

С. Ю. Полевой¹, С. Л. Просвирнин^{2,3}, С. И. Тарапов¹

¹Институт радиопрофики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: polevoy@ire.kharkov.ua

²Радиоастрономический институт НАН Украины
4, ул. Краснознаменная, Харьков, 61002, Украина

³Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина
4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина

РЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА ПЛАНАРНОГО МЕТАМАТЕРИАЛА, СФОРМИРОВАННОГО МАССИВОМ РОЗЕТОК НА НЕНАМАГНИЧЕННОЙ ФЕРРОДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОДЛОЖКЕ

Киральные структуры представляют интерес как для фундаментальной физики, где они могут успешно использоваться для моделирования распространения электромагнитных волн и элементарных возбуждений в конденсированных средах (от кристаллических до аморфных), так и с прикладной точки зрения. Такие структуры могут быть весьма перспективны при создании компактных магнитоуправляемых СВЧ-устройств. Однако в миллиметровом диапазоне длин волн, который является одним из важнейших сегодня с прикладной точки зрения, объем экспериментальных исследований плоско-киральных структур оказывается явно недостаточным. В данной работе исследованы электродинамические резонансные свойства планарного метаматериала в виде массива металлических плоско-киральных розеток на немагнитной ферритовой подложке. Получены экспериментальные и расчетные частотные зависимости коэффициента передачи для нескольких величин периода структуры. Проанализирована зависимость частоты резонансного пика коэффициента передачи от величины периода структуры. Проведен совместный анализ экспериментальных и теоретических данных. Результаты исследований могут найти применение в области телекоммуникаций, высокочастотной техники (при разработке фильтров, поляризаторов, направленных ответвителей), антенной технике. Ил. 5. Табл. 1. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: метаматериал, плоско-киральная структура, ферритовая подложка, резонансный пик.

Киральные структуры [1] интересны как с фундаментальной точки зрения, так и с прикладной. Они могут найти применение при создании компактных магнитоуправляемых СВЧ-устройств, например, поляризаторов, благодаря эффекту Фарадея, который может проявиться в их ферритовой подложке.

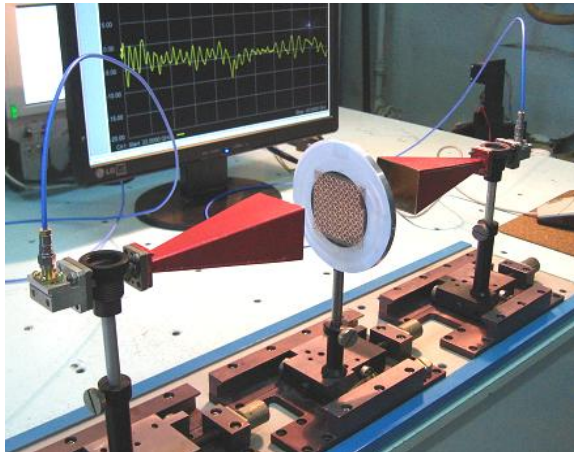
Теоретические исследования плоско-киральных структур [2–4], а также и экспериментальные [5, 6], проводились преимущественно в сантиметровом и инфракрасном диапазоне длин волн. Однако в миллиметровом (мм) диапазоне, который важен сегодня с прикладной точки зрения, объем экспериментальных исследований плоско-киральных структур оказывается явно недостаточным. В частности, вопросы согласования элементов схемы даже в данном случае немагнитных ферродиеlectricких элементов, оказываются весьма сложными.

В настоящей работе рассмотрен плоский метаматериал, построенный на основе периодического массива розеток с осевой симметрией 4-го порядка, размещенной на немагнитной ферритовой подложке. Отметим, что планарная киральность введена в данный метаматериал прежде всего для уменьшения размера элементарной ячейки при сохранении длины проводников в ней. Такое усложнение формы плоских киральных элементов позволяет уменьшить размеры проектируемых резонансных метаматериалов.

Целью этой работы является исследование резонансных свойств описанной выше плоской киральной структуры в зависимости от ее периода в мм диапазоне длин волн, а также отладка соответствующей экспериментальной методики.

1. Методика эксперимента. Экспериментальная установка (рис. 1) состоит из исследуемой структуры, закрепленной в отверстии плоского поглощающего экрана. Структура размещена между двумя облучающими прямоугольными рупорами (передающим и приемным). Посредством коаксиально-волноводных переходов и коаксиальных кабелей измерительный тракт соединен с векторным анализатором цепей *Agilent N5230A*. Соединительные кабели подключены к двум портам анализатора: *port 1* и *port 2*. Рупоры расположены на одной оси, проходящей перпендикулярно структуре через ее центр на расстоянии порядка десяти длин волн от структуры. Раскрыв рупоров 34×40мм, а их длина 110 мм. При необходимости вблизи рупоров могут быть установлены тефлоновые фазокорректирующие линзы, делающие фронт волны более плоским. Внешний вид экспериментальной установки показан на рис. 1, а, а ее структурная схема – на рис. 1, б. С помощью анализатора цепей регистрируется *S*-параметр S_{21} – коэффициент передачи структуры в диапазоне частот 22...40 ГГц. Роль экрана заключается в устранении влияния дифракции

волн на краях структуры [7]. Процедура калибровки измерительной установки обеспечивает уменьшение влияния переотражений, возникающих неизбежно из-за невозможности идеального согласования пространственных элементов схемы. Точность измерения параметра S_{21} в результате предпринятых мер обеспечена не хуже 0,5 дБ.



а)

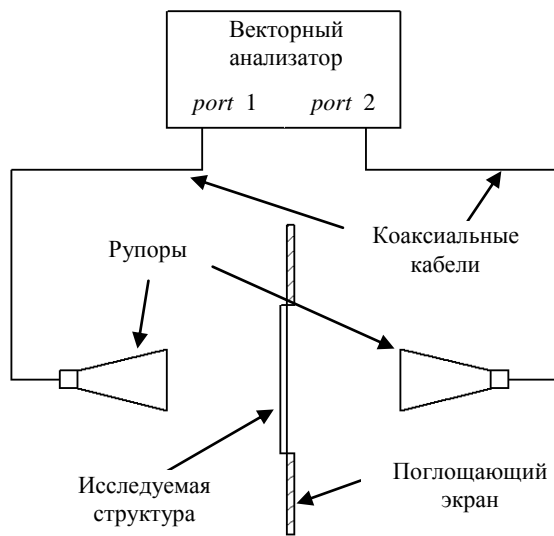
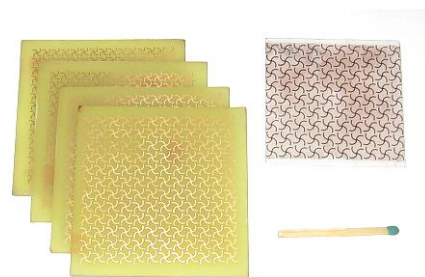


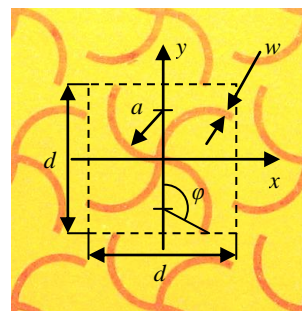
Рис. 1. Экспериментальная установка: а) – внешний вид; б) – структурная схема

Исследуемый планарный метаматериал конструктивно представляет собой двухслойную структуру, которая состоит из ферритовой плоскопараллельной пластины толщиной 0,5 мм (феррит марки L14H, обладающий малыми потерями в исследуемом диапазоне частот) и плоскокиральной периодической решетки. Решетка изготовлена из стеклотекстолита ($\epsilon' = 3,67$, $\text{tg } \delta = 0,06$) толщиной 1,5 мм, одна из сторон которого покрыта медной фольгой. Методом высокоточной фотолитографии на фольгированной сто-

роне получена структура с квадратной периодической ячейкой и плоско-киральными элементами в форме розеток (рис. 2). Авторы благодарят В. П. Рубана (ИРЭ НАН Украины) за помощь в изготовлении образцов. На решетку со стороны металлических элементов накладывается ферритовая пластина. Исследованы 9 образцов такого планарного метаматериала размером $60 \times 60 \text{ мм}^2$, которые отличаются размерами элементов металлической периодической структуры. Размер квадратной периодической ячейки d и радиус дуги a для девяти образцов приведены в таблице. Угловой размер и ширина медных полосок, образующих розетку, у всех образцов одинаковые и составляют $\phi = 120^\circ$ и $w = 0,267 \text{ мм}$ соответственно.



а)



б)

Рис. 2. Периодическая решетка плоско-киральных элементов на диэлектрической подложке: а) – внешний вид структуры; б) – квадратная периодическая ячейка с металлическим элементом в форме розетки

Геометрические параметры исследуемых образцов плоско-киральных элементов

№	d , мм	a , мм
1	3,5	1,16
2	3,75	1,25
3	4,0	1,33
4	4,25	1,42
5	4,5	1,5
6	4,75	1,58
7	5,0	1,66
8	5,25	1,75
9	5,5	1,83

Отметим, что немаловажную роль в проявлении особенностей электродинамических свойств плоских киральных сред играет вид магнитной проницаемости подложки такого метаматериала. Несмотря на то что в данном случае структура находится в нулевом магнитном поле, и, следовательно, ее магнитная проницаемость (магнитная проницаемость полностью размагниченного феррита) является скалярной величиной, тем не менее она оказывается несколько меньше проницаемости вакуума, что необходимо учесть. Для расчета магнитной проницаемости феррита нами применена известная недиссипативная модель «ненасыщенного» феррита [8], основанная на двухдоменной модели магнетика и дающая хорошее согласие с СВЧ-экспериментом [9]. Магнитная проницаемость феррита для частот $\omega > \gamma(H_r + 4\pi M_S)$ рассчитывается по формуле

$$\mu = \frac{1}{3} + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{(\omega/\gamma)^2 - H_r + 4\pi M_S^2}{(\omega/\gamma)^2 - H_r^2}},$$

где M_S – намагниченность насыщения; γ – гиромагнитное отношение; H_r – поле, соответствующее остаточной намагниченности; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота. Для феррита, использованного в эксперименте, $\varepsilon = 13,2 - i0,0697$. Поле, соответствующее остаточной намагниченности $H_r = 3500$ Э. График зависимости $\mu(f)$ в исследуемом диапазоне частот приведен на рис. 3.

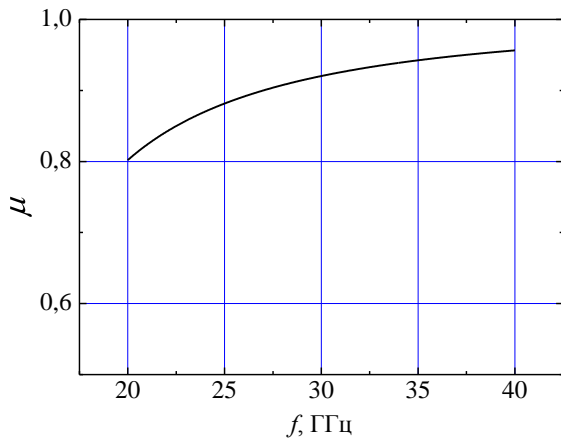


Рис. 3. Теоретическая зависимость магнитной проницаемости от частоты для полностью размагниченного феррита марки L14H

Поля, интенсивности и поляризационные характеристики электромагнитных волн, дифрагированных на решетке из плоско-киральных металлических элементов в форме розеток, были найдены численно с помощью метода, описанного в работе [4]. Теоретической основой этого подхода является использование метода моментов для решения векторного интегрального уравнения относительно плотности поверхностного тока, индуцированного электромагнитным полем

на элементах решетки [2]. Это уравнение получено с помощью граничных условий, которые предполагают равенство нулю тангенциальных компонент электрического поля на металлических полосках розеток. В этом методе используются фурье-преобразования полей и распределенных поверхностных токов.

2. Эксперимент и анализ данных. В ходе эксперимента получены зависимости коэффициента передачи плоско-киральной структуры в диапазоне частот 22...40 ГГц для девяти значений периода структуры d в отсутствие магнитного поля. Эксперимент показал отсутствие преобразования поляризации нормально падающей волны при прохождении через изготовленные образцы плоско-кирального метаматериала, что подтверждает теоретические выводы [3]. Для сравнения реальной ситуации с примененной теоретической моделью нами проведен расчет коэффициента передачи данной структуры в диапазоне частот 20...40 ГГц для четырех величин периода плоско-киральной структуры ($d = 3,5; 4,0; 5,0; 5,5$ мм) – рис. 4.

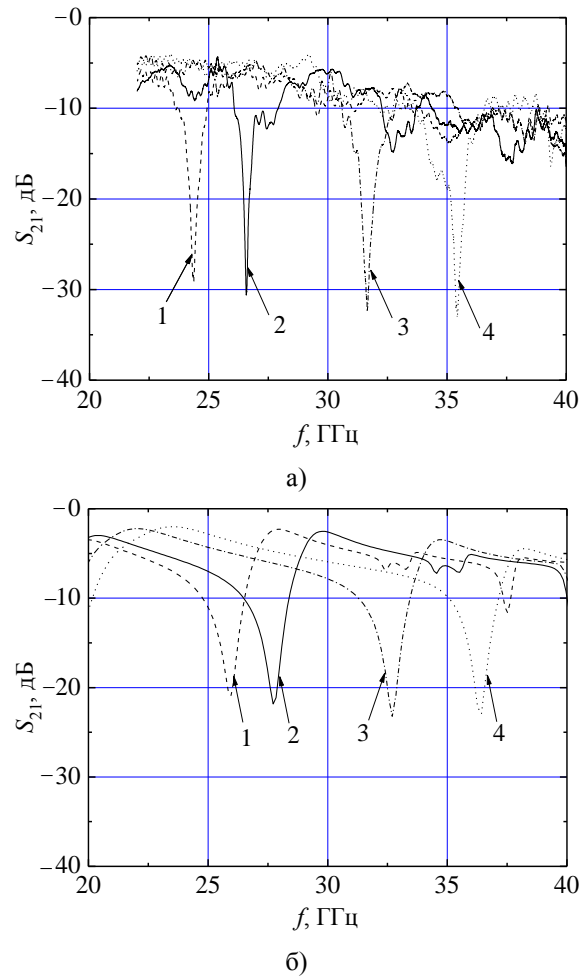


Рис. 4. Спектр коэффициента передачи исследуемой плоской киральной структуры для различных d : (1 – 5,5; 2 – 5,0; 3 – 4,0; 4 – 3,5 мм): а) – экспериментальные данные; б) – теоретический расчет

Коэффициент пропускания демонстрирует явно резонансный характер, с четко выраженными провалами/минимумами в спектре. Видно, что при изменении периода плоско-киральной структуры d от 3,5 до 5,5 мм частота структурного резонанса f_r изменяется от 37,5 до 25,2 ГГц. Эта зависимость имеет монотонный характер (рис. 5), который обусловлен тем, что в условиях резонанса вдоль дуги розетки укладывается целое число волн.

Отметим, что для чистоты эксперимента коэффициент передачи зарегистрирован для двух расстояний $x = 35, 50$ мм от облучающих рупоров до исследуемой структуры. Видно, что расхождение экспериментальных данных по частоте для всех значений периода плоско-киральной структуры весьма незначительно (не более 0,5 ГГц), и не влияет на корректность основных выводов.

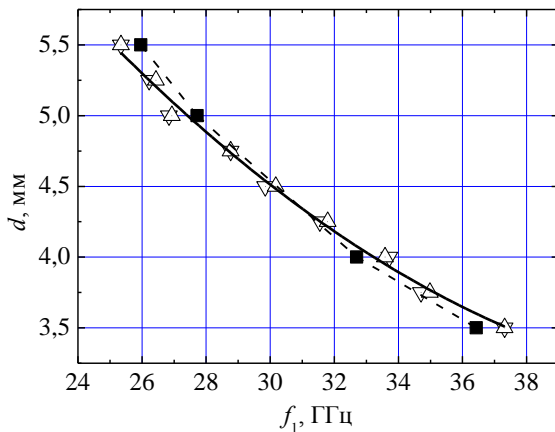


Рис. 5. Экспериментальные и теоретические зависимости частоты резонансного пика коэффициента передачи f_r от величины периода плоско-киральной структуры d : \square – эксперимент при $x = 35$ мм; \triangle – эксперимент при $x = 50$ мм; \blacksquare – теоретический расчет

Анализ данных показывает, что зарегистрированные пики вызваны резонансными токами в элементах плоско-киральной структуры в соответствии с работами [2, 3]. Расхождение по частоте экспериментальных и теоретических данных для четырех значений периода плоско-киральной структуры (рис. 5) незначительно (не более 0,5 ГГц) и, наиболее вероятно, объясняется несовершенством модели ненасыщенного магнетика.

Выводы. Таким образом, в ходе работы отлажена экспериментальная методика изучения плоско-киральных структур в мм диапазоне длин волн. Получены экспериментальные и расчетные зависимости коэффициента передачи планарного метаматериала (массива розеток на немагнитной ферритовой подложке) в диапазоне частот 22...40 ГГц для нескольких значений периода структуры.

Найдено, что коэффициент передачи имеет резонансный характер, вызванный резонансами токов в элементах киральной структуры.

Обнаружен монотонный рост частоты резонанса f_r с уменьшением размера элементарной ячейки киральной структуры. Расхождение положения резонансного пика коэффициента передачи для экспериментальных и теоретических данных не превышает 0,5 ГГц.

Показана возможность управления частотой структурного резонанса с помощью изменения характерных размеров элементов плоско-киральной структуры.

Работа частично поддержана УНТЦ (гранты № 5210, № 5714) и ГФФИ Украины (грант № Ф40.2/037).

Библиографический список

1. *Киральные электродинамические объекты* / Б. З. Каценеленбаум, Е. Н. Коршунова, А. Н. Сивов, А. Д. Шатров // Успехи физ. наук. – 1997. – № 167. – С. 1201–1212.
2. *Васильева Т. Д.* Дифракция электромагнитных волн на плоской решетке из киральных полосковых элементов / Т. Д. Васильева, С. Л. Просвирнин // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 1998. – 1, № 4. – С. 5–9.
3. *Prosvirnin S. L.* Analysis of polarization transformations by a planar chiral array of complex-shaped particles / S. L. Prosvirnin, N. I. Zheludev // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. – 2009. – 11, N 7. – 074002 (10 p).
4. *Prosvirnin S. L.* Electromagnetic wave diffraction by array of complex-shaped metal elements placed on ferromagnetic substrate / S. L. Prosvirnin, V. A. Dmitriev // The Europ. Phys. J. Appl. Phys. – 2010. – 49, N 3. – 33005 (5 p).
5. *Asymmetric Propagation of Electromagnetic Waves through a Planar Chiral Structure* / V. A. Fedotov, P. L. Mlyadonov, S. L. Prosvirnin et al. // Phys. Rev. Lett. – 2006. – 97, N16. – 167401 (4 p).
6. *Nanostructured metal film with asymmetric optical transmission* / A. S. Schwanecke, V. A. Fedotov, V. V. Khardikov et al. // Nano Lett. – 2008. – 8, N 9. – P. 2940–2943.
7. *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.
8. *Schlomann E.* Microwave behavior of partially magnetized ferrites / E. Schlomann // J. Appl. Phys. – 1970. – 41, N 1. – P. 204–214.
9. *Chernovtsev S. V.* Magnetically controllable 1D magnetophotonic crystal in millimetre wavelength band / S. V. Chernovtsev, S. I. Tarapov, D. P. Belozorov // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2007. – 40, N 2. – P. 295–299.

Рукопись поступила 14.08.2012 г.

S. Yu. Polevoy, S. L. Prosvirnin, S. I. Tarapov

RESONANCE PROPERTIES OF PLANAR METAMATERIAL FORMED BY ARRAY OF ROSETTES ON UNMAGNETIZED FERRODIELECTRIC SUBSTRATE

Chiral structures are of a great interest both for fundamental physics, where they can be successfully used to model the propagation of electromagnetic waves and elementary excitations in condensed media (from crystalline to amorphous), as well as from the application point of view. Such structures can be very promising for the design of compact magnetically controlled microwave devices. However, in the millimeter wavelength range,

which is today one of the most important in the application point of view, the amount of experimental research of plane chiral structures is insufficient. In this paper the electromagnetic resonance properties of the planar metamaterial, formed by array of metallic plane chiral rosettes located on unmagnetized ferrite substrate are investigated. The experimental and calculated frequency dependences of the transmission coefficient for several values of the structure period are obtained. The dependence of the resonant peak frequency of the transmission coefficient on the structure period is analyzed. The joint analysis of the experimental and theoretical data is carried out. The research results can be applied in telecommunications, high-frequency technology (the design of filters, polarizers, directional couplers) and antenna design.

Key words: metamaterial, plane-chiral structure, ferrite substrate, resonance peak.

С. Ю. Полевой, С. Л. Просвірін, С. І. Тарапов

РЕЗОНАНСНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛАНАРНОГО
МЕТАМАТЕРІАЛУ, СФОРМОВАНОГО
МАСИВОМ РОЗЕТОК НА НЕНАМАГНІЧЕНІЙ
ФЕРОДИЕЛЕКТРИЧНІЙ ПІДКЛАДЦІ

Киральні структури становлять інтерес як для фундаментальної фізики, де вони можуть успішно використовуватися для моделювання поширення електромагнітних хвиль і елементарних збуджень в конденсованих середовищах (від кристалічних до аморфних), так і з прикладної точки зору. Такі структури можуть бути дуже перспективними при створенні компактних магнітокерованих НВЧ-пристроїв. Однак у міліметровому діапазоні довжин хвиль, який виявляється одним з найважливіших сьогодні з прикладної точки зору, обсяг експериментальних досліджень плоско-киральних структур виявляється недостатнім. У цій роботі досліджено електродинамічні резонансні властивості планарного метаматеріалу у вигляді масиву металевих плоско-киральних розеток на ненамагніченій феритовій підкладці. Отримано експериментальні і розрахункові частотні залежності коефіцієнта передачі для декількох величин періоду структури. Проаналізовано залежність частоти резонансного піку коефіцієнта передачі від величини періоду структури. Проведено спільний аналіз експериментальних та теоретичних даних. Результати досліджень можуть знайти застосування в галузі телекомунікацій, високо-частотній техніці (при розробці фільтрів, поляризаторів, спрямованих відгалужувачів), антенній техніці.

Ключові слова: метаматеріал, плоско-киральна структура, феритова підкладка, резонансний пік.