

Релятивистская лампа обратной волны с селективным трансформатором мод

© Э.Б. Абубакиров, А.Н. Денисенко, Н.Ф. Ковалев, Е.А. Копелович, А.В. Савельев, Е.И. Солуянов, М.И. Фукс, В.В. Ястребов

Институт прикладной физики РАН,
603600 Нижний Новгород, Россия

(Поступило в Редакцию 4 июня 1998 г.)

Предложен и экспериментально исследован новый вариант релятивистской ЛОВ, в которой запредельное для рабочей волны сужение на катодном конце заменено на селективный брегговский трансформатор мод. В экспериментальном макете ЛОВ трехсантиметрового диапазона с трансформатором мод на основе слабофрированного волновода при ускоряющем напряжении 0.8 MV и фокусирующем магнитном поле 7 kOe получено излучение мощностью 700 MW в импульсах длительностью до 100 ns с выходной пространственной структурой, близкой к гауссовому волновому пучку.

Введение

В традиционной конструкции релятивистской лампы обратной волны (ЛОВ) большой мощности вывод СВЧ излучения из пространства взаимодействия осуществляется через коллекторную область, находящуюся под нулевым потенциалом. Для этого обычно используется запредельное сужение, отражающее рабочую волну ЛОВ от катодного конца электродинамической системы и не препятствующее прохождению электронного пучка. Такая компоновка прибора позволяет использовать в высокочастотном тракте сверхразмерные элементы, наиболее адекватные мощному СВЧ излучению, в частности дифракционный вывод и коническую антенну с большой апертурой. Однако применение запредельного сужения накладывает ряд ограничений на выходные характеристики ЛОВ. Во-первых, поскольку закритическое сечение является одновременно и волновым рефлектором, и диафрагмой для электронного пучка, то в ЛОВ со сверхразмерной электродинамической системой в качестве рабочей волны используется, как правило, одна из высших мод. Поэтому излучение имеет сложное распределение, тогда как для практического использования чаще всего требуется простая структура, например волновой пучок. Во-вторых, отражение рабочей волны приводит к усилению высокочастотного электрического поля в пространстве взаимодействия ЛОВ, следовательно, возрастает опасность высокочастотного пробоя (как правило, все электродинамические системы в мощных релятивистских ЛОВ имеют следы эрозии, положение которых соответствует пучностям электрического поля). Кроме того, паразитное взаимодействие электронного пучка с отраженной волной E -типа может снизить эффективность и стабильность работы ЛОВ, а также исказить структуру выходного излучения [1,2].

ЛОВ со встроенным трансформатором мод

Вышеперечисленные неблагоприятные факторы, влияющие на структуру выходного излучения, могут быть в значительной степени ослаблены путем замены запредельного сужения на селективный преобразователь мод, с помощью которого можно трансформировать рабочую моду ЛОВ в попутную волну с любой желаемой структурой. Для практических применений наиболее привлекательны простые структуры излучения, поэтому желательно в качестве попутной волны, выводящей излучение из пространства взаимодействия, использовать одну из наших мод. Поскольку низшие волны имеют большую групповую скорость и, следовательно, меньшую амплитуду электрического поля, то уменьшается опасность возникновения высокочастотного пробоя. С применением трансформатора, обладающего селективностью как по частотам, так и по типам волн, повышается степень когерентности выходного излучения ЛОВ. Вывод СВЧ мощности из пространства взаимодействия низшей модой облегчает решение еще одной практической проблемы, особенно важной при работе прибора с высокой частотой следования импульсов, — повысить эффективность ЛОВ при малом фокусирующем магнитном поле [3,4].

Наконец, если осуществить преобразование рабочей волны ЛОВ в попутную гибридную волну слабофрированного волновода, структура которой близка к волне H -типа регулярного цилиндрического волновода, то из-за исчезающе малой продольной компоненты электрического поля паразитное взаимодействие электронного пучка с этой попутной волной будет пренебрежимо малым.

Селективный преобразователь мод для ЛОВ

Наиболее приемлемым вариантом трансформатора мод для ЛОВ является брэгговский рефлектор в виде отрезка цилиндрического волновода с гофрированной стенкой [5]. Такой трансформатор совместим с мощным электронным пучком и обладает достаточно высокой электропрочностью. Работа брэгговского рефлектора основана на резонансном рассеянии рабочей волны периодической гофрировкой. В цилиндрическом волноводе с периодической n -заходной винтовой или осесимметричной ($n = 0$) гофрировкой азимутальные индексы связываемых волн определяются соотношениями

$$m_{i1} \pm n = m_{i2}, \quad (1)$$

а сумма продольных постоянных распространения этих мод равна постоянной $\bar{h}_r = 2\pi/d_r$ периодической (d_r — период) системы рефлектора

$$h_{i1} + h_{i2} = \bar{h}_r \quad (2)$$

(i — номер пары связываемых мод).

На рис. 1 показана зависимость коэффициента трансформации мод K_p (по мощности) от расстройки

$$\Delta = (\bar{h}_r - h_{i1} - h_{i2})L/2 \quad (3)$$

для рефлектора длиной L [5,6]. Чтобы обеспечить переизлучение рабочей волны ЛОВ в желаемую попутную волну и при этом исключить переизлучение в паразитные моды, полоса трансформации мод рабочей структуры поля (рис. 1) не должна перекрываться полосами соседних структур, спектр которых

$$k_i = \left[(\bar{h}_r^2 + k_{i1}^2 + k_{i2}^2)^2 - 4k_{i1}^2 k_{i2}^2 \right]^{1/2} / 2\bar{h}_r \quad (4)$$

($k_{i1} = 2\pi/\lambda_i$; λ_i — длина волны; k_{i1} , k_{i2} — поперечные волновые числа) определяется соотношением (2). Наибольшее различие между частотами рабочей и соседней резонансных структур имеет место при участии в рабочей структуре высокочастотного поля квазипоперечной моды, частота которой близка к критической. Именно такая ситуация реализуется в брэгговском рефлекторе, используемом в ЛОВ.

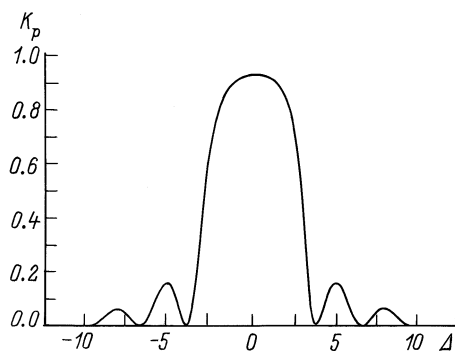


Рис. 1. Зависимость коэффициента трансформации мод (отношений мощностей) брэгговского рефлектора от расстройки.

ЛОВ с циклотронно-резонансной селекцией мод

Для практической реализации генератора со встроенным трансформатором мод была выбрана ЛОВ, работающая на моде E_{02} . Режим одномодовой генерации в многомодовом пространстве взаимодействия ЛОВ, работающей в условиях черенковского синхронизма с (-1) -й пространственной гармоникой рабочей волны

$$\omega = (\bar{h} - h)\nu, \quad (5)$$

обеспечивается методом селекции мод, основанном на резонансном взаимодействии быстрой циклотронной волны электронного пучка, направляемого продольным магнитным полем H , с основной гармоникой рабочей волны [7], т. е. при условии

$$\omega + h\nu = \omega_H. \quad (6)$$

Здесь ω и h — частота и продольное волновое число рабочей волны ЛОВ, ν — поступательная скорость электронов, $\bar{h} = 2\pi/d$, d — период электродинамической системы ЛОВ, $\omega_H = eH/mc\gamma$ — циклотронная частота, e и m — заряд и масса покоя электрона, c — скорость света, γ — релятивистский фактор.

В отсутствие поперечных скоростей электронов при влете в пространство взаимодействия, если одновременно выполняются условия (5), (6), т. е. выбирается величина магнитного поля, отвечающая соотношению

$$\omega_H = \bar{h}\nu, \quad (7)$$

происходит поглощение электромагнитной энергии быстрой циклотронной волной электронного пучка [8]. Как следует из условия (7), в котором отсутствуют индивидуальные характеристики мод, подавление генерации происходит для всех волн одновременно. Исключением является мода, для которой интенсивность циклотронного взаимодействия с вращающейся поперечной структурой поля, пропорциональная фактору $J_{m\pm 1}^2(\nu_{mn}r/R)$, равна нулю. Здесь r — радиус трубчатого электронного пучка, R — средний радиус электродинамической системы, ν_{mn} — n -й корень функции Бесселя $J_m(\nu) = 0$ для E_{mn} -волны или производной от функции Бесселя $J'_m(\nu) = 0$ для H_{mn} -волны, знаки $+$, $-$ относятся к различным направлениям вращения поперечной структуры волны. Для рабочей моды E_{02} циклотронное поглощение отсутствует при $r/R = 0.693$. Следует заметить, что в черенковских генераторах сантиметрового диапазона длин волн необходимое для эффективной работы сильное фокусирующее магнитное поле существенно снижается при использовании циклотронно-резонансного метода селекции мод.

Работа релятивистских ЛОВ сантиметрового диапазона с традиционной компоновкой при магнитных полях, меньших резонансной величины (7), малоэффективна, поскольку в области слабых магнитных полей имеется

еще один циклотронный резонанс, приводящий к сильному поглощению высокочастотной мощности. Это — резонанс с прямой волной

$$\omega - h\nu = \omega_H, \quad (8)$$

выводящей излучение из пространства взаимодействия ЛОВ. Интервал магнитных полей H между резонансами (6), (8)

$$e(H_2 - H_1)/mc^2 = 2h(\gamma^2 - 1)^{1/2}, \quad (9)$$

в котором возможна работа генератора, невелик, поскольку обычно в ЛОВ постоянная распространения рабочей волны h значительно меньше k и низкая эффективность работы прибора в этом интервале обусловлена влиянием близких циклотронных резонансов.

Использование низшей моды для вывода излучения из пространства взаимодействия позволяет значительно расширить этот интервал магнитных полей H до

$$e(H_2 - H_1)/mc^2 \approx (k + h)(\gamma^2 - 1)^{1/2} \quad (10)$$

из-за сдвига резонанса (8) с попутной волной, для которой фазовая скорость близка к скорости света, в сторону меньших значений H . Это дает возможность выбрать такое значение магнитного поля, при котором влияние циклотронных эффектов на эффективность индуцированного черенковского излучения практически отсутствует.

Экспериментальное исследование ЛОВ с брэгговским рефлектором

Эксперименты проводились с генератором, схема которого показана на рис. 2. Основные расчетные параметры генератора: энергия электронов 0.8 MeV, ток пучка 6 кА, электродинамическая система ЛОВ 2 — отрезок цилиндрического волновода с периодической осесимметричной гофрировкой синусоидального профиля, частота генерации на моде E_{02} 9.1 GHz, ожидаемая мощность излучения более 0.5 GW. Электродинамическая система 1 брэгговского рефлектора — отрезок цилиндрического волновода с однозаходной ($n = 1$) винтовой гофрировкой синусоидального профиля, расчетный коэффициент преобразования мощности падающей моды E_{02} в мощность отраженной вращающейся моды H_{11} на частоте 9.1 GHz $K_P = 91.2\%$, полоса преобразования 4%.

В экспериментах использовался высокоточный электронный ускоритель с взрывоэмиссионным холодным

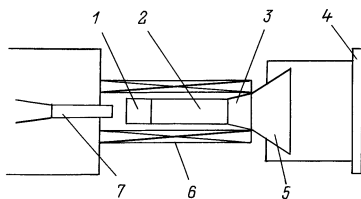


Рис. 2. Схема исследуемого генератора.

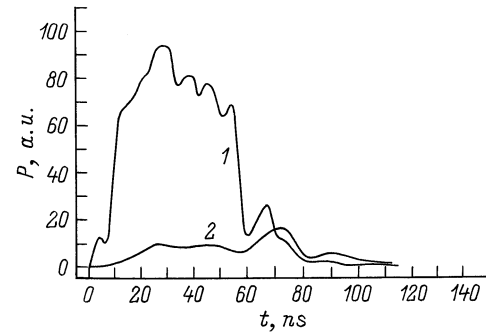


Рис. 3. Оциллограммы огибающих СВЧ импульсов на выходе поляризатора, настроенного на циркулярно-поляризованное излучение с левым (1) и правым (2) вращением.

катодом 7. Ускоряющее напряжение на диоде с магнитной изоляцией менялось в пределах 0.7–1.1 MV в импульсе длительностью 200 ns, ток пучка от 5 до 7 кА, диаметр пучка от 41 до 47 mm. Для фокусировки электронного пучка использовался соленоид 6, обеспечивающий напряженность магнитного поля до 20 кОе в импульсах длительностью 10 ms. Излучение выводилось из электродинамической системы 2 генератора рупорной антенной 3, формирующей волновой пучок, через резонансное вакуумноплотное полиэтиленовое окно 4 диаметром 40 mm, толщина которого для обеспечения механической прочности была выбрана равной длине волны. Отрабатанный электронный пучок осаживался на коллекторе 5, находящемся вне высокочастотного поля. В таком коллекторе заполнение высокочастотного канала плазмой, образующейся при осаждении электронов, происходит значительно медленнее, чем в коллекторе, являющемся частью высокочастотного тракта [9].

Частота генерируемого импульса измерялась в центре диаграммы излучения при помощи волноводного переключателя по частоте полосового фильтра. Измерения показали, что частота генерации близка к расчетной.

Поляризации излучения определялась при помощи устройства, в котором использовалась диэлектрическая пластина, расположенная в диаметральной плоскости цилиндрического волновода. Размеры пластины были подобраны таким образом, чтобы на рабочей частоте циркулярно поляризованное излучение, падающее на цилиндрический волновод, преобразовывалось в линейно поляризованное и проходило в плавно сочлененный с ним прямоугольный волновод, когда по отношению к этому прямоугольному волноводу пластина установлена под 45° . Соответственно при угле 135° излучение отражается от прямоугольного волновода. На рис. 3 показаны сигналы ЛОВ после такого поляризатора при двух положениях пластины, показывающие, что поляризация наблюдаемого излучения близка к циркулярной.

Пространственная структура выходного излучения измерялась для вертикальной и горизонтальной поляризаций в плоскости, находящейся на расстоянии 4 m от из-

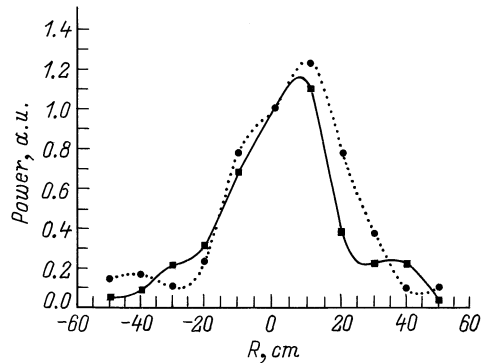


Рис. 4. Распределение интенсивности излучения ЛОВ на расстоянии 4 м от излучающего конуса.

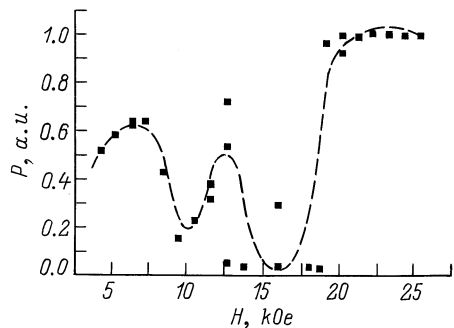


Рис. 5. Зависимость выходной мощности генератора от фокусирующего магнитного поля.

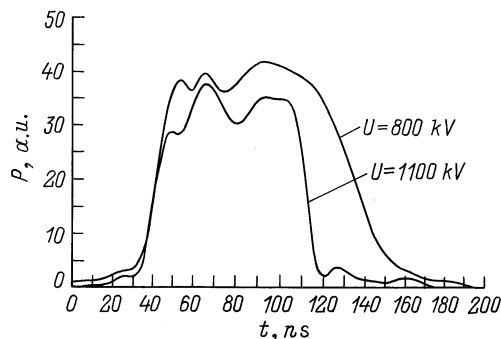


Рис. 6. Осциллограммы огибающих выходного излучения при различных ускоряющих напряжениях.

лучающего конуса 3 , в горизонтальном и вертикальном направлениях. Результаты измерений (рис. 4) хорошо совпадают с эталонным распределением, полученным при возбуждении выходного тракта ЛОВ волной H_{11} цилиндрического волновода, которая затем в излучающем конусе преобразовывалась в волновой пучок. Таким образом, измерения частоты, поляризации и структуры выходного излучения убеждают, что ЛОВ работает, как и ожидалось, на моде E_{02} и полоса рефлектора перекрывается с полосой генерации ЛОВ.

Особый интерес для данной версии ЛОВ вызывает зависимость выходной мощности от напряженности

ведущего магнитного поля (рис. 5). Так как радиус электронного пучка в ЛОВ выбран равным $r/R = 0.693$ для минимизации интенсивности циклотронного взаимодействия электронов с рабочей модой E_{02} , то зона циклотронного поглощения при $H = 10$ кОе относительно невелика. Однако в окрестности $H = 16$ кОе появилась дополнительная зона циклотронного поглощения, соответствующая резонансному ($\omega_H = \bar{h}_r \nu$) переизлучению в рабочем объеме брэгговского рефлектора встречной электромагнитной волны E_{02} в быстрые циклотронные волны электронного пучка. Вместе с тем, как и ожидалось, использование для вывода энергии из ЛОВ волны с относительно малой фазовой скоростью позволило явно выделить окно прозрачности в области малых магнитных полей. Оптимизация выходной мощности по радиусу электронного пучка в области слабых магнитных полей $H = 7$ кОе позволила достичь 0.7 GV в импульсах длительностью 100 ns при КПД около 15% .

Увеличение ускоряющего напряжения (и соответственно тока пучка) не приводит к ожидаемому увеличению выходной мощности. Импульсы излучения становятся более короткими и нерегулярными (рис. 6), что, скорее всего, свидетельствует о возникновении высокочастотного пробоя в СВЧ тракте (в электродинамической системе ЛОВ и/или на выходном окне).

Заключение

Результаты экспериментального исследования показали существенное улучшение рабочих характеристик релятивистской ЛОВ при замене традиционного запредельного сужения на катодном конце электродинамической системы на селективный брэгговский рефлектор.

Список литературы

- [1] Абубакиров Э.Б., Петелин М.И. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 6. С. 1085–1089.
- [2] Коровин С.Д., Полевин М.И., Ройтман А.М., Ростов В.В. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. Вып. 1. С. 12–16.
- [3] Abubakirov E.B., Fuchs M.I., Kolganov N.G. et al. // *Microwaves in Plasmas*. Nizhny Novgorod: IAP RAS, 1996. Vol. 2. P. 810–828.
- [4] Clunie D., Mesyats G., Osipov M.I. et al. // *Strong Microwaves in Plasmas*. Nizhni Novgorod: IAP RAS, 1996. Vol. 2. P. 886–902.
- [5] Каценеленбаум Б.З. Теория нерегулярных волноводов с медленно меняющимися параметрами. М.: Изд-во АН СССР, 1981.
- [6] Ковалев Н.Ф., Орлова И.М., Петелин М.И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1968. № 11. С. 783–786.
- [7] Абубакиров Э.Б., Белоусов В.И., Варганов В.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. Вып. 9. С. 533–536.
- [8] Абубакиров Э.Б., Гинзбург Н.С., Ковалев Н.Ф., Фукс М.И. // РЭ. 1989. Т. 34. № 9. С. 1058–1066.
- [9] Быков А.М., Губанов В.П., Гунин А.В. и др. // Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1988. Вып. 5. С. 101–124.