

09

Экспериментальное тестирование коротковолновых частотно-перестраиваемых брэгговских отражателей, основанных на связи распространяющихся и квазикритических волн

© А.В. Аржанников, Н.С. Гинзбург, В.Ю. Заславский,
П.В. Калинин, А.М. Малкин, Н.Ю. Песков,
А.С. Сергеев, С.Л. Синицкий, М. Тумм

Институт ядерной физики СОЛ РАН им. Будкера, Новосибирск
Новосибирский государственный университет
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
E-mail: peskov@appl.sci-npov.ru

Поступило в Редакцию 3 февраля 2012 г.

Проведено численное моделирование и экспериментальное тестирование свойств узкополосных брэгговских рефлекторов планарной геометрии, в которых переотражение падающей волны во встречную происходит через возбуждение квазикритической моды. Измеренные в 4-мм диапазоне длин волн характеристики находятся в хорошем соответствии с результатами теоретического анализа и моделирования на основе стандартного кода HFSS. Максимальное значение коэффициента отражения по мощности составило ~ 0.8 , ширина полосы отражения на полувьсоте 0.3–0.5%. Продемонстрирована возможность частотной перестройки полосы отражения на 3–5% за счет изменения зазора между пластинами.

Брэгговские рефлекторы на основе полых металлических волноводов с гофрировкой боковых стенок [1,2] использовались в большом числе экспериментов по генерации мощного излучения в длинноволновой части миллиметрового диапазона и могут рассматриваться в качестве традиционных элементов электродинамических систем релятивистских мазеров. Одним из основных их достоинств является совместимость с системой транспортировки интенсивных релятивистских электронных

пучков (РЭП). Как и в предшествующих оптических аналогах [3,4], в их традиционном варианте имеет место связь двух встречных волн, обладающих большой групповой скоростью (рис. 1, *a*). Однако продвижение релятивистских мазеров в коротковолновую часть миллиметрового диапазона и тем более в субмиллиметровый диапазон требует модификации брэгговских структур, поскольку при значительной сверхразмерности резонаторы, составленные из традиционных брэгговских зеркал, теряют селективность. Возникает перекрытие зон брэгговского резонанса, соответствующих связи различных пар распространяющихся волн, которое приводит к уменьшению абсолютных значений коэффициентов отражения.

Указанная проблема может быть в значительной степени решена при использовании брэгговских отражателей, основанных на связи распространяющихся и квазикритических волн (рис. 1, *b*) [5,6]. Данная статья посвящена моделированию и экспериментальному исследованию электродинамических свойств планарных брэгговских отражателей нового типа в 4-мм диапазоне длин волн.

Модифицированный брэгговский рефлектор планарной геометрии может быть выполнен в виде двух параллельных металлических пластин с длиной l_z , шириной l_x и расстоянием (зазором) между ними a_0 , на которые нанесена неглубокая гофрировка

$$a = \frac{a_1}{2} \cos(\bar{h}z), \quad (1)$$

где $\bar{h} = 2\pi/d$, d и a_1 — период и глубина гофрировки соответственно (рис. 1, *b*). В данной структуре поле может быть представлено как сумма двух встречно-распространяющихся квазиоптических волновых пучков

$$\vec{E} = \vec{y}_0 \text{Re} [A_+ e^{i\omega t - ihz} + A_- e^{i\omega t + ihz}], \quad (2a)$$

которые связаны друг с другом посредством возбуждения квазикритической волны ТМ_{*n*} типа

$$\vec{E} = \vec{z}_0 \text{Re} \left[B \sin\left(\frac{\pi ny}{a_0}\right) e^{i\omega t} \right] \quad (2b)$$

в условиях брэгговского резонанса

$$h \approx \bar{h}. \quad (3)$$

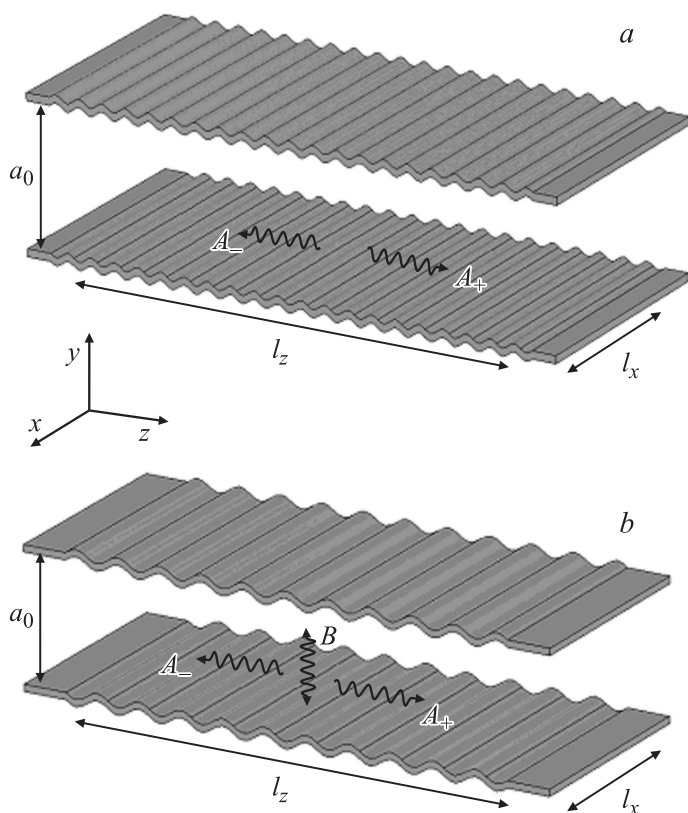


Рис. 1. Схема (а) традиционного и (b) модифицированного брэгговского зеркала планарной геометрии. Стрелками показаны направления потоков энергии связывающихся парциальных волн.

Здесь ω , h — частота и продольное волновое число, A_{\pm} и B — амплитуды парциальных волн, n — число вариаций поля критической волны по координате y . Модифицированный брэгговский рефлектор обеспечивает узкополосную зону отражения вблизи частоты отсечки ω_c

указанной волны

$$\omega_c = \frac{\pi n c}{a_0}. \quad (4)$$

Из (3), (4) вытекает соотношение между зазором и периодом структуры

$$a_0 \approx \frac{nd}{2}. \quad (5)$$

Из (3) также следует, что период структуры d приблизительно вдвое больше по сравнению с традиционными брэгговскими зеркалами, в которых условие брэгговского резонанса, как известно [2–4], имеет вид $2h \approx \bar{h}$. Это обстоятельство имеет важное значение с точки зрения технологии изготовления структур при продвижении в коротковолновые диапазоны.

Заметим, что в случае противофазной гофрировки нижней и верхней пластин брэгговского отражателя (как показано на рис. 1) распространяющиеся волновые пучки со структурой, близкой к ТЕМ-моды планарного волновода, связываются с критической модой с четным числом поперечных вариаций поля $n = 2k$, $k = 1, 2, 3 \dots$ — натуральное число. В случае синфазной гофрировки пластин имеет место возбуждение критической моды с нечетным поперечным индексом $n = 2k - 1$.

Дополнительным достоинством модифицированных брэгговских структур является возможность плавной частотной перестройки полосы отражения. При умеренных поперечных размерах $a_0/\lambda \leq 5$ (λ — длина волны) изменение расстояния между пластинами a_0 сопровождается смещением в достаточно широкой частотной области зоны брэгговского отражения вслед за изменением частоты отсечки квазикритической волны ω_c . При оптимально выбранных параметрах структуры величина коэффициента отражения практически не меняется.

Исследование электродинамических свойств модифицированных брэгговских структур проводилось на панорамном источнике при милливаттном уровне мощности (так называемое „холодное“ тестирование) в области частот в окрестности 75 GHz. Структуры были выполнены в виде двух параллельных медных пластин длиной $l_z = 60$ mm и шириной $l_x = 100$ mm, зазор между пластинами составлял $a_0 \approx 10$ mm ($a_0/\lambda \approx 2.5$). Гофрировка была выполнена на внутренней поверхности проводников в форме параллельных прямоугольных канавок (меандра) с периодом $d = 4$ mm и глубиной $a_1 = 0.1$ mm. Согласно (2), (3),

данные структуры обеспечивали резонансное отражение двух встречно-распространяющихся ТЕМ-волн через возбуждение квазикритической волны TM_5 -типа планарного волновода в окрестности частот 75 GHz. Зазор между пластинами a_0 варьировался в экспериментах около указанного выше значения. Механическая точность установки зазора составляла около ± 0.05 mm. Для сравнения была также изготовлена брэгговская структура с „традиционной“ гофрировкой, рассчитанная на непосредственное переизлучение двух встречных волн ТЕМ-типа в исследуемом частотном диапазоне. Эта структура имела те же геометрические размеры ($l_x = 100$ mm, $l_z = 60$ mm), но для поддержания коэффициента отражения глубина гофрировки была увеличена до $a_1 = 0.15$ mm. Период „традиционной“ структуры $d = 2$ mm, как было отмечено выше, был вдвое меньше периода модифицированной. Возбуждение брэгговских структур осуществлялось падающей волной $TE_{1,0}$ -типа стандартного волновода прямоугольного сечения (3.6×1.8 mm) через секцию конического волновода длиной 100 см, поперечное сечение которого на выходе составляло 100×10 mm. Согласно расчетам, коэффициент преобразования падающей $TE_{1,0}$ волны прямоугольного волновода в ТЕМ-волну планарного волновода составлял около 90% по мощности.

Предварительно на основе стандартного трехмерного кода HFSS [7] было проведено моделирование описанных выше брэгговских структур. Результаты моделирования представлены на рис. 2, *a* и находятся в хорошем соответствии с „холодными“ электродинамическими измерениями (рис. 2, *b*). Для модифицированной брэгговской структуры максимальное значение коэффициента отражения по мощности составило ~ 0.8 . При этом величина коэффициента отражения для указанной структуры превышает соответствующую величину для традиционной структуры даже при меньшей глубине гофра. Важно также подчеркнуть, что ширина зоны брэгговского отражения для модифицированной структуры (200–300 MHz) на порядок меньше ширины зоны отражения традиционной структуры (~ 2 –3 GHz).

Как уже отмечалось выше, другим важным достоинством модифицированных брэгговских структур является возможность плавной частотной перестройки зоны отражения при изменении величины зазора a_0 . Согласно результатам трехмерного моделирования, которые подтверждаются „холодными“ измерениями (рис. 2), модифицированные брэгговские структуры обеспечивают достаточно высокий коэффициент

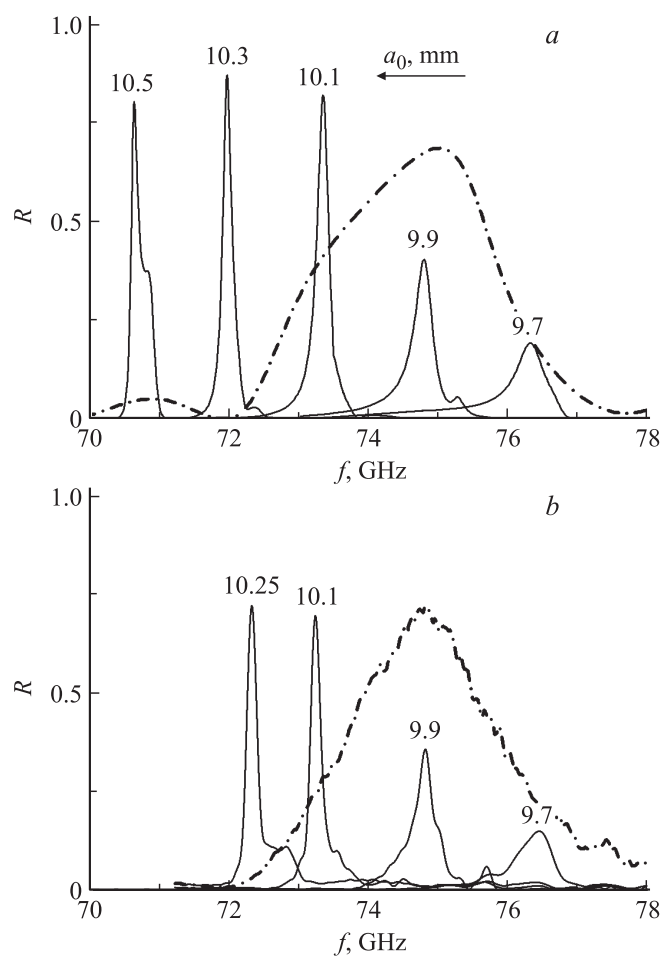


Рис. 2. Результаты моделирования (а) и „холодных“ измерений (б) частотных зависимостей коэффициента отражения по мощности R модифицированных брэгговских структур в окрестности частоты 75 GHz при различных величинах зазора между пластинами a_0 ($l_x = 100 \text{ mm}$, $l_z = 60 \text{ mm}$, $d = 4 \text{ mm}$, $a_1 = 0.1 \text{ mm}$). Для сравнения штрихпунктиром показана аналогичная зависимость для традиционного брэгговского рефлектора той же сверхразмерности ($d = 2 \text{ mm}$, $a_1 = 0.15 \text{ mm}$). Значения величины зазора между пластинами a_0 указаны над соответствующими кривыми.

отражения в области параметров, в которых частота отсечки ω_c меньше брэгговской частоты $\bar{\omega} = \bar{h}c$. В то же время при изменении величины зазора a_0 в области $\omega_c \geq \bar{\omega}$ наблюдается значительное падение коэффициента отражения. Таким образом, реализованная в эксперименте полоса перестройки зоны отражения составила $\sim 2\text{--}4$ GHz (3–5%) при поддержании абсолютного значения коэффициента отражения на уровне 0.5–0.8. Следует также отметить, что определенное отличие между результатами трехмерного моделирования и „холодных“ измерений ($\sim 10\text{--}15\%$) может быть объяснено неточностью установки величины зазора в экспериментальном макете, а также примесью дополнительных волноводных мод в падающем и рассеянном волновых потоках.

Описанные выше эксперименты в 4-мм диапазоне длин волн проводились при поперечных размерах волновода $a_0/\lambda \sim 2\text{--}3$. В то же время для работы мазеров (лазеров) на свободных электронах (МСЭ, ЛСЭ) на основе интенсивных РЭП в субмиллиметровом диапазоне требуется увеличение сверхразмерности пространства взаимодействия до $a_0/\lambda \sim 10\text{--}20$. Трехмерное моделирование модифицированных брэгговских структур в диапазоне частот вблизи 600 GHz проводилось при следующих геометрических параметрах: $l_z = 75$ mm, $d = 0.5$ mm, $a_1 = 0.05$ mm; зазор между пластинами варьировался вокруг значения $a_0 \approx 2$ mm. Моделирование показывает (рис. 3, *a*), что при сверхразмерности $a_0/\lambda \sim 4\text{--}5$ модифицированные брэгговские структуры обеспечивают узкополосное отражение ($\Delta\lambda/\lambda \approx 0.5\%$) падающей ТЕМ-волны во встречную волну того же (ТЕМ) типа с коэффициентом по мощности на уровне 75–80%. При этом переизлучение в другие распространяющиеся волны составляет около 10%. На рис. 3, *b* приведены результаты моделирования при зазоре между пластинами $a_0 = 5$ mm ($a_0/\lambda \sim 10$). С увеличением сверхразмерности для поддержания коэффициента отражения на высоком уровне (более 90%) увеличена длина структуры $l_z = 150$ mm и глубина гофрировки $a_1 = 0.12$ mm. Согласно моделированию, частотная перестраиваемость полосы отражения с увеличением сверхразмерности ухудшается. Экспериментальные исследования модифицированных структур субмиллиметрового диапазона в настоящий момент проводятся в НГУ.

Таким образом, проведенные исследования демонстрируют возможность реализации узкополосных рефлекторов на основе модифицированных брэгговских структур и перспективность их использования в МСЭ, работающих в коротковолновой части миллиметрового и

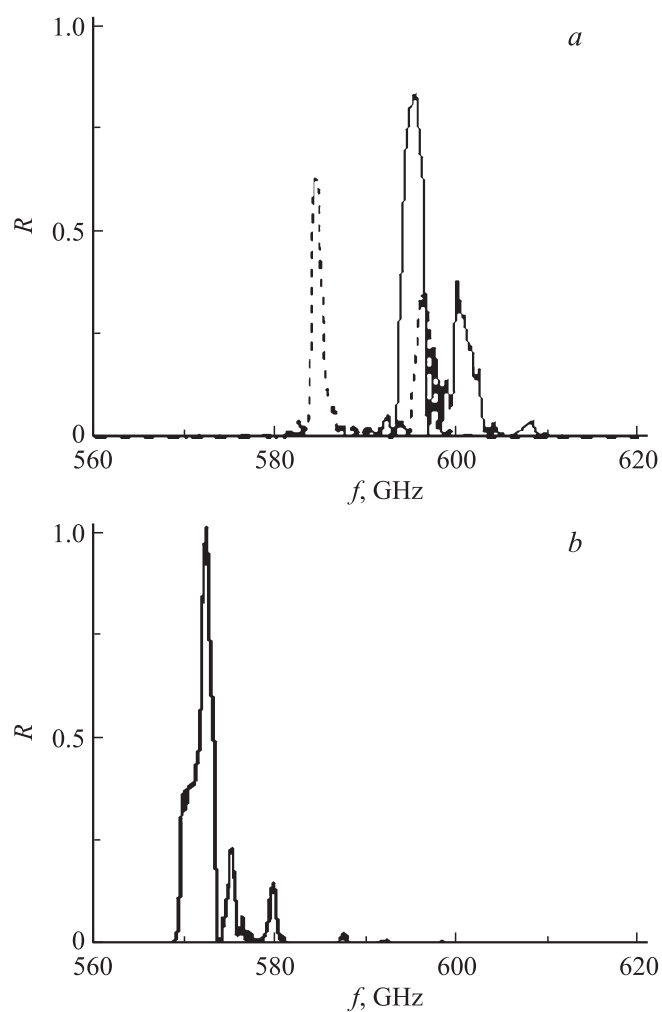


Рис. 3. Результаты моделирования модифицированных брэгговских структур в диапазоне частот 600 GHz: *a* — $l_z = 75$ mm, $d = 0.5$ mm, $a_1 = 0.025$ mm, $a_0 = 1.97$ mm (сплошная кривая) и $a_0 = 2.03$ mm (пунктир); *b* — $l_z = 150$ mm, $d = 0.52$ mm, $a_1 = 0.12$ mm, $a_0 = 5$ mm.

субмиллиметрового диапазонов. Результаты моделирования подтверждены „холодными“ электродинамическими тестами, выполненными в 4-мм диапазоне. Показано, что модифицированные брегговские структуры обеспечивают узкополосное отражение в районе частоты отсечки возбуждаемой в них квазикритической моды. При умеренной сверхразмерности ($a_0/\lambda \leq 5$) достоинством таких структур является также возможность частотной перестройки зоны отражения в полосе до 5% при изменении величины зазора между пластинами.

Отметим в заключение, что моделирование пространственно-временной динамики МСЭ демонстрирует высокую эффективность использования модифицированных брегговских отражателей в коротковолновых диапазонах [8]. В настоящее время работоспособность МСЭ с модифицированными брегговскими рефлекторами цилиндрической геометрии продемонстрирована в совместных экспериментах ИПФ РАН и ОИЯИ (Дубна) в 8-мм диапазоне длин волн [9].

Данная работа проводится при поддержке гранта Правительства РФ (№ 11.G34.0033), гранта президента РФ для молодых ученых (№ MR-5530.2011.2), Федеральной целевой программы „Научные и педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 годы и Российского фонда фундаментальных исследований, гранты № 10-02-01395 и № 10-08-01269.

Список литературы

- [1] Ковалев Н.Ф., Петелин М.И., Резников М.Г. Резонатор: А. с. № 720592. Бюл. № 9. 1980.
- [2] Bratman V.L., Denisov G.G., Ginsburg N.S., Petelin M.I. // IEEE J. Quant. Electr. 1983. V. QE-19. N 3. P. 282–296.
- [3] Kogelnik H., Shank C.V. // J. Appl. Phys. 1972. V. 43. P. 2327–2335.
- [4] Yariv A. Quantum Electronics. N.Y.: J. Wiley and Sons Inc., 1975.
- [5] Ginsburg N.S., Malkin A.M., Peskov N.Yu. et al. // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 95. P. 043504.
- [6] Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Малкин А.М. и др. // ЖТФ. 2012. Т. 82. В. 3. С. 104–110.
- [7] ANSYS HFSS User Manual, www.ansys.com
- [8] Гинзбург Н.С., Заславский В.Ю., Зотова И.В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 91. С. 286–289.
- [9] Гинзбург Н.С., Голубев И.И., Голубых С.М. и др. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 20. С. 50–59.