

The possibility of using the normal Doppler effect in the plasma relativistic microwave amplifier with the frequency band 2—3 GHz

I. L. Bogdankevich, I. E. Ivanov, A. A. Rukhadze, P. S. Strelkov
Prokhorov's General Physics Institute RAS, Moscow, Russia

V. P. Tarakanov
High-Energy Density Research Center RAS, Moscow, Russia

The possibility of using the normal Doppler effect to suppress the feedback in the finite plasma-beam system is considered in this article. There are given the results of computer simulation. These results were obtained by means time-dependent electrodynamics computer code KARAT. There are also shown experimental data, which were acquired by the research of the plasma relativistic microwave amplifier with the frequency band 2—3 GHz.

PACS: 52.35Hr; 52.35Qz

УДК 533.9

ЭЦР-источники на основе коаксиального резонатора со спиральной волноводной структурой

А. А. Балмашинов, А. В. Калашников
Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

На основе коаксиальных резонаторов, центральный электрод которых выполнен в виде спирали, разработаны компактные ЭЦР-источники плазменного потока CERA-RHI и потока диссоциированных молекул CERA-RHD. Предполагается их использование в научных исследованиях и в вакуумно-плазменных технологиях, а CERA-RHI — также в качестве двигателя коррекции орбит легких космических аппаратов.

PACS: 52.80.Pi

Введение

В промышленном производстве и, в частности, при изготовлении полупроводниковых структур широко используются источники заряженных частиц и диссоциированных молекул, работающие в ВЧ-диапазоне электромагнитного излучения, что обеспечивает пространственную однородность процесса на достаточно больших площадях обрабатываемых изделий. Однако нерезонансный механизм формирования "активной" среды приводит к низкой энергетической эффективности этого типа систем. Как показывают исследования ряда авторов [1, 2], более энергетически эффективные ЭЦР-источники, работающие в диапазоне СВЧ, не позволяют достичь требуемой однородности, в связи с чем в промышленном производстве практически не применяются. Однако в научных исследованиях различного характера ЭЦР-источники являются предпочтительными. В этом типе источников традиционно применяют полые СВЧ-резо-

наторы, что определяет их характерные геометрические размеры, которые с системой формирования магнитного поля составляют десятки сантиметров. В связи с этим является актуальной разработка компактных ЭЦР-источников заряженных частиц и диссоциированных молекул. Низкая себестоимость таких источников наряду с высокой энергетической эффективностью, надежностью и возможностью работать с агрессивными газами обеспечит их широкое использование.

Особый интерес компактные ЭЦР-источники плазмы представляют и с точки зрения их применения в качестве двигателей коррекции орбит легких космических аппаратов. Этому вопросу, в частности, посвящена работа [3], в которой представлены результаты исследований параметров потока микроволновой плазмы, формируемой в коаксиальном резонаторе со сплошным центральным электродом. Аналогичные исследования были проведены [4], и в результате были установлены значительное влияние параметров СВЧ-разряда на резонансную

частоту резонатора и, как следствие, нестабильность поджига плазмы в системе, настроенной на режим, близкий к оптимальному с точки зрения параметров формируемого плазменного потока. Частично проблема нестабильности поджига решена в источнике плазмы CERA-RHI, описание которого представлено ниже.

Цель данной работы — демонстрация возможностей предлагаемых конструкций источников потоков плазмы и дисоциированных молекул, в которых используются коаксиальные резонаторы с центральным электродом, выполненным в виде спиральной волноводной структуры (СВС), что обеспечивает формирование стоячей электромагнитной волны не только в области между центральным и внешним цилиндрическим электродами, но и внутри спирали, где вектор напряженности СВЧ электрического поля имеет продольную составляющую. Геометрические размеры этих резонаторов значительно меньше размеров полых резонаторов, что позволяет использовать постоянные магниты, профиль поля которых обеспечивает достижение желаемых результатов.

Описание источника потока плазмы CERA-RHI и результаты первых экспериментов

В источнике потока плазмы CERA-RHI реализуются условия, при которых создаваемая вне СВС ЭЦР-плазма проникает в приосевую область, где могут быть реализованы различные механизмы экстракции частиц плазмы в продольном направлении, в частности, аналогичные описанным в работах [5—7].

Источник плазмы CERA-RHI (рис. 1) состоит из коаксиального резонатора с емкостной нагрузкой 1, центральный электрод 2 которого выполнен в виде СВС. Диаметр резонатора 3 см, диаметр СВС 1,6 см, длина резонатора может варьироваться. В работе использовался магнетронный генератор М-107, работающий в непрерывном режиме на частоте $f = 2,47$ ГГц. Добротность ненагруженного резонатора составляла $Q = 300$. Стационарное магнитное поле создавалось кольцеобразными магнитами 3, перемещение которых позволяло менять его профиль и локализацию области электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР). В качестве рабочего газа использовали азот. Диагностику параметров плазмы осуществляли плоским зондом и многосеточным электростатическим анализатором.

Результаты первых экспериментов показали устойчивый характер поджига разряда в диапазоне давлений $P_g = (0,8—4) \cdot 10^{-3}$ Торр при СВЧ-мощности, поступающей в резонатор, $P \geq 20$ Вт и пороговый характер (по вводимой в систему СВЧ-

мощности) возникновения экстракции из источника плазмы с ускоренными ионами как в нарастающем, так и в спадающем вдоль оси системы магнитном поле (рис. 2). Было также установлено, что как в первом, так и во втором случае энергия и полный ток ионной компоненты в потоке плазмы могут варьироваться изменением профиля магнитного поля и достигать в условиях проводимых экспериментов 50 эВ и 60 мА, соответственно, при уровне СВЧ-мощности, не превышающей 50 Вт. Диаметр плазменного потока составлял 1,5 см.

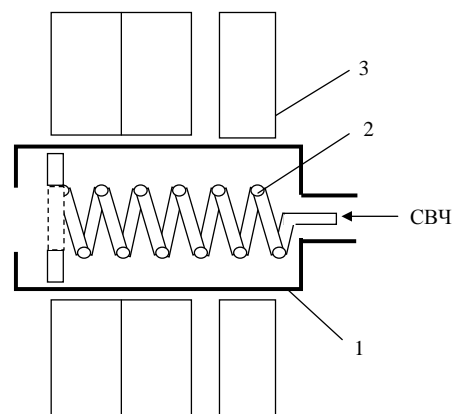


Рис. 1. Схема источника плазмы CERA-RHI

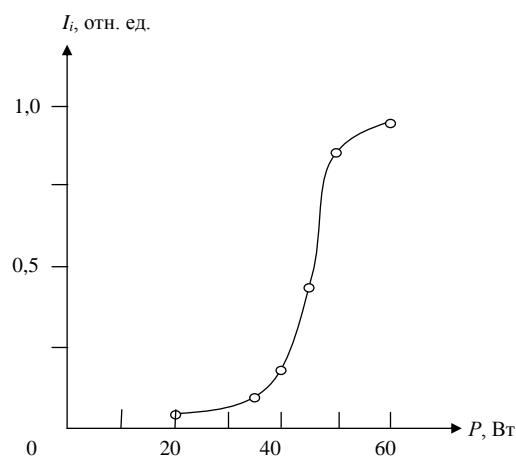


Рис. 2. Зависимость ионного тока I_i в потоке плазмы от вводимой в источник СВЧ-мощности P при $P_g = 1 \cdot 10^{-3}$ Торр

На основе полученных результатов предполагается, что механизм экстракции и ускорения ионов в спадающем магнитном поле связан с формированием двойного слоя в области электронного плазменного резонанса [5], а экстракция и ускорение в нарастающем магнитном поле — с возбуждением косої Ленгмюровской волны [7]. Указанные механизмы носят существенно пороговый характер по плотности плазмы и напряженности СВЧ электрического поля.

Описание источника потока диссоциированных молекул CERA-RHD и результаты его тестирования

В генераторе потока диссоциированных молекул CERA-RHD (рис. 3) плазма создается в кварцевой трубе 1, расположенной в СВЧ 2 коаксиального резонатора ($Q \approx 300$). Плоские постоянные магниты 3 формируют поперечное магнитное поле, обеспечивающее условие ЭЦР в области разряда. Как и ранее, в работе использовали магнетронный генератор М-107, работающий в непрерывном режиме на частоте $f = 2,47$ ГГц.

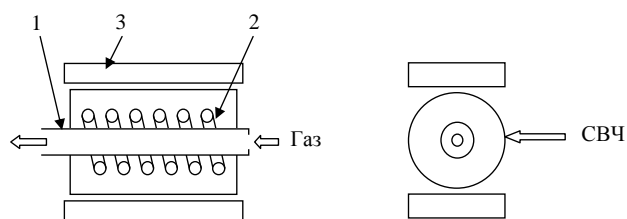


Рис. 3. Схема источника потока диссоциированных молекул CERA-RHD

Было установлено, что источник устойчиво работает в диапазоне давлений рабочего газа (водород) $P_g = (1-8) \cdot 10^{-3}$ Торр при поступающей в него СВЧ-мощности $P \geq 30$ Вт, а также замечено отсутствие влияния на КСВ системы со стороны генерируемой в ней плазмы.

Измерения параметров потока диссоциированных молекул не проводились, однако тестовые испытания показали, что обработка фотопреобразователей на основе поликристаллического кремния (Poly-Si) потоком атомарного водорода приводит к результатам, полученным ранее на аналогичных образцах и в тех же условиях (давление водорода в системе, температура обрабатываемого образца, время обработки) с использованием источников CERA-C и CERA-L [8], которые показывают возможность повышения их энергетической эффективности на 40 % относительно исходной величины.

В связи с этим предполагается, что плотность потока атомарного водорода, формируемого в ЭЦР-источнике плазмы CERA-RHD, сравнима с величиной, достигнутой в ранее созданных системах, и составляет $\approx 10^{18}$ ат/(см²·с).

Заключение

Результаты исследований показывают, что на основе коаксиальных резонаторов с СВЧ могут быть созданы компактные ЭЦР-источники потоков плазмы и диссоциированных молекул, возможность широкого использования которых в научных исследованиях и в практических целях определяется их исключительной простотой в изготовлении, низкой себестоимостью, высокой надежностью в работе, возможностью использовать СВЧ-генераторы низкой мощности, а также высокой энергетической и газовой эффективностью.

Предполагается, что на основе источника потока плазмы CERA-RHI может быть создан компактный двигатель коррекции орбит легких космических аппаратов с параметрами, превосходящими параметры двигателей, описанных в работах [3, 4], а на основе генератора диссоциированных молекул CERA-RHD — генератор отрицательных ионов водорода (дейтерия). В настоящее время начаты работы по созданию на основе источника рентгеновского излучения CERA-RX [9], в котором центральный электрод резонатора будет выполнен в виде спиральной волноводной структуры — генератора многозарядных ионов с системой экстракции частиц, аналогичной предложенной в работе [7] и реализованной в CERA-RHI.

Литература

1. *Asmussen J.*: Proc. Int. Workshop "Microwave plasma and its applications". — Russia. Zvenigorod, 1994. P. 52.
2. *Musil J.*: Ibid. P. 318.
3. *Naoji Yamamoto, Shinya Kondo, Takayasu Kanagawa et al.*: Proc. VI Int. Conf. "Microwave discharge: fundamentals and applications". — Russia. Zvenigorod, 2006. P. 211.
4. *Балмашинов А. А., Калашиников А. В.*// Прикладная физика. 2007. № 6. С. 99.
5. *Балмашинов А. А., Чечуй Д. С., Якушин В. П.*// Там же. 1999. № 5. С. 140.
6. *Балмашинов А. А., Чечуй Д. С.*// Там же. 2001. № 3. С. 23.
7. *Андреев В. В., Балмашинов А. А., Умнов А. М.*// Там же. С. 28.
8. *Балмашинов А. А.*: Тр. 1-й конф. по инновационной деятельности. — М., 2005. С. 92.
9. *Андреев В. В., Балмашинов А. А., Калашиников А. В., Умнов А. М.*// Прикладная физика. 2006. № 6. С. 80.

Статья поступила в редакцию 16 июля 2008 г.

ECR-plasma sources based on coaxial resonators with helical wave structure

A. A. Balmashnov, A. V. Kalashnikov

People's Friendship University of Russia, Moscow, Russia

The coaxial resonators with helical wave structure of inner electrode are used to form plasma flow (CERA-RHI), as well as dissociated molecular flow (CERA-RHD). It has been found experimentally that total ion current in CERA-RHI could reach 60 mA under 50 W microwave power (2.47 GHz) and that density of hydrogen atomic flow in CERA-RHD was about $10^{18} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. We suppose that these types of sources can be used to scientific investigations, to discharge ion thruster for small satellite propulsion system and to negative ions as well as multicharge ions sources.

PACS: 52.80.Pi

УДК 533.9

Увеличение предельного тока магнетронного разряда с помощью магнитоизоляции секционированного анода

A. A. Бизюков, К. Н. Серeda

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, г. Харьков, Украина

В. В. Слепцов

Российский государственный технический университет им. К. Э. Циолковского (МАТИ), Москва, Россия

В магнетронном разряде при токах выше критического, величина которого лежит в пределах 15—30 А, происходит переход из тлеющего разряда в поперечном магнитном поле в дуговой. В настоящее время проблема дугогашения решается за счет применения импульсных и ВЧ-источников питания. В настоящей работе предложен альтернативный метод увеличения предельного тока магнетронного разряда за счет увеличения сопротивления разрядного промежутка с помощью дополнительного прианодного поперечного магнитного поля и прерывания тока дуги с использованием секционирования токоприемной поверхности анода.

PACS: 52.80.-s

Введение

В различных отраслях науки и техники широко используются вакуумно-плазменные технологии получения покрытий на поверхности материалов. В вакуумно-плазменных технологических процессах осаждения тонких пленок наряду с другими методами широко применяется метод магнетронного распыления [1]. Максимальная производительность такого метода пропорциональна максимальному току магнетронного разряда. Вместе с тем в магнетронных распылительных системах (МРС) с разрядом на постоянном токе при токах выше некоторого критического значения происходит переход из тлеющего разряда в поперечном

магнитном поле (магнетронного) в дуговой, и процесс эрозии мишени изменяет свой характер.

Характерная особенность дугового разряда — наличие на катодной поверхности МРС быстропеременяющихся катодных пятен [2]. Эрозия поверхности катода вакуумной дуги под воздействием катодного пятна обуславливает генерацию “катодного факела” — сверхзвуковой струи частично ионизированного материала катода в паробразном и капельном состояниях с высокой проводимостью [3—5], которая “закорачивает” разрядный промежуток. Так как блоки электропитания МРС постоянного тока не предназначены для поддержания дугового режима разряда (разрядных токов 100 А и более), то это приводит к их