

15

Квазиоптический пятиканальный мультиплексор частотного диапазона 12–90 GHz

© В.И. Белоусов^{1,2}, В.А. Вершков^{3,4}, Г.Г. Денисов^{1,2},
М.А. Хозин^{1,2,¶}, Д.А. Шелухин^{3,4}

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

² ЗАО НПП „ГИКОМ“, Нижний Новгород

³ НИЦ „Курчатовский институт“, Москва

⁴ Координационный центр „Управляемый термоядерный синтез — международные проекты“ (УТС-центр), Москва

¶ E-mail: mkhozin@appl.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 30 июня 2017 г.

Впервые разработан эффективный квазиоптический пятиканальный мультиплексор, распределяющий СВЧ-сигналы частотного диапазона 12–90 GHz по пяти частотным каналам: *K_i*, *K*, *K_a*, *U*, *E* (частотные диапазоны стандартных одномодовых волноводов) — или объединяющий эти каналы в один волновой поток. При этом в 90% полосы каждого диапазона достигается сравнительно однородная характеристика с общим уровнем потерь около 1.5 dB. Проведен детальный анализ дифракционных и омических потерь в частотных каналах мультиплексора.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.22.45265.16941

Мультиплексоры, разделяющие или объединяющие сигналы различных частот, находят применение в таких областях науки и техники, как диагностика плазмы, спектроскопия, волоконная оптика, радиоастрономия и т.д. В качестве дисперсионных элементов для разделения или объединения сигналов различных частот, как правило, используются либо дифракционные решетки, имеющие свойство отражать сигналы разных частот под разными углами, либо различного рода частотные фильтры, позволяющие пропускать сигналы определенного частотного диапазона и отражать сигналы на всех других частотах.

Дифракционные решетки нашли наибольшее применение в оптической области диапазона длин волн. В этом диапазоне линейные размеры

всех элементов мультиплексора велики по сравнению с длиной волны, дифракционные искажения волновых пучков при этом несущественны, и схема устройства получается относительно простой и компактной.

В диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых волн также возможно применение дифракционных решеток. Однако наличие значительной угловой дисперсии существенно ограничивает полосовые свойства такого устройства, но для узкополосных сигналов такие мультиплексоры могут быть достаточно компактными и при использовании в качестве дифракционных решеток металлических гребенок электропрочными [1–3].

В диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых волн в качестве частотных фильтров используют специальным образом перфорированные зеркала [4]. Конфигурация, размер и расположение отверстий в таких зеркалах определяют частотный диапазон прошедшего излучения. Например, в [5] приведены параметры экспериментальной реализации квазиоптического мультиплексора, в котором перфорированными зеркалами было осуществлено разделение сигналов частотного диапазона 30–110 GHz на восемь относительно узких частотных каналов с полосой каждого канала 10 GHz и потерями в каждом из них около 2 dB.

В настоящей работе предлагается в качестве частотно разделительных фильтров квазиоптического мультиплексора использовать брэгговские рефлекторы. Такие рефлекторы могут эффективно отражать пришедшее на них излучение в достаточно широкой частотной полосе. В частности, можно подобрать параметры периодически расположенных элементов рефлектора таким образом, чтобы он отражал СВЧ-излучение во всей полосе частот стандартного прямоугольного волновода.

Квазиоптическая схема устройства, предназначенного для работы в диапазоне 12–90 GHz, показана на рис. 1. Схема представляет собой конфокальную линию передачи, в фокальных плоскостях которой расположены диэлектрические структуры — брэгговские рефлекторы. Угол падения θ_0 с направлением распространения волны составляет 45° . Высокочастотная часть спектра последовательно отражается от каждого из брэгговских рефлекторов и через соответствующую конфокальную пару зеркал попадает на вход приемного рупора, низкочастотная часть спектра с минимальными потерями проходит через соответствующий рефлектор и поступает для дальнейшего анализа на последующие каскады устройства. Поскольку мультиплексор состоит из взаимных элементов, он может использоваться как для сложения, так и для разде-

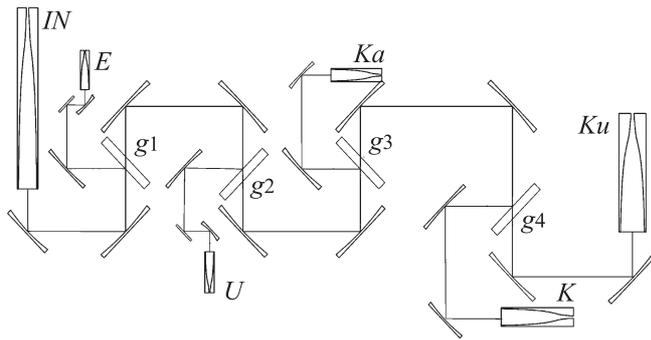


Рис. 1. Схема пятиканального мультиплексора. *IN* — излучающий рупор; *Ku*, *K*, *Ka*, *U*, *E* — приемные рупоры соответствующих диапазонов; *g1*, *g2*, *g3*, *g4* — частотно селективные элементы. Сплошной линией на схеме показана траектория геометрических центров пучков, распространяющихся в конфокальной зеркальной линии.

ления частот. Рабочей волной в системе является основная волна прямоугольного волновода TE_{10} . Это позволило расположить все элементы системы между двумя проводящими плоскостями, перпендикулярными электрическому полю, с расстоянием между ними 12 мм. При этом все устройство становится сравнительно компактным и вместе с тем такой зазор между плоскостями обеспечивает приемлемый уровень омических потерь.

В нашем варианте устройства в качестве брэгговских рефлекторов были использованы наборы периодически расположенных пластин из полистирола с воздушными промежутками между ними. В каждом из рефлекторов было использовано по шесть диэлектрических пластин. Схема такого частотного фильтра и коэффициент отражения от него плоской волны представлены на рис. 2, *a*. Толщина основных диэлектрических слоев составляет $d = \lambda / (4\sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta_0})$, а толщина воздушных промежутков $D = \lambda / (4 \cos \theta_0)$, где λ — длина волны для центральной частоты полосы отражения, ϵ — диэлектрическая проницаемость отражающих пластин, θ_0 — угол падения волнового пучка на рефлектор. Для улучшения согласования периодических структур брэгговских рефлекторов с падающей на них волной крайние слои диэлектрика в каждом из рефлекторов были сделаны несколько тоньше

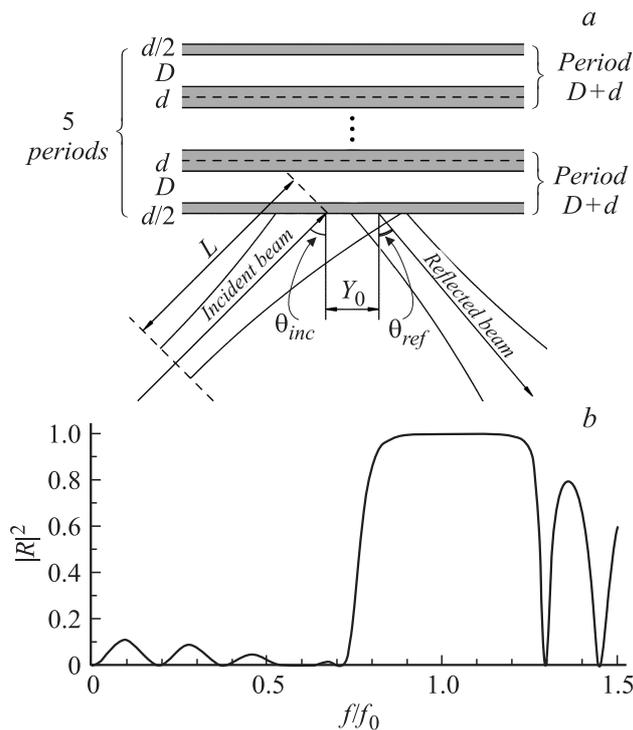


Рис. 2. Схема брэгговского рефлектора (а) и зависимость коэффициента отражения от частоты для плоской волны при $\theta_{inc} = 45^\circ$ (b).

основных [6], что существенно снижает уровень отраженного сигнала по сравнению с классическим вариантом брэгговского рефлектора для частот ниже основной полосы отражения. Такая модификация позволяет получить близкий к единице коэффициент прохождения для частот от нуля до основной полосы отражения. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) модифицированного брэгговского рефлектора приведена на рис. 2, b.

Кроме ширины полосы отраженного от каждого из рефлекторов сигнала существенное значение имеют потери мощности, возникающие при разделении исходного сигнала в каждом из частотных каналов. Эти потери можно разделить на три группы: 1) омические и дифракционные

потери в излучающем и приемных рупорах устройства; 2) омические и дифракционные потери в конфокальной линии передачи; 3) диэлектрические и дифракционные потери в брэгговских зеркалах.

Профиль поверхности боковых стенок излучающего и приемного рупоров выбирался в соответствии с рекомендациями [7] для волноводных переходов, сохраняющих при минимальной длине пришедшую на его вход волноводную моду. В данном случае это мода TE_{10} прямоугольного волновода. Для каждого из приемных рупоров уровень потерь в высшие типы волн на его выходной апертуре в расчетах не превышает 0.05 dB. Дифракционные же потери, возникающие при согласовании излучающего и приемного рупоров с квазиоптической линией передачи мультиплексора, имеют более высокий уровень. Они составляют для каждого из диапазонов 0.18 dB и приводят к возбуждению высших типов волн TE_{n0} в устройстве.

Омические потери в конфокальной линии передачи, ограниченной с двух сторон металлическими пластинами, зависят от расстояния между этими пластинами и материала из которого они изготовлены. В нашей модели мультиплексора, изготовленного из алюминиевого сплава Ад1, эти потери изменяются (в зависимости от пути, пройденного сигналом) от 0.3 dB для диапазона 60–90 GHz до 0.5 dB для диапазона 12–18 GHz и могут быть уменьшены либо за счет увеличения расстояния между проводящими пластинами, либо за счет применения материала верхней и нижней пластин мультиплексора с более высокой проводимостью.

Источниками дифракционных потерь, вносимых брэгговскими рефлекторами, являются: смещение центральной части волнового пучка относительно первоначального его положения при прохождении или отражении его от диэлектрических пластин, искажение ограниченного волнового пучка брэгговскими рефлекторами в результате угловой дисперсии. Смещения центральной части волнового пучка относительно первоначального его положения были скомпенсированы при проектировании системы для центральной частоты каждого диапазона. На других частотах этих диапазонов брэгговские рефлекторы вносят небольшой сдвиг в положениях центральной части проходящих и отраженных волновых пучков. Поскольку поперечные размеры волновых пучков в системе велики по сравнению с их смещениями, это практически не влияет на коэффициент передачи внутри частотных диапазонов. На границах диапазонов, когда происходит сильное изменение коэффициента отражения при изменении угла падения в приближении плоской волны,

Основные потери в каждом из каналов мультиплексора

Потери	Канал				
	K_i	K	K_a	U	E
Омические потери в ограничивающих металлических плоскостях, dB	0.42	0.49	0.45	0.38	0.27
Омические потери в зеркалах, dB	0.014	0.017	0.017	0.027	0.015
Омические потери в рупорах, dB	0.19	0.21	0.24	0.27	0.35
Рассогласование структуры поля между рупорами и линией передачи, dB	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
Потери на отражения от рефлекторов, dB	0.40	0.50	0.30	0.20	0.05
Суммарные потери, dB	1.20	1.41	1.19	1.06	0.86
Потери, полученные в результате численного моделирования, dB	1.50	1.50	1.10	1.00	1.10

искажение усиливается и в этих местах возникает дополнительное рассеяние мощности в высшие типы волн [6]. Угловая дисперсия брэгговского рефлектора ограничивает минимальные геометрические размеры системы. Численный анализ показывает, что для волновых пучков с угловой расходимостью более 3° искажения волнового пучка приводят к критическому сужению частотной полосы отраженного сигнала. Фактические угловые расходимости отражаемых пучков мультиплексора составляют 1,2, 1,8, 2,7 и 3.2° для рефлекторов g_1 , g_2 , g_3 и g_4 соответственно. Кроме сужения частотной полосы отраженного от брэгговского рефлектора сигнала угловая дисперсия приводит к дополнительному рассеянию энергии пучка в высшие типы волн TE_{n0} . Основные виды потерь мощности в каждом из каналов мультиплексора приведены в таблице.

Следует заметить, что малые дифракционные потери, возникающие на элементах мультиплексора, хоть и не оказывают существенного влияния на общий коэффициент передачи, но в закрытой системе (при проведении измерений коэффициентов прохождения каждого из каналов, когда вход и выход мультиплексора нагружены на одномодовые волноводы) они могут привести к появлению резонансов на паразитных модах TE_{n0} [8].

Измерения коэффициентов передачи каждого из каналов мультиплексора проводились отдельно для каждого из частотных диапазонов.

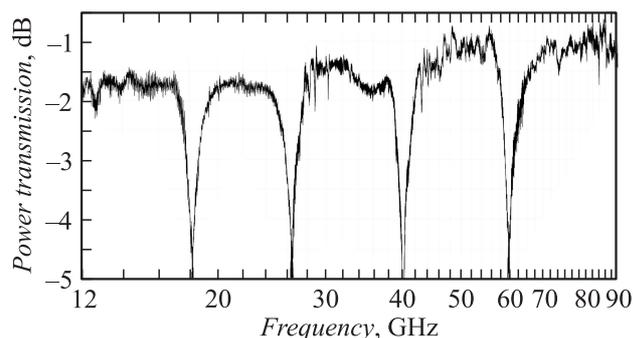


Рис. 3. Измеренная АЧХ пятиканального мультиплексора. Для каждого частотного диапазона приведен график коэффициента передачи соответствующего канала.

Волноводные переходы между одномодовыми волноводами соответствующего канала и входным сечением излучающего рупора были сделаны из нержавеющей стали. Такая система измерений повышает омические потери для запертых колебаний и существенно снижает добротность и глубину резонансов на паразитных модах. Кроме того, при измерениях в диапазонах Ka , U , E в излучающий тракт включались волноводные фильтры в виде 100 mm прямоугольного волновода с прорезанной вдоль длинной стенки щелью. Фильтры вносят дополнительные потери в паразитную волну TE_{20} линии передачи, возбуждающуюся при прохождении волнового пучка через различные элементы устройства, и препятствуют возникновению резонансов при проведении измерений. Результаты измерений АЧХ для всех каналов представлены на рис. 3.

Таким образом, разработанный мультиплексор позволяет проводить разделение частот на каналы, полностью перекрывающие пять стандартных волноводных диапазонов от 12 до 90 GHz, и обеспечивает сравнительно низкий уровень потерь около 1.5 dB.

Работа проведена в рамках государственного контракта № Н.4а.241.9Б.17.1001 „Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2017 г.“ от 31.01.2017 г.

Список литературы

- [1] *Belousov V.I., Denisov G.G., Peskov N.Yu.* // Int. J. IRMM Waves. 1991. V. 12. Iss. 9. P. 1035–1043.
- [2] *Kasperek W., Petelin M.I., Shchegolkov D.Yu.* et al. // Nucl. Fusion. 2008. V. 48. P. 054010 (1–9).
- [3] *Власов С.Н., Копосова Е.В., Кошуринов Ю.И., Лубяко Л.В., Павельев В.Г.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55. № 6. С. 440–454.
- [4] *Moore E.L.* // Microwaves & RF. 1990. V. 29. P. 107–110.
- [5] *Moore E.L., Audette D.J.* // Microwave J. 1992. V. 35. P. 72–85.
- [6] *Хозин М.А., Денисов Г.Г., Белоусов В.И.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59. № 8–9. С. 743–750.
- [7] *Unger H.G.* // BSTJ. 1958. V. 37. Iss. 4. P. 899–912.
- [8] *Ваганов Р.Б., Матвеев Р.Ф., Мерикари В.В.* // Многоволновые волноводы со случайными нерегулярностями. М.: Сов. радио, 1972. С. 90–96.