

ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ КВАЗИОПТИЧЕСКИЕ ДЕЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

© 2012 г. Г. С. Воробьев, М. В. Петровский, А. А. Рыбалко, Ю. В. Шульга

Сумской государственный университет
Украина, 40007, Сумы, ул. Римского-Корсакова, 2
Поступила в редакцию 21.03.2011 г.

Описаны схемы и принцип работы квазиоптических делителей мощности на основе двухрядных периодических структур, образованных решетками из металлических брусьев и диэлектрическим волноводом, расположенным вдоль их продольной оси. Экспериментальные исследования макетов делителей мощности в диапазоне частот 60–80 ГГц показали возможность регулировки уровня излучаемой мощности в основном плече делителя путем изменения продольной и угловой координат двухрядной периодической структуры, что может быть использовано при построении квазиоптических аттенуаторов.

Делители мощности (д.м.) и направленные ответвители предназначены для отбора заданной части мощности из основного передающего тракта линии передачи. Общий принцип построения этих устройств в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн основан на использовании связанных между собой волноводных и диэлектрических линий передачи, диэлектрических пластин и призм, а также периодических металлических решеток с периодом $l \ll \lambda$, где λ — длина волны излучения [1–3].

В данной работе представлены результаты исследования конструкции д.м. на основе двухрядной полупрозрачной периодической структуры с распределенным источником излучения (основным трактом) в виде диэлектрического волновода (д.в.), который расположен вдоль ее продольной оси. В такой системе поверхностная волна д.в.

трансформируется на периодических решетках в пространственные гармоники объемных волн [3, 4].

На рис. 1 приведены два варианта исполнения д.м.: с продольным (Δd) и угловым (φ) смещением ламелей решеток.

Делитель мощности содержит д.в. 1, который включен в основной с.в.ч.-тракт через согласующие переходы 2, решетки из брусьев 3, 4 и приемники излучения 5. Решетка 3 неподвижно закреплена относительно оси y , а решетка 4 установлена на позиционере, обеспечивающем либо линейное ее перемещение вдоль оси x с точностью $\Delta d = \pm 0.01$ мм, либо угловое в плоскости осей x, y с точностью $\Delta\varphi = \pm 1^\circ$. Приемники излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн могут быть выполнены, например, в виде рупорных или линзовых антенн и служат для

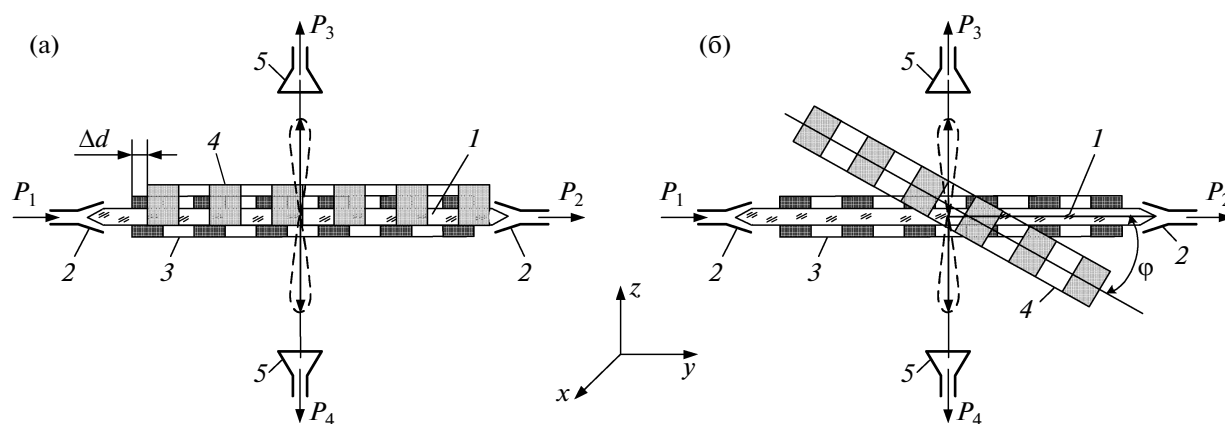


Рис. 1. Схемы исполнения д.м. на основе двухрядных периодических структур: с продольным Δd (а) и угловым φ (б) смещением ламелей решеток. 1 — основной тракт (диэлектрический волновод); 2 — согласующие переходы; 3, 4 — решетки; 5 — приемники излучения.

фиксации отобранной из основного тракта мощности.

Принцип работы таких д.м. основан на трансформации поверхностной волны д.в. в пространственную (объемную) волну, которая возбуждается на решетках. Уровень мощности излучения такой волны можно регулировать путем изменения фазовых соотношений медленных гармоник волн, возбуждаемых на решетках двухрядной структуры, при смещении ее ламелей либо изменении угла поворота относительно оси д.в.

Рассмотрим общие особенности волновых процессов в описываемых квазиоптических д.м. (см. рис. 1). При подаче на вход д.в. I с.в.ч.-сигнала мощностью P_1 вдоль его поверхности распространяется замедленная волна, которая рассеивается на решетках 3, 4. При этом возникает поле дифракции, которое представляет собой суперпозицию плоских волн. Часть этих волн уходит в свободное пространство (выделенные из основного тракта мощности P_3, P_4) под углами γ_n в виде пространственных волн, а остальные локализованы вблизи решеток в виде медленных гармоник, распространяющихся к выходу д.в. I (мощность P_2). Угол и условия излучения пространственных волн в системе д.в.—решетки определяются из соотношения [5]:

$$|\cos \gamma_n| = \frac{1}{k} \left(\alpha - \frac{2\pi n}{l} \right) \leq 1, \quad (1)$$

где n — номер пространственной гармоники, которая излучается; γ_n — угол излучения гармоники с индексом $n < 0$; l — период решетки; $k = 2\pi/\lambda$; $\alpha = k - (2\pi l)/l$ — постоянная распространения.

Из соотношения (1) следует, что волны с $n \geq 0$, $|\cos \gamma_n| > 1$ представляют собой спектр неоднородных плоских волн, существующих вблизи решетки и распространяющихся вдоль продольной оси системы д.м. с фазовыми скоростями $v_\phi < c$, где v_ϕ — фазовая скорость волны, c — скорость света. Для всех остальных волн с индексами $n < 0$ выполняется условие их излучения в окружающее пространство, что характеризует их как пространственные (объемные) волны. Выбрав соответствующим образом параметры электродинамической системы и распространяющейся вдоль д.в. поверхностной волны, можно добиться преобладания того или иного типа волн.

Геометрические размеры рассмотренных д.м. выбираются из соотношения (1) для излучения основной ($n = -1$) пространственной волны под углом $\gamma_{-1} = 90^\circ$ к плоскости решеток 3, 4 при зеркальном расположении последних относительно оси д.в. ($\Delta d = 0, \Delta \varphi = 0^\circ$). При этом необходимо учитывать влияние на интенсивность излучения толщины брусьев $2h$ [6], максимальная величина которой определяется как

$$2h = N \frac{\lambda}{2} + d \frac{4}{\pi} \ln \left(\sin \frac{\pi \theta}{2} \right), \quad (N = 1, 2, \dots), \quad (2)$$

где d — ширина брусьев, θ — относительное расстояние между брусьями решеток.

В решетке с оптимальным профилем по толщине брусьев $2h$ должно укладываться несколько меньше целого числа полуволн. Поправка к полуволновой толщине $\Delta h = d \frac{4}{\pi} \ln \left(\sin \frac{\pi \theta}{2} \right)$ одинакова для всех гармоник и определяется только геометрическими параметрами решетки вне зависимости от длины волны и угла излучения. Эта поправка максимальна, $\Delta h_{\max} = -0.23l$, при ширине щели $\theta \cong 0.3$.

Кроме того, интенсивность пространственных волн в рассматриваемых системах можно регулировать коэффициентом заполнения полупрозрачных решеток из брусьев $u = \cos(\pi d/l)$ и прицельным параметром a — расстоянием от д.в. до поверхности решеток, определяющим степень связи поверхностных волн с неоднородными волнами решеток.

Интервал области оптимальных значений параметра Δd для первого варианта исполнения д.м. (см. рис. 1а) определялся экспериментально в связи с отсутствием теории таких систем. Для второго варианта д.м. (см. рис. 1б) области углов φ смещения решетки 4 относительно решетки 3 можно оценить по предельным (критическим) значениям угла поворота одиночной решетки [5]:

$$\varphi_{\text{кр}} = \arccos \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\kappa \beta_B}{n} - \frac{n \beta_B}{\kappa} - \frac{\kappa}{n \beta_B} \right) \right], \quad (3)$$

где $\kappa = l/\lambda$, $\beta_B = v_\phi/c$ — относительная фазовая скорость волны в д.в.

Следовательно, при $\varphi = \varphi_{\text{кр}}$ в открытой структуре д.в. и решетки 4 наступает режим поверхностных волн, и дальнейшее увеличение φ приводит к брэгговской дифракции, для которой $\varphi_B = \arccos \frac{N_B \beta_B}{2\kappa}$, $N_B = 1, 2, 3, \dots$ — порядок дифракции. В этом режиме неоднородная поверхностная волна д.в. преобразуется в поверхностную волну решетки. Образовавшаяся новая поверхностная волна распространяется под углом $(180^\circ - \varphi)$ к направлению исходной неоднородной волны. Степень преобразования одной волны в другую определяется продольными размерами решетки и связью д.в. с полем решетки.

Приведем пример выбора параметров д.м. и их основных элементов в четырехмиллиметровом диапазоне длин волн ($f = 60\text{--}80$ ГГц). В качестве источника поверхностной волны использовался фторопластовый волновод сечением 5.2×2.6 мм², который на длине волны $\lambda = 4$ мм обеспечивал относительную скорость волны $\beta_B = 0.788$. Основные лепестки диаграмм излучения ($n = -1$) пространственных волн формировались под углом

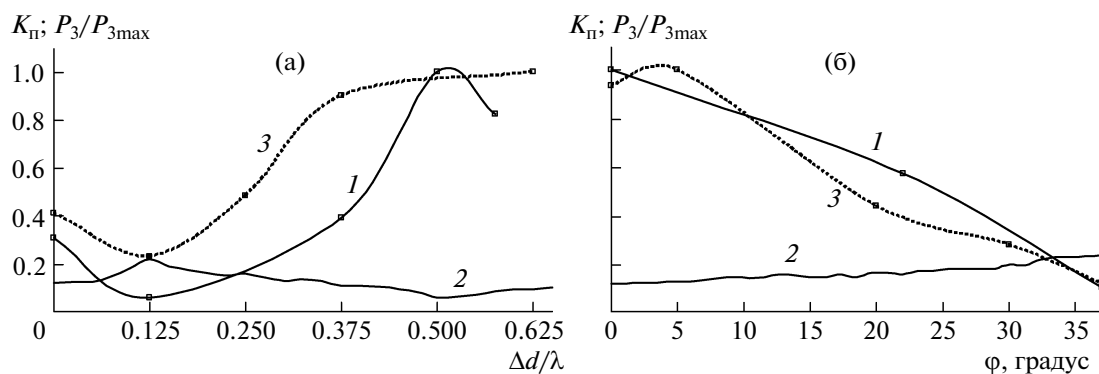


Рис. 2. Амплитудные и волноводные характеристики д.м. при продольном (а) и угловом (б) смещении ламелей решетки относительно оси волновода. 1 – относительные значения мощности P_3 ; 2 – значения K_π ; 3 – расчетная кривая.

$\gamma = 90^\circ$, что, согласно соотношениям (1), (2), соответствовало значениям $l = 3$ мм, $u = 0$, $2h = 1$ мм. Апертура решеток $D = 60$ мм и их длина вдоль оси д.в. $L = 54$ мм обеспечивали выполнение основных условий квазиоптики [1].

Экспериментальные исследования макетов д.м. (рис. 1а, 1б) проводились по методике [7].

В качестве примера на рис. 2 приведены амплитудные (относительные значения $P_3/P_{3\max}$) и волноводные (коэффициенты прохождения $K_\pi = P_2/P_1$) характеристики описанных выше д.м. Они свидетельствуют о возможности 80%-ного отбора мощности из основного тракта ($P_2 = 0.2P_1$) и деления ее поровну при симметричном расположении решеток относительно д.в. ($P_3 = P_4 = 0.4P_1$) для заданного значения прицельного параметра $a = 0.7$ мм.

Анализ графиков на рис. 2 показывает, что мощность в плече P_3 можно плавно регулировать либо путем смещения ламелей, либо изменением угла поворота решетки 4 относительно оси решетки 3. При этом значения $\Delta d/\lambda$ для варианта выполнения д.м. на рис. 1а целесообразно выбирать в интервале 0.2–0.4, на котором зависимость излучаемой мощности близка к линейной и не имеет резонансных эффектов.

С точки зрения регулировки и калибровки излучаемой мощности P_3 предпочтительным является второй вариант исполнения д.м. (рис. 1б), для которого амплитудная характеристика практически линейна для выбранного интервала углов $\varphi = 0\text{--}35^\circ$. Для обоих вариантов исполнения д.м. значения коэффициентов стоячей волны составили 1.1–1.3 в частотном диапазоне $f = 60\text{--}80$ ГГц.

Представленные на рис. 2 амплитудные характеристики численно моделировались методом конечных разностей [8], результаты расчета даны на рис. 2 штриховыми линиями 3. Сравнение экспериментальных результатов и численного анализа свидетельствует об их корреляции.

Анализируя характеристики представленных д.м., можно сделать следующие выводы. В отличие от волноводных аналогов и д.м. на д.в. [1] описываемые д.м. обладают более широкими функциональными возможностями, позволяющими разделить поступающую из основного тракта мощность поровну между двумя каналами с возможностью ее плавной регулировки в одном из выходных плеч делителя. При этом уровни мощности, поступающие в выходные плечи делителя, могут регулироваться путем изменения прицельного расстояния д.в. относительно поверхностей решеток. Представленные делители мощности могут быть изготовлены также в планарном исполнении при использовании периодических металлодиэлектрических структур [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валитов Р.А., Дюбко С.Ф., Макаренко Б.И. и др. Измерения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах: Методы и техника. М.: Радио и связь, 1984.
2. Xiao-Ping Chen, Ke Wu // IEEE Trans. 2008. V. MTT-56. Issue 1. P. 142.
3. Воробьев Г.С., Журба В.О., Кривец А.С. и др. // ПТЭ. 2009. № 4. С. 110.
4. Quan Xu, Kang Xie, Yinghua Ran et al. // International Journal for Light and Electron Optic. 2011. V. 122. Issue 2. P. 156.
5. Шестопалов В.П. Физические основы миллиметровой и субмиллиметровой техники. Т.1.: Открытые структуры. Киев: Наукова думка, 1985.
6. Шестопалов В.П. Дифракционная электроника. Харьков: ХГУ, 1976.
7. Воробьев Г.С., Журба В.О., Петровский М.В. и др. // ПТЭ. 2010. № 4. С. 74.
8. Банков С.Е., Курушин А.А., Разевиг В.Д. Анализ и оптимизация трехмерных СВЧ-структур с помощью HFSS. М.: СОЛОН-Пресс, 2004.
9. Vorobyov G.S., Petrovsky M.V., Ruban A.I. et al. // Telecommunications and Radio Engineering. 2007. № 66(20). P. 1839.