

УДК 621.372.8.09

## КВАЗИОПТИЧЕСКАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ СОБСТВЕННЫХ ВОЛН ВОЛНОВОДОВ КРУГОВОГО СЕЧЕНИЯ ПОСРЕДСТВОМ АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫХ РЕФЛЕКТОРОВ

С. Н. Власов, И. М. Орлова, М. И. Петелин

Описана конструкция и приведен расчет квазиоптического волнового трансформатора, преобразующего одну из собственных волн сверхразмерного волновода кругового сечения в собственную волну другого волновода кругового сечения, отличающуюся от первой радиальным индексом. Экспериментально осуществлено преобразование волны  $H_{01}$  в волну  $H_{02}$  с коэффициентом передачи по мощности  $\eta = 0,74$ .

Применение существующих методов преобразования волн (таких, как плавное изменение поперечного сечения [1] или импеданса стенок волноводов [2], использование неоднородностей в волноводе, связывающих две волны [3], использование связанных волн, распространяющихся в разных волноводах [4] или в одном и том же волноводе [5]) к волноводам большого — по сравнению с длиной волны  $\lambda$  — сечения сталкивается с трудностями, обусловленными необходимостью обеспечения высокой точности изготовления волноводных трансформаторов. Несоблюдение этих требований влечет за собой потери мощности на переизлучение в паразитные типы волн.

Для преобразования собственных волн волноводов увеличенного сечения друг в друга, а также в квазиоптические волновые пучки можно использовать квазиоптические методы [6]. В настоящей работе для трансформации одной из собственных волн сверхразмерного волновода кругового сечения в другую, отличающуюся от первой лишь радиальным индексом, предлагается преобразователь в виде аксиально-симметричного рефлектора (рис. 1). Принцип действия его может быть рассмотрен на основе геометрооптических представлений.

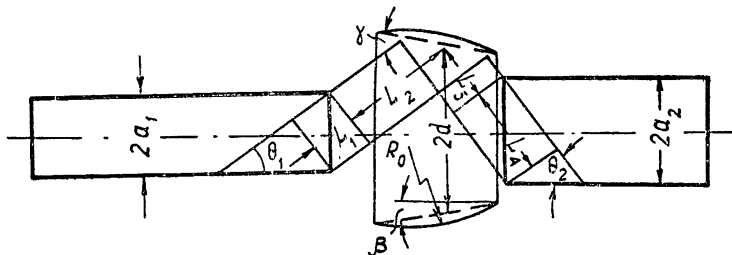


Рис. 1. Аксиально-симметричный волновой трансформатор.

**Геометрооптическое представление.** Представим собственную волну волновода кругового сечения в виде суперпозиции плоских волн (концепция Бриллюэна), волновые векторы  $k$  которых образуют одинаковый угол  $\theta = \arcsin \frac{x_{mn}}{k}$  с осью  $z$ , где  $k = 2\pi/\lambda$ , а  $x_{mn}$  — поперечное волновое

число (для  $H_{mn}$ -волн  $\chi_{mn} = \nu_{mn}/a$ , где  $\nu_{mn}$  — корень уравнения  $J'_m(\nu_{mn}) = 0$ ; для  $E_{mn}$ -волн  $\chi_{mn} = \mu_{mn}/a$ , где  $\mu_{mn}$  — корень уравнения  $J_m(\mu_{mn}) = 0$ ,  $J_m, J'_m$  — функция Бесселя и ее производная соответственно,  $a$  — радиус волновода). При выполнении условия  $m^2 \ll \nu_{mn}^2$  или  $m^2 \ll \mu_{mn}^2$  поле излучения вблизи открытого конца сверхразмерного волновода представляет собой набор расходящихся волн, ограниченных апертурой волновода и составляющих угол  $\theta$  с осью  $z$ , и описывается  $z$ -компонентой вектор-потенциала (магнитного или электрического)

$$\frac{f(r, z) \exp(j \sqrt{k^2 - h^2} r - jhz + jm\varphi)}{\sqrt{r}},$$

где

$$f(r, z) = g(\xi) = \begin{cases} 0 & (\xi < -a \operatorname{ctg} \theta) \\ A = \text{const} & (-a \operatorname{ctg} \theta < \xi < a \operatorname{ctg} \theta), \\ 0 & (\xi > a \operatorname{ctg} \theta) \end{cases}$$

$$\xi = z - r \operatorname{ctg} \theta.$$

Волнам одного типа (магнитным или электрическим), имеющим одинаковые азимутальные, но различные радиальные индексы, соответствуют волновые пучки, отличающиеся лишь углом  $\theta$  между направлением их распространения и осью  $z$ . Чтобы осуществить преобразование одной из этих волн в волну с другим радиальным индексом, необходимо изменить угол между направлением распространения волновых пучков и осью  $z$ , что достигается посредством конического отражателя (рис. 1). Если образующая отражателя составляет угол  $\beta$  с осью  $z$ , должно выполняться соотношение

$$\beta = \frac{\theta_2 - \theta_1}{2},$$

где  $\theta_2$  и  $\theta_1$  — бриллюэновские углы для волн  $H_{m_2}(E_{m_2})$  в волноводе II и  $H_{m_1}(E_{m_1})$  в волноводе I. Ширина пучков, измеренная перпендикулярно направлению их распространения, должна быть одинаковой для обоих волноводов:

$$a_1 \cos \theta_1 = a_2 \cos \theta_2.$$

Геометрооптический подход может быть использован в качестве нулевого приближения при расчете трансформаторов волн при соблюдении следующих условий.

1. Диаметры волноводов должны быть достаточно велики:

$$p_1 = \frac{\sqrt{s_1 \lambda}}{2a_1 \cos \theta_1} \ll 1, \quad p_2 = \frac{\sqrt{s_2 \lambda}}{2a_2 \cos \theta_2} \ll 1$$

(здесь  $s_1$  и  $s_2$  — расстояния от центров волноводов до той точки отражателя, в которой пересекаются центральные лучи).

2. Волновые пучки каждого из волноводов должны существовать раздельно в области отражателя. Из-за дифракции пучки расплываются и при значениях параметра  $p \gg 1$  границы их приближаются к асимптотам, составляющим углы  $\alpha = \pm \arcsin \frac{\lambda}{2a_{1,2} \sin \theta_{1,2}}$  с направлениями

распространения пучков. В дальней зоне эти углы соответствуют первым нулям диаграмм направленности. Можно считать, что пучки существуют раздельно, если первый нуль диаграммы направленности каждого из пуч-

ков находится с той же стороны от линии  $\theta = 0$ , что и направление главного лепестка. Отсюда следует условие  $\nu_{ml}, \nu_{mp} > \pi$ . Этому условию не удовлетворяет волна  $H_{11}$ : из-за дифракции пучки сливаются при любом диаметре волновода; поэтому излучение, направленное вдоль оси, попадает в волновод II, минуя отражатель, что снижает эффективность преобразования.

*Квазиоптическое приближение.* При геометрическом подходе функция  $f(r, z)$  в выражении для вектор-потенциала зависит только от одной переменной  $\xi = z - r \operatorname{ctg} \theta$ ; в более высоком — квазиоптическом — приближении следует учитывать расплывание волнового пучка. Если поле волны, распространяющейся под углом  $\theta$  к оси  $z$ , на цилиндрической поверхности радиуса  $a_1$  описывается функцией  $f_1(z + a_1 \operatorname{ctg} \theta)$  при  $-l_0 < z + a_1 \operatorname{ctg} \theta < l_0$ , то функция  $f_2(z - a_2 \operatorname{ctg} \theta)$ , описывающая поле волны на цилиндрической поверхности радиуса  $a_2$ , может быть найдена с помощью интеграла Кирхгофа:

$$f_2(z - a_2 \operatorname{ctg} \theta) = \sqrt{\frac{ik \sin^3 \theta}{2\pi(a_1 + a_2)}} \int_{-l_0}^{l_0} f_1(z + a_1 \operatorname{ctg} \theta) \times \\ \times \exp \left[ -\frac{ik \sin^3 \theta}{4(a_1 + a_2)} (z_1 - z)^2 \right] dz_1.$$

Эта формула, полученная в [7] для  $m = 0$ , справедлива при условии  $m^2 \ll \nu_{mn}^2$ .

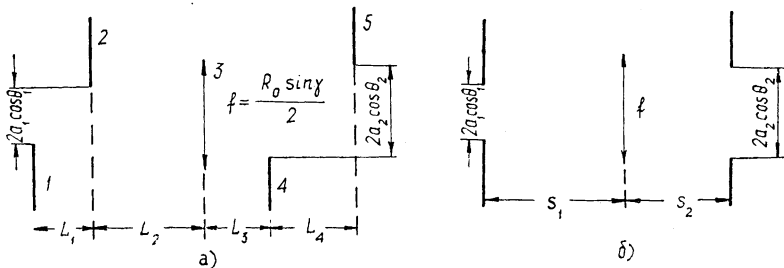


Рис. 2. Эквивалентные схемы преобразователя.

Для уменьшения потерь в предполагаемом преобразователе целесообразно использовать отражатель с фазовой коррекцией. Оптимальный радиус кривизны образующей отражателя и величина коэффициента преобразования могут быть определены из эквивалентной схемы, приведенной на рис. 2 а, где 1, 2, 4, 5 — поглощающие экраны, 3 — линза с фокусным расстоянием  $f = \frac{R_0 \sin \gamma}{2}$ ,  $R_0$  — радиус кривизны образующей отра-

жателя,  $\gamma$  — угол между образующей отражателя и направлением падающего на него лучка. Расстояния  $L_1, L_2, L_3, L_4$  определяются из лучевых соображений (рис. 1) и связаны с геометрическими размерами преобразователя следующими соотношениями:  $L_1 = 2a_1 \sin \theta_1$ ;  $L_2 = d/\sin \theta_1 - a_1 \sin \theta_1$ ;  $L_3 = d/\sin \theta_2 - a_2 \sin \theta_2$ ;  $L_4 = 2a_2 \sin \theta_2$ . При расчете коэффициента трансформации энергии падающего пучка определяется в плоскости 2. Коэффициент возбуждения волновода II зависит от безразмерных параметров  $C_1 = \frac{k(a_1 \cos \theta_1)^2}{L_1}$ ,  $C_2 = \frac{k(a_1 \cos \theta_1)^2}{L_2}$ ,  $C_3 = \frac{ka_1 a_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2}{L_3}$ ,

$C_4 = \frac{k(a_2 \cos \theta_2)^2}{L_4}$  и  $f/L_2$ . В области применимости геометрической

оптики, что соответствует значениям  $C_1, C_2, C_3, C_4 \gg 2\pi$ , коэффициент трансформации стремится к 1\*. Однако, как показывает расчет, даже при  $C_1, C_2, C_3, C_4$  порядка  $\pi$  коэффициент преобразования может быть достаточно высок.

На рис. 3 приведена сосчитанная на ЭВМ зависимость коэффициента возбуждения волновода II по мощности от величины  $f/L_2$  для системы с  $C_1 = 3,7$ ;  $C_2 = 2$ ;  $C_3 = 4,7$ ;  $C_4 = 2,8$  (эти параметры соответствуют экспериментальной модели трансформатора, изображенной на рис. 4, с диаметрами волноводов  $2a_1 = 17,2$  мм,  $2a_2 = 23,6$  мм,  $2d = 30$  мм, предназначенной для преобразования волны  $H_{01}$  в волну  $H_{02}$  на длине волны 8,35 мм). Как следует из графика, максимальная величина коэффициента преобразования  $\eta$  равна 0,72 и очень медленно падает при отклонении фокусного расстояния линзы от оптимального значения, для описанной модели равного 19 мм.

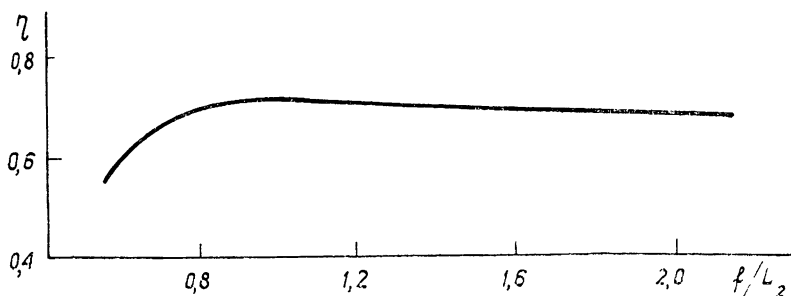


Рис. 3. Расчетная зависимость коэффициента преобразования от фокусного расстояния линзы.

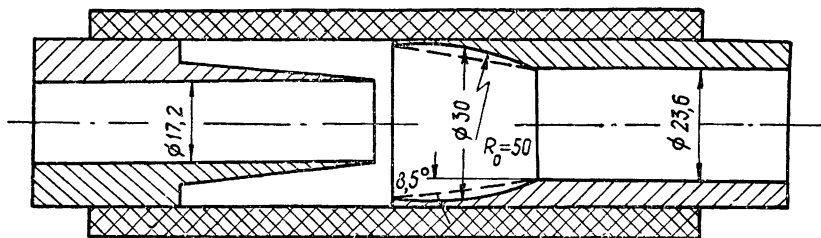


Рис. 4. Экспериментальная модель преобразователя.

**Приближенный метод подбора корректора.** Некритичность коэффициента передачи по отношению к изменению фокусного расстояния корректора позволяет определять фокусное расстояние  $f$  по упрощенной эквивалентной схеме (рис. 2 б). Будем считать, что поле плоской волны обрезается краями волновода не поочередно слева и справа, а одновременно в некотором среднем сечении:  $2a_1 \cos \theta_1$ ,  $2a_2 \cos \theta_2$  — размеры пучков по линиям, проходящим через центры апертур волноводов перпендикулярно направлению распространения пучков; фазовый фронт вдоль этих линий предполагается плоским, а распределение поля П-образным. Аппроксимируем П-образные распределения полей гауссовыми функциями

\* При больших значениях  $C$  уменьшается дифракционное расплывание пучков; однако волноводы становятся очень многомодовыми, бриллюэновские углы для волн, имеющих одинаковые азимутальные и близкие радиальные индексы, мало отличаются друг от друга, в связи с чем возрастают требования к точности изготовления и юстировки рефлекторов.

ми  $\exp\left(-\frac{x^2}{w_{1,2}}\right)$ , где  $w_{1,2} = \frac{a_{1,2} \cos \theta_{1,2}}{1,06}$  [8]. При  $s_1 = s_2 = s$  и  $w_1 = w_2 = w$  оптимальное фокусное расстояние  $f$  можно найти по формуле

$$f = \frac{\pi^2 w^4}{2\lambda^2 s} + \frac{s}{2}.$$

Для преобразователя, параметры которого приведены выше, найденное таким образом значение  $f$  равно 17,5 мм, соответственно  $R_0 = 50$  мм, что согласуется с более точным расчетом на основе метода интегрального уравнения.

*Полоса преобразования.* Оценка полосы преобразования может быть осуществлена следующим образом. При изменении длины волны  $\lambda$  меняются углы  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , что приводит к смещению центров пучков волноводов I и II на отражателе. При аппроксимации пучков соответствующими гауссовыми пучками зависимость коэффициента преобразования от длины волны определяется выражением  $\exp\left(-\frac{\Delta^2}{w^2}\right)$ , где  $\Delta$  — смещение центров пучков на образующей отражателя, равное

$$\Delta = \frac{d\lambda}{\lambda} \frac{1}{\sin(\theta_1 + \beta)} (S_1 \operatorname{tg} \theta_1 + S_2 \operatorname{tg} \theta_2),$$

а  $\bar{w}$  — полуширина пучков на отражателе.

*Результаты эксперимента.* Экспериментально исследовались волновые преобразователи  $H_{01} \rightarrow H_{02}$ . Схема установки для измерения коэффициента преобразования приведена на рис. 5. Измерение коэффициента преобразования производилось с помощью подвижного поршня, помещавшегося в волновод II. В качестве поршня использовалась коническая втулка, полностью отражающая волну  $H_{02}$  и не влияющая на прохождение волны  $H_{01}$ . Волна  $H_{01}$  излучалась из волновода II практически без отражения, что позволяло рассматривать систему как четырехполюсник. При различных положениях конической втулки определялись с помощью измерительной линии комплексные коэффициенты отражения на входе системы. Точки, изображающие коэффициенты отражения в полярной системе координат, хорошо легли на некоторую окружность. С помощью соответствующих построений [9] был определен коэффициент передачи по мощности данного четырехполюсника, равный (если пренебречь омическими потерями в преобразователе Марье) коэффициенту преобразования исследуемого трансформатора.



Рис. 5 Схема установки для измерения коэффициента преобразования: 1—генератор, 2—измерительная линия, 3—преобразователь Марье, 4, 6—волноводы кругового сечения, 5—конический отражатель, 7—подвижная втулка.

Максимальная величина коэффициента преобразования волны  $H_{01}$  в волну  $H_{02}$  для трансформатора, изображенного на рис. 4, с  $R_0 = 50$  мм достигала величины  $0,74 \pm 0,02$ . Этот результат находится в хорошем согласии с результатами расчета. В модели без фазовой коррекции максимальная величина коэффициента преобразования не превышала 0,6,

На рис. 6 приведена зависимость коэффициента преобразования от длины волны  $\lambda$ . Полосу преобразования не удалось снять полностью, так как она была ограничена со стороны длинных волн полосой преобразователя Марье ( $\lambda < 8,8$  мм). Полоса преобразования, измеренная на уровне  $\eta = 0,8 \eta_{\max}$ , составляет 7% и близка к расчетному значению, равному 8%.

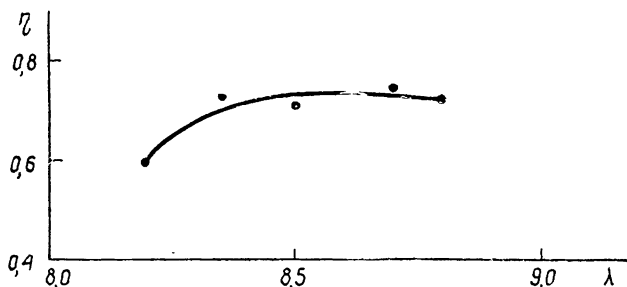


Рис. 6.

## ЛИТЕРАТУРА

1. P. Marie, *Onde electr., Communications presentees au Congres International des Circuits et Antennas Hyperfrequencies*, Paris, 2, 471 (1957).
2. Н. П. Керженцева, *Радиотехника и электроника*, 16, № 1, 29 (1971).
3. П. Л. Капица, *Электроника больших мощностей*, сб. 4, изд. Наука, М., стр. 7, 1965.
4. S. E. Miller, *Bell System Techn. J.*, 33, № 3, 661 (1954).
5. Н. Ф. Ковалев, И. М. Орлова, М. И. Петелин, *Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика*, 11, № 4, 784 (1968).
6. С. Н. Власов, Л. И. Загрядская, Н. Ф. Ковалев, И. М. Орлова, М. И. Петелин, *Тезисы докладов 5-го Всесоюзного симпозиума по дифракции и распространению радиоволн*, Ленинград, 1970.
7. Б. З. Каценеленбаум, *Радиотехника и электроника*, 8, № 9, 1516 (1963).
8. В. С. Авербах, С. Н. Власов, Э. М. Попова, Н. М. Шеронова, *Радиотехника и электроника*, 11, № 4, 750 (1966).
9. Э. Гинзтон, *Измерения на сантиметровых волнах*, ИЛ, М., 1960.

Научно-исследовательский радиофизический институт

Поступила в редакцию  
3 апреля 1972 г.

### QUASI-OPTICAL TRANSFORMATION OF NATURAL WAVES OF CIRCULAR-SECTION WAVEGUIDES BY MEANS OF AXIALLY-SYMMETRIC REFLECTORS

*S. N. Vlasov, I. M. Orlova, M. I. Petelin*

The design is described and the calculation is made of the quasi-optical wave transformer which transforms one of natural waves of a super-dimensional circular-section waveguide into the natural wave of the other circular-section waveguide differing from the first in the radial index. The  $H_{01}$  wave transformation into  $H_{02}$  wave with the power transmission coefficient  $\eta=0.74$  is experimentally realized.