40 см при радиусе 4 см. Граница счетных областей является идеальным проводником с нулевым потенциалом. Области, занятые плазмой, имеют радиус 2 и 3 см и длину 11 и 30 см соответственно. Боковые стенки и торцевая поверхность источника плазмы, отстоящая от границы счетной области в продольном направлении  $z$  на 1,5 см, являются диэлектриками. Торцевая поверхность при  $z = 12,5$  см и 30 см является идеальным проводником, ее потенциал равен нулю. На внешней боковой поверхности цилиндра при  $z = 3, 3,5$  и 4 см расположены три витка с током, осциллирующим с частотой 12,5 МГц.

При моделировании рассматривалось однородное магнитное поле с индукцией 20—70 Гс. Для уменьшения времени счета масса ионов  $M$  взята равной 2000 массам электронов  $m$ . Расчеты выполнялись при концентрациях аргона  $3 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>. В процессе счета регистрировались компоненты электромагнитного поля в объеме, пространственные распределения потенциала, концентрации и кинетическая энергия электронов и ионов. Выбранные физические и счетные параметры обеспечивали выполнение важного условия: шаг сетки существенно меньше дебаевского радиуса плазмы. Только при выполнении этого условия результаты PiC-моделирования физически обоснованы.

### Результаты расчетов

На рис. 1 и 2 показаны распределения плотности плазмы вдоль оси  $z$  в сечениях, отстоящих от оси источника плазмы на различных расстояниях  $r$ , рассчитанные при значениях индукции внешнего магнитного поля 20 и 50 Гс соответственно.

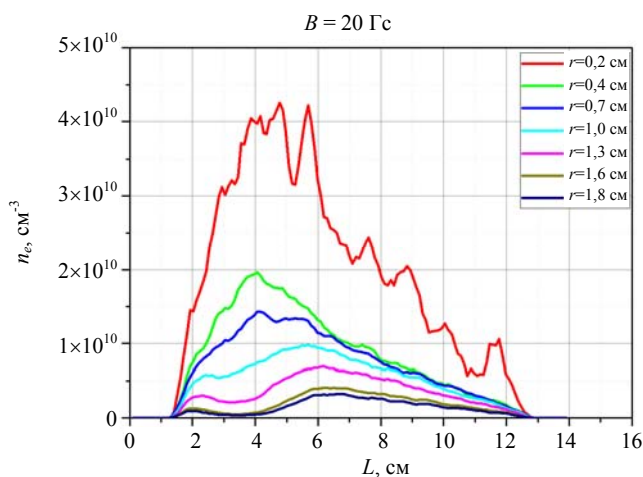


Рис. 1. Распределение концентрации электронов вдоль оси  $z$  на различных расстояниях по  $r$  от оси источника плазмы.  $B = 20$  Гс. Источник радиусом 2 см и длиной 11 см

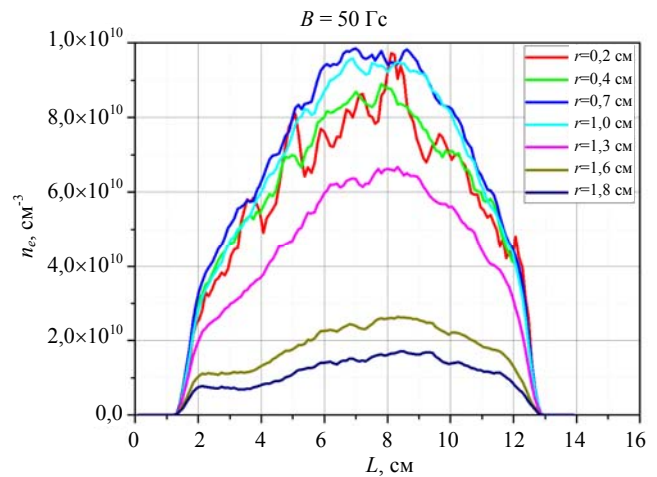


Рис. 2. Распределение концентрации электронов вдоль оси  $z$  на различных расстояниях по  $r$  от оси источника плазмы.  $B = 50$  Гс. Источник радиусом 2 см и длиной 11 см

Рассмотрение рис. 1 и 2 показывает, что при наименьшем из рассмотренных магнитных полей (т. е. при 20 Гс) максимум концентрации электронов в продольном направлении достигается в области локализации антенны  $z = 3—4$  см. В радиальном направлении вблизи антенны концентрация электронов максимальна вблизи оси источника плазмы. Здесь наблюдаются и наибольшие значения средней кинетической энергии электронов  $\epsilon_e$ . Радиальная зависимость  $\epsilon_e$  пропадает по мере удаления от антенны. Рост индукции магнитного поля приводит к смещению положения максимума концентрации электронов по  $z$  в центральную часть источника плазмы. Радиальное распределение электронов при  $B = 40—50$  Гс сначала выравнивается вплоть до  $r = 1$  см, а затем при  $B = 70$  Гс концентрация электронов вблизи оси разряда ( $r < 1$  см) уменьшается по сравнению со значениями концентрации, полученными для  $r = 1$  см и  $r = 1,3$  см. Средняя энергия электронов в центральной части разряда превышает значения, характерные для периферийных областей разряда, на всей длине источника плазмы. Необходимо отметить, что полученные результаты качественно соответствуют наблюдавшимся экспериментально закономерностям изменения продольного и радиального профиля зондового ионного тока насыщения при изменении величины магнитного поля [9].

На рис. 3 и 4 показаны радиальные и аксиальные зависимости ВЧ-поля. Результаты расчетов ВЧ-полей показали, что в объеме плазмы наибольшее значение имеет радиальная компонента электрического ВЧ-поля. Заметные значения продольной компоненты ВЧ-поля указывают на возбуждение в разряде косых ленгмюровских волн. Это согласуется с результатами расчета полей на основании теоретической модели разряда [11].

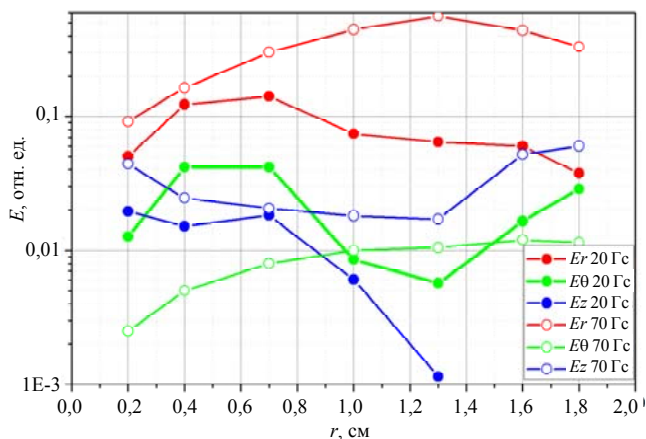


Рис. 3. Радиальная зависимость компонент электрического ВЧ-поля, нормированных на ток антенны.  $z = 7$  см. Источник радиусом 2 см и длиной 11 см

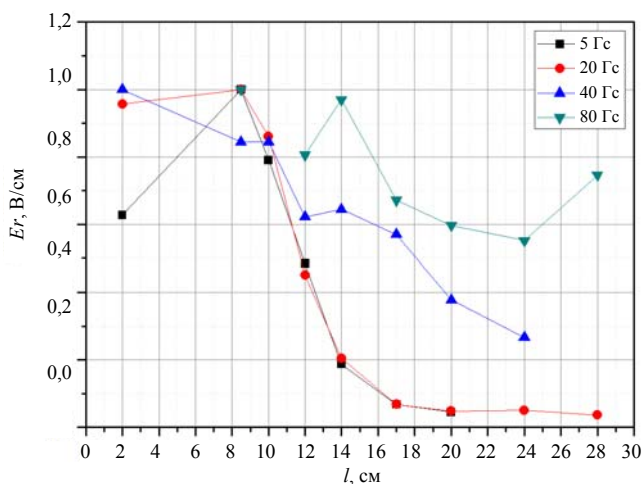


Рис. 4. Продольная зависимость радиальной компоненты электрического ВЧ-поля, нормированной на ток антенны.  $r = 0,5$  см. Источник радиусом 3 см и длиной 30 см

Из рис. 3 видно, что при значении магнитного поля 20 Гс электрическое ВЧ-поле хорошо проникает вглубь плазмы. Так, продольная компонента электрического ВЧ-поля достигает максимума вблизи оси источника плазмы. Радиальная и азимутальная составляющие максимальны при  $r \sim 0,4\text{—}0,7$  см. Напомним, что при указанном значении магнитного поля концентрация электронов вблизи оси источника плазмы максимальна.

При  $B = 70$  Гс проникновение полей в плазму ухудшается, а именно, максимум амплитуд радиального и азимутального полей смещается к стенкам источника плазмы. Неудивительно, что по мере приближения к оси источника концентрация электронов убывает.

Рассмотрим изменение компонент электрического ВЧ-поля вдоль оси источника. Результаты расчетов представлены на рис. 4. Из рисунка видно, что амплитуда радиальной компоненты электрического ВЧ-поля  $E_r$  максимальна в области

расположения антенны. При магнитном поле менее 20 Гс величина  $E_r$  быстро уменьшается по мере удаления от антенны. Рост магнитного поля приводит к выравниванию распределения поля вдоль оси. Поведение продольной компоненты электрического поля подобно радиальной, в то время как азимутальная компонента максимальна в области расположения антенны при всех рассмотренных значениях магнитного поля. Отметим, что смещение положения максимума в продольном направлении наблюдалось также экспериментально в работе [9].

### Заключение

Результаты математического моделирования индуктивного ВЧ-разряда, помещенного во внешнее магнитное поле, показали, что при магнитном поле 20 Гс максимум концентрации электронов в продольном направлении достигается в области локализации антенны  $z = 3\text{—}4$  см. В радиальном направлении вблизи антенны концентрация электронов максимальна вблизи оси источника плазмы. Здесь наблюдаются и наибольшие значения средней кинетической энергии электронов. Радиальная зависимость пропадает по мере удаления от антенны. Рост индукции магнитного поля приводит к смещению положения максимума концентрации электронов в продольном направлении в центральную часть источника плазмы. Радиальное распределение электронов при  $B = 40\text{—}50$  Гс сначала выравнивается вплоть до  $r = 1$  см, а затем при  $B = 70$  Гс концентрация электронов вблизи оси разряда ( $r < 1$  см) уменьшается по сравнению со значениями концентрации, полученными для  $r = 1$  см и  $r = 1,3$  см. Закономерности изменения плотности плазмы коррелируют с изменениями пространственного распределения ВЧ-поля. Рост магнитного поля от 20 до 70 Гс приводит к выравниванию распределения радиальной и продольной компонент электрического ВЧ-поля вдоль оси источника.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кралькина Е. А. Особенности энерговклада в пространственно ограниченные ВЧ индуктивные источники плазмы низкого давления. Диссертация на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. 2008.
2. Александров А. Ф., Воробьев Н. Ф., Кралькина Е. А. и др. // Журнал технической физики. 1994. Т. 64. № 11. С. 53.
3. Vavilin K. V., Rukhadze A. A., Ri M. Kh., et al. // Plasma Physics Reports. 2004. V. 30. No. 8. P. 687.
4. Chen F. F. // Plasma Sources Science and Technology. 2015. V. 24. P. 014011.
5. Charles C. // Journal of Physics D: Applied Physics. 2009. V. 42. No. 16. P. 163001.
6. Chen F. F., Arnush D. / UCLA LTP-002, 2000. Contract No.: UC MICRO PROJECT 98-020.

7. Chen F. F., Evans J. D., Tynan G. R. // Plasma Sources Science and Technology. 2001. V. 10. P. 236.

8. Шпак А., Руденко Э., Коротаи И. и др. // Наноиндустрия. 2009. № 4. С. 12.

9. Александров А. Ф., Петров А. К., Вавилин К. В. и др. // Прикладная физика. 2015. № 3. С. 25.

10. Тараканов В. П. Теоретический и численный анализ нелинейных задач физики плазмы посредством кода KARAT: диссертация на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук: 01.04.08. — М. 2011.

11. Вавилин К. В., Рухадзе А. А., Пу М. Х. и др. // Журнал технической физики. 2004. Т. 74. № 6. С. 29.

## KARAT modeling of the inductive RF discharge placed into an external magnetic field

*A. F. Alexandrov<sup>1</sup>, K. V. Vavilin<sup>1</sup>, E. A. Kralkina<sup>1</sup>, V. B. Pavlov<sup>1</sup>, A. K. Petrov<sup>1</sup>,  
and V. P. Tarakanov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>M. V. Lomonosov Moscow State University, Physical Department  
1, build. 2 Leninskie Gory, Moscow, 111991, Russia  
E-mail: alpetrov57@gmail.com

<sup>2</sup>Institute of Thermal Physics of Extreme States, UIHT RAS  
13/19 Izhorskaya str., Moscow, 125412, Russia

*Received September 28, 2015*

***The results of the mathematical modeling using PIC method for the plasma parameters and the RF fields spatial distribution in the RF inductive discharge placed in an external magnetic field are presented. It is shown that the maximum values of the plasma density are shifted along the radius to the walls of the plasma source and along the axis of discharge — from the antenna to the central part of the discharge with an increase in the external magnetic field. Change dependencies of the plasma density correlate with changes in the spatial distribution of the RF field.***

PACS: 52.80.-s, 52.80.Pi, 52.65.-y

**Keywords:** inductive, radio frequency, discharge, plasma, magnetic field, helicon, Trivelpiece Gould wave, PIC method.

### REFERENCES

1. E. A. Kralkina, Doctoral Dissertation in Mathematics and Physics (Moscow, 2008).
2. A. F. Aleksandrov, N. F. Vorob'ev, E. A. Kralkina, et al., Tech. Phys. **64** (11), 53 (1994).
3. K. V. Vavilin, A. A. Rukhadze, M. Kh. Ri, et al., Plasma Physics Reports **30**, 687 (2004).
4. F. F. Chen, Plasma Sources Science and Technology **24**, 014011 (2015).
5. C. Charles, Journal of Physics D: Applied Physics **42**, 163001 (2009).
6. F. F. Chen and D. Arnush, *UCLA LTP-002* (2000. Contract No.: UC MICRO PROJECT 98-020).
7. F. F. Chen, J. D. Evans, and G. R. Tynan, Plasma Sources Science and Technology **10**, 236 (2001).
8. A. Shpak, E. Rudenko, I. Korotash, et al., Nanoindustriya, No. 4, 12 (2009).
9. A. F. Aleksandrov, A. K. Petrov, K. V. Vavilin, et al., Prikladnaya Fizika, No. 3, 25 (2015).
10. V. P. Tarakanov, Doctoral Dissertation in Mathematics and Physics (Moscow, 2011).
11. K. V. Vavilin, A. A. Rukhadze, M. Kh. Ri, et al., Tech. Phys. **74** (6), 29 (2004).

\* \* \*