

Лабораторная работа

Определение длины волны красного лазера с помощью линейки

Цель работы: Знакомство с элементами юстировки оптической системы, работа с грубыми дифракционными решётками ($d \gg \lambda$), определение длины волны излучения красного лазера.

В работе используются: красный полупроводниковый лазер (лазерная указка), металлическая (или пластиковая) линейка длиной 10 -20 см с миллиметровыми (или полумиллиметровыми) делениями, держатель лазера, держатель линейки, небольшое зеркальце, измерительная бумажная лента (1 м) (или деревянная линейка), измерительная линейка (рулетка), скотч, ножницы, бельевая прищепка, фотоаппарат (камера телефона, смартфона, айфона).

Примечание: прищепка используется для фиксации кнопки включения лазера. Держатели лазера можно изготовить из подручных средств (скотч, пластилин). Для фиксации положения лазера удобно использовать двухсторонний скотч. Зеркальце может быть использовано при юстировке оптической системы (выставление луча лазера перпендикулярно стене).

Грубые дифракционные решётки

Дифракционные решётки, которые обычно используются для анализа спектров, имеют порядка 10^3 - 10^4 штрихов на сантиметр, т. е. имеют период d , сравнимый с длиной волны λ света видимого диапазона. На грубых решётках ($d \gg \lambda$) из-за малых углов дифракции $\varphi \sim \lambda/d$ обнаружить и, тем более, исследовать дифракционную картину крайне сложно. В этом случае эффективным оказывается использование *скользящих* лучей, когда угол падения близок к 90° (см. рис. 1).

При наклонном падении лучей на дифракционную решётку условие дифракционного максимума m -го порядка имеет вид:

$$d(\sin\varphi_0 - \sin\varphi_m) = m\lambda \quad (1)$$

В дальнейшем мы будем использовать не углы *падения* φ , а углы *скольжения* $\theta = 90 - \varphi$. Тогда, условие максимума переписывается в виде:

$$d(\cos\theta_0 - \cos\theta_m) = m\lambda \quad (2)$$

Для дифракционного максимума 1-го порядка при малых углах дифракции $(\theta_1 - \theta_0) \ll 1$ эту формулу можно переписать в виде:

$$d(\cos\theta_0 - \cos\theta_1) \approx (d\sin\theta_0)(\theta_1 - \theta_0) = \lambda.$$

Угловое расстояние между максимумами дифракционной картины:

$$\Delta\theta = (\theta_1 - \theta_0) = \frac{\lambda}{d\sin\theta_0}.$$

Видно, что роль эффективного периода решётки в этом случае играет величина $d_{\text{эфф}} = d\sin\theta_0$, которая может быть сделана очень малой. (Напомним, что при нормальном падении света на решётку углы дифракции $\varphi \sim \frac{\lambda}{d}$). Скользящее падение лучей как бы уменьшает период решётки и увеличивает углы дифракции. Таким методом удаётся получать отчётливые дифракционные картины даже от очень грубых решёток, например, от грампластины, пера птицы, резьбы болта, пружины, кусочка тюлевой ткани, капиллярных волн на поверхности воды и даже от миллиметровой шкалы линейки. (Известна экспериментальная олимпиадная задача для школьников, в которой предлагалось с помощью штангенциркуля (!) измерить длину волны света лазерной указки).

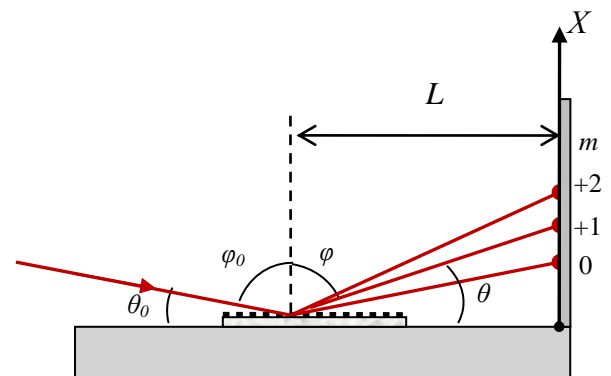


Рис. 1

В нашей работе мы получим и исследуем дифракционную картину от обычной линейки с миллиметровыми (или полумиллиметровыми) делениями.

Найдём зависимость $x_m(m)$ координаты максимума m -го порядка от m (рис.1). При малых углах θ_m :

$$d(\cos\theta_0 - \cos\theta_m) \approx \frac{1}{2}d(\theta_m^2 - \theta_0^2).$$

В этом приближении формула (2) принимает вид:

$$d(\theta_m^2 - \theta_0^2) = 2m\lambda$$

Подставляя в эту формулу выражение для $x_m = L \operatorname{tg}\theta_m \approx L\theta_m$, получаем искомую зависимость:

$$x_m^2 = x_0^2 + \frac{2\lambda L^2}{d}m \quad (3)$$

Здесь $x_0 = L\theta_0$ – координата максимума нулевого порядка, соответствующая зеркальному отражению от решётки. Таким образом, если построить зависимость квадрата координаты x_m^2 дифракционного максимума от его порядка m , то по угловому коэффициенту β наилучшей прямой, проведённой через экспериментальные точки, можно рассчитать длину волны лазерного излучения по формуле:

$$\lambda = \frac{\beta d}{2L^2} \quad (4)$$

Схема экспериментальной установки

Схема измерительной установки показана на рисунке 2. В качестве отражательной дифракционной решётки в работе используется обычная линейка. Линейка должна быть изготовлена из материала, хорошо отражающего свет (деревянная линейка не годится). Как указывалось выше, при работе с такими грубыми решётками эффективным оказывается использование скользящих лучей. Скользящий луч лазера ($\theta_0 \approx 5 - 7^\circ$) падает на металлическую (пластиковую) линейку, шкала которой играет роль отражательной дифракционной решётки. Лучи, отражаясь от делений линейки (деления могут быть через 0,5 или 1 мм) под различными углами θ , формируют на экране (стене) дифракционную картину в виде хорошо различимых ярких дифракционных максимумов (рис. 3). Координаты максимумов определяются по укрепленной на стене измерительной шкале.

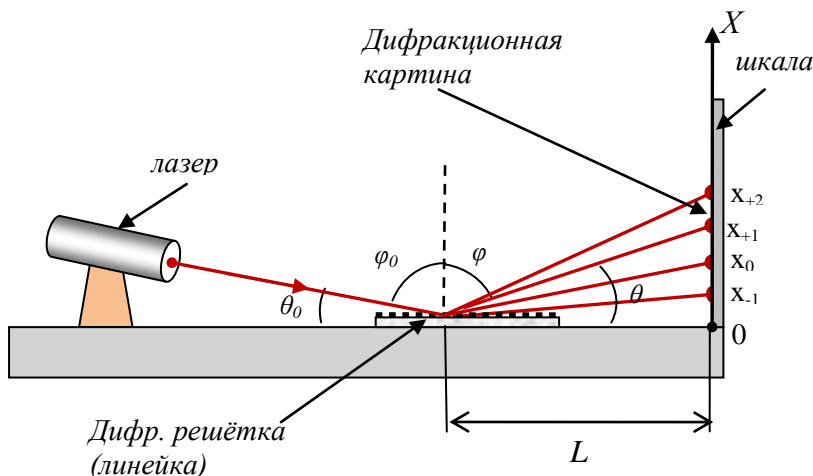


Рис. 2



Рис. 3

Задание

1. Экспериментальная установка: сборка и юстировка

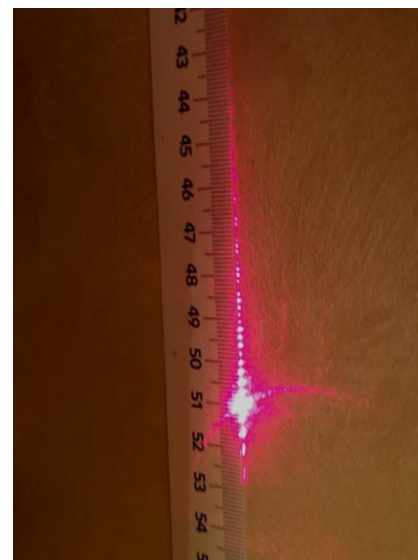
Соберите экспериментальную установку в соответствии со схемой, показанной на рисунке 2. Лазер закрепите с помощью скотча (или пластилина) на столе (или на полу) на расстоянии $\sim 1,5$ м от стены. Луч лазера должен идти под небольшим ($\theta_0 \approx 5 - 7^\circ$) углом к горизонту в вертикальной плоскости, перпендикулярной стене. Отражение луча от стола должно происходить на расстоянии $L \sim 1,2 - 1,3$ м от стены. Положите на стол металлическую (или пластиковую) линейку перпендикулярно стене так, чтобы луч, отразившись от шкалы линейки, сформировал на стене хорошо различимую дифракционную картину (см. рис. 3). С помощью скотча укрепите на стене вертикальную шкалу (деревянную линейку, мерную ленту) так, чтобы удобно было определять координаты дифракционных максимумов.

2. Сфотографируйте установку и полученную дифракционную картину. Фотографии следует приложить к Отчёту.
3. Измерьте L – расстояние от области отражения луча до стены (рис. 2). Запишите также период дифракционной решётки d . (В нашем случае – это расстояние между штрихами линейки $d = 0,5$ или 1 мм).
4. Определите координаты x_m хорошо различимых дифракционных максимумов m -го порядка (за начало координат следует взять уровень стола (пола)). Результаты занесите в таблицу.
5. Постройте график зависимости квадрата координаты x_m^2 от порядка дифракционного максимума m . В соответствии с формулой (3) этот график должен иметь вид прямой линии $x_m^2 = x_0^2 + \beta m$. По угловому коэффициенту наклона β наилучшей прямой, проходящей через экспериментальные точки, используя формулу (4), определите длину волны λ лазерного излучения. Оцените погрешность измерений. Сравните полученный результат с длиной волны λ_0 , указанной на корпусе или в тех. паспорте лазера.
6. Повторите измерения для другого угла скольжения θ_0 .
7. Используя метод скользящих лучей, получите дифракционную картину от каких-либо других периодических структур с периодом $d \gg \lambda$. (Примеры таких структур приводятся в вводной части описания данной работы. CD, DVD для этого, естественно, не годятся). По периоду дифракционной картины и значению λ рассчитайте период d исследованных структур. Фотографии дифракционных картин и исследованных структур приложите к Отчёту.

Контрольные вопросы

1. В чём суть метода «скользящих лучей» и в каких случаях он применяется?
2. Получите формулу (1).
3. Как выглядит условие дифракционных максимумов в *отражённых* лучах при нормальном падении света на решётку?
4. Какой тип дифракции (Френеля или Фраунгофера) реализуется в условиях работы дифракционных решёток? Приведите классическую принципиальную схему спектрометра с дифракционной решёткой.

5. При внимательном рассмотрении дифракционной картины, полученной в этой работе на линейке, можно обратить внимание на модуляцию интенсивности максимумов. (см. фото). С чем это может быть связано? Какими параметрами системы определяется период этой модуляции? Сделайте соответствующие численные оценки.
6. Оцените разрешающую способность линейки как дифракционной решётки, работающей в режиме «скользящих лучей». Какова разрешающая способность вашей дифракционной решётки-линейки в максимумах первого, втором порядков?



Список литературы

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. IV. Оптика. - М.: ФИЗМАТЛИТ, МФТИ, 2002. §§ 46, 47.
2. Лабораторный практикум по общей физике. Т. 2. «Оптика» / под ред. А. В. Максимычева. - М.: МФТИ. - 2014. С. 265 - 291.