

А.У. Утегенов, Е.А. Усенов, М.Қ. Досболаев, Т.С. Рамазанов

Казахский Национальный Университет имени Аль-Фараби,  
Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики,  
050040, г. Алматы, Казахстан  
[almasbek@physics.kz](mailto:almasbek@physics.kz)

## ЗОНДОВАЯ ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА ДОПОЛНИТЕЛЬНО ВОЗМУЩЕННОЙ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМ ПОЛЕМ

**Аннотация.** На данной работе представлены результаты по зондовой диагностике свойств плазмы в высокочастотном разряде с дополнительным возмущением постоянным электростатическим полем. Представлены вольтамперная характеристика электрического зонда в комбинированном разряде, а также аксиальное распределение температуры электронов при разных значениях напряжения постоянного поля.

**Ключевые слова:** высокочастотный разряд, плазма, электростатическое поле, зондовая диагностика, температура электронов.

### Введение

Низкотемпературная плазма в газовых разрядах (ВЧ, DC, дуговой и их комбинации) играет важную роль при производстве элементов микроэлектроники, модификации поверхности разного рода материалов, сепарации пылевых частиц в плазменной среде [1], а также в фундаментальных и прикладных исследованиях в области комплексной плазмы (зондовая и оптическая диагностика комплексной плазмы) [2,3]. Надо отметить, что в последних двух десятилетиях наблюдается рост тенденции перехода к комбинации разного рода газовых разрядов, так как с помощью комбинации разных полей и процессов, протекающих при таких разрядах, можно достичь результатов, которые недостижимы в газовом разряде одного типа [4]. Одной из таких комбинаций является продольный комбинированный разряд высокочастотного и постоянного тока. Электрические свойства данного разряда достаточно хорошо изучались в работе [5], где показано, что продольный комбинированный разряд имеет несколько режимов горения. Но малоизученным остается влияния постоянного поля на пылевую и буферную плазму высокочастотного разряда в смеси различных газов.

На данном этапе работы были проведены эксперименты по исследованию поведения пылевой плазмы высокочастотного газового разряда при дополнительном наложении электростатического поля на разряд.

Управления плазменных частиц микро и макро размеров является актуальной задачей при решении задач по реализации управляемого термоядерного синтеза. Широко известен тот факт, что пылевая плазма, образованная в камере термоядерного реактора вследствие эрозии первой защитной стенки внутрикамерных компонентов, является препятствием для осуществления синтеза, поскольку пылевые частицы в основном отрицательно влияют на работу установки термоядерного синтеза [6]. Попадая в плазму термоядерного синтеза, пылевые частицы приводят к срыву плазменного шнура, тем самым уменьшая эффективность работы реакторов (эрозия стенок и внутрикамерных деталей реактора) [7]. Вследствие данного явления можно утверждать, что методы управления частицами, в частности в термоядерных установках является открытой задачей.

Надо отметить, что данная работа является продолжением ранее опубликованной работы [8].

### Экспериментальная установка

Для разработки метода манипуляции частицами микро и макро размеров была собрана экспериментальная установка на основе высокочастотного разряда. Данная экспериментальная установка является модельной и удобна для исследования основных

физических свойств плазменно-пылевых образований.

Эксперименты проводились в модернизированной камере ВУП-5, основной частью экспериментальной установки является электродная система (рисунок 1), где образуется высокочастотной емкостной газовой разряд.

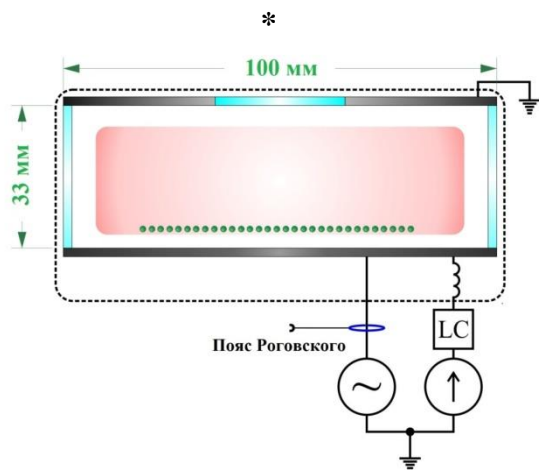


Рисунок 1 – Принципиальная схема экспериментальной установки

Известно, что в термоядерных установках с магнитным удержанием пристеночная пылевая плазма образуется самопроизвольно в результате различных процессов (в частности, при взаимодействии высокотемпературной плазмы с первой стенкой). В лабораторных условиях обычно пыль вводится в объем плазмы вынужденно с заранее известными параметрами (размер, материал, форма), что удобно для расчета характеристик пылевой плазмы. На данном эксперименте использовались монодисперсные частицы размерами 10,17 мкм и инъекция их в плазменный объем осуществлялась с помощью импульсного электродинамического дозатора.

Основные экспериментальные параметры следующие: на нижний электрод подсоединяется ВЧ-генератор с частотой 13,56 МГц и источник постоянного тока. Так как источники переменного и постоянного тока подсоединяются непосредственно к одному электроду, высокочастотное поле, создаваемое ВЧ-генератором, может отрицательно повлиять на работу источника постоянного тока. Поэтому источник DC соединяется с электродом через высокочастотный LC-

фильтр, схема которого содержит катушку индуктивности ( $L=3$  мГн) и конденсатор ( $C=9$  нФ). Давление в камере было постоянным  $p=10^{-2}$  торр, мощность разряда 10 Вт.

### Результаты эксперимента.

Метод зондовой диагностики является универсальным методом определения параметров буферной плазмы. Для определения параметров плазмы ВЧ разряда применяется специальный ВЧ компенсированный зонд. Преимуществом данного метода является возможность определения локальных характеристик плазмы в разрядном промежутке и относительная простота применяемого оборудования. Знание локальных параметров плазмы играет определяющую роль при изучении условия существования плазменно-пылевых структур в пристеночных областях термоядерных установок. В качестве опорного электрода в данной схеме используется заземленный электрод ВЧ разряда. Потенциал, подаваемый на зонд с помощью мультиметра, сигнал, поступающий из зондовой цепи, измеряется через электронный осциллограф. В качестве шунта используется резистор с номиналом  $R \approx 100$  Ом.

Зонд представляет собой вольфрамовый электрод диаметром  $D=120$  мкм и длиной  $L=0,33$  см. Собирающая поверхность расположена внутри керамического изолятора и соединена через конденсатор с емкостью  $C=2$  нФ с компенсационным электродом. Компенсационный электрод расположен между наконечником зонда и резонансными фильтрами и представляет собой металлический цилиндр с очень большой поверхностью (относительно поверхности зонда). Компенсационный электрод находится в контакте с плазмой и подавляет осцилляции потенциала плазмы  $U_s$ . Надо отметить, что компенсационный электрод подавляет только высокочастотную составляющую зондового тока. Прямая составляющая подавляется через внешний источник питания постоянного тока. На рисунке 2 показан вольфрамовый наконечник зонда.

Для измерения параметров плазмы зонд вводится в разрядный промежуток. Основание зонда расположено внутри вакуумной камеры. С измерительной цепью зонд соединяется через контактные шлюзы. Пе-

ред проведением измерений поверхность контактирующей части зонда очищается с помощью ионной или электронной бомбардировки. Для этого на зонд подается максимально положительный или отрицательный потенциал относительно плазмы.

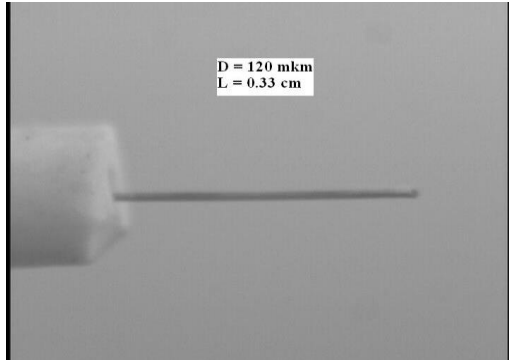


Рисунок 2 – Наконечник ВЧ компенсированного зонда

На рисунке 3 показан ВЧ компенсированный зонд в рабочем режиме в плазме аргона.



Рисунок 3 – ВЧ компенсированный зонд в рабочем режиме в плазме аргона

На рисунке 4 показаны вольтамперные характеристики при вышесказанных значениях. Из рисунка 4 видно, что с увеличением дополнительно подаваемого электростатического поля зондовый ток увеличивается. Исходя из этого, можно предположить, что с увеличением напряженности постоянного поля усиливаются ионизационные процессы и увеличивается концентрация электронов.

Для определения параметров плазмы используется ВАХ электрического зонда в полулогарифмическом масштабе, таким образом, по наклону графика можно определить температуру электронов.

$$T_e = \frac{e}{k} \cdot \frac{1}{\lg \psi}, \quad (1)$$

где  $\psi$  – угол наклона прямолинейного участка графика к оси  $U$ .

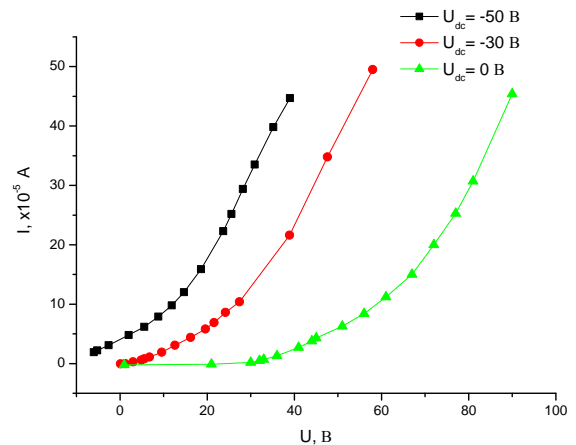


Рисунок 4 – ВАХ электрического зонда

Результаты вычисления распределения температуры в межэлектродном пространстве приведены на рисунке 5.

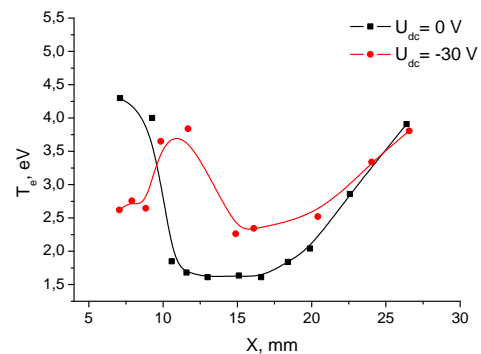


Рисунок 5 – Аксиальное распределение температуры электронов

На рисунке 5, начало координат по оси абсцисс совпадает с расположением нижнего электрода, куда подается высокочастотное и постоянное напряжения. Из рисунка видно, что при увеличении постоянного тока первый пик температуры электронов смещается в центр межэлектродного пространства. Это говорит об увеличении приэлектродного слоя [9, 10]. Данное явление обусловлено тем, что при подаче отрицательного напряжения электроны,двигающиеся в сторону ВЧ-электрода, начинают тормозить и в обратном направлении ускоряться, тем самым обладая относительно высокой энергией.

Вследствие этого концентрация электронов в области свечения первого пика увеличивается, соответственно температура падает.

### **Заключение**

Была проведена зондовая диагностика буферной плазмы комбинированного постоянного и высокочастотного разряда. В ходе выполнения данных экспериментов были получены ВАХ электрического зонда в комбинированном разряде с помощью ВЧ компенсированного зонда. ВАХ электрического зонда использовался для определения температуры электронов плазмы. С помощью известных методов было определено аксиальное распределение температуры электронов. Было выявлено, что с увеличением постоянного тока первый пик температуры электронов смещается в центр межэлектродного пространства.

Данная работа была выполнена при поддержке МОН РК, № гранта 3097/ГФ4.

### **Литература**

1 Orazbayev S.A., Muratov M.M., Ramazanov T.S., Jumagulov M.N., Dosbolayev M.K., Silamiya M., Boufendi L. // *Contrib. Plasma Phys.* – 2013. – Vol. 53. – P. 436-441.  
2 Batryshev D.G., Ramazanov T.S., Dosbolayev M.K., Gabdullin M.T. // *Contrib. Plasma*

*Phys.* – 2015. – Vol. 55. – P. 407-412.

3 Ramazanov T.S., Bastykova N.Kh., Ussenov Y.A., Dzhumagulova K.N., Dosbolayev M.K. // *Contrib. Plasma Phys.* – 2012. – Vol. 52. – P. 110-113.

4 Xi-Ming Z., Wen-Cong C., Shu Z., Zhi-Gang G., Da-Wei H., Yi-Kang P. // *Journal of Physics D: Applied Physics.* – 2007. – Vol. 40. – P. 7019-7023.

5 Lisovskiy V.A., Kharchenko N.D., Yegorenkov V.D. // *Journal of Physics D: Applied Physics.* – 2013. – Vol. 43. – P. 425202.

6 J. Winter. – *Physics of plasmas. Volume 7. Number 10.* – 2000. PP. 3862-3866.

7 А.В. Горбунов, Л.А. Ключников, К.В. Коробов // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез*, 2015, т.38, вып. 2, – С. 62-67.

8 М.К. Досболаев, А.У. Утегенов, Т.С. Рамазанов // *Вестник КазНУ, серия физическая*, №4 (51), 2014. – С. 16-23.

9 Lisovskiy V.A., Kharchenko N.D., Yegorenkov V.D. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – Vol. 41. – 2008.

М.К. Dosbolayev, A.U. Utegenov, T.S. Ramazanov // *IEEE Transactions on plasma science.* – 2016. – vol. 44. – No. 4. – pp. 469-472.

***Принято в печать 06.10.2016***

**А.У. Утегенов, Е.А. Усенов, М.Қ. Досболаев, Т.С. Рамазанов**

*Казахский Национальный Университет имени Аль-Фараби,*

*Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики,*

*050040, г. Алматы, Казахстан*

[almasbek@physics.kz](mailto:almasbek@physics.kz)

## **ЗОНДОВАЯ ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА ДОПОЛНИТЕЛЬНО ВОЗМУЩЕННОЙ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМ ПОЛЕМ**

**Аннотация.** На данной работе представлены результаты по зондовой диагностике свойств плазмы в высокочастотном разряде с дополнительным возмущением постоянным электростатическим полем. Представлены вольтамперная характеристика электрического зонда в комбинированном разряде, а также аксиальное распределение температуры электронов при разных значениях напряжения постоянного поля.

**Ключевые слова:** высокочастотный разряд, плазма, электростатическое поле, зондовая диагностика, температура электронов

**А.У. Утегенов, Е.А. Үсенов, М.Қ. Досболаев, Т.С. Рамазанов**  
*ал-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Эксперименталды және теориялық  
физика ғылыми-зерттеу институты, 050040, Алматы, Қазақстан*  
[almasbek@physics.kz](mailto:almasbek@physics.kz)

### **ҚОСЫМША ЭЛЕКТРОСТАТИКАЛЫҚ ӨРІСПЕН ӘСЕРЛЕНГЕН ЖОҒАРЫЖИІЛІКТІ РАЗРЯДА ПЛАЗМАСЫНЫҢ ЗОНДТЫҚ ДИАГНОСТИКАСЫ**

**Аннотация.** Бұл жұмыста қосымша электростатикалық өріспен әсерленген жоғарыжиілікті разряда плазмасының зондтық диагностикасының нәтижелері келтірілген. Біріккен разрядтағы электрлік зондтың вольтамперлік сипаттамасы, сонымен қатар әр-түрлі тұрақты кернеу мәніндегі электрондар температурасының аксиал таралуы келтірілген.

**Кілт сөздер:** жоғарыжиілікті разряд, плазма, электростатикалық өріс, зондтық диагностика, электрондар температурасы

**A.U. Utegenov, Y.A. Ussenov, M.K. Dosbolayev, T.S. Ramazanov**  
*al-Farabi Kazakh National University Scientific Research Institute of Experimental and Theoretical  
Physics (IETP), 050040, Almaty, Kazakhstan*  
[almasbek@physics.kz](mailto:almasbek@physics.kz)

### **PROBE DIAGNOSTICS OF RADIOFREQUENCY DISCHARGE PLASMA IMPOSED BY ADDITIONAL ELECTROSTATIC FIELD**

**Abstract.** In this work the experimental results of probe diagnostics of radiofrequency discharge plasma imposed by additional electrostatic field are presented. IV characteristics of the probe in combined plasma, as well as axial distribution of electrons temperature are presented.

**Key words:** radiofrequency discharge, plasma, electrostatic field, probe diagnostics, electron temperature.