

**Метаматериалы из ферромагнитных микропроводков:
отрицательный показатель преломления и оптический эффект Магнуса**

Иванов Андрей Валериевич¹

студент

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: andrei_i@ostrov.net

Введение

В последние годы нарастает интерес к искусственным средам с показателем преломления $n = \sqrt{\epsilon(\omega) \cdot \mu(\omega)} < 0$ в некоей области частот ω электромагнитных волн (ЭМВ) (ϵ и μ - отрицательные диэлектрическая и магнитная проницаемости подсистем метаматериала) [1]. Одно из названий таких сред - левые материалы (ЛМ): волновой вектор \mathbf{k} , напряженность \mathbf{E} и индукция \mathbf{B} ЭМВ образуют левую тройку $\{\mathbf{k}, \mathbf{B}, \mathbf{E}\}$). Возможность ЛМ обсуждалась давно [2(с.433),3], отмечалась в курсе [4] (с.398). Но прогресс в изучении начался после их приготовления (2000г.) из чередующихся штырей и колечек (электрические и магнитные диполи): вначале ЛМ освоили гигагерцовую, а спустя 6 лет и красную области спектра [5]. В *однородных* ЛМ обнаружены аномальные, «обратные» по отношению к нормальным, эффекты преломления, Доплера, Черенкова-Вавилова, давления ЭМВ, эффект невидимости, гиротропные явления [6,7]. В неоднородных нормальных средах открыта закручиваемость траектории циркулярно-поляризованной ЭМВ - оптический эффект Магнуса. Аномален ли он в оптически *неоднородных* ЛМ? Как реализовать их? В докладе представлены ответы на эти вопросы.

Результаты

Напряженности E и H ЭМВ пропорциональны $\exp\{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega \cdot t + \psi(s))\}$, а градиент эйконала на пути s , $\nabla\psi = k_0$, определяет направление луча l_0 ($\nabla\psi \cdot E = 0$ и $\nabla\psi \cdot \dot{I} = 0$). Из уравнений Максвелла после трудоемких вычислений в приближении геометрической оптики получено уравнение траектории луча циркулярно-поляризованной ЭМВ, $\Xi = \pm$:

$$\frac{\partial S}{\partial s} = l_0 \times \nabla \ln n \times S + \frac{\Xi}{k} \left[\frac{\partial}{\partial s} (\nabla \ln n \times S) + \frac{1}{2} \frac{\partial \ln \epsilon}{\partial s} \nabla \ln \mu \times S + \frac{1}{2} \frac{\partial \ln \mu}{\partial s} \cdot \nabla \ln \epsilon \times S \right] \quad (1)$$

($S = \alpha(E_0 \times H_0^* + E_0^* \times H_0) / 16\pi$ - вектор Умова-Пойнтинга). Второе слагаемое описывает оптический эффект Магнуса.

Свойствами популярных ЛМ управлять нельзя, изготавливать их сложно, в них трудно получить требуемую уравнением (1) неоднородность. В настоящее время особое значение приобретают микропровода из аморфных ферромагнетиков, и метаматериалы из них технологически осуществимы [8,9]. Вдоль внешнего магнитного поля $\{0, 0, H_0\}$ поместим микропроводки радиусов a в узлах квадратной решетки x с постоянной b . Для ЭМВ, распространяющейся вдоль оси y с $E // z$, в длинноволновом пределе расчетная магнитная проницаемость метаматериала

$$\mu(\omega) = \frac{1}{2} \frac{(\omega_0 + \omega_m)^2 - \omega^2}{\omega_0(\omega_0 + \omega_m) - \omega^2} \left(1 + \sqrt{\left[\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \left(2\pi \frac{a}{b} \right)^2 \right]^2 + 1} \right) \quad (2)$$

где $\omega_m = (2\pi a/b)^2 \gamma M$ (M - намагниченность насыщения), $\omega_0 = \gamma H_0$ ($\gamma = |e|/mc$ - магнетомеханическое отношение), σ - проводимость, связанная с компонентой тензора поверхностного импеданса $\zeta_{zz} = (1-i)\sqrt{(\omega \mu)/(8\pi\sigma)} [1 + (1+i)\delta/(4a\sqrt{\mu})]$ при глубине скин-слоя $\delta = c/\sqrt{2\pi\sigma\omega} < a$. Диэлектрическая проницаемость такой системы в среде с проницаемостью ϵ_0 [8, 10] есть

¹ Автор благодарен профессору А.В. Ведяеву и доценту О.А. Котельниковой за полезные советы и обсуждение.

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_0 - 2\pi \left(2\pi \frac{ac}{\omega b^2} \right)^2 / \left[\ln \frac{b}{a} \left(1 + i \frac{c\zeta_{zz}}{\omega a \ln \frac{b}{a}} \right) \right]. \quad (3)$$

Выводы

Вектор Умова-Пойнтинга $S = v \cdot \nu$ связан с групповой скоростью ν и плотностью энергии, поэтому из 2-го слагаемого в (1) следует формула $\pm \nabla \ln n \times v/k$ оптического эффекта Магнуса, выведенная в [11] с помощью фазы Берри. Уравнение (1) предсказывает *аномальность* оптического эффекта Магнуса в неоднородных ЛМ и *расщепление* линейно-поляризованной ЭМВ на пару циркулярно-поляризованных. Для типичных величин аморфных ферромагнетиков Co-Fe-Cr-B-Si $\sigma \sim 10^{16} \text{с}^{-1}$, $M=500 \text{Гс}$, $\zeta_{zz} \sim 10^{-3}$ [8] и параметров $a=10^{-3} \text{см}$, $b=10^{-1} \text{см}$, $\varepsilon_0=2$ показатель $n = \sqrt{\varepsilon(\omega) \cdot \mu(\omega)} < 0$ на частотах $1,9 \text{АА} \dot{\omega} < \omega < 15,0 \text{АА} \dot{\omega}$ во внешнем поле $H_0=10 \text{Э}$ и метаматериал – ЛМ! Неоднородность n в (1) можно регулировать градиентом ∇H_0 . Т.о., *предложен ЛМ из микропроводков* аморфного ферромагнетика, а не из искусственных нанорезонаторов, показатель преломления и оптическая неоднородность которого *управляемы внешним магнитным полем*, что позволяет наблюдать *рассчитанный эффект Магнуса*.

Литература

1. Агранович В.М., Гартштейн Ю.Н. (2006) Пространственная дисперсия и отрицательное преломление света // УФН **176**, 1051.
2. Мандельштам Л.И. (1972) Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике. М.: Наука.
3. Веселаго В.Г. (1967) Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ε и μ // УФН **92**, 517.
4. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. (1982) Электродинамика сплошных сред. М.: Наука.
5. Soukolis С.М., Linden S., Wegener M. (2007) Negative Refractive Index at Optical Wavelengths // Science **315**, 47; Yuan Н.-К., Chettiar U.K., Cai W. et al. (2007) A negative permeability material at red light // Optics Express **15**, 1076.
6. Lindell I.V., Tretyakov S.A., Nikoskinen K.I. et al. (2001) BW media--media with negative parameters, capable of supporting backward waves // Microwave and Opt. Tech. Lett. **31**, 129; Mackay G., Lakhtakia A. (2004) Plane waves with negative phase velocity in Faraday chiral mediums // Phys. Rev. E **69**, 026602.
7. Ivanov A.V., Kotelnikova O.A., Ivanov V.A. (2006) Gyrotropic left-handed media: energy flux and circular dichroism // JMMM **300**, e67; Иванов А.В., Котельникова О.А., Ведяев А.В. и др. (2006) Вращение плоскости поляризации электромагнитной волны и поток энергии в бигиротропной левой среде // Вестник МГУ. Серия 3. Физика. Астрономия. № **4**, 25.
8. Makhnovskiy D.P., Panina L.V., Garcia C. et al. (2006) Experimental demonstration of tunable scattering spectra at microwave frequencies in composite media containing CoFeCrSiB glass-coated amorphous ferromagnetic wires and comparison with theory // Phys. Rev. B **74**, 064205.
9. Молоканов В.В., Умнов П.П., Куракова Н.В. и др. (2006) Влияние толщины стеклообразного покрытия на структуру и свойства аморфного магнитомягкого кобальтового сплава // Перспективные материалы **2**, 5.
10. Pendry J.B., Holden A.J., Stewart W.J. et al. (1996) Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Mesostructures // Phys. Rev. Lett. **76**, 4773.
11. Блюх К.Ю., Блюх Ю.П. (2004) Оптический эффект Магнуса как следствие анизотропии фазы Берри // Письма в ЖЭТФ **79**, 647.