

УДК 621.396

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТНЫХ СРЕД СО СПИРАЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ

А.Л. Самофалов, И.А. Фаняев, И.В. Семченко, С.А. Хахомов

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель

POLARIZATION TRANSFORMERS OF ELECTROMAGNETIC WAVES BASED ON COMPOSITE MEDIA WITH A HELICAL STRUCTURE

A.L. Samofalov, I.A. Faniayeu, I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov

F. Scorina Gomel State University, Gomel

В СВЧ диапазоне проведено компьютерное моделирование, основанное на методе конечных элементов, частотной зависимости коэффициента эллиптичности отраженной волны для одиночных одновитковых и двухвитковых спиралей и двумерных решеток, состоящих из таких спиралей. Показана возможность преобразования падающей линейно поляризованной электромагнитной волны в циркулярно поляризованную волну, отраженную от двумерной решетки на основе одновитковых и двухвитковых спиралей. Отраженная циркулярно поляризованная волна наблюдается на частотах, близких к резонансной, при этом не зависит от ориентации плоскости поляризации падающей волны относительно оси спиралей.

Ключевые слова: моделирование, преобразование поляризации, одновитковая и двухвитковая спираль, коэффициент эллиптичности.

Computer simulation was carried out in the microwave range based on the finite element method for the frequency dependence of the ellipticity coefficient of reflected wave for single-turn and double-turn helices and two-dimensional arrays consisting of the same helices. The possibility of the transformation of the incident linearly polarized electromagnetic waves in a circularly polarized wave reflected from the two-dimensional array on the basis of a single-turn and double-turn helices was shown. Reflected circularly polarized wave is observed at frequencies close to the resonance and doesn't depend on the orientation of the plane polarization of incident wave relative to the axis of the helices.

Keywords: simulation, transformation of polarization, single-turn and double-turn helices, ellipticity coefficient.

Введение

Для получения циркулярно поляризованной волны в большинстве работ рассматриваются цилиндрические спиральные антенны, соединенные с питающим фидером (активные спирали), в таких устройствах реализован режим осевого излучения с эллиптической поляризацией излучения [1], [2] и др.

В данной работе рассматриваются одновитковые и двухвитковые спирали, а также двумерные решетки, возбуждаемые плоской электромагнитной волной. Спираль является пассивным элементом и обеспечивает формирование циркулярно поляризованной волны в направлении, перпендикулярном оси спирали (боковое излучение), вследствие связанных между собой компонент электрического дипольного и магнитного моментов [3]–[6]. Ранее преобразование поляризации электромагнитных волн структурами различной природы и геометрии исследовано в [7]–[20]. В настоящей работе показана возможность перехода от одиночной спирали к двумерной решетке, при сохранении поляризационных свойств на одной и той же частоте. Получение циркулярно поляризованной волны, отраженной от спиральных структур, не зависит от ориентации плоскости поляризации падающей волны.

1 Исследование частотной зависимости коэффициента эллиптичности отраженной волны для одиночных одновитковых и двухвитковых спиралей

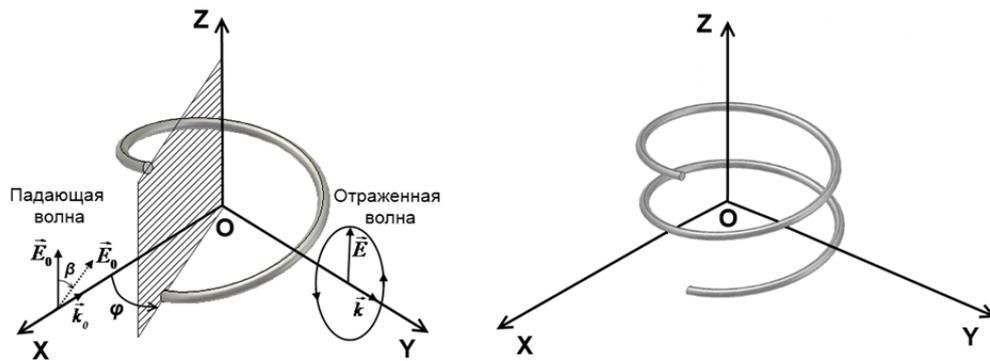
Для подтверждения теоретических расчетов, проведенных в работах [3]–[6], проведены исследования, с помощью компьютерного моделирования, которое основано на методе конечных элементов, одиночных спиралей с параметрами:

$$1) N = 1; \alpha = 13,65^\circ; L = 0,05 \text{ м}; r = 7,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}; h = 11,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}; d = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

$$2) N = 2; \alpha = 7,1^\circ; L = 0,05 \text{ м}; r = 3,95 \cdot 10^{-3} \text{ м}; h = 3,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}; d = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

где N – число витков спирали; α – угол подъема спирали относительно плоскости, перпендикулярной оси спирали; L – длина проволоки, из которой изготовлена спираль; r – радиус витка; h – шаг спирали; d – диаметр проволоки. Исследуемая модель рассматривается в вакууме. Спираль является идеально проводящим проводником. Ось спирали направлена вдоль оси OZ (рисунки 1.1).

На рисунках 1.2–1.3 показаны графики частотной зависимости коэффициента эллиптичности для одиночной одновитковой и двухвитковой



а) одиночная одновитковая спираль с углом подъема $13,65^\circ$;

б) одиночная двухвитковая спираль с углом подъема $7,1^\circ$

Рисунок 1.1 – Расположение спиралей относительно системы координат

спирали при различной ориентации плоскости поляризации падающей линейно поляризованной электромагнитной волны, характеризуемой углом β (рисунок 1.1, а). Отраженная волна исследуется в направлении оси OY (рисунок 1.1).

одиночной одновитковой и двухвитковой спирали не зависит от ориентации плоскости поляризации падающей линейно поляризованной электромагнитной волны. Угол поворота спирали, относительно оси OZ , задается углом φ , отсчитываемым от оси OX (рисунок 1.1, а).

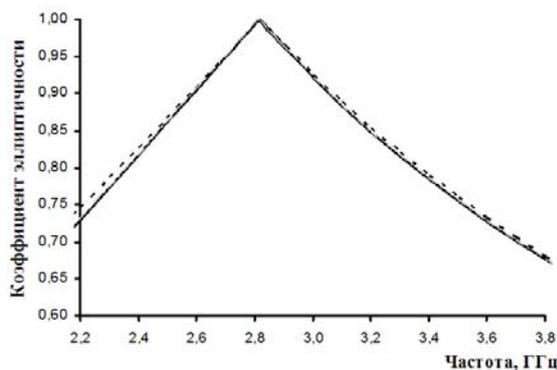


Рисунок 1.2 – График частотной зависимости коэффициента эллиптичности отраженной волны для одновитковой спирали: $\beta=0^\circ$ – сплошная линия, $\beta=45^\circ$ – штрихпунктирная линия, $\beta=90^\circ$ – штриховая линия

На рисунках 1.4–1.5 представлены графики частотной зависимости коэффициента эллиптичности отраженной волны для одиночных спиралей при различных значениях угла φ . Отраженная волна исследуется в направлении оси OY .

Из рисунков 1.4–1.5 следует, что при возбуждении линейно поляризованной электромагнитной волной одиночной спирали с определенными параметрами, обеспечивающими возникновение одинаково значимых электрического дипольного и магнитного моментов, отраженная волна является циркулярно поляризованной. При этом коэффициент эллиптичности отраженной волны существенно изменяется в зависимости от ориентации концов одновитковой спирали относительно направления распространения падающей электромагнитной волны.

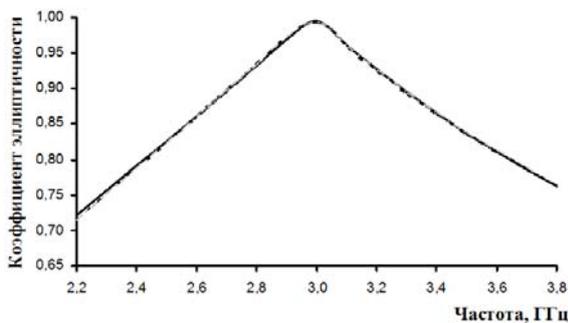


Рисунок 1.3 – График частотной зависимости коэффициента эллиптичности отраженной волны для двухвитковой спирали: $\beta=0^\circ$ – сплошная линия, $\beta=45^\circ$ – штрихпунктирная линия, $\beta=90^\circ$ – штриховая линия

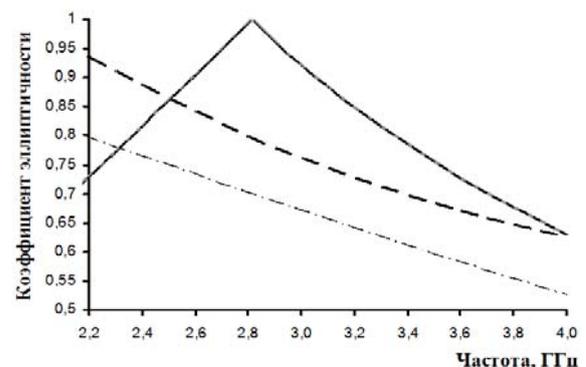


Рисунок 1.4 – График частотной зависимости коэффициента эллиптичности отраженной волны для одиночной спирали при различных значениях угла φ : $\varphi=0^\circ$ – сплошная линия; $\varphi=90^\circ$ – штрихпунктирная линия; $\varphi=135^\circ$ – линия с крупным штрихом; $\varphi=180^\circ$ – линия с мелким штрихом

Как видно из рисунков 1.2–1.3, коэффициент эллиптичности отраженной волны для

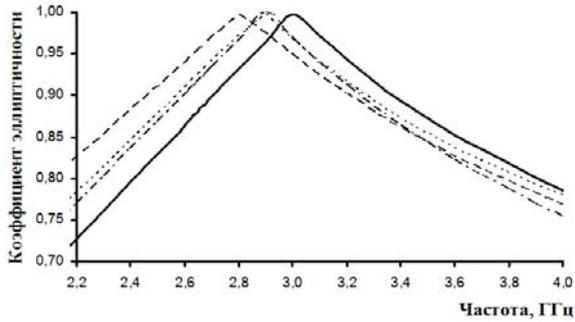


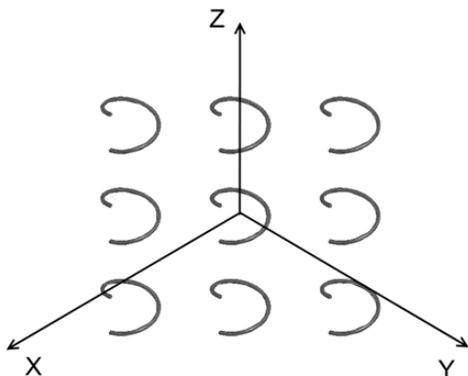
Рисунок 1.5 – График частотной зависимости коэффициента эллиптичности отраженной волны для двухвитковой спирали при различных значениях угла φ : $\varphi=0^\circ$ – сплошная линия; $\varphi=90^\circ$ – штрихпунктирная линия; $\varphi=135^\circ$ – линия с крупным штрихом; $\varphi=180^\circ$ – линия с мелким штрихом

Отраженная волна, распространяющаяся в направлении оси OY , то есть перпендикулярно падающей, является циркулярно поляризованной, если волновой вектор падающей волны направлен в сторону концов спирали или в противоположную сторону ($\varphi=0^\circ$ и $\varphi=180^\circ$). Для двухвитковой спирали отраженная волна является циркулярно поляризованной, вблизи резонансной частоты (2,93 ГГц) и не зависит от изменения угла φ .

2 Исследование частотной зависимости коэффициента эллиптичности для двумерных решеток, состоящих из одновитковых и двухвитковых спиралей

Перейдем от исследований одиночных одновитковых и двухвитковых спиралей к аналогичным исследованиям двумерных решеток, состоящих из таких же спиралей. Исследования проводятся с помощью компьютерного моделирования, которое основано на методе конечных элементов.

Исследуемые решетки рассматриваются в вакууме. Каждая спираль в решетке является идеальным проводником. Ось спиралей в решетке направлена вдоль оси OZ (рисунок 2.1).



а) двумерная решетка, состоящая из одновитковых спиралей с периодом решетки, равным 3,5 см;

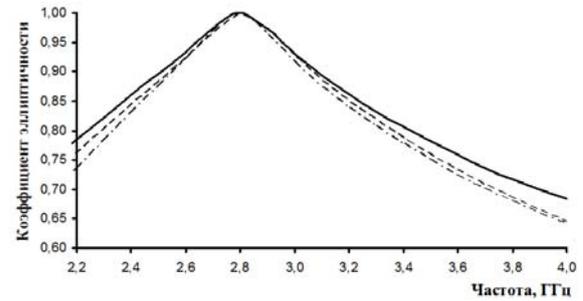


Рисунок 2.2 – График частотной зависимости коэффициента эллиптичности отраженной волны для двумерной решетки, состоящей из одновитковых спиралей: $\beta=0^\circ$ – сплошная линия, $\beta=45^\circ$ – штрихпунктирная линия, $\beta=90^\circ$ – штриховая линия

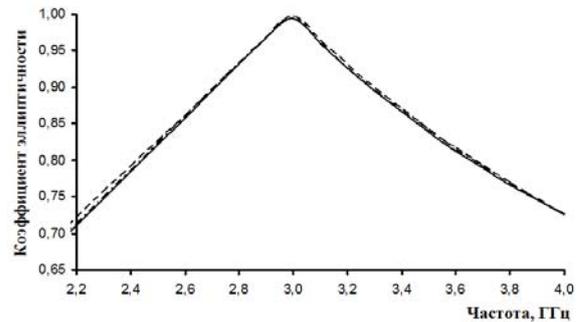
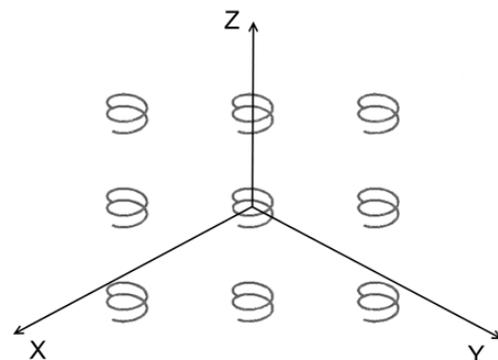


Рисунок 2.3 – График частотной зависимости коэффициента эллиптичности отраженной волны для двумерной решетки, состоящей из двухвитковых спиралей: $\beta=0^\circ$ – сплошная линия, $\beta=45^\circ$ – штрихпунктирная линия, $\beta=90^\circ$ – штриховая линия



б) двумерная решетка, состоящая из двухвитковых спиралей с периодом решетки, равным 2,5 см

Рисунок 2.1 – Расположение спиралей в двумерных решетках

На рисунках 2.4–2.5 показаны графики частотной зависимости коэффициента эллиптичности для двумерных решеток, состоящих из одновитковых и двухвитковых спиралей при различных значениях угла φ . Отраженная волна исследуется в направлении оси OY .

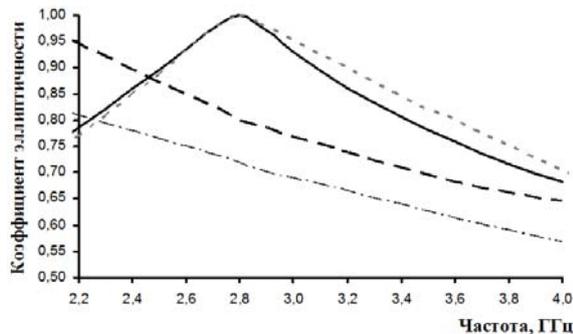


Рисунок 2.4 – График частотной зависимости коэффициента эллиптичности для двумерной решетки, состоящей из одновитковых спиралей при различных значениях угла φ :
 $\varphi=0^\circ$ – сплошная линия;
 $\varphi=90^\circ$ – штрихпунктирная линия;
 $\varphi=135^\circ$ – линия с крупным штрихом;
 $\varphi=180^\circ$ – линия с мелким штрихом

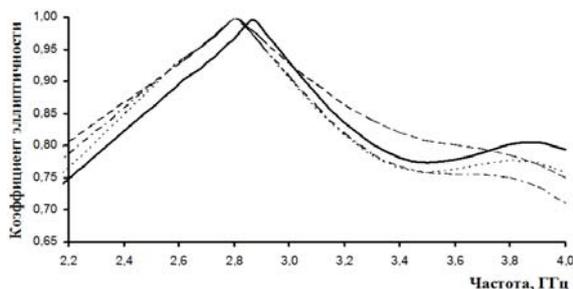


Рисунок 2.5 – График частотной зависимости коэффициента эллиптичности для двумерной решетки, состоящей из двухвитковых спиралей при различных значениях угла φ :
 $\varphi=0^\circ$ – сплошная линия;
 $\varphi=90^\circ$ – штрихпунктирная линия;
 $\varphi=135^\circ$ – линия с крупным штрихом;
 $\varphi=180^\circ$ – линия с мелким штрихом

С помощью компьютерного моделирования был подтвержден ряд теоретических предположений, сформулированных в работах [3]–[6]:

1) возникновение одинаково значимых электрического дипольного и магнитного моментов в одновитковой и двухвитковой спирали с определенными параметрами дает возможность преобразования поляризации из падающей линейно поляризованной волны в отраженную циркулярно поляризованную;

2) для получения циркулярно поляризованной волны в направлении, перпендикулярном падающей, с помощью спирали, состоящей из

одного витка, необходимо, чтобы волновой вектор падающей волны был направлен в сторону концов (усов) спирали;

3) для двухвитковой спирали излучение циркулярно поляризованной волны имеет место при любой ориентации концов спирали относительно волнового вектора падающей волны.

Анализ полученных результатов путем моделирования, проведенного для одиночной спирали и двумерной решетки, состоящей из таких же спиралей, позволяет сделать вывод о том, что при переходе от одиночной спирали к двумерной решетке поляризационные свойства сохраняются на одной и той же частоте (2,82 ГГц).

Результаты экспериментальных исследований поляризационных свойств, проведенных с образцами двумерных решеток, состоящих из одновитковых металлических (медных) спиралей с углом подъема $13,65^\circ$ и двухвитковых с углом подъема $7,1^\circ$, приведены в работах [4], [5], [21]. Полученные экспериментальные данные и результаты моделирования согласуются в пределах погрешностей измерений.

Заключение

На основании проведенного моделирования показана возможность преобразования поляризации падающей линейно поляризованной электромагнитной волны в циркулярно поляризованную, отраженную от одиночной спирали и двумерной решетки, состоящей из таких же спиралей, в области частот, близких к резонансной. Показано, что преобразователями поляризации могут быть как одновитковые спирали с углом подъема $13,65^\circ$, так и двухвитковые спирали с углом подъема $7,1^\circ$.

Также показано, что для получения циркулярно поляризованной волны с помощью одновитковой спирали или решетки, состоящей из таких же спиралей, необходимо, чтобы волновой вектор падающей волны был направлен в сторону концов спирали. При этом отраженная волна рассматривается в направлении, перпендикулярном падающей волне. Для двухвитковой спирали и двумерной решетки излучение циркулярно поляризованной волны имеет место при любой ориентации концов спирали относительно волнового вектора падающей волны.

На основе полученных результатов можно сделать вывод о возможности получения преобразователей поляризации электромагнитных волн на основе композитных сред со спиральной структурой с целью трансформации падающей линейно поляризованной волны в циркулярно поляризованную отраженную волну.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дрaбкин, А.Л. Антенно-фидерные устройства / А.Л. Дрaбкин, В.Л. Зузенко – М.: Сов. радио, 1961. – 816 с.

2. Юрцев, О.А. Спиральные антенны / О.А. Юрцев, А.В. Рунов, А.Н. Казарин – М.: Сов. радио, 1974. – 224 с.
3. Исследование поляризации электромагнитного излучения, рассеянного на металлической спирали / И.В. Семченко [и др.] // Лазерная и оптико-электронная техника. – 2002. – Вып. 7. – С. 84–91.
4. Хахомов, С.А. Получение циркулярно-поляризованной отраженной волны с помощью искусственной плоской решетки из одновитковых спиралей / С.А. Хахомов, А.Л. Самофалов, С.А. Третьяков // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2006. – № 6 (39), Ч. 2. – С. 87–90.
5. Семченко, И.В. Преобразование поляризации электромагнитных волн спиральными излучателями / И.В. Семченко, С.А. Хахомов, А.Л. Самофалов // Радиотехника и электроника. – 2007. – Т. 52, № 8. – С. 917–922.
6. Семченко, И.В. Оптимальная форма спирали: равенство диэлектрических, магнитных и киральных свойств / И.В. Семченко, С.А. Хахомов, А.Л. Самофалов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2009. – Т. 2, № 5. – С. 30–36.
7. *Microwave analogy of optical properties of cholesteric liquid crystals with local chirality under normal incidence of waves* / I.V. Semchenko [et al.] // Journal of Physics D: Applied Physics. – 1999. – Т. 32, № 24. – P. 3222–3226.
8. *Electromagnetic waves in artificial chiral structures with dielectric and magnetic properties* / I.V. Semchenko [et al.] // Electro-magnetics. – 2001. – Т. 21, № 5. – P. 401–414.
9. Semchenko, I.V. Artificial anisotropic chiral structures with dielectric and magnetic properties at oblique incidence of electromagnetic waves / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov // 2001 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference. Belem, Brazil. – 2001. – P. 227–230.
10. Semchenko, I.V. Artificial uniaxial bianisotropic media at oblique incidence of electromagnetic waves / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov // Electromagnetics. – 2002. – Т. 22, № 1. – P. 71–84.
11. Устройство для преобразования поляризации электромагнитной волны: пат. 2316857 Рос. Федерация: МПК7 Н 01 Q 15/24, Н 01 Q 21/06 / И.В. Семченко, С. А. Хахомов, А.Л. Самофалов; заявитель и патенто-обладатель УО «Гомельский гос. ун-т. им. Ф. Скорины». – № 2006112520/09; заявл. 14.04.2006; опубл. 10.02.2008 // Патенты России. Официальный бюллетень «Изобретения. Полезные модели» (с полным описанием изобретений к патентам) [Электронный ресурс]: полнотекстовая база данных (602 Мб). – М: ФИПС, 2008. – № 4. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
12. Излучение циркулярно поляризованных волн сверхвысокочастотного диапазона плоской периодической структурой из Ω -элементов / И.В. Семченко [и др.] // Радиотехника и электроника. – 2007. – Т. 52, № 9. – С. 1084–1088.
13. Семченко, И.В. Использование парных спиралей оптимальной формы для создания слабоотражающих покрытий в СВЧ диапазоне / И.В. Семченко, С.А. Хахомов, А.Л. Самофалов // Проблемы физики, математики и техники. – 2009. – № 1 (1). – С. 33–39.
14. Семченко, И.В. Поляризация селективность искусственных анизотропных структур на основе ДНК-подобных спиралей / И.В. Семченко, С.А. Хахомов, А.П. Балмаков // Кристаллография. – 2010. – Т. 55, № 6. – С. 979–984.
15. Semchenko, I.V. Polarization selectivity of interaction of DNA molecules with X-ray radiation / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, A.P. Balmakov // Biophysics. – 2010. – Т. 55, № 2. – P. 194–198.
16. Semchenko, I.V. Helices of optimal shape for nonreflecting covering / I.V. Semchenko, S.A. Khakhomov, A.L. Samofalov // The European Physical Journal. Applied Physics. – 2010. – Т. 49, № 3. – ar09156.
17. Самофалов, А.Л. Моделирование и исследование искусственных анизотропных структур с большой киральностью в СВЧ диапазоне / А.Л. Самофалов, И.В. Семченко, С.А. Хахомов // Проблемы физики, математики и техники. – 2011. – № 3 (8). – С. 28–31.
18. Исследование свойств искусственных анизотропных структур с большой киральностью / И.В. Семченко [и др.] // Кристаллография. – 2011. – Т. 56, № 3. – С. 398–405.
19. Преимущества искусственных слабоотражающих структур на основе оптимальных спиралей при преломлении и поглощении электромагнитных волн / И.В. Семченко [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. – 2011. – № 4 (9). – С. 64–67.
20. Поляризатор циркулярно-поляризованного СВЧ излучения на основе двухспиральных частиц / А.П. Балмаков [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. – 2013. – № 1 (14). – С. 7–12.
21. Самофалов, А.Л. Использование спиральных излучателей для преобразования поляризации электромагнитных волн / А.Л. Самофалов // Известия Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2009. – № 4 (55), Ч. 2. – С. 176–183.

Поступила в редакцию 11.07.13.