

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 621.396.67

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ПРИ ПОМОЩИ СПИРАЛЬНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

© 2007 г. И. В. Семченко, С. А. Хахомов, А. Л. Самофалов

Поступила в редакцию 04.07.2005 г.

Теоретически и экспериментально исследовано преобразование поляризации электромагнитной волны двумерной решеткой из двухвитковых металлических спиралей. Определены электрический и магнитный моменты, создаваемые падающей линейно поляризованной волной в уединенной спирали. Установлено универсальное соотношение между проекциями индуцированных моментов на ось спирали. Рассчитаны оптимальные параметры спирали для излучения циркулярно поляризованной волны. Изготовлена двумерная решетка, состоящая из двухвитковых спиральных элементов с оптимальными параметрами. Полученные теоретические результаты проверены экспериментально.

ВВЕДЕНИЕ

Искусственные композитные среды, обладающие киральными свойствами в микроволновом диапазоне, активно исследовали в течение последних пятнадцати лет [1–11]. Предполагали, что на основе искусственных киральных материалов могут быть созданы безотражательные покрытия металлических поверхностей. Исследования возможного использования искусственных киральных материалов для уменьшения отражения электромагнитных волн описаны в работах [4–7]. Однако в [9] сделан вывод, что киральность не является важным свойством при создании безотражательных покрытий. Достичь существенно снижения интенсивности отраженных электромагнитных волн на определенной частоте можно также при помощи некиральных поглощающих слоев. Авторы работы [9] пришли к такому выводу в результате расчета рассеяния электромагнитных волн на металлических спиралах в диэлектрической среде. Такую среду можно создать искусственно, поместив металлические проводочные включения спиральной формы в диэлектрический материал [11].

Цель данной работы – исследование взаимодействия электромагнитного излучения микроволнового диапазона с двумерной решеткой, состоящей из металлических спиралей с предварительно рассчитанными оптимальными параметрами и демонстрация того, что такие структуры можно использовать для преобразования поляризации электромагнитных волн микроволнового диапазона, например, для получения циркулярно поляризованной волны.

В большей части работ, посвященных данному вопросу, рассмотрены цилиндрические спиральные антенны, соединенные с питающим фидером (активные спирали), и в таких устройствах реализован режим осевого излучения с эллиптической

поляризацией излучения [12]. В рассмотренной и рассчитанной в данной работе двумерной решетке, состоящей из двухвитковых спиралей, спиральный элемент является пассивным в отличие от известных и обеспечивает формирование циркулярно поляризованной волны в направлении, перпендикулярном осевому, вследствие излучения связанных между собой компонент электрического дипольного и магнитного моментов.

Наиболее близким к рассматриваемому является устройство для преобразования поляризации, содержащее диэлектрический слой с решетчатой структурой, выполненной из одинаковых проводящих элементов [13]. При этом диэлектрический слой представляет собой плату, на одной стороне которой выполнена решетчатая структура из одинаковых проводящих элементов в виде меандровых линий, расположенных под углом 45° к плоскости линейной поляризации электромагнитной волны и параллельно друг другу. Кроме того, решетчатая структура имеет параметры, обеспечивающие изменение фазы двух составляющих вектора напряженности электрического поля электромагнитной волны, проходящей через антенный поляризатор. Устройство обеспечивает получение волны с круговой поляризацией лишь при прохождении электромагнитной волны через поляризатор, в результате чего нельзя применить его в отражающих системах.

В способе, рассмотренном в данной работе, преобразование поляризации электромагнитной волны из линейной в круговую происходит вне зависимости от ориентации плоскости линейной поляризации падающей электромагнитной волны при заданном направлении распространения падающей волны.

Формирование циркулярно поляризованной волны происходит благодаря излучению связанных между собой электрического дипольного момен-

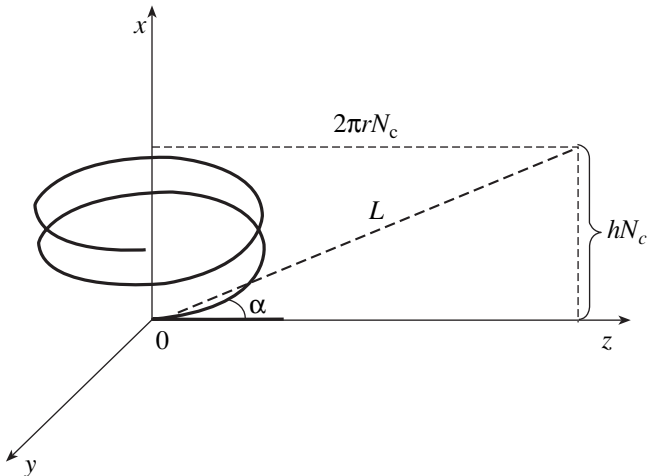


Рис. 1. Спираль и ее схематическое изображение в развернутом виде.

та и магнитного момента каждой спирали, которые дают равные по абсолютной величине вклады в отраженную волну.

1. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА И МАГНИТНОГО МОМЕНТА, ВОЗНИКАЮЩИХ В СПИРАЛИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПАДАЮЩЕЙ ВОЛНЫ

Характеристики электромагнитного излучения, рассеянного на спиральном элементе, зависят от соотношения геометрических размеров спирали и длины волны. Рассмотрим случай, когда линейные геометрические размеры спирали много меньше длины падающей волны, что позволяет применить дипольное приближение теории излучения [14].

Для этого случая найдем электрический дипольный и магнитный дипольный моменты спирали. Одновременное возникновение в каждом спиральном элементе электрического дипольного и магнитного моментов, связанных между собой и индуцированных внешним полем, есть главное условие проявления гиротропных свойств структуры.

Необходимо вычислить все компоненты электрического дипольного и магнитного моментов спирали, от соотношения которых зависит поляризация излучаемой волны.

Пусть l – координата, отсчитываемая вдоль спирали, L – длина спирали, $\vec{S}(l)$ – смещение электронов проводимости вдоль спирали. Тогда вектор дипольного момента \vec{p} можно представить в виде

$$\vec{p} = \int_{(V)} Q N_e \vec{S}(l) dV = -e N_e S_w \int_{-L/2}^{L/2} \vec{S}(l) dl, \quad (1)$$

где $Q = -e$ – заряд электрона; $dV = S_w dl$ – объем элемента спирали, S_w – площадь сечения проволоки, N_e – объемная концентрация электронов проводимости. Аналогично можно вычислить магнитный момент спирали и, учитывая геометрические параметры спирали, определить проекции моментов на оси координат.

Рассмотрим спираль, образованную витками радиусом r и имеющую длину L . Высота спирали $H = hN_c$, угол подъема спирали относительно плоскости, перпендикулярной оси спирали, равен α , ось спирали совпадает с осью Ox , N_c – число витков спирали (см. рис. 1).

Введем удельное кручение спирали q , связанное с шагом спирали h соотношением

$$h = \frac{2\pi}{|q|}. \quad (2)$$

Знак величины q определяет направление кручения спирали в пространстве. При $q > 0$ спираль образует правый винт (см. рис. 1).

Будем рассматривать главный резонанс, когда длина спирали приблизительно равна половине длины волны падающего излучения. В этом случае сила тока монотонно убывает при удалении от центра спирали, обращаясь в нуль на ее краях. В работе [16] рассмотрена модель линейного убывания тока от центра к концам спирали [15].

Однако более точной является модель гармонического убывания тока от центра к концам спирали. Это соответствует установившемуся колебанию стоячей волны, причем на концах спирали ток равен нулю, а наибольшее значение интенсивности соответствует колебаниям, половина длины волны которых укладывается на длине спирали. Гармоническая зависимость тока от координаты рассмотрена ниже. Этот пример важен потому, что произвольное распределение тока в спирали может быть сведено при помощи фурье-анализа к гармонической зависимости тока от координаты.

Показано, что z -компоненты электрического дипольного и магнитного моментов спирали обращаются в нуль независимо от числа витков спирали. Это свойство обусловлено симметричностью распределения тока относительно центра спирали.

По мере возрастания числа витков абсолютные значения z -компонент электрического дипольного и магнитного моментов спирали уменьшаются по сравнению со значениями x -компонент. Таким образом, главную роль играют составляющие моментов вдоль оси спирали.

Для установления общих закономерностей рассмотрим монохроматическую зависимость смещения электронов проводимости от времени:

$$S(x, t) = S(x) \exp(-i\omega t), \quad (3)$$

где ω – циклическая частота тока в спирали. В этом случае выполняется следующее соотношение между смещением электронов проводимости S и силой тока \mathcal{F} :

$$S = -\frac{i}{eN_e\omega S_w} \mathcal{F}. \quad (4)$$

При помощи соотношений (1) и (4) можно получить следующее выражение для x -компоненты электрического дипольного момента спирали:

$$p_x = \frac{i}{\omega} \int_{x_1}^{x_2} \mathcal{F}(x) dx. \quad (5)$$

Это выражение является достаточно известным [17–19].

Используя соотношения (1) и (5) и учитывая геометрические параметры спирали, вычислим также x -компоненту магнитного момента:

$$m_x = \frac{1}{2} r^2 q \int_{x_1}^{x_2} \mathcal{F}(x) dx. \quad (6)$$

Из выражений (5) и (6) следует соотношение между проекциями моментов на ось спирали

$$p_x = \frac{2i}{\omega r^2 q} m_x, \quad (7)$$

которое является универсальным, поскольку не зависит от распределения тока в спирали. Именно x -компоненты моментов спирали играют главную роль при излучении циркулярно поляризованной волны в направлении, перпендикулярном оси спирали.

Соотношение (7) проверено нами на примере трех частных случаев распределения тока в спирали: постоянного тока, линейного убывания тока от центра к концам спирали, гармонической зависимости тока от координаты.

Универсальность соотношения (7) следует понимать и в более широком смысле. В искусственной гиротропной структуре ток в каждой спирали может изменяться не только в результате прямого воздействия падающей электромагнитной волны, но и под влиянием других спиралей, образующих структуру. Однако при любых изменениях тока компоненты электрического дипольного момента p_x и магнитного момента m_x изменяются согласованно, и соотношение (7) остается справедливым. Поэтому геометрические параметры спирали, приведенные ниже, обеспечивают получение циркулярно поляризованной волны даже при значительном возрастании концентрации спиральных элементов в искусственной структуре.

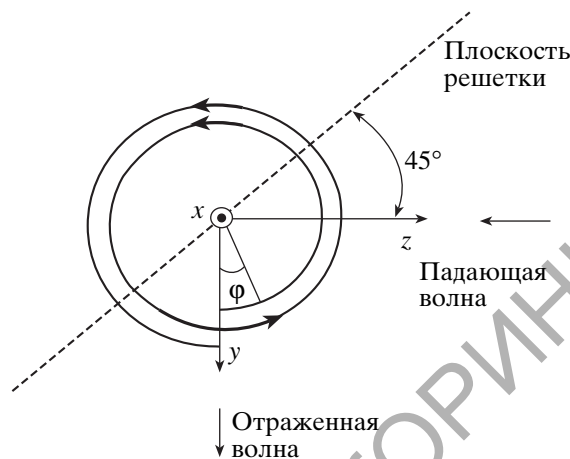


Рис. 2. Схема распределения тока в двухвитковой спирали. Направление тока указано стрелками, сила тока пропорциональна длине стрелки, ϕ – полярный угол.

2. ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СПИРАЛИ, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ЦИРКУЛЯРНО ПОЛЯРИЗОВАННОЙ ВОЛНЫ ПРИ УСЛОВИИ РЕЗОНАНСА. УЧЕТ ЧИСЛА ВИТКОВ СПИРАЛИ

В дипольном приближении напряженность электрического поля излучаемой волны имеет вид [14, 20]

$$\vec{E}(\vec{R}, t) = \frac{\mu_0}{4\pi R} \left([[\dot{\vec{p}}, \dot{\vec{n}}] \dot{\vec{n}}] + \frac{1}{c} [\ddot{\vec{n}}, \ddot{\vec{m}}] \right), \quad (8)$$

где \vec{R} – радиус-вектор, проведенный от спирали в точку наблюдения, μ_0 – магнитная постоянная, R – расстояние от спирали до точки наблюдения, \vec{n} – единичный вектор волновой нормали, c – скорость света в вакууме, точки над векторами означают дифференцирование по времени.

Будем рассматривать волну, излучаемую спиралью в направлении оси y . При этом падающая волна, возбуждающая спираль, распространяется вдоль оси z .

В эксперименте, описание которого приведено ниже, спирали расположены на пластине из радиопрозрачного материала (пенопласта). Поэтому при угле падения, равном 45° , отраженная от решетки волна сформирована только волнами, излученными каждой спиралью в направлении оси y . Все излученные волны имеют одинаковую фазу и поляризацию, что приводит к их взаимному усилению. Следовательно, отраженная от решетки волна имеет такую же поляризацию, как и волна, излученная каждой спиралью в направлении оси y .

Такая геометрия эксперимента облегчает исследование излучаемой волны, интенсивность ко-

Оптимальные значения угла α подъема спирали при различном числе витков N_c для излучения спирально циркулярно поляризованной волны

N_c	1	2	3	4	5	6	7	8
α , град	13.65	7.1	4.75	3.6	2.9	2.4	2.0	1.8

торой в случае отдельной спирали значительно уступала бы интенсивности падающей волны (см. рис. 2).

Пусть ориентация приемной антенны задается единичным вектором \vec{z}_0 , лежащим в плоскости XOZ и образующим угол θ с осью x , т.е. с вектором напряженности электрического поля падающей волны. Тогда

$$\vec{z}_0 = \cos\theta\vec{x}_0 + \sin\theta\vec{z}_0, \quad (9)$$

$$\vec{n} = \vec{y}_0, \quad (10)$$

где \vec{x}_0 , \vec{y}_0 , \vec{z}_0 – единичные векторы, направленные вдоль осей x , y , z (орты декартовой системы координат).

В этом случае интенсивность сигнала, регистрируемого приемной антенной, пропорциональна величине, равной

$$I = \langle (\vec{E}\vec{z}_0)^2 \rangle_t, \quad (11)$$

где угловые скобки означают усреднение по времени. Для удобства дальнейших вычислений представим ненулевые компоненты электрического и магнитного моментов спирали в виде

$$p_x = p_{x_0}S_0, \quad p_z = p_{z_0}S_0, \quad (12)$$

$$m_x = im_{x_0}S_0, \quad m_z = im_{z_0}S_0. \quad (13)$$

Используя (8)–(10), (12), (13), вычислим интенсивность сигнала (11), регистрируемого приемной антенной:

$$I = \frac{\mu_0^2 \omega^4}{32\pi^2 R^2} |S_0|^2 \left(\left(p_{x_0}^2 + \frac{1}{c^2} m_{z_0}^2 \right) \cos^2 \theta + \left(p_{z_0}^2 + \frac{1}{c^2} m_{x_0}^2 \right) \sin^2 \theta + \left(p_{x_0} p_{z_0} - \frac{1}{c^2} m_{x_0} m_{z_0} \right) \sin 2\theta \right). \quad (14)$$

Исследуем возможность излучения спирально циркулярно поляризованной волны. Это возможно при условии

$$|p_z| \ll |p_x|, \quad \frac{1}{c} |m_z| \ll |p_x|.$$

Тогда из выражения (14) следует условие излучения циркулярной волны:

$$|p_x| = \frac{1}{c} |m_x|. \quad (15)$$

При выполнении условия (15) гиротропные свойства спирали проявляются наиболее сильно, поскольку электрическое поле падающей волны возбуждает в спирали не только электрический дипольный момент, но и не менее значимый магнитный момент.

Для определения параметров спирали, при которых возможно излучение циркулярно поляризованной волны, используем универсальное соотношение (7), полученное выше для компонент электрического дипольного момента и магнитного момента спирали при произвольном распределении тока, а также условие главного частотного резонанса

$$\frac{\lambda}{2} = L, \quad (16)$$

λ – длина волны падающего электромагнитного излучения.

Учитывая соотношение для геометрических параметров спирали

$$L \cos \alpha = 2\pi r N_c, \quad (17)$$

получаем тригонометрическое уравнение для угла подъема спирали α :

$$4N_c \operatorname{tg} \alpha = \cos \alpha \quad (18)$$

или

$$\sin^2 \alpha + 4N_c \sin \alpha - 1 = 0. \quad (19)$$

Корни уравнения (19) с учетом положительного значения угла α можно записать в виде

$$\alpha = \arcsin(-2N_c + \sqrt{4N_c^2 + 1}). \quad (20)$$

В таблице приведены значения угла подъема спирали для различного числа витков, при которых возможно излучение спирально циркулярно поляризованной волны.

Как следует из таблицы, излучение циркулярно поляризованной волны возможно как при нечетном, так и при четном числе витков спирали. Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что интенсивность волны, излучаемой спирально, быстро убывает при увеличении числа витков, т.е. по мере уменьшения угла подъема спирали. Следовательно, оптимальным числом витков является $N_c = 1$ или $N_c = 2$.

Для спирали, состоящей из одного витка, следует исключить влияние компонент электрического и магнитного моментов: p_z и m_z , ортогональных оси спирали. Поэтому для получения циркулярно поляризованной волны концы одновитковой спирали должны быть направлены навстречу падающей волне.

В спирали с двумя витками распределение тока является более симметричным и излучение циркулярно поляризованной волны имеет место при

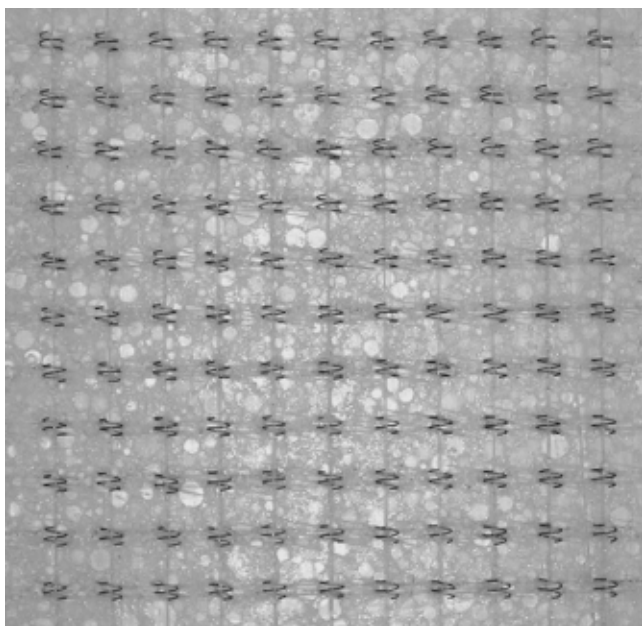


Рис. 3. Двумерная гиротропная решетка, состоящая из двухвитковых спиральных излучателей, закрепленных на пластине из пенопласта.

любой ориентации концов спирали относительно волнового вектора падающей волны.

На основании полученных результатов найдем значения параметров спирали, при которых возможно излучение спиралью циркулярно поляризованной волны, если спираль возбуждается линейно поляризованной волной с частотой $\nu = 3$ ГГц. Длина проволоки, из которой изготовлена спираль, должна соответствовать условию главного частотного резонанса, т.е. $L = 5$ см. Выберем значение угла подъема спирали из таблицы: $\alpha = 7.1^\circ$, которое реализуется при $N_c = 2$. Радиус спирали можно рассчитать при помощи формулы (17): $r = 3.95 \times 10^{-3}$ м. Шаг спирали найдем из соотношения $h = \frac{L \sin \alpha}{N_c}$ или $h = 3.1 \times 10^{-3}$ м.

Для проверки выполненных теоретических расчетов и создания преобразователя поляризации с целью излучения циркулярно поляризованной волны был изготовлен экспериментальный образец, содержащий двухвитковые спиральные элементы с указанными выше параметрами (рис. 3).

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ОТРАЖЕННОГО ДВУМЕРНОЙ ГИРОТРОПНОЙ СТРУКТУРОЙ

Для измерения поляризационной характеристики в работе применен метод, основанный на использо-

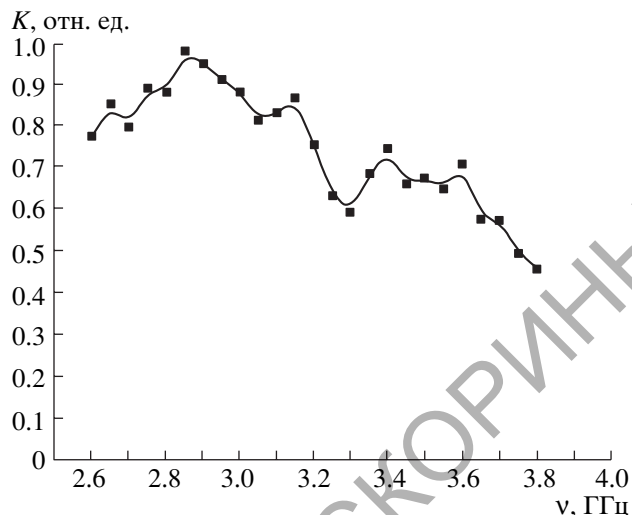


Рис. 4. Зависимость коэффициента эллиптичности K отраженной волны от частоты ν падающей линейной волны.

вании приемной антенны с линейной поляризацией поля (рупорная антенна). Проведены исследования коэффициента эллиптичности электромагнитной волны, отраженной от образца двумерной гиротропной решетки, в зависимости от частоты падающего излучения. Измерения выполнены в частотном интервале 2.6...3.9 ГГц.

Коэффициент эллиптичности K отраженной волны вычисляли непосредственно из поляризационной диаграммы как отношение минимального значения к максимальному значению уровня сигнала, которые определяли по показаниям индикатора приемника.

Результаты исследования приведены в виде графика на рис. 4. Как видно из графика, максимальное значение коэффициента эллиптичности находится в диапазоне частот 2.8...2.9 ГГц. Теоретический расчет предполагает циркулярную поляризацию отраженной волны для данного образца на частоте падающего излучения, равной 3 ГГц. Такой сдвиг наблюдаемой резонансной частоты по сравнению с расчетной может быть объяснен замедлением электромагнитных волн в спиральных элементах двумерной решетки. Это уменьшение скорости волн может происходить в результате индуцирования значительных электрических дипольных и магнитных моментов в спиралях.

Падающую линейно поляризованную волну можно рассматривать как суперпозицию двух циркулярно поляризованных волн: правой и левой. Правая спираль с найденными оптимальными параметрами на резонансной частоте излучает только левую циркулярную волну и не взаимодействует с волной противоположной поляризации. Следовательно, правую спираль с такими па-

раметрами при соответствующей ориентации спирали можно рассматривать как “ортогональный осциллятор” по отношению к правой круговой волне на резонансной частоте.

Таким образом, разработаны теоретические основы преобразователей поляризации электромагнитных волн на основе композитных сред со спиральной структурой, в том числе с целью трансформации линейно поляризованной волны в циркулярную.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Advances in Complex Electromagnetic Materials. NATO ASI Series 3. / Eds. Priou A. et al. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1997.
2. Cloete J.H. // Proc. Int. Conf. Bianisotropics'97. Glasgow: University of Glasgow. 1997. P. 39.
3. Lafosse X. // Proc. Int. Conf. Chiral-94. Perigueux: French Atomic Energy Commission. 1994. P. 209.
4. Whites K.W., Chung C.Y. // J. Electromagn. Waves Appl. 1997. V. 11. № 3. P. 371.
5. Tretyakov S.A., Sochava A.A., Simovski C.R. // Electromagnetics. 1996. V. 16. № 2. P. 113.
6. Cloete J.H., Bingle M., Davidson D.B. // Proc. Int. Conf. Electromagnetics in Advanced Applications. Torino: Politecnico di Torino, 1999. P. 55.
7. Tretyakov S.A., Sochava A.A. // Electron. Lett. 1993. V. 29. № 12. P. 1048.
8. Semchenko I.V., Khakhomov S.A., Tretyakov S.A. et al. // J. of Phys. D: Appl. Phys. 1998. V. 31. № 19. P. 2458.
9. Bohren C.F., Luebbers R., Langdon H.S., Hunsberger F. // Appl. Optics. 1992. V. 31. № 30. P. 6403.
10. Semchenko I.V., Khakhomov S.A., Fedosenko E.A. // Proc. SPIE. 2001. V. 4358. P. 309.
11. Kuehl S.A., Grove S.S., Kuehl E. et al. // Advances in Complex Electromagnetic Materials. NATO ASI Series 3. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1997. P. 317.
12. Юрцев О.А., Рунов А.В., Казарин А.Н. Спиральные антенны. М.: Сов. радио, 1974.
13. Бук Н.И. Антенный поляризатор: А. с. № SU 1821853 А1, Б.И. 1993. № 22.
14. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М.: Наука, 1973.
15. Serdyukov A.N., Semchenko I.V., Tretyakov S.A., Sihvola A.H. Electromagnetics of Bi-anisotropic Materials. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publishers, 2001.
16. Семченко И.В., Хахомов С.А., Кондратенко В.И., Самофалов А.Л. // Лазерная и оптико-электронная техника. Минск: Изд-во Белорус. ун-та, 2002. Вып. 7. С. 84.
17. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. М.: Наука, 1980.
18. Борн М. Оптика. Харьков-Киев: ОНТИ, 1937.
19. Волькенштейн М.В. Молекулярная оптика. М.: Гостехтеориздат, 1951.
20. Яворский Б.М., Детлаф А. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. М.: Наука, 1977.