

УДК 533.9

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР ИОНОВ, УСКОРЯЕМЫХ В ДВОЙНОМ СЛОЕ, ФОРМИРУЕМОМ НА ЭЛЕКТРОННОМ ПЛАЗМЕННОМ РЕЗОНАНСЕ

А. А. Балмашнов, Д. С. Чечуй, В. П. Якушин

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

E-mail: abalmashnov@mх.pfu.edu.ru

Дано краткое описание микроволнового источника плазмы CERA-V и представлены результаты экспериментального исследования зависимости энергетического спектра ускоренных ионов от градиента концентрации плазмы в области формирования двойного слоя. Сделан вывод о возможности использования в CERA-V SmCo₆ магнитов, что существенно улучшит его параметры как двигателя космических аппаратов.

Продолжены работы по изучению механизма ускорения ионной компоненты плазмы в двойном слое, возникающем вследствие синфазных колебаний элек-

тронов, возбуждаемых в узком слое плазмы с продольным градиентом плотности частиц в условиях электронного плазменного резонанса.

Данная работа представляет определенный практический интерес:

изучаемый механизм может являться причиной аномально больших потерь частиц в открытых системах;

этот механизм реализован в устройствах CERA-V [1] и CERA-VN [2], которые уже в настоящее время могут быть использованы в ряде вакуумно-плазменных технологий, в частности, в технологии модификации электрооптических характеристик полупроводниковых приборов, в процессе молекулярно-пучковой эпитаксии;

CERA-V может служить основой для создания двигателей коррекции орбит летательных аппаратов. Это утверждение основывается на экспериментальных исследованиях параметров плазменного потока, формируемого в микроволновом источнике плазмы CERA-V, которые показали, что максимальные значения токов и энергий ионов практически не зависят от типа рабочего газа (водород, азот, аргон) и составляют (0,3 – 0,4) А и ≈ 300 эВ соответственно при давлении в рабочем объеме (4 – 8) · 10⁻⁴ торр. Это послужило основанием для проведения оценочных расчетов параметров CERA-V как двигателя, работающего на ксеноне [3].

Технические характеристики двигателей

	RITA-15	RITA-25	CERA-V
Сила тяги, мН	15	25	8,6 – 11,5
Диаметр потока, см	10	10	6
Энергия частиц, эВ	1500	1200	300
Потребляемая мощность, Вт	530	780	≤ 400
Масса ВЧ (СВЧ)-генератора, кг	—	5	1
Расход газа, кг/с	—	—	(6–12) · 10 ⁻⁷
Энергетическая эффективность, кВт/Н	35	31	35–47

Из представленных данных видно, что по ряду параметров CERA-V уступает двигателям серии RITA, однако преимущества CERA-V заключаются в отсутствии ускоряющих ионную компоненту плазмы электродов (повышение временного ресурса двигателя) и в использовании резонансного механизма формирования плазмы (путь повышения КПД).

Микроволновый источник плазмы CERA-V состоит из цилиндрического двухмодового резонатора (TE₁₁₁, E₀₁₀), возбуждаемого (данная серия экспериментов) двумя магнетронными генераторами мощностью по 800 Вт каждый (M105), работающими на частоте $f = \omega/2\pi = 2,45$ ГГц в непрерывном режиме. Возбуждение TE₁₁₁-моды осуществляется штыревой антенной, E₀₁₀-моды — петлевой.

Резонатор помещен в продольное стационарное пространственно неоднородное магнитное поле, создаваемое электромагнитом. При проведении данных экспериментов был использован дополнительный соленоид, позволяющий варьировать градиент магнитного поля. Разрядная камера диаметром 6 см располагается аксиально резонатору. Одной стороной разрядная камера соединяется с вакуумным объемом, давление в котором может достигать 2 · 10⁻⁵ торр. Напуск рабочего газа (аргона) осуществлялся в область разрядной камеры, расположенной вблизи электромагнита. Для диагностики параметров плазмы использовались: лэнгмюровский зонд, высокочастотный зонд, способный перемещаться вдоль плазменного столба, и электростатический анализатор с углом поворота $\pi/2$.

Активная часть высокочастотного зонда представляла собой пластину диаметром 2 мм, ориентированную перпендикулярно плазменному потоку. Сигнал с

зонда поступал на петлевую антенну возбуждения высокочастотного резонатора (TE_{111}), настроенного на частоту поля возбуждения E_{010} -моды, потенциал на котором относительно корпуса установки мог варьироваться. Поле в этом резонаторе регистрировалось штыревой антенной. Конструкция высокочастотного зонда и используемая схема позволили регистрировать синфазные электронные колебания. Его чувствительность зависела от приложенного к нему потенциала. Ленгмюровский зонд использовался для измерений распределения плотности плазмы вдоль оси плазменного столба. В связи с тем, что точность зондовых измерений достаточно мала, была проведена его калибровка с использованием 9-мм интерферометра.

Поджиг плазмы осуществлялся в условиях электронного циклотронного резонанса, реализуемого вблизи электромагнита. Уменьшение величины магнитного поля приводило к ряду описанных ранее процессов [4], сопровождающихся ростом концентрации плазмы до сверхкритических значений $n > n_{кр}$, где $n_{кр} = m\omega^2 / 4\pi e^2$; m , e — масса и заряд электрона, соответственно.

С помощью подвижного ленгмюровского зонда экспериментально были получены продольные распределения плотности плазмы в области двухмодового резонатора для различных величин и градиентов магнитного поля. Давление рабочего газа в системе (аргон) и СВЧ-мощность, поступающая в TE_{111} -моду, составляли $8 \cdot 10^{-4}$ торр, 300 Вт, соответственно. E_{010} -мода не возбуждалась. В процессе измерений использовался дополнительный одиночный зонд, расположенный вблизи оси плазменного потока вне резонатора, который служил для регистрации возмущений параметров плазмы подвижным зондом. Представленные ниже результаты соответствуют режимам, при которых возмущения не регистрировались. В условиях возбуждения E_{010} -моды (300 Вт) с помощью электростатического анализатора были получены зависимости энергетического спектра ионов от величин и градиентов магнитного поля, а с помощью высокочастотного зонда установлено, что возникновение потока ускоренных ионов однозначно связано с возникновением синфазных электронных плазменных колебаний.

На рисунке представлены результаты проведенных измерений, позволяющие сопоставить невозмущенные образованием двойного слоя распределения концентрации плазмы в области резонатора и энергетический спектр ионной компоненты.

Это сопоставление показывает, что:

ускоренные ионы регистрируются только в случае реализации условий для формирования плазмы со сверхкритической концентрацией частиц и при градиенте концентрации частиц плазмы, превышающем некоторое значение;

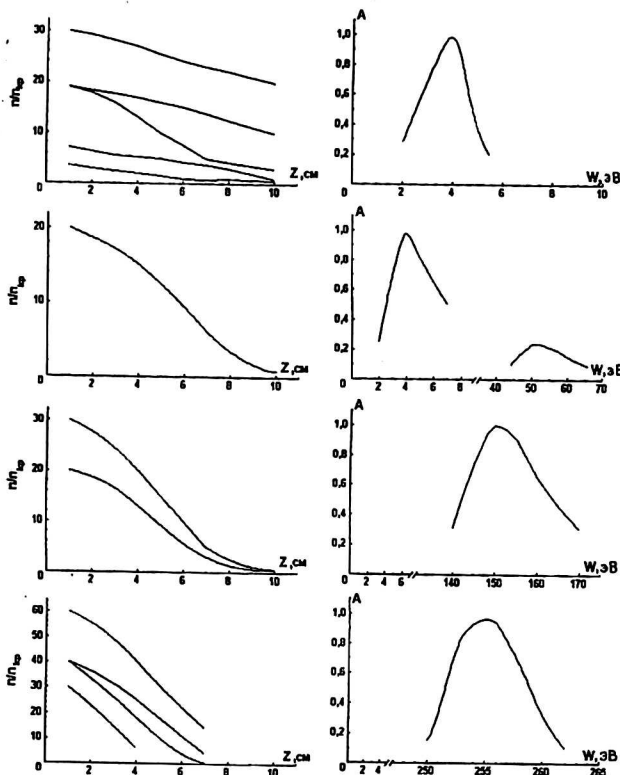
увеличение градиента концентрации частиц плазмы в области формирования двойного слоя ведет к сужению энергетического спектра ионов, смещению его в сторону больших значений и к росту величины ионного тока;

наличие градиента концентрации плазмы, начиная с которого дальнейшего изменения в энергетическом спектре ионов не наблюдается, при этом увеличение мощности, поступающей в E_{010} -моду (до 350 Вт), не сопровождается увеличением ионного тока;

минимальная ширина энергетического спектра ускоренных ионов превышает более чем в два раза ширину спектра ионов в условиях отсутствия их ускорения.

Факт уширения энергетического спектра ионной компоненты плазмы может быть объяснен в рамках приближенного описания процесса формирования двойного слоя уравнениями гидродинамики [5], решение которых для напряженности электрического поля в области нахождения слоя E_c имеет вид:

Распределение концентрации плазмы вдоль оси разрядной камеры и соответствующие им спектры продольных энергий ионов



$$E_c = \frac{E_0}{1 - b^2} \cos(\omega t + \varphi) + C_1 \sin(\Omega t + \varphi / b) + C_2 \cos(\Omega t + \varphi / b),$$

где E_0 — амплитудное значение напряженности электрического поля E_{010} -моды;

Ω — электронная плазменная частота;

$b = \omega/\Omega$, v_{e0} — начальная скорость электронов;

φ — начальная фаза взаимодействия.

Константы C_1 и C_2 могут быть найдены из системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{E_0}{1 - b^2} \cos \varphi + C_1 \sin(\varphi / b) + C_2 \cos(\varphi / b) = 0; \\ \frac{v_{e0} m \Omega}{e} + \frac{E_0 b}{1 - b^2} \sin \varphi - C_1 \cos(\varphi / b) + C_2 \sin(\varphi / b) = 0. \end{cases}$$

Не нарушая общности задачи, полагаем $\varphi = 0$.

Тогда имеем:

$$E_c = \frac{E_0}{1 - b^2} (\cos \omega t - \cos \Omega t) + \frac{v_{e0} m \Omega}{e} \sin \Omega t;$$

$$x_c = -\frac{e E_0 b^2}{m \omega^2 (1 - b^2)} (\cos \Omega t - \cos \omega t) + \frac{v_{e0}}{\Omega} \sin \Omega t + x_0,$$

где x_c — координата пульсирующего слоя электронов.

Решение уравнения движения иона в области $0 < x < x_c^{\max}$ показывает, что ширина ионного спектра энергий определяется числом ускоряющих ион pulsa-

ций E_c -поля, которое он испытывает, находясь в двойном слое, фазой пульсации слоя в момент начала взаимодействия и исходной функцией распределения ионов по энергиям.

Таким образом, из представленных результатов следует, что при определенных условиях электрическое поле E_{010} -моды способно формировать в плазме устойчивую структуру в виде квазистационарного двойного слоя (синфазные электронные плазменные колебания), полем которого ускоряется ионная компонента плазмы. Ширина энергетического спектра ускоренных в CERA-V ионов не может быть менее удвоенного значения их начального спектра.

Предполагается, что использование в CERA-V постоянных магнитов (SmCo_6) не приведет к изменению характеристик формируемого в нем плазменного потока, уменьшит его массу (масса RITA-25 — 7 кг, масса CERA-V без электромагнита — менее 2,5 кг), энергопотребление и габаритные размеры улучшат его параметры как двигателя космических аппаратов.

Л и т е р а т у р а

1. Balmashnov A. A. //JVST, 1996. V. 14. P. 471.
2. Балмашнов А. А.: Труды конф. ПФФ-96. — Саратов, 1996. С. 90.
3. RITA The ion Propulsion System for the Future. Daimler-Benz Aerospace AG Space Infrastructure. Henning von Bassewitz. P.O.Box 80 11 68, 81663, Munchen.
4. Balmashnov A. A., Golovanivsky K. S., Kamps E.: Proc. ICPP. — Kiev, 1987. P. 239.
5. Балмашнов А. А., Чечуй Д. С., Якушин В. П.: Труды конф. ФНТП-98. — Петрозаводск, 1998. С. 507.

*Работа поддерживается грантом Министерства образования
Российской Федерации.*

THE ENERGETIC SPECTRUM OF IONS ACCELERATED IN THE DOUBLE LAYER CREATED UNDER ELECTRON PLASMA RESONANCE

A. A. Balmashnov, D. S. Chechuy, V. P. Yakushin

Russian Peoples' Friendship University, Moscow, Russia
E-mail: abalmashnov@mx.pfu.edu.ru

A short description of the microwave plasma source CERA-V and the results of the experimental investigations of ion energetic spectrum dependence on the charge particle gradient in the region of double layer creation are presented. The conclusion about the possibility of SmCo_6 -magnets use in CERA-V is made that improves its parameters as a spaceship engine.