

УСЛОВИЯ СОВМЕЩЕНИЯ ОБЫКНОВЕННОГО И НЕОБЫКНОВЕННОГО ЛУЧЕЙ В ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ПЛАСТИНКЕ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ ИЗ ОПТИЧЕСКОГО ОДНООСНОГО КРИСТАЛЛА

© 2004 г. А. А. Мурый; В. И. Строганов, доктор физ.-мат. наук

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск
E-mail: root@festu.khv.ru

Показано, что в плоскопараллельной пластинке, изготовленной из оптического одноосного кристалла, существуют направления совмещения обыкновенного и необыкновенного лучей. Такие направления совмещения важны при создании оптических фазовых пластинок или светофильтров с наклонным падением лучей малого поперечного сечения на пластинку, при записи голограммных решеток или решеток нелинейной восприимчивости.

Коды OCIS: 260.0260, 260.1180, 260.1440.

Поступила в редакцию 12.11.2003.

При наклонном падении лучей на плоскопараллельную пластинку, изготовленную из одноосного кристалла, обыкновенный и необыкновенный лучи разделяются по направлению. Причиной этого является разная величина показателя преломления пластинки для этих лучей [1–5].

Существует ряд практических задач, когда необходимо совместить в пластинке направления распространения лучей, имеющих малое поперечное сечение (малый диаметр). К таким задачам, например, можно отнести создание оптических фазовых пластинок или светофильтров с наклонным падением лучей; запись голограммных решеток или решеток показателя преломления.

Целью работы является расчет для плоскопараллельной кристаллической пластинки направлений, вдоль которых могут быть совмещены обыкновенный и необыкновенный лучи. Расчет проведен для положительного кристалла каломели (Hg_2Cl_2), имеющего большое двулучепреломление. Рассмотрен частный случай, когда плоскость падения лучей совпадает с плоскостью главного сечения кристалла. Этот случай является наиболее важным, так как чаще всего используется на практике. Угол падения (α) для обыкновенных и необыкновенных лучей на кристаллическую плоскопараллельную пластинку одинаковый (рис. 1).

Расчет произведен на основании выражения (1), являющегося законом преломления $n_{cp} \sin \alpha = n_o \sin \beta_o$,

$$\begin{aligned} n_{cp} \sin \alpha &= \\ &= \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_e^2 \cos^2 (\omega + \beta_{ke}) + n_o^2 \sin^2 (\omega + \beta_{ke})}} \sin \beta_{ke}, \end{aligned} \quad (1)$$

где α – угол падения, β_{ke} – угол преломления необыкновенного луча (угол между нормалью и волновым вектором необыкновенного луча), β_o – угол

преломления обыкновенного луча; n_e, n_o – главные значения показателя преломления кристалла, ω – угол между оптической осью и нормалью.

Уравнение (1) позволяет определить направления волнового вектора необыкновенной волны k_e (угол β_{ke}) и лучевого вектора обыкновенной волны S_o (угол β_o). Направление необыкновенного луча определяется вектором Умова–Пойтинга S_e , параллельного нормали к эллипсу показателей преломления кристалла в точке пересечения эллипса с волновым вектором [1, 4]. Таким образом, нахождение направления необыкновенного луча (угол β_e) сводится к задаче определения положения нормали к эллипсу показателей преломления, что не представляет больших сложностей.

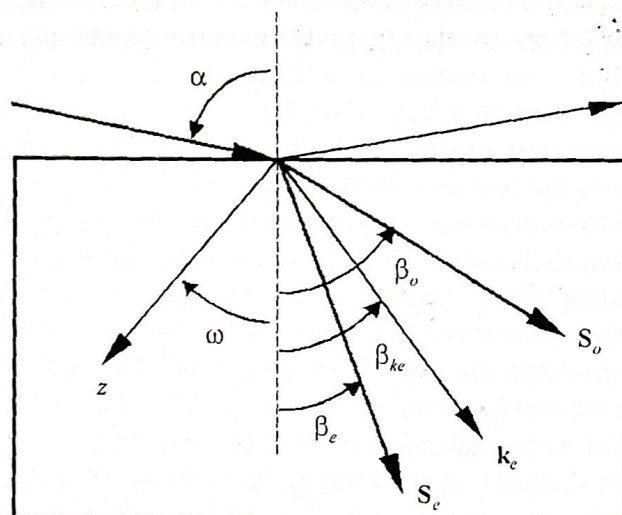


Рис. 1. Расположение волновых и лучевых векторов при преломлении на входной грани кристалла. Указанные направления отсчета углов считаются положительными; z – направление оптической оси кристалла; k_e – волновой вектор необыкновенной волны; S_e, S_o – лучевые векторы.

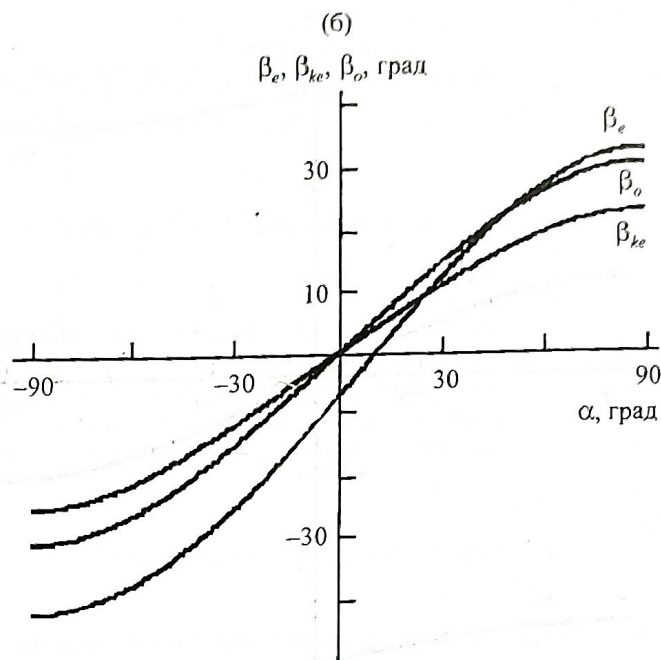
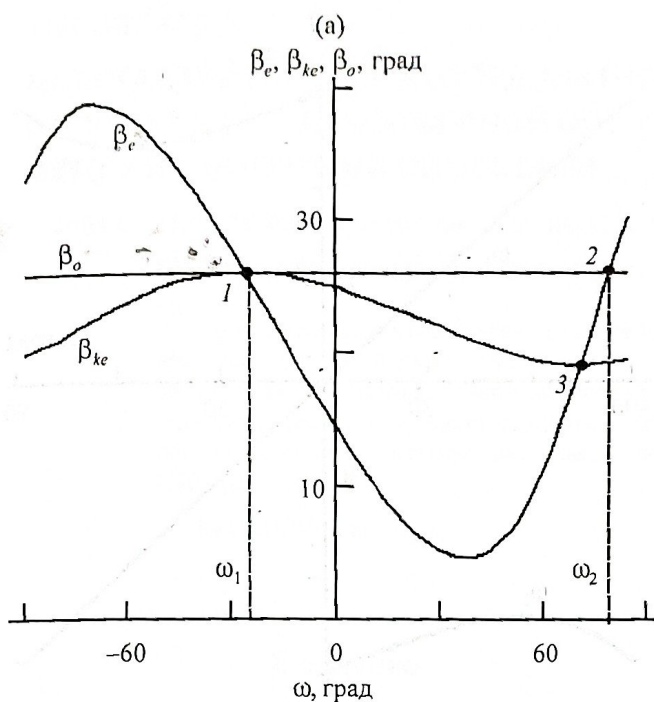


Рис. 2. Зависимости углов β_e , β_{ke} , β_o от положения оптической оси ω (а) при $\alpha = 60^\circ$ и от угла падения α (б) при $\omega = 80^\circ$, рассчитанные для кристалла каломели Hg_2Cl_2 .

Теоретические зависимости углов β_e , β_{ke} , β_o от угла падения луча на входную грань кристалла (оптическая ось фиксирована) и от угла наклона оптической оси (угол падения фиксирован) для кристалла Hg_2Cl_2 , полученные в результате расчетов, приведены на рис. 2. Положительный кристалл Hg_2Cl_2 рассмотрен в качестве примера, так как обладает большим двулучепреломлением.

График показывает, что для каждого угла падения α существуют два положения (точки 1 и 2) оптической оси ω_1 и ω_2 , при которых направления распространения преломленных обыкновенного и необыкновенного лучей в кристалле совпадают (рис. 2а). В первом случае (точка 1) лучи распространяются вдоль оптической оси кристалла с одинаковыми скоростями, поэтому двулучепреломление исключается. Во втором случае (точка 2) скорости для обыкновенного и необыкновенного лучей различны. Векторы $\mathbf{S}_o$ и $\mathbf{S}_e$ имеют одно направление, а волновые векторы $\mathbf{k}_o$ и $\mathbf{k}_e$ – разные. Совмещение лучей ($\beta_e = \beta_o$) в кристалле при определенном положении оптической оси возможно за счет подбора соответствующего угла падения α (рис. 2б).

На графике (рис. 2а) имеется также особая точка 3, которая соответствует совпадению лучевого $\mathbf{S}_e$ и волнового $\mathbf{k}_e$ векторов в плоскопараллельной кристаллической пластинке. Такое совпадение реализуется, когда необыкновенный луч распространяется точно в направлении, перпендикулярном оптической оси. Это своеобразная “поворотная” точка. Если угол падения α меньше угла падения,

соответствующего этой точке, то $\beta_e < \beta_{ke}$, если больше – $\beta_e > \beta_{ke}$ (рис. 2б).

Указанные особенности позволяют регулировать точку выхода необыкновенного луча из плоскопараллельной кристаллической пластинки по отношению к точке выхода обыкновенного луча. Отметим, что угол выхода лучей из пластинки равен углу падения лучей на пластинку независимо от положения оптической оси [6].

Если используется случай с точкой 2, обыкновенный и необыкновенный лучи совмещены в кристалле и из кристаллической пластинки выходят из одной точки и в одном направлении два луча – обыкновенный и необыкновенный. На рис. 3 приведены графики зависимостей $\omega_1(\alpha)$ и $\omega_2(\alpha)$ – положения оптической оси, при которых вектора $\mathbf{S}_o$ и $\mathbf{S}_e$ совпадают по направлению ($\beta_e = \beta_o$). Зависимость $\omega_1(\alpha)$ соответствует случаю, когда преломленный луч идет вдоль оптической оси (при этом двулучепреломление отсутствует). Случай $\omega_2(\alpha)$ реализуется при достаточно больших углах ω (рис. 3).

Таким образом, при определенных значениях α и ω существуют в плоскопараллельной кристаллической пластинке два направления, вдоль которых могут быть совмещены на всей длине кристалла обыкновенный и необыкновенный лучи, имеющие достаточно малый диаметр. Данное свойство может быть полезным при создании фазовых оптических пластинок с наклонным расположением луча, в нелинейной оптике при использовании фазового синхронизма второго типа ($oe \rightarrow e$, $oe \rightarrow o$),

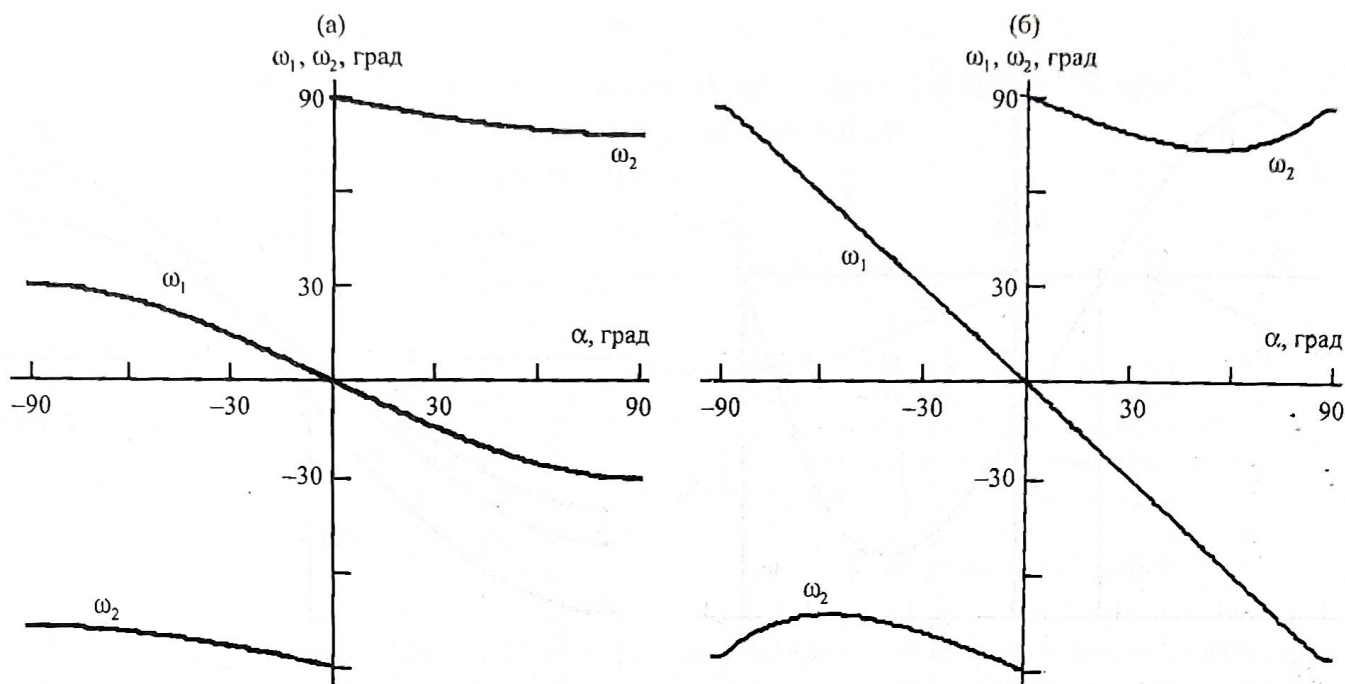


Рис. 3. Условия пространственного совпадения обыкновенного и необыкновенного лучей в кристалле каломели Hg_2Cl_2 . $n_{\text{сп}} = 1$ (а), 1,9 (б).

при записи голограммных решеток и решеток нелинейной восприимчивости в кристаллах. При генерации оптических гармоник и суммарных частот в кристаллах описанный метод позволяет получить значительный выигрыш в эффективности преобразования [7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 656 с.
2. Сиротин Ю.А., Шаскольская М.П. Основы кристаллофизики. М.: Наука, 1979. 640 с.

3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 856 с.
4. Федоров Ф.И. Оптика анизотропных сред. Минск: Изд-во АН БССР, 1958. 223 с.
5. Федоров Ф.И., Филиппов В.В. Отражение и преломление света прозрачными кристаллами. Минск: Наука и техника, 1976. 220 с.
6. Лобань А.Н., Алексеева Л.В. Отражение необыкновенных лучей в кристаллической пластинке в зависимости от положения оптической оси // Оптика: Межвуз. сб. науч. тр. Хабаровск: ДВГАПС, 1993. С. 46–48.
7. Белый В.Н. Распространение электромагнитных волн в гиротропных и анизотропных кристаллах // Автореф. канд. дис. Минск, 1976.