

УДК 533.9.07

Формирование ЭЦР-плазмы в диэлектрическом плазмопроводе при реализации условия самовозбуждения стоячей ионно-звуковой волны

А. А. Балмашинов, А. В. Калашников, В. В. Калашников, С. П. Степина, А. М. Умнов

Экспериментально установлено, что в диэлектрическом плазмопроводе при ЭЦР-разряде и в условиях реализации возбуждения стоячей ионно-звуковой волны формируется пространственно локализованное плазменное образование с высокой яркостью свечения. На основе полученных результатов делается вывод о возможности создания компактных источников интенсивного излучения, спектр которых определяется типом рабочего газа или смеси газов, источников интенсивных потоков химически-активных частиц, а также источника плазмы для двигателя коррекции орбит легких космических аппаратов.

PACS: 52.40.Db, 52.50.Dg, 52.80.Pi

Ключевые слова: плазма, электронный циклотронный резонанс, ЭЦР, ионно-звуковая волна, коаксиальный резонатор.

Введение

Постоянный интерес к СВЧ-плазме [1—4] обусловлен возможностью ее широкого практического использования в области плазмохимии, полупроводниковых технологий и космической техники. При этом особое внимание уделяется источникам плазмы на основе электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) ввиду их высокой энергетической эффективности, обусловленной резонансным механизмом взаимодействия электромагнитного поля с электронами. Возможность их практического использования стимулирует работы по разработке и созданию такого типа устройств.

Для ряда случаев практического использования является необходимым создание ЭЦР-плазмы высокой концентрации, превышающей критическое значение, соответствующее используемой

частоте СВЧ-поля. Как правило, этого достигают путем повышения СВЧ-мощности, вводимой в систему, или реализацией режима, соответствующего распространению в плазме вистлера: $\omega_{ce} > \omega_0$, где ω_{ce} — циклотронная частота электрона, ω_0 — частота СВЧ-поля.

Альтернативный метод создания плазмы с концентрацией частиц, превышающей критическое значение, заключается в реализации условия, при котором в плазменном столбе за счет действия СВЧ-поля возбуждается ионно-звуковая волна, фазовая скорость которой не зависит от плотности заряженных частиц, а определяется температурой электронов и типом рабочего газа. В этом случае наработка плазмы высокой концентрации осуществляется полем именно этой волны. В работе [5] было показано, что этот механизм формирования плазмы позволяет получить концентрацию частиц, более чем в 7 раз превышающую критическое значение. При этом одним из преимуществ данного метода формирования плазмы является то, что возбуждение ионно-звуковой волны реализуется при уровне магнитного поля, соответствующего условию $\omega_{ce} \geq 0,5\omega_0$, что позволяет одновременно значительно улучшить масс-габаритные параметры источника.

Цель данной работы заключается в изучении возможности создания плазмы с высокой концентрацией частиц в источнике ЭЦР-плазмы, описанном ранее в работе [6], путем реализации условий для возбуждения стоячей ионно-звуковой волны.

Балмашинов Александр Александрович, профессор.
 Калашников Андрей Владимирович, научный сотрудник.
 Калашников Владимир Владимирович, научный сотрудник.
 Степина Светлана Петровна, доцент.
 Умнов Анатолий Михайлович, доцент.
 Российский университет дружбы народов (РУДН).
 Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.
 Тел. 8 (495) 955-09-23.
 E-mail: abalmashnov@ Rambler.ru

Статья поступила в редакцию 14 марта 2016 г.

© Балмашинов А. А., Калашников А. В., Калашников В. В., Степина С. П., Умнов А. М., 2016

Постановка задачи и метод ее решения

Формирование ЭЦР-плазмы с концентрацией, превышающей критическое значение, представляет значительный практический интерес ввиду возможности ее широкого использования, в частности, для создания малогабаритных источников излучения, в области плазмохимии, в космической отрасли и т. д. В связи с этим нами были проведены экспериментальные исследования по изучению возможности формирования такой плазмы в цилиндрической диэлектрической камере малого диаметра.

Схема источника плазмы представлена на рис. 1. Он состоит из цилиндрического коаксиального резонатора, центральным электродом которого является СВЧ-индуктор протяженностью 2,7 см (1). Соосно индуктору располагается цилиндрическая разрядная камера (2) (кварцевое стекло, диаметр 0,9 см). Цилиндрический корпус (3) коаксиального резонатора (внутренний диаметр 3,0 см) снабжен подвижным поршнем (4), позволяющим осуществлять его настройку на частоту СВЧ-

генератора. В работе использовался магнетронный генератор М-107 ($f_0 = 2,45$ ГГц), в качестве рабочего газа — аргон и воздух. Поступающая и отраженная СВЧ-мощности измерялись прибором Я2М-66 с использованием направленного ответвителя. Давление в камере откачки регистрировалось традиционным методом. Коэффициент стоячей волны (КСВ) системы «СВЧ-генератор—резонатор» как в присутствии, так и при отсутствии плазмы практически не менялся и не превышал 1,1. Магнитное поле создавалось кольцеобразными постоянными магнитами (5), способными перемещаться в продольном направлении. Продольный профиль магнитного поля представлен на рис. 1.

В работе также использовались двойной электрический зонд и фотодетектор VISHAY, BPW21R (420—675 нм). Измерение СВЧ-поля в резонаторе осуществлялось штыревой антенной, сигналы с которой регистрировались цифровым осциллографом INSTEK GOS-620 и анализатором спектра Tektronix RSA 6114A.

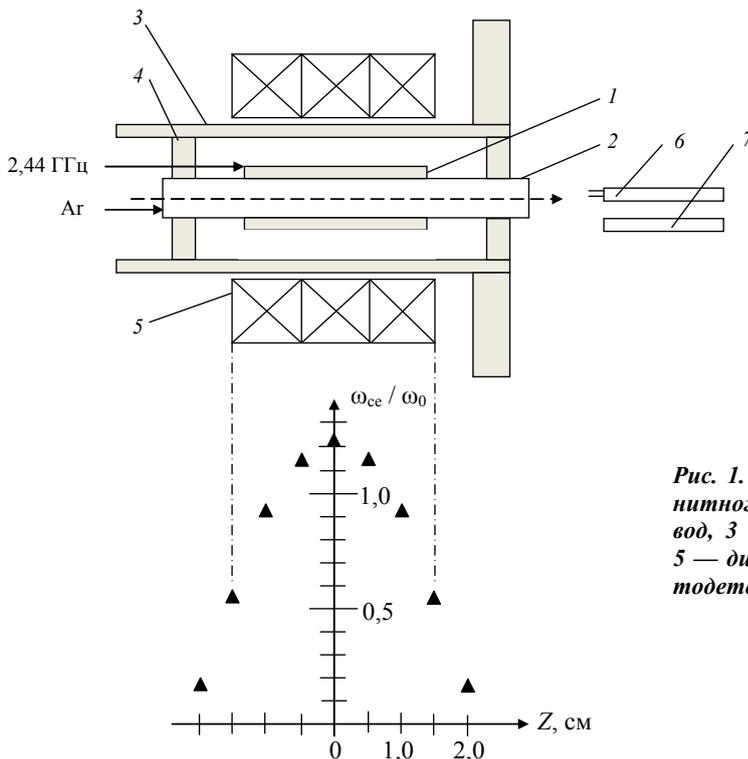


Рис. 1. Схема источника плазмы (вверху) и профиль магнитного поля (внизу). 1 — СВЧ-индуктор, 2 — плазмопровод, 3 — корпус резонатора, 4 — подвижный поршень, 5 — дискообразные магниты, 6 — двойной зонд, 7 — фотодетектор.

Полученные результаты и их обсуждение

Экспериментально было установлено, что при давлении в системе $P = (2-4) \cdot 10^{-4}$ Торр и СВЧ-мощности, поступающей от генератора, 14 Вт и более в разрядной камере происходит устойчивый поджиг плазмы вне зависимости от типа рабочего газа.

При отсутствии симметрии между профилем магнитного поля и индуктором сигналы с СВЧ-антенны и с электрического зонда сильно зашумлены, а температура электронной компоненты плазмы, измеряемая в области $Z = 2,5$ см, составляет 15 ± 3 эВ.

При изменении положения магнитов и достижении симметрии элементов системы регистрируется более чем в десять раз уменьшение ионного

тока насыщения в цепи двойного и более чем в 7 раз увеличение сигнала с фотодетектора, а также возникновение пространственно-локализованного плазменного образования. Сигналы с СВЧ-антенны и с зонда приобретают периодический характер (рис. 2). Период колебаний T существенно зависит от типа рабочего газа ($T_{Ar} = 2,4 \pm 0,2$ мкс, $T_{воз} = 1,4 \pm 0,2$ мкс.) и незначительно от величины вводимой СВЧ-мощности, изменяемой в диапазоне 14—30 Вт. Глубина модуляции СВЧ-поля в резонаторе может достигать 45 %. При этом в спектре колебаний СВЧ-поля в резонаторе возникают синие и красные сателлиты основной частоты (рис. 3), расстояние между которыми с достаточной степенью точности можно считать обратно пропорциональными регистрируемыми периодам колебаний.

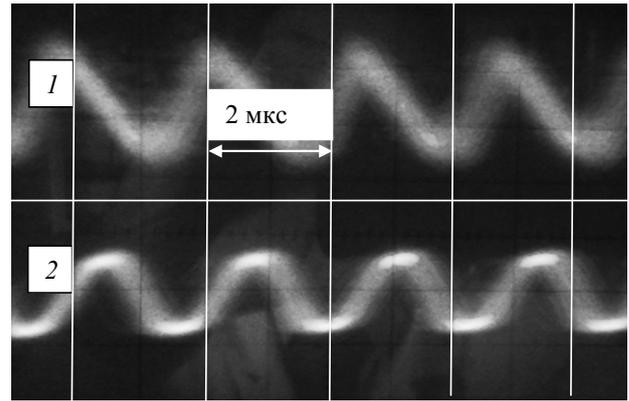


Рис. 2. СВЧ-сигнал из резонатора (1) и с электрического зонда (2). Рабочий газ аргон, давление в системе $P = 3,5 \cdot 10^{-4}$ Торр, вводимая в резонатор СВЧ-мощность $P_{СВЧ} = 15$ Вт.

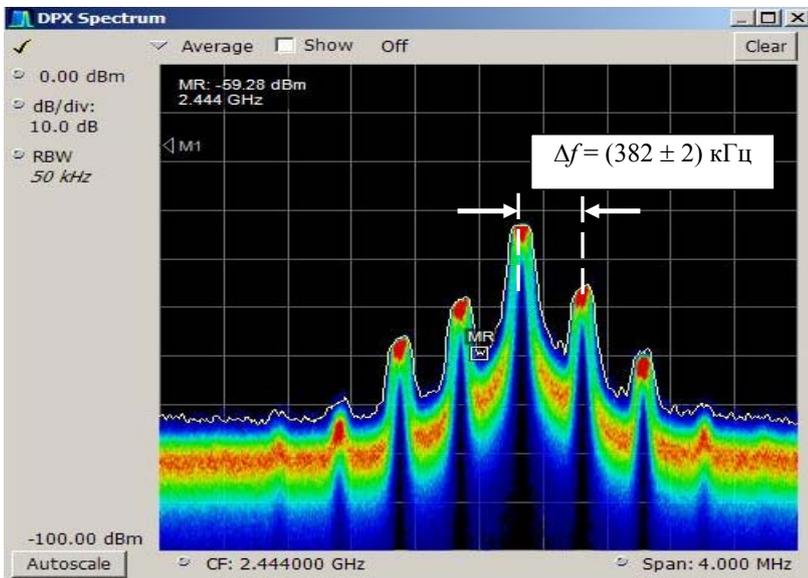


Рис. 3. Спектр СВЧ-колебаний в резонаторе. Рабочий газ — аргон, давление в системе $P = 3,5 \cdot 10^{-4}$ Торр, вводимая в резонатор СВЧ-мощность $P_{СВЧ} = 15$ Вт.

Представленные результаты экспериментального исследования позволяют предположить, что в условиях проводимых экспериментов реализуется механизм формирования плазмы, описанный ранее в [5] и заключающийся в том, что в области $\omega_{ce} \geq 0,5\omega_0$ ($\omega_0 = 2\pi f_0$) происходит трансформация электромагнитной волны в верхнегибридную, которая распадается на новую верхнегибридную волну и ионно-звуковую, частота которой определяется ее фазовой скоростью и геометрическими размерами системы. Новая верхнегибридная волна также подвергается распаду с образованием ионно-звуковой волны, т. е. возникает цепочка распадных процессов. Одновременно с процессами распада идут процессы слияния. Следствием процессов распада и слияния является формирование красных и синих сателлитов основной частоты, отстоящих друг от друга на величину, соответствующую частоте ионно-звуковых колебаний.

В изучаемой системе симметричное расположение постоянных магнитов и СВЧ-индуктора определяет симметрию областей трансформации волн и процессов их распада. При этом расстояние между этими областями является фактором, определяющим пространственный масштаб колебаний — длину ионно-звуковой волны. Действительно, при разряде в аргоне $T_e = 15 \pm 2$ эВ, фазовая скорость ионно-звуковой волны составляет $V_\phi = (1,1 \pm 0,2) \cdot 10^6$ см/с и соответствующая частоте $f_s = 382 \pm 2$ кГц ($1/T_{Ar} = 420 \pm 30$ кГц) длина волны равна $\lambda_s \approx 2,8$ см, т. е. величине, примерно равной расстоянию между областями трансформации волн.

Таким образом, можно сделать вывод, что при симметрии профиля магнитного поля относительно СВЧ-индуктора в области с $\omega_{ce} \geq 0,5\omega_0$ формируется стоячая ионно-звуковая волна. Предполагаем, что в этих условиях, как было установлено ранее [5], концентрация частиц плазмы

может значительно превышать критическое значение, соответствующее используемой частоте СВЧ-поля.

Заключение

Экспериментально установлено, что в исследуемом источнике плазмы, т. е. в диэлектрическом плазмопроводе при ЭЦР-разряде, в условиях симметрии профиля магнитного поля и СВЧ-индуктора при давлении в системе $P = (3-5) \cdot 10^{-4}$ Торр (рабочий газ — аргон) и СВЧ-мощности $P_{\text{СВЧ}} = 15$ Вт в области, протяженностью 2,5—3,0 см, соответствующей $\omega_{\text{се}} \geq 0,5\omega_0$, формируется пространственно локализованное плазменное образование. При этом в плазме и в резонаторе источника регистрируются регулярные колебания, а в спектре СВЧ-колебаний наличие красных и синих сателлитов основной частоты. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что в условиях экспериментов в механизме формирования плазмы участвует стоячая ионно-звуковая волна, возникающая в областях трансформации электромагнитной волны в верхнегибридную с последующим ее распадом на новую верхнегибридную и ионно-звуковую волны.

Результаты работы могут представлять практический интерес ввиду возможности их использования для создания компактного СВЧ-генератора излучения, спектр которого определяется типом рабочего газа (смеси газов), содержащегося в диэлектрической колбе, источника потоков химически-активных частиц путем продувки рабочего газа через плазму с высокой степенью концентрации электронов [6], а также источника плазмы для двигателя коррекции орбит легких космических аппаратов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Труды VII Международного симпозиума по теоретической и прикладной плазмохимии. — Плещ. 2014.
2. Бордусов С. В. Плазменные СВЧ-технологии в производстве изделий электронной техники. — Мн.: Бест-принт, 2002.
3. Proceedings of the 33rd International Electric Propulsion Conference (IEPC-2013). — Washington, D.C. USA, 2013.
4. Proceedings of the 9th International Workshop on Microwave Discharge: Fundamentals and Applications. — Cardoba, Spain, 2015.
5. Balmashnov A. A., Golovanivske K. S., Kamps E. / Proc. International Conference on Plasma Physics — Kiev. 1987. Vol. 2. P. 239.
6. Балмашинов А. А., Калашников А. В. // Прикладная физика. 2008. № 6. С. 93.

Formation of the ECR plasma in a dielectric plasma conduit under condition of self-excitation of a standing ion-acoustic wave

A. A. Balmashnov, A. V. Kalashnikov, V. V. Kalashnikov, S. P. Stepina, and A. M. Umnov

People' Friendship University of Russia
6 Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russia
E-mail: abalmashnov@sci.pfu.edu.ru

Received March 14, 2016

It was established experimentally that in the dielectric plasma conduit under the ECR discharge at the condition of excitation of a standing ion-acoustic wave, a spatially localized plasma formation with high brightness is formed. On the basis of the obtained results, we can conclude that there is a possibility of creation of compact sources of intense radiation, whose spectrum is determined by the type of working gas or mixture of gases. These devices can be used as sources of intense flows of chemically-active particles and a plasma source for the engine correction of the orbit of light spacecraft.

PACS: 52.50.Sw, 52.40.Db, 52.80.Pi

Keywords: plasma, electron cyclotron resonance, ion-acoustic wave, coaxial resonator.

REFERENCES

1. Proceedings of the VII International Symposium on Theoretical and Applied Plasma Chemistry (Plios. 2014).
2. S. V. Bordusov, Microwave plasma technology in the manufacture of electric devices (Minsk, 2002) [in Russian].
3. Proceedings of the 33rd International Electric Propulsion Conference (IEPC-2013. Washington, D.C. USA).
4. Proceedings of the 9th International Workshop on Microwave Discharge: Fundamentals and Applications. (Cardoba, Spain, 2015).
5. A. A. Balmashnov, K. S. Golovanivske, and E. Kamps, in Proc. International Conference on Plasma Physics (ICPP, Kiev, 1987). Vol. 2. P. 239–242.
6. A. A. Balmashnov and A. V. Kalashnikov, Prikladnaya Fizika, No. 6, 93 (2008).