

М.С. АЗОЯН, М.Ц. АЙВАЗЯН

ДЕЛИТЕЛИ СИГНАЛА ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

Рассмотрены способы деления сигнала в волноводных устройствах терагерцового диапазона. Предлагаемые делители построены на основе сверхразмерного металлодиэлектрического волновода в виде волноводного тройника либо волноводного креста, в диагонали которого установлена полупрозрачная диэлектрическая пленка или решетка, состоящая из параллельных проводников. Приведены расчетные соотношения коэффициентов отражения и передачи электромагнитной волны от таких структур. Получено хорошее совпадение расчетных и экспериментальных результатов. Предлагаемые устройства могут найти широкое применение при создании различных устройств терагерцового диапазона.

Ключевые слова: терагерцовый диапазон, делитель мощности, диэлектрическая пленка, частопериодическая решетка, металлодиэлектрический волновод.

Введение. При создании сверхвысокочастотных схем различного назначения, в зависимости от поставленной задачи, возникает необходимость деления сигнала на две части с заданным коэффициентом деления. Для этого, как правило, используется волноводный тройник либо волноводный крест с полупрозрачной поверхностью, расположенной в диагонали разветвления. Реже в диагональ разветвления устанавливают частопериодические решетки, под которыми подразумеваются решетки, состоящие из круглых параллельных проводов либо параллельных лент, причем диаметр провода d или ширина лент и период p много меньше рабочей длины волны λ .

Делители мощности на основе диэлектрической пленки. В терагерцовом диапазоне наибольшее применение нашли металлодиэлектрические волноводы (МДВ) [1, 2]. Конструктивно такой делитель может быть реализован в виде МДВ креста (рис. 1а) либо тройника (рис. 1б).

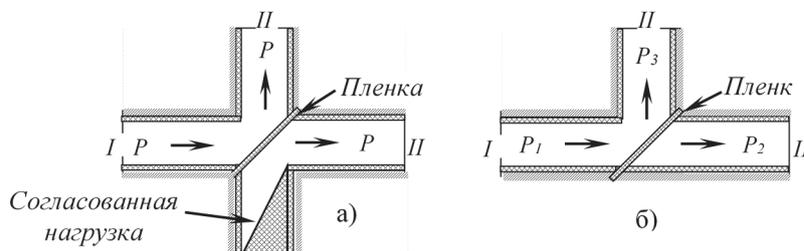


Рис. 1. Конструкции делителей мощности: а – в виде МДВ креста, б – в виде тройника

В диагонали такого устройства устанавливается высокочастотная диэлектрическая пленка с малыми потерями.

Расчет основных характеристик таких устройств в квазиоптическом приближении сводится к задаче расчета коэффициентов отражения и прохождения электромагнитной волны через однородную диэлектрическую пленку, помещенную в свободном пространстве. Для пояснения приведенных ниже соотношений обратимся к рис. 2 [3].

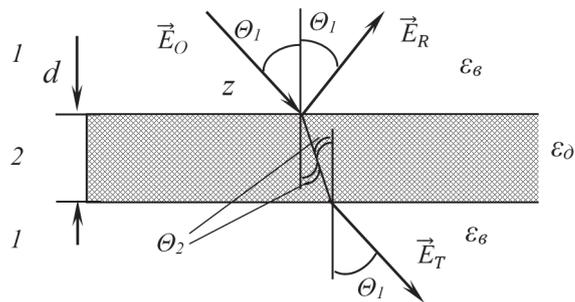


Рис. 2. Ход лучей в слое диэлектрика

На разделяющий пространство 1 (с диэлектрической проницаемостью ϵ_0) диэлектрический слой 2 (с толщиной d и диэлектрической проницаемостью ϵ_d) под углом θ_1 падает плоская волна с единичной амплитудой. Часть волны отражается, а другая часть после преломления проходит в нижнее полупространство.

Выражения для коэффициентов отражения R и прохождения T волны для пластины с диэлектрической проницаемостью ϵ_d , падающей под углом 45° и без учета потерь в высокочастотном диэлектрике, записываются в виде [3]

$$|T_{\perp, \parallel}|^2 = \frac{t_{12}^2 t_{21}^2}{1 + r_{12}^2 r_{21}^2 + 2r_{12} r_{21} \cos 2\beta}, \quad (1)$$

$$|R_{\perp, \parallel}|^2 = \frac{r_{12}^2 + r_{21}^2 + 2r_{12} r_{21} \cos 2\beta}{1 + r_{12}^2 r_{21}^2 + 2r_{12} r_{21} \cos 2\beta}. \quad (2)$$

Здесь индексы \perp и \parallel соответствуют перпендикулярной (вектор E волны перпендикулярен плоскости падения) и параллельной поляризациям (вектор E волны лежит в плоскости падения). Для перпендикулярной поляризации имеем

$$r_{12} = \frac{n_b \cos \theta_1 - n_d \cos \theta_2}{n_b \cos \theta_1 + n_d \cos \theta_2}, \quad r_{21} = \frac{n_d \cos \theta_2 - n_b \cos \theta_1}{n_b \cos \theta_1 + n_d \cos \theta_2}, \quad (3)$$

$$t_{12} = \frac{2n_b \cos \theta_1}{n_b \cos \theta_1 + n_d \cos \theta_2}, \quad t_{21} = \frac{2n_b \cos \theta_1}{n_b \cos \theta_1 + n_d \cos \theta_2}; \quad (4)$$

для параллельной поляризации:

$$r_{12} = \frac{\frac{1}{n_B} \cos \theta_1 - \frac{1}{n_D} \cos \theta_2}{\frac{1}{n_B} \cos \theta_1 + \frac{1}{n_D} \cos \theta_2}, r_{21} = \frac{\frac{1}{n_D} \cos \theta_2 - \frac{1}{n_B} \cos \theta_1}{\frac{1}{n_B} \cos \theta_1 + \frac{1}{n_D} \cos \theta_2}, \quad (5)$$

$$t_{12} = \frac{2 \frac{1}{n_B} \cos \theta_1}{\frac{1}{n_B} \cos \theta_1 + \frac{1}{n_D} \cos \theta_2}, t_{21} = \frac{2 \frac{1}{n_B} \cos \theta_1}{\frac{1}{n_B} \cos \theta_1 + \frac{1}{n_D} \cos \theta_2}. \quad (6)$$

Для обеих поляризаций имеем

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_B d \cos \theta_2, \quad (7)$$

$$n_B = \sqrt{\varepsilon_B}, n_D = \sqrt{\varepsilon_D}. \quad (8)$$

В различных балансных схемах часто используется трехдецибелный делитель, когда модули коэффициентов отражения и прохождения равны ($|R| = |T|$) [4–6]. Анализ выражений (1) и (2) в случае, когда слой 2 окружает воздух ($\varepsilon_s = 1,0$), показывает, что реализация подобного режима для перпендикулярной поляризации падающего поля возможна при значении диэлектрической проницаемости $\varepsilon = \varepsilon_d = 3,4$, а для параллельной поляризации: при $\varepsilon = \varepsilon_d = 11,0$. Для делителей с малым переходным ослаблением (несколько децибел) целесообразно использовать перпендикулярную поляризацию, а для делителей с большим переходным ослаблением (более 10 дБ) – параллельную. При этом наиболее широкополосное деление соответствует значению d , примерно равному нечетному кратному четвертьволновой толщины слоя диэлектрика в соответствии с выражением

$$d = \frac{\lambda_{cp}}{4\sqrt{\varepsilon-0.5}} (2p + 1), \quad (9)$$

где λ_{cp} – длина волны в свободном пространстве на средней частоте рабочего диапазона, $p = 0, 1, 2, \dots$

На рис. 3 приведены результаты расчетных значений коэффициента отражения и прохождения плоской электромагнитной волны от диэлектрического слоя, окруженного воздухом $\varepsilon_s = 1,0$, для двух значений диэлектрической проницаемости при перпендикулярной поляризации на средней частоте 150 ГГц. Значение диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 3,4$ (кривые 1 и 1') действительно обеспечивает деление мощности поровну в плечах устройства.

Однако в связи с отсутствием естественных материалов с требуемой диэлектрической проницаемостью представляет интерес использование естественного материала с наиболее близкими параметрами – плавный кварц ($\varepsilon = 3,91$), кривые 2 и 2'.

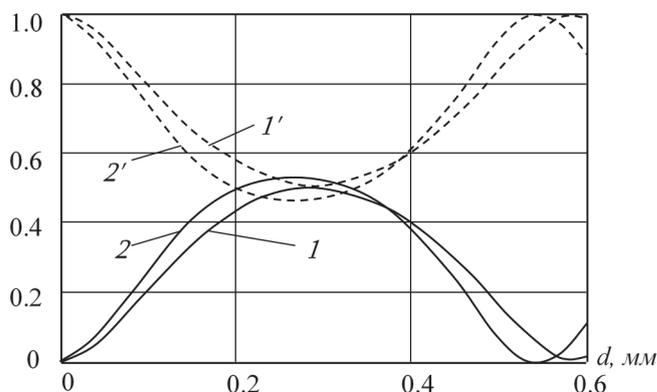


Рис.3. Зависимость коэффициентов отражения (сплошная линия) и прохождения (пунктирная линия) от толщины диэлектрического слоя

На рис.4а приведены расчетные кривые и экспериментальные значения коэффициента прохождения (квадратики) и коэффициента отражения (кружочки) трехдецибельного делителя, выполненного в виде волноводного креста на частотах 150 и 180 ГГц. В качестве диэлектрика используется плавненный кварц толщиной 0,25 мм. Получено хорошее совпадение расчетных и экспериментальных результатов. Видно, что такой делитель обладает достаточной широкополосностью. На рис. 4б показан внешний вид делителя на основе квадратного МДВ сечением 10x10 мм. На фотографии видна согласованная нагрузка, подключенная к правому плечу делителя.

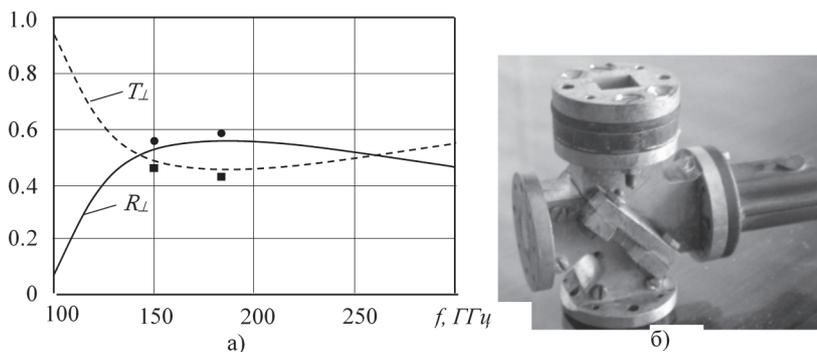


Рис. 4. Расчетные кривые и экспериментальные значения коэффициента передачи T_{\perp} (квадратики) и коэффициента отражения R_{\perp} (кружочки) трехдецибельного делителя (а); внешний вид делителя (б)

Заметим, что приведенные данные получены для толщины d слоя диэлектрика при $p=0$ в выражении (9). Этот случай соответствует наибольшей широкополосности коэффициентов отражения и прохождения. Широкопо-

лосность быстро уменьшается с увеличением d по выражению (9) при возрастании p . Тем не менее, по соображениям механической прочности, выбор больших толщин слоя иногда является необходимым, особенно в терагерцовом диапазоне, когда толщина слоя при $p=0$ получается слишком малой.

Проведенные исследования показывают, что диэлектрические пластины не всегда обеспечивают необходимое ответвление. Для того чтобы реализовать большее значение ответвления, используются частопериодические решетки.

Делители мощности на основе решеток. Поляризационные свойства решеток обеспечивают реализацию целого ряда устройств [6–8]. Иногда такие решетки называют дифракционными. Используются их различные типы: круглые металлические проволочки, плоские ленты, металлодиэлектрические и другие структуры. Результаты теоретических и экспериментальных исследований дифракции электромагнитных волн на периодических структурах наиболее полно отражены в работах [8–10].

В квазиоптической технике для деления мощности волны, как уже отмечалось, широко используются решетки, которые устанавливаются на месте диэлектрической пленки в волноводном тройнике или кресте (см. рис. 1 и рис. 4б). Внешний вид делителя мощности на основе МДВ тройника, использующего решетку, приведен на рис.5.

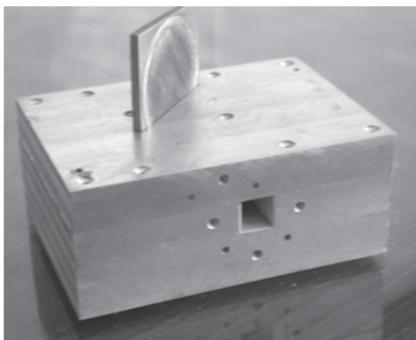


Рис. 5. Делитель мощности на основе волноводного тройника.

В приведенной на рис. 5 конструкции тройника в плоскости нахождения диэлектрической пленки (см. рис 1) выполнен паз, в который устанавливается кассета с диэлектрической пластиной или дифракционной решеткой с известными характеристиками. Волноводы делителя оканчиваются стандартными фланцами.

Прежде чем перейти к рассмотрению основных характеристик делителей на основе частопериодических решеток, рассмотрим основные характеристики решетки, приведенной на рис.6.

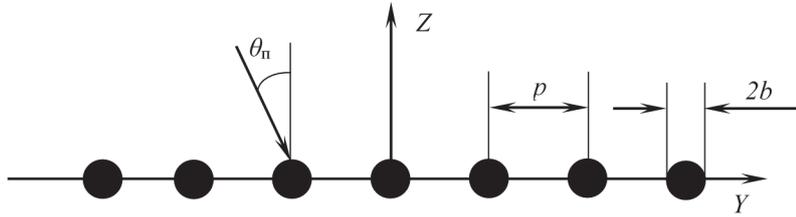


Рис. 6. Одномерная дифракционная решетка из круглых проводов

Для идеально проводящей решетки векторная задача дифракции разделяется на следующие две скалярные задачи, отличающиеся ориентацией электрического вектора по отношению к элементам решетки:

- вектор электрического поля параллелен проводникам решетки (E – поляризация);
- вектор электрического поля перпендикулярен проводникам решетки (H – поляризация).

Строгое решение задачи о прохождении электромагнитной волны сквозь решетку, показанную на рис. 6, с применением эквивалентных граничных условий Вайнштейна – Сивова приведено в [10].

В терагерцовом диапазоне используются решетки, параметры которых удовлетворяют граничным условиям анизотропной проводящей поверхности Владимирского [9–11], записываемым в виде

$$R_{\perp} = 0, \quad T_{\perp} = 1, \quad (10)$$

$$R_{\parallel} = -1, \quad T_{\parallel} = 0. \quad (11)$$

Соотношение между периодом решетки p и длиной волны λ_0 в значительной мере определяет свойства решетки, причем в рассматриваемом случае наибольший интерес представляет длинноволновая область частотного параметра $\chi_p = p/\lambda_0 \ll 1$. Этой области соответствует решетка, для которой получена асимптотика решения задачи дифракции в виде достаточно простых аналитических выражений [12].

Электродинамические свойства подобной решетки в длинноволновом приближении рассмотрены с помощью метода возмущений в работе [12], а выражения для квадрата модуля (отражение по мощности – $|R|^2$) коэффициента отражения и его фазы φ_R в случае редкой решетки с малым коэффициентом заполнения $S_p = 2b/p \ll 1$ имеют следующий вид для E – поляризации:

$$|R_E|^2 = \frac{(1-A_1A_2)^2}{(1+A_1^2)(1+A_2^2)}, \quad (12)$$

$$tg(\varphi_R^E) = \frac{A_1-A_2}{(1+A_1A_2)}, \quad (13)$$

$$A_1 = 2\chi_P \ln\left(\frac{1}{\pi S_P}\right) A_3, A_2 = \frac{\chi_P(\pi S_P)^2}{2} A_3, A_3 = \cos\theta_n;$$

для H -поляризации:

$$|R_H|^2 = \frac{(A_4+A_2A_3)^2}{(1+A_1^2)(A_3+A_4^2)}, \quad (14)$$

$$tg(\varphi_R^H) = \frac{(A_3+A_2A_4)^2}{(A_4-A_2A_3)}, \quad (15)$$

$$A_4 = \frac{A_2}{2A_3}(1 - 2\sin^2\theta_n),$$

где θ_n – угол падения (см. рис. 6).

Аналогичные выражения для рассматриваемой решетки, полученные в [10] методом последовательных приближений, несколько уточняют формулы (12) –(15). Тем не менее, как показывает сопоставление аналитических оценок с результатами строгого решения дифракционной задачи [10, 12], приведенные выражения обеспечивают достаточно высокую точность при коэффициенте заполнения $Sp < 0,25$ и частотном параметре $\chi_P < 0,5$, что характерно для решеток из бесконечных круговых цилиндров, используемых в квазиоптической технике в диапазоне длин волн $\lambda_0 \geq 0,3$ мм.

На рис. 7 приведены результаты численного исследования коэффициентов отражения и передачи делителей для решеток с различными периодами p . Экспериментально измерялись коэффициенты передачи и отражения делителя на двух частотах 150 и 180 ГГц. В кассете была установлена решетка с диаметром проводов $2b = 8$ мкм и периодом $p = 40$ мкм. Полученные результаты показывают хорошее совпадение расчетных и экспериментальных результатов. Как и в предыдущем случае, такая конструкция обеспечивает практически идеальное согласование с волноводным трактом, т.к. отраженная от пластины мощность отводится на согласованную нагрузку.

В заключение рассмотрим применение частопериодических решеток в терагерцовом диапазоне в качестве поляризационных делителей рабочей моды.

Такой делитель является одним из базовых элементов квазиоптического тракта. Несмотря на сходство с диэлектрическим делителем, возможности поляризационного делителя рабочей моды на решетке намного шире. Решетка позволяет изменять соотношение отраженной и прошедшей волн в боковые

каналы делителя в зависимости от угла ориентации ее проводников относительно вектора электрического поля падающей волны.

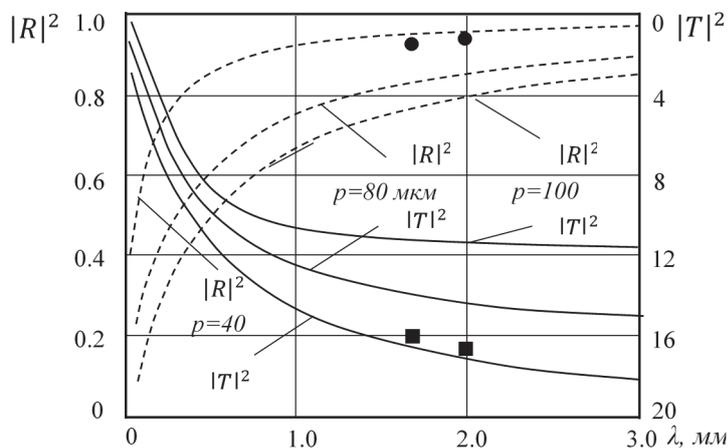


Рис. 7. Расчетные кривые и экспериментальные значения коэффициентов отражения (пунктирные линии) и передачи (сплошные линии) делителя на решетках (E – поляризация)

Заключение. Показано, что характеристики квазиоптических делителей, в которых используются решетки либо диэлектрические пленки, существенно зависят от частоты. Получено хорошее совпадение расчетных и экспериментальных результатов характеристик делителей, использующих как диэлектрические пленки, так и решетки. Указано, что устройства, использующие диэлектрические пленки, обеспечивают фиксированное значение деления мощности по плечам делителя. В делителях, использующих решетки, можно осуществить регулируемое деление мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айвазян М.Ц., Мартиросян Р.М., Казанцев Ю.Н. Направляющие системы для терагерцового диапазона // Физические основы приборостроения. – 2016. – Т. 5, № 1. – С. 28 – 35.
2. Айвазян М.Ц. Направляющие системы для передачи больших мощностей в терагерцовом диапазоне // Известия НАН РА и НПУА. Серия «Техн. науки». – 2016. – Т. 69, № 2. – С. 151 – 160.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики / Пер. с англ.; Под ред. Г.П. Мотулевича. – М.: Наука, 1973. – 720 с.
4. Квазиоптические антенно-фидерные системы / Под ред. Г.И. Хлопова. – Харьков: ИПП «Контраст», 2013. – 408 с.

5. **Костенко А.А., Хлопов Г.И.** Исследование крестообразного разветвления квазиоптических волноводов // Квазиоптическая техника миллиметровых и субмиллиметровых диапазонов волн: Сб. научн. тр. / Институт радиофизики и электроники НАН Украины. – Харьков, 1989. – С. 83-88.
6. **Кулешов Е.М., Литвинов Д.Д.** К вопросу о делении луча в квазиоптических СВЧ-трактах // Радиотехника: Респ. межвед. темат. науч. сб. – Харьков: Изд-во ХГУ, 1971. – Вып. 18. – С. 98–104.
7. **Avakian R., Agababian K., Ayvazyan M., Kazantsev Yu.** Electrical characteristics of the waveguide grating system // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. – 1995. – V. 16, issue 2. - P. 411-418.
8. **Шаров Г.А.** Волноводные устройства сантиметровых и миллиметровых волн. – М.: Горячая линия – Телеком, 2016. – 639 с.
9. **Вайнштейн Л.А.** Электромагнитные волны. – М.: Радио и связь, 1990. – 442 с.
10. **Нефедов Е.И., Сивов А.Н.** Электродинамика периодических структур. – М.: Наука, 1977. – 208 с.
11. **Каценеленбаум Б.З.** Высокочастотная электродинамика. – М.: Наука, 1966. – 240 с.
12. **Шестопалов В.П., Литвиненко Л.Н., Масалов С.А., Сологуб В.Г.** Дифракция волн на решетках. – Харьков: Изд-во ХГУ, 1973. – 272 с.

Национальный политехнический университет Армении. Материал поступил в редакцию 02.06.2020.

Մ.Ս. ԱԶՈՅԱՆ, Մ.Ց. ԱՅՎԱԶՅԱՆ

ՏԵՐԱՀԵՐԳԱՅԻՆ ՏԻՐՈՅԹԻ ԱԶԴԱՆՇԱՆԻ ԲԱԺԱՆԻՉՆԵՐ

Դիտարկվում են տերահերցային տիրույթի ալիքատարային սարքերում ազդանշանի բաժանման մեթոդները: Առաջարկվող բաժանարարները կառուցված են մետաղական-դիէլեկտրիկական ալիքատարի հիման վրա ալիքատարային խաչի տեսքով, որի անկյունագծում տեղադրվում է կիսաթափանցիկ դիէլեկտրիկական թաղանթ, կամ՝ ցանց, որը բաղկացած է զուգահեռ հաղորդալարերից: Բերված են նման սարքավորումների էլեկտրամագնիսական ալիքի անդրադարձման և փոխանցման գործակիցների հաշվարկված արժեքները: Հաշվարկված և փորձարարական արդյունքները լավ համընկնում են: Առաջարկվող սարքերը կարող են լայնորեն օգտագործվել տերահերցային տիրույթի տարբեր ստեղծելու համար:

Առանցքային բառեր. տերահերցային տիրույթ, հզորության բաժանարար, դիէլեկտրիկական թաղանթ, հաճախապարբերական ցանց, մետաղ-դիէլեկտրիկական ալիքատար:

M.S. AZOYAN, M.Ts. AYVAZYAN

THZ RANGE SIGNAL DIVIDERS

The methods of signal division in waveguide devices of the terahertz range are considered. The proposed dividers are built on the basis of an oversized metal-dielectric waveguide in the form of a waveguide tee or waveguide cross. In the diagonal of this devices are installed the dielectric film, or a grating with parallel conductors. The calculated ratios of the reflection and transmission coefficients of the electromagnetic wave from such structures are presented. Good coincidence between the calculated and experimental results is obtained. The proposed devices can be widely used to create various devices of the terahertz range.

Keywords: terahertz range, power divider, dielectric film, grating, metal-dielectric waveguide.