

Краткие сообщения

01;05;07

Отрицательная оптическая рефракция в кристаллах с сильным двулучепреломлением

© Р.А. Браже, Р.М. Мефтахутдинов

Ульяновский государственный технический университет,
432027 Ульяновск, Россия
e-mail: brazhe@ulstu.ru; mrm@ulstu.ru

(Поступило в Редакцию 8 сентября 2006 г.)

Показана возможность существования отрицательной оптической рефракции необыкновенного луча в кристаллах с сильным двулучепреломлением.

PACS: 42.25.Jy

Существование сред с отрицательной рефракцией впервые было предсказано в работе В.Г. Веселаго [1]. Такие среды были названы „левыми“ или „леворукими“, так как в них вектор плотности потока энергии электромагнитной волны (лучевой вектор) образует с векторами напряженности электрического и магнитного полей левовинтовую тройку векторов. Экспериментально они были получены в работах [2–4]. Однако в этих и ряде других работ отрицательная рефракция достигается за счет искусственного создания состояния с отрицательными значениями относительной электрической и магнитной проницаемостей среды ($\epsilon < 0$ и $\mu < 0$). Такой же эффект можно получить и для немагнитных сред, например фотонных кристаллов [5].

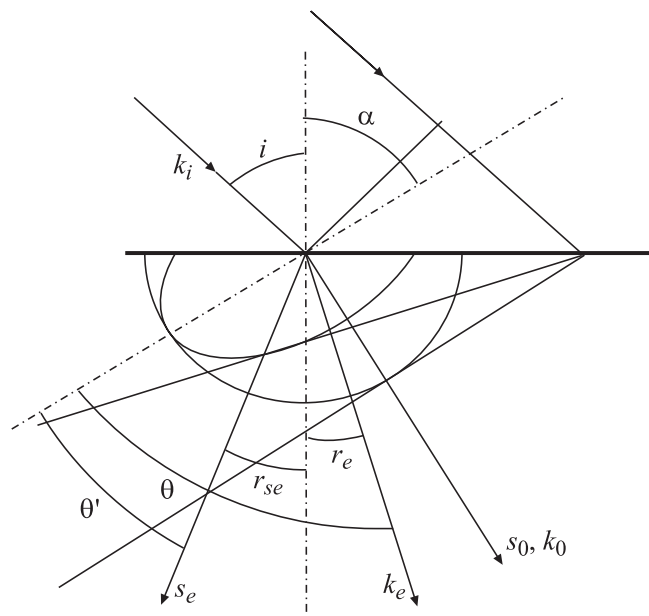


Рис. 1. Построение Гюйгенса для поверхностей скоростей обыкновенной и необыкновенной волн в оптически отрицательном кристалле с сильным двулучепреломлением.

В настоящей работе исследуется возможность получения отрицательной рефракции в кристаллах с положительными ϵ и μ , но с сильным двулучепреломлением.

Пусть луч света под углом i падает из вакуума на одноосный кристалл. На рис. 1 показано построение Гюйгенса для поверхностей скоростей обыкновенной и необыкновенной волн в оптически отрицательном кристалле. Угол между нормалью к поверхности кристалла и оптической осью равен α ; \mathbf{k}_0 и \mathbf{s}_0 — соответственно волновой и лучевой векторы обыкновенной волны (их направления совпадают); \mathbf{k}_e и \mathbf{s}_e — волновой и лучевой векторы необыкновенной волны. Определим условия, при которых лучевой вектор необыкновенной волны будет отклоняться в обратную от направления падения сторону и возникает отрицательная рефракция. Вообще говоря, показатель преломления необыкновенной волны зависит от угла θ между оптической осью и волновым вектором этой волны следующим образом [6]:

$$n'_e = \frac{n_0 n_e}{\sqrt{n_0^2 \sin^2 \theta + n_e^2 \cos^2 \theta}}, \quad (1)$$

где n_0 — показатель преломления обыкновенной волны, n_e — показатель преломления необыкновенной волны в направлении, перпендикулярном оптической оси.

Рассмотрим предельный случай, когда $r_{se} = 0$. Углы θ' и θ связаны соотношением [6]:

$$\text{tg } \theta' = \frac{n_0^2}{n_e^2} \text{tg } \theta. \quad (2)$$

Граничные условия для необыкновенного луча имеют вид

$$\sin r_e = \frac{k_i}{k_e} \sin i = \frac{1}{n'_e} \sin i. \quad (3)$$

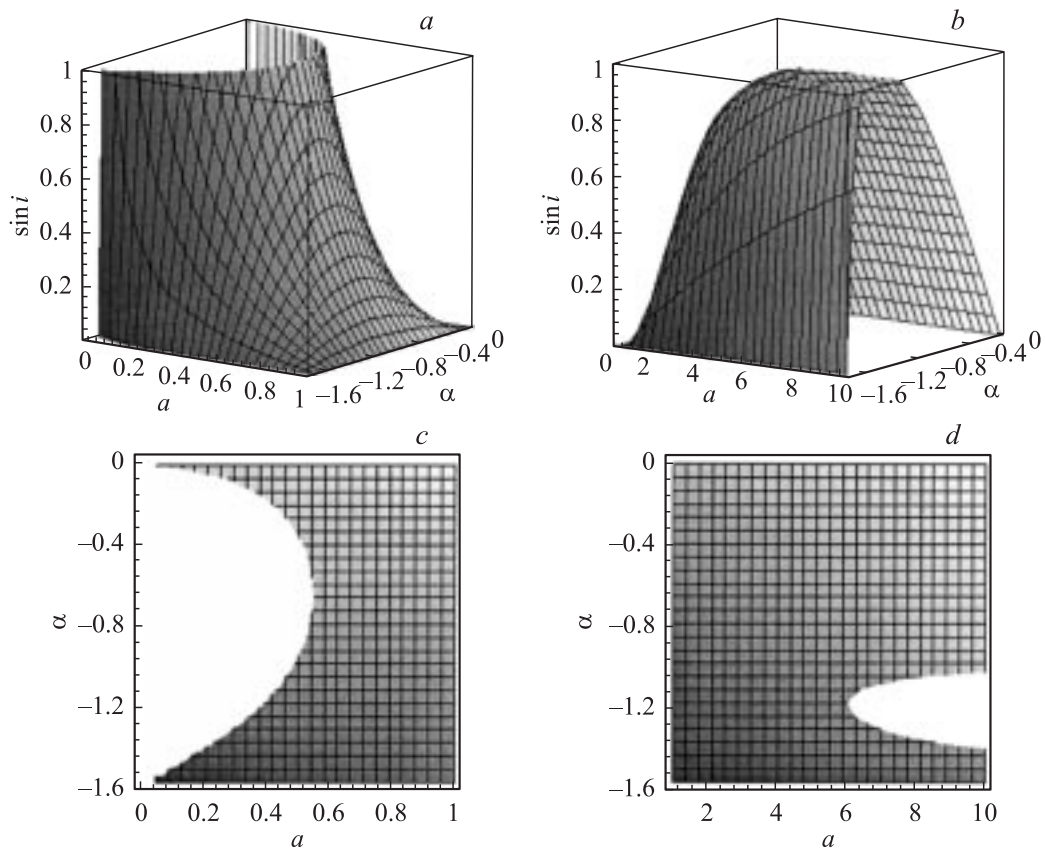


Рис. 2. Поверхности, задаваемые уравнением (4); a — отрицательный кристалл, b — положительный кристалл, и их проекции (c, d) на плоскость (α, a) для $n_0 = 1.2$.

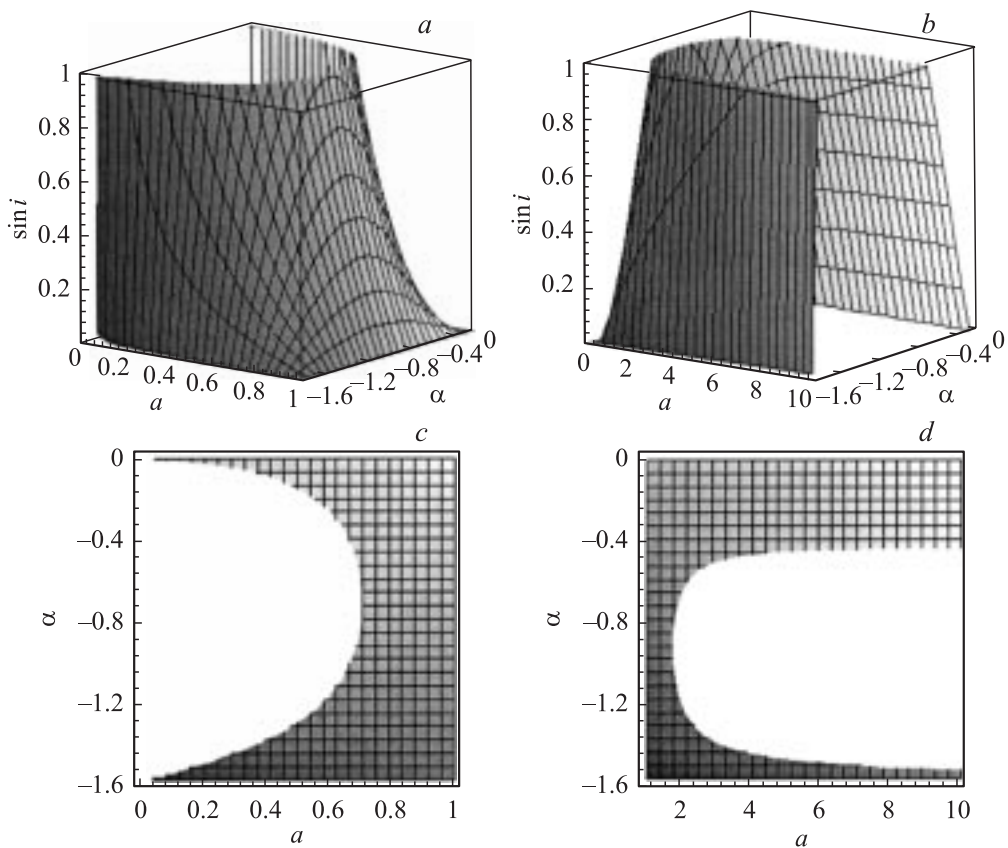


Рис. 3. То же, что на рис. 2, для $n_0 = 2.4$.

Из (1)–(3) получаем

$$\begin{aligned} \sin i = \\ = n_0 \frac{\operatorname{tg} r_e}{\{1 + \operatorname{tg}^2 r_e + (a^2 - 1) \times \\ \times [1 - \cos^2 \alpha (1 - \operatorname{tg}^2 r_e) + \sin 2\alpha \operatorname{tg} r_e]\}^{1/2}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$\operatorname{tg} r_e = -\frac{a^2 - 1}{a^2 + \operatorname{tg}^2 \alpha} \operatorname{tg} \alpha, \quad a = \frac{n_0}{n_e}.$$

На рис. 2, 3 показаны поверхности, задаваемые уравнением (4) для отрицательного ($n_e > n_0$) и положительного ($n_e < n_0$) кристаллов. Отрицательная рефракция наблюдается, если a и α принимают значения из незаштрихованной области рис. 2, c, d и 3, c, d . Чем больше показатель преломления обыкновенной волны n_0 , тем больше эта область. Из рис. 2 видно, что для отрицательного кристалла с $n_0 = 1.2$ a изменяется от 0 до 0.47, т. е. n_e должно быть больше 2.6. Для положительного кристалла отрицательная рефракция начинается с $a = 6.1$ или $n_e \leq 0.2$. С увеличением n_0 степень анизотропии снижается. Так, например, при $n_0 = 2.4$ для отрицательного кристалла показатели преломления обыкновенного и необыкновенного лучей отличаются в 0.6 раз, для положительного — в 1.8 раза.

Следует заметить, что в природных кристаллах столь высокая анизотропия, при которой становится возможным описанный эффект, не встречается. Однако, вероятно, возможно создать искусственные кристаллы с подобными свойствами.

Список литературы

- [1] *Веселаго В.Г.* // УФН. 1967. Т. 92. № 3. С. 517–526.
- [2] *Shelby R.A.* et al. // Science. 2001. Vol. 292. P. 77–79.
- [3] *Smith D.R.* et al. // Phys. Rev. Lett. 2000. Vol. 84. P. 4184–4187.
- [4] *Shuang Zhang* et al. // Phys. Rev. Lett. 2005.
- [5] *Nojima M.* // Phys. Rev. 2000. Vol. B 62. P. 10 696–10 705.
- [6] *Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П.* Теория волн. М.: Наука, 1979. 384 с.