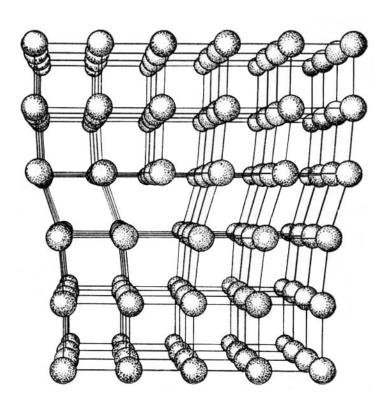
Н.В. Никоноров, А.К. Пржевуский, В.А. Асеев, А.И. Игнатьев, Е.С. Каева, Е.Н. Маколкина, А.С. Рохмин, А.М. Ульяшенко

# ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

ЧАСТЬ 1: ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ДЕФЕКТЫ КРИСТАЛЛОВ И СТЕКОЛ

Учебное пособие по выполнению лабораторного практикума



Санкт-Петербург 2005

### МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

Н.В. Никоноров, А.К. Пржевуский, В.А. Асеев, А.И. Игнатьев, Е.С. Каева, Е.Н. Маколкина, А.С.Рохмин, А.М. Ульяшенко

# ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

## ЧАСТЬ 1: ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ДЕФЕКТЫ КРИСТАЛЛОВ И СТЕКОЛ

Учебное пособие по выполнению лабораторного практикума



Санкт-Петербург 2005 Н.В. Никоноров, А.К. Пржевуский, В.А. Асеев, А.И. Игнатьев, Е.С. Каева, Е.Н. Маколкина, А.С. Рохмин, А.М. Ульяшенко. Оптическое материаловедение. Часть 1: Оптические свойства и дефекты кристаллов и стекол. Учебное пособие к выполнению лабораторных работ по курсу «Оптическое материаловедение». СПб: СПбГУ ИТМО, 2005 – 73 стр.

Пособие содержит описание пяти лабораторных работ по курсу «Оптическое материаловедение». Эти лабораторные работы посвящены изучению оптических свойств и дефектов кристаллов и стекол. Каждая лабораторная работа содержит краткий обзор необходимых теоретических сведений, порядок и условия проведения работы, контрольные вопросы для самопроверки.

Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения, оптотехники , фотоники и оптоинформатики в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений обучающихся по направлениям подготовки бакалавров и магистров 551900 — Оптотехника и 554900 — Фотоника и оптоинформатика.

© Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики 2005.

© Н.В. Никоноров, А.К. Пржевуский, В.А. Асеев, А.И. Игнатьев, Е.С. Каева, Е.Н. Маколкина, А.С. Рохмин, А.М. Ульяшенко, 2005.

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Настоящее пособие открывает цикл лабораторных работ по базовому курсу «Оптическое материаловедение», входящему общие профессиональные дисциплины. Этот курс с некоторыми отличиями читается студентам высших учебных заведений, обучающихся по двум 551900 направлениям: Оптотехника И 554900 Фотоника и оптоинформатика. Первые пять лабораторных работ объединены в общий раздел под названием «Часть 1: Оптические свойства и дефекты кристаллов и стекол». В работах рассмотрены основные вопросы, связанные с изучением оптических и спектральных свойств оптических материалов – кристаллов и стекол. Рассмотрены вопросы измерения показателя преломления объемных оптических материалов и планарных волноводных структур. На примере лазерных материалов рассмотрены отличительные особенности спектров поглощения кристаллов и стекол. Рассмотрены вопросы исследования ориентации кристаллов, а также изучения дефектов в них.

Целью настоящего лабораторного практикума является обучение студентов принципам и приемам самостоятельных исследований оптических и спектральных свойств кристаллов и стекол, методике обработки и анализу полученных результатов. В пособии сформулированы задания по лабораторным работам, описаны схемы конкретных методов измерения и методики выполнения работы. Приведены требования к отчету и контрольные вопросы.

### Лабораторная работа №1. ШТАРКОВСКАЯ СТРУКТУРА СПЕКТРОВ ИОНА Nd<sup>3+</sup> В КРИСТАЛЛАХ И СТЕКЛАХ

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ**: изучение явления неоднородного уширения спектральных линий на основе сопоставления штарковской структуры спектров поглощения стекол и кристаллов, активированных ионами неодима.

**ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ:** лазерные стекла и кристалл калиевогадолиниевого вольфромата, активированный ионами неодима.

#### ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ В РАБОТЕ:

- 1. Измерение зависимости величины оптической плотности от длины волны для образцов неодимовых кристаллов и стекол в интервале длин волн 550-620 нм;
- 2. Построение спектров поглощения  $k(\lambda)$  стекол и кристаллов. Сравнение штарковской структуры этих образцов.

#### СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

Неупорядоченность структуры является одним из важнейших, фундаментальных свойств стекол. В случае активированных стекол из-за неупорядоченности структуры сила и симметрия кристаллического поля в местах расположения ионов активатора меняются в некоторых пределах при переходе от одного активаторного центра к другому. Вследствие этого в ансамбле активаторных центров обнаруживаются различия в положении одноименных возбужденных уровней i относительно *основного* состояния  $\theta$  (рис.1, а). В результате электронные переходы  $\theta \to i$  (стрелки снизу вверх), обусловливающие поглощение света с энергией квантов  $E = E_i - E_0$ , где  $E_i$  и  $E_0$  - энергии уровней i и  $\theta$  соответственно, наблюдаются при варьировании энергии возбуждающего света в некотором диапазоне  $[E - \Delta E/2; E + \Delta E/2]$ . Величина  $\Delta E$  (рис.1, б) характеризует степень неоднородного уширения энергетического уровня i и - как следствие - полосы оптических электронных переходов  $\theta \to i$ .

Наиболее ярко неоднородное уширение спектральных линий проявляется в спектрах f-f-переходов редкоземельных ионов (РЗИ). В зависимости от типа активатора эти переходы наблюдаются в разных частях спектрального диапазона, простирающегося от ближней УФ до ИК области. Следует отметить, что для РЗИ в свободном состоянии переходы между различными уровнями электронной конфигурации 4f<sup>n</sup> (f-f-переходы) запрещены по четности правилами отбора Лапорта. Однако при введении РЗИ в кристаллы или стекла запрет на такие переходы частично снимается по действием низкосимметричной составляющей кристаллического поля активируемой среды, в результате чего между различными 4f-состояниями

редкоземельных активаторов наблюдаются малоинтенсивные переходы электронов в поглощении и люминесценции.

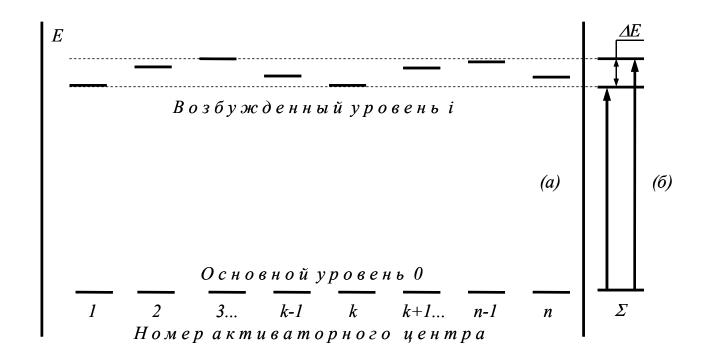


Рис. 1. Неоднородное уширение энергетического уровня активатора в стекпе

Поскольку в случае *f-f*-переходов и основное, и возбужденные состояния являются состояниями одной и той же электронной конфигурации  $4f^n$ , то у потенциальных кривых возбужденных состояний отсутствует сдвиг их минимумов относительно минимума потенциальной кривой основного состояния. По этой причине, а также в силу хорошей экранированности конфигурации  $4f^n$  от внешних воздействий f-f-переходам люминесценции сравнительно отвечают поглощении И спектральные линии и полосы. В случае активированных кристаллов ширина линий составляет величину порядка 10 см<sup>-1</sup>, а спектры поглощения и люминесценции демонстрируют четко выраженную штарковскую Неоднородное энергетических уровней структуру. уширение редкоземельного активатора в стеклах увеличивает ширину тех же спектральных линий во много раз, поэтому штарковская структура его спектров поглощения И люминесценции оказывается размытой, характеризуется меньшим числом надежно регистрируемых максимумов в полос поглощения или люминесценции, обусловленных электронными переходами с участием разных термов активатора.

Количественной характеристикой, описывающей ослабление зондирующего света поглощающей средой, является величина оптической плотности d. Способ ее определения поясняет рис.2.

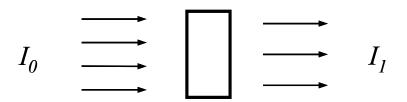


Рис. 2. Схема прохождения параллельного пучка света через поглощающую среду.

Если  $I_0$  - интенсивность света, падающего на исследуемый образец, а  $I_1$  - интенсивность света, прошедшего через образец, то величина оптической плотности рассчитывается из соотношения:

$$d = \lg \left( I_0 / I_l \right) \tag{1}$$

Зная величину d, можно определить коэффициент поглощения среды:

$$k = d/l, (2)$$

где l - толщина образца в сантиметрах. Из (2) следует, что единицей измерения коэффициента поглощения является [см $^{-1}$ ]. Величины d и k, при прочих равных условиях, пропорциональны концентрации ионов активатора в исследуемой среде. Таким образом, если известно сечение поглощения активатора на длине волны, то можно по величине d или k судить о концентрации активатора в конкретном образце.

Для измерения была выбрана самая интенсивная полоса поглощения ионов  $\mathrm{Nd}^{3+}$ , приходящаяся на желтую область спектра (550 - 620 нм) и обусловленная электронными переходами  $^4I_{9/2} \to ^4G_{5/2}$ ,  $^2G_{7/2}$ . Предметом анализа спектров поглощения неодимовых стекол и кристалла является количество регистрируемых максимумов в спектрах названной полосы, их положение ( $\lambda_{max}$ ) и полуширина ( $\Delta\lambda_{1/2}$ ), величина коэффициентов поглощения наиболее интенсивных линий ( $k_{max}$ ) в спектре каждого исследуемого объекта.

В работе для измерения оптической плотности использован спектрофотометр С $\Phi$ -26.

#### ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ СФ-26

Спектральный диапазон, нм	от 186 до 1100
Относительное отверстие монохроматора	1:11
Диапазон показаний шкалы коэффициентов пропускания, %	<b>6</b> от 0 до 110
Диапазон измерений коэффициента пропускания, (%)	от 3 до 100
Основная погрешность измерений коэффициента пропуска	<b>К</b> ИН
в области спектра от 190 до 1100 нм, % абс.	≤ 1,0
Величина рассеянного излучения, % абс.:	
при длине волны 200 нм	≤ 1,0

в видимой и ближней инфракрасной областях спектра  $\leq 0.2$  Источник питания — сеть  $220\pm22$  B, 50 Гц. Потребляемая мощность, B•A 170 Габаритные размеры спектрофотометра, мм  $930\times590\times280$  Масса спектрофотометра, кг

### ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СПЕКТРОФОТОМЕТРА СФ-26

Спектрофотометр СФ-26 предназначен для измерения коэффициента пропускания T исследуемого образца, равного отношению интенсивности потока излучения  $I_1$ , прошедшего через измеряемый образец (Рис.2), к интенсивности потока излучения  $I_0$ , падающего на измеряемый образец (или прошедшего через контрольный образец, коэффициент пропускания которого принимается за единицу), и выражаемого формулой:

$$T = \frac{I_1}{I_0} \cdot 100$$
 (%)

Измерение производится по методу электрической автокомпенсации. В монохроматический поток излучения поочередно вводятся контрольный и измеряемый образцы. При введении контрольного образца стрелка измерительного прибора устанавливается на деление 100% регулировкой ширины щели, а величину установившегося при этом светового потока принимают за 100% пропускания. При введении в поток излучения измеряемого образца стрелка измерительного прибора отклоняется пропорционально изменению потока, величина коэффициента пропускания отсчитывается по шкале, откалиброванной в процентах пропускания или единицах оптической плотности.

### УСТРОЙСТВО СПЕКТРОФОТОМЕТРА СФ-26 Оптическая схема

Оптическая схема монохроматора — автоколлимационная. Излучение от источника 1 (рис. 3) или 1' падает на зеркальный конденсор 2, который направляет его на плоское поворотное зеркало 3, и дает изображение источника излучения в плоскости линзы 4, расположенной вблизи входной щели 5. Прошедшее через входную щель излучение падает на зеркальный объектив 6 и, отразившись, параллельным пучком направляется на призму 7.

Пройдя призму под углом, близким к углу наименьшего отклонения, отразившись от ее зеркальной грани, диспергированный пучок направляется обратно на объектив и фокусируется им на выходной щели 8, расположенной входной щелью. При над вращении призмы монохроматическое излучение различных длин волн проходит через выходную щель 8, линзу 9, контрольный или измеряемый образец, линзу 10 помощью поворотного зеркала 11, собирается И, c светочувствительном слое одного из фотоэлементов 12 или 13.

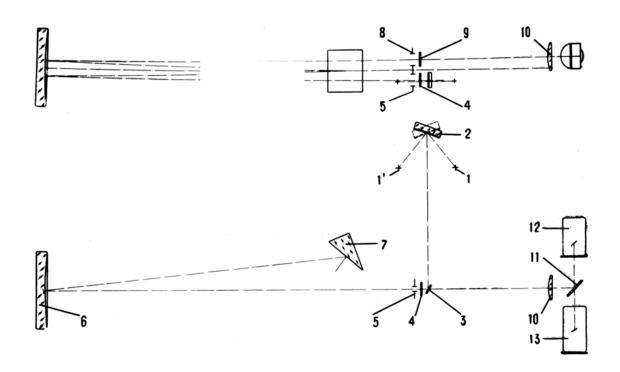


Рис. 3. Оптическая схема спектрофотометра СФ-26.

Объектив представляет собой сферическое зеркало с фокусным расстоянием 500 мм. Диспергирующая призма имеет преломляющий угол 30°, основание 30 мм и эффективный диаметр 44 мм. Призма, линзы и защитные пластинки изготовлены из кварцевого стекла с высоким коэффициентом пропускания в ультрафиолетовой области спектра. Для обеспечения работы спектрофотометра в широком диапазоне спектра используются два фотоэлемента и два источника излучения сплошного спектра. Сурьмяно-цезиевый (Sb-Cs) фотоэлемент с окном из кварцевого стекла применяется для измерений в области спектра от 186 до 650 нм, кислородно-цезиевый фотоэлемент — для измерений в области спектра от 600 до 1100 нм. Длина волны, при которой следует переходить от измерений с одним фотоэлементом к измерениям с другим фотоэлементом, указывается в паспорте спектрофотометра.

Дейтериевая лампа предназначается для работы в области спектра от 186 до 350 нм, лампа накаливания — для работы в области спектра от 340 до 1100 нм. Для проверки градуировки используется ртутно-гелиевая лампа.

### Подготовка к работе

Спектрофотометр (рис. 4) состоит из монохроматора 14 с измерительным прибором 15, кюветного отделения 16, камеры 17 с фотоприемниками и усилителем и осветителя 18 с источниками излучения и стабилизатором.

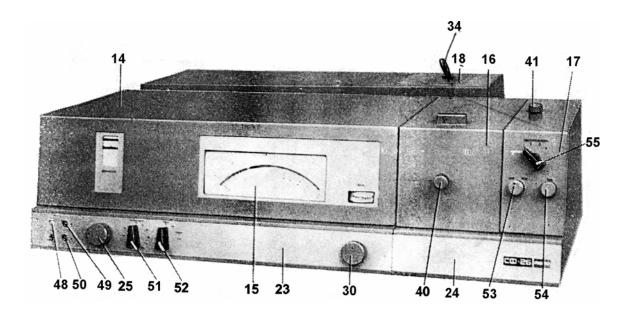


Рис. 4 Спектрофотометр СФ-26

Установите в рабочее положение фотоэлемент и источник излучения, соответствующие выбранному спектральному диапазону измерений. Закройте фотоэлемент, поставив рукоятку 53 шторки в положение 3AKP, а рукояткой 30 установите ширину щели примерно 0,1 мм.

Включите тумблер **СЕТЬ** 48, после чего должны загореться сигнальная лампа **СЕТЬ** и сигнальная лампа **Д** (дейтериевая) или сигнальная лампа **Н** (накаливания) в соответствии с выбранным источником. Стабильная работа спектрофотометра обеспечивается через 1 час после его включения. Для включения после лампы накаливания дейтериевой лампы переключите конденсор рукояткой 34, после минутного прогрева лампа автоматически загорается, одновременно загорается индикаторная лампа **Д** на передней панели. Выключение спектрофотометра производите тумблером **СЕТЬ**.

#### ПОРЯДОК РАБОТЫ

#### Подготовка к измерению

- 1. Включите спектрофотометр.
- 2. Установите требуемую длину волны, вращая рукоятку 25 (рис. 4) в сторону увеличения длин волн. Если при этом шкала повернется на большую величину, то возвратите ее назад на 3-5 нм и снова подведите к требуемому делению.

### Измерение оптической плотности

- 3. Установите стрелку измерительного прибора *15* на нуль рукояткой *54* **НУЛЬ**.
- 4. Откройте фотоэлемент, поставив рукоятку *53* шторки в положение **ОТКР**.
- 5. Установите стрелку измерительного прибора на деление «100%», вращая рукоятку 30 механизма изменения ширины щели.

- 6. Установите в рабочее положение измеряемый образец, перемещая каретку рукояткой 40, снимите отсчет по шкале оптической плотности d.
- 7. Для изменения длины волны, при которой проводится измерение повернуть рукоятку *25*.
- 8. Повторить пункты 3-5 для каждой длины волны. Измерения следует проводить в диапазоне 550 620 нм с шагом 2 нм.

Результаты заносятся в таблицу 1:

λ (HM)	d	$k_{\lambda}$ (cm <sup>-1</sup> )
длина	оптическая	коэффициент
волны	плотность	поглощения
550		
552		
620		

Коэффициент поглощения  $k_{\lambda}$  рассчитывается по формуле:

$$k_{\lambda} = \frac{1}{t}d,$$

где d- оптическая плотность, t - толщина образца в см

На листе миллиметровой бумаги постройте спектр поглощения неодимовых стекол и кристаллов, то есть зависимость коэффициента поглощения от длины волны —  $k_{\lambda}$  ( $\lambda$ ). Из полученной зависимости определите длину волны, соответствующую положению максимума полосы поглощения.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

- 1. Назовите количественные характеристики поглощения света.
- 2. В чем состоит принцип измерения спектров поглощения по одноканальной схеме?
- 3. Поясните физический смысл явления неоднородного уширения спектров.
- 4. Что такое штарковское расщепление?
- 5. Чем различается штарковская структура спектров стекол и спектров кристаллов?
- 6. От чего зависит коэффициент поглощения?

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Зайдель А. Н., Островская Г. В., Островский Ю. И. Техника и практика спектроскопии. - Москва: "Наука". 1976.

- 2. Герлих П., Каррас Х., Кетитц Г., Леман Р. Спектроскопические свойства активированных лазерных кристаллов. Москва: "Наука". 1966.
- 3. Васильев А.Н., Михайлин В.В. Введение в спектроскопию твердого тела. Москва: МГУ. 1987.
- 4. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика. Москва: МГУ. 1998.

# Лабораторная работа №2

### МОДОВАЯ СТРУКТУРА ИОННООБМЕННОГО ВОЛНОВОДА

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** Определение эффективного показателя преломления планарного волновода.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ: планарный волновод.

#### ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ В РАБОТЕ:

- 1.Ознакомление с основными характеристиками планарных волноводов и методами их возбуждения.
- 2. Экспериментальное определение эффективного показателя преломления планарного волновода.

#### СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ:

#### Основные характеристики планарных волноводов

Ограничимся кратким рассмотрением физических явлений в планарных волноводах с целью определения их основных характеристик, необходимых для интерпретации экспериментальных результатов.

#### а) Плоский пленочный волновод

Пленочный волновод изображен на рис.1, где h - толщина пленки,  $\theta_m$  - угол распространения для мод различных порядков (в данном случае  $\theta_0$  - угол распространения  $TE_0$  моды,  $\theta_l$  - угол распространения  $TE_1$  моды),  $n_f$ ,  $n_s$ ,  $n_c$  - соответственно показали преломления пленки, подложки и среды, находящейся над волноводом (обычно  $n_c$  = 1). Соотношение

$$n_f > n_s, n_c$$
 (1)

является необходимым условием волноводного режима, т.е. существования поверхностных световых волн в волноводе. Каждая из таких волн представляет собой плоскую монохроматическую волну, распространяющуюся по пленке в процессе многократных полных отражений от ее стенок. Согласно этой модели волноводная мода представляется суперпозицией плоских волн, распространяющихся по зигзагообразному пути в пленке. Амплитуда поля вдоль координаты Z

описывается выражением вида  $\exp(-j\beta Z)$  с константой распространения  $\beta_m$ , связанной с углом падения и отражения  $\theta_m$ 

$$\beta_m = k n_f \sin \theta_m \,, \tag{2}$$

где  $k = 2\pi/\lambda = \omega/c$ , а  $\lambda$  - длина волны излучения в вакууме; m = 0, 1, 2 ... - порядковый номер волноводной моды.

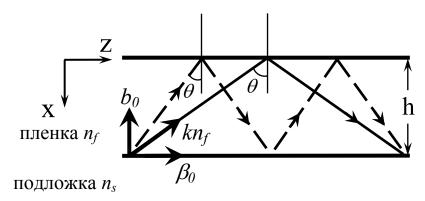


Рис.1. Плоский тонкопленочный волновод (прямоугольный профиль)

- A) Зигзагообразная модель распространения волн для  $TE_0$  моды (сплошная прямая, угол распространения  $\theta_0$ ) и для  $TE_1$  моды (пунктирная прямая, угол распространения  $\theta_l$ )
- Б) Профиль показателя преломления и распределение электрического поля для  $TE_0$  моды (сплошная кривая,  $n_0 = \beta_c/k$ ) и для  $TE_1$  моды (пунктирная кривая,  $n_1 = \beta_1/k$ ).

Уравнение (2) и критический угол определяют границы величины  $\beta_m$ :

$$kn_s < \beta_m < kn_f$$

В ряде случаев удобным при описании свойств диэлектрических волноводов является параметр, определяющий фазовую скорость поверхностной волны - эффективный показатель преломления волновода

$$n_m = \beta_m / k = n_f \sin \theta_m \tag{3}$$

Значения эффективного показателя преломления ограничены показателем преломления пленки и подложки

$$n_{s} < n_{m}^{*} < n_{f} \tag{4}$$

Отметим, что появление волноводных мод обусловлено тем обстоятельством, что фазовые сдвиги, накапливающиеся при двух отражениях исходной волны от границ пленка-подложка и подложка-покровный слой, должны составлять величину, кратную  $2\pi$ . Тогда отраженные волны находятся в фазе с исходной волной и результирующее поле в волноводе представляется суммой полей исходной волны и отраженной волн. В противном случае, набег фазы при отражениях приводит к взаимной компенсации волн. Фазовый сдвиг, соответствующий

одному пересечению пленки (в направлении х), равен  $hkn_f\cos\theta_m$ . Отсюда условие синфазности

$$2hkn_f\cos\theta_m - 2Y_{fs} - 2Y_{fc} = 2m\pi \tag{5}$$

где  $Y_{fs}$  и  $Y_{fc}$  - сдвиги фаз при отражениях на границах пленка-подложка и пленка-покровный слой соответственно.

Уравнение (5) с учетом (3) можно переписать в виде:

$$\left(\frac{h}{\lambda}\right) 2\pi \sqrt{n_f^2 - n_m^2} = arctg \left(\frac{n_f}{n_s}\right)^{\chi} \sqrt{\frac{n_m^2 - n_s^2}{n_f^2 - n_m^2}} + arctg \left(\frac{n_f}{n_c}\right)^{\chi} \sqrt{\frac{n_m^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_m^2}} + \pi m$$
 (6)

где  $\chi$  = O для TE поляризации (E<sub>v</sub>, H<sub>x</sub>, H<sub>z</sub>)  $\chi$  = 2 для TM поляризации (H<sub>y</sub>, E<sub>x</sub>, E<sub>z</sub>)

$$Y_{fs} = arctg \left(\frac{n_f}{n_s}\right)^{\chi} \sqrt{\frac{n_m^2 - n_s^2}{n_f^2 - n_m^2}}$$

$$Y_{fc} = arctg \left(\frac{n_f}{n_s}\right)^{\chi} \sqrt{\frac{n_m^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_m^2}}$$

Трансцендентное уравнение (6) называется дисперсионным уравнением. Оно связывает постоянные распространения волн различных мод с параметрами волновода.

### б) Плоский градиентный волновод

Градиентный волновод изображен на рис.2 где  $\theta_m$  - угол распространения для мод различных порядков (в данном случае  $\theta_0$  - угол распространения  $TE_0$  моды,  $\theta_I$  - угол распространения  $TE_I$  моды),  $n_s$  и  $n_c$  - соответственно показатели преломления подложки и среды, находящейся над волноводом. Распределение показателя преломления по поперечному сечению такого волновода имеет вид:

$$n(x) = egin{cases} n_c & i \check{\sigma} \grave{e} & x > 0 \ n_s + \Delta n f igg( rac{x}{x_m} igg) & i \check{\sigma} \grave{e} & x \leq 0 \ \end{cases}$$
 Вдесь  $f igg( rac{x}{x_m} igg) o 0$  При  $x o 0$   $\Delta n = n_f - n_s$ 

где  $n_f$  - максимальное значение показателя преломления (если оно наблюдается на расстоянии  $x_f$  - от поверхности волновода, то  $f(x_f/x_m)=I$ ).

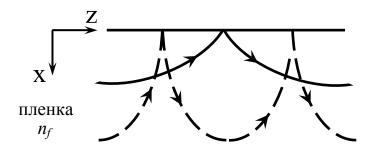


Рис. 2. Плоский диффузионный волновод (экспоненциальный профиль). Зигзагообразная модель распространения волн для ТЕо моды (сплошная кривая, угол распространения  $\theta_0$ ) и для ТЕ<sub>1</sub> моды (пунктирная кривая, угол распространения  $\theta_1$ ).

Достигаемые на практике приращения  $\Delta n$  показателя преломления не превышают нескольких процентов, что значительно меньше резкого скачка показателя преломления на границе волновода с окружающей средой (например, с воздухом):

$$0 < \Delta n << n_s - n_c \tag{7}$$

В некоторых диффузионных волноводах, получаемых различными методами в стеклах и кристаллах, относительное распределение показателя преломления хорошо аппроксимируется экспоненциальной кривой (  $f = \exp(x/x_m)$  ), функцией ошибок (  $f = \operatorname{erfc}(x/x_m)$  ), параболой (  $f = I - (x/x_m)^2$  при  $0 \le x \le x_m$  ), гауссовой кривой (  $f = \exp(x/x_m)^2$  ) и другими функциями.

Критическое значение глубины волноводного слоя d зависит от конкретного вида функции распределения  $f(x/x_m)$ , так же от порядка m возбуждаемой моды.

Волноводные моды градиентного волновода, по аналогии с пленочным волноводом, характеризуются эффективным показателем преломления  $n_m = \beta_m/k$ . Кроме того, для градиентных волноводов вводится понятие глубины волноводного слоя для m-ой моды  $x_m$  (расстояние от поверхности до точки поворота). При этом в точке поворота:

$$n(x_m) = n_m$$

где  $x_m$  - координата точки поворота для данной моды.

По аналогии с пленочным волноводом, при решении краевой электродинамической задачи, можно получить дисперсионное уравнение для градиентного волновода, которое связывает постоянные распространения волн различных мод с параметрами, волновода.

$$k \int_{0}^{x_{m}} \sqrt{n^{2}(x) - n_{m}^{2}} dx = \pi m + \pi / 4 + Y_{fc}$$

 $m=0,\ 1,\ 2\ ...;\ -2\ Y_{fc}$  – сдвиг фазы при отражении на границе пленка-покровный слой.

$$Y_{fc} = arctg \left(\frac{n_{f}}{n_{s}}\right)^{\chi} \sqrt{\frac{n_{m}^{2} - n_{c}^{2}}{n_{f}^{2} - n_{m}^{2}}}$$

 $\chi = 0$  для ТЕ мод;  $\chi = 2$  для ТМ мод.

Известный набор модовых эффективных показателей преломления  $n_m$  (модовый спектр волновода) позволяет рассчитать распределение показателя преломления по глубине волновода n(x).

#### Методы возбуждения оптических планарных волноводов

Изучение свойств оптических волноводов, а так же их практическое использование возможно лишь в том случае, если разработаны достаточно эффективные способы их возбуждения, преобразующие объемные волны в поверхностную волну.

К настоящему времени существуют несколько способов возбуждения планарных волноводов: через торец волновода, через скошенный край несущего слоя волновода, с помощью дифракционной решетки, с помощью призмы.

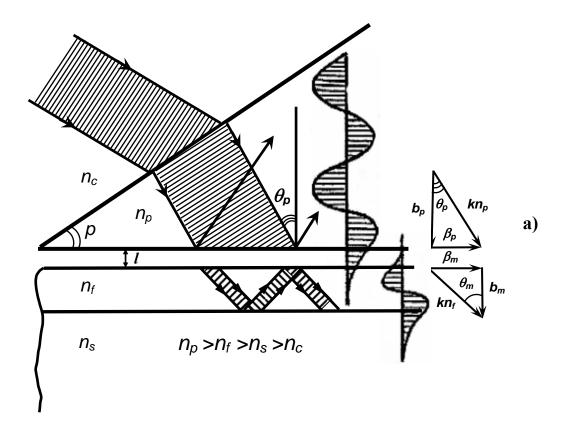
#### Возбуждение с помощью призмы

Возбуждение волновода с помощью призмы (при этом  $n_p > n_f > n_s$ ,  $n_c = 1$ ) использует явление нарушенного полного внутреннего отражения. В этом случае призма располагается на некотором расстоянии (порядка 1/8-1/4  $\lambda$ ) от волновода, а угол падения луча  $\theta$  на основание призмы должен превышать угол полного внутреннего отражения, т.е.:

$$\theta_p \ge \theta_{kp} = \arcsin(n_c/n_p)$$
 (8)

При этом суперпозиция падающей волны и волны, испытывающей полное внутреннее отражение, дает стоячую волну вдоль вертикальной оси X в более плотной среде, а ниже границы раздела двух сред X=0 поле экспоненциально затухает (рис.3, а).

Экспоненциальное поле, при малом зазоре между призмой и пленкой, проникает в пленку и возбуждает световую волну в ней. Этот процесс обычно называют оптическим туннелированием.



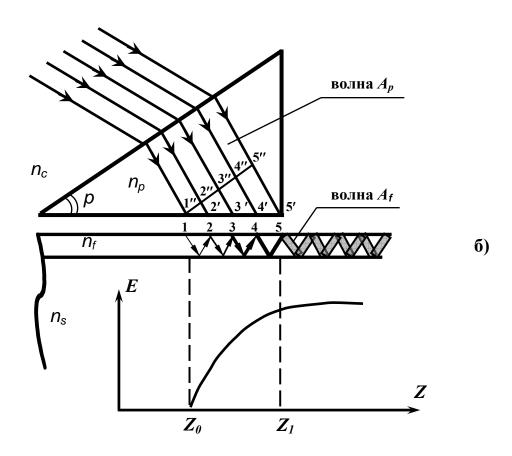


Рис. 3. Призменный элемент связи.

Если угол падения  $\theta_p$  выбран таким образом, что горизонтальная составляющая (  $\beta_p = kn_p \sin\theta_p$  ) волнового вектора  $kn_p$  падающей волны в призме равна собственной постоянной распространения поверхностной волноводной волны  $\beta_m$  (2), то возбуждение носит резонансный характер и напряженность поля в несущем слое может во много раз превышать напряженность поля падающего пучка. Таким образом, условия фазового синхронизма можно записать, как:

$$\beta_m = \beta_p$$

или

$$\beta_m = k n_p \sin \theta_p$$

Так как для различных мод постоянные распространения различны, то, выбирая соответствующий угол  $\theta_p$  можно раздельно возбудить любую из них. И, наоборот, измеряя резонансный угол  $\theta_p$  нетрудно определить постоянную распространения волноводной моды.

Зигзагообразная модель распространения волны в волноводе более наглядно иллюстрирует резонансный характер возбуждения волновода с помощью призмы (рис.3, б). Если импульс света одновременно достигает точек 1', 2", 3", 4", 5" (фронт волны), то в этот момент времени луч 1', поскольку он уже достиг зазора, возбуждает в пленке в точке 1 волну  $A_f$ . Последняя, распространяясь в пленке по зигзагообразному пути, попадает в точку 2. Если момент, когда волна  $A_f$  достигнет точки 2, точно совпадает с моментом, когда луч 2' в призме достигнет воздушного зазора, то луч 2' возбудит в пленке новую волну  $A_f$ , которая сложится в фазе с уже существующей в пленке волной,  $A_f$ . Следовательно, результирующая волна в точке 2 будет иметь удвоенную амплитуду, интенсивность этой волны будет больше в 4 раза, и т.д.

Величина зазора l (рис.3, a) в системе определяет степень связи волновода с возбуждающей призмой. Путем изменения зазора l можно управлять количеством энергии, поступающей из призмы в волновод и излучаемой волноводом в призму.

распространялась Для ТОГО чтобы волна ПО волноводу переизлучаясь при этом обратно в призму (рис.4, а) необходимо резко уменьшить связь  $(l >> \lambda)$  в той точке  $(Z_1)$ , где поле в волноводе достигло максимального значения. На рис.3, б и рис.4, б показаны наиболее простые решения с использованием прямоугольной призмы и равнобедренной призмы (с поджатым в точке Z<sub>0</sub> волноводом), а так же показан характер распределения энергии в волноводах. Эффективность преобразования энергии плоской волны, падающей на основание призмы, в энергию поверхностной волноводной волны (при условии выбора оптимального зазора l) может достигать 80%.

Призменное возбуждение волноводов оказывается наиболее удобным в лабораторной практике, поскольку позволяет с помощью одной

призмы селективно возбуждать волноводные моды в любом волноводе, если  $n_p > n_f$ .

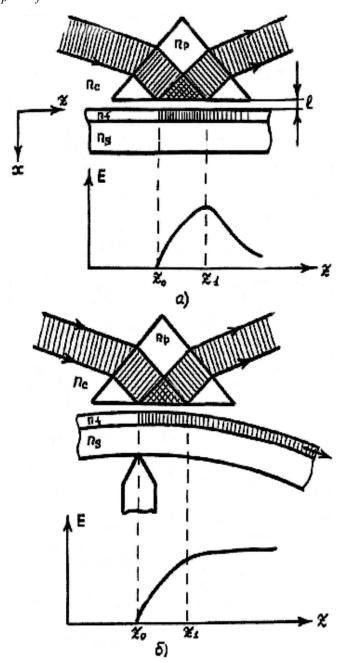


Рис.4. Возбуждение волновода с помощью равнобедренной призмы.

### Экспериментальное определение характеристик волноводов

Для построения устройств интегральной оптики на основе планарных ионообменных волноводов необходимо знать вид функции распределения показателя преломления по глубине волновода n(x), т.е. профиль показателя преломления. Экспериментальное определение этого профиля является сложной задачей. Для некоторых многомодовых волноводов эта задача решена с помощью интерферометрии или рентгеновского микроанализа. Однако метод интерферометрирования волноводного слоя требует изготовления тонких (100 мкм) срезов и по точности пригоден, в основном, для качественного контроля градиента показателя преломления.

Кроме того, метод интерферометрирования волноводного слоя не чувствителен к волноводам с перепадом показателя преломления  $\Delta n < 10^{-2}$  и глубиной h < 10 мкм. Кроме того, этот метод требует создания клина на уже полученном волноводе.

Рентгеновский микроанализ, измеряющий распределение концентрации диффундирующего иона, пригоден не для всех ионов, требует знания связи градиента показателя преломления и градиента концентрации. Кроме того, указанные экспериментальные методы определения профиля показателя преломления в волноводах являются разрушающими.

В настоящей работе использован косвенный неразрушающий метод исследования ионообменных слоев, дающий возможность измерить модовый спектр волновода и рассчитать профиль показателя преломления – это метод резонансного возбуждения волноводных мод.

Анализ методов возбуждения планарных волноводов позволил остановиться на призменном методе возбуждения волноводных мод. Вопервых, возбуждение волновода с помощью призмы обладает наибольшей эффективностью преобразования энергии падающей плоской волны в энергию поверхностной волноводной волны. Во-вторых, большой объем исследуемых образцов, получаемых в результате ионообменной диффузии диффузанты, разнообразие подложки, технологических режимов) не позволяет использовать трудоемкие методы типа нанесения дифракционных решеток или создания скошенных краев с полированными торцами на волноводах. В-третьих, относительно небольшие показатели преломления В диффузионных волноводах на стеклах позволяет использовать легкодоступный класс флинтов (n = 1,74 для  $T\Phi$ -5) для изготовления призм ввода - вывода излучения.

Метод измерения эффективного показателя преломления  $n_m$  состоит в определении утла связи  $\theta_p$  для призменного ввода (рис.5). Исходя из условий фазового синхронизма имеем:

$$\beta_m = \beta_p$$

где 
$$\beta_m = k n_f \sin \theta_m = k n_m$$
,  $\beta_p = k n_p \sin \theta_p$ 

Отсюда: 
$$n_m = n_p \sin \theta_p \tag{9}$$

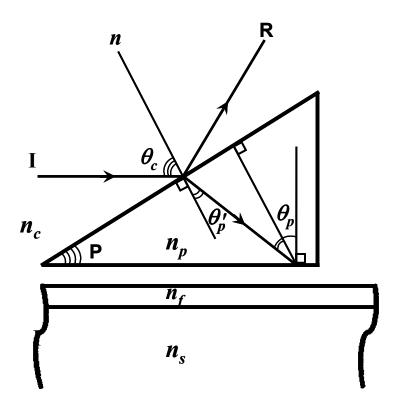


Рис. 5. Схематическое изображение призмы, поясняющее формулу (9). Положительная схема.

Из рис.5 видно, что:

$$\theta_{p} = \theta_{p}' + P$$

$$\theta_{p}' = \arcsin \frac{\sin \theta_{c}}{n_{p}}$$
(10)

где

$$n_c = 1 -$$
для воздуха (11)

Формулу (9) с учетом (10) и (11) можно переписать в виде:

$$n_m = n_p \sin \left[ P + \arcsin \frac{\sin \theta_c}{n_p} \right]$$
 (12)

Таким образом, чтобы определить  $n_m$ , нужно знать кроме показателя преломления призмы  $n_p$  еще и угол P между основанием и входной гранью призмы, и угол падения  $\theta_c$  на входную грань призмы. Угол падения считается положительным (положительная схема), когда падающий луч I лежит между нормалью к грани и основанием призмы, как показано на рис.5. В случае, когда отраженный луч R лежит между нормалью к грани и основанием призмы, угол падения считается отрицательным (отрицательная схема) и формула (12) принимает вид:

$$n_m = n_p \sin \left[ P - \arcsin \frac{\sin \theta_c}{n_p} \right] \tag{13}$$

Легко видеть, что погрешности в определении  $n_p$ , P,  $\theta_c$  вносят почти равные вклады в погрешность для  $n_m$ . Таким образом, чтобы получить наименьшую ошибку, целесообразно знать величины  $n_p$  и P с точностью, намного лучше, чем возможная точность измерения  $\theta_c$ . Тогда  $n_m$  будет известно с точностью, приблизительно равной  $\Delta\theta_c$  — точности измерения угла падения.

Значения  $n_p$  и P - могут быть с высокой точностью измерены на прецизионном гониометре (ГС-5) с точностью для  $n_p \pm 5 \times 10^{-5}$  и для  $P \pm 5''$ . Для измерения утла  $\theta_c$  за начало отсчета  $J_{\perp}$ , принимают нормаль к входной грани призмы. При этом определяется положение призмы, при котором луч, отраженный от входной грани противоположен по направлению и сколлимирован с падающим. За конец отсчета  $J_m$  принимают резонансный угол, при котором наблюдается наиболее эффективный ввод излучения в волновод для данной моды (наиболее яркая картина светящегося трека в волноводе или, в случае установки выводной призмы, резкое, наиболее интенсивное изображение моды на экране). Таким образом, угол  $\theta_c$  определяется по разности угловых отсчетов  $J_m$  и  $J_{\perp}$ :

$$\theta_c = J_m - J_{\perp} \tag{14}$$

C учетом возмущения, вносимого призмой на распространение поверхностной волноводной волны, которое, в свою очередь, влияеет на точность определения резонансных углов, на практике выбором оптимального зазора l достигают точности измерения  $\theta_c$ , сравнимой с дифракционной расходимостью падающего луча.

#### Схема экспериментальной установки:

Схема экспериментальной установки для определения параметров плоских волноводов показана на рис.6. Линейно поляризованный луч одномодового He-Ne лазера 1 (ЛГ-52-2,  $\lambda = 0.6328$  мкм) с помощью ромба Френеля 2, приобретая разность фаз  $\pi/2$  при двукратном полном внутреннем отражении, превращается в циркулярно-поляризованный. Вращением поляризатора 3 можно возбуждать в волноводе различные типы мод (TE<sub>m</sub> или TM<sub>m</sub>). Исследуемый планарный волновод 6 с установленными на нем призмами ввода 7 и вывода 8 помещен на позворотный столик 5 (цена деления 5'), с помощью которого осуществляется настройка на резонансный угол. Изменяя вращением столика угол падения луча на входную грань призмы, снимают отсчет  $J_{\perp}$  (момент автоколлимации) и  $J_m$  (момент резонанса). Оптическая схема построена так, что падающий луч попадает на край области ввода, а область ввода практически не смещается по основанию призмы, когда поворотный столик вращается в диапазоне углов ввода. Это достигается перпендикулярным перемещением вращающегося столика относительно оптической оси при помощи механической подвижки. Модовая картина излучения, выведенная с помощью призмы 8 рассматривается на экране 9 или фотографируется.

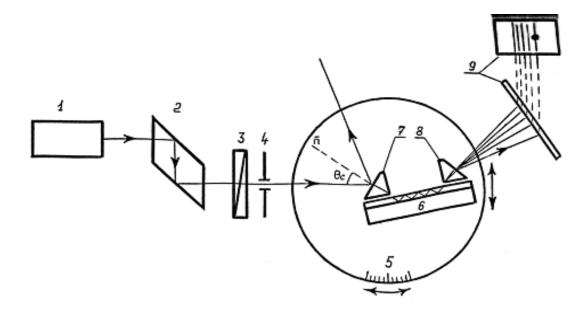


Рис. 6. Схема экспериментальной установки для измерения параметров волноводов.

1. Одномодовнй Не-Ne лазер (ЛГ-52-2,  $\lambda = 0.6328$ мкм), 2- ромб Френеля, 3- поляризатор, 4- диафрагма, 5- поворотный столик с лимбом (стрелками показаны возможные перемещения поворотного столика), 6- исследуемый планарный волновод, 7,8- призмы ввода и вывода, 9- экран.

#### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ:

Последовательность процесса определения эффективного показателя преломления  $n_m$ :

- 1 снять отсчет  $J_{\perp}$ ;
- 2 снять отсчет  $J_m$  для каждого номера моды для ТЕ поляризации;
- 3 снять отсчет  $J_m$  для каждого номера моды для ТМ поляризации;
- 4 вычислить углы  $\theta_c$  для каждого номера моды и типа поляризации по формуле (14);
- 5 по отраженному лучу от входной грани призмы ввода определить знак схемы, в которой возбуждается волновод; для положительной схемы  $n_m$  вычислить по формуле (12), для отрицательной схемы по формуле (13).

Призмы ввода и вывода сделаны из стекла ТФ-5 (  $n_P = 1,749853$  ). Угол призмы ввода  $P = 60^{\rm O}12'16'' \pm 5''$ . При такой установке призмы работают практически с параллельным воздушным зазором, при этом перепад толщины воздушного зазора  $\Delta l$  на длине 12 мм (нижняя грань призмы) составлял  $\sim 0,1$  мкм. Ошибка измерения утла  $\theta_c$  составляет  $\pm 1'$ , при этом ошибка определения эффективного показателя преломления  $n_m$  составляет величину  $\pm 2 \times 10^{-4}$ .

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

- 1. Какие виды волноводов вы знаете? Перечислите их основные характеристики.
- 2. Перечислите основные способы возбуждения планарных волноводов.
- 3. Что такое условие фазового синхронизма?
- 4. Что такое ТЕ и ТМ моды?
- 5. Как влияет длина волны лазера или толщина волновода на его эффективный показатель преломления?

#### ЛИТЕРАТУРА:

- 1. Тамир Т. Интегральная оптика. Москва: "Мир", 1978.
- 2. Барноски М. Введение в интегральную оптику. Москва: "Мир", 1977.
- 3. Семенов А.С., Смирнов В.Л., Шмалько А.В. Интегральная оптика, для систем передачи и обработки информации. Москва: "Радио и связь", 1990.
- 4. Снайдер А., Лав Д. Теория оптических волноводов. Москва: "Радио и связь", 1987.
- 5. Никоноров Н.В. Стекла для ионного обмена в интегральной оптике: современное состояние и тенденции дальнейшего развития (обзор). Физика и Химия стекла, 1999, т.25, N1, с. 21-69.

### Лабораторная работа №3

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСЛОКАЦИЙ В КРИСТАЛЛАХ ГЕРМАНИЯ ПО ЯМКАМ ТРАВЛЕНИЯ

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** Исследование дислокаций и дислокационных структур в кристаллах германия.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ:

- 1. Определение ориентации пластинок германия по форме ямок травления.
- 2. Определение плотности дислокаций путем подсчёта числа ямок травления.
- 3. Определение угловой разориентации кристаллических блоков по линейной плотности дислокаций в дислокационной стенке.

#### СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ:

Под структурными дефектами подразумеваются небольшие области в кристалле, где нарушена правильность (периодичность) в расположении атомов кристаллической решетки. Структурные дефекты могут возникать в результате наличия в кристаллической решетке смещенных или инородных атомов, нарушения в структуре плотно упакованных плоскостей кристаллов, отсутствие атомов в узлах кристаллической решетки (вакансий), наличие двойников и, особенно, дислокаций.

Дислокация – наиболее распространенное структурное линейное несовершенство, образующее внутри кристалла границу зоны сдвига. Дислокации образуются в процессе роста кристаллов, при значительных напряжениях, или при наличии больших температурных градиентов. Во всех этих случаях происходит пластическая деформация кристаллов, микроскопическом которая уровне означает скольжение на плоскостей кристаллических относительно друга. Скольжение друг «плоскостей скольжения» происходит вдоль определённых определённых «линий скольжения».

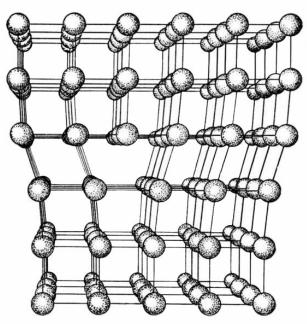


Рис.1 Структура краевой дислокации.

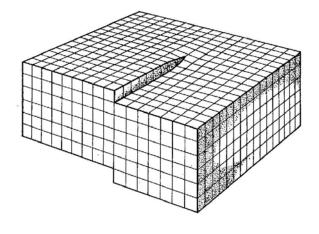


Рис.2 Винтовая дислокация.

Два наиболее простейших типа дислокаций – краевая дислокация и винтовая дислокация изображены на рисунках 1 и 2.

первом случае ЭТО линия, являющаяся краем «лишней» полуплоскости. плоскости Эта линия лежит В скольжения перпендикулярна плоскости рисунка. Направление скольжения перпендикулярно краевой дислокации.

Винтовая дислокация — это ось спирали на рисунке 2. Она направлена параллельно направлению скольжения.

Реальные дислокации в кристаллах в большинстве случаев представляют собой комбинацию из краевой и винтовой дислокаций.

При химическом травлении выход дислокаций на исследуемую поверхность выявляется в виде дислокационной ямки травления, форма которой определяется ориентацией поверхности. На плоскости (111) дислокационные ямки в светлом поле микроскопа выявляются в виде темных равносторонних или равнобедренных треугольников (Рис.3).

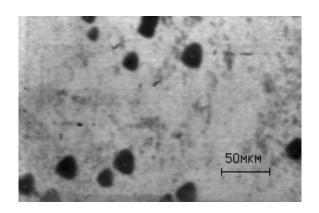


Рис.3 Дислокационные ямки травления на поверхности германия, параллельной кристаллографической плоскости (111).

Для флюорита ориентации (111) наблюдаются в виде ярко выраженных треугольников (рис.4).



Рис.4. Дислокационные ямки травления на поверхности флюорита, параллельной кристаллографической плоскости (111).

Полоса скольжения — линия пересечения системы плоскостей, по которым произошло скольжение, с исследуемой поверхностью кристалла. При избирательном химическом травлении полоса скольжения выявляется в виде прямолинейной цепочки дислокационных ямок травления, ориентированных вдоль ⟨110⟩ на плоскости шлифа (111) (Рис.5).

Во флюорите пространственное расположение ансамбля краевых дислокаций ограничено системой скольжений [110] (001).

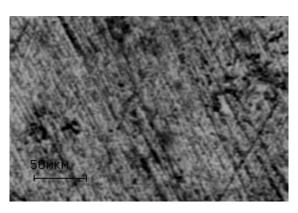
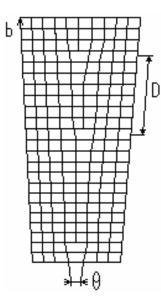


Рис. 5. Линии скольжения в германии, выращенном методом направленной кристаллизации.

Малоугловая граница - переходная область между соседними частями кристалла, разориентированными друг относительно друга на угол от нескольких секунд до нескольких десятков минут, состоящая из одного нескольких рядов дислокаций. При избирательном травлении ИЛИ малоугловая граница выявляется цепочки германия В виде дислокационных ямок травления, ориентированных вдоль ⟨112⟩ плоскости шлифа (111).

Дислокации распределены в материале не равномерно. Характер этого распределения определяется условиями роста кристалла и взаимодействием дислокаций через упругие поля, создаваемые самими



дислокациями. В частности, согласно современным представлениям, один из основных механизмов происхождения кристаллических блоков состоит в изменении пространственного расположения дислокаций при отжиге кристаллов. Например, взаимодействие краевых дислокаций посредством упругих полей приводит К TOMY, что они «выстраиваются» одна другой над «дислокационную стенку», которая перпендикулярна плоскости скольжения. Такой процесс носит название «полигонизации», ЭТОМ при оказывается, что образующиеся дислокационные стенки служат

Рис.6. Граница блоков с малым углом разориентации.

границами между кристаллическими блоками.

Угол разориентации блоков определяется плотностью дислокаций в стенке согласно формуле (1).

$$\sin \theta = \frac{b}{D} \tag{1}$$

где  $\theta$  – угол разориентации между блоками;

b – длина вектора Бюргерса,

D – расстояние между соседними дислокациями.

#### Металлографическое исследование кристаллов

кристаллических большинства материалов применяется металлографический метод исследование поверхности. Этот метод позволяет определять плотность дефектов в образце, а также определять кристаллографическую ориентацию образца. Метод заключается травлении поверхности образца специально подобранным химическим травителем последующим наблюдением фигур травления металлографическом микроскопе.

При использовании селективных травителей процесс травления происходит с различными скоростями по разным кристаллографическим плоскостям. Образующиеся при этом фигуры травления позволяют сделать заключение о кристаллографической ориентации плоскостей. В кристаллах с кубической элементарной ячейкой (германий, кремний, флюорит) для основных кристаллографических плоскостей (100), (110), (111) они будут иметь вид, изображенный на рисунке 7.

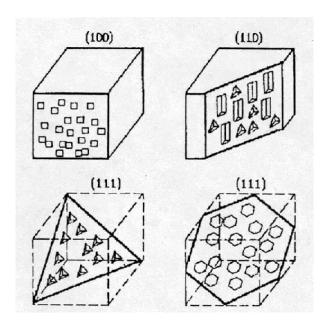


Рис.7 Фигуры травления на основных кристаллографических плоскостях кубической решетки.

Число ямок травления рассматривается как мера плотности дислокаций. Расчет средней плотности ямок травления  $N_D$  производится по формуле:

$$N_D = \frac{n_{cp}}{S} \,, \tag{2}$$

где  $n_{cp}$  — среднее количество дислокационных ямок в поле зрения микроскопа, S — площадь поля зрения, см $^2$ .

#### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ:

- 1. Ознакомиться с методическим указанием к выполнению данной лабораторной работы, получить допуск у преподавателя к её выполнению.
- 2. Исследовать полученные у преподавателя травленые образцы на предмет наличия малоугловых границ между кристаллическими блоками и на предмет существования в них структурных дефектов.
- 3. Полученные значения подтвердить у преподавателя.

#### ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ:

В увиденной в микроскопе картине дислокаций оценить их плотность на единицу площади по формуле (2), а также угол разориентации между микроблоками по формуле (1).

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1. Что называют дислокациями?
- 2. Чем дислокации отличаются от дислокационных ямок травления?
- 3. От чего зависит геометрия фигур травления?
- 4. Объяснить влияние температурных градиентов на плотность дислокаций?
- 5. Что такое вектор Бюргерса?
- 6. Расскажите о плоскостях скольжения в германии и во флюорите.
- 7. Какими физическими и оптическими свойствами обладают кубические кристаллы?

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Рид В.Т. Дислокации в кристаллах. Москва: "Металлургия"., 1957.
- 2. Фридель Ж. Дислокации. Москва: "Мир", 1967.
- 3. Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций. М.: Атомиздат, 1972. 599с.
- 4. Халл Д. Введение в дислокации. M.: Атомиздат, 1968. 277c.
- 5. Батавин В.В. Контроль параметров полупроводниковых материалов и эпитаксиальных слоев. М.: Сов. Радио, 1976

### Лабораторная работа №4

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПОМОЩИ РЕФРАКТОМЕТРА ИРФ-454

#### ЦЕЛИ РАБОТЫ:

- 1) ознакомится с принципом действия рефрактометра;
- 2) освоить методики измерений показателя преломления на рефрактометре Аббе;
- 3) измерить показатели преломления некоторых жидкостей, имеющихся в лаборатории.
- 4) измерить показатели преломления некоторых стекол, имеющихся в лаборатории;

#### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Свет, падающий на границу раздела двух прозрачных сред, частично отражается от поверхности раздела, а частично проходит внутрь второй среды, изменяя при этом свое направление. Направление распространения светового луча в средах 1 и 2 определяется законом преломления Снеллиуса: преломленный луч лежит в той же плоскости, в которой находится падающий луч и нормаль к поверхности раздела, а отношение синусов угла падения  $i_1$  и угла преломления  $i_2$  есть величина постоянная для данной пары сред:

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n_{21} = const \tag{1}$$

Константа  $n_{21}$  называется относительным показателем (коэффициентом) преломления второго вещества по отношению к первому.

Электромагнитная теория Максвелла выяснила простой физический смысл показателя преломления, установив его связь со скоростью распространения света в веществе:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} \tag{2}$$

Показатель преломления вещества по отношению к «пустоте» называется абсолютным показателем преломления или просто показателем преломления. Из (2) следует, что абсолютный показатель преломления вещества равен отношению скорости света в вакууме ( $c = 3.10^8$  м/с) к скорости света в веществе v, т.е. показывает, во сколько раз скорость света в вакууме превосходит скорость распространения света в веществе. Относительный показатель преломления двух сред показывает, во сколько раз изменяется скорость света при переходе из первой среды во вторую. Относительный показатель преломления пары сред есть отношение их

абсолютных показателей:  $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$ . Очевидно, что абсолютный показатель преломления вакуума равен 1.

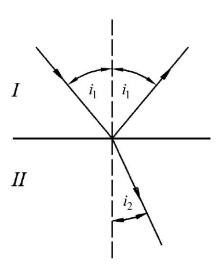


Рис. 1. Отражение и преломление луча света на границе раздела двух сред

Для веществ в различных агрегатных состояниях показатели преломления имеют различные значения. Для газообразных веществ значения показателей преломления близки к n=1. В геометрической оптике показатель преломления воздуха принимают равным единице, хотя его точное значение n=1,000274 (при нормальном давлении и температуре  $20^{\circ}$ C). Величины показателей преломления для жидкостей изменяются в интервале от 1,2 до 1,9. Твердые тела имеют наибольшие значения показателей преломления (от 1,3 до 4,0). Использую абсолютные показатели преломления, закон преломления (1) удобно переписать в виде:

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \tag{3}$$

Произведение показателя преломления среды на синус угла между нормалью и лучом при каждом преломлении есть величина постоянная, называемая оптическим инвариантом. Форма записи (3) очень удобна для запоминания.

#### Полное внутреннее отражение

Из соотношения (3) видно, что если луч идет из среды оптически менее плотной в среду более плотную (т.е.  $n_2 > n_1$ ), то угол преломления  $i_2$  будет меньше угла падения  $i_1$ . Если же среды таковы, что  $n_1 > n_2$ , то углы падения и преломления подчиняются неравенству  $i_2 > i_1$ . В этом случае при увеличении угла падения в пределе угол преломления может оказаться равным 90°. Соответствующий ему угол падения называется предельным углом полного внутреннего отражения  $i_{nped}$ . При падении света под большими углами  $i_1 > i_{nped}$ , преломленного луча не существует, свет не

выходит из первой среды и имеет место явление полного внутреннего отражения. Рисунок 2 иллюстрирует это явление.

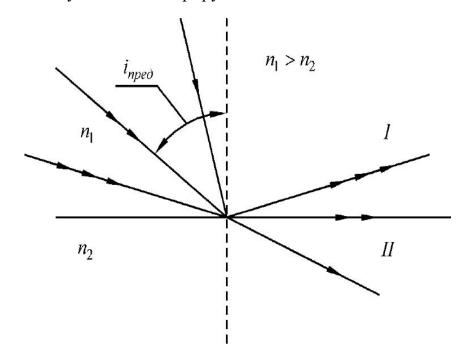


Рис. 2. Возникновение полного внутреннего отражения на границе оптически более плотной среды с оптически менее плотной средой.

Величина предельного угла определяется соотношением:

$$\sin i_{npeo} = \frac{n_2}{n_1} , \quad (n_1 > n_2)$$
 (4)

Если луч идет из вещества с показателем преломления n в воздух, то  $\sin i_{npeo} = 1/n_1$ . Величина предельного угла на границе двух сред зависит только от показателей преломления этих сред. Следовательно, величину предельного угла можно использовать для определения показателя преломления одной из сред, если известен показатель преломления другой среды. Предельный угол можно наблюдать двумя способами: в отраженном и проходящем свете.

Если направить в какую-либо точку на границе раздела двух сред пучок лучей с углами падения от 0 до  $90^{\circ}$  со стороны оптически более плотной среды и наблюдать картину в отраженных лучах, то поле зрения будет разделено на две части различной освещенности. Та часть поля зрения, которая освещается лучами, испытавшими частичное отражение от границы раздела и частичное преломление (лучи 1 и 2 на рис. 3, a), будет менее освещена, чем вторая половина, которая освещается только лучами, испытавшими полное внутреннее отражение (лучи 3 и 4 на рис. 3, a).

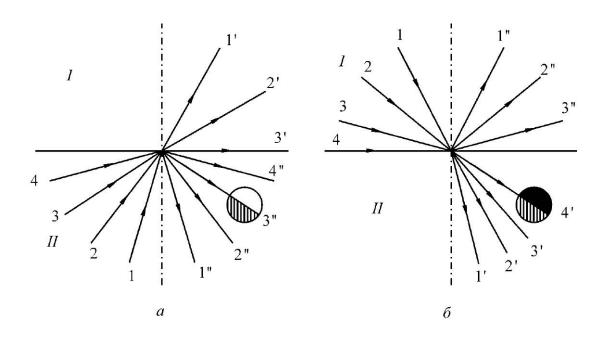


Рис. 3. Наблюдение резкой границы в освещенности поля зрения в отраженном (а) и преломленном (б) пучках лучей света.

При наблюдении картины в проходящем свете граница раздела сред освещается пучком лучей, идущих из среды с меньшим показателем преломления (лучи 1, 2, 3, 4 на рис.3,  $\delta$ ). Очевидно, что в пучке преломленных лучей луч 4' будет крайним. Поле зрения будет разделено на полностью затененную и освещенную части. Этот способ дает очень отчетливую границу, но пригоден только для прозрачных сред. Первый же способ может применяться и в том случае, когда среда с меньшим показателем преломления мало прозрачна, но в этом случае граница наблюдается труднее из-за малой разницы в освещенности обеих половин поля зрения.

#### Дисперсия света

Все изложенное выше справедливо, строго говоря, только в том случае, если для освещения используется монохроматический свет. Если пучок света имеет сложный спектральный состав, то в описанных выше явлениях наблюдается дисперсия света.

Дисперсией света называется разложение света спектр, происходящее при преломлении, дифракции или интерференции. В настоящей работе дисперсия света происходит в связи с тем, что показатели преломления веществ зависят от частоты у излучения, используемого для освещения. Ход зависимости n = f(v), наблюдаемый для всех прозрачных бесцветных веществ таков, что при уменьшении частоты показатель преломления уменьшается. Производная называется дисперсией вещества.

Из явления дисперсии следует, что скорость распространения света в веществе зависит от цвета излучения. Было найдено, что в вакууме скорость света для любой длины волны одна и та же, но в веществе синий свет, например, распространяется медленнее, чем красный.

результате дисперсии света происходит пространственное разделение пучков лучей различных ДЛИН волн. Поэтому характеристики приборов, в которых наблюдается дисперсия, вводят в качестве меры дисперсии величины угловой и линейной дисперсии. Под угловой дисперсией понимают отношение  $\theta = d\phi/d\lambda$ , где  $d\phi$  - разность углов между пучками лучей, отличающихся по длинам волн на  $d\lambda$ . Линейная дисперсия определяется отношением расстояния между положениями двух спектральных линий  $dl/d\lambda$ .

Из наличия дисперсии при преломлении следует, что рассмотренная выше картина наблюдения предельного угла полного внутреннего отражения усложнится. Для наглядного представления рассмотрим преломление различных монохроматических пучков со всевозможными углами падения в какой-либо точке на границе раздела оптически менее плотной среды с более плотной. Для крайних длин волн в пределах видимого спектра картины будут различаться величиной предельного угла.

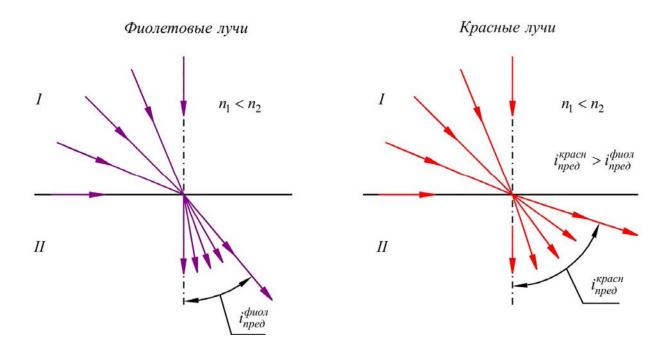


Рис. 4. Влияние дисперсии света на величину предельного угла преломления

Если падающий свет является белым, то происходит наложение подобных картин для различных длин волн. В результате вблизи нормали (при малых углах преломления) преломленный свет остается белым. По мере удаления от нормали (увеличения угла преломления) преломленный

пучок будет обедняться фиолетовыми лучами (прежде всего, достигается значение предельного угла для фиолетовых лучей), затем последовательно — синими, голубыми, зелеными, желтыми, оранжевыми и, наконец, красными. Следует помнить, что деление на 7 определенных цветов условно. При наличии в составе света различных длин волн смена цветов происходит очень плавно.

Направление, определяемое предельным углом для красных лучей, будет соответствовать границе раздела поля зрения на освещенную и затененную части.

Таким образом, граница раздела будет окрашена. Кроме того, появляется неопределенность при измерении предельного угла, так как для различных длин волн он имеет различные значения.

Из сказанного следует, что показатель преломления является константой для данной среды только при определенной длины волны света. И, следовательно, предельный угол должен измеряться при использовании монохроматического излучения. Принято для характеристики сред использовать значение показателя преломления, измеренного для света, излучаемого газовой натриевой горелкой (желтая — D-линия Na,  $\lambda_D = 589,3$  nm). В обозначении показателя преломления  $n_D^{20}$  индекс D относится к спектральной линии, а 20 обозначает температуру, которой соответствует данное значение показателя. Иногда показатель преломления определяют для других спектральных линий (например, красный – C и голубой – F – линий водорода,  $\lambda_C = 653,3$  nm,  $\lambda_F = 486,1$  nm).

Приборы, с помощью которых описанным выше способом определяют показатели преломления различных веществ, называют рефрактометрами. Широкое распространение получил рефрактометр Аббе.

#### Принцип действия рефрактометра Аббе

Световой пучок падает на призменный блок Аббе, представляющий собой две прямоугольные призмы, сложенные гипотенузными гранями. Нижняя матовая (шероховатая) грань верхней призмы служит для освещения рассеянным светом исследуемой жидкости между призмами. Свет, рассеянный матовой поверхностью, проходит плоскопараллельный слой исследуемой жидкости и падает на гипотенузную грань нижней измерительной призмы под различными углами. Измерительная призма изготовлена из оптически плотного стекла (тяжелый флинт), показатель преломления которого больше 1,7. Поэтому измерения могут проводиться для веществ с n < 1,7. Для скользящих лучей (с углом падения  $\sim 90^{\circ}$ ) угол падения на границе жидкость — измерительная призма будет близок к предельному. Этот угол и определяет границу распространения света в призме

$$n = N \sin i_{nped} \,, \tag{5}$$

где n и N показатели преломления жидкости и призмы соответственно. Обычно измеряют угол выхода предельного луча из призмы в воздух  $\varphi$ .

Следует отметить, что точка O (рис.5) произвольно выбрана на гипотенузной грани измерительной призмы. В результате преломляющего действия всей поверхности AB через грань CB. будет выходить множество параллельных пучков. Направление каждого из них определяется одним из множества углов, среди которых наименьшим является угол  $\varphi$ .

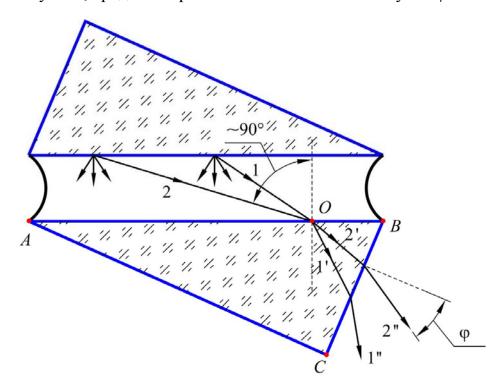


Рис. 5. Ход лучей света в призменном блоке Аббе

Измерение угла  $\varphi$  производят с помощью зрительной трубы, установленной на бесконечность. При такой установке зрительная труба собирает в соответствующих точках своей фокальной плоскости лучи, выходящие параллельными пучками через грань CB призмы под различными углами. В направлениях, заданных углами, меньшими, чем  $\varphi$ , свет не распространяется. Поэтому, наводя крест нитей окуляра зрительной трубы на границу раздела света и темноты, можно измерить угол  $\varphi$ . При этом, если оптическая ось трубы будет совпадать с направлением, заданным углом  $\varphi$  на рис.5, то нижняя половина поля зрения будет соответствовать направлениям лучей, идущих под углами, большими, чем  $\varphi$ , а верхняя — меньшими, чем  $\varphi$ .

Легко показать, рассмотрев преломление лучей света на грани BC призмы, что показатель преломления жидкости n связан с углом  $\varphi$  соотношением

$$n = \sin B \sqrt{N^2 - \sin^2 \varphi} - \cos B \sin \varphi , \qquad (6)$$

где B — преломляющий угол призмы (угол между преломляющими гранями). В действительности при измерениях нет необходимости

пользоваться этой формулой для вычисления показателей преломления, так как отсчетная шкала рефрактометра уже проградуирована в значениях n с учетом соотношения (6).

Особенностью рефрактометра Аббе является использование для измерений белого света. Это онжомков благодаря компенсатору дисперсии, вмонтированному в зрительную трубу. Основной деталью компенсатора является призма прямого видения (призма Амичи). Призма Амичи является сложной призмой состоящей из трех простых призм, изготовленных из разного стекла. Подбором материала и преломляющих углов призм можно варьировать угол преломления того или иного цвета, а также величину суммарной угловой дисперсии. В частности, можно добиться отсутствия отклонения для какого-либо среднего в спектре луча, не уничтожая при этом суммарной дисперсии. Такая комбинация призм будет давать спектр, в котором средние лучи будут выходить по направлению падающего белого луча.

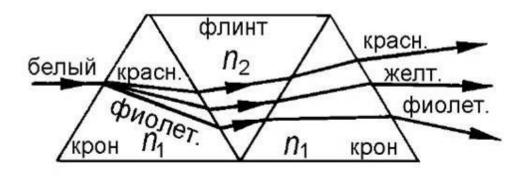


Рис. 6. Ход лучей различного цвета в призме Амичи.

Лучи света других длин волн будут отклоняться, и образовывать спектральную окраску по обе стороны от центрального луча. В призме Амичи, составляющие ее призмы подобраны с таким расчетом, чтобы лучи, соответствующие D - линии натрия, проходили всю систему без отклонения.

В силу обратимости световых лучей с помощью призмы Амичи можно пучок цветовых лучей собрать в белый луч.

Принцип действия компенсатора в рефрактометре Аббе сводится к следующему. Из призменного блока Аббе лучи разного цвета выходят под разными углами, зависящими от соотношения показателей преломления исследуемой жидкости измерительной Иначе И призмы. призменный блок Аббе характеризуется некоторой величиной угловой дисперсии  $d\phi/d\lambda$ . Если на пути этих лучей установить призму Амичи таким образом, чтобы ее угловая дисперсия, которая зависит также от поворота призмы, была равна по величине и противоположна по знаку угловой дисперсии  $d\phi/d\lambda$ , то суммарная дисперсия системы будет равна нулю. При этом пучок цветных лучей соберется в белый луч, направление которого совпадает с направлением желтого луча D. Линия полного

внутреннего отражения (в поле зрения окуляра зрительной трубы) представится в виде резкой неокрашенной границы между светлой и темной частями поля зрения, причем положение границы будет соответствовать предельному лучу D, хотя для освещения применялся белый свет. Таким образом, показания шкалы рефрактометра дают значения  $n^D$ .

## Упрощенная оптическая схема рефрактометра показана на рис.7.

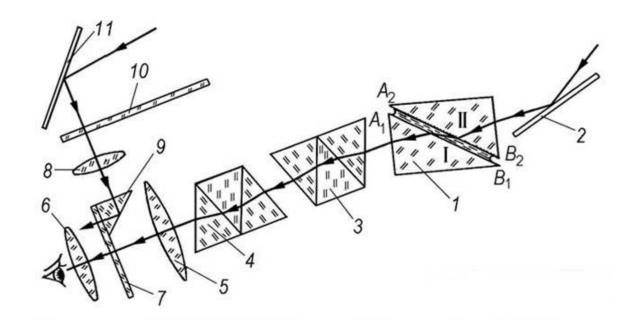


Рис. 7. Упрощенная оптическая схема рефрактометра.

Основной деталью рефрактометра является стеклянный параллелепипед 1, состоящий из двух призм I и II, изготовленных из одного сорта стекла. Призма I имеет хорошо отполированную грань  $A_1B_1$  и измерительной, а призма II имеет матовую грань  $A_2B_2$  и является преломления жидкости осветительной. Для измерения показателя несколько ее капель помещается в щель между призмами. Пучок света от какого-либо источника c помощью зеркала 2 направляется осветительную призму. Вследствие рассеяния света поверхностью в исследуемую жидкость лучи входят по различным направлениям. Среди этих лучей имеются лучи, скользящие вдоль грани  $A_1B_1$  призмы I, которые, проходя в эту призму, преломляются

под предельным углом. Углы же преломления остальных лучей больше предельного. Выйдя из измерительной призмы, свет проходит через две дисперсионные призмы Амичи прямого зрения 3 и 4 (о назначении этих призм будет сказано ниже) и попадает в зрительную трубу, состоящую из объектива 5, окуляра 6 и отсчетного приспособления 7, расположенного в фокальной плоскости объектива. В этой плоскости свет образует светлое и

темное поля (см. рис. 3). Отсчетное приспособление представляет собой стеклянную пластинку. На одной части этой пластинки нанесен крест, совмещаемый при измерениях с границей раздела темного и светлого полей. На другую часть пластинки при помощи линзы 8 и призмы 9 проектируется изображение прозрачной шкалы 10, которая освещается от какого-либо источника пучком света, направляемым зеркалом 11. Таким образом, зрения окуляра видны одновременно поле образованная светом, прошедшим через измерительную призму, изображение шкалы. Параллелепипед 1 связан с пластинкой, на которой нанесена шкала, механической передачей. При его повороте происходит перемещение шкалы и, следовательно, перемещение ее изображения в поле зрения окуляра.

Конструкция прибора предусматривает, что при совмещении креста с границей раздела светлого и темного полей указатель шкалы показывает сразу значение показателя преломления исследуемого вещества для монохроматического света, с длиной волны, соответствующей желтой линии натрия D.

При использовании источника белого света в измерительной призме происходит дисперсия света. В результате, граница раздела светлого и темного полей, видная в окуляр, оказывается, вообще говоря, окрашенной и размытой. Для устранения окраски границы раздела полей служат дисперсионные призмы прямого зрения.

При прохождении света последовательно через две дисперсионные призмы 3 и 4 окончательная дисперсия зависит от ориентации призм по отношению друг к другу. Вращая одну из призм вокруг оси, идущей вдоль неотклоненного луча, можно получить любую дисперсию от нулевой до двойной по сравнению с дисперсией одиночной призмы. Таким образом, поворотом одной из дисперсионной призм можно компенсировать дисперсию света, возникшую в измерительной призме, и, следовательно, устранить окраску и размытие границы светлого и темного полей, наблюдаемых в окуляр.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Прибор ИРФ-454 представляет собой современную модель рефрактометра Аббе (рис.8). Он состоит из следующих основных частей: корпуса 1, измерительной головки 2 и зрительной трубы 3 с отсчетным устройством. В измерительной головке находится призменный блок Аббе, который жестко связан со шкалой отсчетного устройства, расположенной внутри корпуса. Шкала подсвечивается зеркалом 4 и проектируется специальной оптической системой в поле зрения трубы.

Таким образом, в поле зрения трубы одновременно видны граничная линия, крест нитей, деления шкалы и визирный штрих шкалы. Чтобы найти границу раздела и совместить ее с перекрестием, необходимо вращать маховичок 5. Окрашенность наблюдаемой границы устраняется поворотом компенсатора с помощью маховичка 6. Вместе с

компенсатором одновременно вращается барабан 7 со шкалой, по которой в случае необходимости можно измерить дисперсию вещества. Подсветка исследуемого вещества осуществляется с помощью зеркала 8 дневным светом или от электрической лампы накаливания.

# Измерение показателя преломления прозрачных жидкостей на ИРФ-454

На поверхность измерительной призмы наносят несколько капель исследуемой жидкости и осторожно закрывают головку; наблюдают окно 9, чтобы жидкость полностью заполнила зазор между измерительной и осветительной призмами. Осветительное зеркало 8 устанавливают перед окном 9 так, чтобы поле зрения трубы было равномерно освещено. Вращая маховичок 10, находят границу раздела света и тени, маховичком 11 окрашенность. Точно устраняют ее совмещая границу перекрестием сетки, снимают отсчет по шкале показателей преломления. Индексом для отсчета служит неподвижный визирный штрих сетки. Целые, десятые, сотые и тысячные доли значения показателя преломления отсчитываются по шкале, десятитысячные доли оцениваются на глаз. Шкала рефрактометра проградуирована для температуры 20°C. Так как показатель преломления в значительной мере зависит от температуры, в приборе предусмотрено термостатирование призменного блока с помощью камер, через которые пропускается вода, идущая от термостата. В учебных целях, если не требуется высокая точность при определении показателя, измерения могут проводиться без термостатирования.

По окончании измерений тщательно вытирают рабочие поверхности блока Аббе мягкой тряпочкой или фильтровальной бумагой. Полированную грань измерительной призмы надо вытирать очень осторожно, чтобы не повредить полировку. Затем призмы промывают спиртом, протирают и оставляют блок на некоторое время открытым для просушки. После этого измерительную головку осторожно закрывают, и прибор накрывают футляром.



Рис.8, а. Внешний вид рефрактометра Аббе типа ИРФ-454

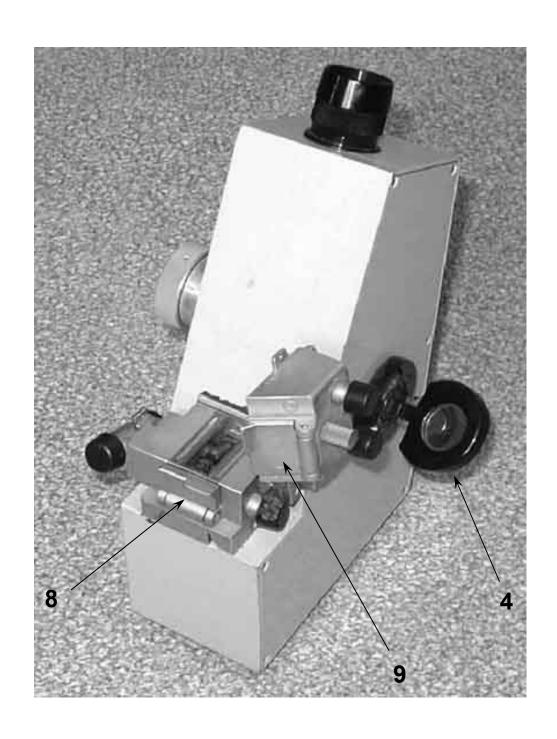


Рис.8, б. Внешний вид рефрактометра Аббе типа ИРФ-454

### Измерение показателя преломления твердого тела

Перед работой верхнюю часть измерительной головки откидывают и работе при дальнейшей измерительную головку закрывают. Соприкасающиеся поверхности образца и измерительной протирают спиртом и чистой салфеткой. Для соблюдения оптического контакта между гранью измерительной призмы и исследуемым веществом помещают каплю жидкости, показатель преломления которой больше, чем показатель преломления измеряемого объекта. Введение между образцом и призмой параллельного слоя жидкости не оказывает влияния на ход лучей в системе. Обычно для этой цели служит монобромнафталин. Каплю жидкости помещают на полированную поверхность образца при помощи стеклянной палочки с закругленным концом. Накладывают образец полированной гранью на измерительную призму так, чтобы его матовая грань, образующая с полированной гранью острое ребро, была обращена к источнику света. При установке образца плоскость его соприкосновения с измерительной призмой должна принимать равномерную Измерение показателя преломления далее производится так же, как и в случае жидкости.

### ВНИМАНИЕ!

Высокопреломляющие иммерсионные жидкости (монобромнафталин, нитротолуиден, нитроксилол) достаточно вредные для здоровья вещества.

## ОБРАЩАТЬСЯ С ОСТОРОЖНОСТЬЮ!

### КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ И ВОПРОСЫ

- 1. Сформулировать закон преломления и пояснить физический смысл относительного и абсолютного показателей преломления.
- 2. Сформулировать условия, при которых наблюдается полное внутреннее отражение. Получить формулу для определения предельного угла полного внутреннего отражения. Объяснить зависимость величины предельного угла от длины волны.
- 3. Построить ход лучей в рефрактометре ИРФ-454 при монохроматическом освещении. Какую роль играет в приборе компенсатор дисперсии?
- 4. Как формируется изображение в фокальной плоскости зрительной трубы при освещении белым светом?

В конце работы оформляется отчет.

В него должно войти:

- 1. Цель работы.
- 2. Кратко теоретическая часть.
- 3. Результаты измерений.
- 4. Выводы.

### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Савельев И.В. Курс общей физики, 1978.
- 2. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976.
- 3. Иоффе Б.В. Рефрактометрические методы химии. Л.: Химия, 1974.
- 4. Белов Д.В.Электромагнетизм и волновая оптика.-МГУ, 1994:§§ 44, 45
- 5. Белов Д.В., Пустовалов Г.Е. Оптика (ч. IY Краткого курса общей физики).-МГУ, 1982: §§ 29, 30.

## Лабораторная работа №5

# ИССЛЕДОВАНИЕ БЛОЧНОЙ СТРУКТУРЫ КРИСТАЛЛОВ ФЛЮОРИТА ПО ФИГУРАМ АСТЕРИЗМА

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** ознакомиться с методом ориентации кристаллов путем наблюдения фигур астеризма. Изучить кристаллографии кубических кристаллов.

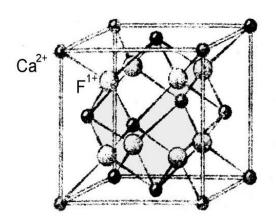
ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ: кристаллы флюорита.

### ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ В РАБОТЕ:

- 1. Научиться определять в градусной мере ориентацию кристаллов путем фиксации рефлексов от поверхности. Научиться объяснять фигуры астеризма. Ознакомиться с кристаллографией кубических кристаллов.
- 2. Научиться наблюдать фигуры оптического астеризма.
- 3. Получить базовые знания по применению сетки Вульфа.
- 4. Определить, какую роль играет шлифовка отражающей/преломляющей поверхности образца.

## СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ:

 $\Phi$ люорит (по химической номенклатуре – фтористый кальций  $CaF_2$ ), состоит из атомов кальция (51,33%) и фтора (48,67%) закономерно



принципу упакованных ПΟ кубической гранецентрированной кристаллической решетки. Элементарная флюорита ячейка представляет собой куб, разделенный восемь маленьких кубиков октантов (рис.1).

Рис.1 Элементарная ячейка флюорита.

В соответствии с внутренней кристаллической структурой, кристаллы флюорита характеризуются высокой симметрией. Они относятся к гексоэдрическому классу кубической сингонии. Это значит, что наиболее правильные кристаллы флюорита характеризуются тремя осями симметрии четвертого порядка  $(C_4)$ , четырьмя осями третьего порядка  $(C_3)$  и шестью осями второго порядка  $(C_2)$ . На рисунке 2 показаны все возможные оси симметрии в кубе.

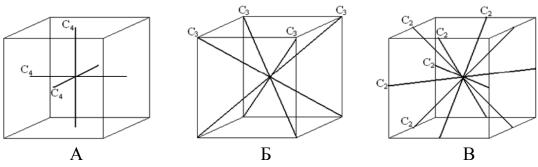


Рис.2 Оси симметрии в кубе: А – три оси 4-го порядка, Б – четыре оси 3-го порядка, В – шесть осей 2-го порядка.

Положение И ориентация плоскости кристалла определяются заданием координат трех атомов, лежащих в этой плоскости. Если каждый из трех атомов находится на одной из трех кристаллографических координатных осей, то положение данной плоскости может быть задано соответствующими координатами атомов по осям в единицах постоянных решетки. Если, например, атомы, определяющие плоскость, координаты (4,0,0)(0,1,0), (0,0,2)какой-то системе кристаллографических координатных осей, то указанная плоскость может быть охарактеризована тремя числами: 4, 1 и 2.

Более обычным методом описания положения плоскости, которым широко пользуются при структурном анализе, являются *индексы Миллера*, которые определяются так, как показано на рисунке 3.

Плоскость показанная на рисунке 3, отсекает на осях координат отрезки 3a, 2b, 3c. Обратные числа равны 1/3, 1/2, 1/3. Наименьшие целые числа, отношения между которыми равны отношению указанных дробей, есть 2,3,2. Таким образом, индексы Миллера данной плоскости есть (232).

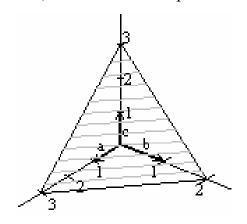


Рис.3 Определение индексов Миллера.

Индексы Миллера для наиболее важных плоскостей в кубических кристаллах иллюстрируются рисунками 4.

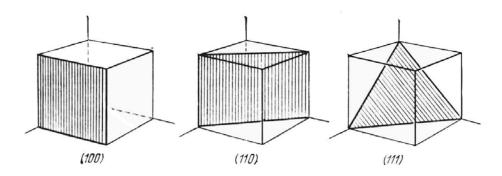


Рис.4 Индексы Миллера некоторых наиболее важных плоскостей кубического кристалла.

Набор индексов (hkl) может означать отдельную плоскость или семейство параллельных плоскостей. Если плоскость пересекает ось в области отрицательных значений координат, соответствующий индекс также будет отрицательным, знак минус помещается над индексом.

Плоскостью скола во флюорите является кристаллографическая плоскость (111). В результате скалывания кристалла по этим плоскостям кристалл приобретает форму октаэдра. Каждый правильный многогранник обладает *взаимным*, который можно определить как многогранник, ограниченный некоторыми плоскостями, а именно плоскостями вершинных фигур, построенных при вершинах многогранника. Очевидно, что его ребра делят пополам ребра многогранника и перпендикулярны к ним. Октаэдр представляет собой многогранник, взаимный для куба (рис.5).

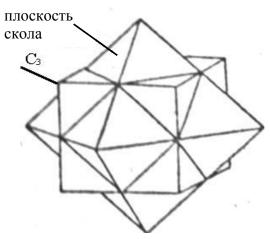


Рис.5 Ориентация октаэдра в кубе.

Для кристаллографической ориентации кристаллов помимо рентгеновского и микроскопического методов, существует *метод световых фигур*. Этот метод состоит в том, что на грубо шлифованную поверхность направляется параллельный пучок света, который, проходя

через образец, падает на экран, на котором фиксируется пространственное распределение преломленного луча. В силу того, что флюорит имеет плоскости спаянности по граням {111}, можно оценить ориентацию граней {111} по выколкам на шлифованной поверхности флюорита произвольной ориентации, избегая процесса травления. Световые фигуры представляют собой рефлексограммы от поверхности обработанного соответствующим образом кристалла. Вид световых фигур зависит от кристаллографической ориентации образца.

Круг методов обработки кристаллов для выявления кристаллографических плоскостей достаточно широк: механическая обработка (получение спайных сколов), химическая, электролитическая, термическая, ионное травление и т.д. В производственных условиях должны быть использованы наиболее дешевые и быстрые методы. К таким методам могут быть отнесены: 1 — Механическая обработка, 2 — Химическое травление.

Исходя из полученных данных для граней {111}, путем построения полученных значений рефлексов на сетке Вульфа, можно найти для данной кристаллической поверхности ориентацию других кристаллографических плоскостей.

Сетка Вульфа (по имени советского ученого Г.В. Вульфа) — график, с помощью которого решаются многие задачи сферической тригонометрии астрономии. Сетка Вульфа сферической представляет стереографическую проекцию полусферы (с нанесенной на нее сеткой меридианов и параллелей) на плоскость. Удобство применения сетки Вульфа состоит в том, что все большие и малые круги сферы изображаются на ней в виде окружностей. Используют ее обычно в прозрачной бумагой (калькой), на которую наносят сочетании с дополнительные построения. Кальку следует соединить с сеткой Вульфа булавкой, воткнутой в центр сетки (калька должна вращаться вокруг булавки).

Существуют три основных оптических способа определения ориентации кристаллов:

## 1. Определения ориентации кристаллов в отраженном свете.

Измерение ориентации в отраженном свете является наиболее простым и удобным методом для определения ориентации кристаллов. Принципиальная схема измерений приведена на рисунке 6.

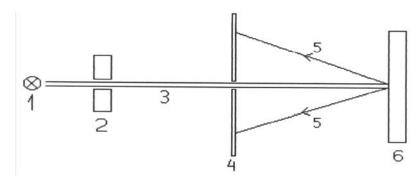


Рис.6 Принципиальная схема измерения ориентации в отраженном свете.

Когда узкий пучок параллельного света 3 от источника 1, проходя диафрагму 2 и отверстие в экране 4, отражается 5 от обработанной соответствующим образом поверхности образца 6 и направляется на экран 4, то на последнем отображаются различные световые фигуры, зависящие от кристаллографической ориентации образца к падающему пучку света.

Важным достоинством этого метода является то, что можно регулировать расстояние между экраном и поверхностью кристалла. Чем больше это расстояние, тем чувствительнее и точнее метод. Это позволяет измерять малоугловую ориентацию кристаллических блоков. Математическая обработка измерений крайне проста, но апертуры такого прибора не хватит, чтобы измерить крупноугловую разориентацию. Тут имеет смысл обратиться к методу на прохождение. Он менее чувствительный, но обладает достаточно большой апертурой.

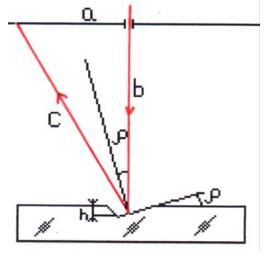
## 2. Определения ориентации кристаллов в проходящем свете.

Образец кладется обработанной поверхностью к источнику света и через пластинку проходит сходящийся пучок света. Вторая(тыльная) поверхность должна быть полирована, либо просветлена. Предварительно центр экрана совмещают с изображением диафрагмы.

# 3. Определения ориентации кристаллов на второй поверхности образца.

Сущность метода заключается в том, что при прохождении параллельного пучка света через грубо шлифованную поверхность кристалла, возникает фигура рассеяния, соответствующая ориентации блока, которую можно наблюдать на второй поверхности кристалла, шлифованную менее грубым абразивом.

Рассмотрим подробнее метод на отражение. Как уже отмечено, для реализации этого метода поверхность образца обработана таким образом, чтобы выявить плоскости скола. На грубо обработанную поверхность по нормали к ней направляем параллельный пучок света. В результате отражения луча от косо расположенных микроскопических фрагментов



плоскостей спайности на экране №1 наблюдаться световая фигура, отвечающая симметрии направления в кристалле (рис.7).

Рис. 7. Рисунок к расчету отражения светового пучка лучей от поверхности кристалла и регистрации его на экране №1.

Угол наклона оптической оси кристалла рассчитывается по формуле:

$$\rho = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{a}{b} \tag{1}$$

Зная расстояние до экрана b, предварительно рассчитываются целые значения угла  $\rho$  по формуле (1) и в соответствии с этими значениями расчерчивается экран №1.

Теперь рассмотрим расчет угла  $\rho$  при использовании *метода на прохождение*. Пучок испытывает преломление дважды: на плоскости скола и на просветленной поверхности (рис.8).

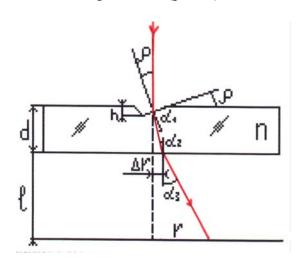


Рис.8 Рисунок к расчету прохождения светового пучка лучей сквозь образец и регистрации его на экране №2.

Условия преломления луча на границах образца:

$$n_1 \sin \rho = n_2 \sin \alpha_1, \quad n_1 = 1, \quad n_2 = n \quad \sin \rho = n \sin \alpha_1 \quad \alpha_1 + \alpha_2 = \rho$$
  
 $n_2 \sin \alpha_2 = \sin \alpha_3, \quad \sin \alpha_3 = n \sin \alpha_2 \quad \alpha_1 = \rho - \alpha_2$  (2)

В результате ряда преобразований получим:

$$tg\rho = \frac{\sin \alpha_3}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_3} - 1} \tag{3}$$

Далее, как видно из рисунка 
$$\frac{\Delta r}{\sqrt{\Delta r^2 + d^2}} = \sin \alpha_2 \tag{4}$$

В результате преобразования формулы (4) получим:

$$\Delta r = \frac{d \sin \alpha_3}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_3}} \tag{5}$$

Суммарное расстояние r будет определяться формулой:

$$r = ltg\alpha_3 + d\frac{\sin\alpha_3}{\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha_3}} \tag{6}$$

Явное выражение угла  $\rho$  через наблюдаемое расстояние r слишком громоздко. Поэтому построить шкалы для непосредственного отсчета углов  $\rho$  на экране проще всего следующим образом. Отдельно рассчитываются таблицы зависимостей  $\rho = \xi(\alpha_3)$  по формуле (3) и  $\rho = \psi(\alpha_3)$  по формуле (6). И уже по этим данным составляется таблица для построения шкалы  $\rho = F(r)$ , в соответствии с этой таблицей расчерчивается экран №2.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ:

- 1. Ознакомиться с методическим указанием к выполнению данной лабораторной работы, получить допуск у преподавателя к её выполнению.
- 2. Отметить все основные кристаллические блоки на исследуемой поверхности образца, зарисовать картину. Отметить на поверхности две-три прямые линии, пролегающие через как можно большее количество блоков, по которым будет сканироваться поверхность пучком света и вдоль которых будут производиться тщательные замеры.
- 3. Произвести настройку прибора, представленного на рисунке 9.

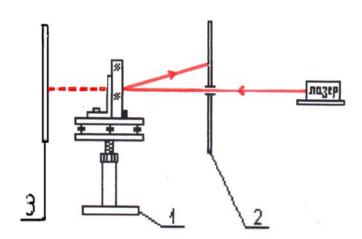


Рис.9 Схема экспериментальной установки для измерения ориентации образцов малого размера. 1 – столик, 2 – экран-диафрагма №1, 3 – экран №2.

- 3.1. Совместить пучок падающего света с центром экрана №1 и центром экрана №2.
- 3.2. Установить поверхность исследуемого образца перпендикулярно падающему лучу. Использовать для этого накладное зеркало.
- 4. Перемещая исследуемый образец под падающим пучком света с экрана №1, фиксируется два значения: угол отклонения  $\rho$  кристаллографической оси [111], а также фиксируется направление  $\varphi$ ,

- вдоль которого эта ось наклонена в базисе. Рабочий шаг измерений вдоль отмеченных прямых  $\Delta x = 3$  мм.
- 5. Ориентацию областей, от которых рефлекс выходит за границы экрана №1, надо определить методом на прохождение, фиксируя рефлекс на экране №2. Для этой цели необходимо просветить иммерсионной жидкостью поверхность, из которой будет выходить пучок света, для того, чтобы получить как можно более четкий рефлекс на экране №2 (для флюорита это керосин n = 1,433).
- 6. Полученные значения подтвердить у преподавателя.

### ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ:

- 1. Построить графические зависимости  $\rho(x)$  и  $\varphi(x)$ . На графиках отметить границы ростовых блоков и области микроблочности, так называемой мозаичной структуры.
- 2. Построить полученные значения на сетке Вульфа (см. Приложение).

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

- 1. Какие вы знаете способы ориентации кристаллов? Каковы их преимущества и недостатки?
- 2. Расскажите о симметрии фтористого кальция. Каковы свойства  $CaF_2$  и где он применяется?
- 3. Покажите на макете элементарной ячейки флюорита расположение осей 2-го, 3-го и 4-го порядков?
- 4. Преимущества и недостатки методов оптического астеризма «на отражение» и «на пропускание»?
- 5. Какие фигуры астеризма вы наблюдали? Какие возможно наблюдать? Объясните форму рефлексов?
- 6. Какова плоскость спайности у флюорита? Какой формы естественная огранка этого кристалла?
- 7. Какие вы знаете методы обработки оптической поверхности для выявления её кристаллографической микроструктуры? В чем их достоинства и недостатки?
- 8. Что такое сетка Вульфа?
- 9. Что такое индексы Миллера?
- 10. Каковы последствия присутствия блочности во флюорите для оптики? Каким образом блочность влияет на оптическое качество материала?

#### ЛИТЕРАТУРА:

- 1. Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П. Основы кристаллографии, М: Наука, 1979, 639с.
- 2. Шаскольская М.П. Кристаллография.
- 3. Китель Ч. Введение в физику твердого тела. М: Наука, 1978г., 792с.
- 4. Юшкин Н.П., Волкова Н.В., Маркова Г.А. Оптический флюорит, М: Наука, 1983.

- 5. Чередов В.Н. Дефекты в синтетических кристаллах флюорита, СПб: Наука, 1993.
- 6. Попов Г.М., Шафрановский И.И. Кристаллография, М: Высшая школа, 1972,с.44-50.

## ПРИЛОЖЕНИЕ: Построения на сетке Вульфа.

По полученным в лабораторной работе данным произвести построения на сетке Вульфа выполняя следующие пункты:

- 1. Построить стереографические проекции направлений [111], заданных сферическими координатами  $\varphi$  и  $\rho$ .
- 1.1.Накладываем кальку на сетку и ставим на ней центральный крестик и черточку нулевого уровня для  $\varphi$ .
- 1.2.От нулевого индекса для  $\varphi$  по кругу проекций (по часовой стрелке) отсчитываем первую сферическую координату долготу  $\varphi$  и отмечаем результат на внешнем круге вспомогательной точкой.
- 1.3.Вращением кальки (центр кальки при этом всегда должен совпадать с центром сетки) совмещаем найденную вспомогательную точку с концом ближайшего диаметра сетки.
- 1.4.По этому диаметру от центра сетки в сторону вспомогательной точки отсчитываем вторую сферическую координату полярное расстояние  $\rho$  и отмечаем найденную точку небольшим кружком.
- 1.5.Возвращаем кальку в исходное положение и подписываем точку a. Точка a является искомой стереографической проекцией направления [111].
- 1.6.Следуя вышеизложенной схеме изобразить стереографические проекции остальных направлений [111].
- 2. Провести дугу большого круга через заданные стереографические проекции a,  $\delta$  двух направлений [111] и [111].
- 2.1.Вращением кальки добиваемся того, чтобы обе заданные точки a и b оказались на одной из вспомогательных меридиональных дуг сетки Вульфа.
- 2.2. Найденную дугу тщательно обводим карандашом и возвращаем кальку в исходное положение.
- 3. Измерить угол между двумя направлениями [111] и [111], заданными их стереографическими проекциями.
- 3.1.Вращением кальки совмещаем данные точки a и  $\delta$  с одной из меридиональных дуг сетки Вульфа.
- 3.2.Отсчитываем по этой меридиональной дуге количество градусов, между точками a и  $\delta$ . В результате получаем угол между направлениями [111] и [111].
- 4. Определить на сетке Вульфа место расположения стереографических проекций направлений [110] и [100].

# Содержание

Введение	стр. 3
Лабораторная работа №1	
Штарковская структура спектров иона Nd <sup>3+</sup>	
в кристаллах и стеклах	стр. 4
Лабораторная работа №2	
Модовая структура ионнообменного волновода	стр.14
Лабораторная работа №3 Исследование дислокаций в кристаллах германия по ямкам тра	
Лабораторная работа №4	
Определение показателя преломления оптических материалов и	при помощи
рефрактометра ИРФ-454	стр.38
Лабораторная работа №5	
Исследование блочной структуры кристаллов флюорита по фин	гурам
астеризма	стр.57



### КАФЕДРА ОПТОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И МАТЕРИАЛОВ

### Заведующий – профессор Н.В.Никоноров

Кафедра является ведущей и единственной в России по подготовке специалистов в области современных технологий и материалов фотоники и оптоинформатики. Область деятельности кафедры - новые технологии и материалы, позволяющие осуществлять передачу, прием, обработку и хранение информации на основе оптических носителей - фотонов.

Кафедра готовит бакалавров и магистров по направлению «Фотоника и оптоинформатика. Кафедра обеспечивает специальную подготовку студентов в области технологии и материалов для записи информации, волноводной оптоэлектроники, микрооптики, волоконной, интегральной и градиентной оптики. Особое внимание уделяется нано-материалам и нанотехнологиям, фотонным кристаллам, нелинейным лазерным, полифункциональным материалам, математическому a также моделированию.

Кафедру отличает исключительно высокий процент специалистов высшей квалификации: из 14 преподавателей - 10 профессоров, докторов наук и 4 кандидата наук. Это известные ученые, лауреаты Государственных премий, имеющие большой авторитет в России и мировое признание за рубежом. Среди них - Петровский Г.Т. - академик РАН, трижды лауреат Государственной премии.

Кафедра обладает уникальным современным импортным оборудованием, позволяющим проводить исследования на мировом уровне. Она ведёт разработки в области оптоинформационных технологий совместно с мировыми лидерами в этой области - компаниями Самсунг и Корнинг. Студенты подключены к научно-исследовательским работам уже с младших курсов.

## История кафедры:

1994 год. Организована базовая кафедра СПбГУ ИТМО при ГОИ им. С.И.Вавилова — кафедра оптического материаловедения. Образование кафедры явилось логичным развитием тесных связей, которые в течение многих лет существовали между ГОИ и ИТМО. В частности, для преподавания в ИТМО широко привлекались ведущие сотрудники ГОИ, а ИТМО был постоянным источником, из которого ГОИ черпал новые молодые кадры. Кафедра ведет подготовку специалистов по образовательному направлению «Оптотехника».

**1999** год. Реорганизация кафедры. На кафедре созданы три направления: оптическое материаловедение, информационная оптотехника, физическая оптика и спектроскопия. Кафедра переименована в кафедру оптического материаловедения и оптики.

**2002** год. Кафедра ОМиО вошла в состав нового факультета СПбГУ ИТМО - фотоники и оптоинформатики.

**2003** год. При кафедре создана <u>учебно-исследовательская лаборатория</u> материалов и технологий фотоники.

**2004** год. Кафедра явилась одним из организаторов нового образовательного направления подготовки бакалавров и магистров – «Фотоника и оптоинформатика» и начала подготовку студентов по этому направлению.

2005 год. Кафедра переименована в кафедру оптоинформационных технологий и материалов.

Никоноров Николай Валентинович Пржевуский Александр Кириллович Асеев Владимир Анатольевич Игнатьев Александр Иванович Каева Екатерина Спартаковна Маколкина Евгения Николаевна Рохмин Алексей Сергеевич Ульяшенко Александр Михайлович

# Оптическое материаловедение

Часть 1: Оптические свойства и дефекты кристаллов и стекол

Учебное пособие по выполнению лабораторного практикума

В авторской редакции Н.В. Никоноров, А.К. Пржевуский, В.А. Асеев,

А.И. Игнатьев, А.С. Рохмин, А.М. Ульяшенко

Компьютерный набор и верстка А.С. Рохмин

Дизайн обложки Н.В. Никоноров

Редакционно – издательский отдел СПбГУ ИТМО

Заведующая редакционно – издательского отдела Н.Ф. Гусарова

Лицензия ИД №00408 от 05.11.99

Подписано в печать 05.06.05

Заказ №854 Тираж 100 экз. Отпечатано на ризографе

## Редакционно-издательский отдел

Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

