УДК 535.54; 535.853

ДВОЙНЫЕ КОНОСКОПИЧЕСКИЕ ФИГУРЫ В ПРИЗМАХ ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

© 2006 г. **М. Н. Литвинова***; **В. И. Строганов***, доктор физ.-мат. наук; **П. Г. Пасько****; **В. В. Криштоп***, канд. физ.-мат. наук; **Л. В. Алексеева***, канд. физ.-мат. наук

* Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск

** Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск

Приведены результаты исследования особенностей формирования двойных коноскопических фигур в призмах полного внутреннего отражения. Выявлены условия существования двойных коноскопических фигур при отсутствии поляризатора и анализатора. Эксперимент выполнен с призмами, изготовленными из кристаллов кальцита, дигидрофосфата калия (KDP) и ниобата лития.

Коды OCIS: 260.0260, 260.1180, 260.6970.

Поступила в редакцию 17.05.2005.

Наблюдение и регистрация коноскопических фигур являются актуальным современным методом исследования физических свойств кристаллов, используемых в оптическом приборостроении [1, 2]. Применение расходящегося светового излучения позволяет получить крупномасштабные яркие и контрастные коноскопические фигуры [3].

В работах [4–6] обнаружены аномалии при формировании коноскопических фигур в устройствах типа бифокальной линзы [4], призмы Рошона [5], ромба Френеля [6], проявляющиеся в виде двойных коноскопических фигур и неинвариантности интерференции поляризованных волн.

Некоторой неожиданностью явилась возможность наблюдения коноскопических фигур в треугольных призмах полного внутреннего отражения. Ранее коноскопические фигуры наблюдали с плоскопараллельными пластинками или призмами, эквивалентными плоскопараллельным пластинкам [4–6]. Подчеркнем, что при формировании коноскопических фигур с плоскопараллельными пластинками значительную роль играет не только разность фаз между обыкновенным и необыкновенным лучами в пластинке, но и разность фаз между этими же лучами вне пластинки [7].

Ниже приведены результаты исследований коноскопических фигур в призмах, изготовленных из одноосных отрицательных кристаллов: кальцита, KDP и ниобата лития. Выявлены характерные особенности формирования коноскопических фигур при отсутствии поляризатора и анализатора.

В эксперименте использованы треугольные призмы (угол между входной или выходной и отражающей гранью равен 45°) и ромб Френеля, изготовленный из кристалла ниобата лития.

В призмах наблюдалась неинвариантность интерференции при прохождении расходящихся световых пучков в прямом и обратном направлениях. То есть вид интерференционной картины определялся тем, как направлен падающий пучок: вдоль оптической оси кристалла или перпендикулярно к ней.

Далее рассмотрим различные варианты прохождения лучей и расходящихся пучков относительно треугольных призм.

В первом варианте луч *1* направлен вдоль оптической оси *zz* кристалла (рис. 1а, 1б). Если вектор напряженности электрического поля **E** падающей волны направлен под углом относительно плоскости рис. 1, то из призмы выходят поляризованные лучи – обыкновенный *2* и необыкновенный *3*. Угол падения луча *1* на грань *6* равен 45°, угол отражения обыкновенного луча *2* также равен 45° ($n_o \sin 45° = n_o \sin\beta_o$, $\beta_o = 45°$ – угол отражения). Угол отражения β_e необыкновенного луча больше 45° ($n_o \sin 45° = n_e \sin\beta_e$, $n_e < n_o$ – отрицательный кристалл).

При размещении перед входной гранью *4* призмы транспаранта *9*, формирующего расходящийся пучок лучей, на экране видна двойная коноскопическая фигура. Если падающее на входную грань излучение *1* поляризовано вертикально (обыкновенный луч), коноскопическая картина со светлым “мальтийским крестом” формируется вдоль выходящего обыкновенного луча *2* (рис. 1а). Если излучение *1* поляризовано горизонтально (необыкновенный луч), то светлый “мальтийский крест” расположен в направлении выходящего необыкновенного луча *3* (рис. 1б). Коноскопическая картина с темным “мальтийским крестом” формируется в направлении отсутствующего в данный момент луча, соответствующего центру коноскопической фигуры.

Угловое расстояние между центрами коноскопических фигур равно угловому расстоянию между выходящими из призмы (рис. 1а, 1б) обыкновенным *2* и необыкновенным *3* лучами.

Общий вид двойной коноскопической фигуры, полученной в призме из кальцита по первому варианту,

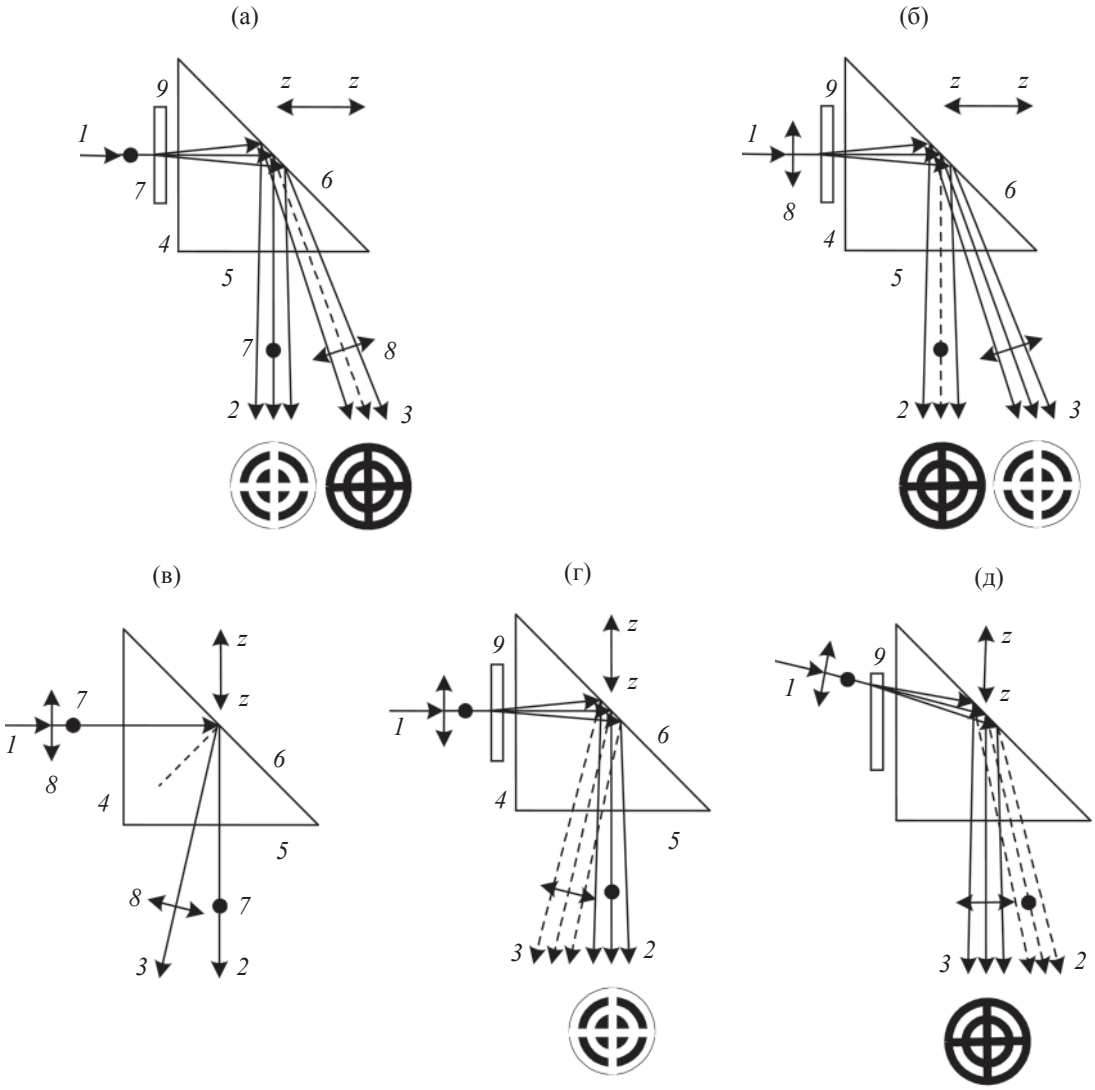


Рис. 1. Ход лучей и расходящихся пучков в призме из одноосного отрицательного кристалла. *1* – падающий пучок лучей, *2* и *3* – выходящие из призмы обыкновенный и необыкновенный лучи, *4*– *6* – входная, выходная и наклонная (отражающая) грани призмы, *7* – вектор **E** обыкновенного луча, *8* – вектор **E** необыкновенного луча, *9* –транспарант, *zz* – направление оптической оси в призме. Внизу под призмой схематически изображены наблюдаемые коноскопические фигуры. Ось пропускания анализатора перпендикулярна к плоскости рисунка.

приведен на рис. 2. Отметим, что для кристалла кальцита двойные коноскопические фигуры ярко выражены и легко наблюдаются на экране. В случае призм, изготовленных из кристалла KDP, коноскопические фигуры на экране частично перекрываются.

Таким образом, при наблюдении двойных коноскопических фигур на входную грань *4* призмы должен падать пучок линейно поляризованных лучей (нужен поляризатор). Двойные коноскопические фигуры наблюдаются без анализатора. Поляризация излучения в двойных коноскопических фигурах взаимно ортогональная.

Распространяясь вдоль оптической оси кристалла в области от грани *4* до отражающей грани *6*, один падающий поляризованный пучок лучей формирует пучок со сложной поляризационной структурой. В этом пучке уже имеется излучение, способное сформировать две, дополнительные друг к другу, коноскопические фигуры. Наклонная грань *6* разделяет этот пучок на два пучка с взаимно ортогональными поляризациями (*s*- и *p*-компоненты излучения).

Область кристалла от грани *6* до выходной грани *5* обеспечивает для этих двух пучков с ортогональными поляризациями разные показатели преломления n_o и n_e (пучки распространяются вблизи нормали к оптической оси). Это приводит к разделению пучков на определенный угол и формированию двух коноскопических фигур (рис. 1а, 1б).

При пропускании через призму двух пучков с взаимно ортогональными поляризациями образуются четыре коноскопические фигуры, которые попарно накладываются друг на друга, образуя пучки практически с равномерным распределением интенсивности. Размер коноскопической фигуры определяется расстоянием, пройденным пучком от грани *4* до грани *6* (рис. 1б).

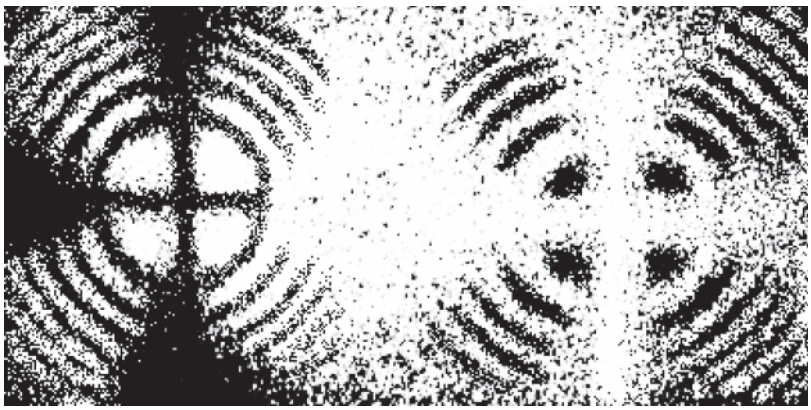


Рис. 2. Фотография двойной коноскопической фигуры, наблюдаемой с призмой (рис. 1а), изготовленной из одноосного отрицательного кристалла кальцита.

Напомним, что для наблюдения коноскопической фигуры с плоскопараллельной кристаллической пластинкой падающее излучение должно быть линейно поляризованным (пластинка находится между поляризатором и анализатором). Пучок линейно поляризованного излучения, распространяясь вдоль оптической оси кристалла, преобразуется в пучок лучей со сложной поляризационной структурой (эллиптичность меняется при увеличении углового расстояния от оси пучка).

При пропускании пучка со сложной поляризационной структурой через анализатор на экране возникает коноскопическая фигура. Если наблюдается коноскопическая фигура со светлым "мальтийским крестом", то часть излучения, которая могла бы сформировать коноскопическую картину с темным "мальтийским крестом", поглощается анализатором.

Во втором варианте призма расположена так, что падающий на призму луч (или ось пучка лучей) направлен перпендикулярно к оптической оси кристалла (рис. 1в, 1г). Если падающий луч не поляризован, то из призмы выходят два луча – обыкновенный (под углом отражения 45°) и необыкновенный (угол отражения меньше 45°) (рис. 1в). Если падающий луч обыкновенный, то из призмы также выходит обыкновенный луч; если падающий луч необыкновенный, то выходит один необыкновенный луч.

Для формирования пучка расходящихся лучей перед входной гранью *4* призмы устанавливался транспарант *9*.

Если падающий пучок лучей сформирован обыкновенными лучами (рис. 1г), то в направлении выходящего из призмы обыкновенного луча только при наличии анализатора наблюдается одна коноскопическая картина. Если ось пропускания анализатора вертикальна (проходят обыкновенные лучи), на экране наблюдается коноскопическая картина со светлым крестом. Если ось пропускания анализатора горизонтальна (проходят необыкновенные лучи), то в том же месте, где была картина со светлым крестом, появляется фигура с темным "мальтийским крестом". Это объясняется тем, что при распространении вдоль оптической оси кристалла в области призмы между гранями *5* и *6* (рис. 1г) из линейно поляризованного пучка формируется пучок лучей со сложной поляризационной структурой. В направлении, где проходил необыкновенный луч, коноскопическая картина отсутствует при любом положении анализатора. Причиной этого является отсутствие пучка лучей с необыкновенными лучами.

Если падающий пучок лучей сформирован необыкновенными лучами (рис. 1г), то коноскопические фигуры на экране отсутствуют, так как выходящего пучка с обыкновенными лучами нет, а пучок с необыкновенными лучами находится на достаточно большом угловом расстоянии от оптической оси и не может сформировать коноскопическую фигуру, соответствующую центральной части фигуры.

Если угол падения на входную грань *4* призмы для пучка с необыкновенными лучами увеличить так, чтобы ось выходящего из призмы пучка располагалась вдоль оптической оси кристалла (рис. 1д), то появятся коноскопические фигуры, дополнительные по отношению к фигурам для обыкновенного пучка. При повороте анализатора коноскопическая картина с темным крестом меняется на коноскопическую картину со светлым крестом.

При направлении в призму двух пучков с взаимно ортогональными поляризациями таким образом, чтобы оптическая ось кристалла была расположена между осями выходящих пучков с обыкновенными и необыкновенными лучами, формируется сложная совместная коноскопическая фигура.

Таким образом, наблюдение коноскопических фигур по второму варианту возможно без поляризатора, только с одним анализатором. Роль поляризатора играют область призмы между входной гранью *4* (рис. 1г) и отражающей гранью *6* и сама наклонная (отражающая) грань, разводящая данные пучки на определенный угол.

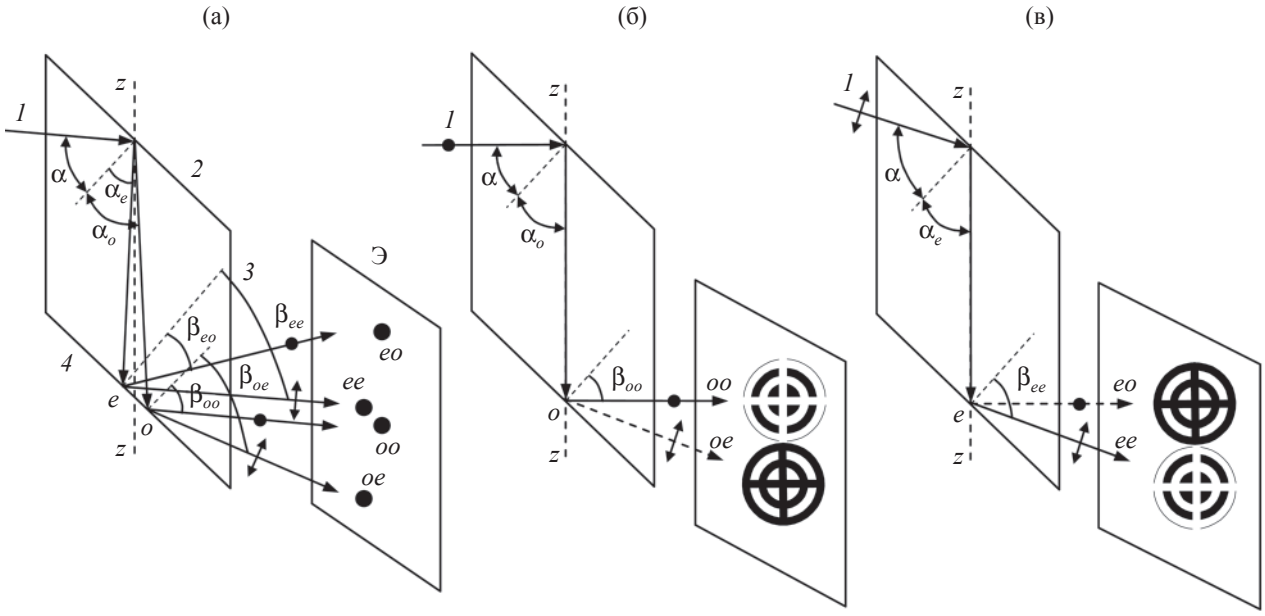


Рис. 3. Ход лучей в призме, изготовленной из кристалла ниобата лития. *1* – входная грань; *2*, *4* – боковые грани, *3* – выходная грань, *o* – обыкновенный луч, *e* – необыкновенный луч, *z* – оптическая ось кристалла, Э – экран, α – угол падения луча на отражающую грань. Углы отражения: α_o – луча *o*, α_e – луча *e*, β_{eo} – луча *eo*, β_{ee} – луча *ee*; β_{oo} – луча *oo*, β_{oe} – луча *oe*; падающий луч: а – неполяризованный, б – обыкновенный, в – необыкновенный.

Двойные коноскопические фигуры наблюдались без поляризатора и анализатора с призмой, изготовленной из кристалла ниобата лития, изображенной на рис. 3а (ромб Френеля). Размеры входной грани призмы 18×5 мм. Боковые грани наклонены под углом 45° к оптической оси кристалла. Луч неполяризованного излучения гелий-неонового лазера падает на входную грань *1* перпендикулярно к оптической оси кристалла и попадает на боковую грань *2*, от которой отражаются два луча – обыкновенный (*o*) и необыкновенный (*e*), под углами α_o и α_e:

$$n_o \sin\alpha = n_o \sin\alpha_o, \tag{1}$$

$$n_e \sin\alpha = n_e(\alpha_e)\sin\alpha_e. \tag{2}$$

Отраженные от грани *2* обыкновенные и необыкновенные лучи распространяются вблизи оптической оси кристалла ($n_e(\alpha_e) \approx n_o$, $\alpha_e < \alpha_o$) и попадают на противоположную боковую грань *4*. Углы падения на грань *4* для обыкновенного и необыкновенного лучей равны α_o и α_e соответственно. При отражении от грани *4* каждый из лучей (обыкновенный и необыкновенный) в общем случае создает по два луча (также обыкновенный и необыкновенный). Обыкновенный луч создает *oo* и *oe* лучи, которые отражаются под углами β_{oo} и β_{oe}:

$$n_o \sin\alpha = n_o \sin\beta_{oo}, \tag{3}$$

$$n_o \sin\alpha = n_e(\beta_{oe})\sin\beta_{oe}, \tag{4}$$

так как $n_e(\beta_{oe}) < n_o$, то $\beta_{oe} > \beta_{oo}$.

Необыкновенный луч создает лучи *eo* и *ee*, которые отражаются под углами β_{eo} и β_{ee}:

$$n_e(\alpha_e)\sin\alpha_e = n_o \sin\beta_{eo}, \tag{5}$$

$$n_e(\alpha_e)\sin\alpha_e = n_e(\beta_{ee})\sin\beta_{ee}, \tag{6}$$

поскольку $n_e(\beta_{ee}) < n_o$, то $\beta_{ee} > \beta_{eo}$.

В общем случае из кристалла выходят четыре луча *eo*, *ee*, *oo*, *oe* (первый индекс соответствует падающему лучу, второй – отраженному) и на экране Э наблюдаются четыре светлые точки. Их взаимное расположение и направление поляризации лучей изображено стрелками и точками на рис. 3а. Снос необыкновенных лучей происходит за счет небольшой непараллельности противоположных граней призмы.

Отметим некоторые ограничения на число выходящих из призмы лучей (рис. 3). Луч, отраженный от грани *2* и идущий вдоль оптической оси кристалла, сохраняет состояние поляризации (не изменяет его) и выходит из призмы один (рис. 3б, 3в). Для лучей, идущих в призме под углом к оптической оси, образуются два луча (обыкновенный и необыкновенный).

На рис. 3б, 3в приведен пример образования двойных коноскопических фигур в призме (ромбе Френеля), изготовленной из одноосного кристалла ниобата лития. Светлый "мальтийский крест" образуется при взаимодействии типа *oo* и *ee*, а темный – при взаимодействии типа *eo* и *oe*. Для наблюдения коноскопических фигур перед призмой устанавли-

вается транспарант, формирующий расходящиеся пучки.

В данных призмах (рис. 3) формируются и хорошо наблюдаются двойные коноскопические фигуры без поляризатора и анализатора. Роль поляризатора играют входная грань призмы (показатели преломления для обыкновенных и необыкновенных лучей разные) и наклонная грань, отражающая эти пучки под разными углами. Пучок, ось которого расположена под углом к оптической оси, не формирует коноскопическую фигуру. А пучок лучей, ось которого совпадает с оптической осью, преобразуется в пучок со сложной поляризационной структурой.

Роль анализатора выполняет наклонная грань призмы, разделяющая пучок со сложной поляризационной структурой на два пучка (на *s*- и *p*-компоненты, которые являются одновременно обыкновенным и необыкновенным лучами и имеют разные показатели преломления). Эти пучки выходят из призмы в разных направлениях. Один из них создает на экране коноскопическую фигуру со светлым "мальтийским крестом", другой – с темным "мальтийским крестом".

Двойные коноскопические фигуры хорошо наблюдаются с данной призмой в естественном свете невооруженным глазом без применения поляризатора и анализатора. Коноскопические фигуры окрашены за счет дисперсии света в кристалле ниобата лития.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Константинова А.Ф., Гречушников Б.Н., Бокуть Б.В., Валяшко Е.Г.* Оптические свойства кристаллов. Минск: Наука и техника, 1995. 302 с.
2. *Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П.* Основы кристаллофизики. М.: Наука, 1979. 640 с.
3. *Пикуль О.Ю., Алексеева Л.В., Повх И.В., Строганов В.И., Рудой К.А., Толстов Е.В., Криштоп В.В.* Особенности оптической системы для наблюдения коноскопических фигур больших размеров // Изв. вузов. Приборостроение. 2004. Т. 47. № 12. С. 53–55.
4. *Осипов Ю.В.* Интерференционно-поляризационные свойства кристаллооптической бифокальной линзы // Оптический журнал. 1998. Т. 65. № 3. С. 25–29.
5. *Осипов Ю.В.* Неинвариантность интерференции поляризованных волн на выходе двупреломляющей призмы Рошона // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 2. С. 100–101.
6. *Лобань А.Н.* Коноскопические эффекты в одноосных кристаллах $LiNbO_3$ и KH_2PO_4 // Бюлл. научн. сообщений / Под ред. Строганова В.И. Хабаровск: Изд-во ДВГАПС, 1996. № 1. С. 39–41.
7. *Строганов В.И., Толкунова Т.К., Шабалина Т.Н.* Разность хода в пластинках, изготовленных из кристалла кварца // Бюлл. научн. сообщений / Под ред. Строганова В.И. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2001. № 6. С. 55–58.