

УДК 537.525.99

Математическое моделирование индуктивного ВЧ-разряда низкого давления с помощью программы KARAT

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

В работе представлены результаты математического моделирования параметров плазмы индуктивного ВЧ разряда в аргоне PIC методом в диапазоне давлений $1\text{mTorr} - 1\text{Torr}$. Показано, что при низких давлениях в области скин-слоя азимутальное поле осциллирует на основной частоте со средним значением равным нулю, в то время как радиальное поле имеет отличную от нуля постоянную составляющую. Осцилляции азимутального электрического поля приводят к формированию пучка электронов, азимутальная скорость которого осциллирует со временем, достигая максимума дважды за период.

PACS: 52.80.—s, 52.80.Pi, 52.65.Rr

Ключевые слова: индуктивный, высокочастотный, разряд, плазма, функция распределения по скоростям, сила Миллера

Введение

В настоящее время индуктивный ВЧ-разряд находится в центре внимания большого числа исследователей в связи с широким спектром возможностей его использования. Очевидно, что усовершенствование известных источников плазмы и разработка нового поколения устройств может быть выполнено только на основе детального фундаментального исследования свойств разряда в широком диапазоне условий его существования. Немаловажную роль в формировании физической картины разряда играют методы математического моделирования [1].

Целью данной работы являлся численный расчет основных параметров плазмы в широком диапазоне давлений аргона, позволяющем проследить за изменениями параметров плазмы при переходе от нелокального к локальному режиму ввода ВЧ-мощности [2].

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.
Тараканов Владимир Павлович, вед. 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., Тараканов В.П., 2013

Методика расчетов

Математической моделью, лежащей в основе кода KARAT [1], являются уравнения Максвелла с различными материальными уравнениями, в том числе в виде кинетического уравнения, решаемого методом частиц (PIC-метод). В данной работе использовалась двумерная осесимметричная версия, в которой учитываются все компоненты скорости частиц. Счетная область — цилиндр длиной 10 см и радиусом 5 см. Область, занятая плазмой, имеет длину 6 см и радиус 3,5 см. Плазма ограничена диэлектрическими стенками толщиной 0,5 см. На внешней боковой поверхности цилиндра расположены три витка с током, осциллирующим с частотой 12,5 МГц. В модели учитываются упругие и неупругие столкновения электронов с атомами аргона (соответствующие сечения столкновений взяты из работы [3–5]). Для уменьшения времени счета масса ионов M взята равной 2000 массам электронов m . Расчеты выполнялись при концентрациях аргона 10^{14} см^{-3} , $3 \cdot 10^{14}\text{ см}^{-3}$, 10^{15} см^{-3} , $3 \cdot 10^{16}\text{ см}^{-3}$. В процессе счета регистрируются компоненты электромагнитного поля в объеме, пространственные распределения потенциала, концентрации электронов и ионов, кинетической энергии электронов, рассчитанной с учетом и без учета анизотропной части энергетического распределения электронов. Выбранные физические и счетные параметры обеспечивают выполнение важного условия: шаг сетки существенно меньше дебаевского радиуса плазмы. Только при выполнении этого условия результаты PIC моделирования физически обоснованы.

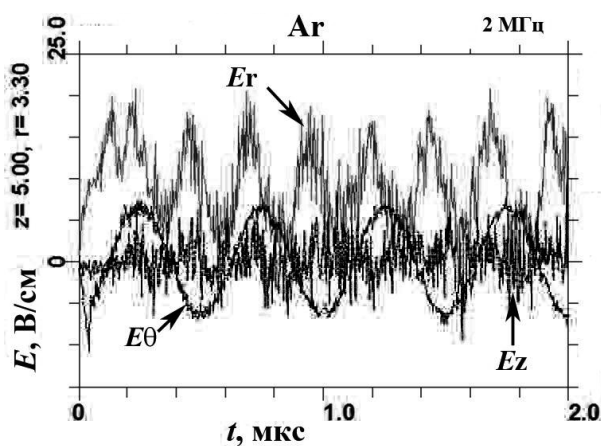


Рис. 1. Временные зависимости компонент электрического ВЧ-поля в области скин-слоя.

Результаты математического моделирования индуктивного ВЧ-разряда РС-методом

Как и следовало ожидать, расчеты показали, что в случае возбуждения индуктивного ВЧ-разряда азимутальным током основной компонентой магнитного ВЧ-поля является B_z . Магнитное поле B_z достигает максимальных значений вблизи витков тока и убывает по мере удаления от индуктора. На рис. 1 показаны временные зависимости компонент электрического ВЧ-поля вблизи стенок источника плазмы.

Как видно, в пределах скин-слоя основными компонентами электрического ВЧ-поля являются азимутальное E_θ и радиальное E_r поля. Амплитуда продольного электрического ВЧ-поля E_z исчезающе мала. Обращает на себя внимание, что азимутальное поле E_θ осциллирует на основной частоте со средним значением равным нулю, в то время как радиальное поле E_r имеет отличную от нуля постоянную составляющую, а частота осцилляций переменной составляющей поля близка к удвоенной рабочей частоте. По мере удаления от стенок источника плазмы постоянная составляющая E_r исчезает. Очевидно, причиной возникновения постоянной составляющей E_r является сильная неоднородность ВЧ-полей, которая, в свою очередь, приводит к появлению силы Миллера F_M [6–9]:

$$F_M = -\frac{e\nabla E_\theta^2}{2m(\omega^2 + v^2)}, \quad (1)$$

выталкивающей электроны из области сильного поля. Переменная составляющая радиального ВЧ-поля, осциллирующая на удвоенной частоте, является результатом воздействия силы Лоренца на электроны, дрейфующие в скине под действием электрического ВЧ-поля при наличии продольного магнитного ВЧ-поля B_z [6–9].

Необходимо отметить, что в области скин-слоя величины радиального ВЧ-поля существенно пре-

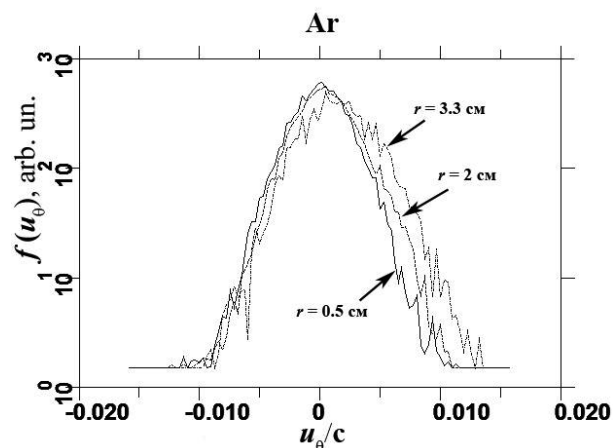


Рис. 2. Рассчитанные функции распределения электронов по компонентам скорости в первый полупериод ВЧ-поля.

вышают значения азимутального поля. Этот эффект отмечался также в работах [7–9]. По мере роста давления постоянная составляющая радиального поля падает и при давлении 1 Торр радиальное и азимутальное поля сравниваются по величине. В работе [9] отмечается, что радиальное ВЧ-поле, реализующееся в области низких давлений, может быть ниже, чем предсказанное формулой (1). Действительно, в случае, когда скорость дрейфа частиц не определяется локальными электрическими полями, тепловое движение частиц может привести к уходу дрейфующих под действием азимутального поля частиц в область более низких значений поля.

Рост рабочей частоты также, как и рост давления, приводит к понижению радиальной составляющей ВЧ-поля, так что при давлении 1 мТорр и частоте 12,5 МГц азимутальное поле в скин-слое существенно превышает радиальное.

Рассмотрим изменения во времени функций распределения электронов по компонентам скорости. Прежде всего, остановимся на функции распределения электронов по азимутальной скорости $f(u_\theta)$. Рассчитанные $f(u_\theta)$ в различные фазы тока антенны показаны на рис. 2 и рис. 3. Можно видеть, что в области скин-слоя азимутальный ток дважды за период изменяет направление своего движения. Заметные изменения азимутальной компоненты скорости электронов указывают на то, что при низких давлениях в области скин-слоя скорость направленного движения электронов сравнима с тепловой. Таким образом, в скин-слое формируется пучок электронов, азимутальная скорость которого осциллирует со временем, достигая максимума дважды за период.

Анализ поведения функции распределения электронов по радиальной компоненте скорости $f(u_r)$ при изменении фазы тока антенны показыва-

ет, что, в отличие от азимутальной компоненты, $f(u_r)$ слабо зависит от времени. Обращает на себя внимание, что функция $f(u_r)$ ассиметрична относительно нуля, а именно, в скин-слое отсутствуют быстрые частицы, движущиеся по направлению к скину. Наиболее вероятно, что это связано с действием силы Миллера, выталкивающей частицы из области скина в центральные области разряда. Рост рабочей частоты, сопровождающийся снижением постоянной составляющей радиального поля, приводит к уменьшению ассиметрии функции распределения электронов по радиальной компоненте скорости.

Расчеты показали, что функция распределения электронов по продольной компоненте скорости $f(u_z)$ симметрична и не зависит от времени.

Приведенные выше результаты соответствовали давлению 10 мТорр. Расчеты позволили проанализировать влияние давления на характер изменения функции распределения электронов по скоростям, а именно, они показали, что наибольшее смещение $f(u_0)$ наблюдается при наименьшем из рассмотренных давлений — 1 мТорр. Вероятность столкновений здесь низка, и электроны ускоряются азимутальным полем, при этом в каждый полупериод изменяя направление движения. В центральной части разряда функция $f(u_0)$ симметрична, она представляет собой распределение электронов по тепловой скорости. Расчеты показывают, что скорость направленного движения при давлении 1 мТорр существенно превосходит тепловую.

Рост давления и, соответственно, частоты столкновений приводит к понижению скорости направленного движения по сравнению с тепловым. Так, при давлении 100 мТорр разница между функциями $f(u_0)$, рассчитанными для центральных и периферийных областей разряда, исчезает. При давлении 1 Торр, когда не только длина свободного пробега электронов, но и длина релаксации энергии электронов становится ниже толщины скин-слоя, функция распределения $f(u_0)$ в центральной части разряда обедняется быстрыми электронами, т.к. вложением ВЧ-мощности происходит локально в пределах скин-слоя. Аналогичные изменения с увеличением давления претерпевают функции распределения по радиальной и продольной составляющим скорости электронов.

Полученные значения функции распределения электронов по скоростям были использованы для расчета средней энергии электронов ϵ с учетом только изотропной части функции распределения и кинетической энергии w с учетом как направленной, так и изотропной части распределения. Расчеты показали, что при наименьшем из рассмотренных давлений (т.е. 1 мТорр) кинетиче-

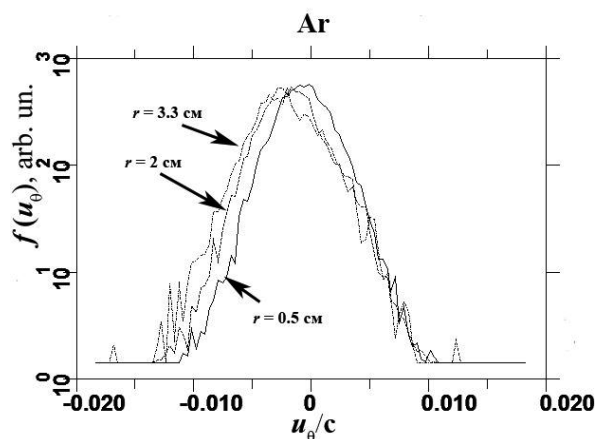


Рис. 3. Рассчитанные функции распределения электронов по компонентам скорости во второй полупериод ВЧ-поля.

ская энергия электронов в области скин-слоя существенно превышает кинетическую энергию электронов в центральных областях разряда, где величины w близки к энергии электронов ϵ , рассчитанные по изотропной части функции распределения. В центральных частях разряда наблюдается увеличение числа медленных электронов по сравнению с периферией. Это связано с удержанием медленных электронов в центральных областях источника плазмы электрическими стационарными полями, возникающими между центральными и периферийными областями плазмы. Рост давления приводит к выравниванию w по объему источника плазмы и сближению величин w и ϵ . Однако при давлении 1 Торр как значения w , так и ϵ существенно понижаются в центральных частях разряда по сравнению с периферией. Это является следствием локального характера ввода ВЧ-мощности в индуктивный ВЧ-разряд.

Изменение характера поглощения ВЧ-мощности проявляется и в поведении пространственного распределения электронной плотности. При давлениях менее 0,1 Торр максимум электронной плотности достигается в центральных частях разряда. При более высоких давлениях максимум электронной плотности смещается к стенкам источника плазмы. Это связано с тем, что при давлениях, превышающих 0,1 Торр, ввод ВЧ-мощности в плазму становится локальным.

Заключение

При низких давлениях в области скин-слоя формируется направленное азимутальное движение электронов под действием электрического ВЧ-поля, индуцированного током, текущим по антенне. Максимальная скорость направленного движения электронов сравнима с тепловой скоростью и каждый полупериод меняет знак. В центральных частях разряда наблюдается увеличение числа медленных электронов по сравнению с пе-

риферией. Это связано с удержанием медленных электронов в центральных областях источника плазмы электрическими стационарными полями, возникающими между центральными и периферийными областями плазмы.

С увеличением давления выше 0,1 Торр происходит переход к локальному режиму ввода мощности в плазму, что приводит к смещению максимума электронной плотности к стенкам источника плазмы.

Литература

1. Тараканов В.П. Теоретический и численный анализ нелинейных задач физики плазмы посредством кода КАРАТ: Дисс. ... докт. физ. — мат. наук. — М.: 2011.

2. Кудрявцев А.А., Смирнов А.С., Цендин Л.Д. Физика тлеющего разряда. — СПб.: Лань, 2010.

3. Kieffer L.J., Dunn H.G. // Review of Modern Physics. 1966. V. 38. No. 1. P. 1

4. de Heer F.J., Jansen R.H., van der Kaay W. // J.Phys. B: Atom. Mol. Phys. 1979. V. 12. No. 6. P. 979.

5. Смирнов Ю.М. Эффективные сечения возбуждения атомов и ионов электронным ударом. — М.: 1989.

6. Александров А. Ф., Богданкевич Л. С., Рухадзе А. А. Основы электродинамики плазмы. — М.: 1978.

7. Godyak V.A., Alexandrovich B.M., Kolobov V.I. // Phys. Rev.E. 2001. V. 64. P. 026406.

8. Godyak V., Piejak R., Alexandrovich B., Smolyakov A. // Plasma Sources Sci. Technol. 2001. V. 10. P. 459.

9. Godyak V. // Phys.Plasmas. 2005. V. 12. P. 055501.

Mathematical simulation of an inductive RF discharge using the KARAT program

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

Moscow State University
1 Leninskie Gory, Moscow, 111191, Russia
E-mail: afalexandrov@gmail.com; ekralkina@mail.ru

The mathematical simulation results of an inductive RF discharge plasma parameters in argon by PIC method in the pressure range 1 mTorr — 1 Torr are represented in this paper. It is shown that the azimuthal field oscillates on the main frequency with zero average value while the radial field has nonzero direct component at low pressures. The azimuthal electric field oscillations lead to formation of the electron beam, its azimuthal velocity oscillates in time and reaches the maximum value twice per one period.

PACS: 52.80.— s, 52.80.Pi, 52.65.Rr

Keywords: inductive, RF, discharge, plasma, velocity distribution function, Miller force

Bibliography — 9 references

Received November 7, 2013