

УДК 621 372.8

К АНАЛИЗУ РАБОТЫ ПРИЗМЕННОГО ДЕЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ В МНОГОМОДОВЫХ ВОЛНОВОДАХ

А. Е. Луньков, Б. А. Ляховецкий

Рассматривается прохождение плоской электромагнитной волны через две диэлектрические 45° -призмы, помещенные в перекрестье многомодовых волноводов. Получены зависимости коэффициентов прохождения волны в каждое из плеч устройства от ширины зазора между призмами, учитывающие внутренние отражения от граней призм и специфику изменения зазора в волноводах.

Проведена экспериментальная проверка расчетных зависимостей на длинах волн 2,2 и 4 мм. На основе сопоставления расчетных и экспериментальных данных оценена возможность аппроксимации характеристик многомодовых призмных делителей мощности зависимостями, полученными для плоской электромагнитной волны.

В настоящее время в квазиоптических системах, используемых в технике измерений миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, находят применение устройства, основанные на явлении полного внутреннего отражения в диэлектрических призмах [1-3].

Ряд конструктивных и принципиальных преимуществ дает помещение этих устройств в волноводы увеличенных сечений, применяемые в качестве канализирующих систем указанных диапазонов длин волн. При расчете характеристик подобных узлов возникает необходимость учета конечных размеров призм, а также оценки применимости основных соотношений, полученных для коэффициентов прохождения плоской электромагнитной волны через воздушный зазор между диэлектрическими средами [4, 5].

Проведенный в [6, 7] анализ внутренних отражений, обусловленных конечными размерами призм, показал, что за счет отражений в призмах высокочастотная мощность проходит в 3-е плечо. Наиболее простой и эффективный способ учета внутренних отражений дан в работе [6], где с помощью метода графов получены следующие выражения для коэффициентов прохождения в каждое из трех плеч делителя:

$$R' = \frac{E_2}{E_0} = \Psi\Psi' R e^{-\gamma s} \frac{1 - (R^2 - T^2) \Gamma^2 e^{-2\gamma s}}{\Delta},$$

$$T' = \frac{E_3}{E_0} = \Psi\Psi' T e^{-\gamma s} \frac{1 + (R^2 - T^2) \Gamma^2 e^{-2\gamma s}}{\Delta},$$

$$D' = \frac{E_4}{E_0} = \Psi\Psi' R T e^{-\gamma s} \frac{2\Gamma}{\Delta},$$

$$\Delta = 1 - 2(R^2 + T^2) \Gamma^2 e^{-2\gamma s} + (R^4 + T^4) \Gamma^4 e^{-4\gamma s},$$

где Ψ, Ψ' — коэффициенты передачи соответственно диэлектрик — воздух и воздух — диэлектрик для плоской нормально падающей электромагнитной волны, Γ, Γ' — соответствующие коэффициенты отражения от граней призм, $\gamma = \alpha + i\beta$ — комплексная постоянная распространения

волны в материале призм, s —размер боковых граней призм, $T(d)$, $R(d)$ — являющиеся функциями зазора величины коэффициентов прохождения и отражения плоской волны, падающей на диагональную поверхность призмы [4, 6].

Выражения для R' , T' , D' получены при условии изменения зазора в направлении, перпендикулярном диагональным граням призм. При помещении призм в пересечение двух волноводов изменение ширины зазора может осуществляться за счет смещения одной из призм вдоль волноводного канала. Это должно сопровождаться изменением условий интерференции волн внутри призм, что может быть описано введением в показатель экспоненты коэффициента передачи соответствующего контура графа величины смещения призмы l . Очевидно, что в случае 45° -призм имеет место соотношение $l = d\sqrt{2}$.

С учетом указанной специфики изменения зазора могут быть получены следующие выражения для коэффициентов прохождения волны в каждое из плеч призматического делителя мощности:

$$R^* = \frac{E_2}{E_0} = \Psi\Psi' R e^{-\gamma s} \frac{1 - (R^2 - T^2 e^{-\gamma l}) \Gamma^2 e^{-2\gamma s}}{\Delta},$$

$$T^* = \frac{E_3}{E_0} = \Psi\Psi' T e^{-\gamma s} \frac{1 + (R^2 - T^2) \Gamma^2 e^{-\gamma(2s+l)}}{\Delta},$$

$$D^* = \frac{E_4}{E_0} = \Psi\Psi' R T \Gamma e^{-2\gamma s} \frac{1 + e^{-\gamma l}}{\Delta},$$

$$\Delta = 1 - [2R^2 + T^2(1 + e^{-2\gamma l})] \Gamma^2 e^{-2\gamma s} + (R^4 + T^4 e^{-2\gamma l}) \Gamma^4 e^{-4\gamma s}.$$

На рис. 1 приведены зависимости модулей R' , T' , D' и R^* , T^* , D^*

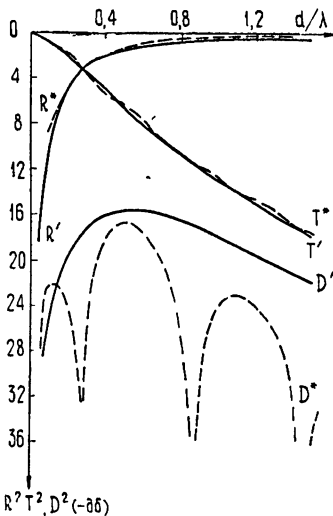


Рис. 1. Расчетные зависимости коэффициентов прохождения волны в каждое из плеч делителя мощности от приведенной к длине волны ширины зазора для тефлоновых 45° -призм.

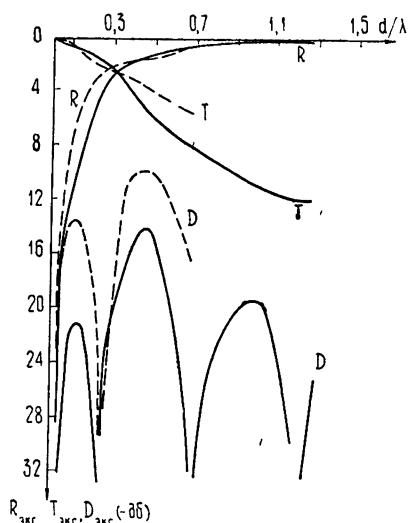


Рис. 2. Типичные экспериментальные зависимости коэффициентов прохождения, полученные на длинах волн 2,2 мм (сплошная кривая) и 4 мм (пунктирная кривая)

от приведенной к длине волны ширины зазора d/λ , рассчитанные для тефлоновых призм, помещенных в волноводный крест сечения $8 \times 17 \text{ мм}^2$.

При расчете параметры материала брались равными $\epsilon = 2,04$, $\operatorname{tg} \delta = 2,8 \cdot 10^{-4}$ [8].

Проведенные расчеты показывают, что для тефлоновых призм с длиной граней s , достигающей значений $s/\lambda = 10$, внутренние отражения приводят к смещению характеристик ослабления волны не более чем на 10% по амплитуде и $2,5^\circ$ по фазе. За счет специфики изменения зазора между призмами в волноводах можно при отдельных положениях призм получать деление мощности с высокой направленностью по отношению к 4-му плечу делителя, что весьма существенно для работы устройства в качестве квазиоптического аналога рефлектометра, измерителя КСВ, высокочастотного моста.

Для экспериментальной проверки полученных зависимостей были изготовлены макет призмленного делителя мощности в канале 8×17 мм², в котором зазор между двумя тефлоновыми 45° -призмами мог изменяться от 0 до 4 мм с точностью $\pm 0,01$ мм. Методом гальванопластики были изготовлены также плавные (порядка 50 длин волн) волноводные переходы на указанное сечение с волноводных каналов 2- и 4-мм диапазонов.

На рис. 2 приведены типичные результаты измерений, полученные на длинах волн 2,2 и 4 мм.

Объяснение имеющих место расхождений между данными расчета и эксперимента может быть получено из сравнения результатов измерений на двух длинах волн с точки зрения квазиоптического представления волн типа H_{n0} в волноводах увеличенного сечения в виде суперпозиции двух плоских волн, распространяющихся под углом $\pm \theta$ к оси волновода, величина которого определяется отношением $\lambda_0/\lambda_{кр}$. При малых углах θ поведение волны на неоднородности, в частности, при падении на призмы, может быть выяснено из геометрической оптики [9].

Из-за преломления на боковой грани углы падения на диагональную грань составляющих основной волны H_{10} в нашем случае будут отличаться от 45° на $2^\circ 30'$ на длине волны 2,2 мм и на $4^\circ 40'$ на 4 мм. За счет этого при нулевом зазоре следует ожидать увеличения прохождения волны в каналы волноводного креста, перпендикулярные каналу возбуждения, т. е. роста R и D . Так как для тефлона критический угол полного внутреннего отражения равен $44^\circ 30'$, в случае одиночной призмы парциальная плоская волна, падающая на диагональную грань под углом, меньшим критического, должна приводить к увеличению прохождения сигнала в прямом направлении.

Указанные эффекты должны проявляться в большей степени с увеличением угла θ , т. е. при постоянном сечении волновода — с увеличением длины волны, что и наблюдалось экспериментально. Так, изложенные выше соображения подтверждаются увеличением значений D , а также более пологим по сравнению с расчетным характером зависимости $T(d/\lambda)$, наблюдаемым с увеличением длины волны.

Другое подтверждение получено из измерений прошедшей и отраженной мощности в случае одиночной призмы, т. е. при $d = \infty$. Отношение отраженной мощности к прошедшей $(R/T)^2$ уменьшается с 17 дБ на длине волны 2,2 мм до 7 дБ на 4 мм.

Предложенный анализ, основанный на экспериментальных данных, представляется вполне правомерным и позволяет, на наш взгляд, сделать ряд практических выводов.

1. Удовлетворительная аппроксимация характеристик призмленного делителя мощности зависимостями, рассчитанными для плоской электромагнитной волны, поляризованной перпендикулярно плоскости падения на диагональную грань призмы, имеет место при увеличении сечения волноводов не менее, чем в 10 раз по сравнению с основными размерами.

2. Увеличение диэлектрической проницаемости призм улучшает указанную аппроксимацию, так как за счет уменьшения длины волны в призме в $\sqrt{\epsilon}$ раз падающая на диагональную грань волна еще более приближается к плоской.

3. Влияние внутренних отражений, возрастающих с увеличением диэлектрической проницаемости призм, может быть учтено на основе изложенной выше методики. При этом интерференционный характер зависимости $D(d/\lambda)$, обусловленный спецификой изменения зазора между призмами, помещенными в волноводы, позволяет получать деление мощности с высокой направленностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. F. Harvey, Proc. IEE, № 2799 E, 154 (1959).
2. D. J. N. Wort, J. Science Instrum., 39, 317 (1962).
3. J. J. Taub et al, IEEE Trans., MTT-11, № 5, 338 (1963).
4. E. E. Hall, Physical Rev., 15, 73 (1902).
5. C. Schefer, G. Gross, Ann. Phys., 32, № 9, 648 (1910).
6. R. G. Fellers, J. Taylor, IEEE Trans., MTT-12, № 6, 584 (1964).
7. А И Адонина, А. М. Андрусенко, Р А Валитов, Радиотехника и электроника, 14, № 5, 905 (1969).
8. Ю. А. Дрягин, А. Н. Чухвичев, Изв. высш. уч. зав.—Радиофизика, 12, № 8, 1245 (1969).
9. К. Као, в сб. Квантоптика, изд. Мир, М., 1966, стр. 341.

Саратовский государственный университет

Поступила в редакцию
2 ноября 1970 г.

TO THE ANALYSIS OF OPERATION OF PRIZM POWER DIVIDER IN
MULTIMODE WAVEGUIDES

A. E. Lun'kov, B. A. Lyakhovetskii

The transmission of a plane electromagnetic wave through two dielectric 45°-prisms placed in the cross of multimode waveguides is considered. The dependences of the transmission coefficients of a wave into each of arms of the arrangement versus the width of a gap between prisms are obtained. They take into account internal reflections from the prism faces and specification of the gap change in waveguides.

An experimental check of calculated dependences is made at the wavelengths of 2.2 and 4 mm. From the comparison of calculated data with the experiment there has been obtained the possibility of approximating the characteristics of multimode prism power divider by the dependences obtained for a plane electromagnetic wave.