

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

**ИЗМЕРЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО СТЕКЛА  
РЕФРАКТОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Методические указания по выполнению лабораторной работы  
по дисциплине «Оптическое материаловедение»  
для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавриата  
12.03.03 – «Фотоника и оптоинформатика»

Томск  
2021

УДК 535.39  
ББК 22.34  
Д 95

**Рецензент:**

**Мандель А. Е.**, профессор кафедры СВЧиКР, д-р физ.-мат. наук

**Авторы:**

В. Дю, А. С. Акрестина, Г. В. Симонова, М. Г. Кистенева

**Дю, Валерия**

Д 95 Измерение показателя преломления оптического стекла рефрактометрическим методом: Методические указания по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Оптическое материаловедение» для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавриата 12.03.03 – «Фотоника и оптоинформатика» / В. Дю [и др.]. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2021. – 12 с.

Представлены методические указания по выполнению лабораторной работы «Измерение показателя преломления оптического стекла рефрактометрическим методом» для студентов, обучающихся по дисциплине «Оптическое материаловедение» по направлению подготовки бакалавриата 12.03.03 – «Фотоника и оптоинформатика».

Одобрено на заседании каф. ЭП, протокол №90 от 19.05.2021 г.

УДК 535.39  
ББК 22.34

© Дю В., Акрестина А. С.,  
Симонова Г. В., Кистенева М. Г., 2021  
© Томск. гос. ун-т. систем упр. и  
радиоэлектроники, 2021

## Оглавление

1 Введение .....	4
2 Теоретическая часть .....	4
2.1 Распространение света в неоднородной среде .....	4
2.2 Измерение показателя преломления .....	8
2.4 Контрольные вопросы .....	9
3 Экспериментальная часть.....	9
3.1 Прибор Гартля .....	9
3.2 Демонстрация явления полного внутреннего отражения .....	10
3.3 Демонстрация эффекта Брюстера .....	11
3.4 Задание .....	11
3.5 Содержание отчета.....	12
Литература .....	12

## 1 Введение

Показатель преломления является одной из основных характеристик стекла при разработке и реализации оптических приборов и устройств. Существуют различные методы определения показателя преломления с высокой точностью, такие как метод наименьшего отклонения, метод автоколлимации, иммерсионный метод Обреимова, интерференционный метод и др.

Цель работы: изучить методику определения показателя преломления стекла рефрактометрическим методом, овладеть методикой определения предельного угла полного внутреннего отражения оптического стекла и изучить закономерности эффекта Брюстера с помощью прибора Гартля.

## 2 Теоретическая часть

### 2.1 Распространение света в неоднородной среде

В однородной среде свет распространяется прямолинейно с постоянной скоростью. Если же среда неоднородна, то в разных областях скорость его распространения различна и прямолинейность световых лучей нарушается.

Простейшей неоднородностью является плоская граница раздела двух безграничных однородных сред, в которых свет распространяется со скоростями, равными соответственно  $v_1$  и  $v_2$ . На рис. 2.1 показано, что луч **I**, падающий из первой среды под углом  $\theta_i$  к перпендикуляру  $N$ , на границе раздела раздваивается на отраженный луч **II**, идущий в первой среде с той же скоростью  $v_1$ , и преломленный луч **III**, распространяющийся во второй среде под углом  $\theta_r$  к тому же перпендикуляру.

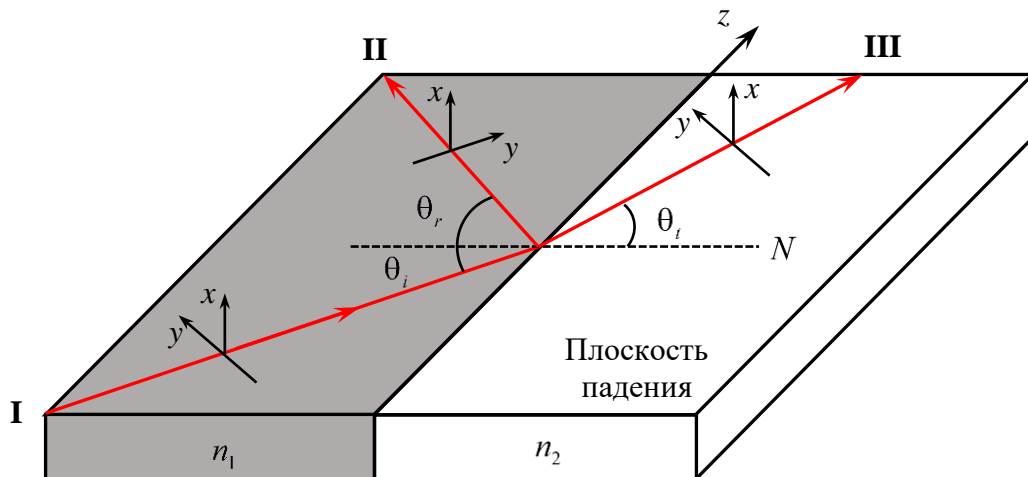


Рисунок 2.1 – Отражение и преломление волны на границе между двумя диэлектрическими средами

Взаимное геометрическое расположение этих лучей определяется тремя законами Снеллиуса–Декарта:

1. Угол падения равен углу отражения:

$$\theta_i = \theta_r. \quad (2.1)$$

2. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная:

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = const. \quad (2.2)$$

3. Луч падающий, луч отраженный и луч преломленный лежат в одной плоскости с перпендикуляром, восстановленным к границе раздела в точке падения:

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = n_{12}, \quad (2.3)$$

где  $n_{12}$  – постоянная величина, называется относительным показателем или коэффициентом преломления второй среды относительно первой.

Показатель преломления среды относительно вакуума называется абсолютным показателем преломления этой среды. Относительный показатель преломления  $n_{12}$  выражается через абсолютные показатели преломления  $n_1$  и  $n_2$  соотношением:

$$n_{12} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (2.4)$$

С учетом соотношения (2.4) закон преломления можно записать в симметричной форме:

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r. \quad (2.5)$$

Из этой симметрии следует обратимость световых лучей. Если обратить направление луча **III** на рис. 2.1 и заставить его падать под тем же углом  $\theta_r$  на границу раздела, то преломленный луч будет распространяться в первой среде под углом  $\theta_i$ , т.е. пойдет обратно вдоль луча **I**.

Уравнение (2.5) может охватить и закон отражения. Поскольку отраженный луч **II** распространяется в той же самой первой среде, но по другую сторону перпендикуляра, то для него можно формально положить показатель преломления  $n = -n_1$ . Подставляя минус  $n_1$  в равенство (2.5), получаем:

$$\sin \theta_i = -\sin \theta_r \Rightarrow \theta_i = -\theta_r. \quad (2.6)$$

Для прозрачных сред падающий на границу раздела лучистый поток при переходе света из среды с большим показателем преломления  $n_1$  (оптически более плотной) в среду с меньшим показателем  $n_2$  (оптически менее плотную), угол падения может достичь некоторого предельного значения  $\theta_{ic}$ , при котором преломленный луч направлен вдоль границы раздела сред, согласно (2.5):

$$n_1 \sin \theta_{ic} = n_2 \sin 90^\circ \Rightarrow n_1 \sin \theta_{ic} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (2.7)$$

Следовательно, при  $\theta_i > \theta_{ic}$ , преломление прекращается и остается лишь отраженный луч (рис. 2.2). Это явление носит название полного внутреннего отражения. Вся энергия света, падающего на границу раздела, при этом полностью отражается обратно в первую среду.

Явление полного внутреннего отражения используется в различных оптических приборах (бинокли, перископы и др.), а также для измерения показателей преломления (рефрактометры). Показатель преломления различных сортов стекла – около 1,5. Поэтому

предельный угол для границы стекло-воздух составляет  $\theta_{ic} = \arcsin\left(\frac{1}{1,5}\right) = 42^\circ$  и при падении

лучей на эту границу под несколько большим углом равным  $45^\circ$ , будет всегда происходить полное внутреннее отражение.

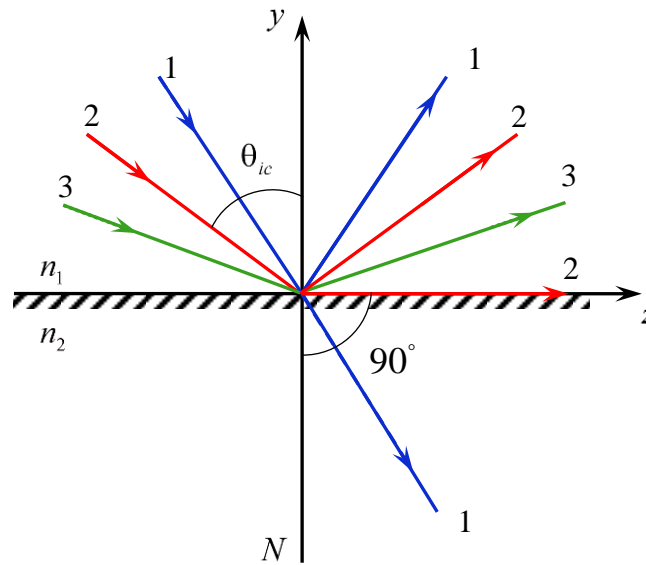


Рисунок 2.2 – К явлению полного внутреннего отражения

На рис. 2.3 изображены призмы полного внутреннего отражения, в которых наблюдается это условие. В случае (а) изображение повёрнуто на  $90^\circ$ . В случае (б) изображение перевернуто за счет двукратного полного внутреннего отражения от боковых граней призмы. Обратной также является призма Аббе (в), где полное внутренне отражение происходит от нижней грани призмы.

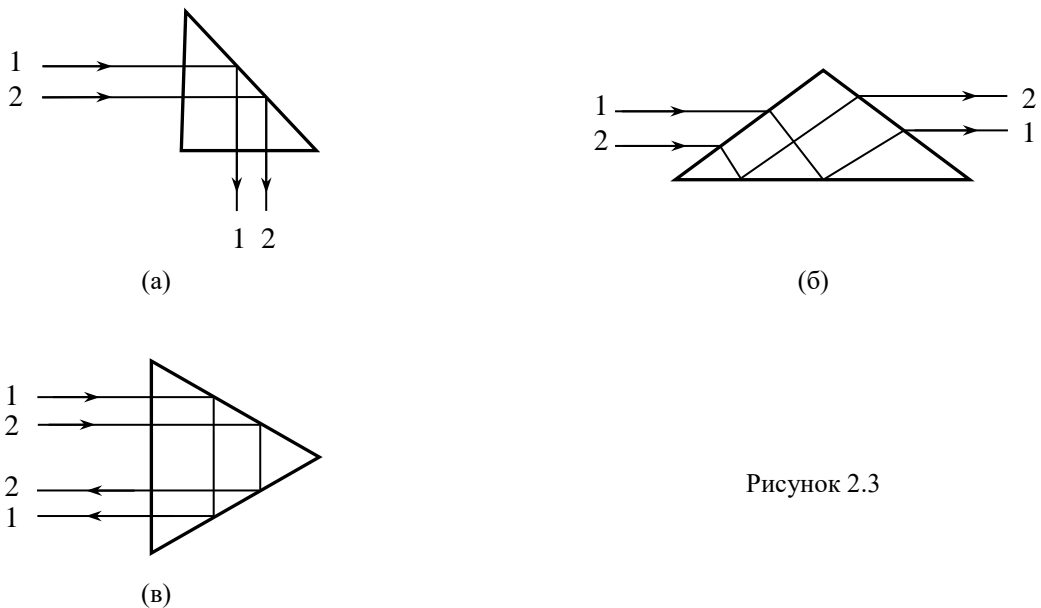


Рисунок 2.3

На рис. 2.4 показана схема хода лучей и получения изображения в перископе, предназначенном для наблюдений из-за укрытия. В принципе можно было бы добиться того же эффекта, заменив призмы в перископе двумя наклонными зеркалами. Однако при отражении от металлического зеркала часть лучистой энергии проникает в металл и поглощается в последнем. При полном же внутреннем отражении такие потери энергий не наблюдаются.

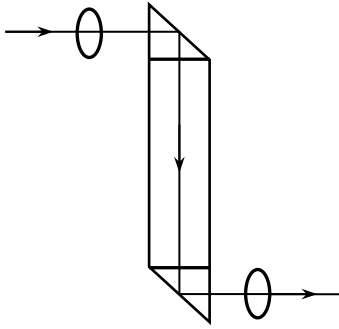


Рисунок 2.4 – Схема хода лучей и получения изображения в перископе

Отражение естественного света, который можно представить как некогерентную смесь двух линейно поляризованных волн с ортогональными направлениями поляризации, обладает замечательным свойством: при падении естественного света под углом  $\theta_i = \theta_{Br}$ , отразится только составляющая, поляризованная перпендикулярно плоскости падения, и отраженный свет будет полностью линейно поляризованным (рис. 2.5).

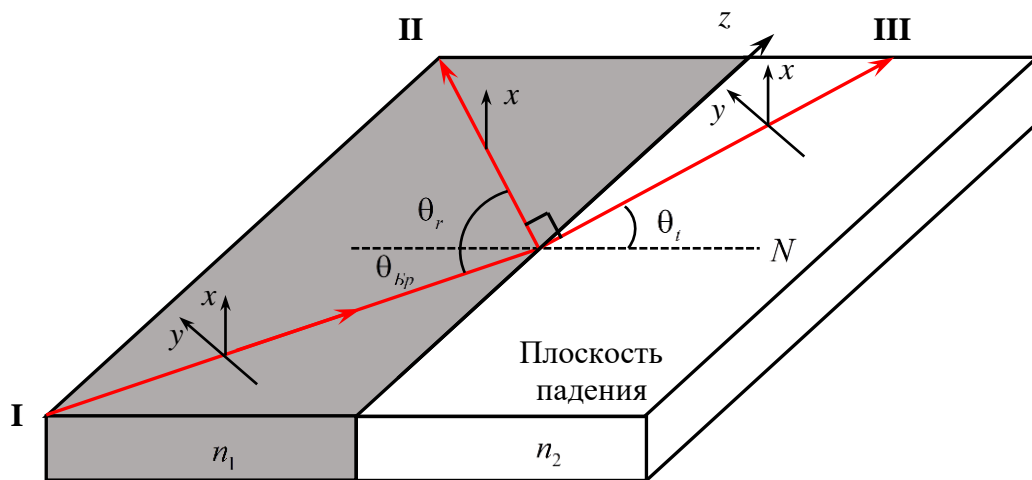


Рисунок 2.5 – К определению угла Брюстера

В этом состоит закон Брюстера, открытый экспериментально в 1815 г. Угол  $\theta_{Br}$  называется ещё углом полной поляризации, а отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны. Из закона преломления получаем

$$\operatorname{tg} \theta_{Br} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (2.8)$$

При угле Брюстера отражённая волна всегда линейно поляризована в направлении, перпендикулярном плоскости падения, а волна, поляризованная в плоскости падения, не отражается вообще. Из сказанного следует, что эффект Брюстера возможен лишь при поляризации падающего луча в плоскости падения. Если же падающий луч поляризован перпендикулярно плоскости падения, то отраженный луч должен наблюдаться под любым углом падения.

В газовых лазерах торцевые окна разрядной трубки представляют собой плоскопараллельные стеклянные пластинки, расположенные под углом Брюстера к оси трубки. Благодаря этому излучение, распространяющееся вдоль оси трубки в образованном зеркалами открытом резонаторе и поляризованное в плоскости падения на пластинки, проходит сквозь них беспрепятственно, не испытывая отражения. В результате лазер генерирует свет, поляризованный в этой плоскости.

## 2.2 Измерение показателя преломления

Под показателем преломления  $n$  вещества (стекла) понимают отношение синуса угла падения  $\theta_i$  к синусу угла преломления  $\theta_r$ , или отношение скорости света в воздухе  $v_B$  к скорости света в веществе  $v_C$ :

$$n = \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{v_B}{v_C}. \quad (2.9)$$

При постоянной температуре и барометрическом давлении воздуха показатель преломления стекла для выбранной длины волны света величина неизменная.

Для измерения показателя преломления и дисперсии стекла применяют следующие методы:

- метод наименьшего отклонения и метод автоколлимации, осуществляемые на гониометре-спектрометре с точностью до  $\pm 1,5 \times 10^{-5}$  показателя преломления;
- метод измерения предельного угла выхода лучей из призмы на рефрактометре с точностью  $\pm 1 \times 10^{-4}$  показателя преломления и  $\pm 2 \times 10^{-5}$  дисперсии;
- иммерсионный метод Обреимова с точностью определения показателя преломления  $\pm 1 \times 10^{-4}$ ;
- интерференционный метод позволяет измерять показатель преломления сравниваемых образцов стекла одной марки с точностью  $\pm 1 \times 10^{-5}$ .

Рассмотрим рефрактометрический метод определения показателя преломления материала. Этот метод основан на использовании явления полного внутреннего отражения, возникающего в тех случаях, когда лучи света идут из среды, оптически более плотной, в среду менее плотную, при этом углы падения лучей должны быть равными или большими угла полного внутреннего отражения  $\varepsilon$ , определяемого по формуле

$$\sin \theta_{ic} = \frac{n}{n_0}, \quad (2.10)$$

где  $n$  и  $n_0$  – показатели преломления сред, причём  $n_0 > n$ .

В рефрактометрических методах (рис. 2.6) используется эталонная призма  $PST$ , показатель преломления которой  $n_0$  и угол  $\theta$  точно измерены заранее; на грань  $PS$  установлен исследуемый образец стекла с показателем преломления  $n$ . Пусть в некоторую точку  $A$  луч  $PA$  испытал полное внутренне отражение.

Согласно закону преломления, для точек  $A$  и  $B$  получим

$$n = n_0 \sin \alpha, \quad (2.11)$$

$$\sin \beta = \frac{\sin \varepsilon}{n_0}. \quad (2.12)$$

Очевидно, что  $\alpha = \theta - \beta$ .

Подставляя последовательно значения  $\alpha$  и  $\sin \beta$  в формулу (2.11), получим общую зависимость, на которой основана теория рефрактометрических методов:

$$n = \sin \theta \sqrt{n_0^2 - \sin^2 \varepsilon} \pm \cos \theta \sin \varepsilon, \quad (2.13)$$

где знак плюс используется при  $\theta > 90^\circ$ , минус – при  $\theta < 90^\circ$ .



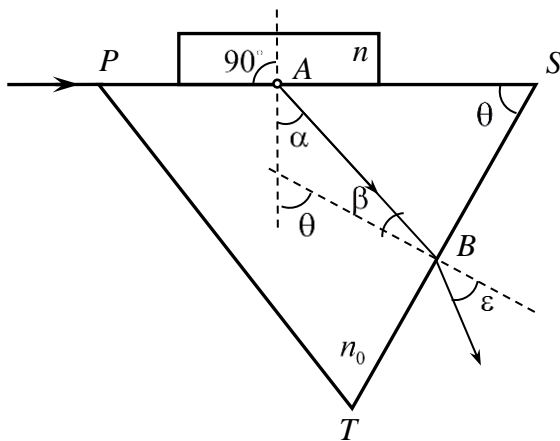


Рисунок 2.6 – Ход луча при рефрактометрических методах измерения показателя преломления

В частном случае, когда  $\theta = 90^\circ$  (рефрактометры Пульфриха), имеем

$$n = \sqrt{n_0^2 - \sin^2 \varepsilon} . \quad (2.14)$$

При  $\theta = 60^\circ$  (рефрактометры Аббе):

$$n = 0,5 \left[ \sqrt{3(n_0^2 - \sin^2 \varepsilon)} \pm \sin \varepsilon \right] . \quad (2.15)$$

Как видно из формулы (2.14), для определения показателя преломления  $n$  необходимо и достаточно измерить лишь один параметр – угол  $\varepsilon$ , так как показатель преломления  $n_0$  эталонной призмы и её угол  $\theta$  являются константами прибора и известны с высокой точностью.

Измеряемый образец имеет более простую форму по сравнению с образцом при гониометрических методах, так как необходимо обеспечить отражение лучей только на плоской границе контакта образца с эталонной призмой. Поэтому рефрактометрические методы по сравнению с гониометрическими обеспечивают возможность более быстрого определения показателя преломления, что является их важным преимуществом.

## 2.4 Контрольные вопросы

1. Сформулируйте законы Снеллиуса-Декарта.
2. Сформулируйте закон отражения.
3. Что такое угол Брюстера? Чем он замечателен?
4. В чем заключается рефрактометрический метод измерения показателя преломления?

## 3 Экспериментальная часть

### 3.1 Прибор Гартля

Модифицированный прибор Гартля, поставляемый в комплекте УМОГ-3, представляет собой диск (рис. 3.1), который можно поворачивать вокруг своей оси. На приборе зафиксировано желтое кольцо, с нанесенным на нем через  $1^\circ$  отсчётными рисками.

На диске укреплены полуцилиндрическая призма **1.2.П** и нанесен указатель нормали к плоской поверхности призмы. Призма фиксируется винтом расположенным вблизи нижней поверхности диска. На оси диска укреплены кронштейны:

- 1.2.И** – для установки держателя 3.4 лазерного излучателя 5.Л;
- 1.2.Ф** – фотодиода 6.1;
- 1.2.Н** – для отсчета угла.

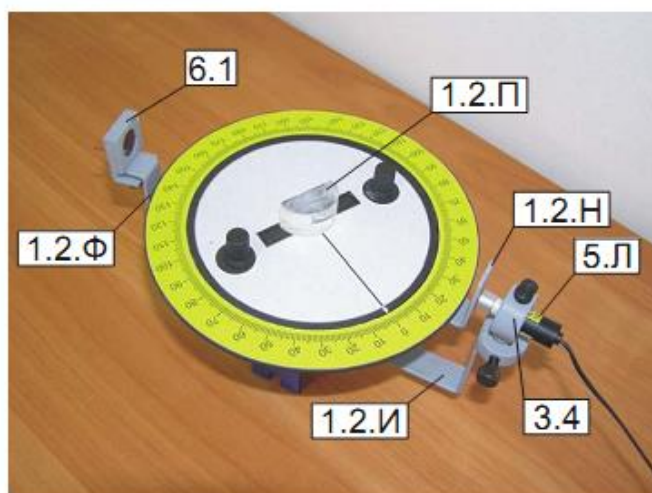


Рисунок 3.1 – Прибор Гартля

Для демонстрации хода лучей держатель **3.4** устанавливается в кронштейн **1.2.И**, лазер **5.1** в держатель **3.4**. Перед демонстрацией хода отраженного и преломленного на границе раздела воздух-стекло лучей, необходимо реализовать скользящее прохождение пучка лазера над диском прибора Гартля. Поверхность диска матовая, что позволяет наблюдать распространение лучей в условиях полу затемнённого помещения (рис. 3.2). Наличие отсчетных рисок, указателя, кронштейна **1.2.Н** позволяет с точностью до  $0,5^\circ - 1^\circ$  определять углы падения, отражения и преломления. Поворачивая диск вокруг своей оси, демонстрируют ход соответствующих лучей и изучают законы отражения, преломления (Снеллиуса-Декарта).



Рисунок 3.2 – Демонстрация закона Снеллиуса-Декарта с помощью прибора Гартля

### 3.2 Демонстрация явления полного внутреннего отражения

Для демонстрации явления полного внутреннего отражения (рис. 2.2) пучок лазера вводят в призму **1.2.П** через ее цилиндрическую поверхность. Отметим, что ось цилиндрической поверхности призмы совпадает с осью вращения диска. Поэтому в приборе Гартля любой луч (падающий, преломленный, отраженный) нормален к цилиндрической поверхности и, следовательно, не изменяет своего направления на границе раздела воздух–цилиндрическая призма. Подбором угла падения пучка на плоскую границу раздела стекло–

воздух (поворотом диска) добиваются исчезновения преломленного пучка. Измерив при этом угол падения, легко реализовать определение показателя преломления стекла, из которого изготовлена призма **1.2.П**, используя формулу закона отражения (показатель преломления воздуха принять равным 1).

### 3.3 Демонстрация эффекта Брюстера

Для демонстрации эффекта Брюстера пучок лазерного излучения, имеющий линейную поляризацию, направляют на плоскую границу раздела воздух–стекло. Поворотом диска устанавливают угол падения, равный углу Брюстера, при котором преломлённый и отраженный пучки ортогональны (рис. 2.5). Между лазером и полугцилиндрической призмой располагают линейный поляризатор. С помощью него устанавливают лазер таким образом, чтобы его излучение было поляризовано в плоскости падения. Фотодиод подключен к вольтметру, и располагают его в отраженном пучке. Затем поочередно измеряют сигнал с вольтметра в отражённом ( $I_R$ ) и преломлённом ( $I_T$ ) пучках для установленной поляризации излучения при различных углах падения лазерного излучения. Кронштейн **1.2.Ф** фотодиода позволяет легко изменять место закрепления фотодиода на кольце. Для того чтобы не учитывать поглощения, коэффициент отражения по интенсивности определяют по формуле

$$R_{\parallel} = \frac{I_{R_{\parallel}}}{I_{R_{\parallel}} + I_{T_{\parallel}}} \quad (3.1)$$

Поворотом лазера вокруг своей оси на угол  $90^\circ$  устанавливают поляризацию падающего излучения, перпендикулярную плоскости падения. Коэффициент отражения  $R_{\perp}$  рассчитывается аналогично формуле (3.1).

### 3.4 Задание

1. Ознакомиться с методикой выполнения лабораторной работы.
2. Используя методику определения показателя преломления, изложенную в пункте 3.2, определить показатель преломления полугцилиндрической призмы.
3. Используя методику, изложенную в пункте 3.3, определить угол Брюстера. Сравнить экспериментально полученное значение угла Брюстера с расчётным значением, при расчете использовать значение показателя преломления стекла полугцилиндрической призмы, полученное экспериментально по методике п. 3.2. Результаты эксперимента и расчетов занести в таблицу 3.1.
4. Построить зависимость коэффициента отражения волны, поляризованной в плоскости падения и ортогонально к плоскости падения, от угла падения лазерного излучения. Используя эту зависимость, уточнить значение угла Брюстера.
5. Результаты контроля и выводов занести в отчет.

Таблица 3.1 – Результаты экспериментов и расчетов

$\theta_i$	$I_{R_{\parallel}}$ , мкА	$I_{T_{\parallel}}$ , мкА	$ R_{\parallel} $ (эксперимент)	$I_{R_{\perp}}$ , мкА	$I_{T_{\perp}}$ , мкА	$ R_{\perp} $ (эксперимент)
$5^\circ$						
$10^\circ$						
...						
...						
$80^\circ$						

### 3.5 Содержание отчёта

При составлении отчёта необходимо руководствоваться общими требованиями и правилами оформления отчёта о лабораторной работе. В соответствующих разделах отчёта необходимо представить:

- схему экспериментальной установки;
- таблицы экспериментальных данных;
- результаты расчетов, предусмотренных заданием;
- графики экспериментальных и расчётных зависимостей  $|R_{\parallel}(\theta_i)|$  и  $|R_{\perp}(\theta_i)|$ ;
- выводы.

### Литература

1. Салех, Б. Оптика и фотоника. Принципы и применение / Б. Салех, М. Тейх; пер. с англ. В. Л. Дербова. – Долгопрудный: Интеллект, 2012. – 784 с.
2. Андреев, А. Н. Оптические измерения: Учебное пособие / А. Н. Андреев, Е. В. Гаврилова, Г. Г. Ишанин и др. – М.: Университетская книга; Логос, 2007. – 416 с.