



XL Международная олимпиада школьников по физике (Мексика, г. Мерида, 2009 год). Экспериментальный тур

Экспериментальная задача 1. Определение длины волны диодного лазера

Лазерный пучок должен пройти через линзу. Считайте, что фокус – точечный источник, из которого исходит сферическая волна. После линзы на пути пучка стоит лезвие бритвы, частично закрывающее пучок. Край лезвия может рассматриваться как источник цилиндрической волны. Эти две волны интерферируют одна с другой в направлении распространения и дают интерференционную картину, которую можно наблюдать на экране (рис. 1.1).

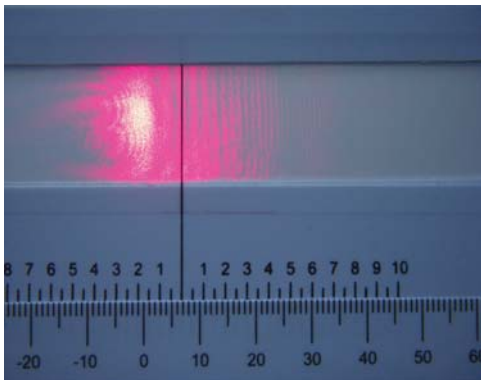


Рис. 1.1. Типичная интерференционная картина полос

Есть два важных частных случая (рис. 1.2 и 1.3).

1.1. Соберём эксперименталь-

ную установку для получения вышеописанных интерференционных картин. Расстояние L_0 от фокуса линзы до экрана должно быть значительно больше фокусного расстояния.

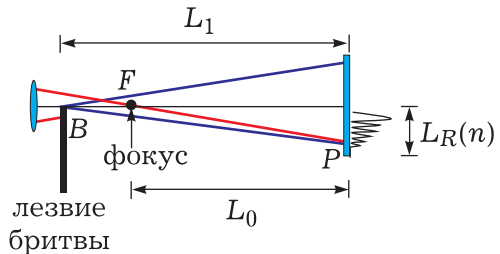


Рис. 1.2. Случай I: бритва до фокуса линзы

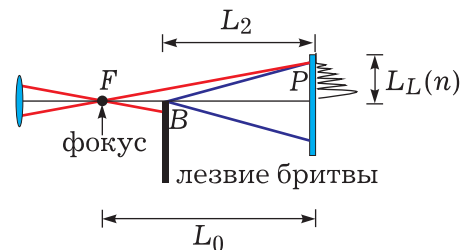


Рис. 1.3. Случай II: бритва за фокусом линзы

Сделаем эскиз нашей установки. Изобразим на нём путь лазерного пучка и укажем, на какой высоте h от оптического стола он проходит.



Внимание! Не будем обращать внимания на возможные круговые картины. Кольца появляются из-за оправы диодного лазера.

Мы должны видеть не менее 10 вертикальных интерференционных полос на экране. Измеряем положение *тёмных* полос. Чтобы считывать положение полос с лучшей точностью, мы можем использовать увеличительное стекло. Лучший способ наблюдения полос – смотреть на заднюю поверхность освещённого экрана.

Если установка правильно отъюстирована, то при перемещении лезвия вдоль луча мы должны видеть картину для случая I или II.



Как дети это будут делать

Теоретические соображения

L_0 – расстояние от фокуса до экрана, L_1 – расстояние от бритвенного лезвия до экрана (случай I), L_2 – расстояние от бритвенного лезвия до экрана (случай II), $L_R(n)$ – координата n -ой *тёмной* полосы (случай I), $L_L(n)$ – координата n -ой *тёмной* полосы (случай II).

Первая *тёмная* полоса для случаев I и II – самая широкая и соответствует $n=0$. В нашей экспериментальной установке должны выполняться условия $L_R(n) \ll L_0, L_1$ для случая I и $L_L(n) \ll L_0, L_2$ для случая II.

Явление интерференции волн происходит из-за разницы оптических путей волн, исходящих из одной и той же точки пространства. В зависимости от разницы фаз волны могут ослаблять друг друга (интерференционный минимум, *тёмные* полосы) или усиливать (интерференционный максимум, *светлые* полосы).

Детальный анализ интерференции этих волн даёт следующее условие *тёмной* полосы для случая I:

$$\Delta_I(n) = \left(n + \frac{5}{8} \right) \lambda, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (1.1)$$

и для случая II:

$$\Delta_{II}(n) = \left(n + \frac{7}{8} \right) \lambda, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (1.2)$$

где λ – длина волны лазера, а $\Delta_I(n)$ и $\Delta_{II}(n)$ – разность длин оптических путей для каждого случая.

Разность длин оптических путей для случая I равна

$$\Delta_I(n) = (BF + FP) - BP \quad (1.3)$$

для $n = 0, 1, 2, \dots$, а для случая II:

$$\Delta_{II}(n) = (FB + BP) - FP \quad (1.4)$$

для $n = 0, 1, 2, \dots$

1.2. Предполагая, что $L_R(n) \ll L_0, L_1$ для случая I и $L_L(n) \ll L_0, L_2$ для случая II, и используя уравнения (1.3) и (1.4) (убедимся, что наш эксперимент удовлетворяет этим условиям), найдём приближенные выражения для $\Delta_I(n)$ и $\Delta_{II}(n)$ в терминах $L_0, L_1, L_2, L_R(n)$ и $L_L(n)$. Имейте в виду, что $(1+x)^r \approx 1+rx$ при $x \ll 1$ (ответ на вопрос

$$1) \Delta_I(n) \approx \frac{1}{2} L_R^2(n) \cdot \left(\frac{1}{L_0} - \frac{1}{L_1} \right);$$

$$2) \Delta_{II}(n) \approx \frac{1}{2} L_L^2(n) \cdot \left(\frac{1}{L_2} - \frac{1}{L_0} \right).$$



L_0 трудно определить, потому что положение фокуса нелегко найти, а $L_R(n)$ и $L_L(n)$ трудно измерить точно из-за неточной юстировки.

Чтобы избавиться от этих трудностей, выберем начало отсчёта (0) шкалы как точку отсчёта координат для всех измерений положения по-

лос. Пусть l_{0R} и l_{0L} – неизвестные координаты, от которых отсчитываются $L_R(n)$ и $L_L(n)$. Пусть $l_R(n)$ и $l_L(n)$ – положения полос от начала шкалы (0). Тогда

$$\begin{aligned} L_R(n) &= l_R(n) - l_{0R} \\ \text{и } L_L(n) &= l_L(n) - l_{0L}. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Выполнение эксперимента. Анализ результатов

1.3. Для случаев I и II измерим положения тёмных полос $l_R(n)$ и $l_L(n)$ как функцию номера полосы n . Занесём свои измерения в таблицу 1 (мы должны сделать не менее восьми измерений для каждого случая).

Определим положения лезвия L_1 и L_2 и укажем, каким измерительным прибором мы пользовались.

Внимание: для того чтобы упростить анализ и получить лучшую точность, измеряем *прямо* расстояние $d = L_1 - L_2$ с лучшей точностью, чем L_1 и L_2 . Указываем использованное нами измерительное устройство.

1.4. Используя вышеприведённые данные, найдём L_0 , l_{0R} , l_{0L} и λ .

Предложим процедуру для получения этих величин. Приведём использованные нами выражения и/или уравнения. Включим анализ погреш-

ностей. Изобразим на графике проанализированные нами величины. Выпишем вычисленные значения l_{0R} и l_{0L} с погрешностями.

1.5. Приведём вычисленное значение L_0 , погрешность и формулы для её вычисления.

1.6. Напишем вычисленное значение λ . Включим погрешность и формулы для её вычисления. *Внимание:* в нашем выражении для λ везде, где мы используем $(L_1 - L_2)$, заменим его на d и будем применять прямое измерение этой величины.

$$\text{Ответ. } \lambda = \frac{d}{2L_a \cdot L_b} \cdot \frac{m_R^2 \cdot m_L^2}{m_R^2 + m_L^2};$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx \sqrt{2} \frac{\Delta m_L}{m_L}, \text{ где}$$

$$m_R = \sqrt{\frac{2L_1 L_0}{L_1 - L_0}} \cdot \lambda, \quad m_L = \sqrt{\frac{2L_2 L_0}{L_0 - L_2}} \cdot \lambda.$$

Экспериментальная задача 2. Двухлучепреломление слюды

Описание явления

Свет – это поперечная электромагнитная волна, её электрическое поле лежит в плоскости, перпендикулярной направлению распространения, и поле колеблется при распространении волны.

Если вектор электрического поля меняется вдоль *одной и той же прямой линии*, то говорят, что волна линейно поляризована, или просто поляризована (рис. 2.1).



Место принесения жертв у Майя

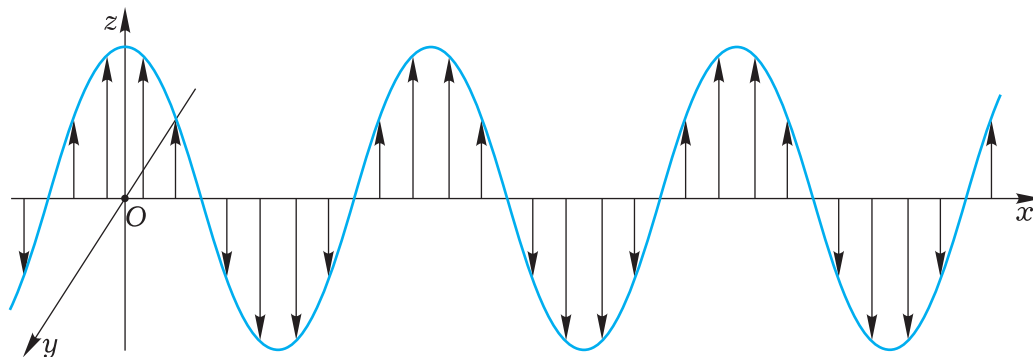


Рис. 2.1. Волна, распространяющаяся в направлении x и поляризованная в направлении z

Поляризатор – это материал с выделенной осью в его плоскости такой, что прошедший свет поляри-

зован вдоль оси поляризатора. Обозначим выделенную ось как (+), а перпендикулярную как (-).

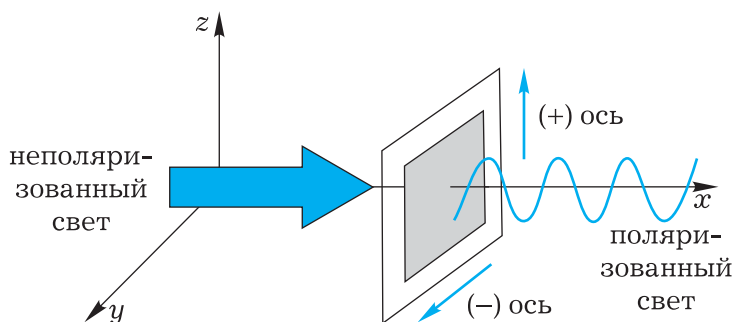


Рис. 2.2

Многие кристаллы, в том числе слюда, чувствительны к направлению электрического поля волны. Для света, распространяющегося перпендикулярно поверхности слюды, есть две характерные взаимно перпендикулярные оси, которые мы назовём ось 1 и ось 2.

Проанализируем два простых примера действия двулучепреломления. Предположим, что свет, поляризованный в вертикальном направлении, падает вдоль нормали на тонкий слой слюды.

Случай 1. Ось 1 или ось 2 параллельна поляризации падающей волны. Прошедшая волна поляризована так же, как и падающая

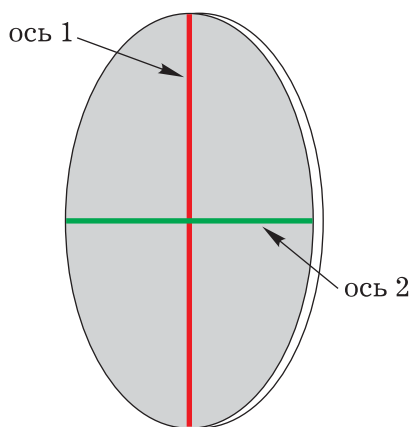


Рис. 2.3. Тонкий слой слюды с двумя оптическими осями: ось 1 (красная) и ось 2 (зелёная)



волна, но распространение происходит так, как если бы у материала

был показатель преломления n_1 или n_2 (рис 2.4 и 2.5).

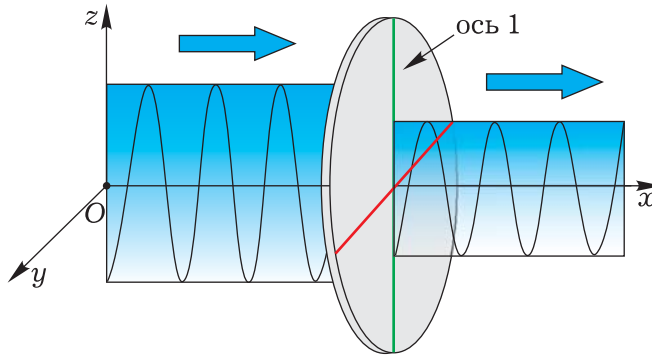


Рис. 2.4. Ось 1 параллельна поляризации падающей волны. Показатель преломления n_1

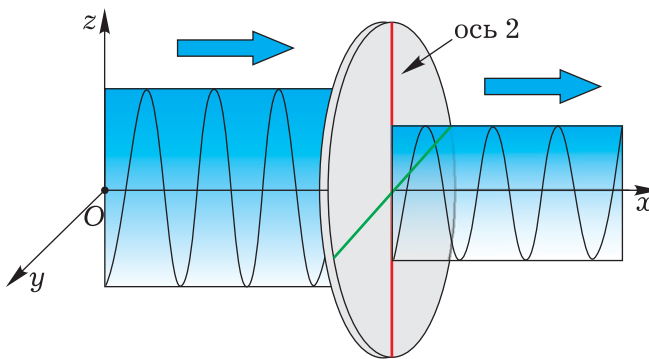


Рис. 2.5. Ось 2 параллельна поляризации падающей волны. Показатель преломления n_2

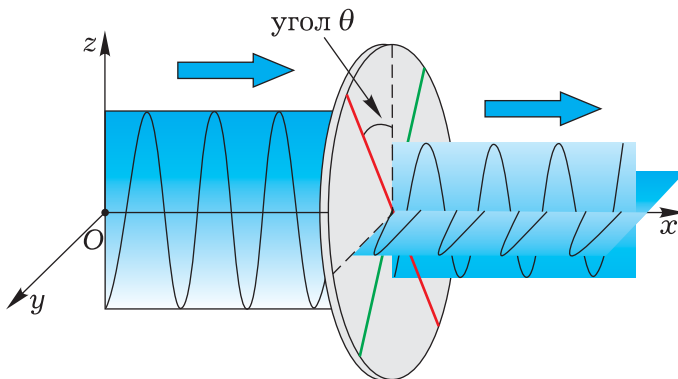


Рис. 2.6. Ось 1 повернута на угол θ относительно поляризации падающей волны



Случай 2. Ось 1 составляет угол θ с направлением поляризации падающей волны (рис. 2.6). Прошедший свет имеет более сложное состояние поляризации. Волна может рассматриваться как *суперпозиция* двух волн, одна из которых поляризована *параллельно* поляризации падающей волны (вертикально), а другая – *перпендикулярно* поляризации падающей волны (горизонтально).

Пусть I_P – *интенсивность* волны с поляризацией, параллельной поляризации падающей волны, и I_O – *интенсивность* прошедшей волны с поляризацией, перпендикулярной поляризации падающей волны. Эти интенсивности имеют сложную зависимость от угла θ , длины волны λ источника света и толщины образца L , а также от абсолютной величины разности показателей преломления $|n_1 - n_2|$. Последняя величина называется *двулучепреломлением* материала. Её измерение – цель работы. Как и поляризаторы, двулучепреломляющие материалы полезны для контроля состояния поляризации света.

Экспериментальная установка

2.1. Предложим экспериментальную установку для измерения интенсивностей I_P и I_O прошедшей волны как функции угла θ , отсчитанного от любой оптической оси (рис. 2.6). *Сделаем эскиз нашей установки.* Используем обозначения (+) и (–) для направлений осей поляризаторов.

2.1. а) Установка для I_P .

2.1. б) Установка для I_O .

Отъестируем пучок таким образом, чтобы он проходил через ось цилиндра со слюдой и параллельно столу.

Зависимости $I_P(\theta)$ и $I_O(\theta)$ от угла θ усложняются за счёт неучтённых эффектов, таких как поглощение света слюдой. Тем не менее, можно получить простые приближённые выражения для нормализованных интенсивностей $\bar{I}_P(\theta)$ и $\bar{I}_O(\theta)$, определённых как

$$\bar{I}_P(\theta) = \frac{I_P(\theta)}{I_P(\theta) + I_O(\theta)}, \quad (2.1)$$

$$\bar{I}_O(\theta) = \frac{I_O(\theta)}{I_P(\theta) + I_O(\theta)}. \quad (2.2)$$

Можно показать, что нормализованные интенсивности приблизительно даются выражениями:

$$\bar{I}_P(\theta) = 1 - \frac{1}{2}(1 - \cos \Delta\phi) \sin^2(2\theta), \quad (2.3)$$

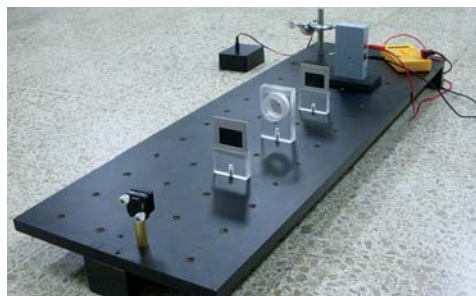
$$\bar{I}_O(\theta) = \frac{1}{2}(1 - \cos \Delta\phi) \sin^2(2\theta), \quad (2.4)$$

где $\Delta\phi$ – разность фаз для волн, поляризованных вдоль разных осей. Эта величина даётся выражением:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi L}{\lambda} |n_1 - n_2|, \quad (2.5)$$

где L – толщина пластинки слюды и $|n_1 - n_2|$ – величина двулучепреломления.

Фотоприёмник выдаёт напряжение, когда на него падает свет. Из-



Экспериментальная установка для определения величины двулучепреломления



меряйте напряжение с помощью приложенного мультиметра. Напряжение пропорционально интенсивности света. Поэтому приведём интенсивность в единицах напряжения фотоприёмника. При выключенном лазере мы измеряем фон. Это напряжение должно быть меньше 1 мВ. При измерениях его *можно не учитывать*.

Предупреждение: лазерный пучок частично поляризован, но направление поляризации неизвестно. Таким образом, для получения оптимальной интенсивности нам надо установить поляризатор с осью (+) или (-) в вертикальном

положении таким образом, чтобы интенсивность прошедшего света без дополнительных элементов на пути пучка была наибольшей.



Беседа с Президентом Олимпиады

Измерение интенсивностей

2.2. Цилиндр со слюдой имеет равномерную угловую разметку. Напишем количество градусов в наименьшем интервале.

Чтобы облегчить анализ, важно найти начало отсчёта углов. Нам предлагается найти одну из осей и обозначить её как ось 1. Скорее всего, положение оси не совпадёт с отметкой на цилиндре. Поэтому примем ближайшую отметку за временное начало отсчёта. Пусть $\bar{\theta}$ – углы, измеренные от этого начала отсчёта. Ниже нам будет предложено найти более точное положение нуля θ .

2.3. Измерим интенсивности I_p



На стадионе майя

и I_0 для необходимого количества углов $\bar{\theta}$. Внесём наши измерения в составленную нами таблицу 2.

2.4. Положение оси 1 определяет начало отсчёта для угла θ . Для определения нулевого положения вы можете использовать один из двух методов.

2.4. а) *Определение по графику.* Приведём график из нескольких точек (примерно четырёх) для значения выбранной нами интенсивности как функции угла $\bar{\theta}$ от временного начала отсчёта. «На глаз» экстраполируем параболу между точками и найдём лучшее значение нуля. Приложим миллиметровую бумагу с графиками.

2.4. б) *Численное определение.* Вблизи нуля θ мы можем приблизить наши измерения для трёх точек параболой

$$I(\bar{\theta}) \approx a\bar{\theta}^2 + b\bar{\theta} + c.$$

Положение минимума даётся формулой

$$\bar{\theta}_m = -\frac{b}{2a}.$$

В любом из вышеприведённых



случаев мы получим сдвиг $\delta\bar{\theta}$ для наших значений $\bar{\theta}$ в таблице 2.

Приводим значение сдвига $\delta\bar{\theta}$ в градусах.

Анализ результатов

2.5. Выберем $I_P(\theta)$ или $I_O(\theta)$ для того, чтобы найти разность фаз $\Delta\phi$ с помощью статистического анализа. Приводим переменные для выбранного нами случая.

2.6. Анализ измерений и разность фаз.

а) Запишем в таблице 2 значения переменных, необходимые для анализа. Убедимся, что мы используем скорректированные значения углов θ . Включим погрешности и формулы их вычисления. Приводим график на миллиметровой бумаге.

б) Выполним статистический анализ данных для получения разности фаз $\Delta\phi$. Приводим наши результаты, включая погрешность. Выпишем формулы, которые мы использовали для анализа. Приводим график.



Наши лидеры на апелляции

в) Вычисляем значение разности фаз $\Delta\phi$ в радианах, включая погрешность. Находим значение фазы в промежутке $[0; \pi]$. Записываем формулы для вычисления погрешности.

2.7. Заметим, что прибавив $2N\pi$ к разности фаз $\Delta\phi$ или изменив её знак, мы не изменим значений интенсивности. Однако значение дву-

лучепреломления $|n_1 - n_2|$ при этом изменится. Поэтому для того, чтобы правильно рассчитать двулучепреломление из значения $\Delta\phi$, полученного в вопросе 2.6, нам надо принять во внимание следующее:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi L}{\lambda} |n_1 - n_2|, \text{ если } L < 82 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

или

$$2\pi - \Delta\phi = \frac{2\pi L}{\lambda} |n_1 - n_2|,$$

если $82 \cdot 10^{-6} \text{ м} \leq L < 164 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, где значение толщины слюды L приведено на цилиндре с образцом. Значение дано в микрометрах. Погрешность измерения толщины $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Для длины волны лазера мы можем использовать значение, найденное в первой части экспериментальной работы, либо среднее значение между $\lambda = 620 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ и $\lambda = 750 \cdot 10^{-9} \text{ м}$, что является границами для красного цвета. Напишем значения L и λ , а также величину двулучепреломления $|n_1 - n_2|$ с погрешностью. Включим формулы, которые мы использовали для вычисления погрешностей.



Мы вне политики