

Д. Ю. Кулик, С. А. Стешенко, А. А. Кириленко

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: 4dyk@ukr.net

КОМПАКТНЫЕ ВРАЩАТЕЛИ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ НА ЗАДАННЫЙ УГОЛ В КВАДРАТНОМ ВОЛНОВОДЕ

Преобразователи поляризации широко используются в антенной и СВЧ-технике. В работе исследована возможность построения компактных вращателей плоскости поляризации электромагнитных волн на основе структур, обладающих диэдральной симметрией и образованных 5-щелевыми резонансными диафрагмами с прямоугольными щелями. Предложены конструкции, позволяющие вращать плоскость поляризации на углы, отличные от 90° и имеющие приемлемый коэффициент отражения в заданной полосе частот. Ил. 5. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: поляризатор, волновод, резонансная диафрагма, оптимизация.

Стандартный прием при создании вращателя поляризации основан на организации двух каналов распространения волны и синтезе требуемого дифференциального фазового сдвига, кратного 180° , при заданном соотношении амплитуд кроссполяризованных полей на выходе [1, 2].

Одним из удачных примеров реализации поляризатора нового типа, основанного на взаимодействии плоско-киральных объектов по затухающим волнам, является диэдральная ячейка, предложенная и исследованная в работах [3–5].

Диэдральная ячейка представляет собой пару диафрагм с прямоугольными щелями, каждая из которых обладает вращательной симметрией C_4 , причем две соседних диафрагмы являются сопряженными, т. е. вторая получается путем поворота первой вокруг оси, перпендикулярной оси вращательной симметрии диафрагмы, что создает объект с D_4 (диэдральной) симметрией.

В работе [5] была показана принципиальная возможность вращения плоскости поляризации на 90° ячейкой, выполненной на 2-щелевых диафрагмах (D_2 -симметрия), однако только при возбуждении ее полем, вектор \vec{E} которого перпендикулярен большему размеру щелей. При этом приемлемый коэффициент отражения обеспечивался в полосе частот шириной до 7 %.

Принципиальная возможность вращения плоскости поляризации при произвольной ориентации вектора \vec{E} возбуждающего поля на заданный угол ячейкой, выполненной на 4-щелевых диафрагмах, показана в работах [3, 4]. Фундаментальное обоснование эффекта было представлено в работе [6], а область практической применимости исследовалась в работе [7], продолжением которой является данная статья.

В работе [7] показано, что ячейка из двух сопряженных 4-щелевых диафрагм обеспечивает хорошее согласование в заданной полосе только для углов поворота, близких к 90° .

Для практических применений также представляют интерес конструкции вращателей плоскости поляризации на заданный угол (прежде всего на угол 45°), широко используемые как составная часть ряда преобразователей линейной поляризации в круговую.

К сожалению, для двухдиафрагменной 4-щелевой ячейки не удалось получить приемлемого согласования при углах поворота 45° , поскольку в требуемой частотной полосе уровень кополяризованной компоненты поля оказался очень низким.

Авторами предложена и исследована 5-щелевая диафрагма, являющаяся модификацией 4-щелевой, с дополнительным квадратным отверстием, расположенным в центре симметрии (рис. 1).

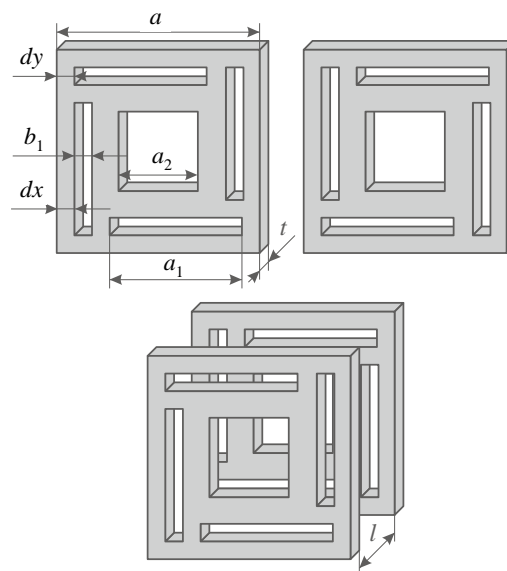


Рис. 1. Ячейка вращателя плоскости поляризации и образующие ее конструктивные элементы

Не нарушая общей D_4 -симметрии устройства, это отверстие увеличивает долю кополяризованной компоненты в прошедшем поле,

уровень которой относительно кроссполяризованной определяет угол поворота. Полученный эффект можно рассматривать и как результат сближения двух первых собственных частот устройства при введении дополнительного центрального отверстия, что позволяет получить двугорбую частотную характеристику коэффициента отражения при меньших расстояниях между диафрагмами.

Влиянию размеров этого дополнительного отверстия на характеристики устройства посвящена данная работа.

1. Метод решения задачи. Для исследования зависимости угла поворота от размеров центрального отверстия в зоне согласования устройства [7] были построены зависимости параметров сигнала от частоты и расстояния между диафрагмами при различных размерах центрального отверстия.

Была рассмотрена композитная диафрагма следующей конструкции – две сопряженных диафрагмы толщиной $t = 0,05$ мм, размещенные в квадратном волноводе сечением $a \times a = 23 \times 23$ мм². Одномодовым (с точностью до вырождения по поляризации) для такого волновода является диапазон частот 6,52...13,04 ГГц. Рабочим диапазоном принято считать диапазон 8...12 ГГц. Геометрические размеры боковых щелей заданы как $a_1 = 15$ мм, $b_1 = 1$ мм, $dx = 1$ мм, $dy = 0$ мм. Это позволяет ожидать полосу пропускания ориентировочно в районе 10 ГГц.

Для расчета использовался обобщенный метод частичных областей (ОМЧО, программный пакет MWD-2) [8, 9] с параметром точности $f_{cut} = 100$ ГГц, что соответствует 374 модам, учитываемым в базисе квадратного волновода.

Сначала определялись базисы отдельных волноводных линий, входящих в устройство (объемлющего волновода и волноводов центральной и боковых щелей).

Затем рассчитывалось параллельно-плоскостное соединение пяти линий, соответствующих щелям диафрагмы, с линией, соответствующей объемлющему волноводу. Для этого сначала вычислялись и сохранялись частотно-независимые интегралы связи, а затем находилась и обобщенная матрица рассеяния соответствующего шестипортовика (1+5).

«Электродинамическая сборка» происходила с использованием метода обобщенных матриц рассеяния. Здесь это особенно важно, так как формирование D_4 -колебаний обусловлено высшими модами внутри щели композитной диафрагмы.

Путем процедуры соединения полученного шестипортовика самого с собой пятью портами, соответствующими отверстиям в диафраг-

ме, на расстоянии, равном толщине отдельной диафрагмы, мы получили матрицу рассеяния двухпортовика, соответствующего первой из диафрагм.

Используя преобразование матрицы рассеяния в соответствии с перебросом осей координат, мы получили из матрицы рассеяния первой диафрагмы матрицу рассеяния второй диафрагмы без дополнительных вычислений.

Электродинамически объединяя два плоско-киральных объекта в единую композитную диафрагму с зазором l между составляющими ее двумя компонентами, методом S-матриц получаем искомую матрицу рассеяния всего устройства.

Применение такого метода расчета позволило ускорить решение прямой задачи более чем в тысячу раз по сравнению с коммерческими пакетами и за счет этого провести исследование свойств конструируемого объекта и оптимизацию его характеристик.

Для избранной полосы частот была проведена оптимизация устройства с целевой функцией вида:

$$f = \min \sum_{i=0}^{i_{\max}} ((w_{IL} \text{abs}(IL_{xp} - IL_{cp} - k_{\alpha})S_{IL}^{-1})^2 + (w_{RL}S_{RL}RL^{-1})^2), \quad (1)$$

где $IL_{cp} = -20L \lg(S_{00}^{10})$ – уровень кополяризованной компоненты поля в децибелах; $IL_{cp} = -20L \lg(S_{10}^{10})$ – уровень кроссполяризованной компоненты поля в децибелах; $RL = -20L \lg(S_{00}^{00})$ – коэффициент отражения падающей волны; $k_{\alpha} = -20 \lg(\text{tg}(\alpha))$ – коэффициент, задающий соотношение между уровнями ко- и кроссполяризованной компоненты поля, обеспечивающее требуемый угол поворота α плоскости поляризации; S_{IL} и S_{RL} – требуемые по техническому заданию уровни вносимых и обратных потерь; w_{IL} и w_{RL} – весовые коэффициенты, определяющие компромисс между величиной коэффициента отражения и углом поворота плоскости поляризации. Величина i_{\max} определяет количество фиксированных частот, расположенных в заданной полосе, на которых проводятся вычисления.

Физические ограничения на варьируемые параметры определялись формулой:

$$a_1 + a_2 + b_1 + dx + dy + 3\delta < a, \quad (2)$$

где δ соответствует технологическим требованиям на величину зазора между отверстиями диафрагмы.

2. Численные результаты. Следует отметить, что устройство, вращающее плоскость

поляризации на угол 90° , не нуждается в дополнительном центральном отверстии, которое увеличивает кополяризованную компоненту поля. Однако для других углов поворота этот прием дает нужный результат. В процессе исследования вариантов конструкций, вращающих плоскость поляризации на другие углы, в работе были построены двумерные зависимости параметров вращателя от частоты и расстояния между диафрагмами при различных размерах центрального отверстия a_2 (1, 3, 6, 9 и 12 мм).

На рис. 2 представлены зависимости коэффициента отражения и коэффициента прохождения кроссполяризованной компоненты поля при минимальном отверстии $a_2 = 1$ мм (по сути, для 4-щелевой диафрагмы [7]). Из них видно, что высокий уровень кроссполяризованной компоненты поля наблюдается в области малых расстояний между диафрагмами, т. е. прежде всего там, где происходит сильное взаимодействие полей диафрагм по затухающим высшим модам, основными из которых являются четыре моды пакета $TH(TE)_{1(2),2(1)}$.

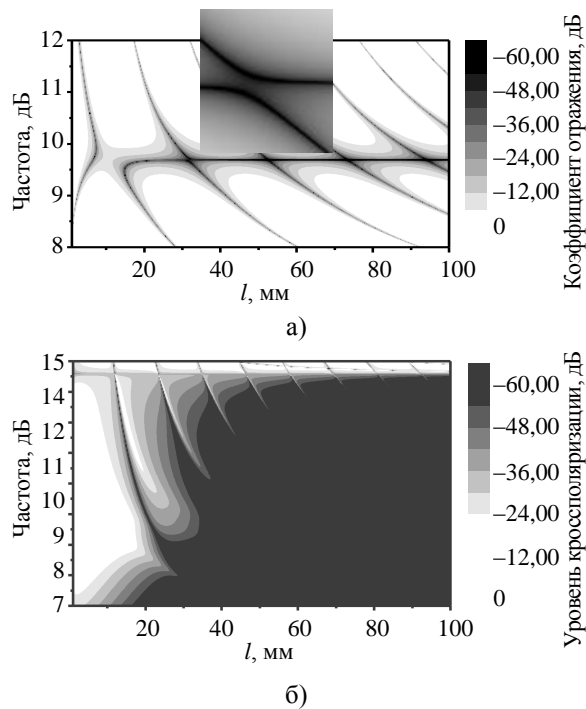


Рис. 2. Коэффициент отражения (а) и коэффициент прохождения кроссполяризованной волны (б) вращателя плоскости поляризации в зависимости от расстояния между диафрагмами и частоты при размере центрального отверстия $a_2 = 1$ мм

Резонансы, расположенные на больших расстояниях между диафрагмами и/или более высоких частотах, делятся на три группы:

1) обычные полуволновые резонансы прохождения на основной волне, подобные любым другим, возникающим между двумя пре-

пятствиями в одномодовом волноводе, расположенные со сдвигом $\lambda_g/2$ вдоль оси абсцисс (наклонные гиперболообразные кривые);

2) резонансы прохождения вблизи 9,5 ГГц, обусловленные собственными резонансными свойствами боковых щелей диафрагм;

3) резонансы отражения, сопровождающиеся всплеском амплитуды кроссполяризованной компоненты поля в области 14,7 ГГц (рис. 2, б). Они обусловлены близостью к критической частоте четверки волн $TH(TE)_{1(2),2(1)}$, т. е. там, где собственные коэффициенты отражения этих волн стремятся к единице. Это ведет к формированию добротного собственного колебания с частотой несколько ниже 14,7 ГГц. Возбуждение этого колебания ведет к полному запираению волновода (одномодового) на основной волне.

Из увеличенного фрагмента характеристики, изображенной на рис. 2, а, видно, что кривые резонансов полного прохождения групп 1 и 2 не пересекаются, а сближаются на некую минимальную дистанцию, оставляя частотную характеристику устройства двугорбой. В этом плане эти кривые похожи на известные графики Вина для частот связанных колебаний.

Поскольку нас интересуют прежде всего широкополосные зоны с высоким уровнем кроссполяризации, мы будем рассматривать далее частотные зависимости характеристик устройства только в области малых расстояний между диафрагмами (до 25 мм).

Вне рассмотрения оставим добротные всплески кросс-компоненты вблизи (ниже) 14,7 ГГц (рис. 2, б), связанные с высшими (по продольному индексу) диэдральными колебаниями, когда слабо затухающие моды пакета $TH(TE)_{1(2),2(1)}$ все же «достают» до соседней диафрагмы, формируя новую пару D_4 -симметричных колебаний [6].

На рис. 3 представлен ряд комбинированных двумерных зависимостей угла поворота плоскости поляризации от частоты и расстояния между диафрагмами при различных размерах центрального отверстия и наложенными поверх них белыми линиями, отмечающими уровни коэффициента отражения в -20 и -40 дБ. Жирными черными линиями обозначена зона углов поворота от 80 до 100 градусов.

В зонах удовлетворительного согласования (коэффициент отражения меньше -20 дБ) были построены графики зависимости параметров поля от частоты (рис. 4), по сути, вертикальные сечения двумерных зависимостей при фиксированном расстоянии между диафрагмами, которое обеспечивает чебышевскую характеристику коэффициента отражения устройства. Определены углы поворота в центре полос согласования.

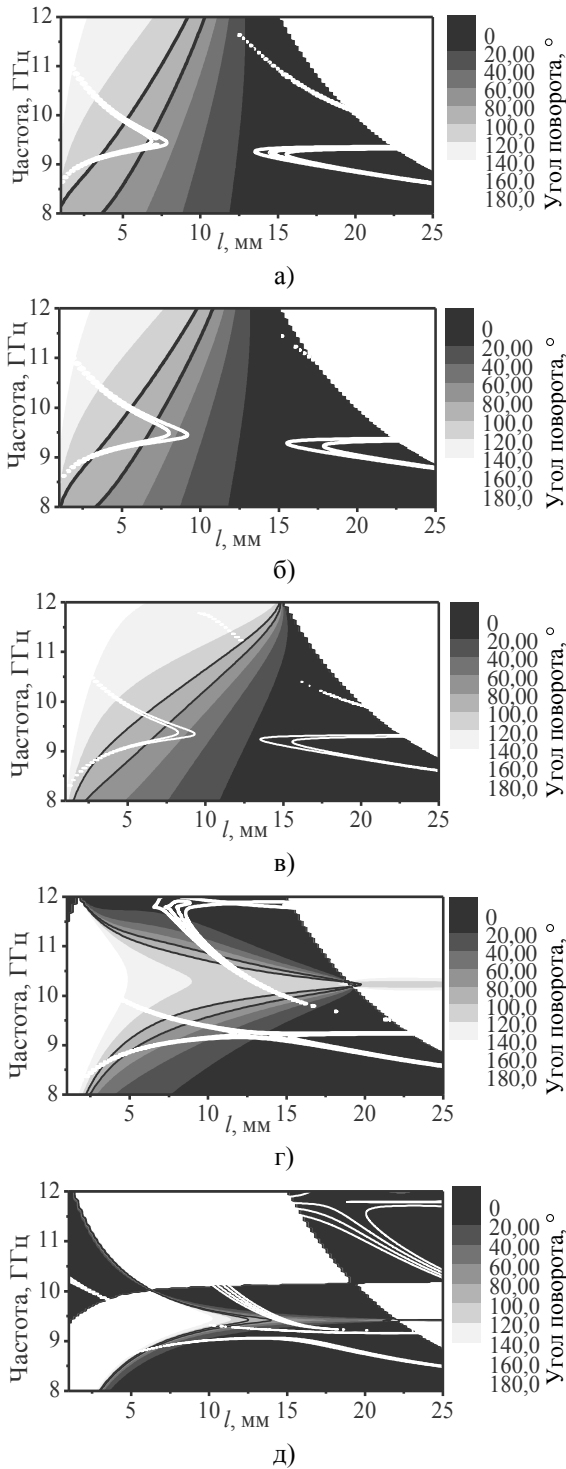


Рис. 3. Угол поворота прошедшей волны вращателя плоскости поляризации в зависимости от расстояния между диафрагмами и частоты при различных размерах центрального отверстия a_2 : а) 1 мм; б) 3 мм; в) 6 мм; г) 9 мм; д) 12 мм

Поскольку при $a_2 = 9$ мм оказалось возможным добиться согласования при двух различных значениях расстояния между диафрагмами, для этого случая были построены две зависимости (рис. 4, г, д).

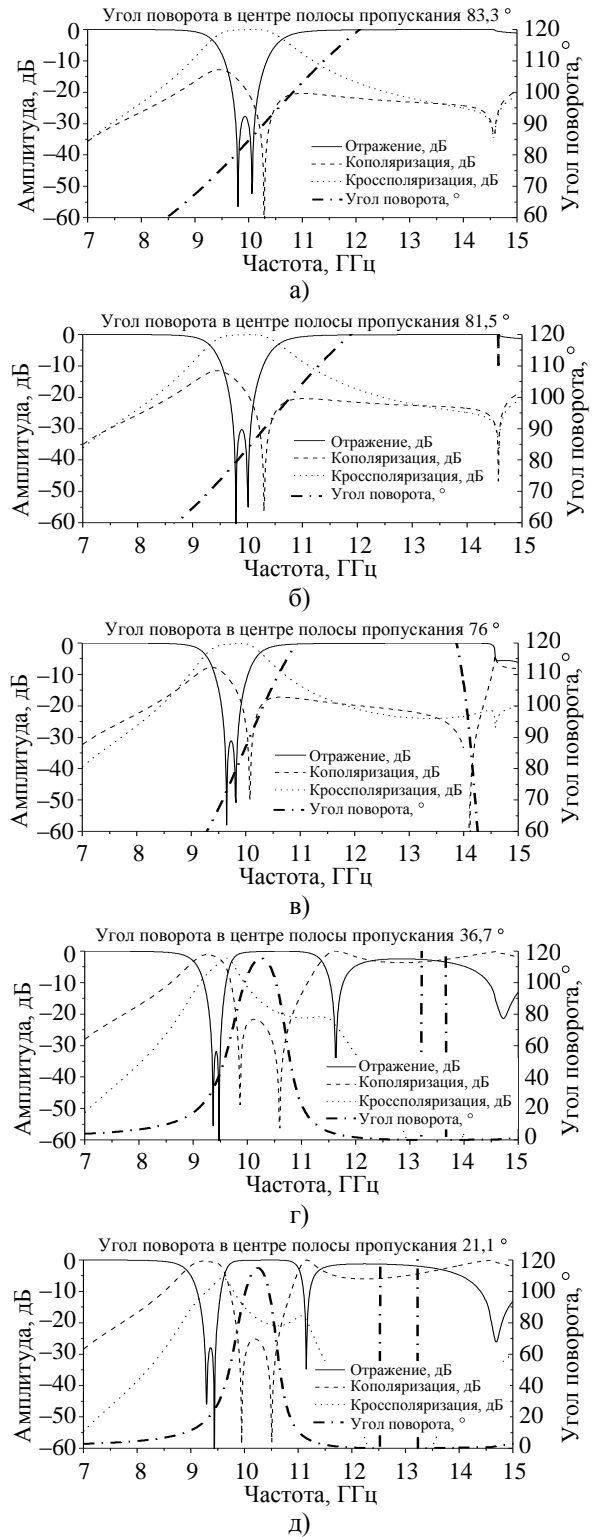


Рис. 4. Частотные характеристики вращателя плоскости поляризации при различных размерах центрального отверстия и расстояниях между диафрагмами: а) $a_2 = 1$ мм; $l = 6,75$ мм; б) $a_2 = 3$ мм; $l = 7$ мм; в) $a_2 = 6$ мм; $l = 8,25$ мм; г) $a_2 = 9$ мм; $l = 12,5$ мм; д) $a_2 = 9$ мм; $l = 14$ мм

Анализ этих зависимостей показывает, что при размерах центрального отверстия боль-

ших, чем 9 мм, характер резонансов полного согласования существенно изменяется. Резонансы, расположенные в зоне малых расстояний между диафрагмами и обусловленные взаимодействием затухающих мод типа $TH(TE)_{1(2),2(1)}$, которые и формируют кроссполяризованную компоненту поля, начинают сливаться с обычными полуволновыми резонансами на основной моде. При дальнейшем увеличении размеров центрального отверстия характер этих резонансов приближается к резонансам 1-й группы и уже не обеспечивает сколь-либо значимого уровня кроссполяризованной компоненты (рис. 3, г, д).

Можно сделать вывод, что при увеличении центрального отверстия устройства до определенных размеров (около 9 мм) можно получить чебышевскую характеристику устройства для различных углов поворота плоскости поляризации. Этот эффект объясняется увеличением доли кополяризованной компоненты в прошедшем сигнале, уровень которой регулируется размерами центрального отверстия. При этом чем больше размер отверстия, тем больше расстояние между диафрагмами и меньше угол поворота.

Необходимо отметить, что поскольку с увеличением центрального отверстия увеличивается и расстояние между диафрагмами, добротность резонансных пиков увеличивается, а полоса пропускания, соответственно, сужается. Компенсировать это можно лишь путем изменения других параметров конструкции, в частности, размера b_1 .

Особый интерес представляет зависимость угла поворота плоскости поляризации от частоты в полосе пропускания устройства. Видно, что для чебышевских полос она носит монотонно возрастающий характер с весьма крутым наклоном, что приводит к большой частотной дисперсии угла поворота плоскости поляризации, другими словами, позволяет получить требуемый угол поворота только в одной частотной точке.

В связи с этим была применена процедура оптимизации, уменьшающая частотную дисперсию угла поворота в полосе частот, с целевой функцией вида (1). Результат этой процедуры представлен на рис. 5.

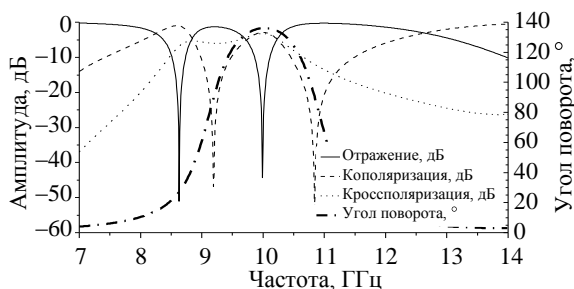


Рис. 5. Оптимизированные частотные характеристики вращателя плоскости поляризации для угла поворота $45^\circ(135^\circ)$ в полосе частот 9,75...10,25 ГГц

Устройство оптимизировалось для угла 45° в полосе частот 9,75...10,25 ГГц, но поскольку целевая функция минимизировала не угол поворота, а только разность между ко- и кроссполяризованными компонентами поля, результирующий угол поворота оказался равным 135° , т. е. не вправо на 45° , а влево, что в большинстве случаев оказывается несущественным. Для того, чтобы получить угол поворота именно в нужную сторону, необходимо изменить направление киральности вращателя поляризации, т. е. задать новое значение параметра $dy_{new} = a - a_1 - dy_{old}$, по сути поменяв местами две диафрагмы.

Следует отметить, что результаты оптимизации с целевой функцией (1), обеспечивающей минимальную частотную дисперсию угла поворота плоскости поляризации в заданной полосе частот, существенно отличаются от результатов оптимизации, требующей нужного угла поворота только в центре полосы пропускания вращателя. Разнятся не только все геометрические параметры устройства – резко изменяется сам характер частотной характеристики.

Вместо частотной характеристики, подобной приведенным на рис. 4, мы получили характеристику, изображенную на рис. 5, при параметрах конструкции $a_1 = 16,176$ мм, $a_2 = 9,706$ мм, $b_1 = 1,505$ мм, $dx = 3,625$ мм, $dy = 0,869$ мм, $l = 3,658$ мм.

Из графиков на рис. 5 следует, что при выполнении условий, обеспечивающих точку экстремума частотной характеристики угла поворота плоскости поляризации в центре требуемой полосы частот, удалось добиться слабой зависимости угла поворота плоскости поляризации от частоты. Однако обеспечить полное прохождение сигнала удалось только в одной точке, что все равно лучше, чем в 4-щелевой структуре [7], где одновременное полное согласование и минимальная частотная дисперсия для углов поворота 45° не обеспечивались вообще.

Обеспечить несколько точек согласования в полосе частот при минимальной частотной дисперсии угла поворота можно только увеличением числа диафрагм в устройстве, как показано в работе [7].

Выводы. Введение дополнительного центрального отверстия в 4-щелевую конструкцию вращателя плоскости поляризации, подробно исследованную в работах [6, 7], позволило эффективнее управлять уровнем кополяризованной компоненты в прошедшем поле. За счет этого стало возможным создавать хорошо согласованные конструкции вращателей плоскости поляризации для углов поворота, отличных от 90° .

Для углов поворота, обеспечивающих поворот на 90° , это отверстие является лишним,

так как дополнительная кополяризованная компонента поля здесь только мешает.

Увеличивая кополяризованную компоненту поля путем увеличения размеров центрального отверстия, мы можем уменьшить угол поворота плоскости поляризации до требуемого, сохраняя при этом чебышевскую характеристику в полосе пропускания, что невозможно для 4-щелевой конструкции.

К сожалению, двухдиафрагменные конструкции с чебышевской полосой пропускания принципиально имеют значительную частотную дисперсию угла поворота плоскости поляризации. Уменьшить ее удается либо путем сужения полосы пропускания и согласованием устройства только в зоне одного из двух резонансов, либо введением дополнительных резонансов, которые обеспечиваются добавлением в конструкцию дополнительных диафрагм [7].

Библиографический список

1. Ragan G. L. (Ed.) *Transition Units. Microwave Transmission Circuits*. New York: Dover, 1965.
2. Cornbleet S. *Polarization. Microwave Optics: The Optics of Microwave Antenna Design*. London: Academic Press, 1980.
3. Kirilenko A. A., Kolmakova N. G., and Prikolotin S. A. Ultra-compact 90° twist based on a pair of two closely placed flat chiral irises. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2012. April, vol. 55. N 4. P. 175–177.
4. Kolmakova N., Prikolotin S., Kirilenko A., and Perov A. The simple example of polarization plane rotation by the fringing fields interaction. *Proc. of European Microwave Conf., EuMC*, (6–10 Oct. 2013, Nuremberg). Nuremberg IEEE, 2013, p. 936–938.
5. Kirilenko A. A., Kolmakova N. G., Perov A. O., Prikolotin S. A., and Derkach V. N. Natural oscillations providing 90 polarization plane rotation by planar chiral double-slot irises. *Radioelectronics and Communications Systems*. 2014. Vol. 57, Iss. 12. P. 521–530.
6. Kolmakova N., Prikolotin S., Perov A., Derkach V., Kirilenko A. Polarization plane rotation by arbitrary angle using D4 symmetrical structures. *IEEE MTT*. 2016, Vol. 64, N 2, p. 429–435.
7. Кулик Д. Ю., Перов А. О., Моспан Л. П., Колмакова Н. Г. Компактные вращатели плоскости поляризации на основе диафрагм с прямоугольными щелями. *Радиофизика и электроника* 2015. Т. 20. № 3. С. 96–101.
8. Приколотин С. А., Кириленко А. А. Метод частичных областей с учетом особенностей во внутренних задачах с произвольными кусочно-координатными границами. Часть 1. Спектры собственных волн ортогонных волноводов. *Радиофизика и электроника*. 2010. Т. 15. № 1. С. 17–29.
9. Стешенко С. А., Приколотин С. А., Кириленко А. А., Кулик Д. Ю., Рудь Л. А., Сенкевич С. Л. Метод частичных областей с учетом особенностей во внутренних задачах с произвольными кусочно-координатными границами. Часть 2. Плоско-поперечные соединения и «in-line» объекты. *Радиофизика и электроника*. 2013. Т. 18. № 3. С. 13–21.

REFERENCES

1. RAGAN, G. L., ed. 1965. *Transition Units*. In: *Microwave Transmission Circuits*. New York: Dover.
2. CORNBLEET, S., 1980. *Polarization*. In: *Microwave Optics: The Optics of Microwave Antenna Design*. London: Academic Press.
3. KIRILENKO, A. A., KOLMAKOVA, N. G. and PRIKOLOTIN, S. A., 2012. Ultra-compact 90° twist based on a pair of

- two closely placed flat chiral irises. *Radioelectronics and Communications Systems*. Apr., vol. 55, no. 4, pp. 175–177.
4. KOLMAKOVA, N., PRIKOLOTIN, S., KIRILENKO, A. and PEROV, A., 2013. The simple example of polarization plane rotation by the fringing fields interaction. In: *Proc. European Microwave Conference (EuMC)*. Nuremberg, Oct. 6–10. 2013, pp. 936–938.
5. KIRILENKO, A. A., KOLMAKOVA, N. G., PEROV, A. O., PRIKOLOTIN, S. A. and DERKACH, V. N., 2014. Natural oscillations providing 90 polarization plane rotation by planar chiral double-slot irises. *Radioelectronics and Communications Systems*. Dec., vol. 57, Iss. 12, pp. 521–530.
6. KOLMAKOVA, N., PRIKOLOTIN, S., PEROV, A., DERKACH, V., KIRILENKO, A., 2016. Polarization plane rotation by arbitrary angle using D4 symmetrical structures. *IEEE MTT*. vol. 64, no. 2, pp. 429–435.
7. KULIK, D. Yu., PEROV, A. O., MOSPAN, L. P., KOLMAKOVA, N. G., 2015. Compact rotator the polarization plane on the basis of the diaphragms with rectangular slots. *Radiofizika i Elektronika*. vol. 20, no. 3, pp. 96–101 (in Russian).
8. PRIKOLOTIN, S. A., KIRILENKO, A. A., 2010. The method of partial areas, taking into account peculiarities of the internal problems with arbitrary piecewise coordinate boundaries. Part 1. The spectra of natural waves orthog-waveguides. *Radiofizika i Elektronika*. vol. 15, no. 1, pp. 17–29 (in Russian).
9. STESHENKO S. A., PRIKOLOTIN S. A., KIRILENKO A. A., KULIK D. Yu., RUD' L. A., SENKEVICH S. L., 2013. The method of partial areas, taking into account peculiarities of the internal problems with arbitrary piecewise coordinate boundaries. Part 2. Flat cross-connections and «in-line» objects. *Radiofizika i Elektronika*. vol. 18, no. 3, pp. 13–21 (in Russian).

Рукопись поступила 24.11.2016.

D. Yu. Kulik, S. A. Steshenko, A. A. Kirilenko

COMPACT POLARIZATION PLANE ROTATOR AT A DEFINED ANGLE IN THE SQUARE WAVEGUIDE

We have studied the possibility of designing compact polarization plane rotator electromagnetic waves on the basis of the structures with dihedral symmetry, and formed by 5-resonant slotted apertures with rectangular irises. The proposed structure allows to rotate polarization plane at angles being different from 90° and have an acceptable matching in a given frequency band.

Key words: polarization plane rotator, waveguide, resonant irises, optimization.

Д. Ю. Кулик, С. О. Стешенко, А. О. Кириленко

КОМПАКТНІ ОБЕРТАЧІ ПЛОЩИНИ ПОЛЯРИЗАЦІЇ НА ЗАДАНИЙ КУТ У КВАДРАТНОМУ ХВИЛЕВОДІ

Перетворювачі поляризації широко використовуються в антенній та НВЧ-техніці. У роботі досліджено можливість побудови компактних обертачів площини поляризації електромагнітних хвиль на базі структур, що мають дидралину симетрію і являють собою 5-щільні резонансні діафрагми з прямокутними отворами. Запропоновано конструкції, що дозволяють обертати площину поляризації на кути, відмінні від 90°, та мають задовільні характеристики коефіцієнта відбиття у заданій смузі частот.

Ключові слова: поляризатор, хвилевод, резонансна діафрагма, оптимізація.