

09;10

## Резонансная релятивистская ЛОВ дециметрового диапазона с импульсной мощностью 5 GW

© С.А. Кицанов, А.И. Климов, С.Д. Коровин, И.К. Куркан,  
И.В. Пегель, С.Д. Полевин

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск  
E-mail: polevin@ife.hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 8 октября 2002 г.

Представлены результаты численных и экспериментальных исследований резонансной релятивистской лампы обратной волны. За счет использования отражений рабочей моды  $TM_{01}$  от концов электродинамической системы достигаются оптимальные условия взаимодействия электронного пучка как с  $(-1^{\text{й}})$  гармоникой встречной, так и с основной гармоникой попутной волн. В эксперименте на частоте 3.6 GHz получена одномодовая генерация с импульсной мощностью 5 GW и эффективностью 30%. Показана возможность перестройки частоты генерации посредством изменения периода замедляющей структуры при неизменных параметрах электронного пучка в пределах 15% (по половинному уровню мощности).

В настоящее время релятивистская лампа обратной волны (ЛОВ) является одним из эффективных источников когерентного излучения гига-ваттного уровня мощности в сантиметровом диапазоне длин волн [1,2]. Она адаптивна к изменению параметров электронного пучка, обладает малым временем установления колебаний и узким спектром излучения. Конструкция электродинамической системы ЛОВ сравнительно проста и имеет высокую электрическую прочность. Однако в обычной релятивистской ЛОВ, когда электронный пучок взаимодействует с  $(-1^{\text{й}})$  пространственной гармоникой встречной волны, эффективность генерации невелика и для энергии электронов 0.5–1 MeV не превышает 15–20% [3]. Оптимальная длина пространства взаимодействия в этом случае составляет  $L \approx (5-9)\lambda$ , где  $\lambda$  — длина волны излучения. Как правило, в реальной конструкции ЛОВ для вывода излучения в сторону коллектора с катодного конца замедляющей структуры (ЗС)

используется запредельное сужение, что приводит к появлению в пространстве взаимодействия попутной электронам волны. Было показано численно и экспериментально [4,5], что при относительно короткой длине пространства взаимодействия, когда угол пролета электронов в попутной волне составляет

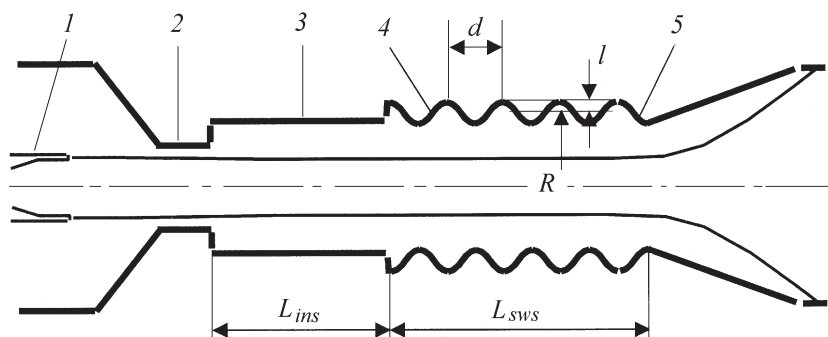
$$\theta_{tr} = kL \left( \frac{1}{\beta_e} - \frac{1}{\beta_{ph}} \right) \approx \frac{5}{2} \pi, \quad (1)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $c\beta_e$  — скорость электронов и  $c\beta_{ph}$  — фазовая скорость основной гармоники попутной волны, благодаря монотронному эффекту [6] влияние на процесс энергообмена попутной волны становится существенным. В этом случае эффективность генерации зависит от отношения амплитуд и разности фаз ( $-1^{\text{й}}$ ) гармоники встречной волны и основной гармоники попутной волны, а также от длины пространства взаимодействия.

В теоретической работе [7] исследовалось влияние отражений от концов ЗС на работу релятивистской ЛОВ, однако учитывалось взаимодействие электронного пучка лишь с ( $-1^{\text{й}}$ ) пространственной гармоникой встречной волны. Как следствие, эффективность одночастотной генерации резонансной ЛОВ не превышала 20%.

Данная работа посвящена численному и экспериментальному исследованию резонансной релятивистской ЛОВ с учетом взаимодействия электронного пучка как со встречной, так и с попутной электромагнитными волнами с целью повышения эффективности генерации, мощности излучения и уменьшения длины прибора. Последнее требование существенно при создании генератора в дециметровом диапазоне длин волн.

Конфигурация исследуемой резонансной релятивистской ЛОВ представлена на рис. 1. Электронный пучок формировался в коаксиальном вакуумном диоде с магнитной изоляцией и инжектировался в электродинамическую систему через запредельное сужение, служащее для отражения встречной электромагнитной волны в сторону коллектора. Электроны эмитировались со взрывоземиссионного цилиндрического графитового катода. Для улучшения продольного распределения ВЧ-поля и реализации оптимальных условий взаимодействия электронного пучка с ( $-1^{\text{й}}$ ) гармоникой встречной волны и основной гармоникой попутной волны использовалось частичное отражение рабочей моды  $TM_{01}$  от коллекторного конца ЗС. Отражение обеспечивалось



**Рис. 1.** Конфигурация резонансной ЛОВ: 1 — катод, 2 — запердельное сужение, 3 — вставка, 4 — замедляющая структура, 5 — выходной отражатель.

уменьшением среднего радиуса ЗС и позволяло варьировать добротность ( $Q$ ) электродинамической системы. Отрезок гладкого цилиндрического волновода между запердельным сужением и началом ЗС служил для подстройки оптимального сдвига фазы между основной гармоникой попутной и  $(-1^{\text{й}})$  гармоникой встречной электромагнитных волн. Отношение амплитуд гармоник на траектории электронного пучка задавалось глубиной гофрировки ЗС. Импеданс вакуумного диода варьировался изменением зазора между катодом и анодом. Фокусирующее магнитное поле напряженностью до 30 кОе создавалось импульсным соленоидом.

Генератор оптимизировался с использованием численного РИС-кода КАРАТ [8]. Моделирование проводилось с магнитоизолированным вакуумным диодом. Напряжение на диод подавалось по коаксиальной линии в виде  $TEM$ -волны. Длина ЗС выбиралась в соответствии с соотношением (1) и варьировалась в пределах  $L_{sws} = (2-4)\lambda$ . Моделирование показало, что при оптимальной геометрии электродинамической системы:  $L_{sws} \approx 2.5\lambda$ ,  $L_{ins} \approx \lambda$ ,  $l \approx \lambda/8$ ,  $R \approx \lambda/2$ ,  $d \approx \lambda/2$ ,  $Q \approx 100$ ,  $R_b/R \approx 0.7$ , КПД генерации составляет  $\sim 30\%$  и изменяется незначительно в широком диапазоне мощностей электронного пучка (от 5 до 20 GW). Оптимальный импеданс вакуумного диода составляет около 90 Ohm, время нарастания микроволновых колебаний  $\sim 20$  ns.

Было обнаружено, что при изменении длины цилиндрической вставки между запредельным сужением и ЗС происходит периодическое скачкообразное изменение продольного индекса стоячей электромагнитной волны. Число вариаций поля на длине электродинамической системы изменялось в пределах 2–6. В точках скачков наблюдалась многочастотная генерация со значительным падением мощности. В пределах одного продольного индекса перестройка частоты составляла 3–4%.

В работе также проводились исследования возможности широкополосной перестройки частоты генерации резонансной ЛОВ посредством варьирования периода ЗС при неизменных параметрах электронного пучка. При относительно небольшой глубине гофрировки  $l \ll R$  условие черенковского синхронизма можно записать в виде

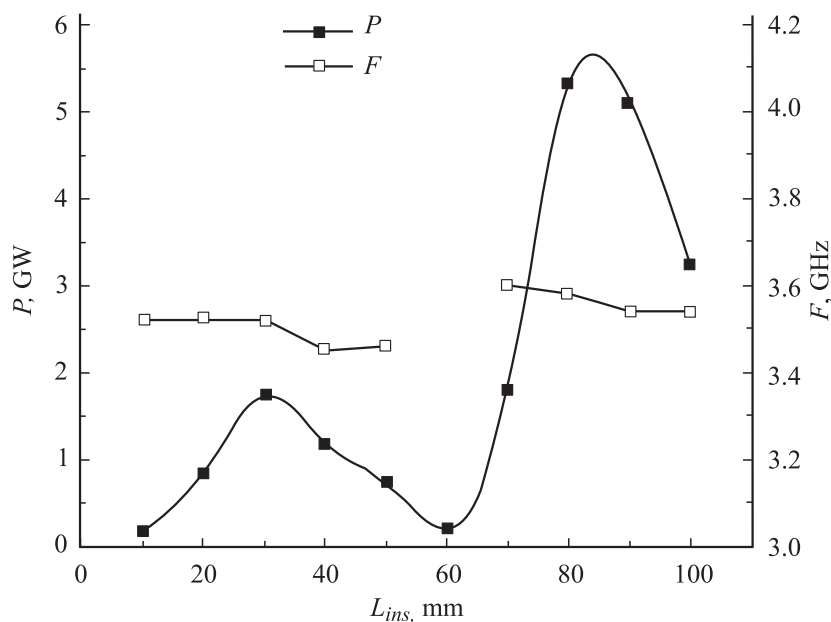
$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{\lambda}{d} \frac{\beta_e}{(1 + \beta_e\beta_{ph})} \frac{\Delta d}{d}.$$

Для ЛОВ с энергией электронов 1 MeV

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx (0.4 \div 0.5) \frac{\Delta d}{d}.$$

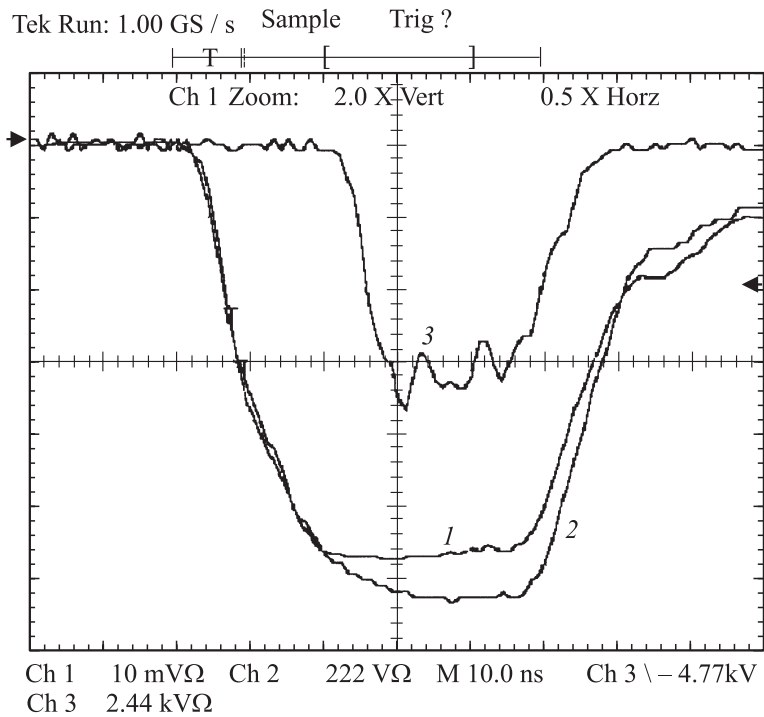
Численное моделирование показало, что полоса перестройки частоты генерации в резонансной ЛОВ ограничена снизу и сверху критическими частотами ЗС и запредельного сужения соответственно и может достигать 25% (по половинному уровню мощности). Однако при варьировании периода ЗС для оптимизации взаимодействия электронного пучка с попутной волной необходимо изменение длины вставки между запредельным сужением и ЗС.

Экспериментальные исследования резонансной ЛОВ в дециметровом диапазоне длин волн проводились на сильноточном электронном ускорителе «Синус-7» [9]. Генератор оптимизировался по импедансу вакуумного диода и длине вставки между запредельным сужением и ЗС. Варьирование длины вставки (рис. 2) приводило к изменению частоты генерации в полосе  $\sim 3\%$ . Многочастотная генерация с характерным провалом мощности излучения наблюдалась при длине вставки  $\sim 0.7\lambda$ . В оптимальном режиме на частоте 3.6 GHz была получена генерация с эффективностью около 30%. При напряжении на катоде 1.2 MV и токе электронного пучка 15 kA мощность излучения составляла 5.3 GW,



**Рис. 2.** Зависимости мощности и частоты излучения от длины вставки между запердельным сужением и ЗС ( $d = 45$  mm,  $H = 20$  kOe).

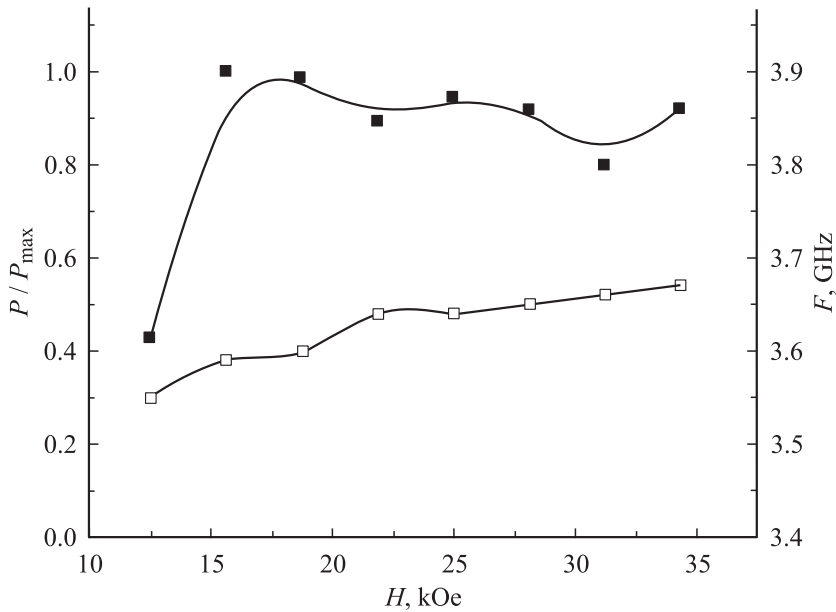
длительность микроволнового импульса  $\sim 25$  ns (по половинному уровню мощности). Мощность микроволнового излучения измерялась с помощью калиброванных дипольных антенн суммированием по диаграмме направленности. Энергия, измеренная калориметром, конструкция которого была аналогична описанной в работе [2], достигала  $\sim 100$  J. Типичные формы импульсов напряжения на катоде, тока электронного пучка и сигнала с микроволнового детектора приведены на рис. 3. Диаграмма направленности соответствовала излучению  $TM_{01}$  волны из рупорной антенны. Как и в численном моделировании, эффективность генерации изменялась незначительно при изменении мощности электронного пучка от 5 до 19 GW. Оптимальный импеданс диода составлял около  $80 \Omega$ .



**Рис. 3.** Типичные осциллограммы напряжения на катоде (1), тока электронного пучка (2) и сигнала с микроволнового детектора (3).

Зависимость мощности излучения от величины фокусирующего магнитного поля (рис. 4) имела провал в области магнитных полей ниже 15 кОе. Как показало численное моделирование, спад мощности был обусловлен частичным выпадением электронов пучка на поверхность ЗС под действием интенсивных ВЧ-полей. С уменьшением мощности электронного пучка граница провала смещалась в область низких магнитных полей. Нижний предел по величине фокусирующего магнитного поля может быть также связан с циклотронным поглощением встречной электромагнитной волны электронным пучком [10,11].

В эксперименте путем изменения периода ЗС от 38 до 48 мм и соответствующей подстройке длины вставки была получена перестройка частоты генерации в полосе около 15% (по половинному уровню



**Рис. 4.** Зависимости мощности и частоты излучения от величины фокусирующего магнитного поля (напряжение на катоде 1.2 MV, ток пучка 15 kA).

мощности). Параметры электронного пучка и величина фокусирующего магнитного поля при этом не изменялись.

Таким образом, за счет улучшения продольного распределения ВЧ поля посредством отражения рабочей моды  $TM_{01}$  от концов электродинамической системы и оптимизации взаимодействия электронного пучка как со встречной, так и с попутной волнами, удалось повысить эффективность генерации резонансной ЛОВ до 30%. Важным достоинством резонансной ЛОВ в сравнении с обычной релятивистской ЛОВ является также меньшая длина пространства взаимодействия ( $\sim 3\lambda$ ), требующая меньших затрат энергии на создание фокусирующего магнитного поля. В дециметровом диапазоне длин волн получена импульсная мощность одномодового излучения около 5 GW. Показана возможность перестройки частоты генерации резонансной ЛОВ посредством изменения периода ЗС в полосе 15%.

## Список литературы

- [1] Бункин Б.В., Гапонов-Грехов А.В., Ельчанинов А.С. и др. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 9. С. 61–64.
- [2] Гунин А.В., Кицанов С.А., Климов А.И. и др. // Изв. вузов. Физика. 1996. Т. 39. № 12. С. 56–61.
- [3] Братман В.Л., Гинзбург Н.С., Ковалев Н.Ф. и др. // Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1979. С. 249–274.
- [4] Ельчанинов А.С., Загулов Ф.Я., Ковалев Н.Ф. и др. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 4. В. 23. С. 1443–1447.
- [5] Коровин С.Д., Полевин С.Д., Ройтман А.М. и др. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 1. С. 12–16.
- [6] Юлпатов В.К. // Изв. вузов. Радиофизика. 1970. Т. 13. № 12. С. 1784–1787.
- [7] Levush B., Antonsen T., Bromborsky A. et al. // IEEE Transaction on Plasma Science. 1992. V. 20. N 3. P. 263–280.
- [8] Tarakanov V.P. User's Manual for Code KARAT. Springfield: BRA, 1992.
- [9] Коровин С.Д., Ростов В.В. // Изв. вузов. Физика. 1996. Т. 39. № 12. С. 21–30.
- [10] Elchaninov A.S., Zagulov F.Ya., Korovin S.D. et al. // Proc 4th Int. Conf. On High Power Electron and Ion Beams. Palaiseau, 1981. V. 2. P. 847–852.
- [11] Абубакиров Э.Б., Белоусов В.И., Варганов В.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. В. 9. С. 533–536.