

УДК539.23:621.793

М.К. Досболаев*, А.У. Утегенов, Т.С. Рамазанов

Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
НИИ экспериментальной и теоретической физики, Республика Казахстан, г. Алматы
E-mail: merlan@physics.kz

Свойства комплексной плазмы смеси газов в разряде переменного и постоянного тока

В данной работе представлены результаты исследований влияния смеси газов на параметры плазмы комбинированного RF+DC разряда. Экспериментально исследовались свойства комплексной плазмы в смеси газов в ВЧ разряде, с дополнительно приложенным постоянным электростатическим полем. Показано, что добавление тяжелого газа в более легкий газ и дополнительное воздействие постоянного поля на ВЧ разряд приводят к изменениям пространственной характеристики буферной плазмы разряда и, соответственно, положения пылевой структуры.

Ключевые слова: высокочастотный разряд, смесь газов.

M.K. Dosbolayev, A.U. Utegenov, T.S. Ramazanov

Influence of gas mixtures on complex plasmas parameters in rf and dc discharges

In this paper the influence of the gas mixture on plasma parameters in DC and combined RF+DC discharge is studied. The properties of complex plasma in the radio-frequency discharge of the gas mixture, with additional constant electrostatic field were experimentally studied. It is shown that the addition of a heavy gas to a light one, and the additional impact of a constant field on the RF discharge leads to changes in the spatial characteristics of the buffer plasma and, hence, the location of the dust structure.

Key words: radio-frequency capacitive discharge, mixture of gases, combined RF+DC discharge.

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

Айнымалы және тұрақты ток газдар қоспасы разрядындағы комплектті плазманың қасиеттері

Берілген жұмыста газ қоспасының RF+DC біріккен разрядының параметрлеріне әсерін зерттеу нәтижелері келтірілген. Қосымша тұрақты ток қосылған жоғары жиілікті газ қоспасы разрядында түзілген комплексіті плазманың қасиеттері эксперименттік түрде зерттелді. Ауыр газды жеңіл газға қосқан кезде және ЖЖ разрядқа қосымша тұрақты ток беру арқылы разрядтың буферлі плазмасының кеңістік бойынша сипаттамалары, сәйкесінше тозаңды құрылымның орны өзгеретіні көрсетілген.

Түйін сөздер: жоғары жиілікті сыйымдылықты разряд, газдар қоспасы, біріккен жоғары жиілікті және тұрақты токты разряд.

Введение

Исследованию свойств комплексной плазмы посвящено огромное количество экспериментальных и теоретических работ (см. обзоры [1-3]).

С недавних пор изучение плазмы в смесях различных газов имеет широкий интерес, так как, варьируя компоненты плазмы, можно получить результаты (трудно достигаемых в

чистом однокомпонентном газе), полезные для решения некоторых технологических задач, например, в производстве плазменных панелей, интегральных микросхем, при модификации поверхностей материалов, в лазерных источниках, а также при получении пучков с высокой скоростью и т.д. [4-10].

Данная тематика теоретически [11] и экспериментально исследовалась в разрядах раз-

личного типа, результаты которых представлены в работах [12-14].

В статье приведены результаты экспериментальных исследований комплексной плазмы в высокочастотном разряде, с наложенным постоянным электрическим полем (с помощью источника стационарного тока) в смеси инертных газов. Особенностью такого рода разряда является то, что при дополнительном добавлении статического поля на высокочастотный разряд изменяются пространственные характеристики плазмы [15]. Во многих работах по исследованию такого рода плазмы, то есть в плазме, где ВЧ разряд осуществляется с дополнительными источниками ВЧ или источниками постоянного тока, наблюдаются изменения в свойствах буферной плазмы [16, 17].

Экспериментальная часть. Условия эксперимента

Эксперименты проводились в модернизированной газоразрядной камере, в которой для откачки и напуска рабочего газа в объем камеры использовалась универсальная установка VUP-5. Основной частью экспериментальной установки является электродная система, где образуется

высокочастотный емкостной газовый разряд. Дисконные электроды с диаметрами 100 мм из алюминия расположены параллельно друг другу в горизонтальном положении, на расстоянии 35 мм [18].

На нижний электрод подсоединяется ВЧ-генератор с частотой 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 DC. Поэтому источник DC подсоединяется с электродом через высокочастотный LC-фильтр, схема которого содержит катушку индуктивности с индуктивностью $L=3$ мГн и конденсатор с емкостью $C=9$ нФ. В эксперименте использовались пылевые частицы из меламина формальдегида диаметром 10.17 мкм, и инъекция их в объем плазмы осуществлялась с помощью импульсного электродинамического дозатора. Условия экспериментов были таковы: давление в камере составляло 0.3 и 0.6 тор, мощность передаваемый ВЧ генератором 4 Вт. Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рисунке 1.

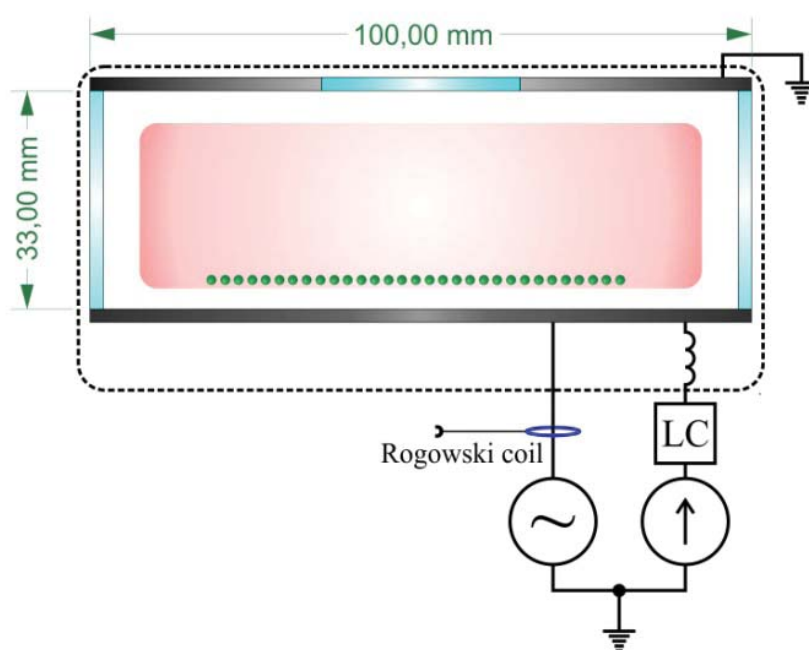


Рисунок 1 – Принципиальная схема экспериментальной установки

Результаты экспериментов

Аксиальное распределение интенсивности свечения буферной плазмы

В экспериментальной части рассматривались следующие явления: первое – это изменения аксиального положения и интенсивности свечения буферной плазмы; второе – изменения пространственного положения пылинок в плазме.

При добавлении постоянного поля к высо-

кочастотному разряду смещается приэлектродный плазменный слой, что можно заметить на рисунке 2, где приведено фотоизображение горения разряда при разных значениях постоянного тока. На рисунке 3 это явление можно увидеть как смещение интенсивности свечения плазмы вертикально вверх, тем самым заметно, что в верхней части горения плазмы интенсивность свечения становится больше чем в нижней части.

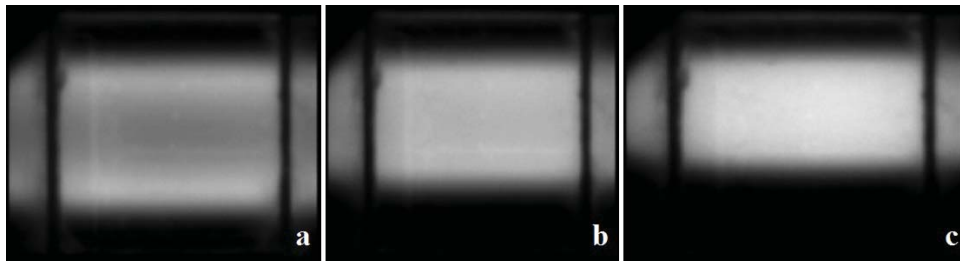


Рисунок 2 – Смещение приэлектродного плазменного слоя в зависимости с приложенным постоянным полем

a – $U_{dc} = -30$ В; b – $U_{dc} = -50.7$ В; c – $U_{dc} = -70.1$ В

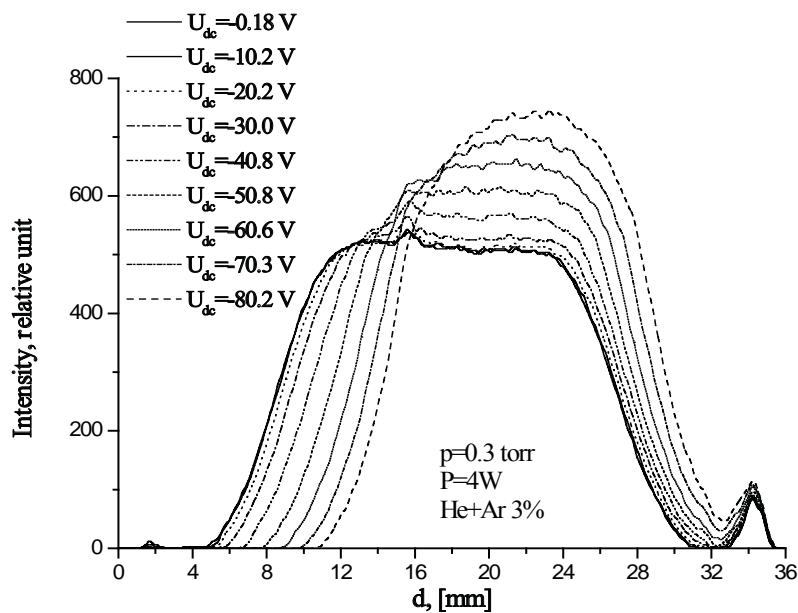


Рисунок 3 – Аксиальное распределение интенсивности свечения буферной плазмы при давлении смеси гелий-аргонар = 0.3 торр

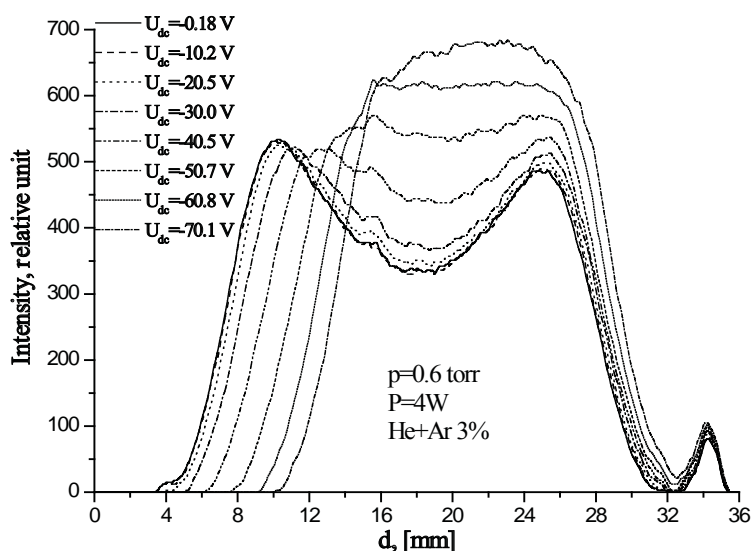


Рисунок 4 – Аксиальное распределение интенсивности свечения буферной плазмы при давлении смеси гелий-аргонар = 0.6 тор

Ниже приводятся объяснения к первым кривым рисунка 3 и 4, где отсутствует влияние постоянного поля. На рисунке приведены распределения интенсивности свечения в межэлектродном пространстве высокочастотного разряда при разных давлениях (рисунок 3, при 0.3 тор; рисунок 4, при 0.6 тор) и, как видно, они симметричны (исключая область верхнего заземленного электрода) [Райзер, 1987, стр. 530-533]. Начало координат соответствует положению нижнего электрода, на 33 мм высоты расположен заземленный электрод. В данном случае очевидно, что свечение газового разряда и ее интенсивность связаны с процессом возбуждения атомов (молекул). А вероятность происхождения процесса возбуждения непосредственно связана с эффективным сечением и частотой столкновения, последнее прямо пропорционально давлению газа в объеме. В связи с этим при увеличении концентрации нейтральных частиц уменьшается длина свободного пробега электрона, соответственно, и его кинетическая энергия (при $E = \text{const}$). Из кривого распределения свечения в межэлектродном промежутке (рисунка 3) видно, что в наибольшей части свечение разряда распределяется равномерно (исключая приэлектродную область), следовательно, в этой области процесс возбуждения атомов тоже происходит приблизительно равномерно. Из этого следует, что электроны при данных условиях

успевают приобретать достаточную энергию для возбуждения атомов. На рисунке 4 видно, что при значении давления 0.6 тор интенсивность свечения разряда в центральной части меньше чем по сравнению с областями, которые ближе расположены к электродам, то есть в сравнительно плотной среде большая часть электронов в результате частых столкновений медленно набирают кинетическую энергию. В таком случае вероятность возбуждения тоже уменьшается. По сравнению с результатами при 0.3 тор (рисунок 4), в этих областях частота возбуждения меньше приблизительно на 25%.

Если к переменному электрическому полю добавить дополнительное постоянное поле, то есть к нижнему электроду подать отрицательный потенциал, то можно заметить что при обоих значениях давления проявляется рост интенсивности свечения и с уменьшением потенциала кривая свечения смещается в направлении верхнего заземленного электрода. Это явление можно объяснить следующим образом, потенциал, подаваемый на нижний электрод, приводит к торможению электронов, движущихся к этому электроду. Этот же процесс обратнo влияет на электроны, которые движутся в направлении верхнего электрода, они ускоряются, соответственно, вероятность возбуждения тоже увеличивается, что приводит к росту интенсивности свечения. Данный факт отражен на рисунках 3 и 4.

Такое же поведение можно увидеть и в плазме чистого гелия, где с добавлением дополнительного статического поля на ВЧ разряд плотность плазмы увеличивается в сторону верхнего заземленного электрода, чему способствует рост интенсивности свечения плазмы, показанного на рисунках 5 и 6. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами работы [16], где показано, что режим, при котором происходит данный процесс, соответствует слаботочному α -режиму. В данном режиме плотность плазмы максимальна в центре разряда (при 0.3 тор), а в γ -режиме высокая плотность плазмы наблюдается вблизи границы приэлектродного слоя, а в центральной области разряда на осевом распределении плотности плазмы наблюдается минимум. Это можно объяснить тем, что при низком давлении газа из приэлектродного слоя в плазму выходит пучок быстрых электронов, способных ионизовать атомы газа. Чем ниже давление газа, тем реже электроны сталкиваются в приэлектродном слое с атомами газа, тем выше энергия электронов на выходе из слоя. Следовательно, при низких давлениях интенсивность свечения плазмы распределяется равномерно, когда как при более высоком давлении газа появляются пики. Срав-

нивая рисунки 4 и 6, можно увидеть, что γ -режим в плазме смеси газов гелий-аргон при 0,6 тор имеет ярко выраженный минимум по сравнению с плазмой чистого гелия. Это можно объяснить тем, что энергия первого уровня возбуждения атома гелия больше чем энергия ионизации атома аргона, поэтому при разряде плазмы смеси газов гелий-аргон атом аргона успевает ионизоваться, когда как атом гелия находится в возбужденном состоянии. Вследствие чего в объеме плазмы появляются свободные электроны, которые, в свою очередь, приводят к торможению электронов вышедших из границы приэлектродного слоя в плазму. Тем самым в центральной части разряда смеси газов появляется ярко выраженный минимум, когда как в плазме чистого гелия интенсивность свечения распределена равномерно.

Надо отметить, что в проводимых экспериментах, при различных составах газа (He, He+Ar) максимальное значение подаваемого дополнительного постоянного поля было разным: в плазме смеси газов гелия и аргона -80.2 В (при $p=0.3$ тор) и -70.1 В (при $p=0.6$ тор), а в плазме чистого гелия -90.3 В (при $p=0.3$ тор) и -90.4 В (при $p=0.6$ тор). При дальнейшем увеличении постоянного напряжения плазма угасала.

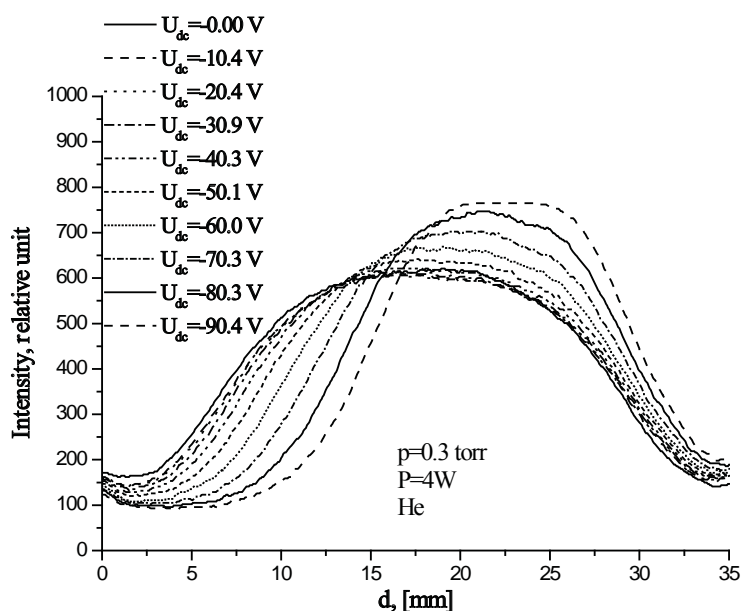


Рисунок 5 – Аксиальное распределение интенсивности свечения буферной плазмы при давлении газа гелия $p=0.3$ тор

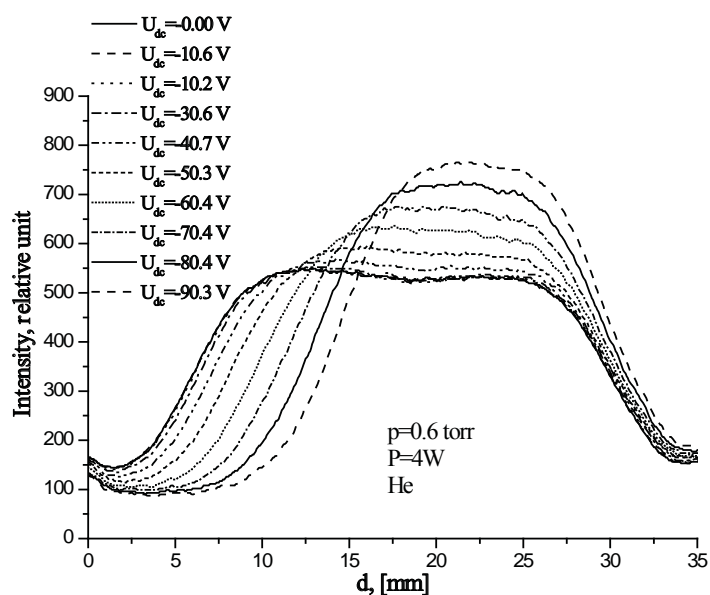


Рисунок 6 – Аксиальное распределение интенсивности свечения буферной плазмы при давлении газа гелия $p=0.6 \text{ тор}$

Изменение в пространственно-структурных свойствах плазмы с пылинками

В этой стадии экспериментального исследования изучалось поведение структур из пылинок. Так как плазменно-пылевая структура образуется

в области границы плазмы и приэлектродного плазменного слоя [17, 18], то с увеличением постоянного напряжения длина приэлектродного плазменного слоя увеличивается, тем самым расположение пылинок смещается вверх (рисунок 7).

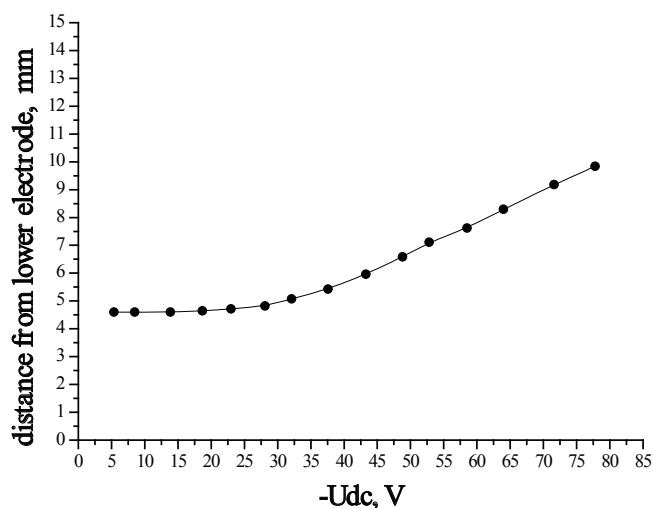


Рисунок 7 – Смещение пылинки в аксиальном направлении

Также были исследованы структурные свойства плазменно-пылевых систем, где были рассчитаны парные корреляционные функции распре-

деления частиц, результаты которых представлены на рисунке 8.

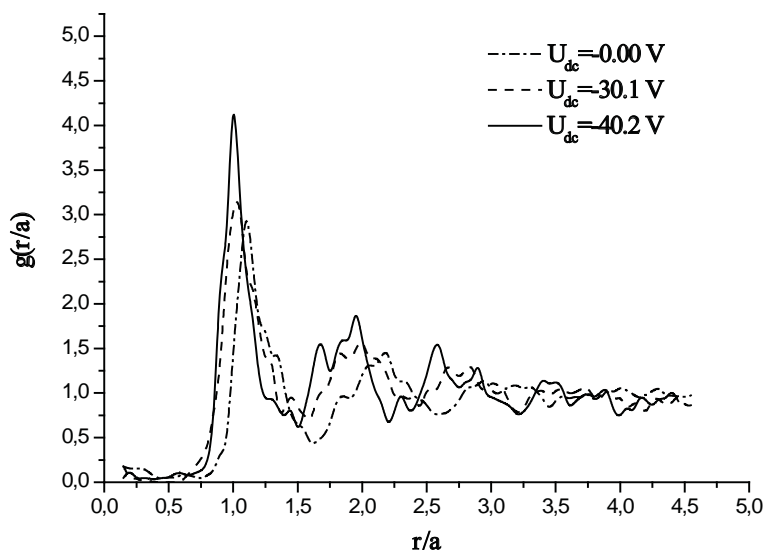


Рисунок 8 – Парные корреляционные функции распределения пылевой структуры при разных значениях U_{dc}

По результатам рассчитанных парных корреляционных функций распределения частиц видно, что при увеличении дополнительного постоянного поля структура из пылинок кристаллизуется.

Заключение

Получены двумерные аксиальные и радиальные распределения параметров плазмы (плотность электронов, электрического поля и температуры электронов) положительного столба разряда в трубке в гелии при различных концентрациях примеси водорода. Было показано, что добавка водорода в гелий существенно меняет характеристики плазмы разряда. При добавлении примеси водорода к гелию увеличи-

вается число страт и плотность электронов, так как у водорода потенциал ионизации намного меньше, чем у гелия.

Экспериментально было изучено распределение интенсивности свечения в аксиальном направлении в ВЧ разряде разогнанным постоянным электрическим полем. Было показано, что с увеличением постоянного напряжения плотность плазмы увеличивается, тем самым увеличивая интенсивность свечения. Далее было рассмотрено поведение пылевой плазмы. Показано, что так как пылевая структура в высокочастотном разряде образуется в приэлектродном слое, то увеличивая постоянное напряжение, можно управлять пространственным положением пылинок в системе.

References

- 1 Shukla P.K. and Mamun A.A. Introduction to Dusty Plasma Physics. Series in Plasma Physics. - Institute of Physics Publishing, 2002.
- 2 Thomas H.M. and G.E. Morfill, Nature (London) 379, 806 (1996)
- 3 Фортвов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А., В.И. Молотков, О.Ф. Петров // УФН, 2004. – Т.174. – Р. 495. *Uspehi Fiz. Nauk (Progress in Physics Sciences)*, v. – [in Russian]

- 4 Шибкова Л.В., Шибков В.М.. Разряд в смесях инертных газов. – М.: Физматлит, 2005.
- 5 Flamm D.L., Donneley V.M., Ibbotson D.E. // J. Vac. Sci. Technol. 1983. – Vol. B1. – N1. – P. 23-30.
- 6 Coburn J.M., Kay E. // IBM J. Res. Develop. – 1979. – Vol. 23. – N 1. – P. 33-41.
- 7 Berndt J., Douai D., Winter J. // Phys. Plasmas. – 2002. – Vol. 9. – P. 1046.
- 8 Berndt J., Makasheva K., Schluter H., Shivarova A. // J. Appl. Phys. – 2002. – Vol. 92. – N 11. – P. 6461-6470.
- 9 Wen-Yao Liu, Yong-Quan Du, Yong-Xin Liu, Jia Liu, etc. // Phys. Plasmas 20, 113501 (2002).
- 10 M.A. Lieberman and A.J. Lichtenberg // Principles of Plasma Discharges and Materials Processing. - Wiley-Blackwell, 2005.
- 11 Майоров // Кр. сообщ. по физ. ФИАН. – 2007. – №7. – С.44.
- 12 Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Jumabekov A.N., and Dosbolayev M.K. // Phys. Plasmas. – 2008. – Vol. 15. – P. 053704.
- 13 Ramazanov T. S., Daniyarov T.T., Maiorov S.A., Kodanova S.K., Dosbolayev M.K. and Zhankarashev E.B. // Contrib. Plasma Phys. – 2011. – Vol. 51, issue 6. – P. 505-508.
- 14 Popova D. V., Maiorov S. A., Antipov S. N., Petrov O. F., and Fortov V. E. In Book of Abstracts of the Fifth International Conference on Physics of Dusty Plasmas. Ponta Delgada, Azores, May 18–23, 2008 – P. 139.
- 15 Lisovskiy V., J.-P. Booth, N. Kharchenko, V. Yegorenkov, 2007 Proc. 28th ICPIG, Prague, Czech Republic. p. 2067
- 16 Лисовский В.А., Харченко Н.Д. // Вестник Харьковского университета, серия физика «Ядра, частиц, поля». – 2010. – № 899. – Вып. 2.
- 17 Shinya Iwashita, Edmund Schungel, Julian Schulze, Peter Hartmann, Zoltan Donko, Giichiro Uchida, Kazunori Koga, Masaharu Shiratani and Uwe Czarnetzki // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2013. – Vol.46. – P.245202 (12pp).
- 18 Dosbolayev M.K., Utegenov A.U., Ramazanov T.S., Daniyarov T.T. // Contrib. Plasma Phys. – 2013. – Vol.53. - No. 4-5. - P. 426-431.