

УДК 537.525.99

## Исследование параметров плазмы ВЧ-индуктивного источника плазмы диаметром 46 см. Часть II. Математическое моделирование параметров плазмы индуктивного и гибридного ВЧ-разрядов

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

*В работе представлены результаты численных расчетов температуры и концентрации электронов в плазме индуктивного ВЧ-разряда в инертных газах. Диапазон рассмотренных давлений 1–200 мТорр. Результаты расчетов позволили объяснить немонокотную зависимость параметров плазмы от давления инертных газов возрастанием энергозатрат на возбуждение атомов при низких значениях электронной температуры и усилением выноса энергии ионами на стенки источника плазмы при повышении роли емкостной составляющей разряда.*

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

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

### Введение

В настоящее время в связи с развитием плазменных технологий и конструированием нового поколения источников плазмы встает вопрос о выявлении ключевых параметров, влияющих на плотность плазмы и ее пространственное распределение, на эффективность поглощения ВЧ-мощности плазмой индуктивного ВЧ-разряда. Очевидно, что поставленная задача может быть решена только на основе детального фундаментального исследования свойств разряда в широком диапазоне его существования и разработки физической модели разряда.

В работе [1] (которая представляет Часть I всего цикла работ по исследованию параметров плазмы ВЧ-индуктивного источника плазмы диаметром 46 см) экспериментально было получено, что эффективная температура и концентрация электронов немонокотно зависят от давления. Настоящая работа посвящена нахождению физических причин наблюдавшегося эффекта на основании математического моделирования.

### Методика численных расчетов

Простая физическая модель индуктивного ВЧ-разряда низкого давления подробно описана в [2]. Она позволяет определить усредненные по объему концентрацию и температуру электронов, потенциал плазмы относительно стенок источника плазмы в следующих предположениях: 1) функция распределения электронов по энергиям является максвелловской; 2) плотность многократно

ионизированных атомов ничтожно мала; 3) плотность ионного тока на стенки источника плазмы постоянна в любой точке источника.

Модель основана на уравнениях баланса ионов и электронов, фиксирующих равенство числа заряженных частиц, рожденных в объеме источника плазмы, числу частиц, ушедших на стенки источника, уравнении баланса мощности, фиксирующем равенство вкладываемой в плазму мощности и мощности, выносимой на ее стенки электронами и ионами, а также затраченной на ионизацию и возбуждение частиц в объеме, уравнении квазинейтральности.

Моделирование влияния емкостной составляющей разряда на параметры разряда осуществлялось с помощью физической модели гибридного ВЧ-разряда, разработанной в работе [3]. Отличительной особенностью гибридного ВЧ-разряда является узел ввода ВЧ-мощности, который представляет собой параллельно соединенные индуктор и обкладки конденсатора, моделирующие емкостную связь между индуктором и плазмой. Предусмотрено, что между индуктором и обкладками конденсатора включен разделительный конденсатор емкости  $C$ , моделирующий наличие диэлектрических стенок между индуктором и плазмой. В отличие от индуктивного разряда, где потенциал плазмы  $\phi$  относительно всей поверхности источника ионов считается одинаковым, в гибридном разряде потенциал плазмы  $U$  относительно поверхности источника, занятой обкладками конденсатора, отличается от потенциала  $\phi$  относительно свободной от электродов части поверхности. Модель учитывает, что поток ионов, поступающий на стенки источника плазмы, приводит с вероятностью  $\gamma_k$  к появлению вторичных электронов. В связи с этим в систему уравнений баланса включена группа моноэнергетичных электронов с энергией  $eU$ . Энергия  $eU$  зависит от напряжения, подведенного к концам антенны. Модель позволяет рассчитать параметры разряда, усредненные по его объему, на основании величин ВЧ-мощности, отдаваемой ВЧ-генератором во внешнюю цепь, емкости разделительного конденсатора, активного сопротивления антенны, а также геометрических размеров источника плазмы.

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., 2013

Расчеты проводились для источника плазмы диаметром 46 см и высотой 30 см. Рассматривался разряд в неоне, аргоне и криптона в диапазоне давлений 1–200 мТорр.

### Результаты расчета концентрации и эффективной температуры электронов с помощью простых физических моделей индуктивного и гибридного ВЧ-разрядов

Результаты расчета температуры  $T_e$  и концентрации  $n_e$  электронов с помощью простой физической модели индуктивного ВЧ-разряда, для значения мощности, вложенной в плазму 500 Вт, показаны на рис. 1 и 2. Отметим, что полученные результаты не зависят от рабочей частоты разряда. Расчеты выполнены для диапазона давлений 1–200 мТорр. При давлениях ниже 1 мТорр в случае аргона и криптона и 10 мТорр в случае неона система уравнений не имеет решений, что свидетельствует о невозможности горения чисто индуктивного разряда ниже указанных давлений.

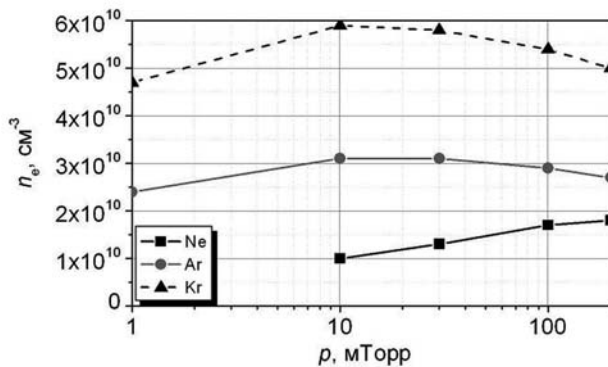


Рис. 1. Расчетная зависимость концентрации электронов от давления неона, аргона и криптона для значения вложенной в плазму мощности 500 Вт. Расчет выполнен на основании математической модели индуктивного ВЧ-разряда.

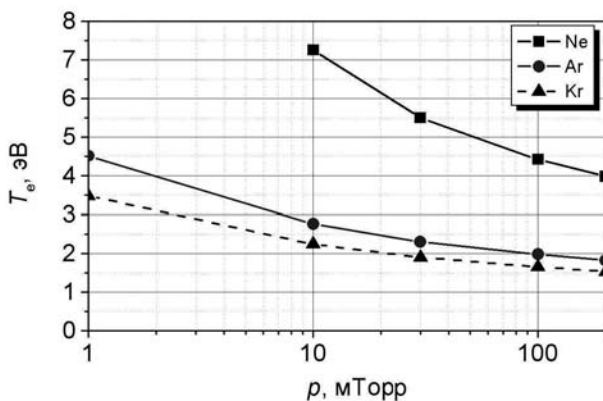


Рис. 2. Расчетная зависимость температуры электронов от давления неона, аргона и криптона для значения вложенной в плазму мощности 500 Вт. Расчет выполнен на основании математической модели индуктивного ВЧ-разряда.

Из приведенных графиков видно, что результаты расчетов качественно соответствуют эксперименту, представленному в работе [1]. Значения концентрации электронов имеют наибольшие значения в случае криптона, наименьшие – в случае неона. Расчеты так же, как и эксперимент, показали немонотонную зависимость

$n_e$  от давления нейтрального газа. Чем тяжелее инертный газ, тем при меньших давлениях наблюдается максимум концентрации электронов. Обращает на себя внимание тот факт, что абсолютные значения концентрации электронов существенно ниже полученных в эксперименте. Это может быть связано с неучетом ступенчатых процессов при проведении расчетов. Учет ступенчатых процессов должен привести к росту концентрации электронов и падению температуры электронов. Наибольшая температура электронов так же, как и в эксперименте, характерна для неона, наибольшая – для криптона. Температура электронов убывает с ростом давления всех рассмотренных газов. Рассчитанные значения температуры электронов близки к измеренным, но систематически превышают их. Учет ступенчатого возбуждения должен привести к улучшению согласия между измеренными и расчетными характеристиками разряда. Необходимо отметить, что уменьшение температуры электронов ниже 2 эВ с увеличением давления приводит к резкому росту потерь энергии на возбуждение нейтральной компоненты разряда по сравнению с затратами на ионизацию. Это, в свою очередь, приводит к понижению концентрации электронов. Таким образом, физическая причина убывания концентрации электронов в области больших давлений связана с ростом энергозатрат на возбуждение атомов.

Рассмотрим далее, как влияет наличие емкостной составляющей разряда на поведение концентрации и температуры электронов при изменении давления рабочих газов. На рис. 3 показана зависимость концентрации электронов в плазме гибридного ВЧ-разряда от давления инертных газов для рабочей частоты 2 МГц. Необходимо подчеркнуть, что в случае гибридного разряда величины  $n_e$ ,  $T_e$  зависят от частоты ВЧ-генераторов  $\omega$ , т.к. вклад емкостной компоненты при фиксированных параметрах внешней цепи сильно зависит от  $\omega$ .

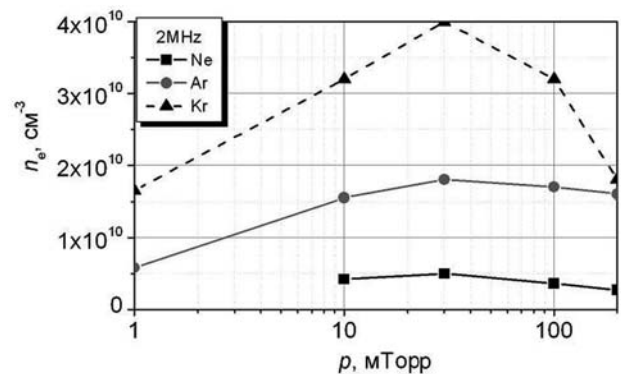


Рис. 3. Расчетная зависимость концентрации электронов от давления неона, аргона и криптона для значения вложенной в плазму мощности 500 Вт. Расчет выполнен на основании математической модели гибридного ВЧ-разряда для значений индуктивности антенны 4 мкГн, разделительной емкости 100 пФ. Рабочая частота 2 МГц.

Рис. 3 показывает, что зависимость концентрации электронов от давления для гибридного разряда выражена существенно сильнее, чем в случае индуктивного ВЧ-разряда. Обращает на себя внимание и то, что абсолютные значения плотности плазмы ниже, чем в индуктивном ВЧ-разряде. Как отмечалось выше, в гибридном разряде потенциал плазмы относительно электродов равен

величине  $U$ , зависящей от напряжения между обкладками конденсатора. Расчеты показывают, что при низких значениях приэлектродного скачка потенциала  $U$  основным каналом потерь в объеме плазмы так же, как и в индуктивном разряде, являются затраты энергии на возбуждение атомов аргона максвелловскими электронами. Рост падения потенциала в приэлектродных слоях приводит к возрастанию роли канала потерь энергии, связанного с выносом энергии ионами на электроды. При значениях  $U > 200$  В при всех рассмотренных давлениях указанный канал является преобладающим.

Поток энергии, выносимый ионами, пропорционален потенциалу плазмы относительно электрода. Расчеты показывают, что наибольшие значения  $U$  достигают в неоне. В связи с этим, концентрация плазмы в гибридном разряде в неоне существенно понижена по сравнению с индуктивным разрядом. Значения  $U$  для криптона ниже, чем для других инертных газов, поэтому значения  $n_e$  для гибридного разряда достаточно велики. Однако в области давлений выше 100 мТорр начинается быстрый рост  $U$ . Это объясняет быстрый спад концентрации электронов в гибридном разряде в криптоне в указанном диапазоне давлений.

Очевидно, что роль индуктивного и емкостного каналов гибридного ВЧ-разряда существенно зависит от частоты. В случае более высокой частоты импеданс антенны возрастает, а импеданс разделительной емкости падает по сравнению с частотой 2 МГц. Расчеты показывают, что при низких давлениях приэлектродное падение потенциала в разряде, горящем на частоте 2 МГц, существенно ниже, чем на частоте 13,56 МГц. Соответственно, концентрация электронов в разряде на более низкой частоте выше. При давлении 100 мТорр значения  $U$  для частоты 13,56 МГц становятся ниже, чем в случае

частоты 2 МГц. Это объясняет смещение максимума плотности плазмы на частоте 13,56 МГц в область больших давлений по сравнению с частотой 2 МГц. Напомним, что смещение положения максимума концентрации электронов в область больших давлений при увеличении рабочей частоты было зафиксировано экспериментально в [1].

### Заключение

Сравнение в целом измеренных и рассчитанных зависимостей концентрации и температуры электронов от давления инертных газов указывает на их качественное согласие. Измерения и расчеты показывают, что зависимость концентрации электронов от давления является немонотонной. Падение  $n_e$  в области больших давлений связано с увеличением роли потерь энергии максвелловских электронов на возбуждение атомов и ростом выноса энергии ионами из разряда. Роль емкостного канала увеличивается с ростом частоты ВЧ-генератора. Сравнение результатов, полученных на частоте 13,56 МГц, с расчетами, показывает, что разряд при условиях экспериментов, по сути дела, является гибридным. Значительный вклад емкостной компоненты приводит к существенному понижению концентрации электронов при давлениях более 100 мТорр.

### Литература

1. Александров А.Ф., Вавилин К.В., Кралькина Е.А. и др. // Прикладная физика. 2013. № 5. С. 34
2. Александров А.Ф., Бугров Г.Э., Вавилин К.В. и др. // Прикладная физика. 2006. № 5. С. 33.
3. Чжао Ч. Влияние внешней цепи на закономерности энерговклада в гибридный ВЧ-разряд низкого давления: Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. – М.: МГУ, 2011.

## Plasma parameters investigation of the RF inductive plasma source with diameter 46 cm. Part II. Plasma parameters numerical simulation of the inductive and hybrid RF discharges

*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*

*This paper represents the results of numerical calculations of the electron temperature and the electron density in RF inductive discharge plasma. The range of pressure was 1–200 mTorr. The results allowed to explain non-monotonic plasma parameters dependence on the noble gases pressure due to the increasing of expenditure of energy on atoms excitation at low electron temperature values and the growth of energy export by ions on the walls of plasma source at an enhancing of the discharge capacitive component role.*

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

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

### References

1. A.F. Alexandrov, K.V. Vavilin, E.A. Kralkina, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 34 (2013).
2. A.F. Alexandrov, G.E. Bugrov, K.V. Vavilin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 33 (2006).
3. Ch. Chzhao, Candidate's Dissertation in Mathematics and Physics (Moscow, 2011).