

УДК 535.5

ИСКУССТВЕННЫЙ АНИЗОТРОПНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛИНЕЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ В КРУГОВУЮ ПОЛЯРИЗАЦИЮ В ДИАПАЗОНЕ КВЧ

© 2022 г. И. Ш. Бахтеев¹*, С. Ю. Молчанов¹, В. М. Муравьев¹, П. А. Гусихин¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук, Черноголовка, Россия

*E-mail: b1984h@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.11.2021 г.

После доработки 06.12.2021 г.

Принята к публикации 22.12.2021 г.

Предложено простое устройство для преобразования линейной поляризации в круговую для диапазона КВЧ. Например, спроектирован, изготовлен с помощью 3D печати и измерен на частоте 96 ГГц анизотропный диэлектрик, состоящий из периодически повторяющихся вырезов. Преимуществом такого преобразователя является передача не менее 90% мощности и осевое отношение (Axial Ratio) ниже 3 дБ в диапазоне частот от 87 до 110 ГГц. Широкополосность и эффективность передачи энергии через устройство преобразования поляризации анализируется численными методами. Измеренные осевые отношения и прошедшая мощность хорошо согласуются с результатами моделирования.

DOI: 10.31857/S0367676522040044

ВВЕДЕНИЕ

Поляризационные состояния имеют особое значение для управления электромагнитными волнами и получили широкое применение в прикладной технике. Поляризация электромагнитных волн в основном классифицируется на линейную поляризацию, круговую поляризацию и эллиптическую поляризацию. Для получения из линейной поляризации круговую используется анизотропный материал с разными коэффициентами преломления n_x и n_y по осям, где $n_x = \sqrt{\epsilon_x \mu_x}$ и $n_y = \sqrt{\epsilon_y \mu_y}$. По достижению разности фаз в материале равной 90° между поляризациями по OX и OY линейно поляризованная волна, проходя через анизотропный материал, закручивается при условии направления вектора поляризации под углом 45° к осям OX и OY . Прошедшая волна имеет уже круговую поляризацию, как показано на рис. 1а. Разность фаз между E_x и E_y при линейной и круговой видах поляризации схематично показана на рис. 1б.

Возможность создания искусственных анизотропных материалов предложена в работе [1]. Авторами для создания анизотропии используются вырезы в диэлектрике. Дальнейшее развитие таких материалов привело к появлению различных конструкций, способных менять поляризацию в разных частотных диапазонах [2–4]. Такие ани-

зотропные материалы, как правило, имеют магнитную составляющую $\mu = 1$, а диэлектрическая проницаемость имеет невысокие значения для лучшего согласования и уменьшения отражения.

Помимо диэлектрических преобразователей (также их можно называть конвертерами) существуют преобразователи и из металла. Например, вырезы в виде периодически повторяющихся крестов на металлическом листе формируют резонансную структуру в виде полосового фильтра [5, 6]. Такие частотно-селективные структуры можно использовать и в качестве преобразователя поляризации [7], если длина вертикальных и горизонтальных вырезов будет отличаться. Такого рода перфорированный лист, настроенный на разную резонансную частоту по осям X и Y , преобразует линейную поляризацию в круговую, при повороте его на 45° . Аналогичная структура, рассмотренная в [8], служит для преобразования поляризации в субтерагерцовом диапазоне. Помимо рассмотрения перфорации в виде крестов авторами приведено исследование структуры в виде кольцевых вырезов в металле. Минус данной структуры кроется в трудности изготовления, их узкополосности и значительными (больше 20%) потерями энергии. В работе [9] ученые из Италии предложили вариант выреза в виде буквы “Т”. Их вариант перфорации работает при трехслойном исполнении и увеличивает полосу ра-

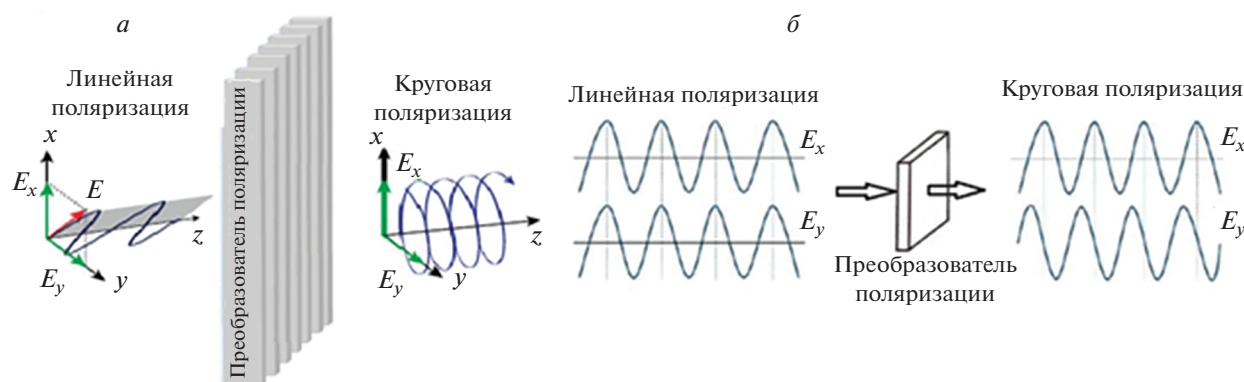


Рис. 1. Преобразование поляризации: схематическая модель работы конвертера линейно-круговой поляризации (а); влияние анизотропного материала на фазы компонентов электрического поля (б).

боты преобразователя благодаря получению нескольких минимумов соотношения осей (Axial Ratio). Сложности в изготовлении и юстировке при сборке слоев накладывают туманные перспективы для массового внедрения такого типа устройства.

Другой разновидностью преобразователей поляризации являются металлические структуры на диэлектрической подложке. Они могут быть как с элементами в виде крестов, так и в виде элементов другой формы [10–12]. Примечательно, что для изготовления поверхности в виде крестообразных вырезов в [11] использовался простой струйный принтер и чернила, содержащие металлизацию. Наряду с односторонней металлизацией встречаются преобразователи, имеющие металлизацию с двух сторон от диэлектрического основания [13–16]. Несмотря на большое количество работ, такие устройства имеют слабую популярность из-за высокой стоимости, больших потерь и узкой полосы. Очевидно, что производство таких пластин требует высокой точности при ориентировании металлических элементов относительно друг друга особенно для КВЧ и субтерагерцевого диапазона.

По сравнению с волнами линейной поляризации, волны круговой поляризации устойчивы к эффектам многолучевого распространения и широко используются в беспроводной связи. Существует два основных способа генерации волны круговой поляризации. В первом необходимо использовать антенну с круговой поляризацией, представляющую собой сложную систему особенно в КВЧ диапазоне [17–20]. Другой способ базируется на использовании антенны с линейной поляризацией в сочетании с преобразователем поляризации в виде металлизации на диэлектрической подложке [21–23] или в виде анизотропного диэлектрика [24–26]. Между двумя способами получения электромагнитной волны с круговой поляризацией предпочтительным выглядит второй по следующим причинам. Во-первых, изготовление антенны с линейной поляризацией гораздо

проще, чем с круговой. Во-вторых, становится возможным изменить такие характеристики как широкополосность, двухдиапазонность и КСВ при использовании того или иного преобразователя поляризации.

ИСКУССТВЕННЫЙ АНИЗОТРОПНЫЙ МАТЕРИАЛ. ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ

С появлением 3D печати производство пластиковых изделий и комплектующих вышло на новый уровень. Теперь, чтобы создать даже сложный объект не нужно изготавливать пресс-формы для литья пластмасс. Достаточно иметь цифровую 3D модель, которую принтер послойно воплотит в жизнь. Провести оценку анизотропии диэлектрика с искусственно созданными вырезами можно по формулам эффективной диэлектрической проницаемости:

$$\epsilon_x = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\vartheta \epsilon_1 + (1 - \vartheta) \epsilon_2}, \quad (1)$$

$$\epsilon_y = \vartheta \epsilon_2 + (1 - \vartheta) \epsilon_1, \quad (2)$$

где ϵ_1 — диэлектрическая проницаемость воздуха, ϵ_2 — диэлектрическая проницаемость материала, ϑ — объемная концентрация, описывающая долю диэлектрического материала в общем объеме. Следовательно, фазовая скорость распространяющейся волны с поляризацией вдоль оси Y является более медленной, чем по оси X , что приводит к двум различным фазовым сдвигам φ_x и φ_y , когда волны пройдут через диэлектрический материал. Учитывая, что магнитная проницаемость $\mu = 1$, формула для расчета разности фаз выглядит следующим образом:

$$\Delta\varphi = \varphi_x - \varphi_y = 2\pi(\sqrt{\epsilon_y} - \sqrt{\epsilon_x})\frac{h}{\lambda}, \quad (3)$$

где h — толщина, λ — длина волны.

Для преобразования волны линейной поляризации в круговую преобразователь поляризации должен удовлетворять разности фаз по осям равной 90° . Современная технология 3D печати накладывает ограничения на минимальную толщину слоя и минимальный воздушный зазор между слоями равные 0.8 мм. Очевидно, что при оптимизации пустот необходимо учитывать и высокие требования к жесткости конструкции при минимально возможной толщине преобразователя поляризации.

В атмосфере Земли волны диапазона КВЧ распространяются на сравнительно небольшие расстояния из-за сильного поглощения. Но существуют так называемые “окна прозрачности”, где поглощение минимально. Именно в этих окнах работают радиоустройства мм-диапазона. Центральная частота рабочей полосы преобразователя поляризации была выбрана исходя из “окна прозрачности” 3 мм диапазона и составила 97 ГГц. В окрестности этой частоты преобразователь в виде пластинки из искусственно созданного анизотропного материала должен обладать высокими значениями прошедшей энергии и минимальным отражением. Решение задачи оптимизации сводится к поиску точек n -мерного пространства, удовлетворяющих минимуму целевой функции. Учитывая, что в данном случае имеет место задача с несколькими переменными, целевая функция не имеет аналитического выражения, а значения этой функции возможно получать посредством численного моделирования электродинамической системы.

Геометрия рассматриваемого преобразователя поляризации состоит из диэлектрического материала и прямоугольных вырезов. Диэлектрическая проницаемость материала преобразователя поляризации $\epsilon_2 = 2.55$ (коэффициент преломления $n = 1.6$). Соотношение объема пустот и диэлектрического заполнения, входящее в формулы (1) и (2), не учитывает расположение вырезов и их форму. Исходя из возможности современной 3D печати и учитывая послойное создание объекта, все составные части конструкции должны представлять прямоугольные элементы. Для расчета электрических параметров, таких как прохождение и отражение электромагнитной волны необходимо провести электродинамическое моделирование. Наиболее удобный метод дискретизации решаемого пространства является метод конечных элементов (МКЭ) описанный в [27]. Математический анализ распространения электромагнитного поля подразумевает переход от анализа всего пространства, к анализу небольших областей данного пространства в виде тетраэдров, в которых можно считать изменение поля минимальным. Поле в пределах тетраэдра описывается простой функцией или набором функций с неизвестными коэффи-

циентами. Решить систему алгебраических уравнений, число которых прямо пропорционально количеству элементов, можно с помощью ЭВМ.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Рупорные антенны для КВЧ диапазона имеют разное сечение исходя из требуемых характеристик. Для создания конвертера, у которого характеристики не будут зависеть от площади облучения электромагнитной волной, удобно использовать модель единичной ячейки, состоящую из диэлектрического и воздушного прямоугольников, которые размножены на бесконечность в плоскости конвертера. Очевидно, что такая структура будет являться периодической. Схожий подход реализован, например, в [26]. В предлагаемой ячейке можно выделить некий волновод, на стенках которого можно ввести специальные граничные условия, которые называются условиями периодичности или периодическими граничными условиями. Главным достоинством этих граничных условий (еще их называют каналом Флоке) является то, что с их помощью можно свести анализ поля всего объекта к анализу поля в пределах одного периода. И таким образом достигается существенное сокращение времени анализа.

На рис. 2а показана рассчитанная частотная зависимость разности фаз $\Delta\phi$ между X и Y поляризациями для разрабатываемого преобразователя. В частотном диапазоне 90–100 ГГц разность фаз лежит в окрестности 90° . Частотная зависимость имеет малый наклон, поэтому осевое соотношение меньше 3 дБ будет наблюдаться в большом диапазоне частот. Вычисленная прошедшая мощность через преобразователь составляет больше 90%. Зависимость прошедшей мощности от частоты приведено на рис. 2б. 3D модель преобразователя приведена на рис. 2в.

Геометрическая модель образца и рупорная антенная WR-10 представлены на рис. 3а вместе с рассчитанным значением отражения. Излучение антенны моделировалось методом конечных элементов. Отражение антенны при совместной работе с преобразователем поляризации не превышало -15 дБ в частотном диапазоне от 85 до 110 ГГц. Результаты моделирования осевого соотношения представлены на рис. 3б. Из-за ограничений в испытательном оборудовании экспериментально измерялось осевое соотношение только на одной частоте. Измеренное значение в виде точки и фотография изготовленного с помощью 3D печати преобразователя приведены на рис. 3б. Осевое соотношение (axial ratio) $AR = 1.8$ дБ на частоте 96 ГГц. Ухудшение характеристик относительно расчетных связаны с погрешностями в изготовлении, а также с диэлектрической прони-

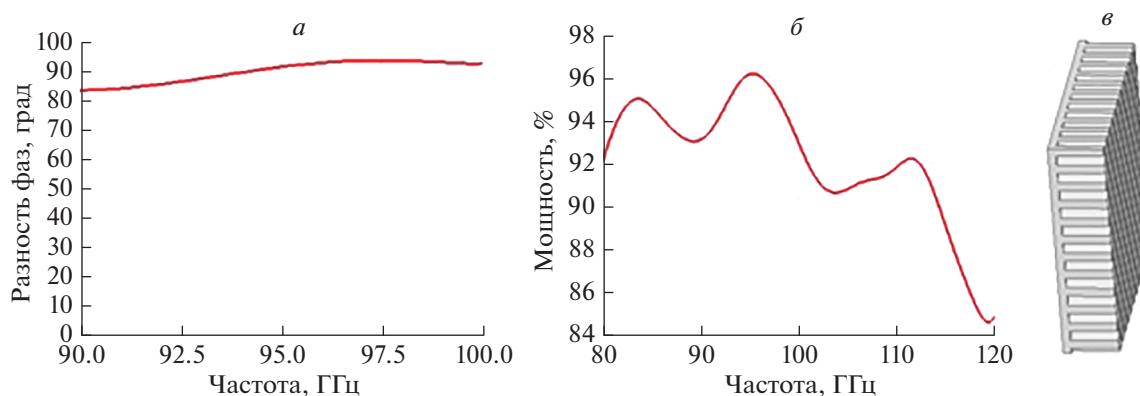


Рис. 2. Рассчитанные значения частотной зависимости разности фаз в градусах (а), частотной зависимости прошедшей мощности в процентах (б) и трехмерный вид физической модели преобразователя поляризации (в).

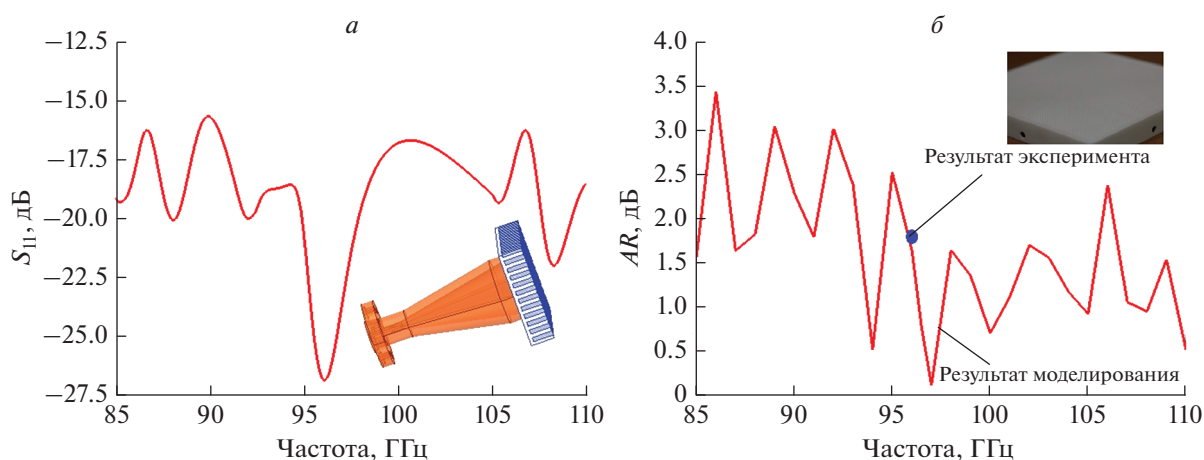


Рис. 3. Рассчитанные значения преобразователя в составе рупорной антенны WR 10 отражения электромагнитной волны в дБ (а) и осевого соотношения в дБ (б). Точкой показано полученное экспериментально значение осевого соотношения на частоте 96 ГГц.

цаемостью материала, используемого при 3D печати, которое может быть частотно-зависимое и иметь отличные от 2.55 значения в диапазоне КВЧ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена конструкция преобразователя линейной поляризации в круговую с шириной полосы при $AR < 3$ дБ 23 ГГц в миллиметровом диапазоне длин волн. Преобразователь поляризации характеризуется высоким коэффициентом передачи. Прошедшая мощность составляет не менее 90% в рабочей полосе. Объединенный с рупорной антенной WR-10 преобразователь поляризации показывает обратные потери не выше -15 дБ. Легкость изготовления и использование недорогих материалов в 3D печати делают этот преобразователь привлекательным с точки зрения массового производства.

Работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-72-30003).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kirschbaum H.S., Chen S. // IRE Trans. Microwave Theory Tech. 1957. V. 5. No. 3. P. 199.
2. Smith P.W. Monolithic polarizer grating. US Patent No. 45516925, cl. 333/21A, H01P 1/16. 1985.
3. Volman V., Harris D.W. Passive electromagnetic polarization shifter with dielectric slots. US Patent № 8519899, cl. 343/756, H01O 19/00. 2013.
4. Redd J. Polarization converting dielectric plate. US Patent No. 0266977, cl. 343/911R, H01Q 15/244. 2014.
5. Munk B.A. Frequency selective surfaces: theory and design. N.Y.: Wiley, 2000. 440 p.
6. Креницкий А.П., Мещанов В.П., Молчанов С.Ю., Ушаков Н.М. // Изв. вузов. Радиоэлектрон. 2016. № 6. С. 49.
7. Roberts A., Lin L. // Opt. Lett. 2012. V. 37. No. 11. P. 1820.

8. Euler M., Fusco V., Dickie R. et al. // IEEE Trans. Antennas Propag. 2011. V. 59. No. 8. P. 3103.
9. Biscarini M., Sardi G.M., Martini E. et al. // Proc. EuCAP'13 (Göteborg, 2013).
10. Clendinning S., Cahill R., Zelenchuk D., Fusco V. // Microwave Opt. Technol. Lett. 2020. V. 62. No. 4. P. 1815.
11. Clendinning S., Cahill R., Zelenchuk D., Fusco V. // Proc. EuCAP-19 (Krakow, 2019). P. 1.
12. Karamirad M., Ghobadi C., Nourinia J., Mohammadi B. // Proc. IEEE 4th KBEI. (Tehran, 2017). P. 186.
13. Li Y., Zhang J., Qu S. et al. // J. Appl. Phys. 2015. V. 117. No. 4. Art. No. 044501.
14. Sofi M.A., Saurav K., Koul S.K. // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2020. V. 68. No. 10. P. 4138.
15. Orr R., Goussetis G., Fusco V., Saenz E. // IEEE Trans. Antennas Propag. 2015. V. 63. No. 5. P. 1949.
16. Wang H.B., Cheng Y.J., Chen Z.N. // IEEE Trans. Antennas Propag. 2019. V. 68. No. 2. P. 1186.
17. Zhou M.M., Cheng Y.J. // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018. V. 66. No. 3. P. 1280.
18. Xu H., Zhou J., Zhou K. et al. // IEEE Trans. Antennas Propag. 2018. V. 66. No. 10. P. 5170.
19. Cheng Y.J., Wang J., Liu X.L. // IEEE Trans. Antennas Propag. 2017. V. 65. No. 11. P. 5855.
20. Ruan X., Chan C.H. // IEEE Trans. Antennas Propag. 2019. V. 67. No. 3. P. 2002.
21. Zhu H.L., Cheung S.W., Chung K.L., Yuk T.I. // IEEE Trans. Antennas Propag. 2013. V. 61. No. 9. P. 4615.
22. Ma X., Huang C., Pan W. et al. // IEEE Trans. Antennas Propag. 2014. V. 62. No. 4. P. 2307.
23. Lin C., Ge Y., Bird T.S., Liu K. // IEEE Antennas Wireless. Propag. Lett. 2018. V. 17. No. 3. P. 480.
24. Kaivanto E., Salonen E., Berg M. // Proc. LAPC-2017 (Loughborough, 2017). P. 1.
25. Tuovinen T., Salonen E.T., Berg M. // IEEE Trans. Antennas Propag. 2016. V. 64. No. 11. P. 4937.
26. Wang K.X., Wong H. // IEEE Trans. Antennas Propag. 2018. V. 66. No. 8. P. 4303.
27. Jin J.M. The finite element method in Electromagnetics. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014. 846 p.

Artificial anisotropic material to convert linear polarization into circular polarization in millimeter wave range

I. Sh. Bahteev^{a,*}, S. Yu. Molchanov^a, V. M. Muravev^a, P. A. Gusikhin^a

^a *Institute of Solid State Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia*

^{*}*e-mail: b1984h@yandex.ru*

We developed a simple device for converting linear polarization to circular one for the EHF band. For example, an anisotropic dielectric operating at 96 GHz and consisting of periodically repeating apertures is designed and manufactured using 3D printing. The advantage of such a transducer is the transmission of at least 90% of the power and the axial ratio below 3 dB in the frequency band 87 to 110 GHz. The broadbandness and the efficiency of energy transmission through the polarization transducing device are analyzed numerically. The measured axial ratios and transmitted power are in line with the simulation results.