

УДК 538.2

ИСКУССТВЕННЫЕ ОДНОПРЕЛОМЛЯЮЩИЕ, ДВУХСПИРАЛЬНЫЕ И МАГНИТНЫЕ ГИРОТРОПНЫЕ СРЕДЫ

О. С. ЕРИЦЯН

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 4 мая 1996г.)

Обсуждена возможность создания искусственных сред, обладающих однопреломлением, спиральной структурой в отношении диэлектрических и магнитных свойств одновременно и магнитным механизмом пространственной дисперсии в первом порядке по компонентам волнового вектора. Рассмотрено распространение электромагнитной волны в двухспиральной среде в присутствии гиروهлектрической и гиромагнитной магнитооптических активностей.

1. Введение

Известен ряд электромагнитных свойств вещества, которые могут обнаруживаться им, но практическое осуществление которых затруднено из-за отсутствия соответствующих сред в естественном состоянии. В настоящее время уделяется немало внимания искусственным средам [1,2]. Ниже мы рассмотрим задачу осуществления искусственным путем ряда известных в настоящее время электромагнитных свойств, представляющих, на наш взгляд, физический и практический интерес.

Перечислим те среды и некоторые их характерные свойства, о которых идет речь.

А. Однопреломляющие среды. В монографии [3] рассмотрены анизотропные среды, у которых тензоры диэлектрической и магнитной проницаемостей ($\hat{\epsilon}$ и $\hat{\mu}$) связаны соотношением

$$\tilde{\mu}^{-1} = \alpha \hat{\epsilon}^{-1} \quad (1)$$

(тильдой обозначено транспонирование, α — скаляр). В случае диагональных тензоров $\hat{\epsilon}$ и $\hat{\mu}$, приводимых к диагональному виду в одной и той же системе координат, соотношение (1) принимает вид

$$\epsilon_{xx} / \mu_{xx} = \epsilon_{yy} / \mu_{yy} = \epsilon_{zz} / \mu_{zz}. \quad (2)$$

Такие среды, как известно [3], должны обладать следующим необычным свойством: фазовая скорость волны не должна зависеть от поляризации, но должна зависеть от направления распространения; при этом в одном направлении распространяется одна волна (а не две волны, как в обычных анизотропных средах). Как указывает автор

монографии [3], это свойство — однопреломление — означает, что двойное преломление обусловлено не анизотропией $\hat{\epsilon}$ или $\hat{\mu}$, а разной анизотропией $\hat{\epsilon}$ и $\hat{\mu}$. Добавим к этому уникальному свойству однопреломляющей среды и то, что однопреломление в средах с двойной спиральностью приводит к новым свойствам сред со спиральной структурой [4], вкратце описанных в пункте Б. Возможно, отсутствие широкого внимания к таким средам связано с тем, что они в естественном состоянии не обнаружены.

Б. Среда со спиральной структурой в отношении диэлектрических и магнитных свойств одновременно. Широко распространенные среды со спиральной структурой — ХЖК [5], обладают спиральностью в отношении диэлектрических свойств и не обладают ею в отношении магнитных свойств. Между тем средам, обладающим спиральной структурой в отношении диэлектрических и магнитных свойств одновременно, должны быть присущи новые особенности. Ряд таких особенностей рассмотрен в [6,7]. В частности, в отличие от ХЖК, в которых поворот плоскости поляризации сопутствует дифракционному отражению и объясняется им, возможно отсутствие поворота плоскости поляризации при наличии дифракционного отражения и отсутствие последнего при наличии поворота. Поворот плоскости поляризации состоит из двух слагаемых, одно из которых пропорционально $\Delta_\epsilon \Delta_\mu$, второе — $(\Delta_\epsilon - \Delta_\mu)^2$ ($\Delta_\epsilon, \Delta_\mu$ — анизотропии диэлектрической и магнитной проницаемостей); зависимости поворота от частоты, а также от шага спирали у этих членов разные. В однопреломляющих спиральных средах отсутствует второе слагаемое, в ХЖК — первое, и поворот плоскости поляризации в присутствии однопреломления следует другой зависимости от длины волны и шага спирали по сравнению с ХЖК. Оптике сред с двойной спиральностью уделено внимание также в работе [8].

В. Магнитные гиротропные среды. Пространственная дисперсия (ПД) диэлектрической проницаемости в первом порядке по компонентам волнового вектора, обуславливающая естественную оптическую активность, заметна в видимой области длин волн. При переходе к областям более длинных волн эффекты ПД быстро затухают из-за малых значений отношения a/λ (a — характерные расстояния, на которые простирается поляризующее действие поля от данной точки, λ — длина волны), и в области сверхвысоких частот (СВЧ) практически не имеет смысла говорить о ПД диэлектрической проницаемости. В этой области, в которой вещество хорошо обнаруживает магнитные свойства, имеет место ПД магнитной проницаемости, однако она обычно начинается с квадратичных по компонентам волнового вектора членов [9] и поэтому не приводит к гиротропии.

Гиротропию в области СВЧ можно создать искусственным путем. Искусственные среды с зеркально-асимметричным распределением элементов простой формы имитируют кристаллическую гиротропию оптически активных сред [2]. В [10] рассмотрены искусственные среды, имитирующие молекулярную гиротропию; в них элементы (“молекулы”) осуществляют пространственную дисперсию благодаря электропроводности элемента. Ниже мы рассмотрим искусственные среды, в гиротропию которых включается магнитный механизм

пространственной дисперсии.

Отметим, что искусственная гиротропия в области СВЧ представляет не только самостоятельный интерес, но и дает возможность воспроизвести в области СВЧ эффекты необратимости волн [11], исследованные для оптической области и имеющие место при одновременном присутствии гиротропии, обусловленной право-левой асимметрией среды, и магнитооптической активности, которая может создаваться простым наложением внешнего магнитного поля.

2. Геометрия элементов

В настоящем параграфе мы рассмотрим геометрию элементов, обеспечивающую указанные в предыдущем параграфе свойства искусственным путем.

А. Однопреломляющие среды. Как известно, эллипсоидальный образец из изотропного вещества обладает анизотропией [12]: дипольный (магнитный) момент, приобретаемый им во внешнем однородном электрическом (магнитном) поле, различен при различных ориентациях электрического (магнитного) поля относительно направлений осей эллипсоида. Поэтому среда, состоящая из эллипсоидальных элементов с одинаковой ориентацией полуосей и с хаотичным распределением их центров, будет представлять собой анизотропную среду (считается, что размеры и расстояния между соседними элементами малы по сравнению с длиной волны, распространяющейся в среде, чтобы ее можно было считать сплошной). Если отличны от нуля как диэлектрическая, так и магнитная восприимчивости вещества, из которого сделаны элементы, то среда будет анизотропной как в отношении диэлектрических свойств, так и магнитных.

Рассмотрим случай самый простой, но, тем не менее, отражающий суть сказанного: а именно, рассмотрим случай, когда можно пренебречь различием между полем, действующим на данный элемент, и усредненным полем. Тогда для диэлектрической и магнитной проницаемостей среды будем иметь:

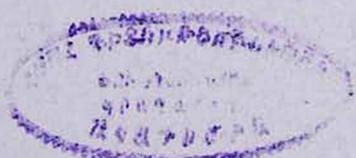
$$\varepsilon_{\alpha\alpha} = 1 + \frac{(\varepsilon - 1)NV}{1 + (\varepsilon - 1)n^{(\alpha)}}, \quad \mu_{\alpha\alpha} = 1 + \frac{(\mu - 1)NV}{1 + (\mu - 1)n^{(\alpha)}}, \quad (3)$$

где ε, μ — диэлектрическая и магнитная проницаемости изотропного вещества, из которого сделаны элементы, V — объем одного элемента, N — число последних в единице объема, $n^{(\alpha)}$ — коэффициент деполяризации вдоль оси α ($\alpha = x, y, z$; оси эллипсоидов параллельны осям x, y, z).

Так как в общем случае $n^{(x)}, n^{(y)}, n^{(z)}$ неодинаковы, то, согласно (3), среда анизотропна как в отношении диэлектрических свойств, так и магнитных. При $\varepsilon = \mu$ среда с параметрами (3) становится однопреломляющей:

$$\varepsilon_{xx} \neq \varepsilon_{yy} \neq \varepsilon_{zz}, \quad \mu_{xx} \neq \mu_{yy} \neq \mu_{zz}, \quad \varepsilon_{xx} / \mu_{xx} = \varepsilon_{yy} / \mu_{yy} = \varepsilon_{zz} / \mu_{zz}. \quad (4)$$

Б. Магнитные гиротропные среды. Для существования гиротропии, как известно [13,14], необходима право-левая асимметрия структуры среды. Элемент из непроводящего магнитного вещества, рассматриваемый ниже, изображен на рис.1. Гиротропия среды, состоящей из



хаотически ориентированных элементов такой формы, обусловлена их право-левой асимметрией. Будем придерживаться подхода к описанию гиротропии, в рамках которого гиротропия отражается в материальных уравнениях в зависимости индукций не только от полей, но и от их роторов [15,16]. Рассматривая, например, намагничение элемента в магнитном поле волны с компонентами H_ξ, H_ζ , для η -компоненты магнитного момента элемента приходим к следующему выражению;

$$m_\eta = \frac{\mu_{11}-1}{8\pi} \delta S_0 a (\text{rotH})_\eta \quad (5)$$

($\delta \ll a$ — ширина щели, $S_0 = \pi b^2 \ll \pi a^2$, μ — магнитная проницаемость элемента вдоль своей оси, длина волны $\lambda \gg a$). Такая связь, после усреднения по хаотичным ориентациям осей ξ, η, ζ (которые жестко связаны с элементом) относительно лабораторной системы, при использовании переопределения \mathbf{D} и \mathbf{H} [15,17] приводит к материальным уравнениям в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{D} &= \epsilon \mathbf{E} + \gamma_e \text{rot} \mathbf{E}, \\ \mathbf{B} &= \mu \mathbf{H} + \gamma_m \text{rot} \mathbf{H}, \end{aligned} \quad (6)$$

описывающим гиротропную среду [15,16]. В γ_e и γ_m могут дать вклад также механизмы поляризации, которые не рассматриваем.

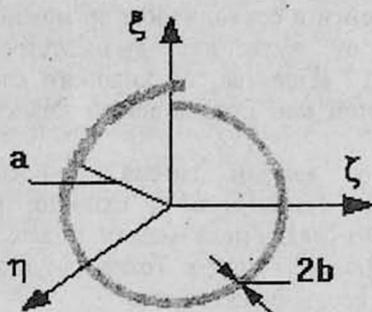


Рис.1

Аналогичными уравнениями описываются и среды с хаотически распределенными зеркально-асимметричными ячейками из рассеивающих центров простых форм [2].

В. Среда с двойной спиральной структурой. Такая среда получается, если эллипсоидам, рассмотренным в пункте А, дать ориентацию, аналогичную ориентации палочкообразных молекул в структуре ХЖК [5]. При пренебрежении взаимодействием между элементами, размеры и расстояния между которыми малы по сравнению с шагом спирали σ и длиной волны λ , распространяющейся в среде, тензоры диэлектрической и магнитной проницаемостей имеют вид тензора диэлектрической проницаемости ХЖК (их явный вид приведен в (8)). При этом главные значения ϵ_1, ϵ_2 этих тензоров в локальной системе координат даются формулами (3). Если $\epsilon = \mu$ (в (3)), то полученная спиральная среда будет локально

однопреломляющей.

Можно осуществить также такую двухспиральную среду, в которой тензоры $\hat{\epsilon}$ и $\hat{\mu}$ не приводятся к диагональному виду в одной и той же локальной системе координат. Это имеет место, например, в случае, когда каждый элемент состоит из двух жестко связанных друг с другом эллипсоидов с диэлектрическими проницаемостями веществ (из которых сделаны эллипсоиды) ϵ_a , ϵ_b и магнитными проницаемостями соответственно μ_a и μ_b , причем направления осей таких связанных эллипсоидов не совпадают. При этом должна существовать пара непараллельных осей, вдоль которых диэлектрическая и магнитная восприимчивости эллипсоидов не пропорциональны друг другу.

Взаимодействие электромагнитной волны со средами с двойной спиральной структурой рассмотрено в [4,8], но без обсуждения вопроса об их существовании или осуществлении.

В присутствии магнитооптической активности, возбуждаемой в среде внешним магнитным полем, параллельным оси спирали, среда будет обладать также гирозлектрической и гиромангнитной магнитооптическими активностями. Материальные уравнения при распространении волны вдоль оси спирали, в присутствии также гиротропии, которая может быть создана рассмотренным в предыдущем пункте путем, примут вид;

$$\mathbf{D} = \hat{\epsilon}\mathbf{E} + \hat{\gamma} \operatorname{rot} \mathbf{E} + i[\mathbf{g}_e \mathbf{E}], \quad \mathbf{B} = \hat{\mu}\mathbf{H} + i[\mathbf{g}_m \mathbf{H}]. \quad (7)$$

Эффект пространственной дисперсии полностью включен в уравнение связи между \mathbf{D} и \mathbf{E} [15].

3. Распространение монохроматической волны вдоль оси двухспиральной магнитоактивной среды: дисперсионное уравнение, необратимость

Такая среда описывается уравнениями (7) при $\hat{\gamma} = 0$. При этом тензор $\hat{\epsilon}$ для спиральной среды с осью, параллельной оси z , имеет вид:

$$\begin{aligned} \epsilon_{xx} &= \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \cos 2\alpha, & \epsilon_{xy} &= \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \sin 2\alpha, & \epsilon_{xz} &= 0, \\ \epsilon_{yx} &= \epsilon_{xy}, & \epsilon_{yy} &= \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} - \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \cos 2\alpha; & \epsilon_{yz} &= 0, \\ \epsilon_{zx} &= 0, & \epsilon_{zy} &= 0, & \epsilon_{zz} &= \epsilon_3. \end{aligned} \quad (8)$$

$\hat{\mu}$ имеет аналогичный вид, но с α , замененным на $\alpha + w$. Здесь $\alpha = az$, $a = 2\pi / \sigma$, σ — шаг спирали, $2w$ — угол между главными направлениями тензоров $\hat{\epsilon}$ и $\hat{\mu}$ в плоскостях, перпендикулярных к оси спирали. Векторы \mathbf{g}_e и \mathbf{g}_m направлены вдоль оси спирали.

Будем искать поля волны

$$\mathbf{E}(z, t) = \mathbf{E}(z)e^{-i\omega t}, \quad \mathbf{H}(z, t) = \mathbf{H}(z)e^{-i\omega t},$$

распространяющейся вдоль оси спирали, в виде

$$\mathbf{E}(z, t) = \hat{R}(az) \sum_s \begin{bmatrix} E_{sx} \\ E_{sy} \end{bmatrix} \exp i(K_s z - \omega t),$$

$$\mathbf{H}(z, t) = \hat{R}(az) \sum_s \begin{bmatrix} H_{sx} \\ H_{sy} \end{bmatrix} \exp i(K_s z - \omega t), \quad (9)$$

$$\hat{R}(az) = \begin{pmatrix} \cos az & \sin az \\ -\sin az & \cos az \end{pmatrix}.$$

Из уравнений поля при $\hat{\gamma} = 0$ получаем;

$$a_4 K_s^4 + a_2 K_s^2 + a_1 K_s + a_0 = 0, \quad (10)$$

где

$$a_4 = 1,$$

$$a_2 = \frac{\omega^2}{c^2} [(2em - 2g_e g_m - e_{22} m_{11} - e_{11} m_{22})] - 2a^2, \quad (11)$$

$$a_1 = -2 \frac{\omega^2}{c^2} [-a(m_{11} + m_{22})g_e - a(e_{22} + e_{11})g_m],$$

$$a_0 = a^4 - 2 \frac{\omega^2}{c^2} a^2 [em + g_e g_m + \frac{e_{22} m_{22} + e_{11} m_{11}}{2}] + \frac{\omega^4}{c^4} [e^2 m^2 + e^2 g_m^2 +$$

$$+ m^2 g_e^2 + g_m^2 g_e^2 - m_{11} m_{22} (e^2 + g_e^2) - e_{22} e_{11} (m^2 + g_m^2) + e_{22} e_{11} m_{22} m_{11}],$$

$$e_{11} = \varepsilon_1 \cos^2 w + \varepsilon_2 \sin^2 w, \quad e_{22} = \varepsilon_2 \cos^2 w + \varepsilon_1 \sin^2 w, \quad e = (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \sin w \cos w,$$

m, m_{11}, m_{22} получаются из e, e_{11}, e_{22} заменами $\varepsilon_{1,2} \rightarrow \mu_{1,2}, w \rightarrow -w$.

Уравнение (10) содержит нечетную степень K_s ($s = 1, 2, 3, 4$); это означает, что в среде имеет место необратимость волн, исследованная в [11] для однородных сред. Необратимость волн в спиральных средах рассмотрена в [4], при этом средой были ХЖК в магнитном поле. Рассмотренные материальные уравнения не содержали g_m , а μ_{ij} были равны δ_{ij} (δ_{ij} — символы Кронекера). Необратимость при $g_m = 0$ обеспечивается присутствием спиральности и гироэлектрической магнитооптической активности ($ag_e \neq 0$). В рассматриваемом здесь случае необратимость обеспечивается отличными от нуля величинами ag_e и ag_m , т.е. сочетанием спиральности как с гироэлектрической магнитооптической активностью, так и с гиромангнитной.

Автор благодарен академику НАН РА А.Р.Мкртчяну за полезные дискуссии.

Выполнение настоящей работы частично стало возможным благодаря финансовой поддержке Международного научного фонда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Герритсен, Р. Ямагучи. УФН, 107, 705 (1972).
2. Н.А. Хижняк. Интегральные уравнения макроскопической электродинамики.

Киев, Наукова думка, 1986.

3. Ф.И. Федоров. Оптика анизотропных сред. Минск, изд. АН БССР, 1958.
4. О.С. Ерицяи. Электромагнитные волны в гиротропных кристаллах. Докт. диссертация, М., изд. МГУ, 1988.
5. В.А. Беляков, А.С. Сонин. Оптика холестерических жидких кристаллов. М., Наука, 1982.
6. О.С. Ерицяи. Изв. АН Арм. ССР, Физика, 22, 9 (1977).
7. О.С. Ерицяи. Изв. АН Арм. ССР, Физика, 19, 306 (1974).
8. В.Н. Капшай, В.А. Князя, И.В. Семченко. Кристаллография, 36, 822 (1991).
9. А.И. Ахизер, В.Г. Барьяхтар, С.В. Пелетминский. Спиновые волны. М., Наука, 1967.
10. D.L. Jaggard, A.R. Mickelson, C.H. Papas. Appl. Phys., 18, 211 (1979).
11. О.С. Ерицяи. УФН, 138, 645 (1982).
12. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Электродинамика сплошных сред. М., Наука, 1982.
13. М.В. Волькенштейн. Молекулярная оптика. М.-Л., ГИТТЛ, 1951.
14. М. Борн. Оптика. Харьков-Киев, Гостехиздат, 1937.
15. Ф.И. Федоров. Теория гиротропии. Минск, Наука и техника, 1976.
16. В.М. Агранович, В.Л. Гинзбург. Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов. М., Наука, 1979.
17. Б.В. Бокуть, А.Н. Сердюков, Ф.И. Федоров, Н.А. Хило. Кристаллография, 18, 227 (1973).

ԱՐՀԵՍՏԱԿԱՆ ՄԻԱԲԵԿՈՂ, ԵՐԿՊԱՐՈՒՅՐԱՅԻՆ ԵՎ ՍԱԳՆԻՍԱԿԱՆ
ԳԻՐՈՏՐՈՊ ՄԻՋԱՎԱՅՐԵՐ

Հ. Ս. ԵՐԻՅԱՆ

Զննարկված է այնպիսի արհեստական միջավայրերի ստեղծման հնարավորությունը, որոնք օժտված են միաբեկումով, երկպարույրային կառուցվածքով և մոլեկուլային գիրոտրոպիային նմանակող գիրոտրոպիայով: Զննարկված է էլեկտրամագնիսական ալիքի տարածումը երկպարույրությամբ օժտված միջավայրում՝ գիրոէլեկտրական և գիրոմագնիսական մագնիսաօպտիկական ակտիվությունների առկայությամբ:

ARTIFICIAL MONOREFRINGATING, DOUBLE-HELICAL AND MAGNETIC GYROTROPIC MEDIA

H. (O.) S. ERITSYAN

The possibility of creating an artificial monorefringence, double helicity and gyrotropy in non-conducting magnetic media is discussed. The propagation of the electromagnetic wave along the axis of double-helical medium possessing magneto-optical activity is considered.