

ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС. ОПИСАНИЕ.

Данный физический практикум по волновой оптике реализован на базе комплекта оборудования, разработанного на кафедре общей физики МФТИ совместно с НПФ «Эккус». Модульный принцип, лежащий в основе лабораторного комплекса, позволяет выполнять на этом оборудовании разнообразные лабораторные работы по оптике. Использование когерентного лазерного света в качестве источника делает эксперименты весьма наглядными, явно демонстрирующими сущность физического явления.

В качестве источника излучения применяется полупроводниковый лазер мощностью 6 мВт. Длина волны излучения составляет 650 нм, что соответствует красному свету. Излучатель лазера, имеющий небольшие размеры 15x15x25 мм, подключается через адаптер к сети 220 В.

Кроме полупроводникового лазера комплекс включает в себя: оптическую скамью (направляющую) длиной 93 см, держатели – *стойки*, экран со стойкой для наблюдения, плоские дифракционные голографические решетки, имеющие 50, 100 и 350 штрихов на миллиметр, бипризму Френеля, столик вращающийся, поляроиды в оправе, толстую стеклянную пластину, щели для наблюдения дифракции Френеля и Фраунгофера, линейку для измерений, магниты для крепления бумаги на экране, сетку с мелкими и средними ячейками в оправе для наблюдения дифракции, фотоприемное устройство с датчиком, экран со стойкой и оправой для короткофокусной линзы, набор короткофокусных линз,



заклученных в оправу, параметры которых приведены в таблице.

Дополнительно в состав комплекса включена *мира* –

№	Диаметр линзы, мм	Диаметр оправы, мм	Длина оправы, мм	Тип линзы
1	17	24	57	двояковыпуклая
2	25	30	33	двояковыпуклая
3	27	35	38	плосковыпуклая

заклученная в оправу прозрачная пленка с нанесенной на нее миллиметровой шкалой.

В процессе выполнения лабораторной работы принадлежности и оборудование монтируются на оптической скамье. Наблюдение ведется на экране. Элементы оптического изображения переносятся карандашом на бумагу, закрепленную на экране магнитами. В качестве альтернативного способа регистрации оптического изображения предлагается фотографировать экран, используя для этих целей разнообразные держатели. Обработка полученных изображений со снятием количественных характеристик возможна в любом графическом редакторе. Кроме того такой способ позволяет надежно документировать результаты измерений.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ И ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТ

Внимание! Лазерное излучение мощностью 6 мВт опасно для сетчатки глаза! Категорически запрещается направлять лазерный луч в глаз! Излучение, отражённое от гладких поверхностей (зеркальных, полированных и пр.), не должно попадать в глаз! Перемещение оптической скамьи, монтаж/демонтаж приспособлений на нее должны осуществляться при выключенном лазере.

Внимание! В процессе выполнения работы категорически запрещается касаться руками или посторонними предметами оптических поверхностей элементов системы: линз, призм, пластин, стекол, поляроидов и пр.

Оптические детали можно держать только за неоптические шлифованные поверхности и ребра. Перед работой оптические детали должны быть заключены в оправы и кассеты. При загрязнении наружных поверхностей оптических систем следует протереть их мягкой чистой тряпочкой.

Используя оптический прибор, необходимо оберегать его от толчков, ударов, падений. Запрещается прилагать значительные усилия при работе с оптическими деталями.

При обнаружении каких-либо неисправностей необходимо обратиться к преподавателю.

Лабораторная работа № ОК-16

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ. БИПРИЗМА ФРЕНЕЛЯ. ВАРИАНТ 2.

Цель работы: определение угла и показателя преломления бипризмы по отражению и преломлению света, а также по интерференционной картине.

Теория

Бипризма Френеля представляет собой две одинаковых треугольных прямоугольных призмы, с малым преломляющим углом, сложенные своими основаниями. Обычно бипризму изготавливают из одной стеклянной пластинки. Можно также представить бипризму как прямой параллелепипед, у которого одну грань деформировали в «крышу» (общепринятый термин в описании призм).

Измерение угла бипризмы методом отражения. Направим на ребро крыши бипризмы БПр параллельный пучок от лазера (Рис. 1). На рисунке показаны только два луча из параллельного пучка лучей, попадающих на каждую из граней крыши. Угол β между основанием бипризмы и гранями крыши очень мал, обычно меньше одного градуса.

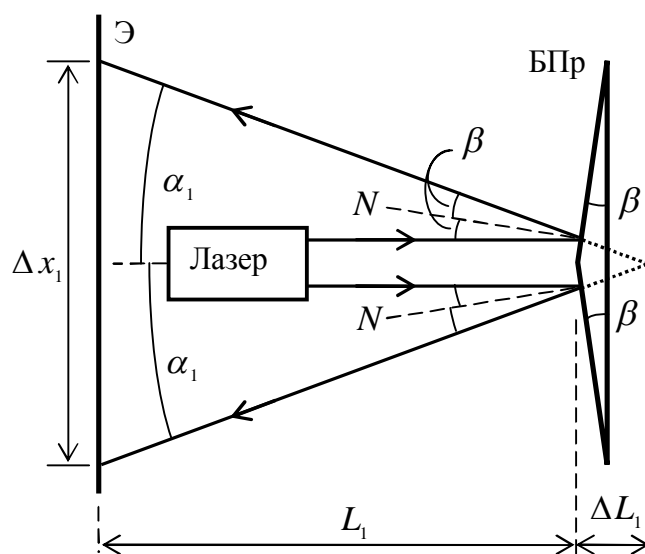


Рис. 1

Угол между падающим лучом и нормалью N к грани крыши равен β . Соответственно и угол отражения также равен β . Таким образом, угол между падающим и отражённым лучами $\alpha_1 = 2\beta$, а угол между отражёнными лучами $2\alpha_1 = 4\beta$. По рис. 1

$$\operatorname{tg} 2\alpha_1 \approx 2\alpha_1 (\text{рад}) = \Delta x_1 / (L_1 + \Delta L_1) \approx \Delta x_1 / L_1 \quad (1)$$

В измерениях расстояние L_1 равно нескольким метрам. Поскольку диаметр лазерного пучка не превышает 2-3 мм, отрезок ΔL_1 равен 12-15 см, и им можно пренебречь.

Тогда угол бипризмы равен

$$\beta = \Delta x_1 / 4L_1 \quad (2)$$

В отражённом свете помимо пучков, отражённых от граней крыши, будут сравнимые с ними по яркости пучки, испытавшие преломление на входной грани бипризмы, отражение от задней плоскости и вторичное преломление. Если углы между гранями крыши и основанием бипризмы равны, то будет наблюдаться вторичный пучок, направленный противоположно падающему. На рис. 2 показано

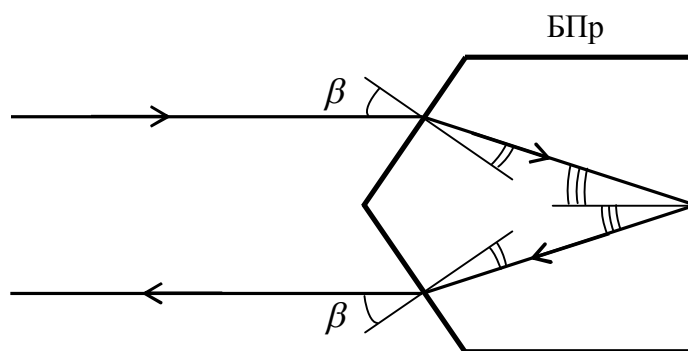


Рис. 2

образование обратного луча одним из лучей верхней половины падающего пучка.

Если же углы между гранями и основанием бипризмы не равны, то в отражении наблюдаются 4-5 пучков: два отражённых от граней крыши и между ними 2-3 вторичных. Если, помимо этого, у призмы имеется пирамидальность, то на экране наблюдения пятна от пучков не лежат на одной прямой.

Измерение показателя преломления бипризмы. Угол отклонения луча половиной бипризмы не зависит от того, плоской гранью или крышей бипризма

повёрнута к лазеру. Это легко доказать в приближении малых углов падения и преломления. Расчёт ещё упрощается в случае, когда бипризма повёрнута к падающему лазерному пучку плоским основанием (Рис. 3). Если падающий луч перпендикулярен первой грани бипризмы, то перпендикулярен и преломлённый луч. Угол падения луча на вторую грань равен β – углу бипризмы. Закон преломления на второй грани

$$n \sin \beta = n_0 \sin \gamma \quad (3)$$

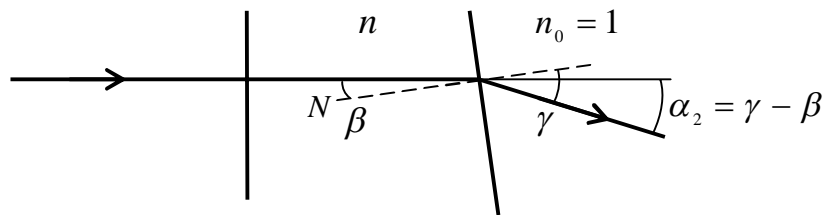


Рис. 3

Здесь n - показатель преломления материала бипризмы, $n_0 = 1$ – показатель преломления воздуха, γ – угол преломления. Т.к. $\beta, \gamma \ll 1$, то $\gamma \approx n\beta$.

Тогда угол отклонения преломлённого луча от первоначального направления

$$\alpha_2 = \gamma - \beta = (n - 1)\beta \quad (4)$$

Две части пучка преломляются на гранях крыши бипризмы и пересекаются при дальнейшем распространении (Рис. 4).

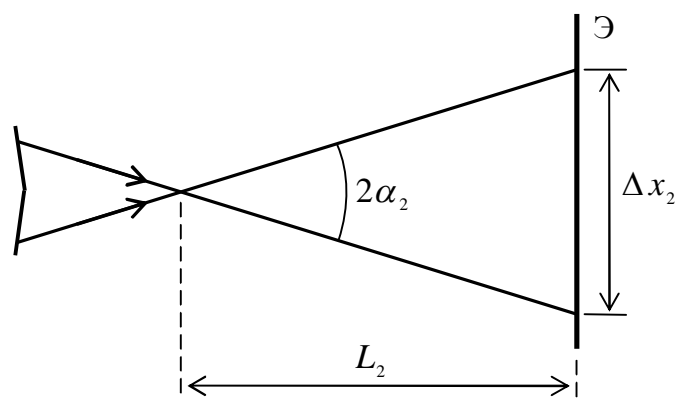


Рис. 4

Угол $2\alpha_2$ между преломлёнными пучками равен

$$2\alpha_2 = \Delta x_2 / L_2 \quad (5)$$

где L_2 – расстояние между точкой пересечения пучков и экраном наблюдения. Точка пересечения пучков, точнее, наименьшего поперечного сечения всего прошедшего пучка, расположена на расстоянии (15 ± 2) см после бипризмы.

Тогда из (4) и (5) показатель преломления стекла бипризмы равен

$$n = 1 + \frac{\Delta x_2}{2\beta L_2} \quad (6)$$

Измерение угла бипризмы интерференционным методом. С помощью бипризмы Френеля световой пучок делится на две части. На выходе из бипризмы пучки накладываются друг на друга. В области перекрытия каждый пучок распространяется независимо, так, как если бы другого пучка не было. Согласно принципу суперпозиции, результирующая напряжённость электрического поля, создаваемого обоими пучками, равна векторной сумме полей

$$\vec{E}_1 + \vec{E}_2 = \vec{E}$$

На рис. 5а слева показаны две плоские волны 1 и 2, в каждой из которых параллельные лучи перпендикулярны волновым фронтам (штриховые линии).

Уравнения поперечных плоских гармонических волн с волновыми векторами

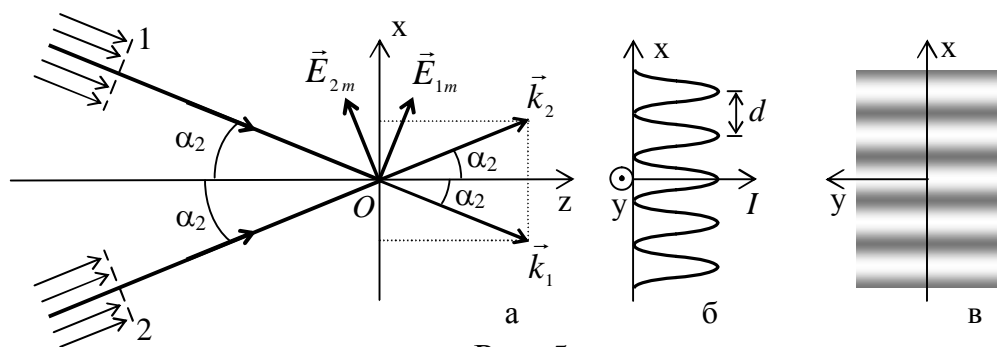


Рис. 5

ми \vec{k}_1 и \vec{k}_2 :

$$\vec{E}_1(\vec{r}, t) = \vec{E}_{1m} \cos(\vec{k}_1 \vec{r} - \omega t) \text{ и } \vec{E}_2(\vec{r}, t) = \vec{E}_{2m} \cos(\vec{k}_2 \vec{r} - \omega t)$$

Частота ω у волн одна и та же, поскольку они получены делением одного светового пучка на два. По той же причине у них одинаковы и начальные фазы, приня-

тые здесь равными нулю. Амплитуды волн будем считать равными $E_{1m} = E_{2m}$, поэтому вектор результирующего поля всегда будет направлен вдоль оси x .

Волновые векторы

$$\vec{k}_1 = (k_{1x}; k_{1z}) = (-k \sin \alpha_2; k \cos \alpha_2) \text{ и } \vec{k}_2 = (k_{2x}; k_{2z}) = (k \sin \alpha_2; k \cos \alpha_2)$$

лежат в одной плоскости xz , перпендикулярной ребру крыши бипризмы (Рис. 1 и 3). Здесь волновое число $k = 2\pi/\lambda$, где λ - длина волны.

Результирующее поле, направленное вдоль x ,

$$\begin{aligned} & \vec{E}_{1mx} \cos(\vec{k}_1 \vec{r} - \omega t) + \vec{E}_{2mx} \cos(\vec{k}_2 \vec{r} - \omega t) = \\ & = \vec{E}_{1mx} \left[\cos(\vec{k}_1 \vec{r} - \omega t) + \cos(\vec{k}_2 \vec{r} - \omega t) \right] \sim \\ & \sim \cos \frac{\vec{k}_1 \vec{r} + \vec{k}_2 \vec{r} - 2\omega t}{2} \cos \frac{(\vec{k}_2 - \vec{k}_1) \vec{r}}{2} = \\ & = \cos \frac{2k_z z - 2\omega t}{2} \cos \frac{(k_{2x} - k_{1x})x}{2} = \cos \frac{2k_z z - 2\omega t}{2} \cos(k \sin \alpha_2 \cdot x) \end{aligned} \quad (7)$$

Второй множитель в (7) зависит только от пространственной координаты x . В точках, где он обращается в ноль, результирующее поле равно нулю в любой момент времени:

$$\begin{aligned} \cos(k \sin \alpha_2 \cdot x) = 0 & \Rightarrow k \sin \alpha_2 \cdot x = \frac{\pi}{2} (2m + 1) \\ x & = \frac{\lambda}{4 \sin \alpha_2} (2m + 1) \end{aligned} \quad (8)$$

Расстояние вдоль оси x между соседними нулевыми точками поля постоянно и равно

$$d \equiv \Delta x = \frac{\lambda}{2 \sin \alpha_2} \quad (9)$$

Для малого угла α_2 формула (9) преобразуется в

$$d \approx \frac{\lambda}{2\alpha_2} \quad (10)$$

Таким образом, вдоль оси x в распределении интенсивности I результирующего поля наблюдается чередование нулей и максимумов с постоянным периодом d (Рис. 5б). Поскольку разность фаз интерферирующих полей не зависит

от координаты y , то в плоскости экрана xu будет наблюдаться система параллельных полос с периодом d (Рис. 5в).

Согласно (9,10), чем меньше угол $2\alpha_2$ между интерферирующими световыми пучками, тем больше период d интерференционной картины. Именно по этой причине угол β бипризмы Френеля делают как можно меньше, чтобы при длине волны порядка 0,5 мкм получить период, позволяющий наблюдать интерференционные полосы визуально. В данной лабораторной работе, однако, угол β недостаточно мал, поэтому для увеличения видимого периода приходится использовать дополнительную линзу.

Описание экспериментальной установки

В работе используется полупроводниковый лазер с длиной волны 650 нм, направляющая (оптическая скамья), набор стоек, бипризма, прозрачная измерительная сетка (мира) с ценой деления 1 мм, кассета для слайдов, короткофокусная собирающая линза L , экран \mathcal{E} наблюдения, линейка.

Все стойки с оптическими элементами размещаются на направляющей, её вид сверху показан на рис. 6. Номера 1-5, 7 обозначены отверстия для крепления стоек, 6 – длинный паз для крепления перемещающейся стойки.

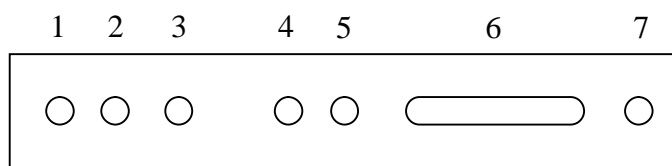


Рис. 6

Внимание, перед выполнением лабораторной работы следует ознакомиться с разделом «Техника безопасности и требования к выполнению работ» и получить разрешение преподавателя на выполнение работы.

Задание к работе

Настройка оптической схемы

1. Установить лазер на стойке в положение 1 направляющей. Экран Э установить в положение 7. На экране закрепить лист миллиметровой бумаги. Ослабить винт крепления лазера в оправе и вращением лазера вокруг оптической оси сориентировать по горизонтали область свечения, светящуюся щель, видимую на экране. Снова зафиксировать винт крепления лазера. Убрать стойку с экраном.
2. Поставить в положение 3 направляющей стойку с бумажными вставками для бипризмы.
3. Определить, с какой стороны у бипризмы поверхность с крышей. Для этого, держа бипризму в руках (за шлифованные поверхности!), наблюдать поочередно полированные поверхности бипризмы при скользящем освещении от окна или лампы, когда угол падения света близок к 90° .
4. Установить бипризму в стойку между бумажными вставками крышей к лазеру так, чтобы ребро крыши было ориентировано вертикально. Не зажимать бипризму прижимными винтами – достаточно лёгкой фиксации. Отрегулировать высоту стойки, чтобы лазерный пучок попадал на середину высоты бипризмы.
5. Плавным перемещением бипризмы по горизонтали добиться, чтобы в проходящем излучении на экране наблюдались два пятна одинаковой яркости. Это означает, что середина падающего лазерного пучка попадает на ребро бипризмы. В отражённом свете при этом наблюдаются 3-5 пятен в линию по горизонтали.

Измерение угла бипризмы методом отражения

6. На экране наблюдения отражённого пучка поместить миллиметровую бумагу и карандашом трижды отметить расстояние Δx_1 между центрами крайних пятен (Рис. 1). Записать значения $\Delta x_{1,1}$, $\Delta x_{1,2}$, $\Delta x_{1,3}$. Вычислить

$\overline{\Delta x_1}$ (не меньше трёх значащих цифр). Трижды измерить расстояние L_1 между экраном и бипризмой и записать значения $L_{1,1}$, $L_{1,2}$, $L_{1,3}$. Вычислить $\overline{L_1}$. Подставив средние значения в формулу (2), вычислить средний угол бипризмы $\overline{\beta}$ (не меньше трёх значащих цифр).

7. Вычислить выборочную стандартную погрешность угла бипризмы из формулы (2)

$$\sigma_{\beta} = \overline{\beta} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\Delta x_1}}{\Delta x_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{L_1}}{L_1}\right)^2} \quad (11)$$

где

$$\sigma_{\Delta x_1} = \sqrt{\frac{(\Delta x_{1,1} - \overline{\Delta x_1})^2 + (\Delta x_{1,2} - \overline{\Delta x_1})^2 + (\Delta x_{1,3} - \overline{\Delta x_1})^2}{2}} \quad (12)$$

$$\sigma_{L_1} = \sqrt{\frac{(L_{1,1} - \overline{L_1})^2 + (L_{1,2} - \overline{L_1})^2 + (L_{1,3} - \overline{L_1})^2}{2}} \quad (13)$$

Записать доверительный интервал для значения трёхкратного измерения угла бипризмы с доверительной вероятностью $P = 0,95$ [1]

$$\beta = \overline{\beta} \pm 2,48 \sigma_{\beta}; \quad P = 0,95 \quad (14)$$

8. Вычислить систематическую погрешность измерения угла бипризмы, связанную с отклонением отражённого пучка от оси падающего пучка (по указанию преподавателя). Чтобы отражённый пучок полностью проецировался на экран и не перекрывался корпусом лазерного источника, пучок необходимо отклонить от оси падающего пучка. Чем больше угол отклонения θ (рад), тем (при малом θ) пропорционально больше добавка, т.е. систематическая погрешность к измеренному значению Δx_1 , равная

$$\Delta_{\Delta x_1} \approx \theta \cdot \Delta x_1 \quad (15)$$

Диаметр корпуса лазера $D_{\text{л}}=16$ мм, расстояние между лазером и стойкой бипризмы $L=370$ мм, поэтому $\theta = D_{\text{л}}/(2L) \approx 0,022$ рад. Чтобы учесть эту погрешность, достаточно $\bar{\beta}$ в (11) и (14) умножить на 0,978.

Измерение показателя преломления бипризмы методом преломления

9. На экране наблюдения преломлённого пучка поместить лист миллиметровой бумаги и карандашом трижды пометить расстояние Δx_2 между центрами световых пятен (Рис. 4). Найти среднее значение $\overline{\Delta x_2}$. Поместив лист бумаги в преломлённый пучок за бипризмой и перемещая его вдоль оси, найти положение минимального поперечного сечения пучка – это область пересечения пучков. Трижды измерить расстояние L_2 от этого минимального сечения пучка до экрана, найти среднее значение \bar{L}_2 . Подставить средние значения в (5), найти угол между пучками $2\alpha_2$ для п. 14 Задания. По формуле (6) найти показатель преломления стекла n , из которого изготовлена бипризма.

Измерение периода интерференционной картины

10. Поставить в положение 5 (Рис. 6) стойку с бумажными вставками. Поместить в неё измерительную сетку. В этом положении сетка примерно совпадает с областью наименьшего сечения преломлённого пучка. В положение 7 поставить экран с миллиметровой бумагой.
11. В паз 6 направляющей поставить стойку с короткофокусной линзой. Перемещая стойку вдоль паза, получить на экране резкое изображение сетки. В этом положении линза создаёт на экране увеличенное изображение сетки и области наибольшего перекрытия интерферирующих частей преломлённого пучка. Зафиксировать стойку линзы на направляющей.

12. Измерить на экране расстояние b между изображениями штрихов измерительной сетки (Рис. 7): трижды отметить b карандашом. Найти среднее значение \bar{b} (в миллиметрах). Зная цену деления измерительной сетки $c = 1$ мм, определить линейное увеличение линзы V по формуле

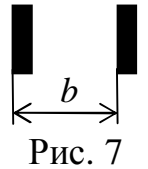


Рис. 7

$$V = \bar{b} / c \quad (16)$$

Более точный вариант измерения размера: сфотографировать изображение сетки на миллиметровой бумаге. При этом может потребоваться дополнительная подсветка фотографируемой поверхности. Предварительно поворотом миллиметровой бумаги вокруг оптической оси добейтесь параллельности изображения штрихов и линий миллиметровки.

13. Убрать измерительную сетку. На экране должна наблюдаться картина интерференционных полос. Трижды сосчитать количество тёмных полос N и измерить соответствующее расстояние $d_{\text{и}}$ между крайними полосами. Для каждого измерения $d_{\text{и}}$ и N найти видимый период интерференционной картины

$$d_{\text{в}} = d_{\text{и}} / (N - 1) \quad (17)$$

Найти среднее значение $\bar{d}_{\text{в}}$. Разделив на линейное увеличение линзы (16), найти период интерференционной картины в области наложения пучков

$$d = \bar{d}_{\text{в}} / V \quad (18)$$

14. Из (10) и (18) найти угол между пучками за бипризмой

$$2\alpha_2 = \lambda / d \quad (19)$$

Сравнить это значение с полученным в п. 9 Задания по формуле (5). Из угла $2\alpha_2$, полученного по формуле (19), вывести значение угла β бипризмы, используя (4). Определить, попадает ли полученное значение в доверительный интервал (14).

Контрольные вопросы

1. Что такое бипризма Френеля?
2. Нарисуйте оптическую схему измерения угла бипризмы методом отражения.
3. Напишите формулу, по которой определяется угол бипризмы методом отражения.
4. Нарисуйте ход лучей в бипризме при измерениях методом преломления.
5. Выведите формулу для угла отклонения от оси лазерного пучка, преломлённого одной половиной бипризмы.
6. Где возникает интерференционная картина: а) на бипризме; б) в области наложения пучков; в) на экране?
7. Какова взаимная ориентация ребра бипризмы и интерференционных полос: а) параллельны; б) под 45° ; в) перпендикулярны?
8. Напишите формулу связи периода интерференционной картины и угла между интерферирующими пучками. С увеличением угла период (уменьшается, увеличивается)?
9. **Выведите** формулу связи периода интерференционной картины с углом между пересекающимися когерентными световыми пучками.
10. Зачем нужна собирающая линза в данной работе?
11. Как вы будете измерять линейное увеличение линзы?

Литература

1. Вводное занятие, часть 2, «Обработка результатов измерений». - Механика и термодинамика: Лабораторный практикум по физике. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015 – 79с.
2. Сарина М.П. Колебания, волны, оптика: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – Ч. 2. Оптика. – 116с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5-и тт. Том 4. Волны. Оптика [Электронный ресурс]: учебное пособие / И.В. Савельев. – Электрон. дан. – Санкт-Петербург: Лань, 2011. – 256с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/707>.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 4. Оптика [Электронный ресурс]: учебное пособие / Д.В. Сивухин. – Электрон. дан. – Москва : Физматлит, 2002. – 792с. – Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/2314>.