

КОНВЕРСИЯ ТЕМ-ВОЛНЫ В ВЫСШИЕ ТМ-ВОЛНЫ НА КАСКАДАХ РАЗНОПЕРИОДНЫХ ЛЕНТОЧНЫХ ДИАФРАГМ

Введение

В радиофизике актуальна проблема преобразователей волноводных волн с высоким КПД передачи энергии возбуждающей волны в энергию только одной из возбужденных волн. Известные разработки таких устройств (например, [1]) относились к случаю $TE_{n,0}$ -волн. В то же время существуют приложения (включая дифракционную электронику), которые требуют создания аналогичных устройств с H -поляризованными волнами, включая TEM -волну. В этой работе мы решаем такую проблему. Здесь мы столкнулись с трудностями обеспечения широкополосности рассмотренных устройств.

1. Решение задач дифракции

Рассмотрим структуру, изображенную на рис. 1, и далее более сложные структуры, необходимые для осуществления необходимых нам трансформаций волн планарного волновода. Идеальный импеданс стенок волновода предполагаем нулевым. Т.е. в отличие от ситуации [1] предполагаем наличие в полях нулевой (TEM) волны кроме высших волноводных волн, поляризованных по y (перпендикулярно плоскости рисунка). Так что искомые поля выразим через функцию

$$P_k = \sum_n \{ C_n^k \exp[i\gamma_n(Z_{k-1} - z)] - D_n^k \exp[i\gamma_n(z - Z_k)] \} \exp[ig_n x]; \quad \gamma_n = \sqrt{\kappa^2 - n^2}, \quad (1)$$

$$C, D_n^k = \pm C, D_{n-2s}^k; C_n^k + \Omega D_n^k e_n^k = C_n^{k-1} e_n^{k-1} + \Omega D_n^{k-1} e_n^{k-1}; D_n^3 = 0; e_n^k = \exp(2i\gamma_n r_k \pi/a); \quad (2)$$

($r_k = r_1 \wedge r_2$), где $\kappa = 2a/\lambda$ – безразмерное волновое число ($a = \pi$), λ – длина волны. При этом амплитуды полей связаны здесь при “ \pm ”=“ $+$ ” в (2) в отличие от “ $-$ ” в [1], что и предполагает наличие нулевой (TEM) волны. Кроме того в (2) имеем иное “ ± 1 ” в виде фактора Ω , зависящего от поляризации поля. Здесь $\Omega = -1$ (в отличие от случая [1] E -поляризации), а функция P_k совпадает с компонентой H_y , перпендикулярной плоскости чертежа.

Сшивая поля на границах $z=0, -r_1, -r_1-r_2$ и используя метод матричных операторов [2], получим для расчета искомых амплитуд C, D бесконечную систему уравнений (СЛАУ)

$$\begin{aligned} C_m^2 &= (\delta_m^p \pm \delta_m^{-p-2s}) T_{m \leftarrow p}^1 + \sum_n R_{m \leftarrow n}^1 D_n^2 e_n^1; \quad D_m^2 = \sum_n (R_{m \leftarrow n}^2 C_n^2 e_n^1 + T_{m \leftarrow n}^2 D_n^3 e_n^2); \\ C_m^3 &= \sum_n (R_{m \leftarrow n}^2 D_n^3 e_n^2 + T_{m \leftarrow n}^2 C_n^2 e_n^1); \quad D_m^3 = \sum_n R_{m \leftarrow n}^3 C_n^2 e_n^2. \end{aligned} \quad (3)$$

с экспоненциальной сходимостью и похожие прямые равенства для расчета амплитуд $A_m = D_m^1$ и $B_m = C_m^4$ отраженных и прошедших волн для каскада в целом ($p \geq 0$ – номер дифрагирующей волны). В свою очередь, коэффициенты $\delta_m^n + R_{m \leftrightarrow n}^k \Omega = T_{m \leftrightarrow n}^k$ рассеяния на каждой из диафрагм каскада находим из эффективных алгоритмов [3] (зависящих от поляризации поля согласно принципу двойственности в формулировке [4]). Т.е., поставленная задача решена и допускает усечение полученной СЛАУ (3) до порядка 8.

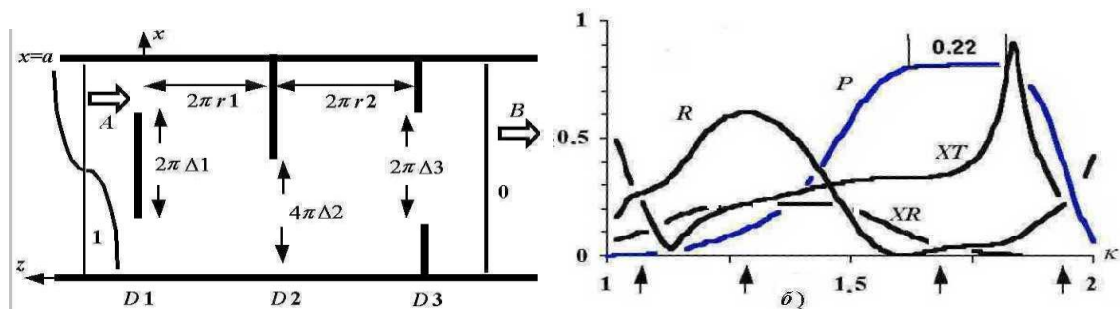


Рис. 1. Каскад диафрагм для конверсии $TM_1 \Rightarrow TM_0$. Зависимости от параметра κ величин: P =КПД; R =отражения TM_1 ; XR и XT -паразитных потоков (TM_0 в отраженном поле и прохождении TM_1)

2. Оптимизация конверсии мод $TM_1 \Rightarrow TEM$

В структуре рис. 1 диафрагмы $D1$ и $D3$ не связывают волны TEM и TM_1 (эпюры “0” и “1” на рисунке). Они преимущественно пропускают TM_1 -волну либо TEM . Смеситель $D2$ связывает эти волны. Так что возможен выбор параметров Δk и резонансных значений дистанций $r1$ и $r2$ между диафрагмами, который обеспечивает в двухмодовом диапазоне $1 < \kappa < 2$ возможность максимальной передачи энергии волны TEM вправо от каскада (при возбуждении структуры волной TM_1 слева). На рис. 1,б это соответствует полосе $1.61 < \kappa < 1.83$ с КПД конверсии $82\% > P > 80\%$ (для $\Delta k = 0.6, 0.4, 0.85$ и $r_k = 0.65, 0.1$). При иных значениях параметров Δk и r_k ($0.45, 0.6, 0.9, 0.76, 0.125$) имеем $0.953 > P > 0.9$ в более узкой полосе частот 5%. Резонансные минимумы на кривой R отражения волны TM_1 служат указателем, ведущим к нахождению интересующего нас максимума величины P . Из уравнения $\det[\text{СЛАУ}(3)] = 0$ вычислены комплексные частоты собственные колебаний в рассмотренных структурах и соответствующие им значения безразмерного волнового числа κ . Их вещественные части показаны стрелками под осью κ на рис. 1 – 7. Они также – репер для нашего поиска оптимальных режимов конверсии волн. В силу теоремы взаимности полученные данные для конверсии $TM_1 \Rightarrow TEM$ совпадают с данными конверсии $TEM \Rightarrow TM_1$ при падении TEM -волны на каскад справа. Для приложений в электронике более интересна ситуация $TM_1 \Rightarrow TEM$.

3. Оптимизация конверсии высших волн

Зеркальное удвоение (утроение и т.д.) структуры рис. 1 по x тривиально породит задачу о конверсии $M \Rightarrow 0$ вместо $1 \Rightarrow 0$. Рассмотрим более общий случай $p > 0$ конверсии $M \Rightarrow p$, когда отмеченной для $p = 0$ тривиальности нет. Проблема разрешима. Мы ее упростим, если M и p нечетны. Так, режим $3 \Rightarrow 1$ и $1 \Rightarrow 3$ осуществим в структуре рис. 2 из 6-реберных селекторов и 4-реберного смесителя.

Данные оптимизации показаны на рис 2,б. Они относятся также к случаю волновода со стенками из идеального магнетика, если рис. 2 трактовать как нижнюю половину структуры, расположенной при $2\pi > x > 0$. В рабочем диапазоне $3 < \kappa < 5$ диафрагма $D2$ в структуре рис. 2 связывает (ввиду ее периодичности) лишь волны с номерами 1 и 3. Однако таким свойством обладает и 2-реберный смеситель $D2$ в альтернативе рис. 3. Как видим из данных рис. 3,б, в альтернативной конструкции удалось расширить полосу эффективной конверсии волн (с КПД $\geq 80\%$) в 3.5 раза (от 8% до 29%).

В общем случае $M \Leftrightarrow p$ берем смесительную периодическую диафрагму $D2$ с $M+p$ полупериодами на сечении волновода и фильтрующие $D1$ и $D3$ с $2M$ полупериодами. Например, $M+p = 6$ и $2M = 10$ применительно к расчетным данным рис 4,а для конверсии $1 \Leftrightarrow 5$. При таких периодичностях диафрагм мы обеспечиваем разрежение спектра рассеянных волн, которое устраняет в рабочем диапазоне $M < \kappa < M+2p$ паразитные потоки волн с номерами между p и M . Заодно сохраняем порядок усечения СЛАУ (3) на уровне 8 (вследствие разреженности матриц $R_{m \leftrightarrow n}^k$ и $T_{m \leftrightarrow n}^k$). В свою очередь данным рис 4, б. для конверсии $1 \Leftrightarrow 7$ соответствует структура с числом ребер диафрагм $M+p = 8$ и $2M = 14$.

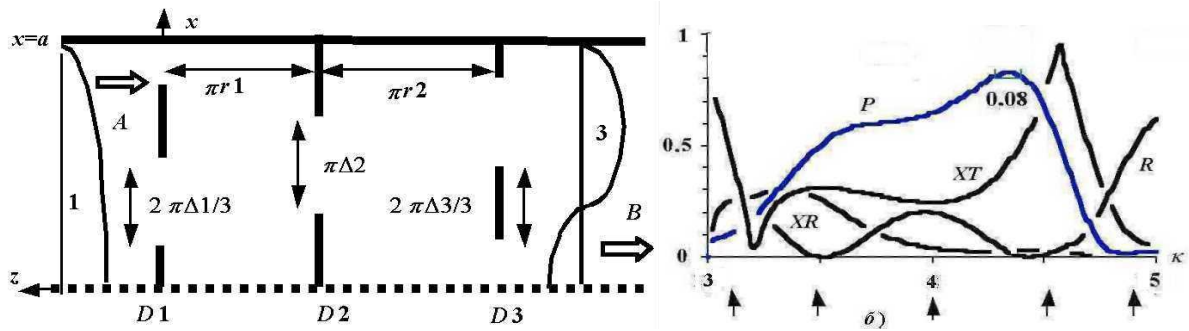


Рис. 2. Конвертор $TM_1 \Rightarrow TM_3$ (верхняя $\pi > x > 0$ половина). Данные рассеяния.

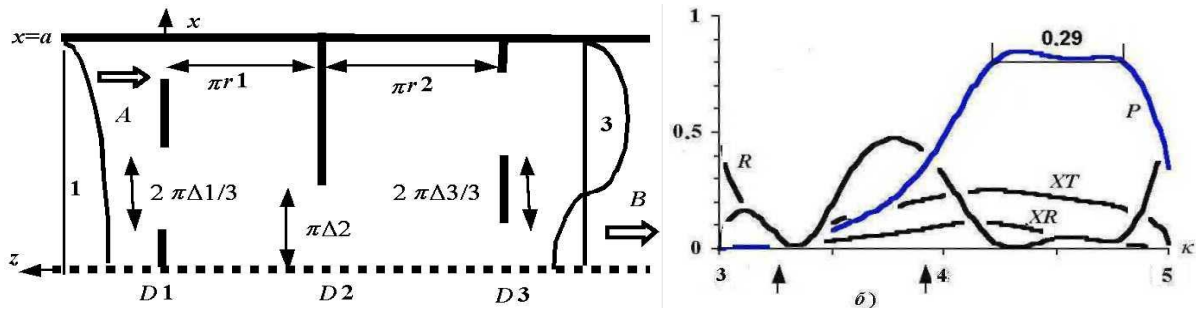


Рис. 3. Альтернативная конструкция конвертора $TM_1 \Rightarrow TM_3$. Данные рассеяния

4. Модификация конструкций

Сравнение с данными работы [1] свидетельствует о худших результатах по широкополосности или КПД для рассматриваемых здесь новых режимов конверсии волн, особенно для TEM -волн. Т.е., возникли трудности обеспечения плосковершинной (и отсюда широкополосной) АЧХ конверторов. Нужен поиск модифицированных конструкций таких устройств для преодоления этих трудностей. Одна из них изображена на рис. 5. С применением такой конструкции можно надеяться на более интенсивное взаимодействие волн TEM и TM_1 на смесителе $D2$ (и отсюда на улучшение энергетических характеристик прибора в целом) в связи с резонансными явлениями в двойном слое радиопрозрачной среды обрамляющим диафрагму $D2$. Другая идея состоит в модифицировании фильтра $D3$, задерживающего волну TM_1 (рис. 6.). Выполним его в виде двойной диафрагмы со слоем радиопрозрачной среды с оптической плотностью меньшей единицы, достаточной для задерживаемости TM_1 -волны в ней (приводящей к снижению ее прохождения через узел $D3$). В обоих модифицированных структурах мы использовали среду с отличной от единицы магнитной проницаемостью μ , соответственно с $\mu=2$ и $\mu \leq 1/4$. (Алгоритмы [3] дополнили построениями [5]). Из расчетов для первого и второго вариантов модификации, отраженных на рис. 5 и 6, КПД устройств с полосой 7% или 3.6% удалось поднять до уровней >0.85 и >0.9 .

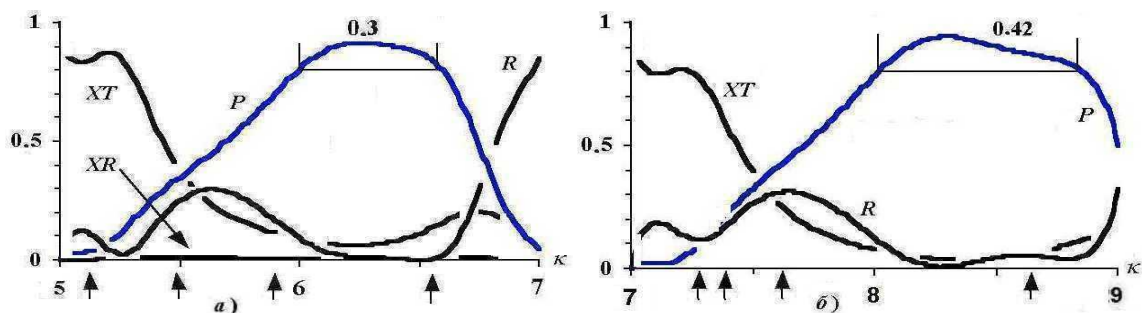


Рис. 4. Данные рассеяния о конверсии $TM_1 \Leftrightarrow TM_5$ и для конверсии $TM_1 \Rightarrow TM_0$

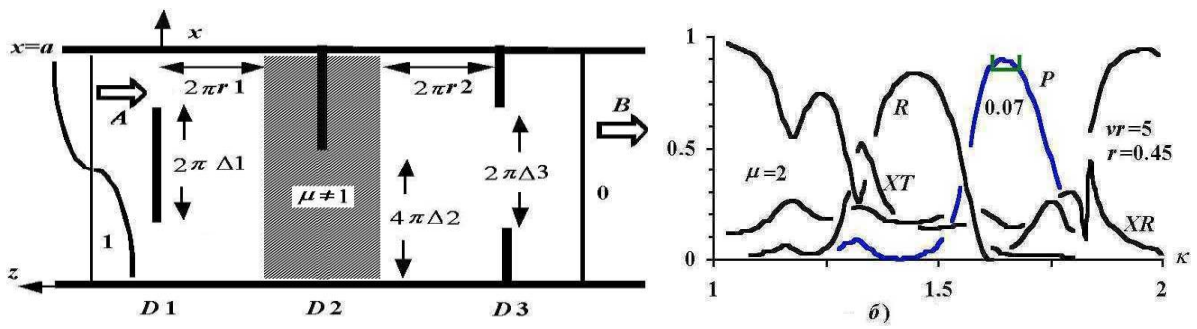


Рис. 5. Модифицирование смесителя $D2$ для конверсии $TM_1 \Rightarrow TM_0$. Данные о конверсии $TM_1 \Leftrightarrow TM_0$

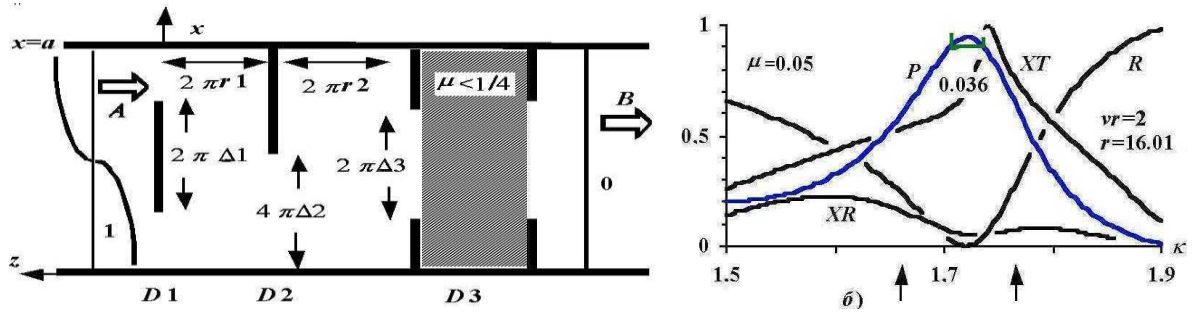


Рис. 6 Модифицирование фильтра $D3$ для конверсии $TM_1 \Leftrightarrow TM_0$. Данные о конверсии $TM_1 \Leftrightarrow TM_0$

Практически интересен и случай, когда выходной канал конвертора является одномодовым при двухмодовом входном. Для этого, например, расположим слева от диафрагмы $D3$ полубесконечный слой среды с $\mu \leq 1/4$ (рис. 7). Найден оптимум (рис. 7, б), когда при КПД ≥ 0.9 полоса частот конвертора равна 9%. Если вместо двойной диафрагмы $D3$ с запердельным для $TM_{1,0}$ волны слоем среды (рис. 6) используем одиночную диафрагму с таким слоем, то имеем данные рис. 7,г. Осуществимость ситуаций $\mu \leq 1$ следует из леммы [6] о пропорциональном изменении ϵ, μ среды. Более важно то, что полученные для таких ситуаций данные прогнозируют возможность аналогичных достижений при замене участков тракта с $\epsilon, \mu \leq 1$ на зауженные в два или более раза отрезки волноводов с вакуумом.

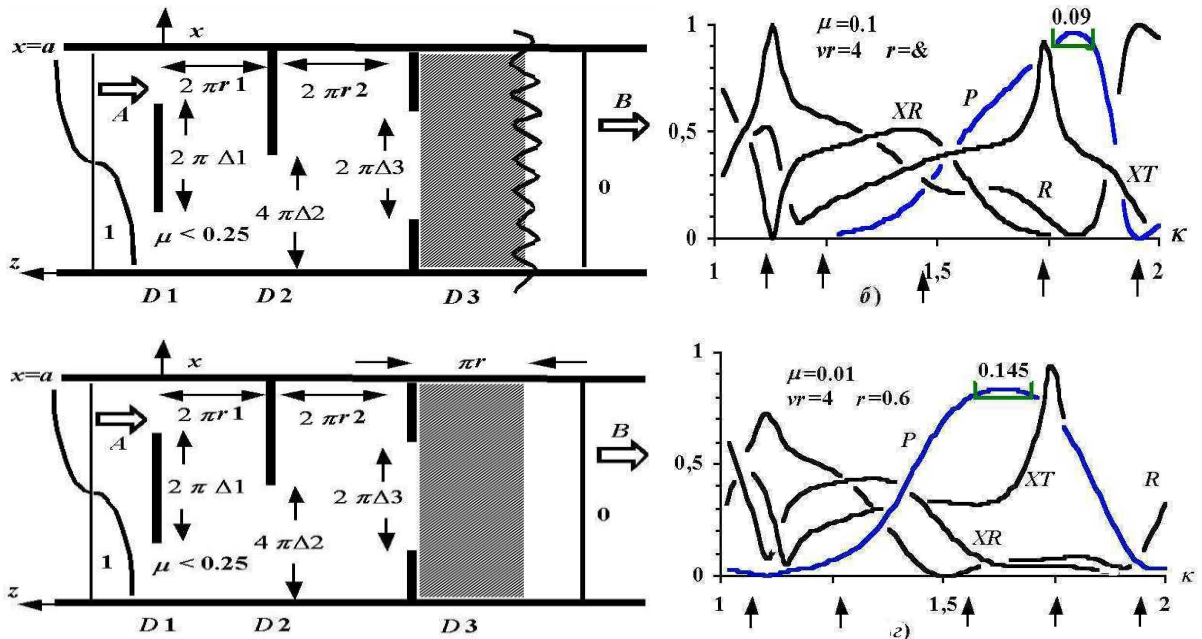


Рис. 7. Конвертор $TM_1 \Rightarrow TM_0$ с одномодовым выходным каналом. Данные оптимизации при $r = \infty$ и $r < \infty$

Выводы

Приобретенный ранее [1] опыт оптимизации конверторов TE -волн использован для создания конверторов TM -волн в плоском (прямоугольном) волноводе, которые более интересны для использования в электронике. Показаны также пути оптимизации взаимодействия TEM -волны с высшими TM -волнами, чтоб создать конверторы на основе каскада из трех разнопериодных решеток в свободном пространстве. Однако, как видим из данных рис. 1 - 4, возникли трудности обеспечения широкополосной плосковершинной АЧХ конверторов для TEM -волны для КПД > 90 %. Для их преодоления необходимо добавление в наши структуры дополнительных резонансных и селективных элементов.

Список литературы: 1. *Щербак В.В.* Режимы чистого преобразования волн TE_n с высоким номером на каскаде из трех разнопериодных ленточных диафрагм // Радиофизика и электроника. – 2008. – Т.13, № 1. – С. 20-28. 2. *Шестопалов В.П., Щербак В.В.* Матричные операторы в задачах дифракции Теор. откр. рез. // Изв.вуз. Радиофизика. – 1968. – Т.11, № 2. – С. 296-305. 3. *Щербак В.В.* Розв'язок задач дифракції хвиль на неоднорідностях з довільною кількістю стрічок та щілин на періоді i // ДАН УРСР, сер. А, 12. – 1982. – С.51-54. 4. *Шестопалов В.П., Щербак В.В.* Неоднородности в прямоугольных волноводах. Высшие типы волн // Радиотехника и электроника. – 1966. – 11, 4. – С.675-683. 5. *Щербак В.В.* Дифракция э.м. волн на двойной равнощелевой диафрагме с магнитодиэлектриком // Радиотехника. – 1966. – №2. – С. 18-29. 6. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. – М. : Сов. радио, 1957. – 582 с.

*Институт радиофизики и электроники
НАН Украины*

Поступила в редколлегию 22.05.2013