

4.4.4. ИНТЕРФЕРОМЕТР ФАБРИ-ПЕРО

Цель работы: измерение длины волны жёлтых линий ртути, жёлтого дублета натрия, определение спектральных характеристик интерферометра Фабри—Перо.

Оборудование: интерферометр Фабри—Перо, линзы, светофильтры, ртутная и натриевая лампы, катетометр КН-6.

Теоретическая часть

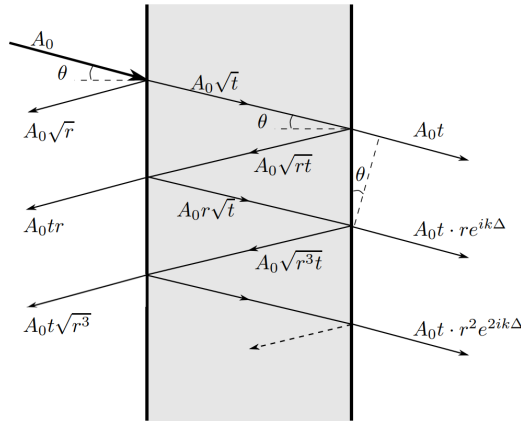


Рис. 1: Амплитуды волн в интерферометре Фабри-Перо

Как спектральный прибор высокой разрешающей способности интерферометр Фабри—Перо широко используется в физических экспериментах. Он применяется для исследования тонкой структуры спектральных линий, является неотъемлемым элементом лазера, выполняя роль оптического резонатора, и т. д. Интерферометр Фабри—Перо состоит из двух стеклянных или кварцевых пластин с хорошо отполированными поверхностями (с шероховатостью до $10 - 2\lambda$), которые установлены параллельно друг другу на некотором расстоянии. На одну поверхность каждой пластины нанесены хорошо отражающие свет покрытия. Для получения коэффициента отражения $r \approx 0.9$ используют металлические покрытия (Ag, Al), для достижения $r \approx 0.99$ наносятся многослойные диэлектрические интерференционные покрытия. Интерферометр Фабри—Перо можно рассматривать как плоскопараллельную пластину, в которой происходят многократные отражения и интерференция световых волн. На рис. 1 приведена схема интерферирующих волн. Коэффициенты пропускания и отражения по интенсивности отдельного зеркала интерферометра равны t и r соответственно (из закона сохранения энергии следует, что $t + r = 1$). Пусть A_0 – амплитуда падающей на интерферометр волны, тогда амплитуда отражённой от первого зеркала волны равна $A_0\sqrt{r}$, амплитуда прошедшей внутрь интерферометра волны – $A_0\sqrt{t}$, амплитуда волны, отражённой от второго зеркала, – $A_0\sqrt{rt}$, амплитуда первой прошедшей волны равна A_0t и т. д. В результате многократных переотражений на выходе интерферометра будем иметь набор волн, амплитуды которых равны $A_0t, A_0tr, A_0tr^2, \dots$. Фазовая задержка между двумя «соседними» волнами равна $k\Delta$, где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; Δ – разность хода для угла падения θ . Интерференционная картина, наблюдаемая с помощью зрительной трубы, настроенной на бесконечность, состоит из концентрических колец равного наклона. Найдём условие возникновения интерференционной картины для световой длины волны λ . Выразим разность хода двух интерферирующих волн, падающих на интерферометр под углом :

$$\Delta = 2L \left(\frac{1}{\cos \theta} - \tan \theta \sin \theta \right) = 2L \cos \theta, \quad (1)$$

где L – расстояние между зеркалами, или БАЗА ИНТЕРФЕРОМЕТРА. Интерференционные максимумы будут наблюдаться для волн, падающих под углами θ_m , удовлетворяющими

условию:

$$2L \cos \theta_m = m\lambda. \quad (2)$$

Просуммируем комплексные амплитуды световых волн, прошедших интерферометр. Можно видеть, что амплитуды прошедших волн образуют геометрическую прогрессию. Считая её бесконечной, получим комплексную амплитуду суммарной прошедшей волны:

$$A = \frac{A_0 t}{1 - r \exp^{ik\Delta}}$$

и ее интенсивность:

$$I = |A|^2 = \frac{|A_0|^2 t^2}{1 + r^2 - 2r \cos(\frac{4\pi}{\lambda} L \cos \theta)} = \frac{I_0}{1 + \frac{4r}{(1-r)^2} \sin^2(\frac{2\pi}{\lambda} L \cos \theta)}. \quad (3)$$

Угловое расстояние между парами уменьшается при увеличении угла наблюдения или уменьшении порядка спектра. Кроме того, уменьшается расстояние между кольцами в одном порядке и их ширина.

Угловая дисперсия ИФП оценивается формулой

$$D = \frac{d\theta}{d\lambda} = -\frac{m}{2L \sin \theta_m} \approx -\frac{1}{\lambda \theta_m}. \quad (4)$$

Дифракция Фраунгофера на апертуре интерферометра также влияет на ширину интерференционного кольца и разрешающую способность. Строго говоря, имеет значение не размер освещённой области зеркала, а размер её однородно обработанного участка. Напомним, что погрешность обработки и настройки базы интерферометра L должна быть много меньше λ .

Мы ограничимся рассмотрением зависимости разрешающей способности интерферометра Фабри–Перо от величины базы L (порядка спектра) и коэффициента отражения зеркал r , определим угловое расстояние между двумя близкими линиями, соответствующее условию Релея. Пусть, как и в случае дифракционной решётки, две линии пересекаются на уровне половинной мощности каждой линии. Запишем это условие для угла $\theta_m + \delta\theta/2$ (угол θ_m соответствует максимуму для длины волны λ порядка m). Используя равенство (3), имеем

$$\frac{4r}{(1-r)^2} \sin^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} 2L \cos(\theta_m + \delta\theta/2) \right) = 1.$$

Учитывая условие резонанса (2) и малость углов, получаем

$$\sin^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} 2L \cos(\theta_m + \delta\theta/2) \right) = \sin^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \cos \theta_m - \frac{\pi L}{\lambda} \sin \theta_m \cdot \delta\theta \right) \approx \left(\frac{\pi L}{\lambda} \theta_m \delta\theta \right)^2.$$

Пусть угловому радиусу $\theta_m + \delta\theta$ соответствует максимум интерференционного кольца с тем же порядком спектра m и длиной волны $\lambda + \delta\lambda$ (при пересечении двух линий на уровне половинной мощности угловое расстояние между максимумами линий в два раза больше полуширины отдельной линии). Величину $\delta\lambda$ можно определить, используя выражение для угловой дисперсии (??):

$$\delta\theta = \frac{1-r}{2\pi\sqrt{r}} \frac{\lambda}{2L} \frac{1}{\theta_m} \approx D\delta\lambda/2 = \frac{m}{4L\theta_m} \delta\lambda.$$

Разрешающая способность для порядка спектра $m \approx 2L/\lambda$ равна

$$R = \frac{\delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{\pi\sqrt{r}}{1-r} m. \quad (5)$$

Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2. Свет от лампы S , пройдя через линзу L_0 и светофильтр C , попадает на интерферометр Фабри—Перо (ИФП). Линза L_0 служит для формирования пучка лучей (слегка сходящегося или слегка расходящегося). Интерференционные кольца наблюдаются в фокальной плоскости линзы. Картина рассматривается через зрительную трубу T , сфокусированную на эту плоскость. Диаметры колец измеряются с помощью микроскопа катетометра. Зрительная труба, отсчётный микроскоп — элементы катетометра — прибора, предназначенного для измерения расстояний в вертикальной плоскости вдоль вертикальной оси.

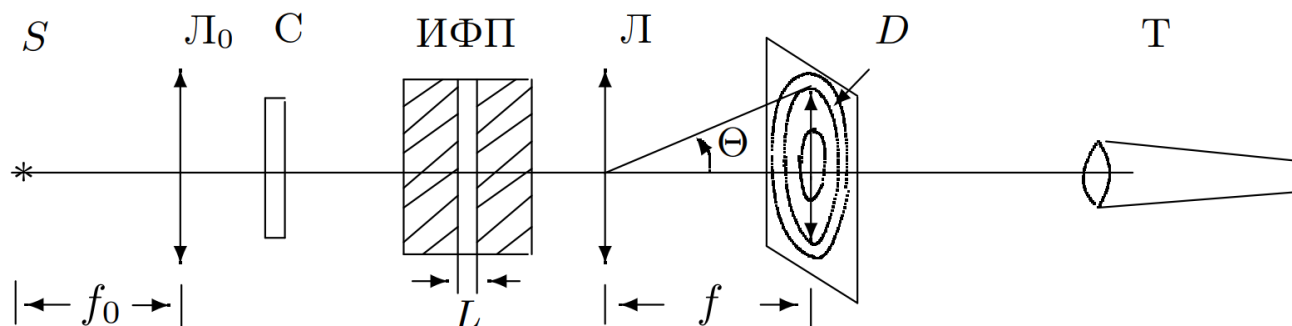


Рис. 2: Схема экспериментальной установки

Результаты и обработка

1.

Выводы

•