

Influence of the interelectrode gap of the alternative current underwater diaphragm discharge on its physical and chemical properties

A. Yu. Nikiforov, A. I. Maximov

The Institute of Solution Chemistry of the Russian Academy of Science, Ivanovo, Russia

A process of active particles generation under action of the underwater discharge with different geometry of current conducting canal was investigated. It is found that efficiency of H_2O_2 formation depends on input discharge power as well as length of the current conducting capillary. Maximal rate of H_2O_2 generation amounts $3.6 \cdot 10^{-3}$ mmol/l.s. Kinetic of OH radicals formation is investigated by means of registration of emission spectrum in the region of 280—400 nm. It is revealed that efficiency of radical's generation decreases with increase of capillary length.

УДК 533.9

Компактный микроволновый источник плазмы CERA-RI

А. А. Балмашинов, А. В. Калашников

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

Разработан компактный источник плазменного потока, ионный ток в котором достигает 20 мА, при мощности высокочастотного генератора, работающего в непрерывном режиме на частоте 2,47 ГГц, менее 20 Вт и при уровне магнитного поля, не превышающем 60 % от величины, соответствующей ЭЦР. Предполагается возможность его использования в качестве двигателя коррекции орбит легких летательных аппаратов.

Компактные источники плазменных потоков представляют значительный интерес в связи с возможностью их использования в качестве двигателей коррекции орбит легких летательных аппаратов. Наряду с продолжением работ над источниками, в которых применяется разряд постоянного тока или высокочастотный разряд [1], в настоящее время особое внимание уделяется созданию микроволновых источников, реализация резонансных механизмов формирования плазмы в которых определяет их высокую газовую и энергетическую эффективность. В частности, вопросу оптимизации параметров микроволнового плазменного двигателя посвящена работа [2], в которой представлены результаты исследования влияния геометрии центрального электрода коаксиальной разрядной камеры и пространственной локализации области ЭЦР (2,45 ГГц) на параметры формируемого плазменного потока.

Предлагаемый авторами источник обладает всеми преимуществами, определяемыми резонансным взаимодействием высокочастотного поля с электронной компонентой плазмы, включающими в себя не только энергетическую и газовую эффективность, но и значительный временной ре-

сурсы работы, а также малый массогабаритный параметр. Однако сильно неоднородное магнитное поле в области транспортировки плазмы к системе экстракции заряженных частиц, а также тот факт, что разрядная камера не является резонатором, существенным образом должны влиять как на величину ионного тока, так и на уровень высокочастотного поля, обеспечивающего поджиг разряда. В связи с этим нами предлагается устройство, в котором разрядная камера является коаксиальным резонатором, а профиль магнитного поля обеспечивает не только снижение потерь заряженных частиц в радиальном направлении, но и обеспечивает их транспортировку в продольном, а также локализацию разряда в области системы экстракции частиц плазмы.

Цель работы — демонстрация возможности реализации предлагаемой конструкции источника плазменного потока.

Описание источника CERA-RI и средств диагностики параметров плазмы

Источник состоит из цилиндрического коаксиального резонатора (диаметр 5 см, длина 2 см, диа-

метр центрального электрода 0,5 см), двух сетчатых электродов (коэффициент прозрачности 0,3), расположенных на расстоянии 0,2 см друг от друга, и электромагнита с профилированным сердечником. Использовался магнетронный генератор М-107, работающий в непрерывном режиме на частоте $f = 2,47$ ГГц, мощность которого могла плавно варьировать. Добротность ненагруженного резонатора составляла 200. Потенциал на внешнем сетчатом электроде варьировался, внутренний электрод в условиях проводимых исследований находился под плавающим потенциалом.

Схема и фотография источника, а также схематическое изображение распределения высокочастотного электрического и стационарного магнитного полей представлены на рис. 1 и 2.

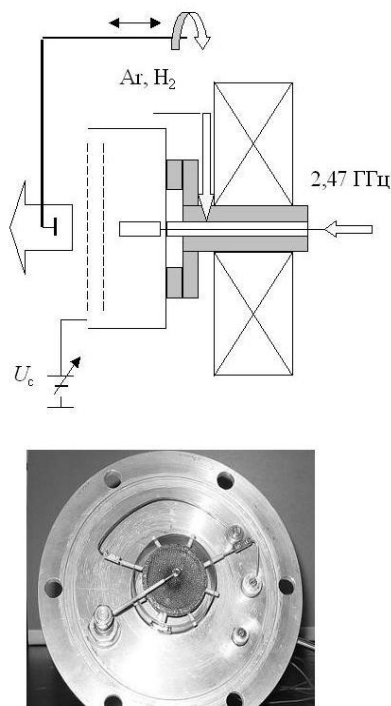


Рис. 1. Схема и внешний вид источника плазмы CERA-RI

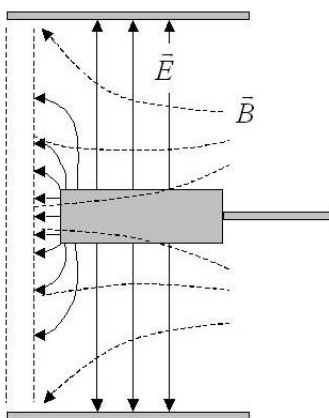


Рис. 2. Схематическое изображение распределений высокочастотного электрического и постоянного магнитного полей

В качестве рабочих газов использовали водород и аргон. Диагностику параметров плазмы осуществляли стационарным плоским электрическим зондом диаметром 1,5 см, подвижным плоским электрическим зондом диаметром 0,4 см и пятисеточным электростатическим анализатором энергий заряженных частиц с диаметром входного отверстия 0,5 см, расположенным на расстоянии 3 см от внешнего сетчатого электрода источника. Анализатор мог перемещаться в радиальном направлении. Спектр колебаний частиц плазмы исследовали высокочастотным зондом и анализатором спектра С4-25. Источник плазмы располагался в вакуумной камере (длина 75 см, диаметр 30 см), находящейся под непрерывной откачкой.

Результаты экспериментов

Установлено, что разряд возникает при магнитных полях, обеспечивающих вблизи задней стенки резонатора условие ЭЦР, а пространственное распределение формируемого источником потока плазмы зависит от типа рабочего газа, его давления в системе (P_g), уровня СВЧ-мощности, поступающей в резонатор (P), величины магнитного поля (ω_c/ω , ω_c — циклотронная частота электронов, $\omega = 2\pi f$) и потенциала на сетчатом электроде (U_c). Характерные для данного источника формы потоков плазмы показаны на рис. 3. Для случая, соответствующего представленному на рис. 3, а, было установлено, что величина ионного тока в плазменном потоке (стационарный зонд) увеличивается с уменьшением тока в цепи соленоида электромагнита и достигает максимального значения при величине, составляющей $\approx 60\%$ от значения, соответствующего условию поджига разряда. Дальнейшее уменьшение магнитного поля приводит к срыву разряда. При этом характер осцилляций в зависимостях величины ионного тока от уровня магнитного поля определяется типом рабочего газа.

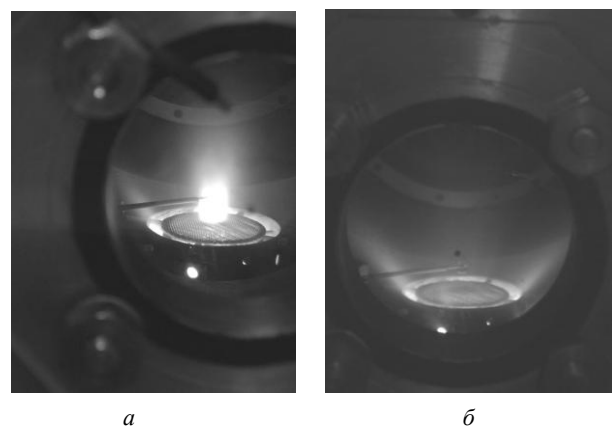


Рис. 3. Виды (а, б) плазменных потоков

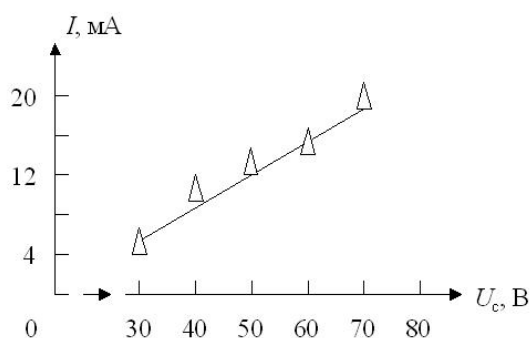


Рис. 4. Зависимость ионного тока на зонд, расположенный на расстоянии 3 см от источника, от потенциала на сетчатом электроде (Ar; $\omega_c / \omega = 0,6$; $P = 25$ Вт; $P_g = 8 \cdot 10^{-3}$ Торр)

Проведенные исследования также показали практически линейную зависимость величины ионного тока на стационарный зонд от потенциала на сетчатом электроде (рис. 4) и отсутствие каких-либо изменений в спектре колебаний частиц плазмы в диапазоне 0—50 МГц, связанных с изменением параметров плазмы при уменьшении тока в цепи электромагнита.

Результаты исследований радиального распределения ионного тока насыщения (подвижный зонд), представленные на рис. 5, а также локализация областей деградации поверхностей электродов источника (см. рис. 1) приводят к выводу, что в условиях отсутствия веерообразного потока плазмы формирование плазменного потока происходит в кольцеобразной области, расположенной между центральным электродом резонатора и сетчатым электродом, находящимся под плавающим потенциалом. Исследования, проведенные электростатическим анализатором, позволили лишь констатировать зависимость энергии ионной компоненты плазмы от потенциала на сетчатом электроде. В связи с этим в дальнейших экспериментах предполагается использовать магнитный анализатор.

Заключение

На основе представленных результатов мы предполагаем, что при уменьшении напряженности магнитного поля относительно уровня, соответствующего ЭЦР, механизм формирования плазмы определяется процессом линейной трансформации электромагнитной волны в верхнегибридную с последующим ее распадом на новую

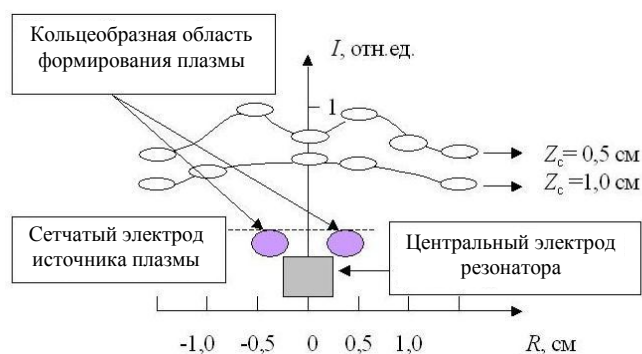


Рис. 5. Радиальные распределения ионного тока насыщения (Z_c — расстояние от внешнего сетчатого электрода, Ar; $U_c = 60$ В; $P = 20$ Вт; $P_g = 8 \cdot 10^{-3}$ Торр; $\omega_c / \omega = 0,6$)

верхнегибридную и ионно-звуковую волны, электрическое поле последней из которых осуществляет наработку плазмы высокой концентрации [3] и влияет на фокусировку ее потока. Так как в регистрируемом высокочастотным зондом спектре колебаний характерных для этого процесса особенностей не наблюдалось, можно сделать вывод о высокой эффективности трансформации энергии электромагнитной волны в формируемой ей плазме.

Замена электромагнита постоянным магнитом с соленоидом пускового режима, увеличение прозрачности сетчатых электродов и незначительные изменения в конструкции источника позволят значительно снизить его массу, увеличить ионный ток и повысить энергетическую эффективность источника в целом.

На основе разработанного источника плазмы может быть создан компактный двигатель коррекции орбит легких летательных аппаратов с параметрами, не уступающими параметрам двигателя, описанного в работе [2].

Литература

1. RITA The Ion Propulsion System for the Future// Daimler-Benz Aerospace AG Space Infrastructure. Marketing Space Propulsion. Henning von Bassewitz. P.O.Box 80 11 68, 81663 Munchen.
2. Naoji Yamamoto, Shinya Kondo, Takayasu Kanagawa et al.: Proc. VI Int. Conf. "Microwave discharge: fundamentals and applications". — Zvenigorod, Russia. 2006. P. 211.
3. Balmashnov A. A., Golovanivske K. S., Kamps E.: Proc. ICPP. — Kiev. 1987. V. 2. P. 239.

Статья поступила в редакцию 27 августа 2007 г.

Compact microwave plasma source CERA-RI

A. A. Balmashnov, A. V. Kalashnikov
People's Friendship University of Russia, Moscow, Russia

The coaxial resonator and electromagnet with iron-cored of spatial profile configuration are used to form plasma flow. It has been found experimentally that total ion current could reach 20 mA under 20 W microwave power (2.45 GHz) and magnetic field level corresponded 60 % from ECR condition. We suppose that this type of a source can be used to create miniature microwave discharge ion thruster for small satellite propulsion system.

УДК 533.9

Характеристики рентгеновского излучения из ЭЦР-разряда в зеркальной магнитной ловушке

Д. М. Карфидов, К. Ф. Сергейчев
Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Россия

Экспериментально исследована генерация рентгеновского излучения в ЭЦР-разряде низкого давления. Показано, что спектр рентгеновских квантов экспоненциально спадает с энергией и может быть охарактеризован эффективной температурой. Максимальная энергия квантов достигает 200 кэВ при СВЧ-мощности ~ 1 кВт.

Эксперименты проводились на подробно описанной в [1] установке, представляющей собой зеркальную магнитную ловушку, создаваемую двумя симметричными магнитными катушками, между которыми установлена сферическая вакуумная камера размером 40 см в поперечнике, откачиваемая до остаточного давления 10^{-6} Торр. Распределение напряженности магнитного поля внутри камеры имеет вид "седла": на оси катушек — это параболический профиль с пробочным отношением $\sim 2,5$, а в радиальном направлении — перевернутая парабола, спадающая в 1,5 раза на расстоянии 20 см от оси камеры.

Условия электронного циклотронного резонанса достигаются в области, где частота сверхвысокочастотного излучения совпадает с гирочастотой электронов $\omega = eV/mc$, где V — индукция магнитного поля, e и m — заряд и масса электрона, c — скорость света.

В качестве источника СВЧ-излучения использовали магнетрон Samsung OM75P(31), питаемый через однополупериодный выпрямитель от сети переменного тока с частотой 50 Гц. Частота излучения магнетрона 2,45 ГГц, средняя мощность 600 Вт при длительности импульса 8 мс, скважности 2,5 и максимальной импульсной мощности 1,5 кВт. СВЧ-мощность передавалась по волно-

водному тракту и вводилась в камеру с помощью рупорной антенны через кварцевое окно параллельно вектору магнитной индукции. Максимальная напряженность электрического поля бегущей волны в центре вакуумной камеры $E_{\text{max}} < 40$ В/см. Величина резонансного магнитного поля для холодных электронов $B_{cr} = 875$ Гс.

Описываемая серия экспериментов была проведена при фиксированной величине магнитного поля в центре камеры $B_0 = 580$ Гс; при этом области резонанса находились на расстоянии $\pm 13,4$ см от центра. Для измерения параметров рентгеновского излучения использовали детектор гамма-излучения Вусгон 2.5M2.5/3LP-X, представляющий собой кристалл NaI(Tl) диаметром 76 мм, смонтированный в одном корпусе с фотоумножителем и предварительным усилителем сигналов. Рабочий диапазон детектора 0,05—1 МэВ. Детектор был помещен на расстоянии 1,5 м от камеры в свинцовый цилиндрический экран с коллиматором, направленным перпендикулярно оси установки. Толщина стенки экрана и коллиматора 2 см, при этом поле зрения детектора перекрывало все пространство между катушками магнитного поля. Линейная зависимость амплитуды сигнала детектора от энергии поглощенных фотонов позволяла проводить амплитудный анализ энергии-