

УДК 621.385.63

## Исследование влияния величины магнитного поля на работу плазменной ЛБВ

П. В. Боровиков

ГУП "Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина"

*Дано описание численного моделирования и экспериментального исследования влияния магнитного поля на параметры гибридной плазменной ЛБВ на основе замедляющей системы типа цепочки связанных резонаторов. Приведены результаты расчета дисперсионных характеристик гибридной замедляющей системы, проанализирована структура электромагнитных волн в канале гибридной замедляющей системы. Впервые реализована эффективная работа мощной нерелятивистской плазменной ЛБВ при малых значениях фокусирующего магнитного поля, т. е. при  $\omega_h \leq \omega_{op}$ . Показаны направления возможной оптимизации конструкции мощных плазменных ЛБВ.*

В ГУП "ВЭИ" разработаны мощные пучково-плазменные СВЧ-усилители — плазменные ЛБВ (ПЛБВ), основанные на гибридных замедляющих структурах (ЗС), представляющих собой цепочку индуктивно связанных резонаторов с плазменным заполнением пролетного канала [1, 2]. Выбор гибридной ЗС в виде цепочки связанных резонаторов (ЦСР) с заполненным плазмой пролетным каналом (рис. 1) обусловлен возможностью пространственного разделения в такой структуре области продольной передачи микроволновой энергии и участка транспортировки и взаимодействия нерелятивистского электронного пучка с плазмой и возбуждаемой микроволновой волной.

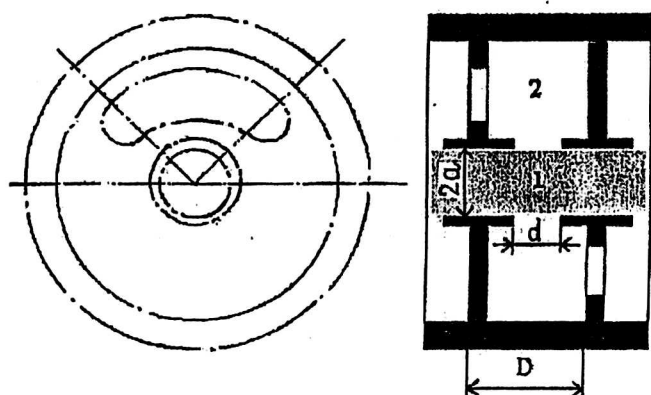


Рис. 1. Вид гибридной замедляющей структуры типа цепочки связанных резонаторов:

1 — область пролетного канала, заполненного плазмой;  
2 — область СВЧ-резонатора с индуктивными щелями связи

Высокие параметры нерелятивистских ПЛБВ определяются эффективностью взаимодействия системы пучок—плазма, компенсацией пространственного заряда электронного пучка, а также длительным синхронизмом пучка с волнами гибридных замедляющих структур при

прохождении области с продольными градиентами концентрации плазмы и сопровождающего магнитного поля.

Гибридные плазменно-резонаторные системы сочетают в себе высокую эффективность взаимодействия, характерную для плазменных волноводов, с возможностью практически полного излучения энергии возбуждаемых СВЧ-полей, что позволяет создавать СВЧ-усилители с уникальным набором характеристик: электронным КПД до 30 %, шириной полосы около 25 %, коэффициентом усиления не менее 20 дБ и средней выходной мощностью более 20 кВт.

Один из существенных признаков разработанных образцов ПЛБВ — наличие сопровождающего магнитного поля, создаваемого соленоидом. В работе [3] утверждается, что для реализации эффекта плазменного усиления в пучково-плазменном приборе необходимо выполнение условия

$$\omega_h > \omega_{op}, \quad (1)$$

где  $\omega_h$  — циклотронная частота;

$\omega_{op}$  — рабочая (оперативная) частота.

Выполнение условия (1) требует применения громоздких, энергоемких соленоидов с медными или алюминиевыми катушками.

Цель данной работы — исследовать возможность эффективной работы плазменной ЛБВ при  $\omega_h \leq \omega_{op}$ , т. е. при относительно малых значениях фокусирующего магнитного поля.

### Численное моделирование гибридных структур

В основу метода аналитического расчета положен метод частичных областей, применяемый для расчета ЗС вакуумных приборов [4], измененный и развитый для расчета гибридных

плазменно-наполненных ЗС. Для этого объем ЗС делится на две области (см. рис. 1): пространство взаимодействия 1; ячейка резонатора с трубками дрейфа и щелями 2.

Дисперсионное уравнение при этом записывается в виде

$$Y_1 + Y_2 = 0;$$

$$Y_{1,2} = \frac{\int E_{z,1,2}(a, z) H_{\varphi,1,2}^*(a, z) dS}{U_0^2},$$

где  $Y_{1,2}$  — поперечные проводимости соответствующих областей, определяемые в [4] по потоку энергии через границу раздела; эквивалентное напряжение на границе раздела при этом определяется из выражения

$$U_0 = - \int_0^D E_z(a, z) dz,$$

где  $a$  — радиус пролетного канала;  $D$  — период регулярной ячейки ЦСР.

Проводимость  $Y_2$  для ячейки резонатора определяется в соответствии с методом, предложенным в работе [4].

Для расчета и исследования плазменно-волноводных гибридных ЗС типа ЦСР на языке ФОРТРАН на основе программы "Нева-2", разработанной в ЛЭТИ, был создан оригинальный программный пакет "Нева-ВЭИ". Результатом расчета являются зависимости частоты, сопротивления связи и замедления в ЗС от фазового угла между соседними резонаторами.

В результате численного моделирования получены дисперсионные характеристики гибридной системы и топография ее полей, в значительной степени зависящие от концентрации плазмы, заполняющей пролетный канал. Распределение амплитуды  $E_z$  по сечению пролетного канала при различных концентрациях плазмы показано на рис. 2, а, б.

Структура компоненты  $E_z$  электромагнитного поля в зазоре гибридной ЗС типа ЦСР при радиусе пролетного канала  $R = 6$  мм, представленная на кривой 3 на рис. 2, а, иллюстрирует объемные волны в пролетном канале, типичные для случая сильного магнитного поля. В этом случае при заполнении трубки плазмой волна в пролетном канале из чисто поверхностной для вакуумного режима работы (см. кривые 1, рис. 2, а, б) в области плазменного заполнения становится объемной.

В слабом магнитном поле выполняется условие

$$\omega_h \leq \omega_{ор}. \quad (2)$$

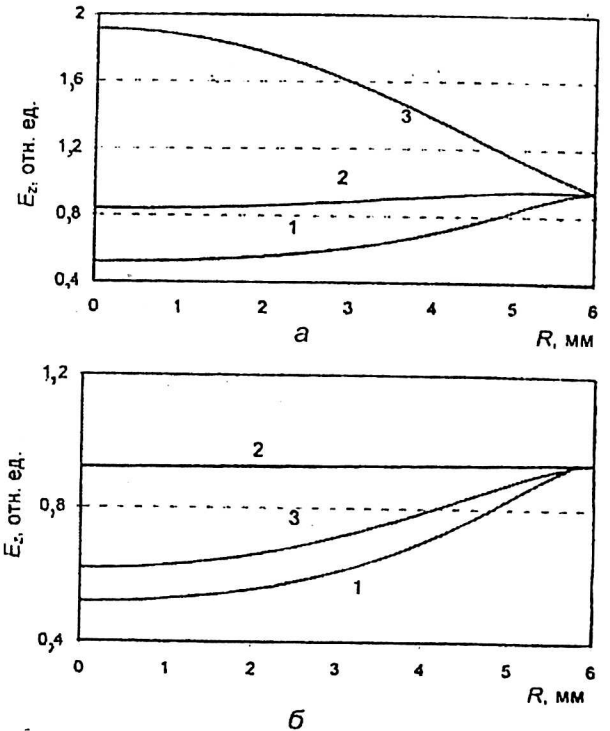


Рис. 2. График компоненты  $E_z$  поля в зазоре гибридной ЗС типа ЦСР при  $R = 6$  мм:

а — сильное магнитное поле,  $\omega_h \approx 1,4 \omega_{ор}$ ;  
б — слабое магнитное поле,  $\omega_h \approx 0,8 \omega_{ор}$ ;  
1 —  $\omega_p = 0$  (вакуум); 2 —  $\omega_p = 0,9 \omega_{ор}$ ; 3 —  $\omega_p = 1,8 \omega_{ор}$ .

В этом случае в пролетном канале гибридной структуры при увеличении концентрации плазмы образуются поверхностные волны (см. кривую 3, рис. 2, б). Таким образом, структура электромагнитного поля в гибридной ЗС при различных соотношениях  $\omega_h$ ,  $\omega_{ор}$  и  $\omega_p$ , где  $\omega_p$  — плазменная частота, сходна с структурой поля в регулярных плазменных волноводах [5]. Здесь

$$\omega_p = \sqrt{\frac{2}{n_e e}} \text{ — плазменная электронная частота.}$$

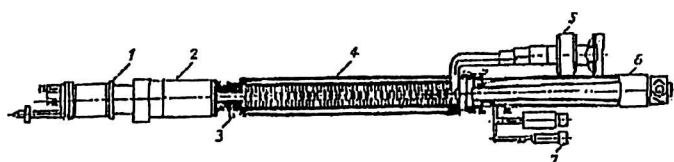
Расчеты показывают (см. кривые 2, рис. 2, а, б), что практически однородное распределение амплитуды  $E_z$  по сечению пролетного канала реализуется при

$$\omega_p \approx 0,9 \omega_{ор}.$$

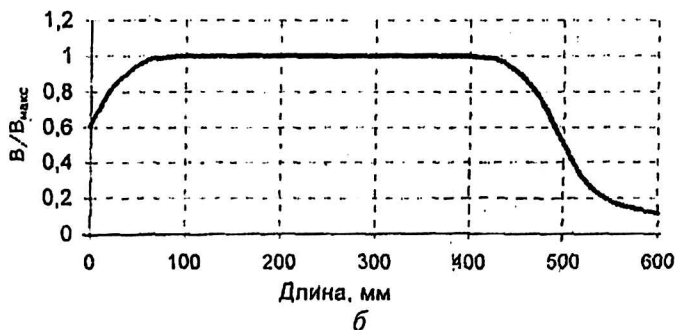
Такая однородная структура электромагнитного поля в ЦСР, как следует из анализа, обеспечивает в большом диапазоне изменения концентрации плазмы практически однородную ( $\Delta E < 10\%$ ) величину продольной компоненты электрического поля волны в области прохождения пучка, что обеспечивает большую эффективность трансформации энергии пучка в энергию СВЧ-излучения и большее (в два — три раза по сравнению с вакуумом) сопротивление связи. Это справедливо как для сильного, так и для слабого магнитного поля.

### Результаты экспериментальных исследований

На рис. 3 представлена конструктивная схема плазменной ЛБВ, разработанной в ГУП "ВЭИ" [1], отличающейся от обычной вакуумной ЛБВ повышенным давлением водорода в замедляющей структуре за счет специальной газодинамической системы. Электронный пучок (ускоряющее напряжение 17—19 кэВ, ток 3 А) проходит в пролетном канале ЦСР в сопровождающем магнитном поле с индукцией порядка 0,25 Тл для случая сильного магнитного поля, при котором выполняется соотношение (1) и около 0,1 Тл — для случая слабого поля, при этом справедливо соотношение (2). Давление рабочего газа (водорода) поддерживается с помощью специальных водородных генераторов. Ионизация создает в пролетном канале неравновесную плазму с концентрацией до  $10^{12}$  см<sup>-3</sup> и электронной температурой 20 эВ при давлении рабочего газа-водорода  $1 \cdot 10^{-3}$  торр.



а



б

Рис. 3. Конструктивная схема плазменной ЛБВ:

а — схематический вид:

- 1 — электронная пушка; 2 — система дифференциальной откачки; 3 — коаксиальный ввод СВЧ-мощности;
- 4 — электродинамическая структура; 5 — окно вывода СВЧ-мощности; 6 — коллектор электронного пучка;
- 7 — генераторы водорода;

б — график зависимости относительной амплитуды продольного магнитного поля  $H_z/H_{ликс}$  вдоль оси прибора (начало отсчета соответствует расположению катода)

Газодинамическая система ПЛБВ, состоящая из магнитоэрозийного и геттерного насосов, позволяет регулировать давление газа в электродинамической структуре в пределах  $10^{-6}$ — $10^{-2}$  торр. При этом обеспечивается вакуумный перепад между электродинамической структурой и электронной пушкой. Это делает возможным как вакуумный, так и плазменный режим работы.

Электронный пучок последовательно проходит через газодинамическую систему, электродинамическую ЗС, в которой происходит усиление СВЧ-колебаний и осажается на коллекторе, охлаждаемом водой.

На рис. 4 представлена зависимость выходной мощности электромагнитного излучения усилителя от давления рабочего газа (водорода) при неизменных параметрах электронного пучка. При этом величина магнитного поля соответствовала случаю слабого магнитного поля (т. е. при  $\omega_h \leq \omega_{ор}$ ) и была равна 0,1 Тл. Оптимальный плазменный режим работы прибора с электронным КПД около 25 % достигается при давлении 0,2—1,0 мторр.

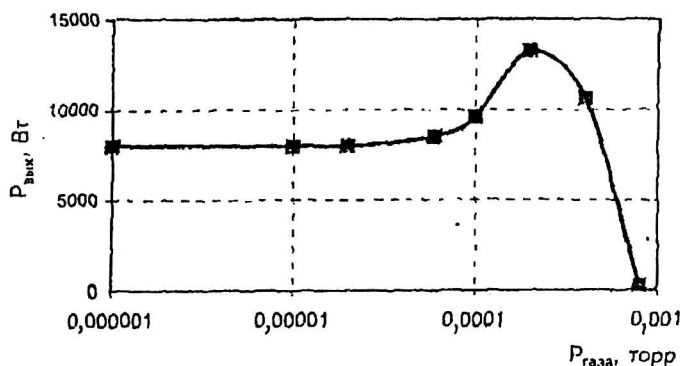


Рис. 4. Зависимость выходной СВЧ-мощности (Вт) от давления рабочего газа

Характеристика наглядно демонстрирует плазменный эффект: увеличение выходной мощности при переходе из вакуумного в плазменный режим работы прибора.

На рис. 5 представлены экспериментальные зависимости выходной СВЧ-мощности от значения магнитного поля в области гибридной ЗС.

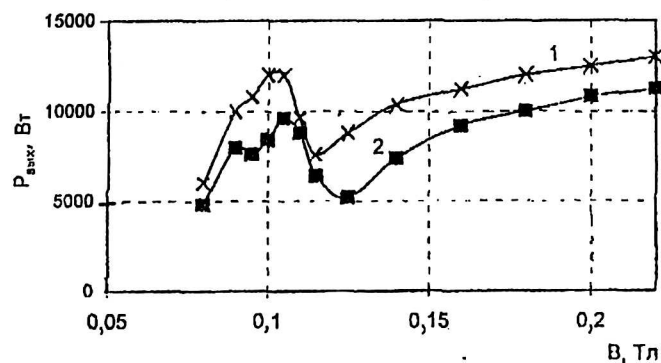


Рис. 5. График зависимости выходной мощности от магнитной индукции в соленоиде для двух частот (1 и 2) из рабочего диапазона ПЛБВ

Изменение магнитного поля осуществлялось путем изменения тока в соленоиде. Кривые 1 и 2 соответствуют различным значениям рабочих частот ( $F_2 > F_1$ , при этом  $F_2 - F_1 = 200$  МГц). Измерения проводились при постоянных значе-

ниях тока, ускоряющего напряжения, давления газа в приборе и постоянном входном сигнале.

Можно отметить три участка зависимости выходной СВЧ-мощности при уменьшении магнитного поля. Сначала СВЧ-мощность незначительно уменьшается, это, по-видимому, связано с монотонным увеличением токооседания на стенке ЗС и соответствующим уменьшением токопрохождения. При дальнейшем уменьшении магнитного поля скорость падения выходной СВЧ-мощности увеличивается (при этом значение циклотронной частоты в этой области равно рабочей частоте  $\omega_h = \omega_{ор}$ ). Минимум выходной мощности и, следовательно, точка максимума циклотронного поглощения для более высокочастотного сигнала (см. кривые 1 и 2, рис. 5) соответствует большему значению магнитной индукции.

После прохождения области локального циклотронного поглощения происходит значительный рост значения выходной СВЧ-мощности, достигается ее локальный максимум, а затем она быстро падает. Падение СВЧ-мощности связано с тем, что на этом участке (0,1—0,08 Тл) происходит резкий рост токооседания (с 5 до 30 % от общего тока пучка). Такие потери тока пучка, связанные с несовершенством электронно-оптической системы экспериментального макета ПЛБВ (макет разработан для работы в сильном магнитном поле), вызывают падение выходной СВЧ-мощности.

Таким образом, кроме хорошо изученного режима работы прибора в сильном магнитном поле (индукция  $B_z \approx 0,25$  Тл), реализован режим работы мощной ПЛБВ в малом магнитном поле (индукция  $B_z \approx 0,1$  Тл), при котором также образуется гибридная плазменная ЗС и происходит эффективное усиление СВЧ-колебаний.

### Заключение

Впервые на основе теоретического анализа и численного моделирования экспериментально реализована эффективная гибридная СВЧ-система на основе мощной ПЛБВ на ЦСР при работе в слабом магнитном поле (при выполнении условия  $\omega_h \leq \omega_{ор}$  достигнута выходная мощность  $P_{вых} \approx 15$  кВт, при этом значение электронного КПД  $\geq 20$  %). Обнаруженные в эксперименте качественные и количественные закономерности подтверждаются при численном моделировании гибридной ЗС.

Для реализации такого прибора необходима разработка новой электронно-оптической систе-

мы, содержащей сферический катод и имеющей минимальные пульсации в пролетном канале гибридной ЗС. Учитывая поверхностный характер гибридных электромагнитных волн в зазоре ЗС, перспективно использование сферического или кольцевого катода для формирования трубчатого пучка.

Кроме того, необходимо проведение дальнейших теоретических и экспериментальных исследований по изучению параметров пучково-плазменного взаимодействия, АХ, АЧХ, спектральных исследований работы ПЛБВ в слабом магнитном поле.

Полученные результаты показывают перспективность и целесообразность проведения дальнейших исследований в следующих направлениях:

- в создании ПЛБВ нового поколения с существенно меньшими энергозатратами и массогабаритными параметрами на основе ПЛБВ с слабым магнитным полем. Предварительные расчеты показывают, что использование оптимизированной пакетированной магнитной системы позволит уменьшить в 10—15 раз массу фокусирующего соленоида и в 5—6 раз — энергопотребление [6].
- в возможности использования локального циклотронного поглощения в области между секциями гибридной ЗС для подавления паразитного самовозбуждения (при этом значение циклотронной частоты в этой области подбирается равной частоте паразитной генерации  $\omega_h = \omega_{ор}$ );
- в разработке эффективной магнитной системы, в том числе на основе постоянных магнитов;
- в возможности создания высокоэффективной плазменной структуры (например, при использовании независимого плазменного источника).

Задача создания эффективной пучково-плазменной структуры требует обеспечения достаточной плазменной концентрации в пролетном канале и тщательного исследования процессов развития пучково-плазменных колебаний в гибридной структуре и возбуждения возможных неустойчивостей.

*Автор благодарит Ю. Кузнецова за неоцененную помощь при проведении экспериментальных исследований, Е. Чубарова — за помощь в проведении расчетов, а также В. Переводчикова и А. Шапиро — за плодотворное обсуждение результатов.*

## Литература

1. Mitin L. A., Perevodchikov V. I., Shapiro A. L. et al.//IEEE Transactions on Plasma Science, 1994. Oct. V. 22. № 5. P. 600–607.
2. Borovikov P. V., Perevodchikov V. I., Kuznetsov Y. A. et al. High Power Wide Bandwidth Plasma-beam Amplifier: Proc. Int. Vacuum Electronics Conf., Monterey, 2000.
3. Завьялов М. А., Неганова Л. А. и др. Пучковая плазма в гибридной ЗС плазменного прибора СВЧ//Сб. науч. тр./ИЦ ВЭИ. — М., 1994. С. 38–46.
4. Боровиков П. В., Григорьев А. Д., Митин Л. А. Расчет характеристик гибридных волн в ЗС типа ЦСР, заполненных плазмой//Сб. науч. тр./ЛЭТИ. — Л., 1991.
5. Кузелев М. В., Романов Р. В., Рухадзе А. А. Электромагнитные волны в плазменных волноводах//Прикладная физика. 2001. № 2–3. С. 103–129.
6. Акимов П. И., Боровиков П. В., Переводчиков В. И. и др. Разработка электронно-оптических систем с магнитной фокусировкой для мощных широкополосных плазменных ЛБВ: Конф. IVESC. — Саратов, 2002.

## Research of influence of a magnetic field on parameters of a plasma TWT

P. V. Borovikov

All-Russian electrotechnical institute, Moscow, Russia

*This article is devoted to numerical modeling and experimental research of influence of a magnetic field on parameters of hybrid plasma TWT because of slowing down system of a type a line-up of connected resonators. The outcomes of account of dispersing performances of a hybrid slowing down system are indicated, the structure of electromagnetic waves in the channel of a hybrid slowing down system is analysed. Effective work plasma TWT for want of small significances of a focusing magnetic field ( $\omega_h \leq \omega_{op}$ , where  $\omega_h$  — cyclotron frequency,  $\omega_{op}$  — operational frequency) for the first time is realized. The direction of possible optimization of construction of plasma TWT are defined.*