ФИЗИКА ПЛАЗМЫ, 2020, том 46, № 7, с. 621–626

ПУЧКИ
В ПЛАЗМЕ

УДК 537.5 533.9

МОДЕЛЬ ПЛАЗМЕННОГО СЛОЯ, СФОРМИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

© 2020 г. Д. В. Колодко[a, b, *], И. А. Сорокин[a, b], В. П. Тараканов[a, c], Е. Г. Шустин[a]

[a] Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино Московской обл., Россия

[b] Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва, Россия

[c] Институт теплофизики экстремальных состояний ОИВТ РАН, Москва, Россия

*e-mail: dv.kolodko@plasma.mephi.ru

Поступила в редакцию 18.02.2020 г.
После доработки 20.02.2020 г.
Принята к публикации 20.02.2020 г.

Представлены результаты численного моделирования методом particle-in-cell в коде КАРАТ формирования пучково-плазменного разряда в отсутствие продольного постоянного магнитного поля, а также предварительно заданной плазмы. Колебания электрического поля, создаваемые неустойчивостью в области пучка электронов, практически не влияют на периферийную плазму. Проведены сравнения результатов моделирования с полученными ранее на упрощенной модели и экспериментальная апробация результатов моделирования. Полученные в модели пространственные распределения концентрации плазмы и электронной температуры качественно соответствуют экспериментальным.

Ключевые слова: пучково-плазменный разряд, КАРАТ, метод частиц в ячейках, пучковая неустойчивость

DOI: 10.31857/S0367292120070057

1. ВВЕДЕНИЕ

Возможность масштабирования основных элементов цифровой электроники приближается к пределу, определяемому физическими закономерностями, и для дальнейшего увеличения производительности процессоров и уменьшения габаритов интегральных схем необходимо внедрять качественно новые материалы и электронные приборы на новых физических принципах. Как нанометровые устройства на основе традиционных материалов, так и особенно новые материалы требуют бездефектных и свободных от зарядов плазменных технологий.

Пучково-плазменный разряд (ППР) в слабом магнитном поле как источник плазмы для плазмохимического реактора обладает определенными преимуществами при решении задач получения и обработки наноразмерных пленок и структур [1]. По сравнению с традиционно используемыми в промышленных установках ВЧ- и СВЧ-разрядами, в ППР есть возможность регулирования в широких диапазонах параметров плазмы: концентрации и температуры электронов, потенциала плазмы [2]. Это позволяет точно регулировать энергию ионов, воздействующих на обрабатываемую поверхность, в диапазоне 10–100 эВ. Низкие энергии ионов обеспечивают минимальную плотность радиационных дефектов. Ранее [3] было показано, что ППР в качестве источника плазмы может успешно применяться как для "мягкого" травления структур полупроводниковых приборов, так и для синтеза наноразмерных углеродных пленок.

Процессы, происходящие в плазме ППР, изучались ранее, однако ввиду особенностей разряда практически невозможно исследование всех процессов и параметров разряда экспериментально. В частности, в области электронного пучка практически невозможно применение зондовой диагностики (электронный пучок создает большую тепловую нагрузку на зонд, немаксвелловское энергетическое распределение электронов и колебательные процессы создают большие шумы и существенное искажение зондовой характеристики) [4, 5]. Ключом к пониманию процессов в плазмохимическом реакторе с ППР может стать численное моделирование.

В настоящей работе проводится исследование развития пучковой неустойчивости, создаваемой электронным пучком в отсутствие изначально существующей плазмы и продольного магнитного поля. Мы подтверждаем слабое влияние СВЧ-ко-

лебаний на периферийную плазму, что позволяет в дальнейшем разделить модель на две части: область пучковой неустойчивости – изучение плазмообразования, и периферийная плазма – в задачах взаимодействия плазмы со стенками и с обрабатываемыми структурами. В обстоятельствах, когда в двух частях для процессов характерны времена и величины плотности разного порядка, появляется возможность существенно сократить время общего расчета реактора.

Для моделирования развития пучковой неустойчивости и образования плазмы использовался программный комплекс КАРАТ [6, 7].

В предыдущей работе [8] проводилось моделирование образования пучковой неустойчивости в объеме, заполненном предварительно созданной плазмой с плотностью 10^{10} см$^{-3}$. В объеме существует продольное магнитное поле с напряженностью, делающей движение электронов практически одномерным, но не влияющее на движение ионов. Плазма считается бесстолкновительной (нейтральные частицы отсутствуют). Полученная фазовая диаграмма для электронов пучка наглядно демонстрирует развитие пучковой неустойчивости. Частоты генерируемых электрических колебаний хорошо соответствуют ожидаемым в ППР частотам вблизи ленгмюровской частоты. Результаты моделирования были сравнены с экспериментальными данными, полученными на плазмохимическом реакторе с ППР [9], и показали качественное совпадение.

2. ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

В данной работе решалась двухмерная аксиально-симметричная задача. Геометрия расчетной области представлена на рис. 1. Она представляет собой цилиндр радиусом 15 см и длиной 50 см. Стенки цилиндра заземлены. Электрод, имитирующий энергоанализатор, на который можно подавать потенциал, помечен на рисунке цифрой *1*. В объем в момент $t = 0$ запускается электронный пучок из области *2*. Радиус пучка 1.5 см. Энергия и ток электронного пучка в различных циклах счета варьировались от 0.5 до 2 кэВ и от 50 до 200 мА, соответственно.

В модели учитываются элементарные процессы взаимодействия электронов с нейтральным газом: упругие столкновения, ионизация и возбуждение. Эффективные сечения для этих процессов соответствуют сечениям ионизации и возбуждения аргона. Масса ионов M задана равной 1000 m_e, что позволяет получить квазистационарное решение за приемлемое время расчета. Ранее было показано, что такое заведомое занижение массы иона приводит только к убыстрению основных физических процессов в исследуемой системе, не меняя их качественно [10]. Критерием

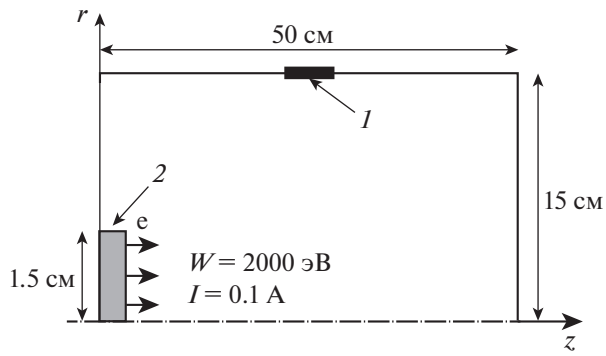

Рис. 1. Геометрия счетной области численной модели.

квазистационарного состояния системы взято условие, что количество заряженных частиц в системе остается неизменным во времени.

Электроны пучка, из-за взаимодействия с нейтральным газом, начинают взаимодействовать с плазмой, создавая неоднородное электрическое поле. Как видно из проекции фазового портрета электронов на ось Z (ось симметрии, рис. 2) в системе развивается конвективная пучково-плазменная неустойчивость (колебания начинаются от уровня шума и нарастают как во времени, так и в пространстве).

Коллективное взаимодействие между электронами пучка и плазмы приводит к формированию сгустков электронов, которые создают локальный переменный электрический потенциал на оси вплоть до 100 В (рис. 3).

Представленное пространственное распределение потенциала показывает периодическую природу перемещения электрического поля со скоростью ~10^7 м/с, близкую к скорости первоначального пучка электронов, как и предсказывает теория пучковой неустойчивости. Благодаря создаваемому неустойчивостью полю, низкоэнергетичные электроны плазмы приобретают достаточную энергию для ионизации газа. Разлетающиеся частицы из приосевой области создают стационарную плазму во всем счетном объеме. Распределения концентрации плазмы и электронной температуры по радиусу на расстоянии 25 см от источника электронов представлены на рис. 4б. При удалении от оси Z на расстояние более 6 см влияние пучковой неустойчивости на плазму мало.

Таким образом, на периферии первичного пучка формируется почти однородный стационарный слой плазмы с малым потенциалом (менее 20 В).

Для решения задач по взаимодействию вытягиваемых из периферийной плазмы ионов со стенками и с обрабатываемыми образцами исследовался их энергетический спектр. Поток ионов

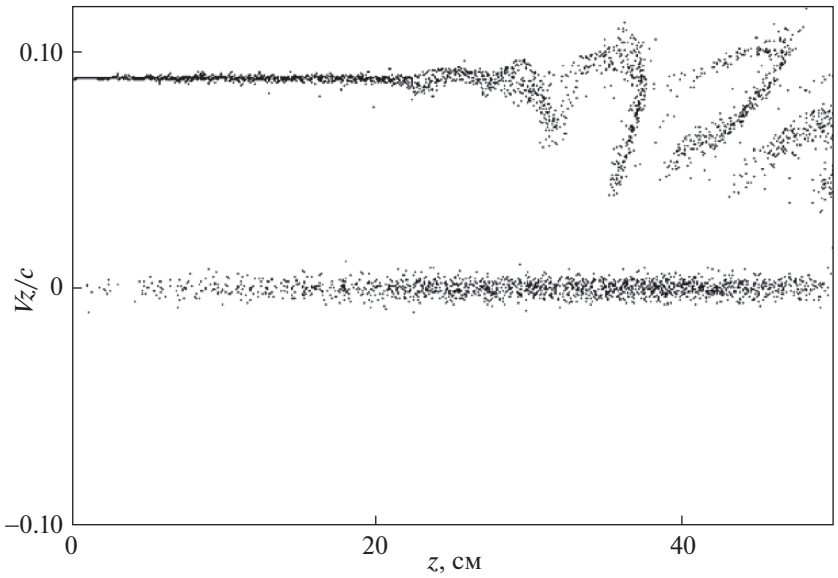

Рис. 2. Фазовый портрет электронов пучка в момент времени 1.7 мкс.

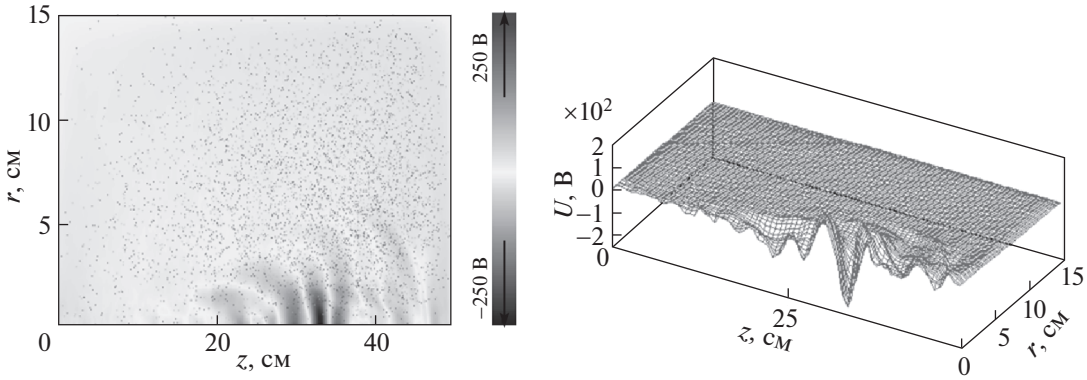

Рис. 3. Распределение потенциалов в момент времени 1.7 мкс.

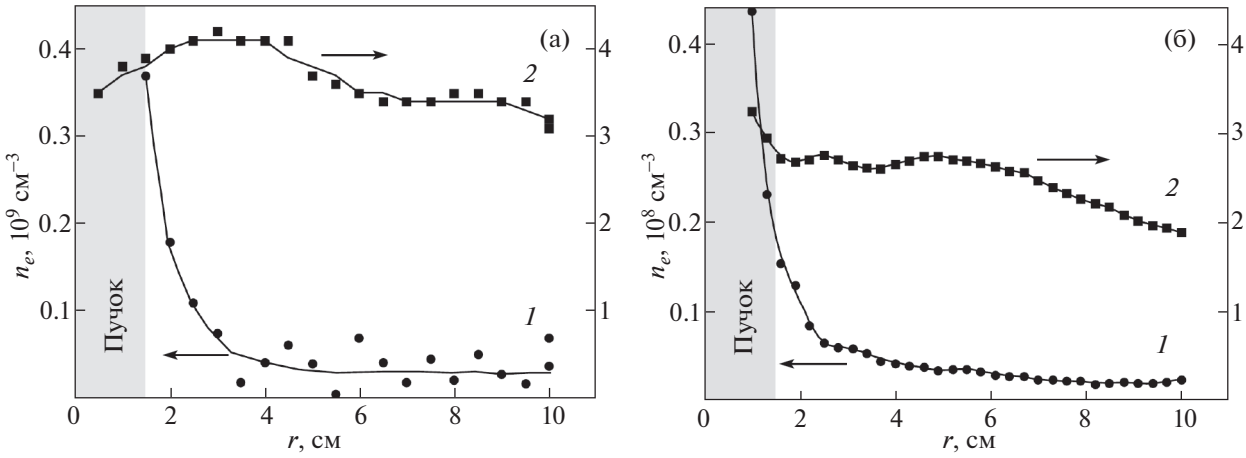

Рис. 4. Профили плотности плазмы, сформированной электронным пучком для двух рабочих давлений: *1* – 0.06 Па (пучковая плазма), *2* – 0.6 Па (ППР). а) и б) – экспериментальные [9] и модельные результаты, соответственно.

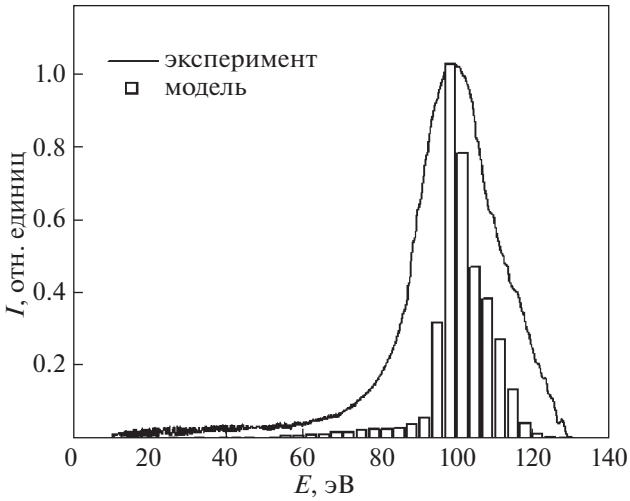

Рис. 5. Энергетическое распределение ионного потока на энергоанализатор ($U = 100$ В).

формировался подачей на энергоанализатор потенциала $U = 100$ В. На рис. 5 представлено энергетическое распределение падающих ионов на поверхность энергоанализатора.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты численного моделирования были апробированы на установке с ППР [11–13], предназначенной для отработки режимов мягкого травления наноструктур. Схема установки представлена на рис. 6.

Электронный пучок в основную камеру установки инжектируется с помощью диодной пушки Пирса с косвенным накалом катода. Объем электронной пушки отделен от основной камеры с помощью вакуумной диафрагмы в виде протяженной трубки диаметром 20 мм и имеет собственную вакуумную откачку. Перепад давления составляет 1:10, что позволяет использовать электронную пушку в вакуумном режиме без перехода в дуговой режим в широком диапазоне давлений в плазменной камере.

Энергия первичного пучка может варьироваться в диапазоне до 4 кВ с током эмиссии до 0.5 А. Для предотвращения перегрева поверхности обрабатываемых образцов ускоряющее напряжение пучка модулируется импульсами с длительностью 10–200 мс и скважностью >3.

Движение пучка в перепадной трубке ограничено по радиусу с помощью продольного магнитного поля до 10 мТл. Значение магнитного поля подбирается экспериментально по максимальному токопрохождению пучка. В качестве приемного коллектора используется танталовая пластина, находящаяся под потенциалом стенок камеры.

Плазма разряда формируется в основной камере диаметром 0.3 м и длиной 0.5 м. Вакуумная откачка установки осуществляется с помощью двух диффузионных насосов с азотными криоловушками. Предельное остаточное давление для обеих частей установки составляет 10^{-3} Па. Напуск рабочего газа (аргона) осуществляется с помощью игольчатого натекателя. Рабочее давление 0.02–2 Па.

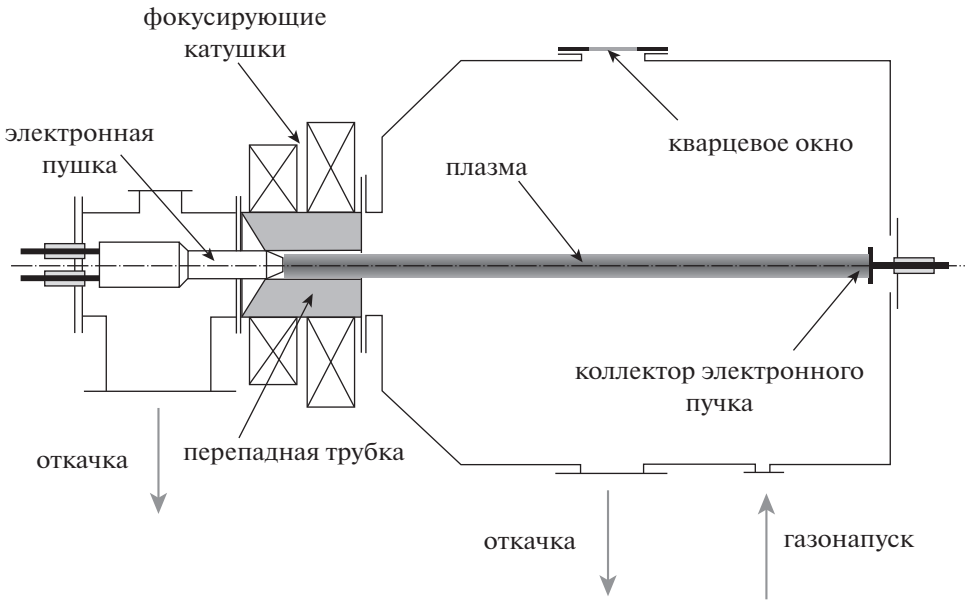

Рис. 6. Схема установки с пучково-плазменным разрядом.

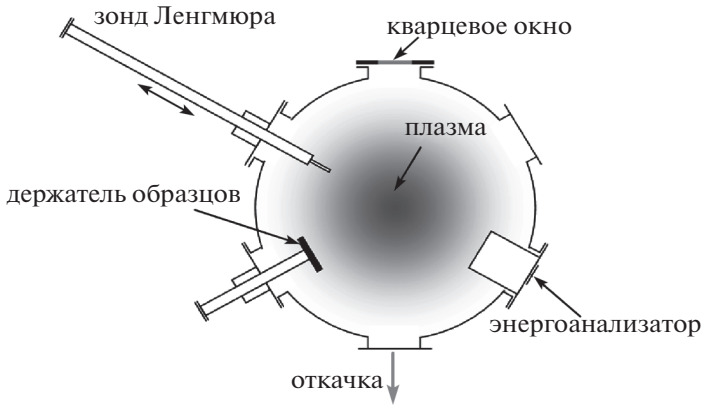

Рис. 7. Схема расположения диагностического оборудования в центральной части установки с ППР.

Образцы, подвергаемые травлению, располагаются в центральной части установки. В той же плоскости устанавливается оборудование для диагностики локальных параметров плазмы разряда, а также энергоанализатор потока ионов из плазмы. На рис. 7 представлена схема расположения диагностического оборудования в центральном сечении установки.

Профили плотности и температуры плазмы измеряются с помощью плоского зонда Ленгмюра (диаметр 3 мм). Зонд располагается на автоматизированном подвижном вводе движения, что позволяет проводить оперативный контроль профилей основных параметров плазмы. Для этого на зонд подается пилообразная развертка напряжения частотой 50 Гц. Во время движения подвижной каретки ввода движения измеряются одновременно сигналы положения зонда, напряжения развертки и тока на зонд. Сигналы записываются цифровым осциллографом в режиме самописца. Обработка производится стандартными методами обработки ВАХ одиночного зонда [14] с помощью специального программного обеспечения.

Энергетическое распределение ионного потока измерялось с помощью цилиндрического электростатического энергоанализатора, имеющего высокую светосилу по сравнению с плоским электростатическим зеркалом (при аналогичной геометрии интенсивность в 4 раза выше [15]). Для вытягивания ионов из плазмы на корпус анализатора может быть подан потенциал смещения.

Локальные параметры плазмы и энергетические спектры ионного потока из плазмы были измерены в режимах, близких к модельным. На рис. 4 представлено сравнение экспериментальных и модельных радиальных распределений плотности плазмы при двух разных рабочих давлениях. В сечении $z = 25$ см профили качественно совпадают с результатами численного моделирования и близки к результатам предыдущего моделирования [9].

Аналогичное сравнение результатов экспериментальной проверки численной модели было проведено для энергетического распределения потока ионов на периферию разряда (см. рис. 5).

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Флуктуации плотности и потенциала слабо распространяются в периферийную плазму, которая практически стационарна. Это позволит в дальнейшем значительно упростить модель для расчета процессов в периферийной плазме: можно не рассчитывать приосевую область, а использовать полученные в данной работе распределения плотности и температуры на радиусах больше 6 см. Это существенно сократит времена расчета пристеночной плазмы. Подобные выводы также подтверждаются при сравнении модельных и экспериментальных энергоспектров ионного потока из плазмы. Таким образом, периферийная плазма является стационарной, и данные, полученные в КАРАТе (такие как фазовые портреты электронов, ионов и распределения потенциала плазмы в пространстве), можно использовать в модели процессов воздействия потоков ионов на пристеночные структуры в плазменном реакторе с ППР-источником плазмы [10]. Это позволит точнее воспроизвести процессы травления с использованием ППР.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и апробирована численная модель формирования ППР в отсутствие продольного постоянного магнитного поля, а также предварительно заданной плазмы. Численная модель показала, что флуктуации потенциала в области разряда, занимаемой пучком, слабо влияют на периферийную плазму. Полученные численным

методом параметры стационарной периферийной плазмы в применении к модели травления позволят рассчитать травление в ППР за доступные времена расчета.

Численная модель экспериментально апробирована на установке с ППР. Результаты моделирования и экспериментов: профили плотности плазмы и электронной температуры; кривые энергетических распределений ионов на периферии разряда качественно совпадают.

Работа выполнена в рамках государственного задания и частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты РФФИ № 18-38-00884 и 19-07-00432).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Исаев Н.В., Рухадзе А.А., Шустин Е.Г.* // Физика плазмы. 2005. Т. 31. С. 1026. [N.V. Isaev, A.A. Rukhadze, E.G. Shustin // Plasma Phys. Rep. 2005. V. 31. P. 953] https://doi.org/10.1134/1.2131131
2. *Lieberman M.A., Lichtenberg A.J.* Principles of plasma discharges and materials processing. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1994.
3. *Shustin E.G.* // J. Communications Technology and Electronics. 2017. V. 62 (5). P. 454. https://doi.org/10.1134/S106422691704012X
4. *Ахметов Т.Д., Давыденко В.И., Таскаев С.Ю.* // Физика плазмы. 2000. Т. 26. С. 166. [Akhmetov T.D., Davydenko V.I., Taskaev S.Y. // Plasma Phys. Rep. 2000. V. 26. P. 152] https://doi.org/10.1134/1.952835
5. *Kolodko D., Sorokin I., Vizgalov I.* // AIP Conf. Proc. 2016. 040008. https://doi.org/10.1063/1.4964193
6. *Тараканов В.П.* Универсальный электромагнитный код КАРАТ / В кн. Математическое моделирование. Проблемы и результаты. М.: Наука, 2003.
7. *Tarakanov V.P.* User's Manual for Code KARAT. Springfield: Berkley Research Associates, 1992.
8. *Тараканов В.П., Шустин Е.Г.* // Физика плазмы. 2007. Т. 33. С. 151. [Tarakanov V.P., Shustin E.G. // Plasma Phys. Rep. 2007. V. 33. P. 130] https://doi.org/10.1134/S1063780X07020067
9. *Сорокин И.А., Шустин Е.Г.* // Физика плазмы. 2018. Т. 44. С. 849. [Sorokin I.A., Shustin E.G. // Plasma Phys. Rep. 2018. V. 44. P. 1164] https://doi.org/10.1134/S1063780X18120061
10. *Tarakanov V.P., Shustin E.G., Ronald K.* // Vacuum. 2019. V. 165. P. 262. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.04.021
11. *Исаев Н.В., Клыков И.Л., Песков В.В., Шустин Е.Г., Визгалов И.В., Курнаев В.А.* // ПТЭ. 2014. Т. 57. С. 124. [Isaev N.V., Klykov I.L., Peskov V.V., Shustin E.G., Vizgalov I.V., Kurnaev V.A. // Instruments Exp. Tech. 2014. V. 57. P. 82] https://doi.org/10.1134/S002044121401014X
12. *Исаев Н.В., Чмиль А.И., Шустин Е.Г.* // Физика плазмы. 2004. Т. 30. С. 292. [Isaev N.V., Chmil' A.I., Shustin E.G. // Plasma Phys. Rep. 2004. V. 30. P. 263] https://doi.org/10.1134/1.1687029
13. *Shustin E.G., Isaev N.V., Temiryazeva M.P., Fedorov Yu.V.* // Vacuum. 2009. V. 83. P. 1350. https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2009.03.033
14. *Козлов О.В.* Электрический зонд в плазме. М.: Атомиздат, 1969.
15. *Yavor M.* // Advances Imaging Electron Phys. 2009. V. 157. P. 213. https://doi.org/10.1016/s1076-5670(09)01606-1