

УДК 535.374:621.375.8, 533.9.082.74

С. В. Кузиков, Н. Ю. Песков, М. Е. Плоткин

Институт прикладной физики РАН
ул. Ульянова, 46, Нижний Новгород, 603950, Россия

E-mail: mplotkin@appl.sci-nnov.ru

**ОТКРЫТЫЙ БРЭГГОВСКИЙ РЕЗОНАТОР С ГАУССОВЫМ ВОЛНОВЫМ ПУЧКОМ
ДЛЯ МОЩНОГО МАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ
САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН**

Предложен резонатор для тридцатигигагерцового мазера на свободных электронах (МСЭ), обладающий высокой модовой селективностью. Резонатор состоит из двух брэгговских рефлекторов с перекрывающимися полосами отражения и разделенным для селекции широким в масштабе длины волны промежутком. Отражатели синтезированы методом связанных волн. Рабочая мода в области зазора между рефлекторами представляет собой гауссов пучок малого диаметра, так что ее поле оторвано от стенок, а потери излучения через зазор малы. В то же время конкурирующие моды претерпевают на зазоре существенные дифракционные потери. В расчетах продемонстрировано трехкратное превышение добротности рабочей моды над добротностями находящихся в пределах брэгговской полосы паразитных мод. В изготовленном модельном резонаторе для имитации открытого участка использовалась уширенная цилиндрическая секция волновода, покрытая поглощающим материалом – альсифером. При тестировании модельного резонатора на низком уровне мощности в брэгговской полосе наблюдалось единственное высокодобротное колебание с частотой, соответствующей расчетной для рабочей моды.

Ключевые слова: МСЭ, гауссов волновой пучок, брэгговский рефлектор, метод связанных волн.

Введение

В настоящее время в совместных экспериментах Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) и Института прикладной физики (ИПФ) РАН разрабатывается мощный мазер на свободных электронах (МСЭ) на частоту 30 ГГц для ускорительных приложений [1; 2]. Данный МСЭ запитывается линейным индукционным ускорителем ЛИУ-3000 (ОИЯИ) 0,8 МэВ / 200 А / 250 нс. Достигнутые параметры генератора составляют ~ 20 МВт мощности излучения в импульсах длительностью 200 нс с частотой следования до 1 Гц и шириной спектра ~ 6 МГц, близкой к теоретическому пределу. Высокая мощность и эффективность этого источника достигнуты при использовании брэгговского резонатора, состоящего из двух гофрированных волноводных секций со скачком фазы гофрировки между ними π . Рабочая мода резонатора состоит из прямой волны TE_{11} , эффективно взаимодействующей с электронным пучком,

и встречной волны TM_{11} [3]. Резонатор данного типа обладает высокой модовой селективностью и обеспечивает стабильный узкополосный режим генерации в МСЭ. При оптимальном выборе параметров гофрированных секций рабочая мода данного резонатора, расположенная в центре полосы непрозрачности брэгговских структур, имеет наивысшую добротность ($Q \sim 1\,000$) среди других мод, обладающих заметной связью с электронным пучком.

Однако резонатор на встречных модах TE_{11} и TM_{11} обладает и некоторыми недостатками. Стык брэгговских рефлекторов, где поле рабочего колебания максимально, ослабляет электропрочность резонатора по отношению к пристеночному СВЧ пробоя, что усугубляется изломом производной профиля поверхности в этом месте из-за скачка фазы гофрировки на π . Во-первых, эксперименты показали, что выходная мощность и длительность выходного импульса МСЭ ограничены из-за возникновения пробоя в резонаторе. Во-вторых, сохранение

селективных свойств резонатора наталкивается на трудности при необходимости расширения поперечного сечения резонатора с целью увеличения тока и выходной мощности излучения МСЭ. В этом случае число паразитных мод быстро нарастает с увеличением диаметра волновода. Некоторые нежелательные моды при этом способны достичь дифракционной добротности, сравнимой с добротностью рабочей моды. Проблемы с селекцией могут возникать также в случае необходимости увеличения дифракционной добротности. В-третьих, как было показано в [4], в резонаторах с различающимися поперечными структурами прямой и встречной волн всегда существуют два вырожденных колебания. В случае резонатора с прямой волной TE_{11} и встречной TM_{11} второе вырожденное колебание образовано прямой волной TM_{11} и встречной TE_{11} . Нежелательное возбуждение паразитного вырожденного колебания наблюдалось как в ходе «холодного» тестирования, так и в «горячих» экспериментах.

В качестве одного из возможных решений проблемы селекции рассматривается использование резонатора с гауссовым пучком в качестве рабочей моды.

Брэгговский резонатор на гауссовом волновом пучке

Предлагаемый дизайн резонатора представлен на рис. 1, на котором показан аксиально-симметричный, широкий в масштабе длины волны зазор между двумя брэггов-

скими секциями. Наличие этого зазора обеспечивает дополнительные дифракционные потери для паразитных мод, в то время как рабочая мода к ней не чувствительна, поскольку ее поле в этой области близко к нулю.

Указанное решение реализуется в круглом волноводе при помощи суперпозиции мод TE_{11} и TM_{11} [5]. Эти моды, взятые в соотношении 85 и 15 % с нулевой разностью фаз, создают распределение поля, имеющее высокий коэффициент корреляции с гауссовым пучком (~ 98 %). Задача, таким образом, сводится к созданию двух (входного и выходного) брэгговских рефлекторов, каждый из которых обеспечивает отражение гауссова пучка с сохранением его поперечной структуры, т. е. комбинация мод TE_{11} и TM_{11} должна отражаться каждым из рефлекторов без изменения относительных амплитуд и фаз мод (рис. 2). Фаза отражения Гауссова пучка должна быть кратна нечетному числу π , чтобы после полного прохода излучения через весь резонатор возникал фазовый набег 2π , отвечающий условию существования собственного колебания на выбранной частоте. При этом выходной рефлектор должен иметь меньший коэффициент отражения гауссова пучка, чем входной, для обеспечения частичного вывода излучения из резонатора.

Рефлекторы рассчитывались на частоту 30 ГГц методом связанных волн. При выбранном опорном диаметре 20 мм в системе, помимо мод TE_{11} и TM_{11} , из которых синтезировалось рабочее колебание, распростра-

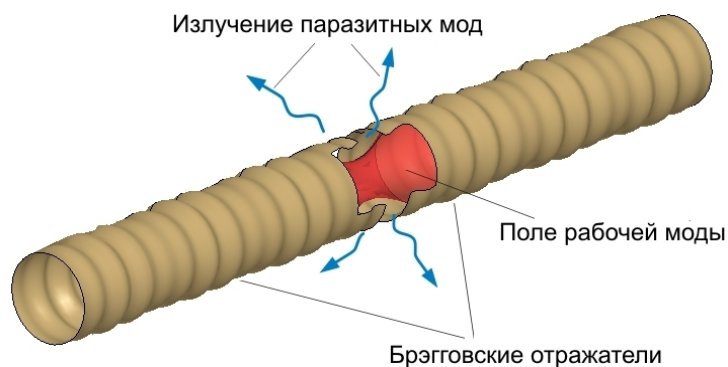


Рис. 1. Брэгговский резонатор с зазором для селекции паразитных колебаний (дополнительный вырез изображен для демонстрации структуры поля рабочего колебания)

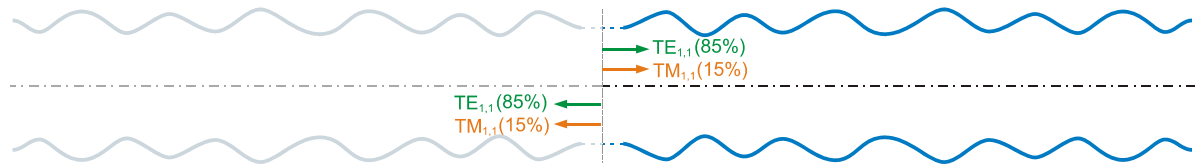


Рис. 2. Схематическое изображение брэгговского резонатора в виде двух отражателей суперпозиции мод TE_{11} и TM_{11}

нящейся является также еще одна мода с азимутальным индексом 1, а именно TE_{12} . В силу аксиальной симметрии системы моды с азимутальными индексами, отличными от 1, в задаче синтеза рефлекторов не учитывались. Таким образом, принимались во внимание лишь шесть мод: три указанные моды, распространяющиеся в прямом направлении, и три такие же моды, распространяющиеся в обратном направлении. Оптимизируемый профиль состоял, прежде всего, из двух гармоник, обеспечивающих условие брэгговского отражения для мод TE_{11} и TM_{11} , а также включал три вспомогательные гармоники, корректировавшие амплитуды и фазы отраженного от рефлектора излучения и служившие для подавления волны TE_{12} в отраженной смеси мод. Гармоники профиля имели следующие периоды:

$$d_1 = \frac{\pi}{h_{TE_{11}}}, \quad d_2 = \frac{\pi}{h_{TM_{11}}}, \quad d_3 = \frac{2\pi}{h_{TE_{11}} - h_{TM_{11}}},$$

$$d_4 = \frac{2\pi}{h_{TE_{11}} - h_{TE_{12}}}, \quad d_5 = \frac{\pi}{h_{TE_{12}}},$$

где $h_{TE_{11}}$, $h_{TM_{11}}$ и $h_{TE_{12}}$ – продольные постоянные распространения мод TE_{11} , TM_{11} и TE_{12} соответственно, взятые при среднем (опорном) радиусе волновода. В качестве свободных оптимизируемых параметров выступали амплитуды и фазы гармоник профиля. Целью оптимизации было получение отраженного излучения, содержащего 85 % мощности в моде TE_{11} и 15 % мощности в моде TM_{11} с фазами обеих мод, равными π (при условии, что падающие моды имеют нулевые фазы).

Для опорного диаметра волноводов 20 мм на частоте 30 ГГц были оптимизированы входной рефлектор длиной 280 мм с коэффициентом отражения более 98 % и выход-

ной рефлектор длиной 160 мм с коэффициентом отражения около 90 %, предназначенный для частичного вывода излучения из резонатора. Селективная щель между брэгговскими зеркалами на этом этапе расчета не учитывалась. В итоге оптимизации, выполненной на основе метода поперечных сечений, гауссов пучок в виде 85 % TE_{11} и 15 % TM_{11} отражается в суперпозицию $P_{TE_{11}} = 85,3\%$ моды TE_{11} и $P_{TM_{11}} = 14,4\%$ моды TM_{11} . Отличие фаз мод TE_{11} и TM_{11} от π на частоте 30 ГГц составило $-5 \cdot 10^{-4}\pi$ и $4,5 \cdot 10^{-4}\pi$ соответственно.

Удобно нормировать отраженные мощности волн на их целевые значения, т. е. вместо $P_{TE_{11}}$ и $P_{TM_{11}}$ рассматривать

$$\tilde{P}_{TE_{11}} = P_{TE_{11}} / 0,85$$

и

$$\tilde{P}_{TM_{11}} = P_{TM_{11}} / 0,15.$$

В этом случае цель оптимизации можно сформулировать как получение одинакового (в случае входного рефлектора близкого к единице, а в случае выходного рефлектора близкого к 0,9) значения обеих нормированных мощностей. Графики для нормированных мощностей приведены на рис. 3, где дополнительно показаны результаты проверочного расчета входного рефлектора с помощью HFSS. На рис. 4 приведены графики для фазы отраженных волн.

Анализ рис. 3 и 4 показывает наличие сдвига целиком всей брэгговской полосы преобразователя на 100÷150 МГц в область низких частот в расчете с помощью HFSS по сравнению с методом связанных волн. В остальном результаты, полученные с использованием HFSS, удовлетворительно согласуются с расчетом по методу связанных волн.

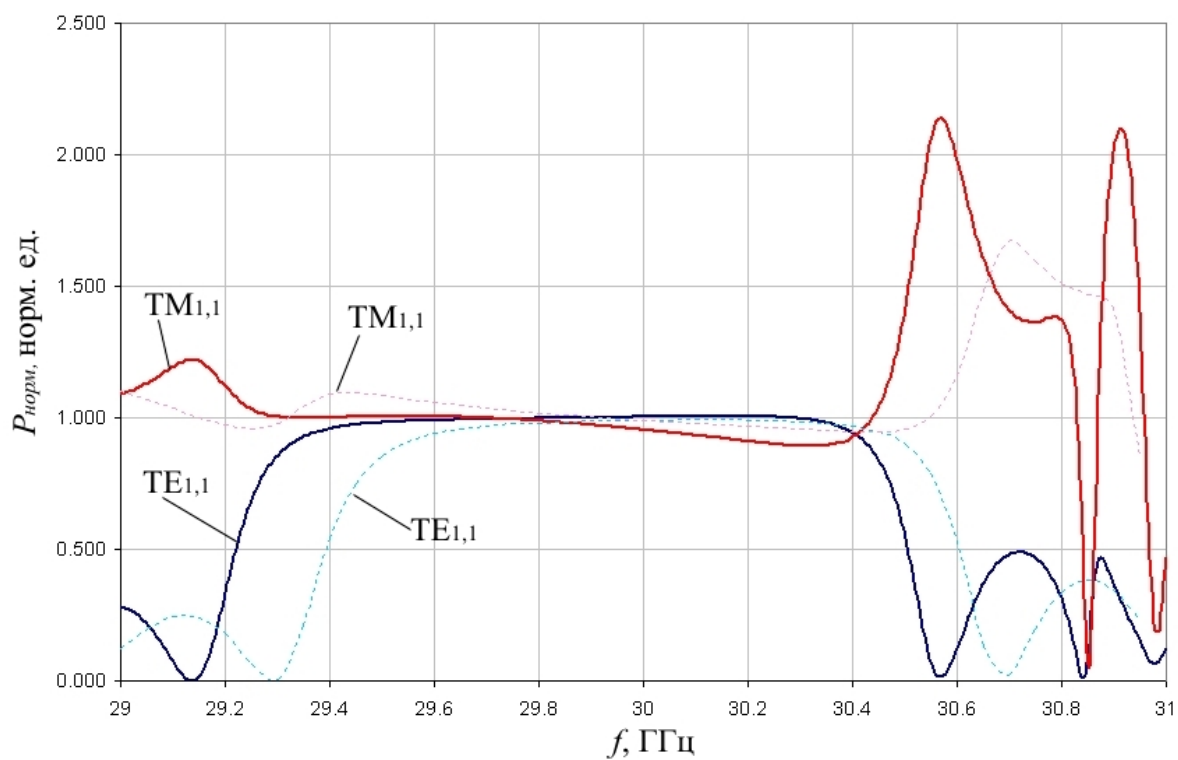


Рис. 3. Нормированные на целевое значение мощности отражения волн.
Пунктирные линии – расчет методом связанных волн, сплошные линии – проверка в HFSS

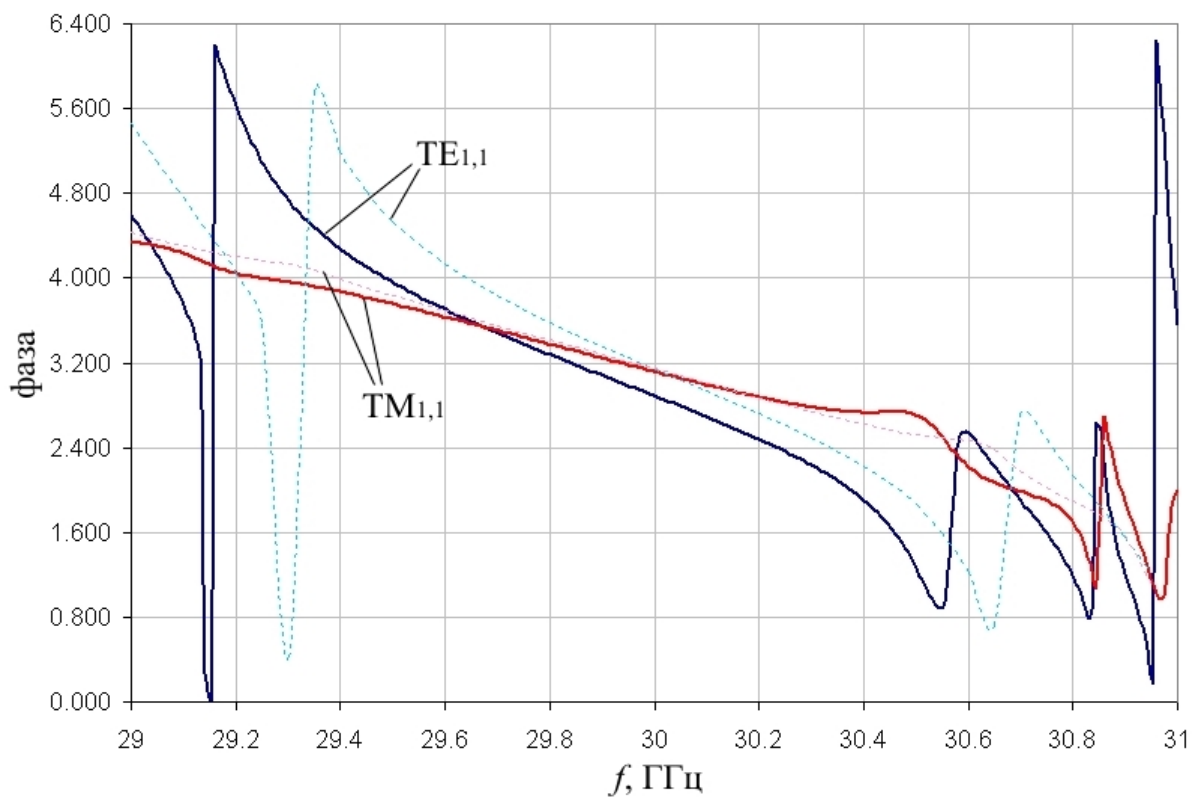


Рис. 4. Фазы отражения волн.
Пунктирные линии – расчет методом связанных волн, сплошные линии – проверка в HFSS

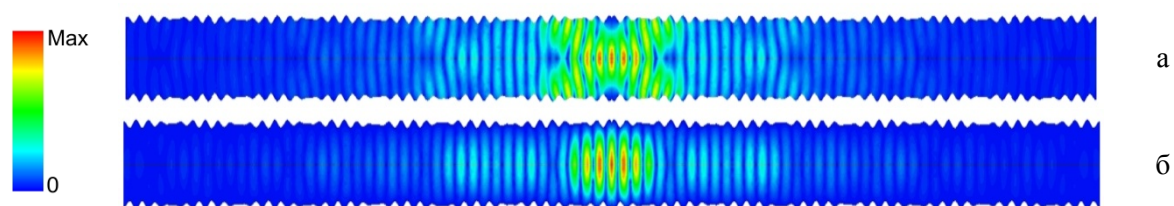


Рис. 5. Распределение усредненного по периоду модуля электрического поля в двух взаимно-перпендикулярных продольных сечениях брэгговского резонатора: *а* – электрическое поле параллельно плоскости сечения; *б* – электрическое поле перпендикулярно плоскости сечения

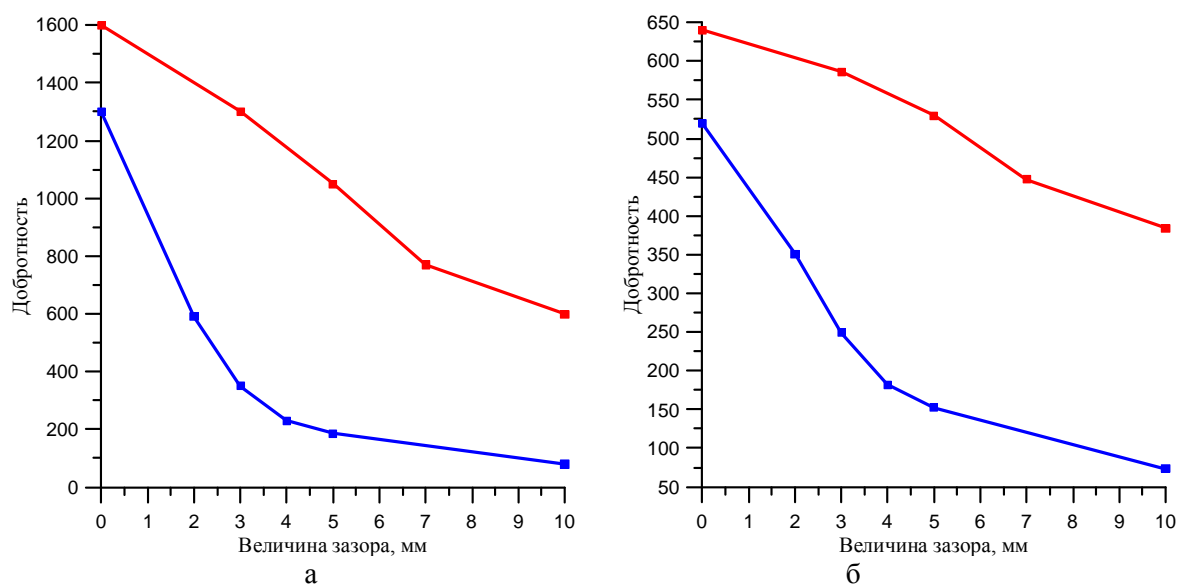


Рис. 6. Добротности рабочего (верхние кривые) и паразитного противофазного (нижние кривые) колебаний от величины зазора в брэгговском резонаторе на суперпозиции мод TE_{11} и TM_{11} : *а* – для симметричного резонатора, состоящего из двух входных рефлекторов; *б* – для резонатора, состоящего из входного и выходного рефлекторов (с коэффициентом отражения 90 %)

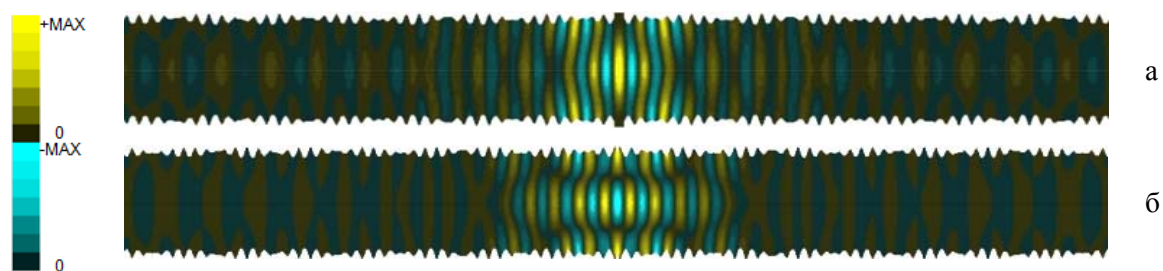


Рис. 7. Мгновенные распределения электрического поля рабочей (*а*) и паразитной (*б*) мод в симметричном резонаторе МСЭ, рассчитанные методом FDTD (электрическое поле параллельно плоскости рисунка)

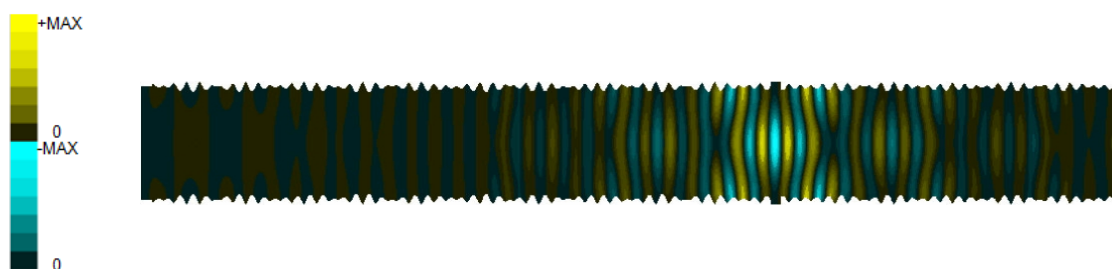


Рис. 8. Мгновенное распределение электрического поля рабочей моды в несимметричном резонаторе МСЭ, состоящем из входного и выходного рефлекторов (электрическое поле параллельно плоскости рисунка)

Моделирование селекции колебаний с учетом влияния промежутка между рефлекторами

На рис. 5 представлено распределение поля в брэгговском резонаторе, полученное с помощью расчета на HFSS. На HFSS моделировался лишь один рефлектор, который возбуждался гауссовым пучком в виде смеси мод TE_{11} и TM_{11} . Рис. 5 получен путем зеркального копирования левой части резонатора направо. На рис. 5, а вблизи центра резонатора есть область длиной 5–7 мм, в которой электрическое поле на стенках близко к нулю. Именно в этом месте резонатора предлагается выполнить зазор для подавления паразитных колебаний.

Влияние зазора на рабочее и паразитные колебания в полном резонаторе исследовалось путем моделирования методом FDTD [6]. Для возбуждения рабочего колебания в центральном поперечном сечении резонатора задавался источник тока с единственной отличной от нуля декартовой компонентой и гауссовым поперечным распределением. Источник работал на частоте, соответствующей центру брэгговской полосы рефлекторов, а время его работы выбиралось таким образом, чтобы возбуждались колебания в полосе шириной 1,5 ГГц. После выключения источника через каждые 35 пс записывалась амплитуда электрического поля в резонаторе. Запись данных производилась в течение промежутка времени, за который уровень поля успевал снизиться в несколько раз. По полученной зависимости поля от времени $E(t)$ с помощью Фурье-преобразования рассчитывался спектр колебаний резонатора и добротности найденных мод.

Моделирование было выполнено для различных размеров селектирующего промежутка d – от 0 до 10 мм. При этом открытое пространство за промежутком моделировалось поглощающим материалом с линейно нарастающими в радиальном направлении и равными между собой комплексными частями диэлектрической и магнитной проницаемостей.

На следующем этапе исследовались добротности паразитных колебаний резонатора. Были смоделированы следующие паразитные моды:

- 1) паразитная мода, соответствующая комбинации мод TE_{11} и TM_{11} с разностью фаз между модами в центральном сечении резонатора $\Delta\varphi = \pi$;
- 2) TE и TM моды с азимутальным индексом $m = 0$;
- 3) TE и TM моды с азимутальным индексом $m = 2$.

В пределах брэгговской полосы наиболее добротным среди всех паразитных колебаний оказалось противофазное колебание, образованное суперпозицией мод TE_{11} и TM_{11} с разностью фаз π . Зависимость добротности рабочей моды и данной паразитной моды от ширины зазора представлена на рис. 6 для случаев симметричного резонатора, составленного из двух одинаковых входных рефлекторов, и рабочего несимметричного резонатора, состоящего из входного и выходного рефлекторов. На рис. 7 приведены мгновенные распределения амплитуды электрического поля рабочей моды и указанной паразитной моды в симметричном резонаторе, а на рис. 8 приведено распределение поля рабочей моды в несимметричном резонаторе. В отсутствие селектирующего зазора в обоих, симметричном и

несимметричном резонаторах, добротность противофазной паразитной моды примерно равна добротности рабочей моды. В несимметричном резонаторе добротности мод ниже из-за высвечивания части накопленного в резонаторе излучения на выход МСЭ. Из рис. 7 видно, что поле паразитной моды велико вблизи зазора, поэтому при его расширении добротность паразитной моды быстро падает.

На основании приведенных расчетов было принято решение использовать резонатор с зазором шириной 5 мм. При этом добротность рабочего колебания выше 500, в то время как добротности всех паразитных мод не превышают 160, т. е. проигрывают по этому фактору как минимум в 3 раза.

Тестирование резонатора на низком уровне мощности

Для исследования на низком уровне мощности был изготовлен брэгговский резонатор из двух рефлекторов с коэффициентами отражения, согласно расчету, 98 % (входная секция длиной 280 мм) и 90 % (вы-

ходная секция длиной 160 мм). Для совместности с электронно-оптической системой МСЭ (ондулятором и соленоидом) селективирующий промежуток был заменен участком волновода длиной 5 мм, увеличенного диаметра, на внутреннюю поверхность которого был нанесен поглощающий материал – альсифер. При «холодном» тестировании исследовался отраженный от резонатора сигнал, причем запитывался резонатор со стороны короткой секции (рис. 9). Это обеспечило достаточную для наблюдения резонансных кривых связь запитывающего излучения с рабочей модой резонатора. Возбуждался резонатор модой TE_{11} с помощью преобразователя из низшей моды стандартного прямоугольного волновода.

Полученная экспериментальная зависимость отраженного сигнала от частоты представлена на рис. 10. Брэгговская полоса находится между частотами 29,2 и 30,4 ГГц. На частоте, близкой к 30 ГГц, видно единственное во всей брэгговской полосе высокодобротное колебание, идентифицируемое как рабочее. Его добротность составила 500.

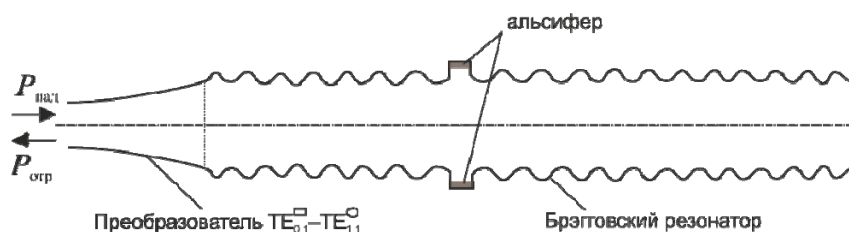


Рис. 9. Схема измерений резонатора

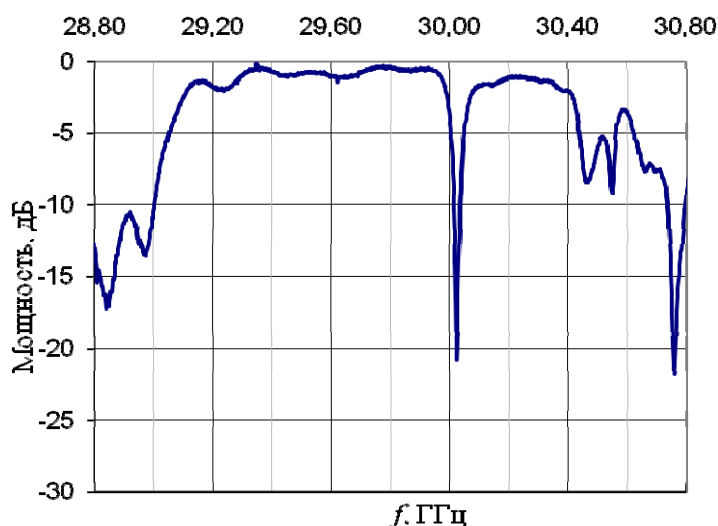


Рис. 10. Отражение от резонатора в зависимости от частоты

Можно ожидать, что открытый брэгговский резонатор с зазором позволил бы обеспечить лучшую селекцию мод по сравнению с резонатором с поглощающей секцией, поскольку поглощение излучения реальным поглотителем, как правило, не является полным.

Заключение

Создан селективный брэгговский резонатор мощного МСЭ с рабочей модой в виде гауссова пучка. Щель в центре резонатора позволяет существенно снизить добротности всех паразитных мод, внося лишь слабое влияние на добротность рабочей моды. В «холодном» эксперименте с резонатором, в котором селектирующий зазор был выполнен в виде секции, покрытой поглощающим материалом – альсифером, продемонстрировано возбуждение единственного высокودобротного колебания в брэгговской полосе частот.

Список литературы

1. Каминский А. К., Перельштейн Э. А., Седых С. Н., Гинзбург Н. С., Кузиков С. В., Песков Н. Ю., Сергеев А. С. Демонстрация работы мощного 30-ГГц МСЭ на резонансную нагрузку // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36, № 5. С. 37–46.
2. Ginzburg N. S., Golubev I. I., Kaminsky A. K., Kozlov A. P., Kuzikov S. V., Perel-

stein E. A., Peskov N. Yu., Petelin M. I., Sedykh S. N., Sergeev A. P., Sergeev A. S., Vikharev A. A., Zaitsev N. I. Experiment on Pulse Heating and Surface Degradation of a Copper Cavity Powered by Powerful 30 GHz Free Electron Maser // Physical Review ST-AB. 2011. Vol. 14. P. 041002.

3. Ginzburg N. S., Kaminsky A. A., Kaminsky A. K., Peskov N. Yu., Sedykh S. N., Sergeev A. P., Sergeev A. S. High-Efficiency Single-mode Free-Electron Maser Oscillator Based on a Bragg Resonator with Step of Phase of Corrugation // Phys. Rev. Lett. 2000. Vol. 84. P. 3574–3577.

4. Peskov N. Yu., Kaminsky A. K., Kuzikov S. V., Perelstein E. A., Sedykh S. N., Sergeev A. S. Splitting Mode Effect in FEM with Oversized Bragg Cavity // Proc. of VII Int. Workshop «Strong Microwaves: Sources and Applications». N. Novgorod, Russia, 2008. Vol. 1. P. 224–229.

5. Doane J. L. Propagation and Mode Coupling in Corrugated and Smooth-Wall Circular Waveguides // Infrared and Millimeter Waves. 1990. Vol. 13. P. 123–170.

6. Taflov A., Hagness S. C. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method. Boston; L.: Artech House, 2000. 854 p.

Материал поступил в редколлегию 08.08.2012

S. V. Kuzikov, N. Yu. Peskov, M. E. Plotkin

OPEN BRAGG CAVITY WITH GAUSSIAN WAVEBEAM FOR FREE ELECTRON MASER OF CENTIMETER WAVELENGTH RANGE

This paper describes a highly selective electromagnetic cavity for a 30 GHz free electron maser (FEM). The cavity consists of two Bragg reflectors with overlapping reflection bands. Reflectors have been synthesized with the help of coupled waves method. For the sake of mode selectivity reflectors are separated by a gap which is wide in the wavelength scale. The operating mode in the interspace between the reflectors represents a Gaussian wavebeam of small diameter, so that its field is detached from the cavity walls, and the loss of radiation through the gap is negligible. At the same time, spurious modes undergo strong diffraction losses through the gap due to different transverse structure of the field. In the calculations, the Q -factor of the operating mode was shown to be at least three times as big as the Q -factors of all spurious modes within the Bragg band. The tested stainless still cavity contained a cylindrical middle-section covered with the absorbing material alsifer to emulate the gap. In low-power tests, the only high- Q mode was observed in the Bragg band, with the frequency of that mode corresponding to the calculated frequency of the operating mode. High-power testing of the cavity is planned in the nearest future.

Keywords: FEM, Gaussian wavebeam, Bragg reflector, coupled waves method.