

Прибор для демонстрации интерференции поляризованных лучей и электрооптического эффекта в кристаллах

Введение

Интерференция поляризованных лучей и электрооптический эффект в кристаллах являются классическими явлениями кристаллооптики и описаны в учебниках [1,2,3,5] и монографиях [4,6,7, 8]. Обычно интерференцию наблюдают индивидуально при расположении кристалла между скрещенными или параллельными поляризатором и анализатором и освещении кристалла сходящимся пучком света. В демонстрациях применяют схему микроскопа и сфокусированную специальным объективом проекцию картины на экран [2,9]. Мы длительное время применяем новую схему для демонстраций. В схеме используется оптическая система, которая одновременно дает сходящийся на кристалле световой пучок и проектирует в расходящемся пучке яркую интерференционную картину большого размера на экран. При увеличении расстояния до экрана размер картины увеличивается в соответствии с увеличением сечения расходящегося пучка. При этом не нужно осуществлять фокусировку картины на экран. Экраном может быть стена или потолок большой аудитории. Такой оптической системой является широкоугольный светосильный окуляр Эрфле [10,11]. Возможность необычного и эффективного применения именно этого окуляра в схеме демонстрационного прибора [13] была нами обнаружена в результате испытаний имевшегося у нас набора различных окуляров и объективов.

Схема демонстрационного прибора

Схема прибора показана на рис. 1. Она состоит из источника света S (лампа накаливания 6 В, 6 Вт), окуляра Эрфле (коллектив из трех линз L_1, L_2, L_3), двух полярироидов P_1 и P_2 и ячейки Погекельса, изготовленной на основе кристалла DKDP (химическая формула KD_2PO_4).

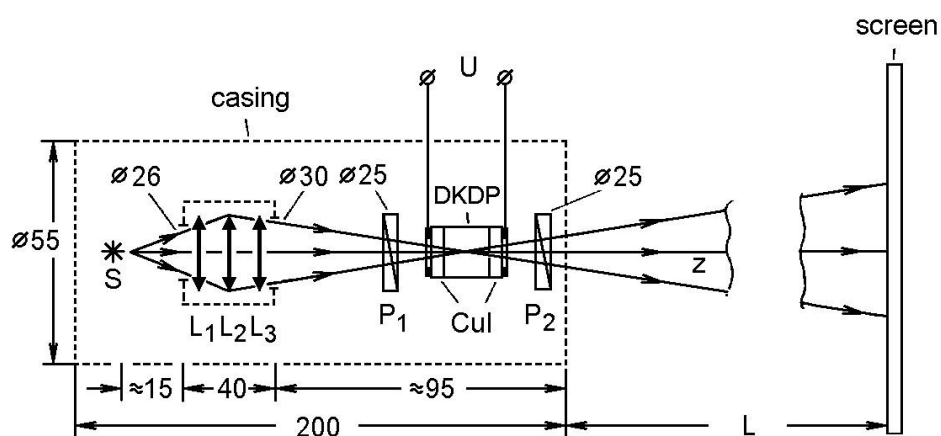


Рис. 1. Оптическая схема прибора для демонстрации интерференции поляризованных лучей и электрооптического эффекта в кристаллах.

Нами применен окуляр Эрфле с длиной корпуса 40 мм и диаметрами 26 и 30 мм его выходного и входного отверстий. Окуляр расположен выходным отверстием в сторону источника света.

Ячейка Поккельса изготовлена на основе кристалла с размерами $1 \times 1 \times 1$ см. Полированные рабочие грани, через которые проходит пучок света, перпендикулярны оптической оси Z кристалла. Этот кристалл был подарен нам коллегами из НТК "Институт Монокристаллов" Национальной Академии Наук Украины (г.Харьков). На рабочие грани кристалла мы наносили прозрачные проводящие [12] пленки CuI толщины ≈ 100 нм. Пленки наносились методом вакуумного термического напыления готового порошка CuI из ленточного молибденового испарителя. Эти пленки можно также получить иначе. На грани кристалла в вакууме термическим напылением осаждают пленки Cu толщиной примерно 25 нм. После нанесения пленок, кристалл помещают на столик закрытого эксикатора, на дне которого находится небольшой кусочек кристаллического иода. При химической реакции Cu с парами I_2 пленки меди через некоторое время полностью превращаются в прозрачные проводящие пленки CuI с указанной выше толщиной.

Кристалл затем помещался в пластмассовый корпус. Пленки CuI прижимались к тонким медным кольцам, которые соединялись с проводами для подачи на кристалл электрического напряжения U . Для повышения электрической изоляции воздушные промежутки в пластмассовом корпусе между пленками CuI на двух гранях кристалла заполняются воском или парафином. В этом же корпусе с двух сторон от кристалла расположены поляроиды P_1, P_2 . Поляроиды могут поворачиваться вокруг оптической оси Z схемы.

Все элементы схемы собраны в едином корпусе. Необходимые ориентировочные размеры показаны на рисунке в мм. Диаметры обозначены символом \varnothing . При сборке схемы расстояния от источника до отверстия окуляра и от окуляра до ячейки подбираются опытным путем для получения на экране наиболее яркой, однородной интерференционной картины.

Источник высокого регулируемого напряжения ($U_{\text{max}} \approx 15 \text{ кВ}$) мы изготовили по известному принципу высокочастотной трансформации постоянного низкого напряжения (4 В) в выпрямленное высокое. Источник имеет очень низкую мощность, что обеспечивает его электрическую безопасность.

В падающем на кристалл сходящемся пучке белого света осевой луч распространяется вдоль оптической оси Z одноосного кристалла DKDP. При скрещенных поляроидах и выключенном напряжении ($U = 0$) наблюдаемая интерференционная картина имеет хорошо известный вид [1,2]: она состоит из цветных концентрических колец, пересеченных черным крестом. На рис. 2а показана черно-белая фотография этой картины. Отчетливая картина наблюдается на экране при расстоянии L не менее 0,5 м. При дальнейшем увеличении L размер картины увеличивается. Например, при $L = 1,5$ м диаметр картины равен 0,5 м. Яркость картины достаточна для ее демонстрации на стене или потолке затемненной аудитории. При параллельных поляроидах черный крест в наблюдаемой картине становится белым.

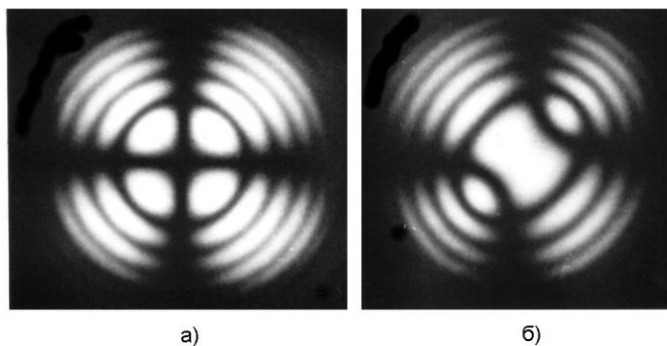


Рис. 2. Примеры интерференционных картин, наблюдаемых на экране. (а) — электрическое напряжение к кристаллу не приложено; (б) — на кристалл подано напряжение $U = 6$ кВ.

При подаче на кристалл электрического напряжения U картина определяется электрооптическим эффектом Поккельса [6] и соответствует интерференции в двухосном кристалле [1,2]. На рис. 2б показана фотография картины при $U = 6$ кВ и скрещенных поляроидах. При изменении U окраска в центре картины изменяется, что связано с дисперсией электрооптического эффекта.

Элементы теории линейного продольного электрооптического эффекта

Электрооптический эффект заключается в изменении показателя преломления среды под действием приложенного электрического поля. При линейной зависимости этого изменения от напряженности поля говорят о линейном электрооптическом эффекте (эффект Поккельса). При зависимости от квадрата напряженности эффект называют квадратичным (эффект Керра). Линейный электрооптический эффект наблюдается в кристаллах без центра инверсии и находит практическое применение для управления световыми пучками: амплитудная и фазовая модуляция излучения, модуляция добротности и синхронизация мод в лазерах, отклонение световых лучей.

Линейный электрооптический эффект можно рассматривать как частный пример явлений нелинейной оптики, связанный с квадратичной поляризацией $P_i^{(2)} = d_{ijk} E_j(\omega_1) E_k(\omega_2)$, где $E_j(\omega_1)$ — электрическое поле световой волны, $E_k(\omega_2)$ — электрическое поле низкой частоты ($\omega_2 \ll \omega_1$, в частности $\omega_2 = 0$).

Среди практически используемых кристаллов наиболее известны кристаллы дигидрофосфата аммония (сокращенное наименование ADP, химическая формула $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) и дигидрофосфата калия (KDP; KH_2PO_4). Используемый в настоящей работе кристалл DKDP отличается от KDP тем, что в нем атомы водорода замещены атомами дейтерия. Благодаря такому изменению химического состава электрооптические свойства в кристалле DKDP выражены значительно сильнее, чем в KDP.

Теория линейного электрооптического эффекта основана на трансформации оптической индикатрисы (эллипсоида показателей преломления) кристалла при действии электрического поля [6,7,8]. Для одноосных кристаллов с группой симметрии $42m$, к которой принадлежат кристаллы KDP и DKDP, расчет показателей преломления для случая электрического поля \mathbf{E} , действующего вдоль

оптической оси Z (продольный эффект), дает:

$$\begin{aligned} n_x &= n_o - \frac{n_o^3}{2} \cdot r \cdot E \\ n_y &= n_o - \frac{n_o^3}{2} \cdot r \cdot E \\ n_z &= n_e \end{aligned} \quad (1)$$

где X, Y, Z — главные оси эллипсоида при наличии поля; n_o, n_e — главные значения показателей преломления для обыкновенной и необыкновенной волны в отсутствие поля; r — электрооптический коэффициент, определяющий величину электрооптического эффекта для ориентации $E \parallel Z$ и зависящий от свойств кристалла.

Различие коэффициентов преломления для света, поляризованного вдоль осей X и Y говорит о том, что в электрическом поле кристалл ведет себя как двухосный (сечение эллипсоида показателей преломления плоскостью, нормальной к Z , дает эллипс, полуоси которого равны n_x, n_y ; направления наведенных полем оптических осей определяются нормальными к круговым сечениям эллипсоида с радиусами n_x, n_y).

В схеме демонстрационного прибора ось Z есть оптическая ось кристалла при выключенном электрическом поле ($U = 0$) и совпадает с осевым лучом сходящегося на кристалле светового пучка. Для этого направления имеет место чисто продольный электрооптический эффект. В наблюдаемых интерференционных картинах (Рис. 2) этот эффект проявляет себя в изменении интенсивности и цвета в центре картины. При $U = 0$ осевой луч проходит вдоль оптической оси Z и остается линейно поляризованным в направлении, которое задается поляроидом P_1 . Так как поляроид P_2 скрещен с P_1 , то в центре картины интенсивность $I = 0$.

При включении электрического поля эллипсоид показателей преломления деформируется так, что его главные оси X, Y ориентируются под углом 45° к направлению поляризации P_1 падающего на кристалл светового пучка (Рис. 3). При такой ориентации главных диэлектрических осей X и Y падающий на кристалл свет с поляризацией E_{P_1} будет в кристалле раскладываться на две компоненты E_x и E_y , поляризованные вдоль X и Y . Амплитуды A этих компонент одинаковы, а фазы $\varphi_{x,y}$ определяются показателями преломления n_x, n_y в соответствии с формулой (1):

$$E_{x,y} = A \cdot \exp(i\varphi_{x,y}) = A \cdot \exp\left\{i \frac{\omega}{C} \cdot \left[n_o \mp \frac{n_o^3}{2} \cdot r \cdot E\right] \cdot l\right\} \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi C \cdot \lambda^{-1}$ — частота света, l — длина кристалла вдоль оси Z .

Из (2) видно, что волны E_x, E_y на длине Z кристалла приобретают фазовый сдвиг Γ :

$$\Gamma = \varphi_y - \varphi_x = \frac{\omega \cdot n_o^3 \cdot r \cdot E \cdot l}{C} \quad (3)$$

Так как приложенное к кристаллу напряжение $U = El$, то Γ можно записать так:

$$\Gamma = \pi \cdot \frac{U}{U_{1/2}} \quad (4)$$

где

$$U_{1/2} = \frac{\lambda}{2 \cdot n_o^3 \cdot r} \quad (5)$$

есть напряжение, при котором фазовый сдвиг равен $\Gamma = \pi$. Поскольку при этом разность хода для двух волн равна $\Gamma \cdot \lambda \cdot (2\pi)^{-1} = \lambda \cdot 0,5$, то напряжение $U_{1/2}$ называют полуволновым.

Формула (4) показывает, что фазовый сдвиг между двумя распространяющимися в кристалле волнами с ортогональными поляризациями зависит от приложенного к кристаллу напряжения. При $U = 0$, $\Gamma = 0$ и поляризация проходящего через кристалл вдоль Z света не меняется и он не пропускается поляроидом P_2 . При $U = U_{1/2}$, $\Gamma = \pi$ и сложение ортогонально поляризованных волн в кристалле [1,3] даст на выходе из него в направлении Z свет с линейной поляризацией, повернутой на 90° относительно направления поляризации P_1 падающего пучка и такой свет пройдет через поляроид P_2 . При промежуточных значениях Γ (между 0 и π) прошедший через кристалл вдоль Z свет эллиптически поляризован и частично пропускается поляроидом P_2 . Таким образом, меняя напряжение на кристалле, можно управлять интенсивностью пропускаемого монохроматического света, т.е. осуществлять его амплитудную модуляцию. Не трудно показать, что отношение интенсивности I прошедшего через P_2 света к интенсивности I_0 света, падающего на кристалл, равно [6,7]:

$$\frac{I}{I_0} = \sin^2 \frac{\Gamma}{2} \quad (6)$$

Синусоидальная зависимость интенсивности прошедшего света, описываемая формулой (6), может быть измерена с помощью демонстрационного прибора, монохроматора видимого диапазона спектра и фотоумножителя, соединенного с микроамперметром. Для таких измерений прибор помещают на входную оптическую скамью монохроматора на расстоянии ≈ 60 см от входной щели монохроматора и проектируют центр интерференционной картины на центр щели. После выходной щели монохроматора помещают фотоумножитель, соединенный с микроамперметром. Устанавливают длину волны λ , для которой выполняются измерения. Изменяя напряжение U на кристалле, измеряют зависи-

мость $I(U)$ для этой λ по показаниям микроамперметра. Первый максимум этой зависимости очевидно будет получаться при $\Gamma = \pi$, т.е. при полуволновом напряжении $U_{1/2}$. По найденному полуволновому напряжению можно затем вычислить величину электрооптического коэффициента r из формулы (5). Из измерений $U_{1/2}(\lambda)$ для разных λ можно получить дисперсию этого коэффициента $r(\lambda)$. Данные по дисперсии $n_0(\lambda)$ можно найти в литературе. Так, например, для кристалла DKDP $n_0 = 1,5$ и $r = 23,6 \cdot 10^{-12} \text{ м} \cdot \text{В}^{-1}$ на длине волны $\lambda = 633 \text{ нм}$ (излучение He-Ne лазера) [6,8]. Из этих данных по формуле (103) находим $U_{1/2} \approx 4 \text{ кВ}$. Это значение $U_{1/2}$ можно использовать для контроля правильности результатов измерений.

Заключение

Описанный здесь демонстрационный прибор позволяет показывать яркую коноскопическую интерференционную картину большого размера и ее изменения при электрооптическом эффекте, а также делать измерения спектральной зависимости полуволнового напряжения.

Литература

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. –М.: Наука, 1970. –С.75.
2. Поль Р.В. Оптика и атомная физика. –М.: Наука, 1966. –С.316–320.
3. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.–Л.: ОГИЗ, 1947. – 632 с.
4. Меланхолин Н.М., Грум–Гржимайло С.В. Методы исследования оптических свойств кристаллов. –М.: Изд. АН СССР, 1954. –191 с.
5. Дитчберн Р. Физическая оптика. –М.: Наука, 1965. – 631 с.
6. Ярив А. Квантовая электроника и нелинейная оптика. – М.: Сов. радио, 1973. – 456 с.
7. Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. –М.: Мир, 1987.
8. Ярив А. Введение в оптическую электронику. –М.: Высш. школа, 1983. – С.231–244.
9. Грабовский М.А., Млодзеевский А.Б., Телесин Р.В. и др. Лекционные демонстрации по физике. –М.: Наука, 1972. –640 с.
10. Панов В.А., Кругер М.Я., Кулагин В.В. и др. Справочник конструктора оптико–механических приборов. –Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1980. –742 с.
11. Edmund Scientific. Optics and Optical Instruments Catalogue. №981 Â, 1998, P.3, Model # D41, 347.
12. Kokubun Y., Watanabe H., Wada M. Electrical Properties of CuI thin films // Jap. J. Appl. Phys. –1971. –10, №7. –P.64–867.
13. Ageev L.A., Yegorenkov V.D. A device for demonstrating interference fringes and electro–optic effect in crystals // Am. J. Phys. –1999. –67, №9. –P.837–838.