

УДК 533.951;537.533.7

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ЦИКЛОТРОННОЙ ПОЛОСЫ ПОДАВЛЕНИЯ ГЕНЕРАЦИИ В ПЛАЗМЕННОМ РЕЛЯТИВИСТСКОМ СВЧ-ГЕНЕРАТОРЕ

И. Л. Богданкевич, П. С. Стрелков, В. П. Тараканов<sup>1</sup>

*В плазменно-пучковой системе, находящейся в конечном магнитном поле, наряду с черенковским резонансом возникают другие резонансы пучковых и плазменных волн. В плазменном волноводе конечной длины попутная волна, возбуждаемая пучком при черенковском резонансе, всегда частично отражается от концов плазменного волновода. Отраженная (встречная) волна обеспечивает обратную связь и приводит к возникновению режима генерации в такой системе. При выполнении резонансного условия для нормального эффекта Доплера происходит подавление обратной связи и возможно прекращение режима генерации. Этот эффект может быть использован в экспериментальных работах по созданию плазменных СВЧ-усилителей, в которых возникновение СВЧ-генерации является вредным явлением.*

Явление плазменно-пучковой неустойчивости было открыто теоретически [1, 2], а затем экспериментально в работах [3, 4]. Пучок электронов возбуждает медленную плазменную попутную волну в плазменном волноводе на основе черенковского механизма. В эксперименте отражение этой волны от излучающего торца плазменного волновода приводит к появлению встречной волны, обеспечивающей обратную связь, и возникает режим СВЧ-генерации. Принципы релятивистской плазменной СВЧ-электроники были сформулированы в работе [5].

<sup>1</sup>Институт теплофизики экстремальных состояний РАН (ИТЭС), Москва.

Впервые возможность создания СВЧ-источников, основанных на взаимодействии релятивистских электронных пучков с плазмой, была продемонстрирована в работе [6]. Вся система находится во внешнем магнитном поле. На рис. 1 качественно представлены дисперсионные кривые плазменных волн (попутной и встречной) и волны электронного пучка. При  $k_z \rightarrow \infty$  частота плазменной волны стремится к ленгмюровской частоте плазмы  $\omega_p$ . Большинство теоретических работ по анализу СВЧ-источников плазменного типа были сделаны в предположении, что циклотронная частота  $\omega_H \ll \omega_p$ . В экспериментальных условиях это требование может быть выполнено не всегда. В конечном магнитном поле, наряду с черенковским резонансом, возникают другие резонансы пучковых и плазменных волн. Для попутной волны может наблюдаться аномальный эффект Доплера, а для встречной (отраженной) волны - нормальный эффект Доплера [7]. В последнее время появились как аналитические работы по линейной теории для конечного магнитного поля [8, 9, 10], так и попытки численного моделирования ситуации, когда циклотронная частота имеет порядок плазменной [11, 12, 13]. Для численного моделирования использовался полный электромагнитный код КАРАТ [14]. Схема численного эксперимента приведена на рис. 2. Внутри счетной области решаются уравнения Максвелла с граничными условиями для металла на поверхностях волновода, для электронов пучка используется PIC-метод, токи в плазме вычисляются в рамках линейной модели. В моделировании большее внимание уделялось нормальному эффекту Доплера, так как он имеет существенное значение для эксперимента. Для волны, отраженной от торца плазменного волновода (см. рис.1.) ( $k_z < 0$ ), справедливо соотношение ( $\omega^* = -k_z^* u$  ( $u$  - скорость электронов пучка)). В пучке, помещенном в магнитное поле, может распространяться быстрая циклотронная волна  $\omega = k_z u + n\omega_H/\gamma$ . Здесь  $\omega_H$  - электронная циклотронная частота. В точке резонанса  $-k_z^* u = k_z^* u + n\omega_H/\gamma$  имеет место нормальный эффект Доплера. Условие резонанса имеет вид

$$\omega^* = n\omega_H/2\gamma \quad (1)$$

где  $n = 1, 2, 3$ .

Это условие приведено в работе [8] для волновода, заполненного изотропным диэлектриком.

Экспериментально было подтверждено [15] проявление эффекта подавления отраженной волны при нормальном эффекте Доплера в плазменном релятивистском СВЧ-генераторе. Было проведено численное моделирование работы такого генератора для условий данного эксперимента. Экспериментальные данные и результаты численного

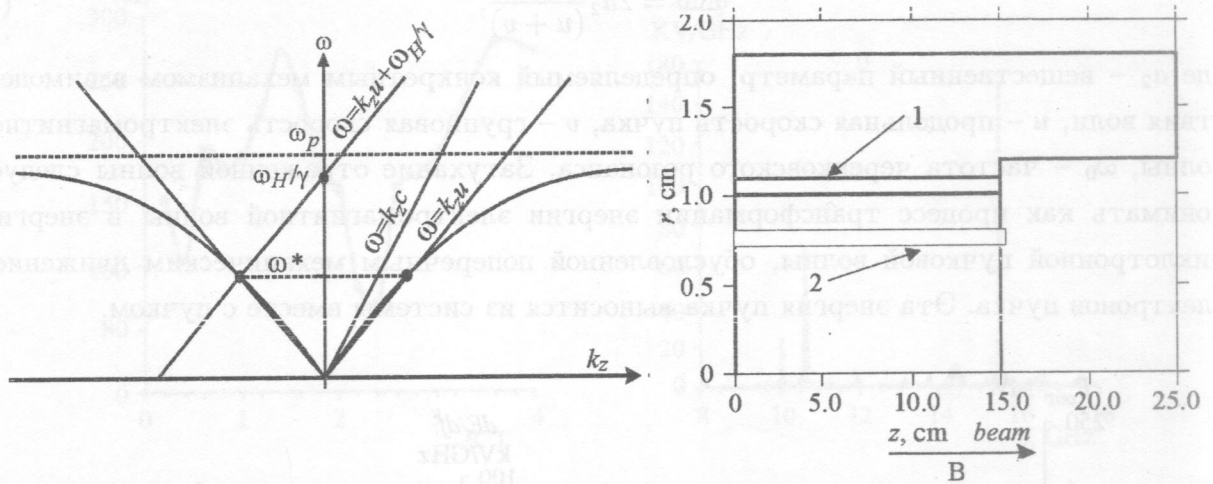


Рис. 1. Дисперсионные кривые попутной и встречной плазменной волны и волны объемного заряда электронного пучка.

Рис. 2. Общая схема численного эксперимента: 1 – трубчатая плазма, 2 – трубчатый пучок.

моделирования позволяют допустить, что подавление обратной связи происходит не только при точном резонансе (1), но и в некоторой окрестности около него. Интересно оценить ширину полосы циклотронного поглощения встречной волны и определить факторы, которые могут на нее повлиять.

Если обратиться к вакуумным приборам с замедляющей структурой в виде гофрированного металлического волновода, то в ряде работ [16, 17, 18], как в экспериментальных данных, так и в результатах численного моделирования и аналитических оценках указывается, что ширина полосы циклотронного подавления генерации составляет 10–20% от величины резонансного значения внешнего магнитного поля.

В [19] рассмотрено влияние (в рамках линейной теории) нормального эффекта Доплера на черенковскую пучковую неустойчивость в электродинамической системе конечной длины. Приведена формула резонанса и дана оценка коэффициента пространственного затухания  $\delta_0$  отраженной волны и ширины  $\Delta\omega$  полосы непропускания колебаний при нормальном эффекте Доплера.

$$\omega_H = 2\gamma\omega_0 \tag{1a}$$

$$\delta_0 = \frac{|a_2|}{\sqrt{uv}} \tag{2}$$



$$\Delta\omega = 2a_2 \frac{\sqrt{uv}}{(u+v)}, \quad (3)$$

где  $a_2$  – вещественный параметр, определяемый конкретным механизмом взаимодействия волн,  $u$  – продольная скорость пучка,  $v$  – групповая скорость электромагнитной волны,  $\omega_0$  – частота черенковского резонанса. Затухание отраженной волны следует понимать как процесс трансформации энергии электромагнитной волны в энергию циклотронной пучковой волны, обусловленной поперечным механическим движением электронов пучка. Эта энергия пучка выносится из системы вместе с пучком.

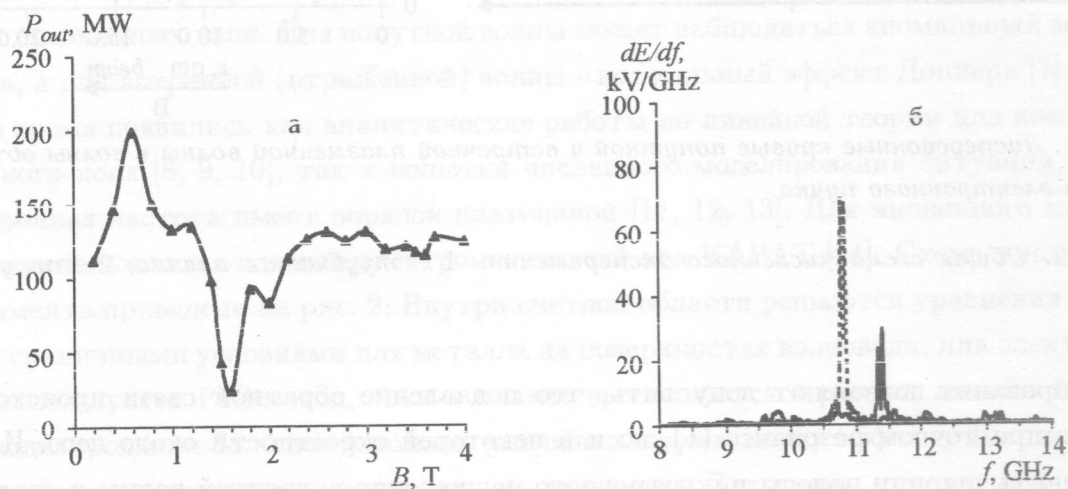


Рис. 3. Зависимость выходной мощности СВЧ-генератора от величины ведущего магнитного поля (а) и спектральные плотности амплитуды поля (б) для плотности плазмы  $12 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  при длине резонатора 10 см. Пунктирные линии на рис. 3б – нерезонансное внешнее поле (4 Тл); сплошные – соответствующие резонансные поля для данной плотности плазмы.

В численном моделировании, приближенном к реальному эксперименту, учет всех факторов, влияющих на поведение системы в условиях нормального эффекта Доплера, усложняется. В формулы (1), (2), (3) входит величина  $\gamma$ , определяемая энергией электронов пучка. При черенковском взаимодействии в каждый момент времени встречная (отраженная) волна взаимодействует с ансамблем электронов с определенным распределением по энергиям. При фиксированном значении плотности плазмы излучается несколько частот, в отличие от схемы на рис. 1. При анализе эффекта циклотронного подавления встречной волны для разных значений плотности плазмы следует учитывать, что коэффициент отражения плазменной волны от коллектора зависит от плотности

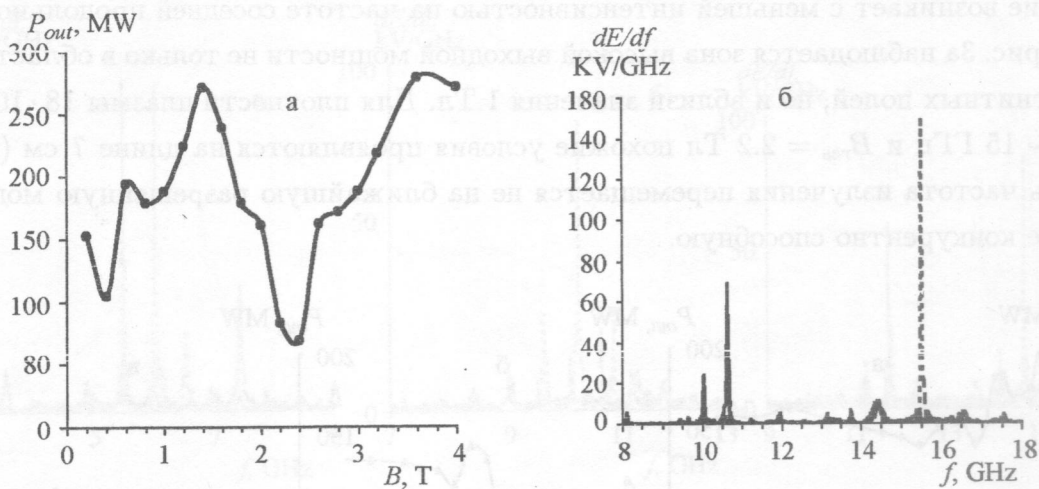


Рис. 4. Зависимость выходной мощности СВЧ-генератора от величины ведущего магнитного поля (а) и спектральные плотности амплитуды поля (б) для плотности плазмы  $18 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  при длине резонатора 7 см. Пунктирные линии – нерезонансное внешнее поле (4 Тл); сплошные – соответствующие резонансные поля для данной плотности плазмы.

плазмы, так как плотность плазмы определяет частоту черенковского резонанса. При увеличении плотности плазмы увеличивается относительная доля энергии встречной волны. Для определения ширины полосы в этих условиях было проведено численное моделирование с использованием кода КАРАТ. Рассматриваемые ниже результаты моделирования были сделаны при следующих параметрах (рис. 2) – радиус металлического волновода  $R = 1.8$  см, средний радиус трубчатой плазмы  $r_p = 1.05$  см, средний радиус трубчатого пучка  $r_b = 0.75$  и  $0.95$  см, ток пучка 2 и 1 кА, длина плазмы  $L = 7, 10$  и  $15$  см, плотность плазмы  $n_p = 6 \cdot 10^{12}, 1.2 \cdot 10^{13}$  и  $1.8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . На рис. 3а приведен график зависимости выходной мощности СВЧ-генератора от значения ведущего магнитного поля  $P_{out}(B)$  для длины взаимодействия 10 см и плотности плазмы  $12 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . На рис. 3б даны спектральные плотности СВЧ-излучения для двух значений магнитного поля. Кривая для резонансного поля (сплошная линия) соответствует точке минимума мощности на графике 3а. Пунктирная линия спектра соответствует внешнему магнитному полю 4 Тл (“большому”). При этой длине резонатора наблюдается излучение с узким спектром с частотой  $f_0 \sim 11$  ГГц. В соответствии с условием резонанса при нормальном эффекте Доплера резонансное значение магнитного поля  $B_{res} = 1.6$  Тл. На графике 3а этому значению соответствует минимум выходной мощности. В соответствии с 3а и 3б можно говорить о сильном подавлении обратной связи на рабочей частоте генератора,

излучение возникает с меньшей интенсивностью на частоте соседней продольной моды [20]. На рис. 3а наблюдается зона высокой выходной мощности не только в области больших магнитных полей, но и вблизи значения 1 Тл. Для плотности плазмы  $18 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  при  $f_0 \sim 15 \text{ ГГц}$  и  $B_{\text{рез}} = 2.2 \text{ Тл}$  похожие условия проявляются на длине 7 см (рис. 4). Но здесь частота излучения перемещается не на ближайшую разрешенную моду, а на наиболее конкурентно способную.

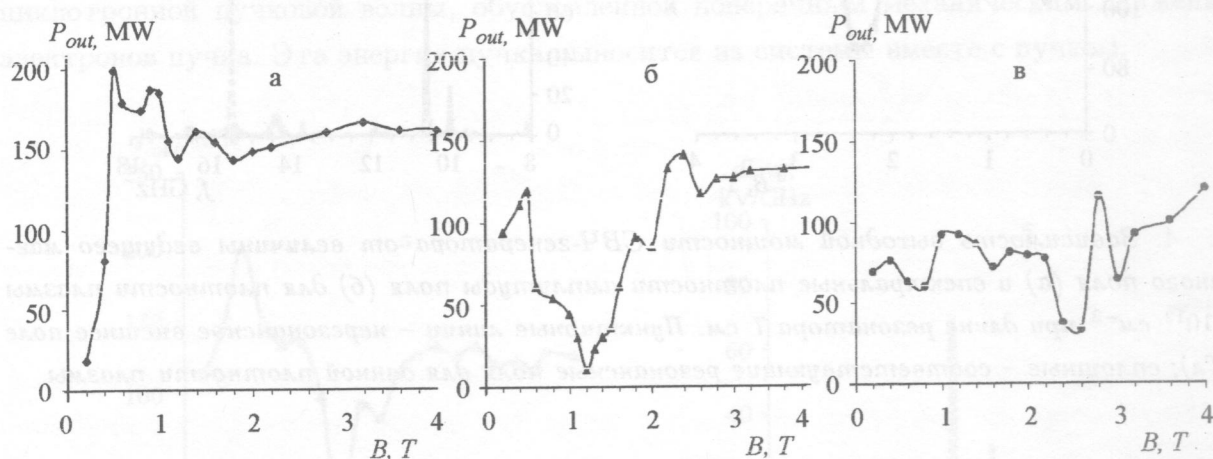


Рис. 5. Зависимость выходной мощности СВЧ-генератора от величины ведущего магнитного поля для трех значений плотности плазмы: а –  $6 \cdot 10^{12}$ , б –  $12 \cdot 10^{12}$ , в –  $18 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  при длине резонатора 15 см.

При увеличении длины взаимодействия до 15 см зависимости  $P_{\text{out}}(B)$  существенно меняются. На рис. 5 представлена зависимость выходной мощности генератора от величины ведущего магнитного поля для трех значений плотности плазмы  $n_p = 6 \cdot 10^{12}$ ,  $1.2 \cdot 10^{13}$  и  $1.8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  (при токе пучка 2 кА). На рис. 6 пунктирными линиями приведены спектры излучения при нерезонансном большом поле (4 Тл). Из графиков находим основную частоту генерации при нерезонансном значении магнитного поля и ожидаемые резонансные значения магнитного поля  $f_1 = 6 \text{ ГГц}$ ,  $B_{1\text{рез}} = 0.9 \text{ Тл}$ ,  $f_2 = 10 \text{ ГГц}$ ,  $B_{2\text{рез}} = 1.4 \text{ Тл}$ ,  $f_3 = 15 \text{ ГГц}$ ,  $B_{3\text{рез}} = 2.2 \text{ Тл}$ . Из рис. 5б и 5в следует, что провалы мощности при  $n_p = 1.2 \cdot 10^{13}$  и  $1.8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  совпадают с резонансными значениями магнитного поля.

Увеличение длины взаимодействия приводит к уширению полосы циклотронного подавления генерации, что видно если, например, сравнить рис. 5б для  $n_p = 1.2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и рис. 3. Каждому значению плотности плазмы соответствуют определенные изменения спектра излучения при резонансном значении магнитного поля по сравнению с большим



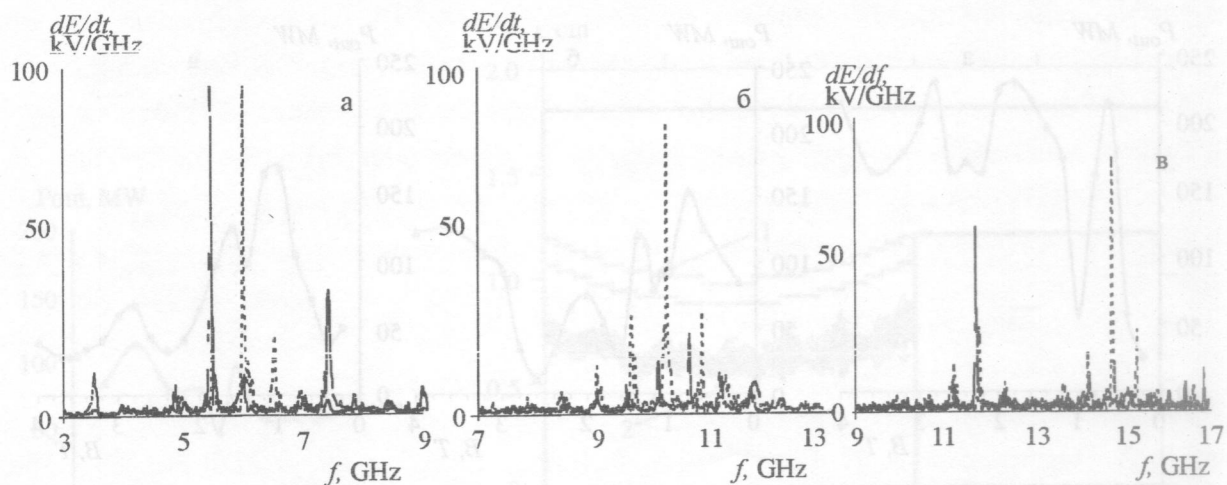


Рис. 6. Спектральные плотности амплитуды поля для различных плотностей плазмы: а –  $6 \cdot 10^{12}$ , б –  $12 \cdot 10^{12}$ , в –  $18 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Пунктирные линии – нерезонансное внешнее поле (4 Тл); сплошные – соответствующие резонансные поля для данной плотности плазмы.

полем (рис. 6). При низкой плотности плазмы ( $f_1 = 6 \text{ ГГц}$ ) при переходе к резонансному магнитному полю выходная мощность не уменьшается (рис. 5а), а в спектре (рис. 6а) наблюдается перестройка основной частоты генерации на ближайшую соседнюю продольную моду. В данном случае подавление обратной связи происходит в узкой полосе частот, меньшей, чем  $\Delta f$  – интервал между частотами продольных мод [20]. Для следующей плотности плазмы ( $f_2 \sim 10 \text{ ГГц}$ , рис. 6б) картина иная – сдвиг спектральных пиков больше  $\Delta f$ , видно сильное уменьшение амплитуды волны СВЧ-генерации, как основного пика, так и боковых. В данном случае, видимо, можно говорить о сильном пространственном затухании в диапазоне нескольких продольных мод, что на рис. 5б проявляется широким циклотронным провалом по мощности. Для третьей плотности (рис. 6в) происходит и потеря мощности и переход на другую, не ближайшую, а наиболее конкурентно способную продольную моду.

Эффективность взаимодействия пучковых и плазменных волн определяется коэффициентом связи. Величина связи как попутной, так встречной плазменных волн с пучковыми волнами в нашей системе определяется геометрическими параметрами (радиусы пучка и плазмы,  $r_p$  и  $r_b$ ). Повысить коэффициент связи можно, уменьшая зазор между трубчатым пучком и плазмой. На рис. 7 даны зависимости выходной мощности от величины ведущего магнитного поля для случая более сильной связи, чем на рис. 5 и 6 ( $L = 15 \text{ см}$ ). При увеличении связи возрастает как циклотронное поглощение отраженной волны пучком, так и усиление на черенковском механизме. Эти факторы

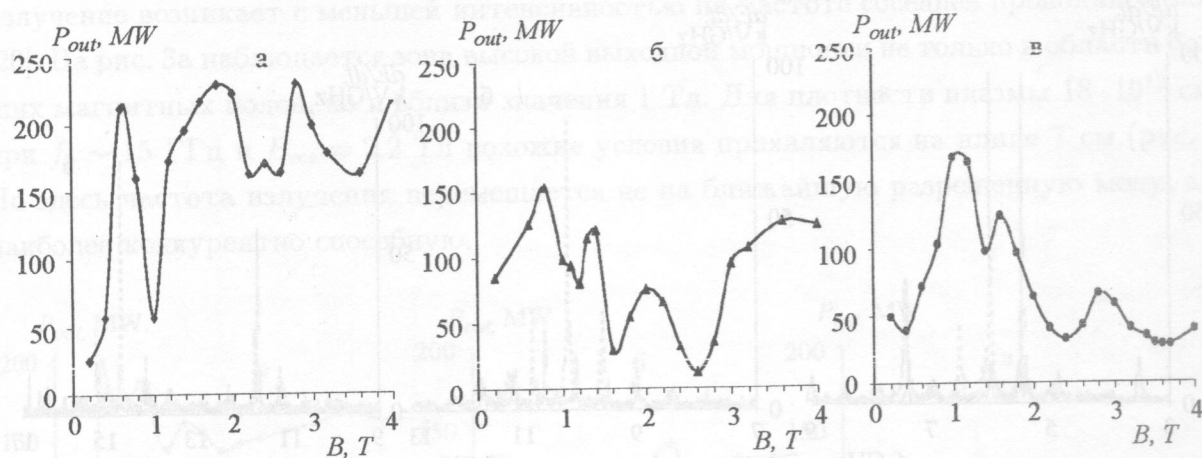


Рис. 7. Зависимость выходной мощности генератора от величины ведущего магнитного поля для трех значений плотности плазмы: а –  $6 \cdot 10^{12}$ , б –  $12 \cdot 10^{12}$ , в –  $18 \cdot 10^{12}$   $\text{см}^{-3}$  при увеличении связи между пучком и плазмой при длине резонатора 15 см.

противоположным образом влияют на выходную мощность генератора, что и отражается в графиках на рис. 7. Для всех плотностей плазмы проявляется существенная, но не однозначная зависимость мощности генерации от величины внешнего магнитного поля на всем диапазоне до 4 Тл. Характерный узкий провал, соответствующий резонансному полю, наблюдается только на рис. 7а для наиболее низкого значения плотности плазмы с наименьшим усилением на черенковском механизме и наименьшим коэффициентом отражения плазменной волны от коллектора.

При уменьшении тока пучка будет сужаться полоса циклотронного поглощения и уменьшаться коэффициент пространственного затухания в соответствии с результатами работы [19]. На рис. 8 (для  $n_p = 1.2 \cdot 10^{13}$   $\text{см}^{-3}$ .) представлен график зависимости  $P_{\text{out}}(B)$  при геометрических параметрах таких, как на рис. 5, но при токе 1 кА. По сравнению с рис. 5б видно сужение полосы подавления обратной связи и уменьшение глубины провалов по мощности для резонансных полей.

Дополнительно можно увеличить полосу частот резонансного поглощения, используя неоднородное внешнее магнитное поле  $B = B_0 \pm A\%$ , при этом условие резонанса для нормального эффекта Доплера выполняется в разных точках по длине плазмы в некотором диапазоне частот. На рис. 9 приведена схема численного эксперимента, используемого в случае неоднородного по длине внешнего магнитного поля. На рис. 10 приведены спектральные плотности амплитуды поля излучения для однородного магнитного внешнего поля (а) и для разных степеней неоднородности магнитного поля (б –



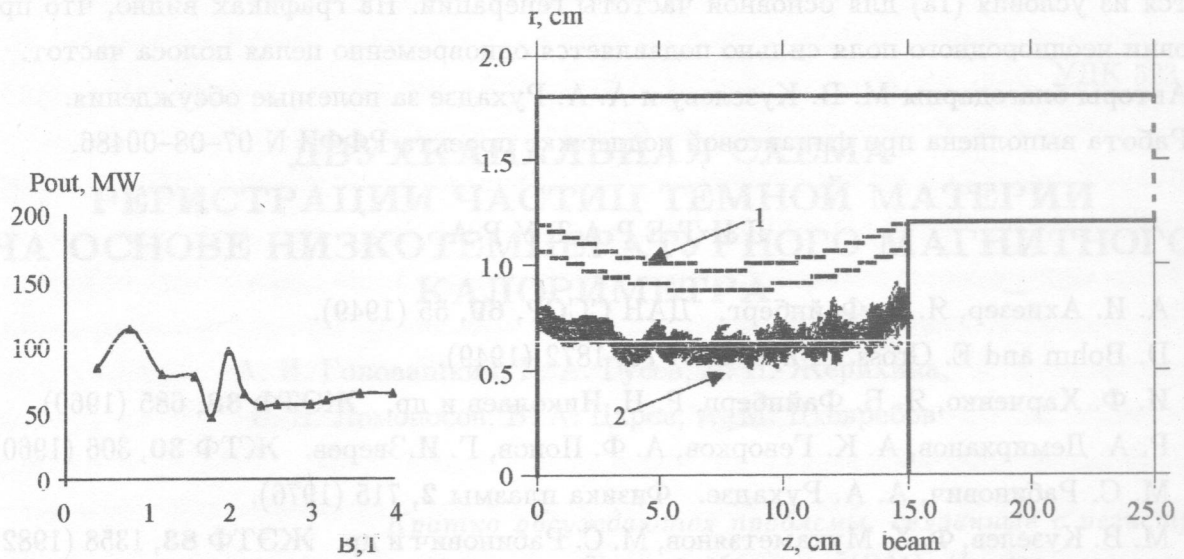


Рис. 8. Зависимость выходной мощности СВЧ-генератора от величины ведущего магнитного поля для  $n_p = 1.2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  при уменьшении тока пучка.

Рис. 9. Схема численного эксперимента в неоднородном внешнем магнитном поле: 1 – трубчатая плазма, 2 – трубчатый пучок.

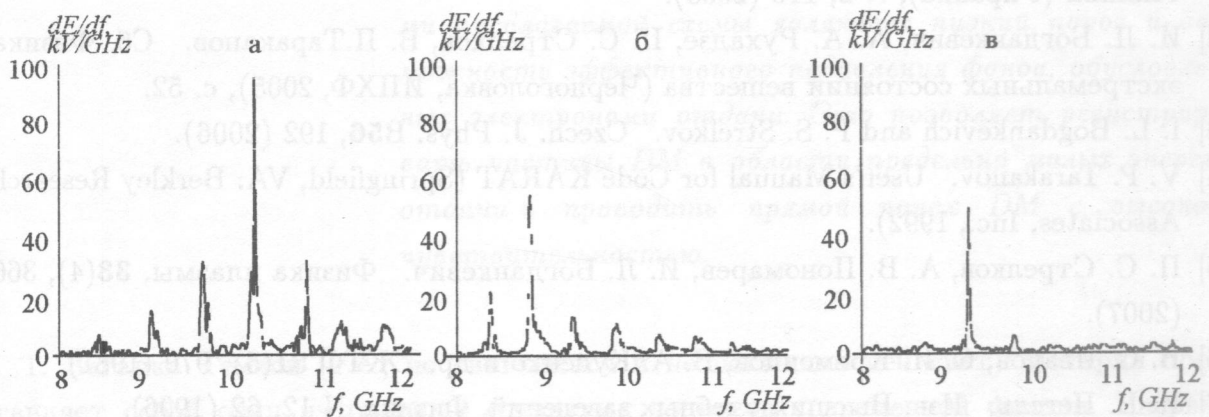


Рис. 10. Спектральные плотности амплитуды поля для плотности плазмы  $1.2 \cdot 10^{12}$  в однородном и неоднородном внешнем магнитном поле. а – однородное поле 4 Тл, б –  $B = 1.3 \pm 20\%$  Тл, в –  $B = 1.3 \pm 50\%$  Тл при длине резонатора 15 см.

20%, в – 50%) по длине взаимодействия пучка и плазмы. Моделирование проведено для плотности плазмы  $1.2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . График “а” дан для поля, нерезонансного по основной частоте генерации. Графики “б” и “в” – результаты моделирования, когда  $B_0$  опреде-

ляется из условия (1а) для основной частоты генерации. На графиках видно, что при условии неоднородного поля сильно подавляется одновременно целая полоса частот.

Авторы благодарны М. В. Кузелеву и А. А. Рухадзе за полезные обсуждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФИ N 07-08-00486.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] А. И. Ахиезер, Я. Б. Файнберг. ДАН СССР, **69**, 55 (1949).
- [2] D. Bohm and E. Gross. Phys. Rev. **75**, 1872 (1949).
- [3] И. Ф. Харченко, Я. Б. Файнберг, Р. Н. Николаев и др. ЖЭТФ **38**, 685 (1960).
- [4] Р. А. Демирханов, А. К. Геворков, А. Ф. Попов, Г. И. Зверев. ЖТФ **30**, 306 (1960).
- [5] М. С. Рабинович, А. А. Рухадзе. Физика плазмы **2**, 715 (1976).
- [6] М. В. Кузелев, Ф. Х. Мухаметзянов, М. С. Рабинович и др. ЖЭТФ **83**, 1358 (1982).
- [7] М. В. Кузелев, А. А. Рухадзе. УФН **152**(2), 295 (1987).
- [8] А. Ф. Александров, М. В. Кузелев, О. Е. Пыркина. ЖТФ **55**(12), 2399 (1985).
- [9] М. В. Кузелев, А. А. Рухадзе. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 2, 26 (2005).
- [10] М. В. Кузелев, А. А. Рухадзе. Физика плазмы, **31**(8), 693 (2005).
- [11] И. Л. Богданкевич, А. А. Рухадзе, В. П. Тараканов. Вопросы атомной науки и техники (Украина), N 2, 116 (2005).
- [12] И. Л. Богданкевич, А. А. Рухадзе, П. С. Стрелков, В. П. Тараканов. Сб. Физика экстремальных состояний вещества (Черноголовка, ИПХФ, 2005), с. 52.
- [13] I. L. Bogdankevich and P. S. Strelkov. Czech. J. Phys. **B56**, 192 (2006).
- [14] V. P. Tarakanov. User's Manual for Code KARAT (Springfield, VA: Berkley Research Associates, Inc., 1992).
- [15] П. С. Стрелков, А. В. Пономарев, И. Л. Богданкевич. Физика плазмы, **33**(4), 366 (2007).
- [16] В. С. Иванов, С. И. Кременцов, В. А. Куценко и др. ЖТФ **51**(5), 970 (1981).
- [17] И. В. Пегель. Изв. Высших учебных заведений. Физика, N 12, 62 (1996).
- [18] Н. Ф. Ковалев, А. Ф. Палицин, М. И. Фукс. Изв. Высших учебных заведений. Радиофизика, **49**(2), 105 (2006).
- [19] А. Ф. Александров, М. В. Кузелев. Физика плазмы, **33**(3), 227 (2007).
- [20] И. Л. Богданкевич, О. Т. Лоза, Д. А. Павлов. ПЖТФ **33**(15), 1 (2007).