

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Могилевский государственный университет продовольствия»

Кафедра физики

**ИЗУЧЕНИЕ ДВОЙНОГО ЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ
ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО МИКРОСКОПА**

Методические указания
к лабораторной работе №14
по разделу «Оптика» курса общей физики для студентов всех специальностей
дневной и заочной формы обучения

Могилев 2014

УДК 539.1

Рассмотрены и рекомендованы к изданию на заседании кафедры физики
Протокол №11 от 02.07.2014

Составители

доктор физико-математических наук, доцент В.А. Юревич
ассистент А.А.Крюковская

Рецензент

кандидат физико-математических наук, доцент
А.С. Скапцов

УДК 539.1

© Учреждение образования
«Могилевский государственный
университет продовольствия»,
2014

Лабораторная работа №14. Изучение двойного лучепреломления с помощью поляризационного микроскопа

Цель работы: изучение анизотропии оптических свойств кристаллических веществ и явления двойного лучепреломления в этих средах. Цель работы в ходе её выполнения предусматривает задачи изучения устройства поляризационного микроскопа и измерения различия показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей.

Приборы и принадлежности: поляризационный микроскоп, кристаллы $NaCl$ и $KDP (KH_2PO_4)$, кварцевая пластинка, слюдяные пластинки.

Краткая теория

1 Оптическая анизотропия

Твёрдым телом называют агрегатное состояние вещества, характеризующееся постоянством формы и объёма – тепловые движения частиц в них представляют собой хаотические колебания частиц относительно положений равновесия.

Твёрдые тела подразделяются на *кристаллические* и *аморфные*.

Кристаллические тела – это твёрдые тела, имеющие упорядоченное, периодически повторяющееся расположение частиц. Во внутреннем строении твёрдых тел наблюдается дальний порядок – молекулы образуют кристаллическую решетку. Под этим понимают внутреннюю структуру физических тел, для которой характерно регулярное расположение частиц с периодической повторяемостью в трех измерениях.

В отличие от кристаллов *аморфным телам* присущ ближний порядок – их упорядоченное расположение повторяется на расстояниях, сравнимых с межатомными. В этом отношении такие тела сходны с жидкостями с тем различием, что подвижность частиц в аморфных телах довольно мала.

Характерной особенностью кристаллов является их *анизотропность* – зависимость физических свойств (упругих, механических, тепловых, электрических, магнитных, оптических) от направления. Одно из объяснений анизотропии состоит в том, что при регулярном расположении плотность частиц по разным направлениям внутри кристалла может быть в значительной степени неодинаковой. В кристаллической решётке регулярностью характеризуется также ориентация молекул в узлах структуры.

Кристаллы по электрическим свойствам относят к диэлектрикам, то есть к веществам, электрические заряды внутри которых связаны притяжением ядер и локализованы в атомах. Порождаемые этими зарядами собственные силовые поля, действующие внутри и вне молекул, заставляют их определённым образом взаимно ориентироваться. Поэтому вдоль разных направлений неодинаковой оказывается мера взаимодействия структурных частиц вещества, то есть различны их электрические и магнитные свойства. В этом состоит вторая причина анизотропности кристаллов.

Наиболее выражена и наглядна анизотропия оптических свойств. В её существовании можно убедиться, наблюдая закономерности хода световых пучков в ряде прозрачных кристаллических сред (под *световым пучком* понимают связку световых лучей близкого направления; образующие пучок *лучи* рассматриваются как *линии*, *вдоль которых распространяется световая энергия*, то есть с направлением луча совпадает направление распространения световой волны). При рассмотрении этих закономерностей обычно предполагалось, что среда оптически изотропна, то есть скорость света в каждой точке среды не зависит ни от направления распространения светового пучка, ни от характера поляризации пучка.

Напомним, что свойство *поляризации световых пучков* означает определённую упорядоченность плоскостей колебаний светового вектора в образующих пучок волнах (*световым* называют вектор напряжённости волнового электрического поля, перпендикулярного направлению распространения луча – колебания электрического вектора в световой волне поперечны). Например, пучок является *линейно поляризованным*, если плоскости колебаний в составляющих его лучах параллельны. Поляризованные пучки обычно получают при пропускании света через несложные оптические устройства, называемые *поляризаторами* и образованные особо рода кристаллами.

Исследования показали, что при обычных условиях газообразные, жидкие и твердые аморфные диэлектрики оптически изотропны. В то же время почти все кристаллические диэлектрики оптически анизотропны.

Закономерности распространения света в любой среде (изотропной или анизотропной) определяются наложением первичной (вошедшей в вещество извне) волны и вторичных волн, переизлучаемых молекулами, атомами или ионами среды. Эти структурные элементы чаще всего представляются дипольными излучателями – элементарными антеннами, взаимодействующими через первичное и переизлучённое электромагнитное поле. Поэтому оптические свойства среды полностью обусловлены электрическими свойствами этих элементарных излучателей, их взаимным расположением и взаимодействием излучённых ими полей друг с другом. Реакция совокупности излучателей на приложенное (вошедшее) извне световое поле оказывается различной в зависимости от направления его действия, то есть от направления светового пучка.

2 Двойное лучепреломление

Изотропность или анизотропность результирующего поля, образованного наложением первичных и переизлучённых волн, зависит от характера симметрии решетки кристалла.

Кристаллы с кубической кристаллической решеткой являются оптически изотропными (например, каменная соль – $NaCl$ или алмаз). В каждом из таких кристаллов показатель преломления представляет постоянную величину, свойственную данному материалу, и кристаллические вещества ведут себя так же, как и некристаллические тела, подобные стеклу.

Кристаллы с асимметричной решеткой или же решеткой с небольшой степенью симметрии оказываются оптически анизотропными (кварц, слюда, корунд, циркон). При вхождении светового пучка в такой кристалл он разделяется на два пучка, которые идут в разных направлениях и поляризованы. Это явление носит название *двойного лучепреломления*.

Двойное лучепреломление впервые было обнаружено во второй половине 17-го столетия в кристаллах исландского шпата. Эти кристаллы имеют форму ромбоэдра, т.е. ограничены шестью ромбами с тупыми углами $\alpha=101^{\circ}52'$ (так, как изображено на рисунке 1). *Оптическая ось* совпадает с диагональю ромбоэдра MN , соединяющей вершины M и N (в кристаллографии направление оптической оси выделяют особо – вдоль её линии оба луча могут следовать, не разделяясь). В этих вершинах углы между ребрами на всех сходящихся гранях равны α .

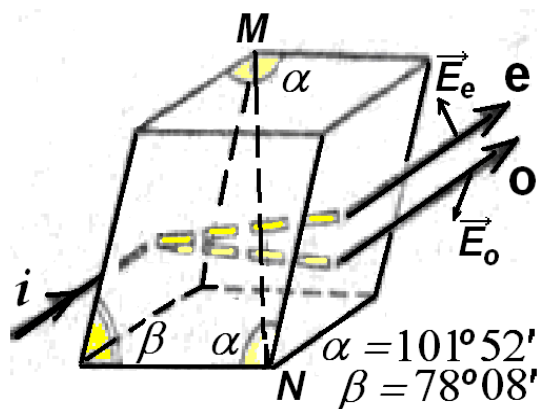


Рисунок 1 – Двойное лучепреломление в одноосном кристалле

Если на кристалл падает достаточно узкий пучок света i , то в результате двойного лучепреломления из кристалла выходят два пространственно разделенных пучка света o и e , параллельных падающему пучку. Оба луча линейно поляризованы – направления колебаний светового вектора в обоих лучах взаимно перпендикулярны. Уже отмечено, что двойное лучепреломление отсутствует только в том случае, когда свет падает нормально на плоскую поверхность кристалла, вырезанную перпендикулярно его оптической оси. Это означает, что только вдоль оптической оси обыкновенный и необыкновенный лучи распространяются с одинаковыми скоростями. *Главным сечением кристалла* (главной плоскостью кристалла) называют плоскость, в которой лежат падающий луч и оптическая ось кристалла, проходящая через точку падения луча.

Итак, световым лучам, возникающим при двулучепреломлении, присущи следующие свойства.

Во-первых, оба луча различаются показателями преломления n_o и n_e ; соответственно различна скорость света в обыкновенном и необыкновенном луче.

Во-вторых, вдоль оптической оси o -луч и e -луч распространяются с одинаковыми скоростями.

В-третьих, o -луч и e -луч поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях: направление колебаний светового вектора в обыкновенном луче перпендикулярно главному сечению, в необыкновенном луче световой вектор колеблется в главной плоскости кристалла.

В-четвёртых, яркость обыкновенного и необыкновенного лучей одинакова и на выходе из кристалла лучи идут в одинаковом направлении.

Кристаллу исландского шпата, схема хода лучей в котором изображена выше, присуще единственное направление, вдоль которого двойное лучепреломление не наблюдается. Кристаллы в зависимости от типа симметрии их структуры бывают одноосные и двуосные, т.е. имеют одну или две оптические оси. Двойное лучепреломление было обнаружено и в двуосных кристаллах, причем оказалось, что в этом случае скорости обоих лучей зависят от направления их распространения в кристалле. Поэтому оба преломлённых луча являются необыкновенными. Вдоль каждой из двух оптических осей двуосного кристалла скорости обоих лучей одинаковы и двойное лучепреломление отсутствует.

Двулучепреломляющие кристаллы обладают свойством *дихроизма* — различного поглощения света в зависимости от ориентации светового вектора в волне. На основе дихроичных кристаллов в виде тонких пленок, в которые вкраплены кристаллики веществ с сильно выраженным дихроизмом, изготавливают поляроиды — элементы поляризаторов (поляроиды обычно называют *никóлями* — по имени шотландского исследователя Никóля, первым предложившего поляризационное устройство в виде призмы особой формы).

Наглядно различие в скоростях распространения обыкновенного и необыкновенного лучей в одноосных кристаллах (показателях преломления этих лучей) удобно представить в виде пространственных фигур, образованных концами векторов этих скоростей. Поверхность, проходящая через концы радиусов-векторов скоростей, имеет форму эллипсоида и называется *оптической индикатрисой среды*. Оси симметрии этого эллипсоида взаимно перпендикулярны и определяют три главных направления в среде. Сечения индикатрис, проходящие через центр поверхности так, что оптическая ось лежит в секущей плоскости, представляют собой эллипсы (рисунок 2). На этом рисунке эллиптические сечения индикатрис изображены на фоне окружностей, характеризующих неизменность скоростей обыкновенных лучей в зависимости от направления. Линией OO' указано направление оптической оси кристалла.

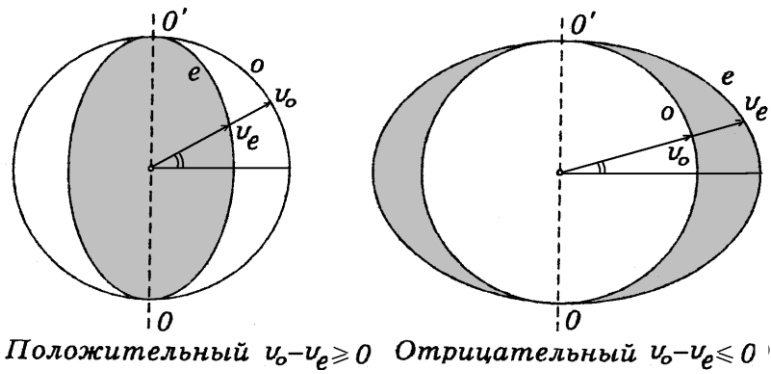
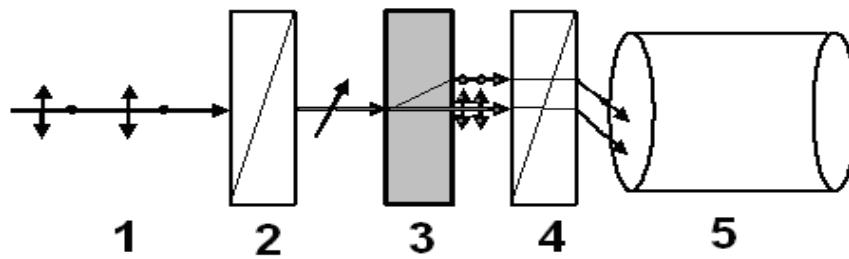


Рисунок 2 – Сечение поверхностей лучевых скоростей кристаллов (характеризованы два типа одноосных двулучепреломляющих кристаллов)

3 Хроматическая поляризация в схеме поляризационного микроскопа

Как уже было отмечено, что направления o - и e -луча при выходе из анизотропного кристалла совпадают. Пучок света разлагается исследуемым кристаллом на две составляющих, несущих в себе световые волны с различной скоростью. Поскольку эти лучи получены из одного исходного пучка, то они когерентны и должны давать интерференционную картину, распределение интенсивности света и окраска полос на которой зависит от длины волн и оптической разности хода $\Delta = (n_o - n_e)l$. Разность хода o - и e -лучи, образующие оба пучка, набирают при прохождении через слой кристалла толщины l за счёт различия n_o и n_e . Однако без использования системы поляроидов (никóлей) наблюдать интерференционную картину невозможно, поскольку оба пучка поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях.

В схеме поляризационного микроскопа (на рисунке 3 она ориентирована горизонтально) анизотропный кристалл помещают между двумя никóлями. Каждый из никóлей поляризует световой пучок в соответствии с заданной ориентацией собственной оси поляризации. Поворотом одного из них можно изменять взаимное положение этих осей. Световой пучок 1, первоначально поляризованный поляроидом 2 (поляризатором) в некоторой плоскости, разлагается исследуемым кристаллом 3 на два луча, поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях и идущих с разной скоростью. Вторым никóлем 4 (анализатор) выделяет из обоих лучей колебания, происходящие лишь в той плоскости, которую он пропускает, поэтому после анализатора возможна интерференция лучей. Интерференционная картина наблюдается через окуляр 5 и определённым образом окрашена.



1 – проходящий пучок, идущий от осветителя, 2 – поляризатор;
3 – шлиф анизотропного кристалла; 4 – анализатор, 5 – окуляр микроскопа

Рисунок 3 – Упрощённая схема хода лучей в поляризационном микроскопе

Явление интерференции обыкновенного и необыкновенного пучков носит название *хроматической поляризации* – на картине отдельно наблюдаются по-разному окрашенные полосы или пятна. Хроматическая поляризация или разделение светового поля на цветовые фрагменты в результате прохождения через кристалл и систему николей вызвана тем, что проходящий пучок белого света несёт в себе спектральные составляющие разных длин волн. Для каждой из них вследствие дисперсии также различен показатель преломления. На наблюдаемой через окуляр картине положения интерференционных максимумов для разных длин волн различны. При перекрытии положений этих максимумов в разной комбинации налагаемых длин волн их смешение способно дать разные цветовые оттенки с различной яркостью. Поэтому картина интерференции в плоскости наблюдения оказывается разделённой (фрагментированной) по окраске. Кроме того, цветовые наборы в окрашенных фрагментах плоскости, их называют также *изохроматами*, могут чередоваться, изменять яркость при вращении анализатора. Это происходит из-за того, что с его поворотом меняется взаимное положение осей поляризаторов и меняется условия пропускания тройной системы поляризатор – анизотропный кристалл – анализатор. Смещение цветов в новом положении анализатора даёт другой результат: характер окраски в данном направлении изменяется. В целом, наблюдаемый цветовой набор оказывается критичным к повороту анализатора. Наиболее резким является различие окраски и освещенности при параллельном и скрещённом положении осей обоих николей. Отметим, что при отсутствии образца кристалла поворот осей николей приводит только к изменению интенсивности светового пучка, проходящего через их систему (это наблюдается на установке по изучению закона Малю).

Хроматическая поляризация представляет собою весьма чувствительный метод для обнаружения двойного лучепреломления. При малом значении разности коэффициентов преломления $n_o - n_e$ двойное лучепреломление трудно обнаружить путем непосредственного наблюдения обыкновенного и необыкновенного лучей. При рассматривании же пластинки даже из слабо анизотропного вещества между скрещёнными николями поле просветлится, что и станет доказательством наличия двойного лучепреломления.

На явлении хроматической поляризации основаны приёмы измерения физических свойств тонких планарных слоев используемых в интегральной

оптике и лазерной физике нелинейных (резонансно поглощающих и просветляющихся) сред. В случае особо тонких слоев в субмикронном диапазоне толщины обычные геометрические и оптические методы измерения толщины, поглощения и параметров внутренней структуры веществ не применимы. Тонкие поверхностные слои на основе полупроводниковых квантоворазмерных структур и люминесцентных кристаллических сред ныне широко используются при создании оптических элементов устройств быстродействующих средств обработки информации. Задачи изучения их свойств необходимо решать для разработки современных технологий.

Измерение разности хода, различия показателей преломления o - и e -лучей, толщины шлифа кристалла в ходе выполнения настоящей лабораторной работы будем проводить, наблюдая следствия хроматической поляризации с использованием таблиц, связывающих величину разности хода с окраской изохроматов и приведенных ниже в разделе инструкций.

Порядок выполнения работы

Кристаллы различных веществ создают различное по величине и направлению двойное лучепреломление. Поэтому, пропуская через них поляризованный свет и измеряя его изменение после прохождения, можно определять оптические характеристики изучаемых кристаллов и производить минералогический анализ. Для этого применяется поляризационный микроскоп, простейшая схема которого изображена на рис.4.



Рисунок 4 – Общий вид и состав поляризационного микроскопа

Упражнение 1. Наблюдение двойного лучепреломления в кристалле *KDP*.

- 1 Включить осветитель отраженного света.
Установить объект с кратностью увеличения 4*. Анализатор убрать.
- 2 Поместить кристалл *KDP* на предметный столик микроскопа и добиться резкости изображения.
- 3 Совместив одно из изображений с центром поля зрения и вращая столик микроскопа, наблюдать поочередное погасание и просветление изображений поверхности образца.
- 3 Зарисовать результаты опытов.
- 4 Провести аналогичное наблюдение, используя кристаллы поваренной соли, и сравнить результаты наблюдений с прежними.

Упражнение 2. Определение толщины шлифа кристалла кварца и значения обыкновенного показателя преломления.

- 1 Вставить объектив с кратностью 10*.
- 2 Поместить на столик микроскопа кристалл кварца.
- 3 Сфокусировать нижнюю поверхность кристалла и отметить показания микроскопа h_1 .
- 4 Вращая микровинт, добиться резкого изображения верхней поверхности кристалла. Отметить показания микровинта h_2 . Провести аналогичные измерения не менее 3 раз, а результаты занести в таблицу 1.
- 5 Измерить толщину кристалла h микрометром.
- 6 Рассчитать видимую толщину $h_B = (h_1 - h_2)$, показатель преломления по формуле $n_0 = h / h_B$.
- 7 Результаты измерений и расчёта представить в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерений

N	h_1	h_2	$h_B = h_1 - h_2$	h	$n_0 = h / h_B$	\bar{n}_0
1						
2						
3						

Упражнение 3. Определение толщины кварцевой пластинки (d).

- 1 На предметный столик микроскопа поместить между скрещенными николями кварцевую пластину так, чтобы она имела наиболее интенсивную окраску. Для этого, вращая столик микроскопа с пластинкой, предварительно найти положение наибольшего затемнения поля зрения, а затем повернуть столик микроскопа на 45° против часовой стрелки.
- 2 Ввести в щель тубуса микроскопа компенсатор (кварцевый клин) и наблюдать изменение интерференционной картины при движении клина: окраска падает до черной или повышается в порядке шкалы Ньютона. Во втором случае столик следует повернуть на 90° , и тогда компенсация разности хода (получение затемнения) может быть достигнута без труда.

3 Зная толщину клина для цвета изохромат соответствующего порядка (погашенного при наложении на пластину), найти искомую толщину пластинки по таблице интерференционных цветов при скрещенных и параллельных николях (таблица 2). Тёмная полоса затемнения означает, что толщина пластинки и толщина клина одинаковы. Передвигая клин, добиться затемнения. После этого убрать кварцевую пластинку и по цвету клина найти по таблице его толщину. Это величина и будет толщиной пластинки.

Таблица 2 – Определение толщины клина по интерференционным цветам

Толщина клина, мм	При скрещенных николях	При параллельных николях	Порядок
1	2	3	4
0,15 0,14 0,13 0,12 0,11	Красная Желтая Зеленая Синяя Пурпурная	Зеленая Серо-голубая Красная Желтая Зеленая	Третий
0,10	Красная	Голубовато-зеленая	Второй
0,09 0,08 0,07 0,06 0,05	Оранжевая Зеленая Небесно-голубая Синяя Пурпурно-красная	Темно-голубая Пурпурная Золотисто-желтая	
0,04 0,03 0,02 0,01	Оранжевая Желтая Зеленая Черная	Синяя Голубая Бурая Белая	Первый

Упражнение 4. Определение разности хода (Δ) и различия показателей преломления ($n_0 - n_c$) слюдяной пластинки известной толщины. Толщина слюдяной пластинки $l = 0,01$ мм.

- 1 На предметный столик при скрещенных николях поместить слюдяную пластинку.
- 2 Поворотом столика добиться максимального затемнения.
- 3 Поворотом столика против часовой стрелки на 45° установить максимальное просветление.
- 4 Выдвинуть кварцевый клин (компенсационную пластинку) и медленно двигать его в тубус микроскопа до появления компенсации (темноты или чаще серого цвета первого порядка при неполной компенсации). Если при продвижении клина компенсации не получилось, необходимо повернуть кристалл на 90° (до следующего максимального просветления). Чтобы

проверить наличие компенсации, следует проводить проверку действия клина в двух положениях кристалла.

5 Добившись компенсации, определить разность хода. Для этого снова выдвинуть кварцевый клин и наблюдать порядок смены интерференционных цветов от момента компенсации до момента полного выдвижения клина из прорези тубуса. Например, кристалл имеет жёлтую окраску. При выдвигании кварцевого клина от момента компенсации жёлтый цвет (несколько иного оттенка) повторится еще один раз. Следовательно, жёлтый цвет кристалла принадлежит 2-ому порядку, что отвечает разности хода $\Delta \approx 850$ нм.

6 Определив разность хода Δ , величину разности показателей преломления ($n_o - n_e$) установить по номограмме цветов интерференции Мишеля-Леви (учитывая, что $l = 0,01$ мм).

Контрольные вопросы

- 1 Объяснить, что такое оптическая анизотропия кристалла?
- 2 Какое явление называется двойным лучепреломлением? Чем отличаются обыкновенный луч от необыкновенного?
- 3 Дать определение оптической оси кристалла.
- 4 Что такое одноосные и двуосные кристаллы?
- 5 Что понимают под оптической индикатрисой двулучепреломляющего кристалла?
- 6 Как различаются между собой положительные и отрицательные кристаллы?
- 7 Какое свойство кристаллов называют дихроизмом?
- 8 Как объяснить интерференцию поляризованных лучей?
- 9 Что такое хроматическая поляризация?
- 10 Где применима хроматическая поляризация?

Список использованных источников

- 1 Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976. – 746 с.
- 2 Золотарев В.М. Физическая оптика. – СПб: СПб ГИТМО, 2001.– 607 с.
- 3 Шубников А.В. Основы оптической кристаллографии. М.: изд. АНССР, 1958. – 315 с .
- 4 Стойбер Р., Морзе С. Определение кристаллов под микроскопом. М.: Мир, 1984. – 185 с.
- 5 Чернов К.А. и др. Современная кристаллография. В 4 т., т. 3,4. – М.: Наука, 1981. – 850 с.