

5390

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ПРЕЛОМЛЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ
И ЖИДКОСТЕЙ**

Методические указания
к лабораторной работе

Рязань 2019

УДК 621.317

Определение показателей преломления твердых тел и жидкостей: методические указания к лабораторной работе /Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: Б.С.Бобров, А.П.Соколов. Рязань, 2019. 8 с.

Изложены элементы теории, устройство микроскопа, методика определения показателя преломления твердых и жидких веществ.

Предназначены для студентов всех специальностей, изучающих курс «Физика».

Ил. 4. Библиогр.: 3 назв.

Микроскоп, показатель преломления, геометрическая оптика, законы отражения и преломления света

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра общей и экспериментальной физики РГРТУ (зав. кафедрой доц. М.В. Дубков)

Определение показателей преломления твердых тел и жидкостей

Составители: Б о б р о в Борис Сергеевич
С о к о л о в Александр Павлович

Редактор М.Е. Цветкова
Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать . Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 0,5.

Тираж 200 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Цель работы: изучение методов определения показателей преломления прозрачных твердых и жидких веществ; знакомство с устройством микроскопа.

Принадлежности: микроскоп, микрометр, набор стеклянных пластинок, шайбы калиброванной толщины, исследуемая жидкость.

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ И МЕТОД ЭКСПЕРИМЕНТА

УСТРОЙСТВО МИКРОСКОПА

Микроскоп предназначен для исследования очень малых предметов. Поэтому его оптические элементы подбираются таким образом, чтобы вся система давала наибольшее увеличение.

Конструктивно микроскоп состоит из двух собирающих линзовых систем: **объектива** с фокусным расстоянием F_1 , равным нескольким миллиметрам, и **окуляра** с фокусным расстоянием F_2 , равным нескольким сантиметрам. Объектив и окуляр удалены друг от друга на расстояние L , существенно превышающее фокусное расстояние как объектива, так и окуляра.

Оптическая схема микроскопа приведена на рис. 1. Исследуемый малый предмет AB помещается вблизи главного фокуса F_1 объектива \mathcal{L}_1 так, чтобы его изображение $A'B'$ оказалось за линзой (действительное и увеличенное). Полученное в объективе изображение рассматривается в окуляре \mathcal{L}_2 , как в лупе, т.е. это изображение располагается между главным фокусом F_2 и окуляром, но вблизи главного фокуса окуляра. При этом расположение окуляра выбирается таким, чтобы создаваемое им мнимое изображение $A''B''$ действительного изображения $A'B'$ предмета находилось на расстоянии наилучшего зрения (обычно в среднем оно составляет около 25 см и уменьшается с возрастом человека).

Общее увеличение микроскопа K определяется выражением

$$K = K_1 K_2, \quad (1)$$

где K_1 – коэффициент увеличения объектива; K_2 – коэффициент

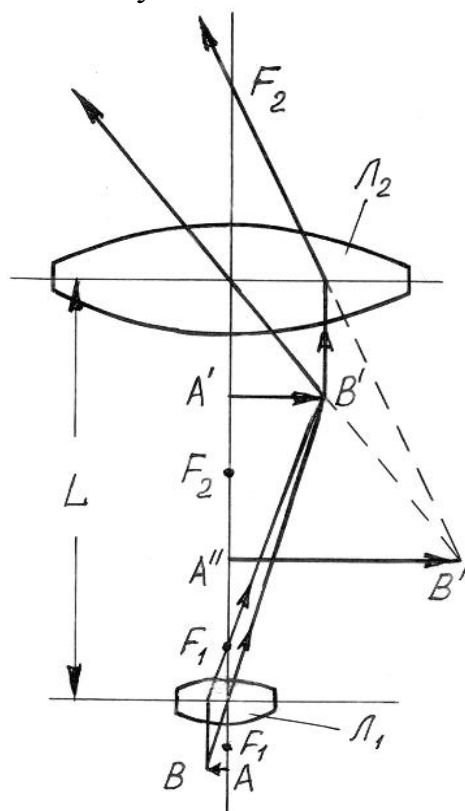


Рис. 1

увеличения окуляра. Увеличение объектива равно

$$K_1 \approx \frac{L}{F_1}. \quad (2)$$

Увеличение K_2 , как и увеличение лупы, равно отношению расстояния наилучшего зрения к фокусному расстоянию окуляра F_2 , т.е.

$$K_2 = \frac{0,25}{F_2}. \quad (3)$$

С учетом уравнений (2) и (3) получаем:

$$K = \frac{0,25L}{F_1 F_2}. \quad (4)$$

Может сложиться впечатление, что увеличение микроскопа можно сделать сколь угодно большим путем уменьшения фокусных расстояний F_1 , F_2 и увеличения длины тубуса или, что то же самое, расстояния L . Однако дифракционные явления ограничивают достигаемую в действительности степень увеличения, так как в каждом оптическом приборе на краях диафрагм, оправ линз и т. д. происходит дифракция света. Поэтому каждый прибор характеризуется **максимальной разрешающей способностью** (или пределом разрешения). Она определяется минимальным расстоянием δ между точками предмета, при котором они представляются различимыми. В этом случае главный дифракционный максимум одной точки изображения совпадает с первым побочным максимумом изображения соседней точки. В связи с этим с помощью микроскопа можно различать лишь такие детали предмета (или сами предметы), размеры которых удовлетворяют условию

$$\delta \geq \frac{0,61\lambda_0}{2n \sin \varphi}, \quad (5)$$

где λ_0 – длина волны света в вакууме; n – показатель преломления среды, окружающей предмет; φ – угловая апертура, т.е. угол, под которым виден радиус выходного отверстия объектива из точки предмета. Поскольку произведение $n \sin \varphi$, называемое **числовой апертурой объектива**, имеет величину, близкую к единице, то минимальные детали, которые еще можно различить с помощью оптического микроскопа, равны (приблизительно) половине длины волны световых лучей. Поэтому одним из наиболее простых способов повышения разрешающей способности микроскопов является переход к излучениям с более короткой длиной волны.

Как следует из выражения (5), величина λ_0/n представляет собой длину световой волны в среде между предметом и объективом

микроскопа. В таком случае заполнение этого пространства веществом с более высоким показателем преломления (например, кедровым маслом с $n=1,5$) приводит к уменьшению длины волны используемого излучения и соответственно к увеличению разрешающей способности микроскопа. Объективы микроскопов, работающие в таких условиях, называются иммерсионными.

ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Проходя через границу раздела двух сред, лучи света преломляются, т.е. изменяют свое направление. Например, переходя из воздуха в воду (рис. 2), лучи приближаются к перпендикуляру, проведенному к границе раздела этих сред. При этом выполняется соотношение Снелла

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{21}. \quad (6)$$

Величина n_{21} называется относительным коэффициентом преломления второй среды по отношению к первой.

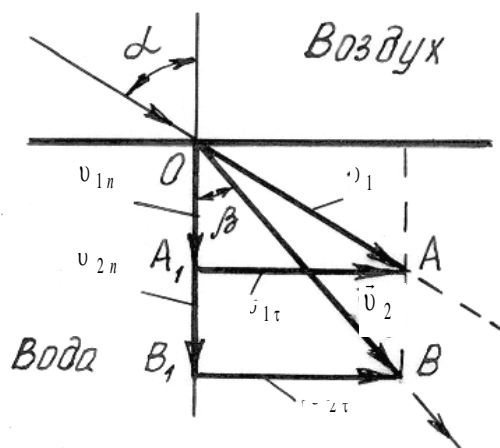


Рис. 2

Первая отчетливо сформулированная точка зрения на природу света принадлежит Ньютону (1672). Исходя из корпускулярных представлений, он сумел объяснить основные законы геометрической оптики, включая закон преломления (6). По Ньютону, приближение света к перпендикуляру (рис. 2) является следствием того, что скорость распространения v_2 света во второй более плотной среде больше скорости v_1 света в менее плотной первой среде. При этом увеличение скорости связано с более сильным притяжением световых корпускул молекулами второй среды. Поскольку при переходе через границу раздела сред изменяется только нормальная составляющая вектора v_1 ($v_{2n} > v_{1n}$), а тангенциальная составляющая скорости остается неизменной ($v_{2\tau} = v_{1\tau}$), то из треугольников OAA_1 и OBB_1 получаем:

$$n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_2}{v_1}. \quad (7)$$

Таким образом, по Ньютону, относительный показатель преломления представляет собой отношение скоростей распространения света в граничащих средах. При этом скорость света в более

плотной среде должна быть больше скорости света в граничащей с ней менее плотной среде.

Современник Ньютона Гюйгенс придерживался иной точки зрения. Исходя из высокой общности звуковых и оптических явлений, Гюйгенс рассматривал свет в виде распространяющегося волнового процесса. Как и Ньютону, ему удалось объяснить основные законы геометрической оптики, однако что касается закона преломления света, то выводы Гюйгенса оказались прямо противоположными заключению Ньютона.

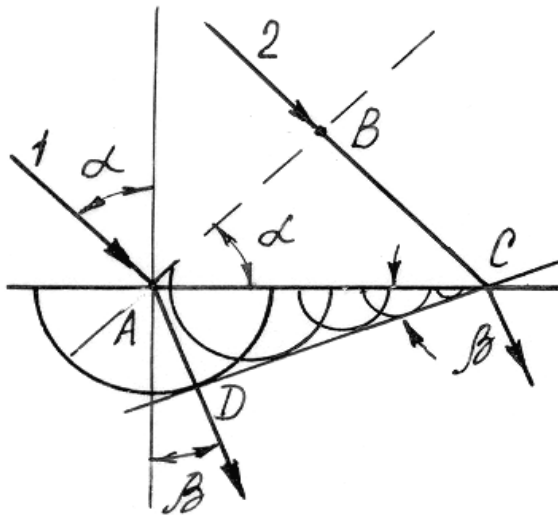


Рис. 3

Для пояснения сути этого противоречия обратимся к рис. 3. Здесь падающая волна представлена в виде параллельного пучка света, ограниченного крайними лучами 1 и 2. В рассматриваемый момент времени плоская волновая поверхность AB падающего пучка достигла границы раздела двух сред в точке A , которая согласно принципу Гюйгенса становится источником вторичной сфериче-

ской волны, распространяющейся в более плотной среде. То же самое можно сказать и о других точках на поверхности границы раздела (плоскость, проходящая через AC).

По мере продвижения волнового фронта AB они будут последовательно вовлекаться в волновой процесс, становясь источниками вторичных волн. И, наконец, за время t , в течение которого падающая волна достигнет точки C , т.е. луч 2 пройдет путь $BC = v_1 t$, вторичная волна, вышедшая из точки A , распространится во второй среде на расстояние $AD = v_2 t$. Огибающая вторичных сферических волн, возбужденных на границе раздела сред, представляет собой плоскую волновую поверхность преломленной световой волны (плоскость, проходящая через DC), которая будет распространяться в виде параллельных лучей, идущих в направлении, перпендикулярном к DC . Из сравнения треугольников BAC и DAC получаем:

$$n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{BC}{AC} \bigg/ \frac{AD}{AC} = \frac{v_1 t}{v_2 t} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (8)$$

Итак, по Гюйгенсу, **отношение синуса угла падения к синусу угла**

преломления равно отношению скорости света в первой среде v_1 к скорости света во второй среде v_2 . В таком случае приближение лучей света после преломления к перпендикуляр, т.е. выполнение условия $n_{21} > 1$, возможно лишь, когда скорость света во второй более плотной среде меньше, чем в первой.

Действительное соотношение скоростей света, отвечающее значению коэффициента преломления $n_{21} > 1$, было установлено лишь в 1850 г., когда Фуко показал, что скорость света в воде v_2 в действительности меньше скорости света v_1 в воздухе. Этот экспериментальный факт являлся убедительным подтверждением справедливости волновой теории Гюйгенса, которая в дальнейшем была развита в трудах Юнга и Френеля.

В 1865 г. Максвелл выдвинул гипотезу о том, что свет представляет собой электромагнитные волны. Эта гипотеза оказалась чрезвычайно плодотворной, поскольку с ее помощью удалось объяснить многие световые явления. Что касается закона преломления, то он находится в полном соответствии с заключением Гюйгенса (8). При этом согласно современным представлениям коэффициент преломления n называется абсолютным, если первой средой является вакуум:

$$n = \frac{c}{v}, \quad (9)$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света (электромагнитной волны) в вакууме; v – **фазовая** скорость распространения световой волны в веществе.

Из теории Максвелла следует, что фазовая скорость распространения света v в веществе зависит от его электрических и магнитных свойств:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}, \quad (10)$$

где ϵ и μ – относительная диэлектрическая и магнитная проницаемость среды.

Поскольку для подавляющего большинства прозрачных веществ μ практически не отличается от единицы, то с учетом (10) выражение для абсолютного показателя преломления (9) может быть представлено в следующем виде:

$$n = \sqrt{\epsilon}. \quad (11)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Предмет, рассматриваемый через плоскопараллельный слой прозрачного вещества, имеющего большую оптическую плотность ($n > 1$)

по сравнению с воздухом, кажется нам расположенным ближе. Это кажущееся приближение связано с преломлением света и зависит от толщины плоскопараллельного слоя, а также от значения его показателя преломления.

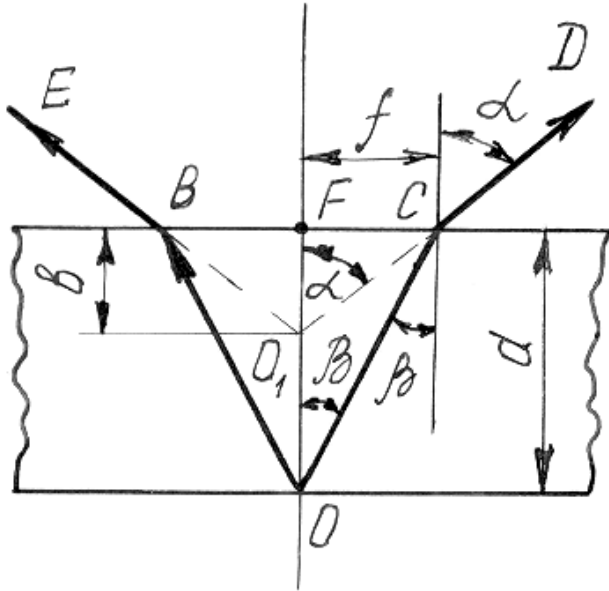


Рис. 4

Представим, что мы рассматриваем точку O , расположенную на нижней грани плоскопараллельной пластинки толщиной d (рис. 4). Проведем из точки O два луча: OB и OC . После преломления эти лучи пойдут по направлениям CD и BE . Наблюдая сверху, мы увидим точку O на пересечении продолжения лучей DC и BE , т.е. в точке O_1 , расположенной на расстоянии b от верхней грани пластинки. Найдем

связь между относительным показателем преломления вещества пластинки n_{21} , толщиной слоя d и расстоянием b .

Из треугольников O_1FC и OFC на рис. 4 следует:

$$f = b \operatorname{tg} \alpha, \quad f = d \operatorname{tg} \beta. \quad (12)$$

Приравнивая полученные выражения, имеем

$$\frac{d}{b} = \frac{\sin \alpha \cos \beta}{\sin \beta \cos \alpha}. \quad (13)$$

Учитывая, что $\sin \alpha / \sin \beta = n$, после преобразований получаем:

$$\frac{d}{b} = \sqrt{\frac{n^2 - \sin^2 \alpha}{1 - \sin^2 \alpha}}. \quad (14)$$

При $\alpha \rightarrow 0$ $d/b \rightarrow n_{21}$. Поэтому при наблюдении вертикально сверху:

$$n_{21} = \frac{d}{b}. \quad (15)$$

Таким образом, измерив толщину слоя и определив каким-либо образом кажущееся положение точки O_1 (например, с помощью микроскопа, снабженного микрометрическим винтом, позволяющим производить точные измерения линейных перемещений тубуса относительно предметного столика), можно определить

относительный показатель преломления данного вещества.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ 1

Определение показателя преломления твердых веществ

1. Ознакомиться с устройством микроскопа.
2. Пластинку из исследуемого вещества с нанесенными на ее грани двумя метками поместить на предметный столик микроскопа.
3. Барабан микрометрического винта тонкой наводки на резкость вывернуть до крайнего положения в направлении «к себе», затем повернуть назад на 1 - 2 оборота.
4. Вращением винта грубой наводки добиться резкого изображения верхней метки, нанесенной на пластинку. При необходимости следует подкорректировать резкость изображения микрометрическим винтом.
5. Заметив, против какого деления барабана стоит указатель-риска, вращением микрометрического винта в направлении «от себя» получить резкое изображение нижней метки на исследуемой пластинке. Поскольку при проведении этой операции одновременно измеряется расстояние b , то в процессе получения резкого изображения нижней метки необходимо вести отсчет целого числа оборотов барабана микрометрического винта, а также отметить, какому делению соответствует конечное положение барабана.
6. Определить смещение b тубуса микроскопа. Для этого необходимо умножить число делений барабана на число его полных оборотов, прибавить сюда число делений, составляющих долю сделанного неполного оборота, и умножить все это на цену одного деления шкалы барабана.
7. Измерить микрометром толщину пластинки.
8. Вычислить по формуле (15) относительный показатель преломления вещества n_{21} .

При этом следует иметь в виду, что одним из источников ошибок, возникающих при измерении, является конечная величина глубины резкости микроскопа: при небольших перемещениях тубуса изображение предмета продолжает оставаться достаточно четким. С перемещением тубуса перемещается и мнимое изображение предмета, рассматриваемое через окуляр. Если смещение мнимого изображения происходит в интервале аккомодации глаза наблюдателя, то изображение всегда кажется резким.

Поскольку аккомодация глаза может меняться от опыта к опыту, то при наведении микроскопа на резкость возникает случайный разброс в положении тубуса. Ошибка, таким образом, носит

случайный характер и может быть уменьшена за счет многократного повторения опыта. Поэтому измерения следует проводить не менее пяти раз.

9. Оценить погрешность определения n_{21} .

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ 2

Определение показателя преломления жидкостей

1. Установить микроскоп так, чтобы его предметный столик занимал горизонтальное положение.

2. Толстое предметное стекло с одной меткой поместить на предметный столик микроскопа. Метка должна располагаться на верхней грани пластинки в центре поля зрения объектива микроскопа. Положить на предметное стекло шайбу калиброванной толщины. По возможности шайба должна располагаться симметрично относительно метки.

Затем с помощью пипетки нанести на предметное стекло небольшое количество исследуемой жидкости так, чтобы толщина капли слегка превышала толщину калиброванной шайбы.

После этого накрыть слой жидкости покровным стеклом, единственная метка которого должна располагаться на его нижней грани. При этом следует иметь в виду, что правильно подготовленная к исследованию проба жидкости не должна содержать в себе воздушных пузырьков.

3. Далее по пунктам 3 - 9 задания 1 определить расстояние b , измерить толщину шайбы d , вычислить значение показателя преломления n_{21} и оценить погрешность измерения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте основные законы геометрической оптики.
2. Выведите законы отражения и преломления света на основе волновой теории света.
3. Дайте определения абсолютного и относительного показателей преломления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев И.В. Курс общей физики. М.: Наука, 1978.
2. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. М.: Наука, 1985.