

## К ВОПРОСУ О ДЕЛЕНИИ ЛУЧА В КВАЗИОПТИЧЕСКИХ СВЧ-ТРАКТАХ

*Е. М. Кулешов, Д. Д. Литвинов*

Харьков

Эквивалентом таких волноводных СВЧ элементов, как направленный ответвитель и щелевой мост в квазиоптических трактах миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов является делитель луча. Делитель является неотъемлемой частью большинства измерительных схем и устройств. В литературе [1—8] описаны делители, в которых в качестве полупрозрачного зеркала используются диэлектрические призмы, пластины и решетки из диэлектрических нитей, металлические решетки и пленки напыленного металла на диэлектрическую подложку. В большинстве этих работ делитель луча описан не полностью. Более подробно описаны делители с диэлектрической пластиной [7] и с диэлектрическими нитями [8]. Однако и в этих работах делитель луча исследовался только при поляризации, перпендикулярной плоскости падения, что является совершенно недостаточным: во-первых, простым поворотом делителя на  $90^\circ$  вокруг оси первичного направления распространения сигнала можно получить существенно отличное деление луча; во-вторых, все приборы и устройства, создаваемые на базе квазиоптических трактов с осевой симметрией, необходимо исследовать в двух характерных или базисных плоскостях, а также оценивать их способность поворачивать поляризацию сигнала, так как эти параметры влияют на точность измерительных схем и приборов. Следовательно, даже оконечные нагрузки должны в общем случае рассматриваться как четырехполюсники, в которых при пользовании матрицами рассеяния следует коэффициентами  $S_{ii}$  описывать коэффициенты обратного зеркального отражения в

двух взаимноортогональных плоскостях, а  $S_{ik}$  — коэффициенты перекрестного отражения. Делитель в общем случае следует рассматривать как шестнадцатиполосник.

### Основные характеристики делителя

В [7] для делителя вводятся характеристики, которые коренным образом отличаются от характеристик направленного ответвителя, что, на наш взгляд, не является необходимостью. Так как делитель обладает строго выраженной направленностью, то его, как и направленный ответвитель, следует характеризовать коэффициентом направленности, коэффициентом переходного ослабления и коэффициентом прямого ослабления. Рассмотрим схему делителя луча, приведенную на рис. 1.

Здесь  $P_1$  — мощность сигнала, подаваемого в делитель, а  $P_2$ ,  $P_3$  и  $P_4$  — мощности сигналов, выходящих из делителя. Тогда коэффициент переходного ослабления  $C = \frac{P_1}{P_2}$ , коэффициент направленности  $D = \frac{P_2}{P_4}$  и коэффициент прямого ослабления

$$L_{13} = \frac{P_1}{P_3}.$$

Однако эти параметры характеризуют делитель только в одной из двух базисных плоскостей (в плоскости падения пучка или ей ортогональной). В общем случае делитель будем описывать матрицей рассеяния шестнадцатиполосника. Если предположить, что на рис. 1 представлена схема делителя пучка лишь для сигнала, поляризованного в плоскости падения, и что с зажимами 1—1 в одном и том же плече расположены зажимы 5—5 (с 2—2 зажимы 6—6 и т. д.) — для сигнала,

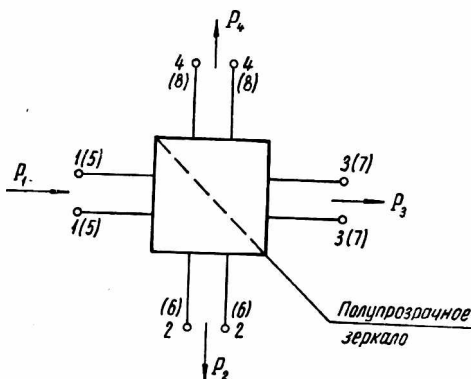


Рис. 1.

поляризованного перпендикулярно плоскости падения, то  $S_{15} = S_{51}$ ,  $S_{26} = S_{62}$ ;  $S_{37} = S_{73}$  и  $S_{48} = S_{84}$  следует назвать [9] коэффициентами отражения для перекрестных базисных поляризаций или перекрестными коэффициентами отражения, а  $S_{17} = S_{71}$ ,  $S_{35} = S_{53}$ ,  $S_{16} = S_{61}$ ,  $S_{25} = S_{52}$ ,  $S_{18} = S_{81}$ ,  $S_{45} = S_{54}$ ,  $S_{28} = S_{82}$ ,  $S_{46} = S_{64}$ ,  $S_{27} = S_{72}$ ,  $S_{36} = S_{63}$ ,  $S_{38} = S_{83}$ ,  $S_{47} = S_{74}$  — перекрестными коэффициентами передачи между двумя базисными поляризациями. Коэффициенты отражения  $S_{ii}$  и перекрестные коэффициенты отражения у большинства делителей пучка ничтожно малы и практически не обнаруживаются. Исключение составляют только призмные делители. Перекрестные коэффициенты передачи принципиально отличны от нуля только у проволочных делителей и у делителей из диэлектрических нитей.

Величины этих коэффициентов в основном определяются анизотропией, углом между плоскостью падения и азимутальной плоскостью, проходящей через ось анизотропии. Ввиду ощутимой величины перекрестных коэффициентов передачи делители с проволочками и диэлектрическими нитями оказываются непригодными для общего применения и применяются лишь для специализированных схем (сведения в один канал сигналов двух базисных поляризаций и пр.). Наиболее полно эти свойства выражены у проволочных делителей пучка с расстоянием между проволочками (шагом)  $l \ll \lambda$  ( $\lambda$  — длина волны).

## Широкополосные делители луча общего применения

Наиболее широкополосным делителем общего применения является делитель с полупрозрачным зеркалом из диэлектрической пленки. Однако для этого необходимо правильно выбрать материал и толщину

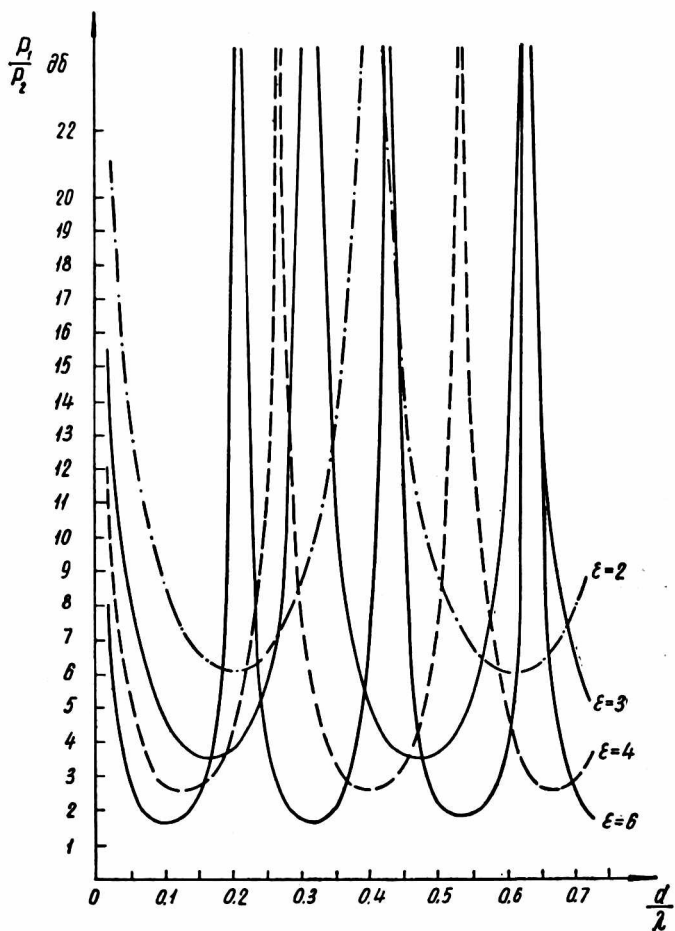


Рис. 2.

пленки. В соответствии с работой [10] получены выражения для коэффициентов переходного ослабления безграничной диэлектрической плоско-параллельной пластины, на которую падает плоская волна под углом  $45^\circ$ . Рассматривался случай диэлектрика без потерь для  $P$  и  $S$  колебаний, т. е. колебаний, параллельных и перпендикулярных плоскости падения.

Коэффициент переходного ослабления в децибелах для  $S$  колебаний

$$C_s = 10 \lg \frac{\epsilon^2 + (2\epsilon - 1) \operatorname{ctg}^2 \left( 2\pi \frac{d}{\lambda} \sqrt{\epsilon - 0,5} \right)}{(\epsilon - 1)^2} \quad (1)$$

Коэффициент переходного ослабления в децибелах для  $P$  колебаний

$$C_p = 10 \lg \frac{4\varepsilon^2 (2\varepsilon - 1) + (\varepsilon - 1)^4 \sin^2 \left( \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\varepsilon - 0,5} \right)}{(\varepsilon - 1)^4 \sin^2 \left( \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\varepsilon - 0,5} \right)} \quad (2)$$

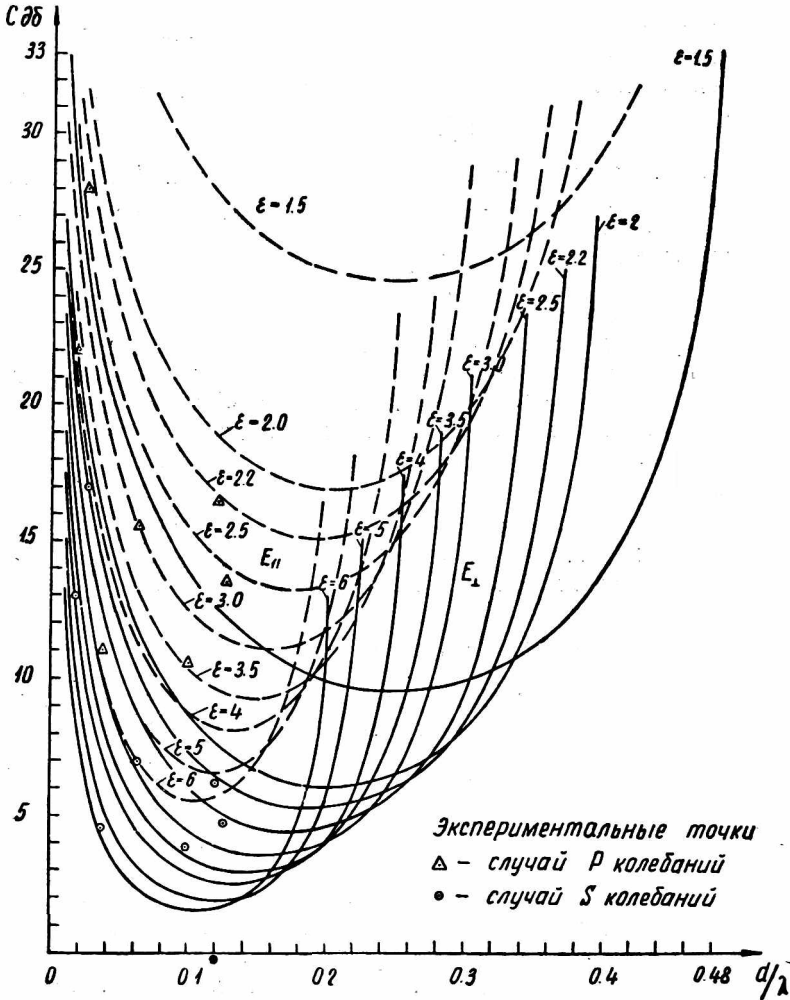


Рис. 3.

Здесь  $\varepsilon$  — диэлектрическая постоянная;  
 $d$  — толщина пластины;  
 $\lambda$  — длина волны в свободном пространстве.

На рис. 2 приведено несколько периодов кривых, построенных по формуле (1). Отсюда следует, что наиболее широкополосное деление получается при работе в пределах периода первого минимума кривой для  $\varepsilon$  выбранного материала. Подобные этим кривые, с тем же периодом получаются по формуле (2), но они расположены выше. Оба семейства таких кривых (приведен только первый период) показаны на рис. 3. Сплошными линиями изображены кривые для  $S$  колебаний, а

пунктирными — для  $P$  колебаний. Из анализа этих кривых можно сделать ряд выводов:

- 1) абсцисса положения минимума для обоих семейств кривых (1) и (2) может быть определена из выражения

$$\frac{d}{\lambda_{\text{ср}}} = \frac{1}{4\sqrt{\varepsilon - 0,5}}, \quad (3)$$

где  $\lambda_{\text{ср}}$  — длина волны в свободном пространстве, соответствующая некоторой средней частоте;

- 2) для одной и той же диэлектрической проницаемости кривые из обоих семейств симметричны прямым  $\frac{d}{\lambda_{\text{ср}}} = \text{const}$ ;

3) отличие в переходном ослаблении для случая  $P$  и  $S$  колебаний в минимумах кривых изменяется от 15 дБ у материала с  $\varepsilon = 1,5$  до 4 дБ у материала с  $\varepsilon = 6$ ;

4) крутизна кривых у минимумов в случае  $S$  колебаний меньше, чем у кривых для  $P$  колебаний.

Отсюда следует, что

- а) толщину пленки для делителя луча нужно выбирать такую, чтобы на средней частоте рабочего диапазона выполнялось соотношение (3);
- б) для делителей с малым переходным ослаблением (несколько децибел) целесообразно использовать  $S$  колебания, а для делителей с большим переходным ослаблением (десять и более децибел) —  $P$  колебания;
- в) поворотом делителя на  $90^\circ$  вокруг направления распространения первичного луча в зависимости от  $\varepsilon$  пленки можно изменить переходное ослабление от единиц до десятка и более децибел.

### Конструкция и экспериментальное исследование делителя луча

Разработана и испытана конструкция касетного пленочного делителя луча, весьма удобная для быстрого получения в любой работающей схеме необходимого деления путем смены касет и для определения  $\varepsilon$  пленочных диэлектрических материалов. Эскиз конструкции делителя, созданного на базе диэлектрического лучевода, показан на рис. 4. Здесь в металлическом корпусе, собранном из двух половин и имеющем четыре присоединительных фланца, в два взаимно-перпендикулярных цилиндрических канала вклеены четыре отрезка диэлектрической трубы, образующих два скрещенных полых диэлектрических лучевода, под углом  $45^\circ$  к осям которых вставляется сменная кассета. Эскиз конструкции кассеты для диэлектрических пленок приведен на рисунке внизу. Пленка в кассете натягивается при помощи кольца полукруглого сечения, которое с помощью винтов перемещается в кольцевом пазу прямоугольного сечения и вдавливают пленку, зажатую между двумя пластинами, в кольцевую выточку полукруглого сечения. Внешний вид делителя приведен на рис. 5.

Схема измерения параметров делителя показана на рис. 6. Измерение коэффициентов переходного ослабления проводилось по методу замещения с помощью трехсетчатого поворотного измерительного аттенюатора ( $АТ_{\text{изм}}$ ) при замене в схеме рис. 6 кассеты с пленкой кассетой с полностью отражающим металлическим зеркалом.

При измерении коэффициента прямого ослабления индикаторную часть схемы ( $АТ_{\text{ф}}$  — фиксированный развязывающий аттенюатор, ВЛП — волноводно-лучевой переход, ДГ — детекторная головка и Инд. — инди-

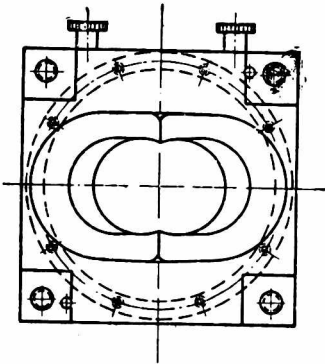
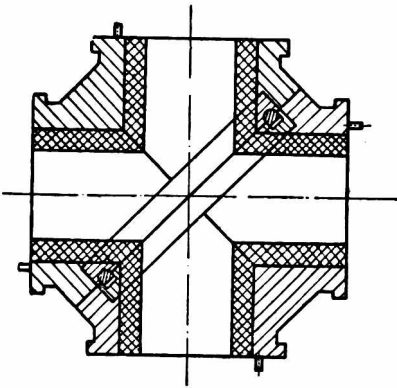


Рис. 4.

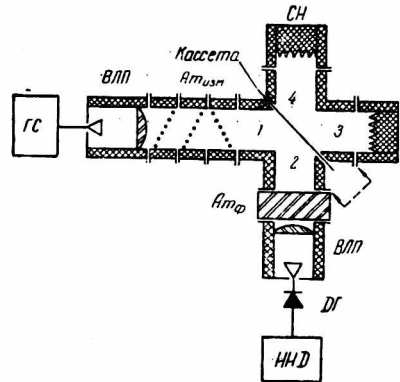


Рис. 6.

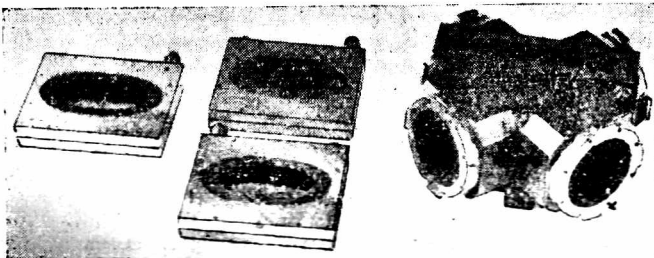


Рис. 5.

катор) меняют местами с согласованной нагрузкой (СН), присоединенной к плечу 3. Коэффициент прямого ослабления также измерялся с помощью метода замещения. Сигнал, прошедший через пленку, уравнивался с сигналом при вынутой кассете.

При измерении коэффициента направленности к плечу 4 присоединяется ВЛП с ДГ и Инд., плечо 2 нагружается СН, а к плечу 3 присоединяется короткозамыкающее зеркало. Измерение проводилось по методике, описанной в работе [7].

Результаты испытания на волне 1,6 мм семи кассет с различными пленками приведены в таблице. Пленки на соответствие условию (3) не подбирались.

| Материал диэлектрической пленки | Толщина пленки, мм | S колебания |                      | P колебания |                      | ε    |
|---------------------------------|--------------------|-------------|----------------------|-------------|----------------------|------|
|                                 |                    | C, дб       | L <sub>13</sub> , дб | C, дб       | L <sub>13</sub> , дб |      |
| Полиэтилен . . . . .            | 0,19               | 6,2         | 1,7                  | 16,5        | 0,4                  | 2,2  |
| Полиэтилен . . . . .            | 0,04               | 17,0        | 0,3                  | 28,0        | 0,1                  | 2,25 |
| Хлорвинил . . . . .             | 0,2                | 4,7         | 2,2                  | 13,5        | 0,6                  | 2,55 |
| Слюда . . . . .                 | 0,06               | 4,5         | 2,5                  | 11,0        | 0,7                  | 5,4  |
| Фотопленка . . . . .            | 0,1                | 7,0         | 1,4                  | 15,6        | 0,5                  | 3,0  |
| Стеклоткань . . . . .           | 0,15               | 3,8         | 3,0                  | 10,5        | 0,8                  | 3,3  |
| Целлофан . . . . .              | 0,03               | 13,0        | 0,6                  | 22,0        | 0,4                  | 3,5  |

Измеренные значения переходного ослабления для соответствующих величин  $\frac{d}{\lambda}$  нанесены точками на рис. 3. Из рисунка следует, что пленки из полиэтилена толщиной  $d = 0,19$  мм, хлорвинила  $d = 0,2$  мм и стеклоткани  $d = 0,15$  мм близки к оптимальным для миллиметрового диапазона радиоволн (1,5 ÷ 0,7 мм), что волна 1,6 мм для них почти совпадает с длинноволновой границей рабочего участка и что в целом экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными.

Экспериментальная оценка направленности в обеих базисных плоскостях показала, что  $D$  более 40 дб.

Описанная конструкция делителя луча весьма удобна для практического использования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. G. Schulten. NTZ, № 9, Sept., 1961.
2. R. G. Fellers. Microwave J. 5, 80, 1960 (рус. перевод, Зар. Р. Э. № 11, 1962).
3. J. J. Taub and others. IEE Tr, MTT—11, 338, 1963 (рус. перевод, Зар. Р. Э. № 8, III, 1964).
4. Bled and others. Onde electr., 44, № 448, 28, 1964.
5. A. P. King. Microwave J., 7, 102, 1964 (рус. перевод, Зар. Р. Э., № 11, 107, 1964).
6. Н. А. Ирисова, Е. А. Виноградов. Proc. 3d Colloq on Microwave Communication, Budapest, 1966. Publ. Hungarian Ac. of Sci. Budapest, 731, 1968.
7. А. Н. Ахиезер. Труды метрологических институтов СССР, вып. 99, (159), 1969.
8. А. Н. Ахиезер. ПТЭ, № 6, 1969.
9. Д. Б. Канарейкин и др. Поляризация радиолокационных сигналов. Изд-во «Советское радио», 1966.
10. М. Борн. Оптика. Научно-техн. изд-во Украины, Харьков—Киев, 1937.