

## Лабораторная работа 4.4.4 (Интерферометр Фабри-Перо)

Астафуров Евгений Б05-812

Московский Физико-Технический Институт (Государственный Университет).

(Дата: 17 марта 2020 г.)

**Цель работы:** измерение длины волны желтых линий ртути, желтого дублета натрия, определение спектральных характеристик интерферометра Фабри-Перо.

**В работе используются:** интерферометр Фабри-Перо, линзы, светофильтры, трутная и натриевая лампы, катетометр КН-6.

### I. ИНТЕРФЕРОМЕТР ФАБРИ-ПЕРО

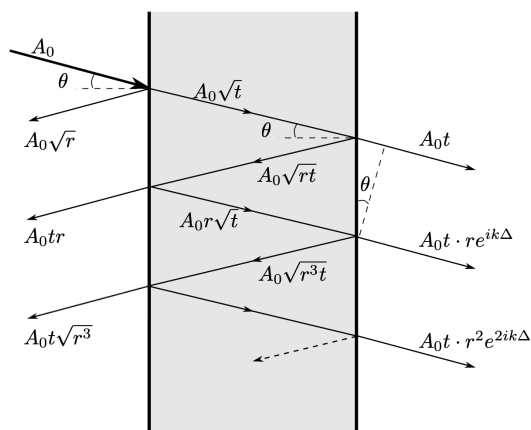


Рис. 1. Амплитуды волн в интерферометре Фабри-Перо. Для прошедших волн также указаны набег фаз

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  $r$  соответ-

ственно (из закона сохранения энергии следует, что  $t + r = 1$ ). Пусть  $A_0$  — амплитуда падающей на интерферометр волны, тогда амплитуда отраженной от первого зеркала волны равна  $A_0\sqrt{r}$ , амплитуда прошедшей внутрь интерферометра волны —  $A_0\sqrt{t}$ , амплитуда волны, отраженной от второго зеркала —  $A_0\sqrt{rt}$ , амплитуда первой прошедшей волны равна  $A_0 t$  и т. д. В результате многократных переотражений на выходе интерферометра будем иметь набор длин волн, амплитуды которых равны  $A_0 t$ ,  $A_0 tr$ ,  $A_0 tr^2$ , ... Фазовая задержка между двумя "соседними" волнами равна  $k\Delta$ , где  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  — волновое число;  $\Delta$  — разность хода для угла падения  $\theta$ . Интерференционная картина, наблюдаемая с помощью зрительной трубы, настроенной на бесконечность, состоит из концентрических колец равного наклона.

Найдем условие возникновения интерференционной картины для световой длины волны  $\lambda$ . Выразим разность хода двух интерферирующих волн, падающих на интерферометр под углом  $\theta$ :

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

где  $L$  — расстояние между зеркалами, или база интерферометра. Интерференционные максимумы будут наблюдаться для волн, падающих под углами  $\theta_m$ , удовлетворяющих условию

$$2L \cos \theta_m = m\lambda$$

### II. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

#### A. Введение

Интерферометр Фабри-Перо состоит из двух отражающих пластин, внутренние поверхности которых хорошо отполированы и установлены параллельно друг к другу. Его можно рассматривать как плоскопараллельную воздушную пластину, на которой происходит многократное отражение и интерференция световых лучей. Интерференционная картина, наблюдаемая в фокальной плоскости линзы  $L$ , состоит из концентрических колец. Для двух соседних лучей, распространяющихся между зеркалами

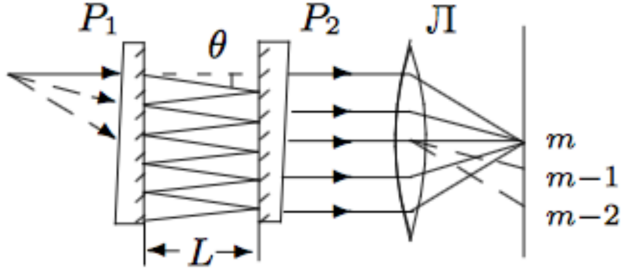


Рис. 2. Интерферометр Фабри-Перо

интерферометра под углом  $\theta$ , разность хода определяется соотношением:

$$\Delta = 2L \cos \theta, \quad (1)$$

где  $L$  — расстояние между зеркалами интерферометра. Будем считать, что поглощение света в зеркалах отсутствует, что достигается лишь при целых значениях  $\frac{\Delta}{\lambda}$ .

Интерференционная картина состоит из узких световых колец, разделенных широкими световыми промежутками, расстояние между которыми мы будем измерять.

#### В. Измерение длин волн $\lambda$ и расстояний $d\lambda$ между спектральными линиями

Исследуем диаметры интерференционных колец, предполагая, что угол  $\theta$  достаточно мал. Рассмотрим два кольца с разным порядком интерференции:  $m_i$  и  $m_j$  соответственно. Из условия отсутствия поглощения следует, что светлое кольцо порядка  $m$  образуется при

$$\Delta = 2L \cos \theta = m\lambda \quad (2)$$

При уменьшении угла  $\theta$  порядок интерференции возрастает, то есть больший порядок соответствует кольцам меньшего диаметра.

Для малых углов  $\theta$ :

$$2L(1 - \frac{\theta_i^2}{2}) = m_i\lambda$$

$$2L(1 - \frac{\theta_j^2}{2}) = m_j\lambda \quad (3)$$

Вычтем второе уравнение из первого и рассмотрим два соседних кольца:

$$L(\theta_j^2 - \theta_i^2) = (j - i)\lambda$$

Диаметр  $D$  кольца в фокальной плоскости линзы связан с ее фокусным расстоянием:

$$D = 2f\theta$$

Тогда выразим  $\lambda$  из уравнения:

$$\lambda = \frac{L}{4f^2} \cdot \frac{D_j^2 - D_i^2}{j - i} \quad (4)$$

Пусть в интерферометре Фабри-Перо наблюдается система колец для двух близких спектральных линий  $\lambda$  и  $\lambda + d\lambda$ , дифференцируя при малых  $\theta$  найдем

$$-2L\theta d\theta = m d\lambda,$$

откуда следует:

$$d\lambda = -\frac{2L\theta}{m} \approx -\lambda\theta d\theta = -\frac{\lambda\bar{D}}{4f^2} dD, \quad (5)$$

где  $\bar{D}$  — средний диаметр колец, а  $dD$  — разность диаметров колец, образующихся для спектральных линий с длинами волн  $\lambda$  и  $\lambda + d\lambda$  при одинаковом порядке интерференции. С помощью формулы можно определять  $d\lambda$ , не зная постоянной интерферометра  $L$ .

#### С. Дисперсия интерферометра

Отношение  $D^* = \frac{d\lambda}{d\lambda}$ , где  $d\lambda$  — расстояние между спектральными линиями в проскости спектра, а  $d\lambda$  — разность дин волн этих линий, называют *линейной дисперсией* спектрального прибора. Линейная дисперсия интерферометра Фабри-Перо выражается через угловую ( $\frac{d\theta}{d\lambda}$ ):

$$D^* = f \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{dD}{2d\lambda} = 2 \cdot \frac{f^2}{\lambda D}$$

Высокая дисперсия является основным преимуществом интерферометра Фабри-Перо.

#### Д. Дисперсионная область

Областью дисперсии называют максимальный интервал длин волн  $\Delta\lambda$ , при котором еще не происходит перекрытия интерференционных полос соседних порядков. Пусть накладывается кольцо  $(m + 1)$ -ого порядка для длины волны  $\lambda$  и кольца  $m$ -ого порядка для длины волны  $\lambda + \Delta\lambda$ :

$$m(\lambda + \Delta\lambda) = (m + 1)\lambda, \quad (6)$$

откуда

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{m} \approx \frac{\lambda^2}{2L} \quad (7)$$

#### Е. Разрешающая способность интерферометра Фабри-Перо

Разрешающая способность спектрального прибора определяется соотношением:

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda}, \quad (8)$$

где  $\delta\lambda$  — минимальная разность длин волн, разрешимая прибором вблизи волны  $\lambda$ . Если определять ширину линии на уровне, на котором интенсивность падает в два раза по сравнению с максимальным значением в середине линии, можно из критерия Релея определить разрешающую способность:

$$R \approx \frac{2\pi L\sqrt{r}}{\lambda(1-r)} \quad (9)$$

### III. ЭКСПЕРЕМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

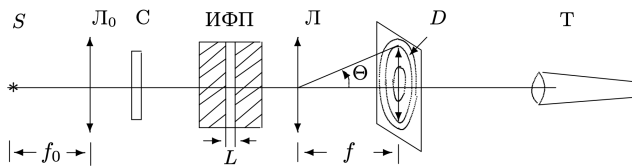


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 3. 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  $L$ . Картина рассматривается через зрительную трубу  $T$ , сфокусированную на эту плоскость. Диаметры колец измеряются с помощью микроскопа катетометра. Зрительная труба  $T$ , отсчетный микроскоп — элементы катетометра — прибора, предназначенного для измерения расстояний в вертикальной плоскости вдоль вертикальной оси.

### IV. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Данные установки:

$$f_1 = 110 \text{ нм} \quad f_2 = 94 \text{ нм} \quad L = 0.1 \text{ мм}$$

Сначала определим координаты  $i$ -ых колец, по ним можно определить диаметр каждого кольца.

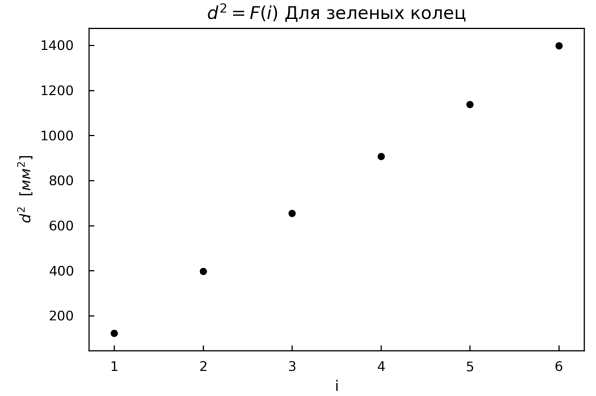


Рис. 4. График зависимости для зеленых колец ртути

$$a = 252.7 \quad b = -114.9$$

Определим постоянную интерферометра  $L$  (расстояние между зеркалами), учитывая, что  $\lambda = 5461 \text{ Å}$ .

$$L = \frac{4f^2\lambda}{k} = (1.0 \pm 0.1) \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

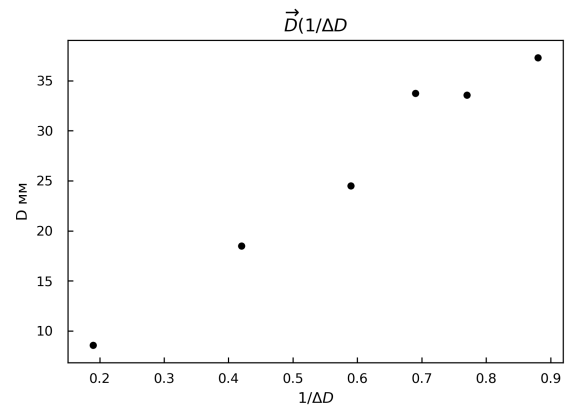


Рис. 5. Для желтых колец ртути

$$a = 43.3$$

$$b = 0.5$$

По углу наклона прямой рассчитаем  $d\lambda$  для желтой пары линий ртути:

$$d\lambda = \frac{\lambda \overline{D} dD}{4f^2} = \frac{\lambda k}{4f^2} = (4.9 \pm 0.3) \text{Å}$$

Измерим ширину кольца:

$$\delta r = (0.81 \pm 0.01) \text{ мм}$$

Оценим аппаратную разрешающую способность:

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{4f^2}{D\delta r} = (50.4 \pm 0.2) \cdot 10^2$$

Найдем значение добротности для  $r = 0.85$ :

$$Q = \frac{2\pi L}{\lambda(1-r)} = 7.6 \cdot 10^3$$

Найдем число интерферирующих лучей:

$$N = \frac{Q}{m} = 21$$

---

[1] *Максимычев А.В.* Лабораторный практикум по общей физике. Т.2. - М.:МФТИ, 2014

[2] *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Т.4. - М.:Наука, 1996