

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра технической физики

ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

Методические указания
к лабораторной работе

М и н с к 2 0 0 4

УДК 535.5

В методических указаниях описано явление дисперсии света, изложены основы электронной теории дисперсии, приведена методика измерения показателя преломления стеклянной призмы по углу наименьшего отклонения лучей с помощью гониометра.

Составители:

Т.С. Кононова, Н.Н. Митькина,
Е.Е. Трофименко

Рецензенты:

В.И. Кудин, П.Г. Кужир

© Кононова Т.С., Митькина Н.Н.,
Трофименко Е.Е., составление, 2004

Лабораторная работа № 307

ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

Цель работы

1. Изучить законы преломления света и ход лучей в призме.
2. Изучить явление дисперсии света.
3. Измерить показатель преломления прозрачного вещества для различных длин волн спектра ртутной лампы по углу наименьшего отклонения луча призмой.
4. Определить зависимость показателя преломления от длины волны света.
5. Построить график зависимости $n = f(\lambda)$.

Порядок теоретической подготовки и выполнения работы

1. Изучить и законспектировать в рабочую тетрадь ответы на следующие вопросы:
 - 1) законы преломления света;
 - 2) принцип обратимости световых лучей;
 - 3) абсолютный и относительный показатель преломления;
 - 4) ход монохроматических лучей в призме;
 - 5) зависимость угла отклонения луча при прохождении его через призму от преломляющего угла призмы.
2. Изучить на рабочем месте сущность метода измерения показателя преломления по углу наименьшего отклонения луча призмой.
3. Используя указания, имеющиеся на рабочем месте в лаборатории, выполнить работу и данные занести в протокол отчета.
4. К зачету подготовить отчет о работе и знать ответы на следующие вопросы:
 - 1) законы преломления света;
 - 2) абсолютный и относительный показатель преломления;
 - 3) связь между показателями преломления и скоростью света в данной среде;

- 4) зависимость показателя преломления от электрических и магнитных свойств среды;
- 5) зависимость показателя преломления от длины волны. Аномальная и нормальная дисперсия;
- 6) объяснение дисперсии с точки зрения электронной теории;
- 7) изобразить ход лучей монохроматического и белого света через призму;
- 8) преломляющий угол призмы. Угол отклонения луча призмой;
- 9) вывод рабочей формулы;
- 10) объяснить метод измерения угла наименьшего отклонения луча призмой на гониометре.

Дисперсия света

Экспериментальные исследования показывают, что при прохождении границы раздела двух сред луч света испытывает преломление (рис.1). Это явление подчиняется следующим закономерностям:

- 1) преломленный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью к поверхности раздела в точке падения;
- 2) отношение синусов углов падения и преломления лучей света с фиксированной длиной волны есть величина постоянная для двух данных веществ:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n_{21}.$$

Коэффициент n_{21} называют коэффициентом (показателем) преломления второй среды относительно первой. Показатель преломления среды относительно вакуума обозначают n и называют показателем преломления данной среды (абсолютным показателем преломления). Если луч падает из вакуума на вещество, то закон преломления записывается в виде

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n. \quad (1)$$

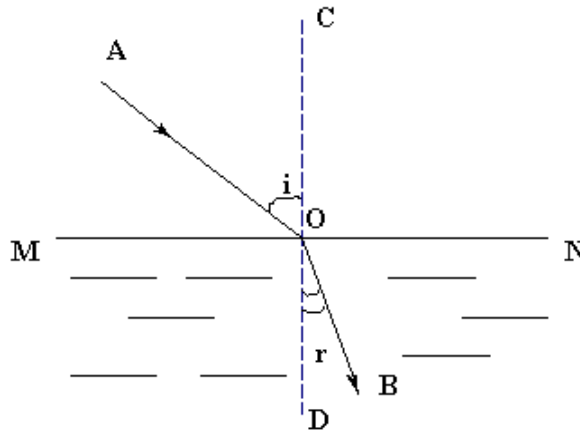


Рис. 1. Преломление света:
 MN – граница раздела двух сред; AO и OB – падающий и преломленный лучи соответственно; CD – нормаль (перпендикуляр к поверхности раздела, восстановленный в точке падения); i и r – углы падения и преломления луча

Было обнаружено, что значение показателя преломления зависит от длины волны (или частоты $\nu = \frac{c}{\lambda}$, где c – скорость света в вакууме) падающего света.

Зависимость показателя преломления n от длины волны λ (или от частоты ν) проходящего света называется *дисперсией света*. Следствием дисперсии является разложение в спектр белого света при прохождении его через призму.

Дисперсия присуща всем средам. Зависимость показателя преломления от длины волны $n = f(\lambda)$ является нелинейной и немонотонной (рис.2). Оказалось, что в подавляющем большинстве случаев показатель преломления среды n уменьшается с ростом длины волны λ (области 1-2 и 3-4 на рис.2). Такая зависимость получила название *нормальной дисперсии*. В области нормальной дисперсии $\frac{dn}{d\lambda} < 0$. Нормальная дисперсия

наблюдается у веществ прозрачных для света. Дальнейшие исследования показали, что возможна и обратная зависимость, когда показатель преломления n уменьшается с уменьшением длины волны λ (*аномальная дисперсия*). В области аномальной дисперсии (участок 2-3 на рис.2) $\frac{dn}{d\lambda} > 0$. Аномальная дисперсия тесно связана с поглощением света. Она наблюдается в тех относительно узких диапазонах длин волн, в которых свет сильно поглощается веществом (эти области спектра называют полосами поглощения).

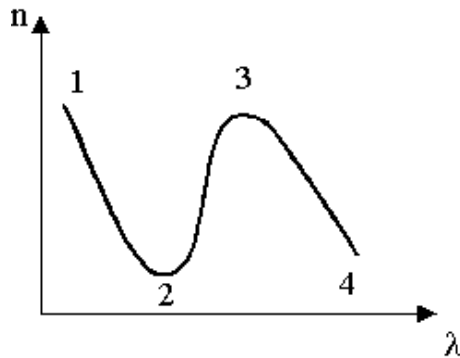


Рис. 2

У стекла (как и у большинства прозрачных веществ) нет полос поглощения в видимой части спектра, поэтому для видимого света в стекле наблюдается нормальная дисперсия. Вместе с тем известно, что стекло сильно поглощает ультрафиолетовые лучи.

Согласно теории Максвелла показатель преломления среды n , диэлектрическая постоянная этой среды ϵ и ее магнитная проницаемость μ связаны с формулой

$$n = \sqrt{\epsilon\mu} . \quad (2)$$

Большинство прозрачных для света веществ являются диэлектриками, например, стекло, вода, масло и т. п. В диэлектриках $\mu \approx 1$. Следовательно, в этом случае формула (2) принимает вид

$$n = \sqrt{\varepsilon} . \quad (3)$$

Выражение (3) противоречит опыту. Эксперимент показывает, что $n = n(\lambda)$, а согласно теории Максвелла $\varepsilon = const$. Кроме того, значения n , получаемые из формулы (3), не согласуются с опытными данными. Например, для воды $n \approx 1,33$ и в то же время $\varepsilon \approx 81$, $\sqrt{\varepsilon} = 9$.

Все эти противоречия легко разрешаются, если учесть, что обычная диэлектрическая постоянная характеризует свойства вещества в условиях постоянного электрического поля. Когда же сквозь вещество проходит свет, то оно попадает в быстропеременное поле световой волны (частота колебаний в световой волне достигает примерно 10^{15} Гц). Очевидно, что значение ε , измеренное в условиях постоянного электрического поля, не будет годиться для случая электрических полей такой частоты.

С точки зрения электронной теории взаимодействие света и вещества сводится к воздействию электромагнитного поля световой волны на атомы и молекулы вещества. Частота переменного электромагнитного поля световой волны так велика (около 10^{15} Гц), что только малые по массе электроны могут следовать за изменением поля световой волны. Более тяжелые электрические заряды (протоны, ионы) практически не успевают реагировать на такие изменения электрического поля. Таким образом падающая световая волна вызывает колебания электронов в атомах и молекулах вещества в такт с колебаниями вектора E световой волны. Колеблющиеся электроны излучают в свою очередь электромагнитные световые волны. Эти вторичные волны, очевидно, когерентны между собой и с первичной волной. В однородном веществе в резуль-

тате интерференции падающей волны со вторичными волнами возникает проходящая волна, которая распространяется в направлении падающей волны, но с измененной скоростью.

Рассмотрим поляризацию вещества под действием электромагнитного поля световой волны. Согласно электронной теории электроны в атомах и молекулах диэлектрика находятся в положении равновесия. Под действием электрического поля E световой волны они смещаются из положения равновесия на некоторое расстояние x . В результате атом превращается в электрический диполь с моментом $p = ex$, где e – заряд электрона. Если в единице объема среды имеется N атомов, в каждом атоме смещается только один электрон, то электрический дипольный момент единицы объема, который называется поляризованностью P , равен

$$P = Nex. \quad (4)$$

Диэлектрическая проницаемость вещества по определению равна

$$\varepsilon = 1 + \varepsilon = 1 + \frac{P}{\varepsilon_0 \cdot E}, \quad (5)$$

где ε – диэлектрическая восприимчивость среды;

ε_0 – электрическая постоянная.

Сравнивая формулы (3), (4) и (5), получаем

$$n^2 = 1 + \frac{P}{\varepsilon_0 E} = 1 + \frac{Nex}{\varepsilon_0 E}. \quad (6)$$

Колебания электронов в атомах под действием распространяющейся в среде световой волны являются типичным примером вынужденных колебаний. Внешней или вынуждающей силой в данном случае будет сила, действующая на электрон со стороны электрического поля световой волны:

$$F_e = eE = eE_0 \cdot \cos \omega t .$$

Здесь E – напряженность электрического поля световой волны, которая изменяется по гармоническому закону; ω – частота падающего света; E_0 – амплитудное значение напряженности электрического поля.

Силу, которая возвращает электрон в атоме в положение равновесия, называют квазиупругой. Ее величина равна

$$F_e = -m\omega_0^2 x ,$$

где m и ω_0 – масса электрона и циклическая частота его свободных незатухающих колебаний.

На основании второго закона Ньютона можно записать, что

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -m\omega_0^2 x + eE_0 \cos \omega t . \quad (7)$$

Решение уравнения (7) имеет вид

$$x = \frac{eE_0 \cos \omega t}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} . \quad (8)$$

Подставляя выражение (8) в (6), получаем

$$n^2 = 1 + \frac{Ne^2}{\varepsilon_0 m(\omega_0^2 - \omega^2)} . \quad (9)$$

Из формулы (9) видно, что в области от $\omega = 0$ до $\omega = \omega_0$ показатель преломления $n > 1$ и возрастает с увеличением ω . В области от $\omega = \omega_0$ до $\omega = \infty$ показатель преломления $n < 1$ и возрастает от $-\infty$ до 1 (рис.3).

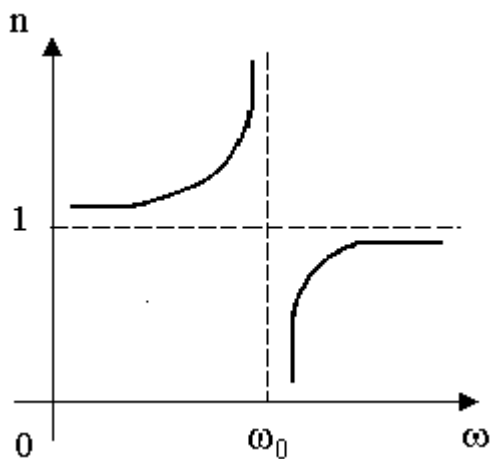


Рис. 3

Обращение показателя преломления в бесконечность не имеет физического смысла. Экспериментальные кривые не имеют такого разрыва, который изображен на рис.3. Дело в том, что колеблющийся электрон постепенно теряет свою энергию, и, следовательно, амплитуда колебаний с течением времени уменьшается. Этот процесс называется затуханием. Затухание связано с излучением вторичных волн и взаимодействием атомов между собой. Явление затухания аналогично трению в механических колебаниях.

Чтобы учесть затухание, в правую часть уравнения (7) следует добавить силу сопротивления, которая пропорциональна скорости электрона, как это делается в механике. С учетом затухания график функции $n(\omega)$ вблизи ω_0 уже не имеет разрыва (рис.4), при этом на нем появляется область аномальной дисперсии AB .

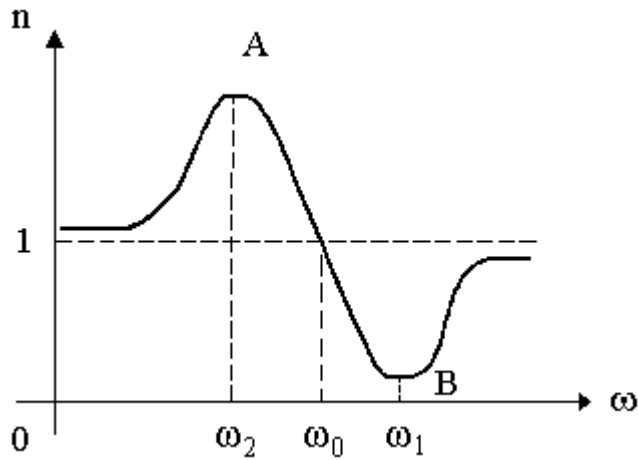


Рис. 4

Как уже отмечалось, в видимой области спектра все прозрачные вещества не имеют полос поглощения. Большинство таких веществ сильно поглощает ультрафиолетовое излучение. Для всех таких веществ в видимой области спектра справедливо неравенство $\omega \ll \omega_0$. Так как $\omega_{кр} < \omega < \omega_ф$, то $n_ф > n_{кр}$, т.е. для прозрачных веществ в соответствии с опытом наблюдается нормальная дисперсия.

Обычно для электронов в атоме характерно наличие нескольких собственных (резонансных) частот колебаний ($\omega_{01}, \omega_{02}, \dots$). Таким образом, как следует из рис. 4 и 5, вдали от резонансных частот наблюдается нормальный закон дисперсии, а вблизи этих частот имеет место аномальная дисперсия.

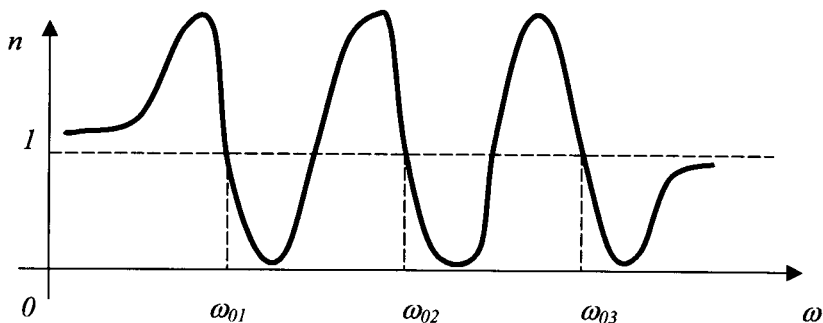


Рис. 5. Зависимость n от ω для случая трех резонансных частот

Методика выполнения работы

Определение показателя преломления вещества по углу наименьшего отклонения

Внимание: перед началом работы внимательно изучить порядок снятия отсчета по гониометру и проверить его правильность у преподавателя.

Рассмотрим метод определения показателя преломления, применимый для прозрачных веществ. Метод состоит в измерении угла отклонения лучей при прохождении света через призму, изготовленную из исследуемого материала. На призму направляется параллельный пучок лучей, поэтому достаточно рассмотреть ход одного из них в плоскости, перпендикулярной линии пересечения преломляющих граней призмы (рис.6). Ход луча через призму рассчитывается на основании законов преломления света. При преломлении на первой грани призмы AC получим

$$n = \frac{\sin i_1}{\sin r_1}, \quad (10)$$

где n – показатель преломления материала призмы для данной длины волны света. Угол падения луча на вторую грань призмы находится из треугольника EDF :

$$i_2 = \varphi - r_1. \quad (11)$$

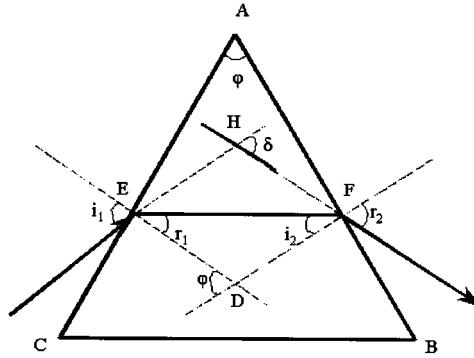


Рис. 6:

i_1, i_2 – углы падения;
 r_1, r_2 – углы преломления на границах раздела AC и AB , соответственно;
 φ – преломляющий угол призмы;
 δ – угол отклонения выходящего из призмы луча относительно первоначального направления

Угол преломления r_2 можно найти из закона преломления

$$\sin r_2 = n \cdot \sin i_2. \quad (12)$$

Из формул (10), (11) и (12) получаем выражение для определения показателя преломления, содержащего углы i_1, r_2, φ , которые можно измерить

$$n = \frac{\sin i_1}{\sin \left[\varphi - \arcsin \left(\frac{\sin r_2}{n} \right) \right]}. \quad (13)$$

Измерения и вычисления упрощаются, а точность определения n возрастает, если сократить число измеряемых углов.

Этого можно достигнуть при симметричном ходе лучей через призму, при котором выполняются следующие равенства:

$$i_1 = r_2, \quad i_2 = r_1.$$

На практике вместо углов i_1, r_2 удобнее измерять угол отклонения лучей от своего первоначального направления δ . Этот угол можно найти из рассмотрения четырехугольника $HFDE$. Действительно, т.к. $HED = i_1$ и $HFD = r_2$, а $r_2 = i_1$, то сумма углов четырехугольника $HFDE$ равна

$$2\pi = (\pi - \delta) + (\pi - \varphi) + i_1 + r_2. \quad (14)$$

Из выражения (14) для симметричного хода лучей получаем

$$i_1 = \frac{\delta + \varphi}{2}, \quad (15)$$

а из выражения (11)

$$r_1 = \frac{\varphi}{2}. \quad (16)$$

Подставляя в формулу (10) значения i_1 и r_2 из (15) и (16), получим формулу для определения показателя преломления при симметричном ходе лучей через призму

$$n = \frac{\sin(\delta + \varphi)}{\sin \frac{\varphi}{2}}. \quad (17)$$

Можно показать, что при симметричном ходе лучей угол отклонения δ будет наименьшим. Таким образом, добиваясь

минимального отклонения лучей призмой, мы тем самым устанавливаем призму симметрично по отношению к падающему и выходящему лучам.

Следовательно, определение показателя преломления вещества сводится к измерению преломляющего угла призмы и угла наименьшего отклонения лучей.

На рис. 7 приведена схема для проведения опыта.

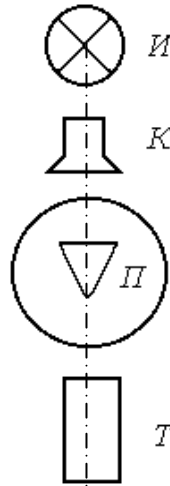


Рис. 7:

Т – зрительная труба;
К – коллиматор со спектральной щелью;
П – призма; *И* – источник света (ртутная лампа)

При измерении угла этим способом используется прибор (рис.8), состоящий из коллиматора со спектральной щелью, зрительной трубы с объективом и обычным окуляром, внешнего источника света.

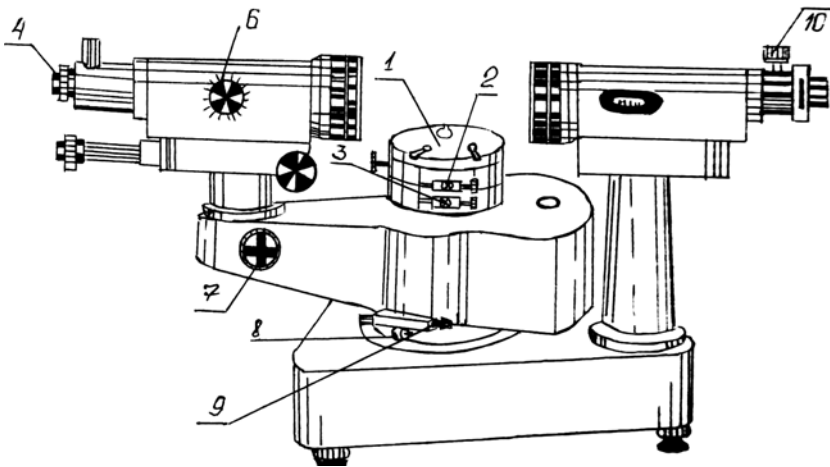


Рис. 8. Гониометр:

- 1 – предметный столик; 2,3 – зажимные винты предметного столика;
 4 – окуляр зрительной трубы; 5 – окуляр отсчетного устройства; 6 – маховичок
 фокусировки зрительной трубы; 7 – маховичок оптического микрометра;
 8 – зажимной винт зрительной трубы; 9 – микрометрический винт;
 10 – винт регулировки ширины коллиматора

Порядок выполнения работы

1). Расположить источник света напротив входной щели коллиматора. Включить источник света.

2). Найти изображение щели коллиматора в поле зрения трубы. Четкость изображения достигается при помощи винта 6. При помощи маховика 7 совместить штрихи шкал лимба. Снять отсчет A_1 .

3). В работе применяется прямоугольная равнобедренная призма. Эту призму на столике гониометра установить прямым углом в сторону коллиматора по его оси, а основание призмы должно пересекать ось коллиматора (как показано на рис. 7).

4). Невооруженным глазом найти направление, в котором видно разложение в спектр изображения щели коллиматора.

Затем поворачивать зрительную трубу вправо или влево до тех пор, пока желтая спектральная линия не окажется в середине поля зрения окуляра зрительной трубы. Остановить зрительную трубу, закрепить ее с помощью винта 8.

5). Поворачивать предметный столик с призмой (рукой по или против часовой стрелки в зависимости от положения зрительной трубы), одновременно наблюдая в окуляре зрительной трубы за движением линий спектра. При положении зрительной трубы слева – столик вращать против часовой стрелки. В этом случае спектр будет уходить вправо. При положении зрительной трубы справа – столик вращать по часовой стрелке. В этом случае спектр будет уходить влево. В определенный момент в том и другом случае спектр остановится и начнет перемещаться в обратном направлении. При остановке спектра прекращать вращение столика.

6). Произвести измерения угла для каждой линии спектра A_2 . Для этого нужно совместить визирную линию с линией спектра с помощью винта 9. Маховиком 7 совместить парные штрихи верхнего и нижнего рядов, видимых в окуляре отсчетного устройства. Отсчет произвести для каждой линии спектра.

7). Результаты измерения занести в таблицу.

Результаты измерения

| Линия спектра | A_1 | A_2 | δ | n |
|--------------------------------------|-------|-------|----------|-----|
| Красная $\lambda = 623$ нм | | | | |
| Желтая $\lambda = 577$ нм | | | | |
| Зеленая $\lambda = 546$ нм | | | | |
| Зелено-голубая $\lambda = 491$ нм | | | | |
| Синяя $\lambda = 434$ нм | | | | |

8). Вычислить показатель преломления n для каждой линии спектра по формуле

$$n = \frac{\sin \frac{\delta + \theta}{2}}{\sin \frac{\theta}{2}},$$

где $\delta = A_1 - A_2$ и $\theta = 45^\circ$.

9). Построить график зависимости показателя преломления от длины волны $n = f(\lambda)$.

***Погрешность определения показателя преломления
по углу наименьшего отклонения***

Погрешность определения показателя преломления можно оценить, прологарифмировав и продифференцировав выражение (17) по переменным n , φ , δ :

$$\frac{dn}{n} = \frac{1}{2} \left[\left(\operatorname{ctg} \frac{\varphi + \delta}{2} \right) (d\varphi + d\delta) - \left(\operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} \right) d\varphi \right].$$

Углы φ и δ измеряются с одинаковой точностью поэтому, переходя к приращениям, получим

$$\frac{\Delta n}{n} = \left(\operatorname{ctg} \frac{\varphi + \delta}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} \right) \cdot \Delta \varphi, \quad (18)$$

где Δn – абсолютная погрешность определения показателя преломления;

$\Delta \varphi$ – абсолютная погрешность измерения углов, выраженная в радианах ($\Delta \varphi = 0,5$ рад).

Литература

1. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Курс физики. – М.: Высш. школа, 1987 – С. 382-384 .
2. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высш. школа, 1996. – С. 349-351.
3. Ландсберг Г.С. Оптика. – М.: Наука, 1976. – С. 540-555.
4. Наркевич И.И., Волошенский Э.И., Лобко С.И. Физика для вузов. Электричество и магнетизм. Оптика. Строение вещества. – Мн., 1994. – С. 309-317.

Учебное издание

ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

Методические указания
к лабораторной работе

Составители: КОНОНОВА Татьяна Сидоровна
МИТЬКИНА Нина Николаевна
ТРОФИМЕНКО Евгений Евгеньевич

Редактор О.Н. Воробьева
Компьютерная верстка А.Г. Гармазы

Подписано в печать 28.01.2004.

Формат 60x84 1/16. Бумага типографская №2.

Печать офсетная. Гарнитура Таймс.

Усл.печ.л. 1,2. Уч.-изд.л. 0,9. Тираж 150. Заказ 511.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

Лицензия ЛВ № 155 от 30.01.2003. 220013, Минск, проспект Ф.Скорины, 65.