

tion theory allows evaluating breakdown threshold as appearance of cluster overlapping the discharge gap, evaluating speed of plasma object propagation and also evaluating its topological features. Comparison of calculated and experimental data has been represented.

PACS: 52.80.Mg

УДК 533.951: 537.533.7

О возможности использования нормального эффекта Доплера при реализации плазменного релятивистского СВЧ-усилителя в диапазоне частот 2—3 ГГц

И. Л. Богданкевич, И. Е. Иванов, А. А. Рухадзе, П. С. Стрелков

Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН (ИОФ РАН), Москва, Россия

В. П. Тараканов

Институт теплофизики экстремальных состояний РАН (ИТЭС), Москва, Россия

Рассмотрена возможность использования нормального эффекта Доплера для подавления обратной связи в конечной плазменно-пучковой системе. Приведены результаты численного моделирования, полученные с использованием нестационарного электродинамического вычислительного кода КАРАТ и результаты физического эксперимента для СВЧ-усилителя в диапазоне частот 2—3 ГГц.

PACS: 52.35.Hr; 52.35.Qz

Введение

При построении усилителя надо подавить положительную обратную связь, обусловленную отражением волн от границ системы. Эта проблема особенно остро стоит для систем с большим коэффициентом усиления, каковыми являются плазменные релятивистские приборы черенковского типа. В большинстве случаев в релятивистской плазменной СВЧ-электронике для подавления обратной связи применяется СВЧ-поглотитель [1, 2]. Моделирование этой ситуации рассмотрено в работе [3].

В данной работе приведен другой механизм подавления обратной связи, без использования СВЧ-поглотителя. В ИОФ РАН создана установка плазменного релятивистского усилителя в диапазоне частот 2—3 ГГц [4]. Как в условиях физического эксперимента, так и в численном моделировании при реализации такого режима возникают особенности по сравнению с более высокочастотным усилителем.

Рассмотрим схему дисперсионных кривых плазменных и пучковых волн, приведенную на рис. 1. Эффект Черенкова считается основным механизмом вынужденного излучения при прямолинейном распространении релятивистского электронного пучка (РЭП) в системах с плазменным

заполнением. В ограниченной по длине системе существуют две плазменные волны: попутная, распространяющаяся в направлении движения электронов ($k_z > 0$), и встречная ($k_z < 0$), возникающая из-за отражения от конца плазменного волновода.

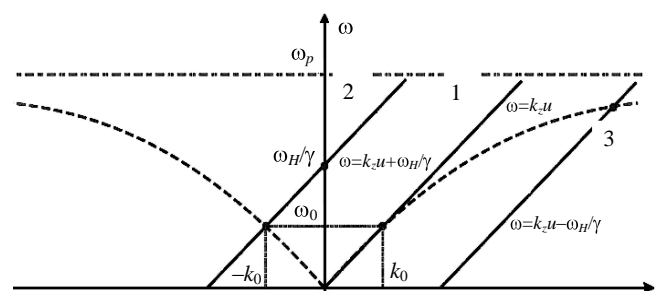


Рис. 1. Дисперсионные кривые:

----- — плазменных волн; 1 — волн пространственного заряда пучка; 2 — волн быстрой циклотронной волны; 3 — волн медленной циклотронной волны

Обе волны при $|k_z| \rightarrow \infty$ достигают значения частоты $\omega = \omega_p$, где ω_p — ленгмюровская частота электронов плазмы (см. рис. 1). В приближении $\omega_b < \omega$, где ω_b — ленгмюровская частота электронов пучка, волна пространственного заряда РЭП (см. рис. 1, кривая 1) удовлетворяет уравнению $\omega = k_z u$, u — скорость электронного пучка. При

взаимодействии попутной плазменной волны с волной пространственного заряда РЭП возникает черенковская неустойчивость на частоте $\omega = \omega_0 = k_0 u$. Оказывается, что величина внешнего магнитного поля не влияет значительно на механизм черенковского излучения и спектры излучаемых волн, но в конечном магнитном поле возникает еще один механизм вынужденного излучения — аномальный эффект Доплера [5]. Этот эффект возникает при взаимодействии плазменной волны с медленной (см. рис. 1, кривая 3) циклотронной пучковой волной, для которой справедливо соотношение $\omega = k_z u - n\omega_H/\gamma$, где n — номер циклотронной гармоники.

Кроме того, существует явление непропускания волн на частоте резонансного взаимодействия быстрой (см. рис. 1, кривая 2) циклотронной волны пучка и встречной плазменной волны при нормальном эффекте Доплера [6]. Плазменная волна, отраженная от торца плазменного волновода ($k_z < 0$), на частоте ω_0 будет иметь волновой вектор $k_z = -\omega_0/u$, т. е. $k_z = -k_0$. В пучке, помещенном в магнитное поле, может распространяться быстрая циклотронная волна $\omega = k_z u + n\omega_H/\gamma$. В точке резонанса $k_0 u = -k_0 u + n\omega_H/\gamma$ имеет место нормальный эффект Доплера. Условие резонанса имеет вид

$$\omega_0 = n\omega_H/2\gamma, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Аномальный эффект Доплера в большинстве экспериментов плазменной релятивистской электроники отчетливо не проявлялся и поэтому меньше рассматривался в численном моделировании, чем проявление нормального эффекта Доплера [7, 8]. Но при реализации плазменного релятивистского усилителя в диапазоне частот 2—3 ГГц в эксперименте [4] сочетание условий таково, что задача моделирования эффекта аномального Доплера становится актуальной. Исходя из оценок [5], частотные диапазоны генерации на черенковском резонансе и на аномальном эффекте Доплера сближаются. Обычно инкременты черенковской неустойчивости превосходят инкременты неустойчивостей при аномальном эффекте Доплера. Но для плазмы, плотность которой близка к порогу возникновения эффекта Черенкова, условие превышения инкремента, обусловленного аномальным эффектом Доплера, над черенковским инкрементом имеет вид [5]

$$\left(\gamma^5 \frac{\Delta_b r_b \omega_p \omega_b^2}{R^2 \Omega_e^3} \right)^{1/3} > 1,$$

где γ — энергия релятивистского электронного пучка;

Δ_b — толщина пучка;

r_b — средний радиус пучка;

R — радиус металлического волновода;

Ω_e — циклотронная частота.

Последнее неравенство может быть выполнено при малых внешних магнитных полях, используемых в эксперименте [4].

Допустим, что для подавления волны положительной обратной связи в полосе черенковской неустойчивости применен механизм нормального эффекта Доплера. Резонансное поглощение волны обратной связи происходит при определенном значении ведущего магнитного поля. Остается открытым вопрос, будет ли при этом значении магнитного поля проявляться аномальный эффект Доплера (см. рис. 1).

Численное моделирование и сравнение с экспериментальными результатами

Для численного моделирования был применен нестационарный электромагнитный код КАРАТ. В данном случае использовалась аксиально-симметричная версия кода. Внутри счетной области для электромагнитных полей решаются уравнения Максвелла в конечных разностях с заданными граничными условиями. Для электронов пучка использовался метод крупных частиц (PIC-метод). Частицы движутся в соответствии с уравнениями движения в самосогласованном электромагнитном поле, определяемом из уравнений Максвелла с использованием зарядов и токов в качестве источников. Плазма описывается моделью среды с диэлектрической проницаемостью бесстолкновительной плазмы во внешнем магнитном поле. В моделировании использовались параметры экспериментальной установки. Радиус внешнего волновода $R = 4,9$ см, трубчатой плазмы $R_p = 1,9—2,1$ см, пучка $R_b = 1,7—1,9$ см, ток пучка 2 кА, энергия электронов 500 кэВ. Это было фиксировано. Изменялись длина системы, величина магнитного поля и плотность плазмы.

Для начала рассмотрим наиболее простой режим — генерации на небольшой длине (45 см). На рис. 2, а дана зависимость выходной мощности в режиме генерации от плотности плазмы при разных значениях индукции внешнего магнитного поля, на рис. 2, б — соответствующая частота излучения при тех же параметрах: точками изображены результаты моделирования, линией с крестиками — максимальная частота полосы черенковского резонанса по линейной теории. Выделяются две области: малой и большой плотности плазмы.

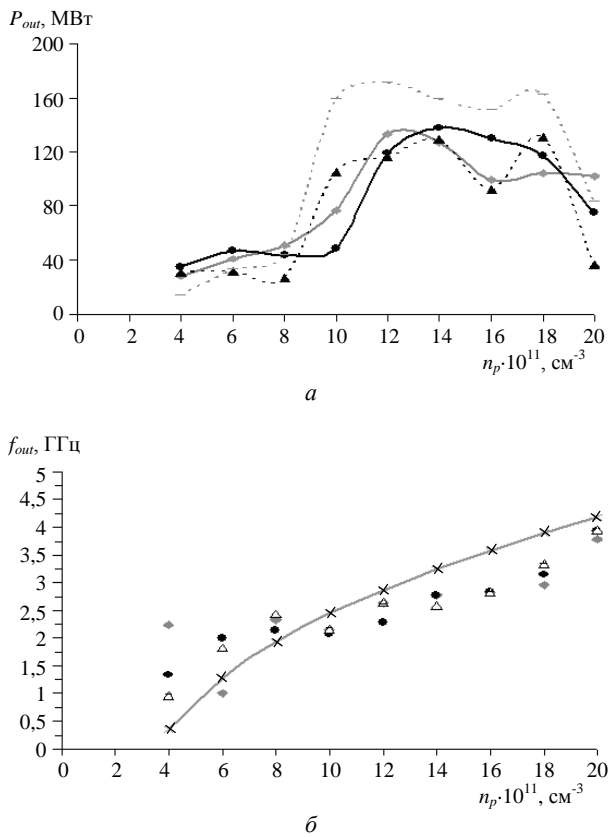


Рис. 2. Зависимость выходной мощности излучения в режиме генератора (а) и основной частоты генерации (б) от плотности плазмы при разных значениях индукции (Тл) внешнего магнитного поля:
 а: — \diamond — 0,3; \bullet — 0,4; \blacktriangle — 0,5; \times — 0,8;
 б: — \diamond — 0,3; \bullet — 0,4; \triangle — 0,5; — \times — 0,8;
 — \times — линейная теория

В интервале плотностей $(4-10) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ уровень выходной мощности меньше 60 МВт для всех значений ведущего магнитного поля. На рис. 2, б в этом интервале проявляются частоты, характерные для неустойчивости по аномальному эффекту Доплера. Спектры излучения приведены на рис. 3, а—г для обоих диапазонов плотности плазмы, индукция внешнего магнитного поля 0,4 Тл. В выходном рупоре значительно меняются структура и интенсивность спектра по сравнению с внутренней областью резонатора (см. рис. 3, а, б). Под резонатором в данном случае понимается область плазменного волновода, где происходит плазменно-пучковое взаимодействие. Внутренний спектр содержит диапазон частот, характерный для аномального эффекта Доплера. Это более высокочастотное излучение по сравнению с излучением, обусловленным черенковским механизмом, имеет меньшую групповую скорость (см. рис. 1) и больший коэффициент отражения на переходе: плазменный волновод — вакуумный волновод. В выходном рупоре проявляется только наиболее низкочастотный интервал. Черенковское излучение выходит с малыми потерями, но в данных условиях оно слабое по интенсивности. Для боль-

ших значений плотности плазмы спектр в выходном рупоре содержит только частоты черенковского излучения (см. рис. 3, в, г). В резонаторе проявление эффекта аномального Доплера слабее по сравнению с черенковской генерацией. В целом по двум интервалам наблюдается одновременно генерация на двух частотах с разными инкрементами и коэффициентами отражения от коллектора. Но при аномальном эффекте Доплера увеличивается поперечная энергия осцилляционного движения электронов пучка. На это расходуется энергия продольного движения, она же идет и на излучение.

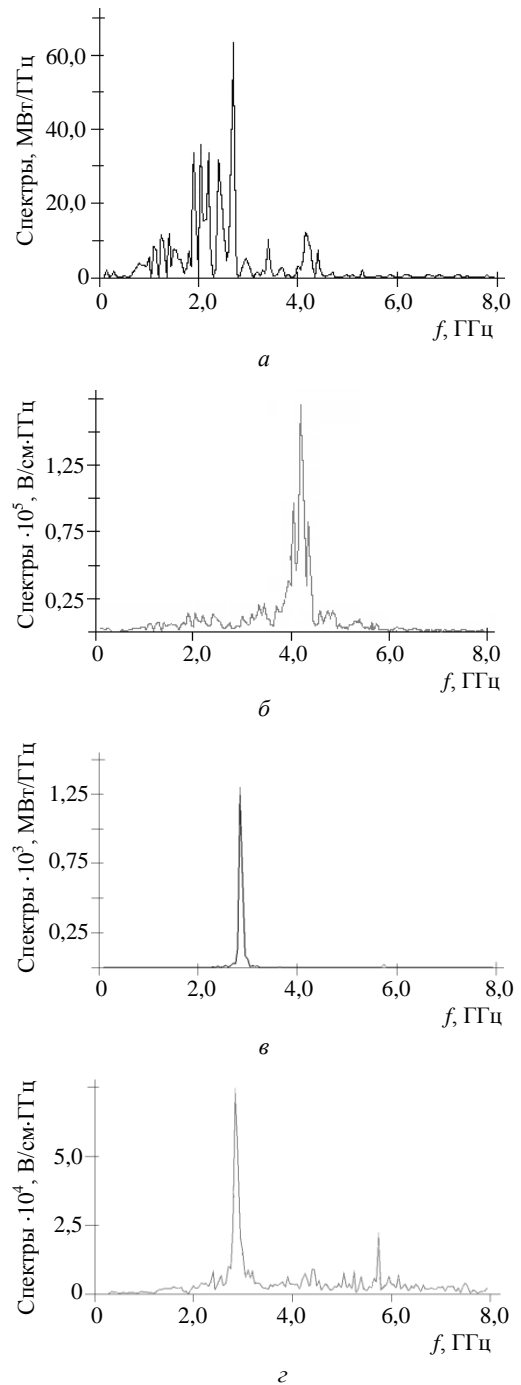


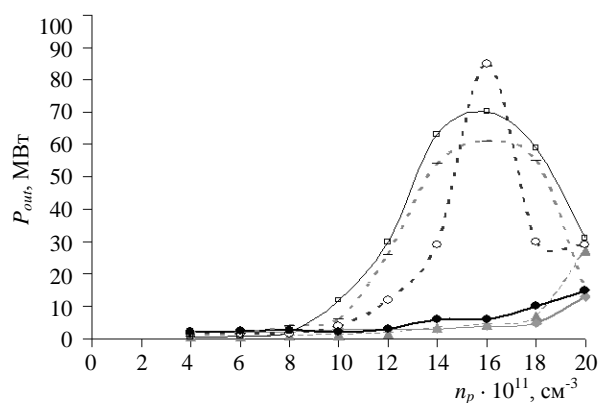
Рис. 3. Спектры излучения для малой плотности плазмы: (а — выходной рупор; б — в резонаторе) и большой плотности плазмы; (в — выходной рупор; г — резонатор)

Следует отметить, что волна излучения, обусловленного аномальным эффектом Доплера, имеет меньшую групповую скорость (см. рис. 1), чем черенковское излучение и дольше сохраняется в области взаимодействия пучка и плазмы (резонаторе) за время импульса пучка. Все эти факторы меняют качество электронного пучка, т. е. условия черенковского резонанса. В этой сложной ситуации перейдем к моделированию системы в режиме усилителя. Сейчас в экспериментах используется внешняя волна с частотой 3 ГГц. Для моделирования она кажется наиболее перспективной, в этом диапазоне слабее проявляется аномальный эффект Доплера.

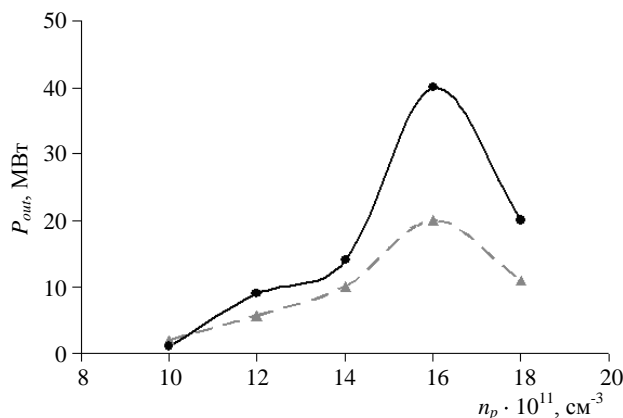
В численном моделировании при однородном магнитном поле без внешней волны наблюдается режим генерации (см. рис. 2). В режиме с внешней волной удалось добиться сужения спектра при фиксированной плотности плазмы для поля с индукцией 0,5 Тл по сравнению со случаем отсутствия внешнего сигнала, но не наблюдается заметного усиления входной мощности. Вернемся к схеме дисперсионных кривых на рис. 1. Имеет смысл расширить полосу подавления обратной связи в условиях нормального эффекта Доплера, захватывая не только область черенковского резонанса, но и область аномального эффекта Доплера. Для этого в численном и физическом экспериментах применялось неоднородное по длине плазменного волновода внешнее магнитное поле. Распределение значений индукции было такое, что в середине плазменного волновода $B = 2B_0$, где B_0 — значение магнитной индукции на левой и правой границах плазменного волновода. Оказалось, что использование неоднородного магнитного поля дает подавление обратной связи на длине 45 см, но остается вопрос — как это будет происходить при других длинах системы.

Длина плазменного волновода влияет на работу усилителя по двум причинам. С одной стороны, от длины зависит общий коэффициент усиления для попутной с пучком волны. С другой стороны, уменьшение энергии отраженной (встречной по отношению к пучку) волны в условиях нормального эффекта Доплера происходит на определенной характерной длине, зависящей от амплитуды волны, степени отстройки от точного резонанса и т. д. Для подавления положительной обратной связи существенно, чтобы эта длина была меньше длины плазменного волновода. На рис. 4, а даны зависимости $P_{out}(n_p)$ для разных длин плазменного волновода. Рассмотрен режим отсутствия внешнего сигнала при неоднородном внешнем магнитном поле с изменением вдоль длины плазменного волновода в интервале 0,35—0,7 Тл. Если сравнить эти зависимости с данным рис. 2, то видно, что при низких плотностях плазмы, т. е. при малых

коэффициентах усиления происходит эффективное подавление обратной связи на всех рассматриваемых длинах. При повышении плотности плазмы увеличивается коэффициент усиления черенковского механизма и есть длины, где не удается добиться подавления обратной связи, а наблюдается высокий уровень генерации. Поэтому для дальнейшего анализа выбраны длины плазменного волновода 50 и 60 см.



а



б

Рис. 4. Зависимость выходной мощности от плотности плазмы для различных длин плазменного волновода при неоднородном магнитном поле 0,35 – 0,7 Тл:

а — СВЧ-генератора: —▲— 45 см; —◆— 50 см; —○— 55 см; —●— 60 см; —·— 65 см; —□— 70 см;
 б — СВЧ-усилителя: —▲— 50 см; —●— 60 см

Соответствующие значения мощности СВЧ-усилителя в режиме насыщения приведены на рис. 4, б для двух длин плазменного волновода. Усиление входной мощности составляет 15—30 дБ для разных значений плотности плазмы. Увеличение длины плазменного волновода позволяет поднять эффективность усиления и расширить полосу усиления по плотности плазмы. Режим усиления в физическом эксперименте без поглотителя получен с использованием неоднородного внешнего поля заданной конфигурации. В однородном магнитном поле такой режим не наблюдался.

Спектральная плотность напряженности электрического поля излучения СВЧ-усилителя была измерена с помощью осциллографа Тектроникс. Частота внешнего сигнала (магнетрона) составляла 3,24 ГГц. На рис. 5, *а, б* приведены модельные и на рис. 5, *в, г* — экспериментальные спектры излучения СВЧ-усилителя без поглотителя. На рис. 5, *а, в*, даны спектры СВЧ-излучения без

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ №07-08-00486.

Л и т е р а т у р а

1. Пономарев А. В., Стрелков П. С., Шкварунец А. Г. // ФП. 2000. Т. 26. № 7. С. 633—638.

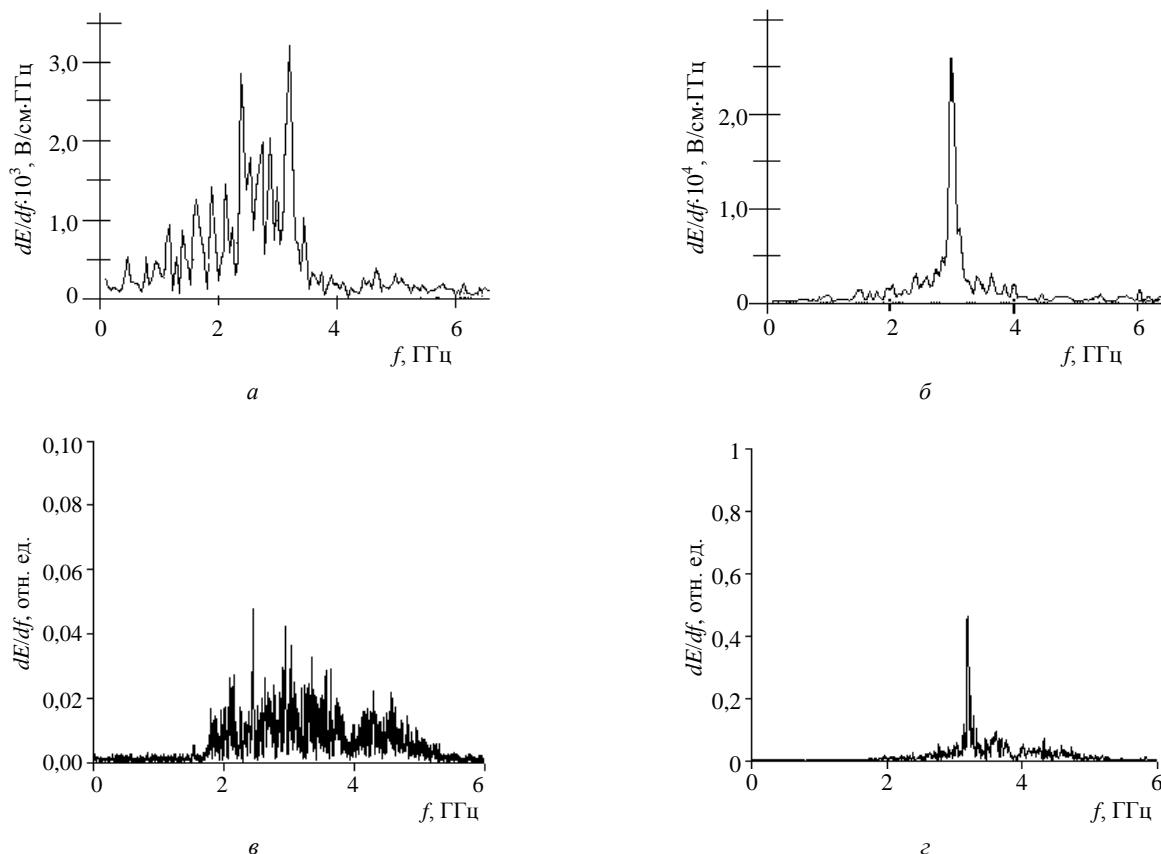


Рис. 5. Спектры излучения модельные (*а, б*) и экспериментальные (*в, г*) в режиме генерации (*а, в*) и усиления (*б, г*)

входного сигнала, на рис. 5, *б, г* — при уровне входного сигнала 50 кВт. Для того чтобы показать структуру шумового спектра генерации, шкала на левых графиках уменьшена в 10 раз по сравнению с диапазоном интенсивности спектров усиления.

З а к л ю ч е н и е

В реализации усилителя на нормальном эффекте Доплера существует ряд ограничений и сложностей, но тем ни менее экспериментальные данные и анализ ситуации с помощью численного моделирования позволяют считать доказанной возможность подавления положительной обратной связи в плазменном релятивистском СВЧ-усилителе при выполнении условий для резонанса на нормальном эффекте Доплера.

2. Пономарев А. В., Стрелков П. С. // Там же. 2004. Т. 30. № 1. С. 66—72.

3. Bogdankevich I. L., Strelkov P. S. // Czech. J. Phys. B. 2006. V. 56 P. 192—196.

4. Богданкевич И. Л., Иванов И. Е., Лоза О. Т и др. // ПЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 11. С. 65—70.

5. Кузелев М. В., Рухадзе А. А. // ФП. 2005. Т. 31. № 8. С. 693—700.

6. Александров А. Ф., Кузелев М. В. // Там же. 2007. Т. 33. № 3. С. 227—231.

7. Стрелков П. С., Пономарев А. В., Богданкевич И. Л. // Там же. 2007. Т. 33. № 4. С. 366—375.

8. Богданкевич И. Л., Стрелков П. С., Тараканов В. П. // КСФ ФИАН. 2007. № 10. С. 25—34.

Статья поступила в редакцию 28 июля 2008 г.

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

A. A. Балмашинов, A. B. 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