

С. Ю. Полевой

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

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

E-mail: polevoy@ire.kharkov.ua

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КИРАЛЬНЫХ СРЕД В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Киральные структуры могут успешно использоваться для моделирования процессов взаимодействия электромагнитных волн с различными композитными средами (от изотропных до бианизотропных). Такие структуры могут быть весьма перспективны при создании компактных СВЧ-устройств. Однако в миллиметровом диапазоне длин волн, который сегодня является одним из самых важных с прикладной точки зрения, объем экспериментальных исследований киральных структур оказывается явно недостаточным. В работе приведены методики экспериментального определения эффективных материальных параметров киральных сред в миллиметровом диапазоне. Основное внимание уделено экспериментальному исследованию поляризационных свойств киральных сред. Измерены частотные зависимости угла поворота плоскости поляризации электромагнитной волны, прошедшей через исследуемую объемную киральную структуру, состоящую из массива двумерных киральных структур. Рассчитаны частотные зависимости параметра киральности для нескольких значений ее толщины. Показана возможность управления углом поворота плоскости поляризации прошедшей электромагнитной волны и параметром киральности за счет изменения толщины структуры. Экспериментально определена частотная зависимость действительной части параметра киральности по двум методикам и проведено сравнение результатов. Получено качественное совпадение результатов двух методик в области частот, соответствующих максимуму модуля параметра киральности. Результаты исследований могут найти применение при разработке различных телекоммуникационных устройств: фильтров, поляризаторов, направленных ответвителей. Ил. 7. Библиогр.: 16 назв.

Ключевые слова: метаматериал, объемная киральная структура, поляризационные характеристики, параметр киральности.

В настоящее время актуальной является задача исследования киральных сред, представляющих интерес как для фундаментальной физики, так и для прикладной. Такие киральные среды могут быть перспективными при создании компактных магнитоуправляемых СВЧ-устройств.

Киральная среда, являясь взаимной биизотропной средой [1], представляется частным случаем гиротропной среды. Распространение электромагнитных волн в гиротропных и кристаллических средах хорошо изучено в физике твердого тела [2, 3].

Многообещающими являются объемные киральные метаматериалы, с помощью которых можно осуществить поворот плоскости поляризации электромагнитной волны на значительные углы в миллиметровом (мм) диапазоне длин волн. Теоретические и экспериментальные исследования таких структур [4, 5] проводились преимущественно в сантиметровом диапазоне длин волн. Однако в мм диапазоне объем экспериментальных исследований на сегодняшний день явно недостаточен.

Целью работы является экспериментальное определение эффективных материальных параметров киральных сред в мм диапазоне длин волн с помощью известных методик.

1. Определение материальных параметров киральных сред. В настоящее время существует несколько форм записи материальных уравнений для киральных сред, поэтому вначале необходимо выбрать удобный вид материальных уравнений, например [1]

$$\begin{aligned} \vec{D} &= \varepsilon \vec{E} + i\kappa \vec{H}, \\ \vec{B} &= \mu \vec{H} - i\kappa \vec{E}, \end{aligned} \tag{1}$$

где \vec{E} , \vec{H} – векторы напряженности электрического и магнитного поля; \vec{D} , \vec{B} – векторы электрической и магнитной индукции; ε , μ – комплексные диэлектрическая и магнитная проницаемость; κ – комплексный параметр киральности.

Существуют и другие формы записи материальных уравнений. Рассматривая киральную среду как среду со слабой пространственной дисперсией, материальные уравнения можно записать в более общей тензорной форме [6]:

$$\begin{aligned} \vec{D} &= \tilde{\varepsilon} \vec{E}, \\ \vec{B} &= \tilde{\mu} \vec{H}, \end{aligned} \tag{2}$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{\varepsilon} &= \begin{pmatrix} \varepsilon & \frac{k_z \kappa}{k_0 \mu} & -\frac{k_y \kappa}{k_0 \mu} \\ -\frac{k_z \kappa}{k_0 \mu} & \varepsilon & \frac{k_x \kappa}{k_0 \mu} \\ \frac{k_y \kappa}{k_0 \mu} & -\frac{k_x \kappa}{k_0 \mu} & \varepsilon \end{pmatrix}, \\ \tilde{\mu} &= \begin{pmatrix} \mu & \frac{k_z \kappa}{k_0 \varepsilon} & -\frac{k_y \kappa}{k_0 \varepsilon} \\ -\frac{k_z \kappa}{k_0 \varepsilon} & \mu & \frac{k_x \kappa}{k_0 \varepsilon} \\ \frac{k_y \kappa}{k_0 \varepsilon} & -\frac{k_x \kappa}{k_0 \varepsilon} & \mu \end{pmatrix}, \end{aligned} \tag{3}$$

– тензоры диэлектрической и магнитной проницаемости; $\vec{k} = \{k_x, k_y, k_z\}$ – волновой вектор электро-

магнитной волны в киральной среде; $k_0 = \frac{\omega}{c}$ – постоянная распространения для вакуума; ω – угловая частота электромагнитной волны; c – скорость света в вакууме.

Следуя результатам работ [7, 8], определение эффективных материальных параметров киральных сред мы будем проводить в случае нормального падения плоских электромагнитных волн на слой киральной среды толщиной L . В рассматриваемом случае киральная среда является одноосной средой вдоль направления распространения волн (оси z). Нормально падающая волна $\vec{E}_\pm(z)$, распространяющаяся в положительном направлении оси z , и отраженная волна $\vec{E}'_\pm(z)$, распространяющаяся в отрицательном направлении оси z , с правой круговой поляризацией (ПКП, +) и левой (ЛКП, –), имеют следующий вид [8]:

$$\begin{aligned}\vec{E}_\pm(z) &= (\vec{x}_0 \pm i\vec{y}_0)E_0 e^{ik_\pm z}, \\ \vec{E}'_\pm(z) &= (\vec{x}_0 \pm i\vec{y}_0)E'_0 e^{-ik_\pm z},\end{aligned}\quad (4)$$

где E_0 и E'_0 – амплитуды падающей и отраженной волн; \vec{x}_0 и \vec{y}_0 – орты прямоугольной системы координат; $k_\pm = k_0 n_\pm$ – постоянные распространения для электромагнитных волн с ПКП и ЛКП; $n_\pm = n \pm \kappa$ – коэффициенты преломления для волн с ПКП и ЛКП; $n = (n_+ + n_-)/2 = \sqrt{\varepsilon\mu}$ – средний коэффициент преломления. Применяя условия непрерывности тангенциальных компонент электрического и магнитного поля на границах кирального слоя $z = 0$ и $z = L$, можно получить систему уравнений для нахождения амплитуд прошедшей T_\pm и отраженной R_\pm волн с ПКП и ЛКП. Из этой системы уравнений находим [8]:

$$\begin{aligned}T_\pm &= \frac{4Ze^{ink_0L} e^{\pm i\kappa k_0L}}{(1+Z)^2 - (1-Z)^2 e^{2ink_0L}}, \\ R = R_\pm &= \frac{(1-Z^2)(e^{2ink_0L} - 1)}{(1+Z)^2 - (1-Z)^2 e^{2ink_0L}},\end{aligned}\quad (5)$$

где $Z = \sqrt{\mu/\varepsilon}$ – волновое сопротивление среды. Из уравнений (5) находим выражения для Z и n_\pm [8]:

$$\begin{aligned}Z &= \pm \sqrt{\frac{(1+R)^2 - T_+ T_-}{(1-R)^2 - T_+ T_-}}, \\ n_\pm &= \frac{i}{k_0 L} \left(\ln \left(\frac{1}{T_\pm} \left(1 - \frac{Z-1}{Z+1} R \right) \right) \right) \pm 2m\pi,\end{aligned}\quad (6)$$

где m – целое число. Знаки в этих выражениях выбираются из условий $\text{Re}(z) > 0$ и $\text{Im}(n) > 0$.

Существуют несколько способов экспериментального определения эффективных материальных параметров одноосных киральных сред.

Первый метод, описанный в статьях [7, 8], состоит в измерении коэффициентов прохождения и отражения электромагнитных волн для измеряемой структуры в случае двух взаимных расположений передающего и приемного рупоров. При этом используется параллельное (случай кополяризации) и перпендикулярное (случай кроссполяризации) расположение рупоров. Измеряемые коэффициенты прохождения и отражения для случая кополяризации T_\parallel , R_\parallel и кроссполяризации T_\perp , R_\perp связаны с коэффициентами прохождения T_\pm и отражения R_\pm для электромагнитных волн с ПКП и ЛКП [7]:

$$\begin{aligned}T_\pm &= T_\parallel \pm iT_\perp, \\ R_\pm &= R_\parallel = R.\end{aligned}\quad (7)$$

Рассчитав величины T_+ и T_- , можно непосредственно вычислить параметр киральности κ и поляризационные характеристики прошедшей волны: угол поворота плоскости поляризации прошедшей волны θ и угол эллиптичности η (рис. 1) [8]:

$$\begin{aligned}\kappa &= \frac{\text{Arg}(T_+) - \text{Arg}(T_-) + 2m\pi}{2k_0L} + i \frac{\ln|T_-| - \ln|T_+|}{2k_0L}, \\ \theta &= \frac{\text{Arg}(T_+) - \text{Arg}(T_-)}{2}, \\ \eta &= \frac{1}{2} \arctg \frac{|T_+|^2 - |T_-|^2}{|T_+|^2 + |T_-|^2}.\end{aligned}\quad (8)$$

Целое число m определяется из соотношения $-\pi < \text{Arg}(T_+) - \text{Arg}(T_-) + 2m\pi < \pi$.

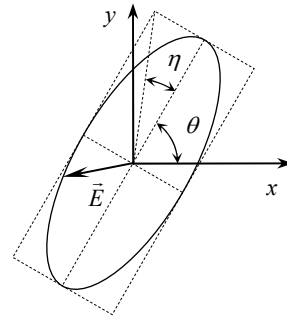


Рис. 1. Эллипс поляризации прошедшей через киральный слой электромагнитной волны

Диэлектрическую проницаемость ε , магнитную проницаемость μ и параметр киральности κ для киральной среды определяют по следующим формулам [8]:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= n/Z, \\ \mu &= nZ, \\ \kappa &= (n_+ - n_-)/2. \end{aligned} \quad (9)$$

Таким образом, измерив коэффициенты прохождения и отражения для волн на кополяризации и кросс-поляризации с помощью рупоров, можно вычислить эффективные материальные параметры исследуемой структуры, а также ее поляризационные характеристики.

Существует также второй метод определения параметра киральности κ и поляризационных характеристик прошедшей волны для киральной структуры. Он состоит в непосредственном измерении угла θ с помощью приемного рупора, который может поворачиваться вокруг своей оси [6]. Угол поворота θ соответствует повороту приемного рупора на такой угол, при котором коэффициент прохождения электромагнитной волны максимален (T_{\max}). Если провести измерение минимального коэффициента прохождения T_{\min} при угле поворота приемного рупора $\theta + 90^\circ$, то можно определить угол эллиптичности η прошедшей волны по формуле

$$\eta = \arctg\left(\frac{T_{\min}}{T_{\max}}\right). \quad (10)$$

Найдем соотношения между поляризационными характеристиками структуры и ее параметром киральности. Угол поворота плоскости поляризации прямо пропорционален частоте, действительной части параметра киральности и толщине кирального слоя [1, 9]:

$$\theta = k_0 L \kappa' = \frac{\omega L \kappa'}{c}. \quad (11)$$

Угол эллиптичности прошедшей волны зависит от мнимой части параметра киральности [10, 11]:

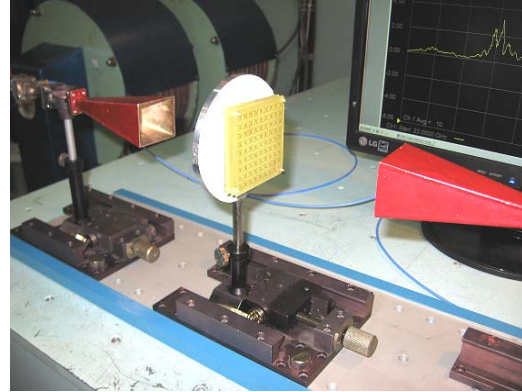
$$\eta = \arctg(\text{th}(k_0 L \kappa'')). \quad (12)$$

По экспериментально полученным значениям θ и η может быть рассчитан параметр киральности:

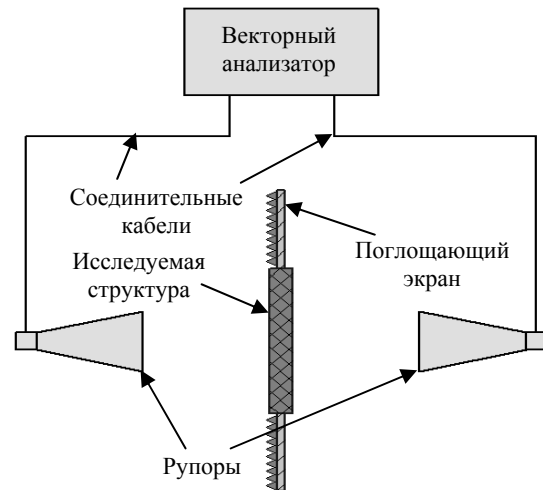
$$\kappa = \frac{\theta}{k_0 L} + i \frac{\text{arcth}(\text{tg } \eta)}{k_0 L}. \quad (13)$$

2. Методика эксперимента. Экспериментальная установка для определения эффективных материальных параметров киральных сред показана на рис. 2. Исследуемая объемная киральная структура закреплена в отверстии плоского поглощающего экрана и размещена между передающим и приемным прямоугольными рупорами, которые соединены с векторным анализатором цепей посредством коаксиально-волноводных переходов и коаксиаль-

ных кабелей. Основными функциями анализатора являются измерение S -параметров, их сохранение, обработка и представление в графическом виде. Роль экрана заключается в устранении влияния дифракции волн на краях структуры [12].



а)



б)

Рис. 2. Экспериментальная установка для исследования киральных структур: а) – внешний вид; б) – структурная схема

Рупоры расположены на одной оси, проходящей перпендикулярно структуре через ее центр на расстоянии порядка десяти длин волн от структуры. Раскрыв рупоров 34×40 мм, а их длина 110 мм. При необходимости вблизи рупоров могут быть установлены тефлоновые фазо-корректирующие линзы, делающие фронт волны более плоским. Приемный рупор может поворачиваться вокруг своей оси. Структурная схема установки показана на рис. 2, б. С помощью анализатора цепей регистрируются параметры S_{21} и S_{11} в диапазоне частот 22...40 ГГц. Процедура калибровки измерительной установки обеспечивает уменьшение влияния переотражений, возникающих из-за невозможности идеального согласования пространственных элементов схемы.

Точность измерения параметра S_{21} в результате предпринятых мер обеспечена не хуже 0,5 дБ.

Для исследования киральных структур с продольным намагничиванием собрана вторая экспериментальная установка (рис. 3). Она похожа на экспериментальную установку, описанную выше, однако структура и рупоры в ней располагаются вдоль оси электромагнита, управляемого с помощью компьютера. Более подробно методика такого эксперимента описана в работах [13, 14].

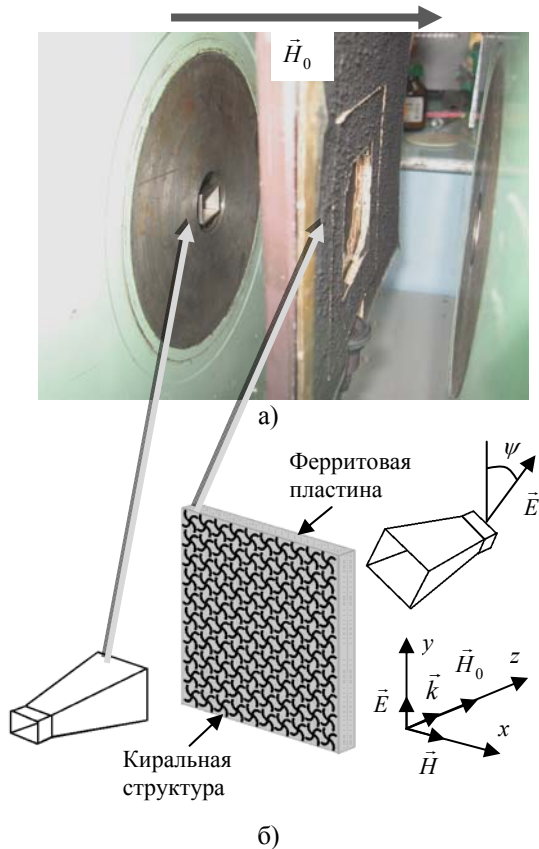


Рис. 3. Экспериментальная установка для исследования киральных структур с продольным намагничиванием: а) – внешний вид; б) – структурная схема

Измерение параметра киральности проведено на примере объемной киральной структуры, состоящей из семи слоев плоских киральных структур в виде дупериодических массивов киральных элементов на стеклотекстолитовой подложке толщиной 1,5 мм (рис. 4, а). Диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon' = 3,67$, $\text{tg } \delta = 0,06$. Плоско-киральные структуры получены на фольгированной стороне стеклотекстолита методом фотолитографии. Киральные элементы (рис. 4, б) имеют форму розеток с параметрами: период $p = 6,25$ мм, радиус дуг $a = 1,66$ мм, ширина металлических полосков $w = 0,3$ мм, угловой размер дуг $\varphi = 120^\circ$. Киральные элементы повернуты вокруг своей оси на 15° относи-

тельно элементов в последующем слое. Таким образом, углы поворота киральных элементов по слоям 0–15–30–45–60–75–90°.

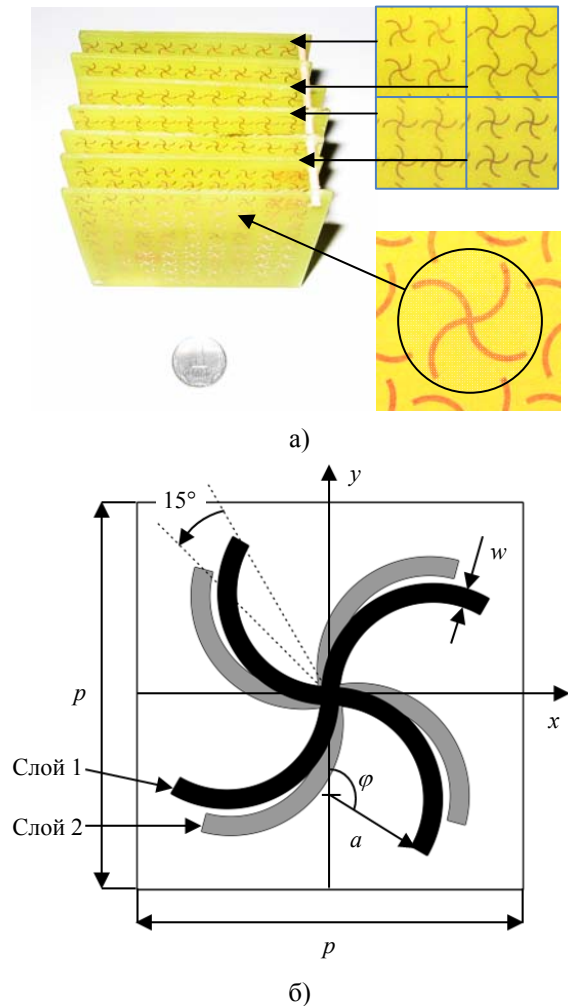


Рис. 4. Исследуемая киральная структура: а) – внешний вид структуры; б) – элементарная ячейка квадратной периодической плоско-киральной структуры с металлическим элементом в форме розетки (2 последующих слоя)

3. Анализ экспериментальных данных.

С целью исследования зависимости поляризационных свойств объемной киральной структуры от ее толщины были проанализированы экспериментальные зависимости угла поворота плоскости поляризации $\theta(f)$ от частоты электромагнитной волны $f = \omega/(2\pi)$ для четырех значений толщины структуры L (рис. 5, а). Толщина структуры L изменялась от 10,5 до 12,6 мм за счет увеличения расстояния между слоями метаматериала d от 1,5 до 1,8 мм. По полученным экспериментальным кривым были рассчитаны частотные зависимости действительной части параметра киральности $\kappa'(f)$ для четырех значений толщины структуры L (рис. 5, б). Расчет выполнялся по формуле (13).

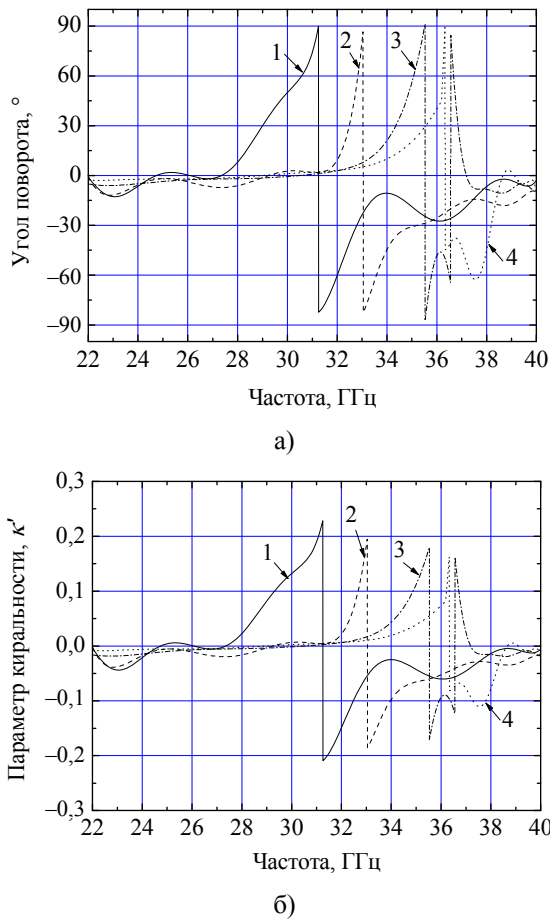


Рис. 5. Экспериментальные частотные зависимости θ и κ' для четырех значений толщины структуры L (1 – 10,5; 2 – 11,2; 3 – 11,9; 4 – 12,6 мм): а) – зависимости $\theta(f)$; б) – зависимости $\kappa'(f)$

Для частотной зависимости угла $\theta(f)$ для структуры толщиной $L=10,5$ мм (рис. 5, а, кривая 1) вблизи частоты 31,2 ГГц обнаружена область максимальной дисперсии угла θ , где он достигает значений 90° при угле эллиптичности 20° . Вблизи частоты 30 ГГц угол θ достигает значений 50° при угле эллиптичности 2° . Как видно, частотная зависимость параметра киральности $\kappa'(f)$ также имеет резонансный характер на этой частоте. При этом модуль параметра киральности достигает значения 0,23. Характер зависимости $\kappa'(f)$ аналогичен зависимости $\theta(f)$ в соответствии с формулой (13).

На рис. 6, а отчетливо виден монотонный рост частоты $f_{\text{рез}}$ области максимальной дисперсии угла θ от 31,2 до 36,3 ГГц при увеличении толщины структуры. Наиболее вероятная причина увеличения частоты $f_{\text{рез}}$ при увеличении L заключается в наличии высокочастотной «магнитной» моды между слоями структуры [4, 15]. Эта «магнитная» мода имеет аномальную частот-

ную зависимость, т. е. при увеличении расстояния между слоями киральной структуры ее частота растет. Такая зависимость характерна для сред с отрицательной дисперсией. Отметим, что в данной объемной киральной структуре, так же как и в структурах [4, 16], проявляется «электрическая» мода, которая имеет обычную частотную зависимость, т. е. при увеличении расстояния между слоями киральной структуры ее частота уменьшается. При этом на тех же частотах зарегистрировано уменьшение максимального значения действительной части параметра киральности $\kappa'_{\text{рез}}$ от 0,23 до 0,16 (рис. 6, б). Наиболее вероятная причина уменьшения $\kappa'_{\text{рез}}$ заключается в разрежении структуры при увеличении расстояния между ее слоями.

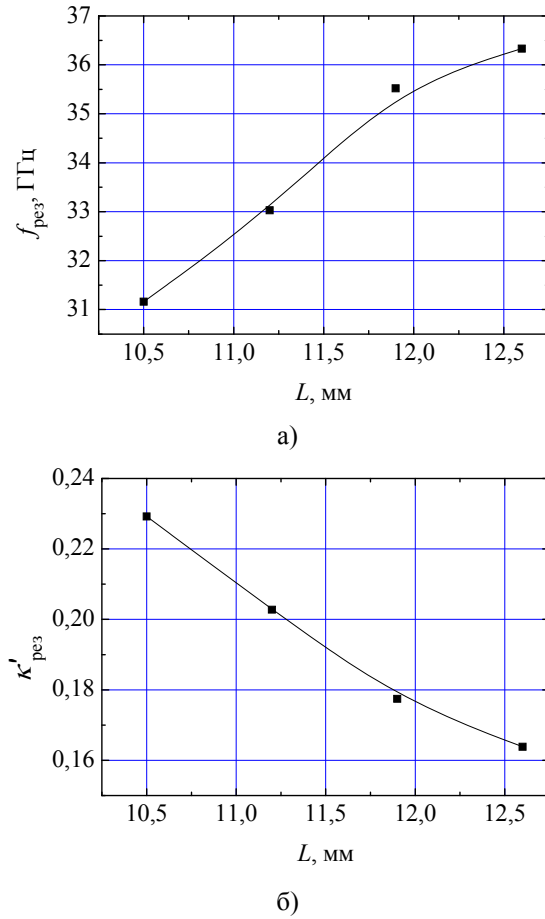


Рис. 6. Зависимости резонансных значений $f_{\text{рез}}$ и $\kappa'_{\text{рез}}$ от толщины структуры L : а) – зависимость $f_{\text{рез}}(L)$; б) – зависимость $\kappa'_{\text{рез}}(L)$

С целью сравнения двух методов определения угла θ было проведено две серии экспериментов. В первой серии экспериментов измерены комплексный коэффициент прохождения и отражения волны от структуры для параллельной и перпендикулярной ориентаций передающего и

приемного рупоров. По полученным данным была рассчитана действительная часть параметра киральности первым методом (рис. 7, кривая 1). Во второй серии экспериментов была зарегистрирована зависимость угла θ от частоты для описанной выше объемной киральной структуры толщиной $L = 10,5$ мм. По полученной экспериментальной кривой была рассчитана действительная часть параметра киральности вторым методом (рис. 7, кривая 2). Видно качественное совпадение результатов двух методов. Частота области с максимальными значениями параметра киральности для обоих методов отличается не более чем на 0,5 ГГц. Отличие в абсолютных значениях можно объяснить недостаточным согласованием элементов схемы. Видно, что для мм диапазона наиболее приемлемым является способ экспериментального определения зависимости угла θ от частоты и последующего вычисления параметра киральности из-за его большей точности.

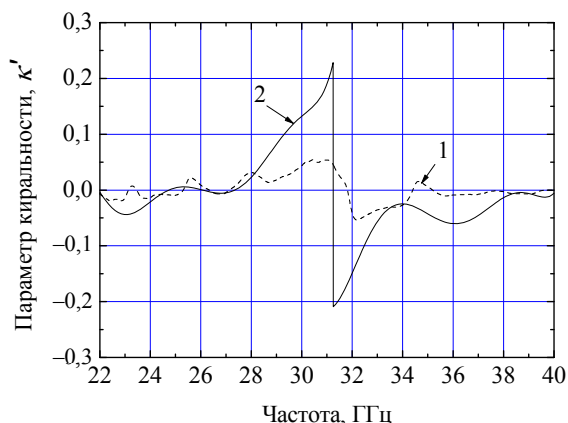


Рис. 7. Зависимость $\kappa'(f)$ для исследуемой структуры толщиной $L = 10,5$ мм

Наряду с определением κ' были также найдены другие эффективные материальные параметры: κ'' , ϵ' , ϵ'' , μ' и μ'' . Во всем диапазоне частот максимальные значения величины κ'' достигали значений 0,05 с относительной погрешностью 10%. В то же время величины ϵ' и μ' достигали значений 0,25, а ϵ'' и μ'' достигали значений 0,05. Относительная погрешность определения диэлектрической и магнитной проницаемости 40%. Отметим, что весьма большая относительная погрешность при измерении данных материальных параметров обусловлена сложностью согласования элементов измерительного стенда.

Выводы. Экспериментально исследованы киральные свойства объемного метаматериала на основе массива плоских киральных структур. Предложены две экспериментальные методики определения эффективных материальных пара-

метров киральных сред. С помощью этих методик определена частотная зависимость действительной части параметра киральности исследуемой структуры.

Получено качественное согласие двух предложенных методик в области частот, в которых модуль параметра киральности имеет максимальное значение. Отмечены причины различия абсолютных значений параметра киральности.

Показана возможность управления резонансной частотой угла поворота плоскости поляризации электромагнитной волны за счет изменения толщины структуры. Показано существование «магнитной» моды, обладающей аномальной зависимостью частоты от толщины структуры.

Автор благодарит В. П. Рубана за помощь в изготовлении объектов исследования, Н. Н. Белецкого и С. И. Тарапова за научные консультации.

Библиографический список

1. Иванов О. В. Распространение электромагнитных волн в анизотропных и бианизотропных слоистых структурах / О. В. Иванов. – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – 262 с.
2. Агранович В. И. Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов / В. И. Агранович, В. Л. Гинзбург. – М.: Наука, 1979. – 432 с.
3. Федоров Ф. И. Теория гиротропии / Ф. И. Федоров. – Минск: Наука и техника, 1976. – 456 с.
4. Metamaterial with negative index due to chirality / E. Plum, J. Zhou, J. Dong, et al. // Phys. Rev. B. – 2009. – 79, N 3. – P. 035407 (6 p.).
5. Lytvynenko L. M. Wave diffraction by periodic multilayered structures / L. M. Lytvynenko, S. L. Prosvirnin, K. Schueneemann // Radio Physics and Radio Astronomy. – 2005. – 10, spec. iss. – P. S186–S201.
6. Осипов О. В. К вопросу о физическом смысле материальных уравнений киральной среды / О. В. Осипов, А. Н. Волобуев // Письма в журн. техн. физики. – 2009. – 35, вып. 16. – С. 28–33.
7. Conjugated gammadion chiral metamaterial with uniaxial optical activity and negative refractive index / R. Zhao, L. Zhang, J. Zhou et al. // Phys. Rev. B. – 2011. – 83, N 3. – P. 035105 (4 p.).
8. Zhao R. Chiral metamaterials: retrieval of the effective parameters with and without substrate / R. Zhao, T. Koschny, C. M. Soukoulis // Optics Express. – 2010. – 18, N 14. – P. 14553–14567.
9. Electromagnetic Waves in Chiral and Bi-Isotropic Media / I. V. Lindell, A. H. Sihvola, S. A. Tretyakov, A. J. Viitanen. – Boston–London: Artech House, 1994. – 333 p.
10. FDTD modeling of transient microwave signals in dispersive and lossy bi-isotropic media / A. Grande, I. Barba, A. C. L. Cabeceira et al. // IEEE Trans. Microwave Theory Techn. – 2004. – 52, N 3. – P. 773–783
11. Retrieving effective parameters for quasiplanar chiral metamaterials / C. Menzel, C. Rockstuhl, T. Paul, F. Lederer // Appl. Phys. Lett. – 2008. – 93, N 23. – P. 233106 (3 p.).
12. Обоснование методики экспериментального исследования свойств дифракционных решеток / Д. Д. Иванченко, Н. Н. Колчигин, Л. Н. Литвиненко и др. // Изв. вузов. Радиофизика. – 1979. – 12, № 9. – С. 1109–1116.
13. Experimental Study of the Faraday Effect in 1D-Photonic Crystal in Millimeter Waveband / A. A. Girich, S. Y. Polevoy, S. I. Tarapov et al. // Solid State Phenomena. – 2012. – 190. – P. 365–368.

14. Resonant features of planar Faraday metamaterial with high structural symmetry / S. Y. Polevoy, S. L. Prosvirnin, S. I. Tarapov, V. R. Tuz // The Europ. Phys. J. – Appl. Phys. – 2013. – 61, N 3. – P. 030501 (7 p.).
15. Polevoy S. Yu. Frequency dispersion of the polarization properties of chiral structure in the millimeter waveband / S. Yu. Polevoy, S. I. Tarapov // 8th Intern. Kharkov symp. on physics and engineering of microwaves, millimeter and sub-millimeter waves: proc. – Kharkov, 2013. – P. 98–100.
16. Bi-layer cross chiral structure with strong optical activity and negative refractive index / J. Dong, J. Zhou, T. Koschny, C. Soukoulis // Optics Express. – 2009. – 17, N 16. – P. 14172–14179.

Рукопись поступила 08.07.2013 г.

S. Yu. Polevoy

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF MATERIAL PARAMETERS OF THE CHIRAL MEDIA IN THE MILLIMETER WAVELENGTH RANGE

Chiral structures can be successfully used for the simulation of the interaction of electromagnetic waves with various composite media (from isotropic to bianisotropic). Such structures can be quite promising for compact microwave devices design. However, in the millimeter wavelength range, which is one of the most important today from the practical point of view, the amount of experimental studies of chiral structures is insufficient. The paper presents methods of the experimental determination of the effective constitutive parameters of the chiral media in the millimeter wave range. The focus is on the experimental study of the polarization properties of chiral media. The frequency dependence of the polarization plane rotation angle of the electromagnetic wave transmitted through the investigated bulk chiral structure consisting of the array of two-dimensional chiral structures was analyzed. The frequency dependence of the chirality parameter for several values of its thickness was calculated. The possibility of controlling the angle of the polarization plane of the transmitted electromagnetic wave, and the chirality parameter by changing the thickness of the structure was demonstrated. The frequency dependence of the real part of the chirality parameter by two methods was determined experimentally. The comparison of the obtained characteristics has been carried out. The qualitative agreement

between the results of both methods in the vicinity of the frequency of the maximum of the chirality parameter module has been obtained. Results can be used for design of various telecommunication devices: filters, polarizers, directional couplers.

Key words: metamaterial, bulk chiral structure, polarization characteristics, chirality parameter.

С. Ю. Полевой

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ МАТЕРІАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ КІРАЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ У МІЛІМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ ДОВЖИН ХВИЛЬ

Кіральні структури можуть успішно використовуватися для моделювання процесів взаємодії електромагнітних хвиль з різними композитними середовищами (від ізотропних до біанізотропних). Такі структури можуть бути дуже перспективними при створенні компактних НВЧ-пристроїв. Однак у міліметровому діапазоні довжин хвиль, який сьогодні є одним з найбільш важливих з прикладної точки зору, обсяг експериментальних досліджень кіральних структур виявляється явно недостатнім. У роботі наведено методики експериментального визначення ефективних матеріальних параметрів кіральних середовищ у міліметровому діапазоні. Основну увагу приділено експериментальному дослідженню поляризаційних властивостей кіральних середовищ. Виміряно частотні залежності кута повороту площини поляризації електромагнітної хвилі, яка пройшла через досліджувану об'ємну кіральну структуру, що складається з масиву двовимірних кіральних структур. Розраховано частотні залежності параметра кіральності для декількох значень її товщини. Показано можливість управління кутом повороту площини поляризації електромагнітної хвилі, що пройшла крізь структуру, і параметром кіральності за рахунок зміни товщини структури. Експериментально визначена частотна залежність дійсної частини параметра кіральності за двома методиками та проведено порівняння результатів. Одержано якісний збіг результатів двох методик в області частот, відповідних максимуму модуля параметра кіральності. Результати досліджень можуть знайти застосування при розробці різних телекомунікаційних пристроїв: фільтрів, поляризаторів, спрямованих відгалужувачів.

Ключові слова: метаматеріал, об'ємна кіральна структура, поляризаційні характеристики, параметр кіральності.