

Лабораторная работа 4.5.3  
Сканирующий интерферометр

Яковлева Саша, группа 625

13 апреля 2018 г.

**Цель работы:** знакомство с устройством и работой газового лазера непрерывного действия, со спектральными характеристиками лазерного излучения, а также с устройством и принципом действия сканирующего интерферометра Фабри-Перо; исследование спектрального состава излучения лазера.

В работе используются He-Ne-лазер с блоком питания, сканирующий интерферометр Фабри-Перо, поляризатор, пластинка  $\lambda/4$ , линза, фотодиод, электронный осциллограф.

## 1 Устройство и принцип работы лазера

Рассмотрим принцип работы газового лазера. Его главные элементы - активная среда (газ), усиливающая исходное излучение, и резонатор (интерферометр Фабри-Перо, состоящий из двух плоских зеркал с высоким коэффициентом отражения), обеспечивающий обратную связь.

Через активную среду проходит электромагнитная волна с частотой  $\omega$ , иначе называемой частотой рабочего перехода, соответствующая резонансному условию:  $\hbar\omega = E_1 - E_0$ , где  $E_1$ ,  $E_0$  - некоторые уровни энергии атомов среды. Условия для усиления интенсивности излучения в трубке лазера создаются за счет накачки: концентрация атомов в возбужденном состоянии больше концентрации атомов в основном, тогда количество рожденных фотонов превышает количество поглощенных.

Множественно отражаясь от зеркал резонатора, волны, распространяющиеся вдоль оси интерферометра, усиливаются. В трубке лазера образуется стоячая волна, то есть на длине резонатора  $L$  укладывается целое число полуволн  $\lambda/2$ :

$$2L = \lambda m$$

Различным порядкам  $m$  интерференции соответствуют стоячие волны разных частот  $\nu$  - моды колебаний. Межмодовое расстояние определяется следующей формулой:

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L} \quad (1)$$

Причем каждая мода колебаний не является строго монохроматической, а содержит узкий спектр частот в интервале  $\omega \pm \Delta\Omega$ , ширина которого  $\Delta\Omega$  выражается через добротность системы  $Q$ :

$$\Delta\Omega \propto \omega/Q \quad (2)$$

Рассчитаем добротность резонатора Фабри-Перо. Для этого заметим, что за один проход волны вдоль оси потеря энергии составит:  $\Delta W/W = 1 - r^2$ , где  $r$  - коэффициент отражения по энергии. За время одного прохода совершается  $L/\lambda$  колебаний. Тогда для добротности интерферометра Фабри-Перо верно:

$$Q = 2\pi \frac{W}{\Delta W} \propto \frac{2\pi L}{\lambda} \frac{1}{1 - r^2} \quad (3)$$

Таким образом, спектр излучения лазера формирует дискретный набор волн, усиление которых превышает уровень потерь.

Ширина спектра генерации (количество волн в наборе) определяется эффектом Доплера. Действительно, частота рабочего перехода уширяется. В лазерной трубке атомы среды

участвуют в хаотическом движении со средней скоростью  $v$  вдоль оси интерферометра, а частота движущегося источника сдвинута относительно неподвижного. Механизм изображения изображен на рисунке 1.

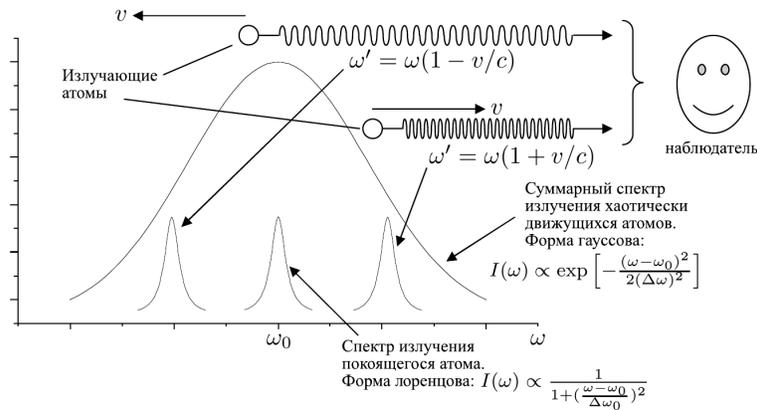


Рис. 1: Доплеровское уширение спектра излучение атомов вследствие теплового движения

Изменение частоты  $\Delta\omega_\gamma$  пропорционально скорости, а именно верно выражение:

$$\frac{\Delta\omega_\gamma}{\omega} \propto \frac{2v}{c} \quad (4)$$

Здесь  $c$  - скорость света.

Таким образом, получаемый на выходе из лазера спектр изображен на рисунке 2.

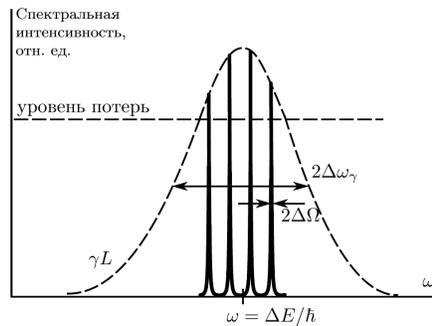


Рис. 2: Схематическое изображение генерируемых лазером мод

Для исследования межмодового спектра излучения в работе используется сканирующий интерферометр.

## 2 Устройство и принцип работы сканирующего интерферометра

Схематично сканирующий интерферометр изображен на рисунке 3.

При подаче большого напряжения пьезоэлектрический элемент  $\Pi$  позволяет периодически изменять расстояние между зеркалами интерферометра  $\mathcal{Z}_1$  и  $\mathcal{Z}_2$  на величину порядка длины волны лазера.

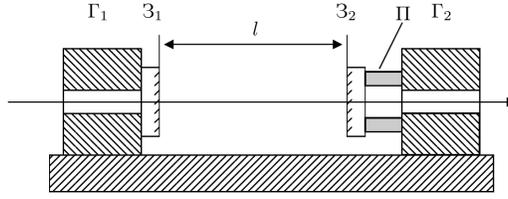


Рис. 3: Устройство сканирующего интерферометра

Аналогично лазеру, существует условие для стоячих волн в сканирующем интерферометре:

$$2l = \lambda m$$

Внешнее излучение с длиной волны  $\lambda$  полностью проходит через интерферометр. Расстояние между соседними собственными его модами называется дисперсионной областью и равно:

$$\Delta\nu_i = \frac{c}{2l} \leftrightarrow \Delta\lambda_i = \frac{\lambda}{m} = \frac{\lambda^2}{2l} \quad (5)$$

Разрешающая способность интерферометра Фабри-Перо равна:

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{2\pi l}{\lambda(1-r)} \quad (6)$$

Здесь  $r$  - коэффициент отражения по энергии.

Периодическое изменение длины сканирующего интерферометра позволяет охватить несколько мод лазера и наблюдать осциллограммы мощности излучения, которые показаны на рисунке 4.

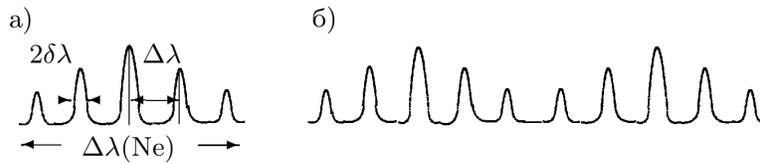


Рис. 4: Характерные осциллограммы при амплитуде колебаний длины сканирующего интерферометра а)  $\approx \Delta\lambda$ , б)  $\approx 2\Delta\lambda$

### 3 Исследование спектрального состава излучения лазера

Для исследования спектральной линии соберем установку, показанную на рисунке 5. Параметры установки: расстояние между зеркалами сканирующего интерферометра  $l = 9,0$  см, расстояние между зеркалами лазера  $L = 65,0$  см, длина волны  $\lambda = 632,8$  нм. Погрешность в указанных на установке расстояниях будем считать равно 2 мм.

Излучение He-Ne-лазера проходит развязку, состоящую из поляроида П и пластинки  $\lambda/4$ , повернутой на  $\pi/4$  к разрешенному направлению поляроида, - она нужна для предотвращения попадания в лазер отраженных лучей - и линзу Л, уменьшающую расходимость пучка на входе интерферометра СИ. После излучение поступает на фотодиод ФД; напряжение с фотодиода подается на вертикальный вход осциллографа. Напряжение на пьезоэлементе регулируется ручкой 1.

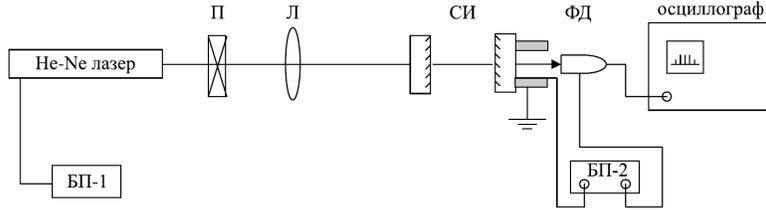


Рис. 5: Схема установки спектрального состава излучения лазера

Отцентрируем систему и добьемся максимального сигнала на осциллографе. Рассчитаем межмодовое расстояние  $\Delta\nu$  для резонатора в лазере по формуле (1):

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L} = (230,7 \pm 0,7) \text{ МГц}$$

Это же расстояние в терминах  $\lambda$  может быть найдено по аналогии с равенством (5):

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2L} = (3,080 \pm 0,009) \cdot 10^{-4} \text{ нм}$$

Подберем напряжение, при котором на экране осциллографа укладывается 1-2 доплеровских контура (считаем, что ширина спектрального контура  $\approx$  ширина доплеровского контура  $\Delta\lambda_\gamma$ ). Число промежутков между модами на экране осциллографа внутри одного контура равно 6. Тогда ширина доплеровского контура:

$$\Delta\lambda_\gamma = 6\Delta\lambda = (1,848 \pm 0,006) \cdot 10^{-3} \text{ нм}$$

Отсюда по формуле (4) и с учетом  $\frac{\Delta\lambda_\gamma}{\lambda} = \frac{\Delta\omega_\gamma}{\omega}$  получим:  $\frac{\Delta\lambda_\gamma}{\lambda} \propto \frac{2v}{c}$ , где  $v$  - средняя скорость хаотического движения,  $c$  - скорость света.

Для кинетической энергии движения вдоль оси верно:  $mv^2/2 = kT/2$ , где  $T$  - температура газа в лазере,  $k$  - постоянная Больцмана,  $m$  - масса атома неона. Таким образом, можно оценить температуру газа  $T$ :

$$T = \frac{mv^2}{k} = \frac{m}{k} \left( \frac{c\Delta\lambda_\gamma}{2\lambda} \right)^2 = (466 \pm 2) \text{ К}$$

Рассчитаем теперь дисперсионную область сканирующего интерферометра по формуле (5):

$$\Delta\lambda_i = \frac{\lambda^2}{2l} = (2,22 \pm 0,05) \cdot 10^{-3} \text{ нм}$$

При помощи фотографии осциллограммы легко определить, что ширина на полувывоте одного максимума наблюдаемой картины примерно равна половине расстояния между модами. Тогда разрешающая способность интерферометра равна:

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{2\lambda}{\Delta\lambda} = (74,0 \pm 0,2) \cdot 10^6$$

Зная разрешающую способность, по формуле (6) найдем коэффициент отражения  $r$ :

$$r = 1 - \frac{2\pi l}{\lambda R} = (0,99 \pm 0,02)$$

Фотографии наблюдаемых осциллограмм представлены на рисунках 6.

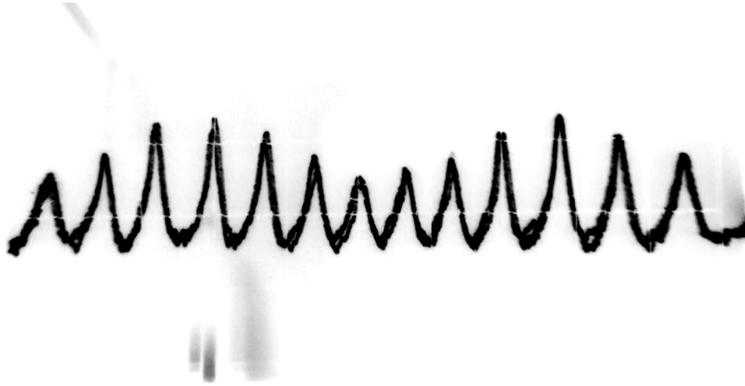


Рис. 6: Осциллограмма с двумя доплеровскими контурами

**Вывод:** в работе изучены устройство и принцип работы лазера и сканирующего интерферометра. Проведено исследование спектра излучения лазера, а именно, оценено его межмодовое расстояние  $\Delta\lambda$  и вычислена ширина доплеровского контура  $\Delta\lambda_\gamma$ . Получена температура газа  $T$ , которая по порядку величины совпадает с настоящим значением. В ходе работы определены некоторые характеристики сканирующего интерферометра: дисперсионная область  $\Delta\lambda_i$ , значение которой соотносится с значением ширины доплеровского контура; разрешающая способность и коэффициент отражения по энергиям. Как и ожидалось, разрешающая способность интерферометра Фабри-Перо высока. Погрешности величин, указанных в работе, занижены и учитывают лишь приборную ошибку параметров системы.