



Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

## СКАНИРУЮЩИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР

### Лабораторная работа № 5.10

МОСКВА 2005

**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.

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

Перед выполнением эксперимента студентам предлагается ознакомиться с принципом работы лазера (оптического квантового генератора, ОКГ) и с теорией интерферометра Фабри–Перо по литературе, приведенной в конце описания. Теория интерферометра Фабри–Перо более подробно рассмотрена в описании к лабораторной работе № 5.9.

#### Устройство He-Ne-лазера.

Основным элементом He-Ne-лазера непрерывного действия является газоразрядная трубка Т (рис. 1) с длиной несколько десятков сантиметров и с внутренним диаметром 5–10 мм. Трубка наполнена смесью гелия и неона с парциальными давлениями порядка 1 и 0,1 Торр соответственно. Концы трубки закрыты плоскопараллельными стеклянными или кварцевыми пластинами  $P_1$  и  $P_2$ , установленными под углом Брюстера к ее оси. Линейно поляризованный свет с электрическим вектором, лежащим в плоскости падения, не испытывает потерь на отражение, вследствие этого лазер генерирует линейно поляризованное излучение. В загнутых концах трубки располагаются анод А и катод К. Разряд в трубке возникает при напряжении 1,5–2 кВ. Трубка помещена между зеркалами  $S_1$  и  $S_2$ , образующими интерферометр Фабри–Перо, который играет роль оптического резонатора. Прозрачность зеркал резонатора обычно меньше 1%. Разрядный ток трубки составляет несколько десятков миллиампер.

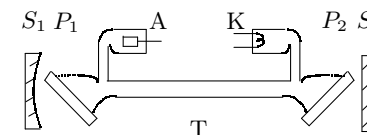


Рис. 1. Устройство гелий-неонового лазера

В загнутых концах трубки располагаются анод А и катод К. Разряд в трубке возникает при напряжении 1,5–2 кВ. Трубка помещена между зеркалами  $S_1$  и  $S_2$ , образующими интерферометр Фабри–Перо, который играет роль оптического резонатора. Прозрачность зеркал резонатора обычно меньше 1%. Разрядный ток трубки составляет несколько десятков миллиампер.

Рабочим газом He-Ne-лазера является неон, ответственный за розовато-красное свечение разряда. Для возбуждения лазерной генерации необходимо создать инверсную заселенность уровней рабочего перехода неона. В гелий-неоновом лазере такая заселенность достигается главным образом из-за передачи возбуждения атомам неона от атомов гелия, которые возбуждаются в разряде электронным ударом.

Активная среда, обладающая инверсной заселенностью уровней, способна усиливать оптическое излучение на частоте рабочего перехода. Усиление происходит вследствие индуцированного (стимулированного) когерентного излучения возбужденных атомов под действием поля световой волны. Если кювету с активной средой поместить между зеркалами интерферометра Фабри–Перо, то испущенный вдоль оси свет многократно отражается. При этом обеспечиваются условия возникновения лазерной генерации света. Условием возбуждения генерации является превышение усиления над потерями. Потери в He-Ne-лазере обусловлены главным образом неидеальным отражением от зеркал (уход излучения из резонатора). Обратим в связи с этим еще раз внимание на установку пластин  $P_1$  и  $P_2$  (см. рис. 1) под углом Брюстера.

В интерферометрах Фабри–Перо, используемых в лазерах, излучение распространяется вдоль оси интерферометра. Если на полном оптическом пути  $2L$ , где  $L$  — расстояние между зеркалами, укладывается целое число длин волн, наступает резонанс, т. е. в интерферометре возникает стоячая волна. При этом волна, дважды отраженная от зеркал, возвращается к испустившему ее атому в той же фазе, в которой она была испущена. Волны индуцированного излучения, складываясь, усиливают друг друга. Условие резонанса имеет вид

$$2L = m\lambda \quad (m — \text{целое число}). \quad (1)$$

Различным значениям порядка интерференции  $m$  соответствуют стоячие волны разных частот. Их называют *типами колебаний*, или *модами*. Из (1) легко получить выражение для межмодового расстояния  $\Delta\nu$  (в единицах частоты):

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L}, \quad \text{где } c — \text{скорость света}. \quad (2)$$

Из формулы (2) следует, что для интерферометра с базой  $L = 1$  м межмодовое расстояние  $\Delta\nu = 150$  МГц. В то же время спектральная линия рабочего перехода неона имеет ширину порядка 1500 МГц. Генерация лазера возникает на резонансной частоте лазерного интерферометра. В нашем случае возможна одновременная генерация нескольких мод. Рисунок 2 иллюстрирует увеличение числа мод генерации лазера с ростом усиления активной среды, возникающим при увеличении мощности накачки.

Спектральная линия  $\lambda = 632,8$  нм неона уширена главным образом из-за эффекта Доплера, т. е. вследствие теплового движения атомов. При небольшом усилении (кривая 1) генерации нет. В случае 2 генерация происходит только на частоте  $\nu_m$ , расположенной вблизи центра спектральной линии. Если усиление определяется кривой 3, генерация возникает на трех частотах  $\nu_{m-1}$ ,  $\nu_m$  и  $\nu_{m+1}$ , и т. д. Говорят, что в этом случае лазер одновременно работает на трех модах.

Для гелий-неонового лазера с достаточно длинной трубкой на переходе 632,8 нм многомодовая генерация является обычным режимом работы<sup>1</sup>.

**Сканирующий интерферометр.** Для исследования межмодового состава излучения He-Ne-лазера в работе используется сканирующий интерферометр, представляющий собой высокочастотный интерферометр Фабри–Перо с периодически изменяемой базой. Его устройство схематически показано на рис. 3.

На жестком массивном основании расположены две юстировочные головки  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ , на которых укреплены зеркала  $З_1$  и  $З_2$ . Зеркало  $З_1$  установлено непосредственно на головке  $\Gamma_1$ , зеркало  $З_2$  связано с головкой  $\Gamma_2$  через пьезокерамический элемент П. Юстировочные головки снабжены винтами (не показанными на рис. 3), которые позволяют в небольших пределах поворачивать зеркала относительно вертикальной и горизонтальной осей. С помощью головок  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  зеркала выставляются на параллельность.

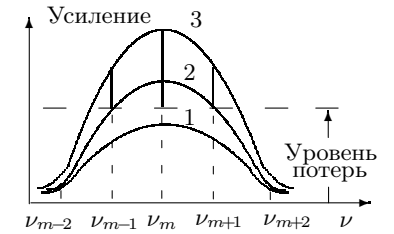


Рис. 2. Развитие генерации лазера на нескольких модах при увеличении мощности накачки

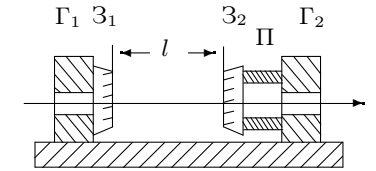


Рис. 3. Устройство сканирующего интерферометра

<sup>1</sup>Описанные здесь моды, отличающиеся по частоте на величину  $c/2L$ , называются *продольными модами*. Кроме того, существуют так называемые поперечные моды, отличающиеся от продольных распределением интенсивности по сечению пучка. Частоты поперечных мод отличаются от частот соответствующих продольных мод на величину, малую по сравнению с межмодовым расстоянием  $c/2L$ .

Пьезокерамический элемент П позволяет периодически изменять базу интерферометра ( $l \approx 10$  см) на величину порядка длины световой волны. Элемент имеет форму полого цилиндра. Его внутренняя и наружная поверхности металлизированы и образуют цилиндрический конденсатор. Необходимое изменение длины цилиндра возникает при напряжении в несколько сот вольт.

Если вдоль оси интерферометра распространяется световое излучение с длиной волны  $\lambda$ , то при выполнении условия

$$2l = m\lambda \quad (m — \text{целое число}), \quad (3)$$

аналогичного условию (1) для лазера, возникает резонанс. Внешнее излучение с длиной волны, удовлетворяющей условию (3), полностью проходит через интерферометр. Если на интерферометр падает излучение с различными длинами волн, то одновременно может возникнуть несколько резонансов. Собственные моды интерферометра отличаются по частоте на величину

$$\Delta f = \frac{c}{2l}.$$

Величина  $\Delta f$  называется *дисперсионной областью* спектрального прибора. В единицах  $\lambda$  дисперсионная область сканирующего интерферометра равна

$$\Delta\lambda_{\text{си}} = \frac{\lambda}{m} = \frac{\lambda^2}{2l}. \quad (4)$$

В нашей работе интерферометр Фабри–Перо используется как спектральный прибор высокой разрешающей силы. Разрешающая способность  $R$  спектрального прибора определяется отношением

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda}, \quad (5)$$

где  $\delta\lambda$  — минимальная разность длин волн, разрешимая прибором вблизи длины волны  $\lambda$ . При определении  $\delta\lambda$  обычно используют критерий разрешения Релея. Разрешающая способность интерферометра Фабри–Перо зависит от длины интерферометра  $l$  и коэффициента отражения зеркал  $r$ :

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

(см. работу № 5.9). В лазерной технике принято выражать разрешение интерферометра в единицах частоты:

$$\delta f = \nu \frac{\delta\lambda}{\lambda} = \frac{c}{2l} \frac{1-r}{\pi}. \quad (7)$$

Как видно из (7), величина  $(1-r)/\pi$  показывает, во сколько раз разрешение интерферометра меньше его межмодового интервала. Сканирующий интерферометр, применяемый в настоящей работе, имеет зеркала с коэффициентом отражения  $r \approx 98,5\%$ . Поэтому с его помощью можно разрешить две узкие спектральные линии, отличающиеся по частоте на величину порядка  $0,005 \delta f$ , т. е. (при  $l = 10$  см) приблизительно на 7,5 МГц. Напомним, что межмодовое расстояние лазера при  $L = 1$  м равно  $\Delta\nu = 150$  МГц. Таким образом, наш сканирующий интерферометр вполне подходит для исследования межмодового состава лазерного излучения.

Рисунок 4 дает представление о соотношении между спектром генерации ОКГ и спектральной характеристикой сканирующего интерферометра (т. е. его спектром пропускания). Изменение расстояния между зеркалами сканирующего интерферометра приводит к сдвигу нижней «гребенки» по оси частот. При этом интерферометр последовательно настраивается на разные моды лазера.

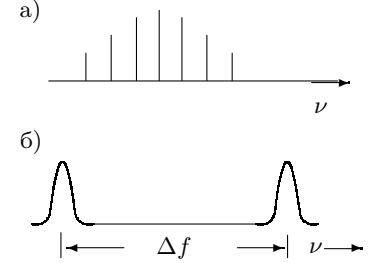


Рис. 4. Спектр генерации лазера (а) и спектр пропускания сканирующего интерферометра (б)

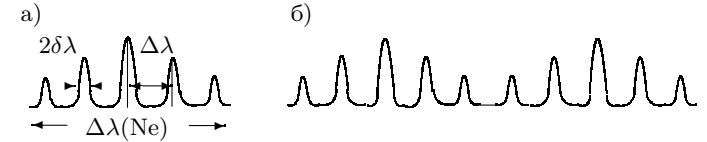


Рис. 5. Характерные осциллограммы: амплитуда колебаний зеркала сканирующего интерферометра а)  $\approx \Delta\lambda(\text{Ne})$ ; б)  $\geq 2\Delta\lambda(\text{Ne})$

Если одно из зеркал сканирующего интерферометра периодически перемещать вдоль оси, мощность прошедшего через интерферометр излучения периодически изменяется (рис. 5).

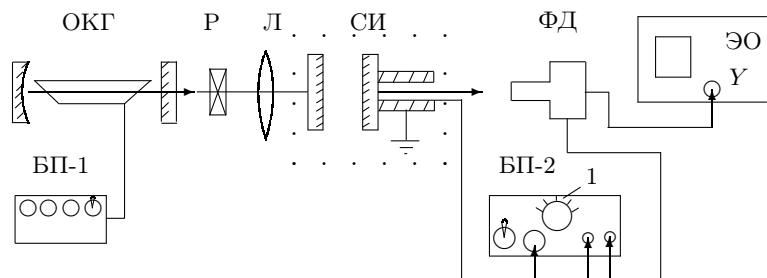


Рис. 6. Схема установки для исследования доплеровского контура излучения лазера

**Экспериментальная установка.** Схема экспериментальной установки приведена на рис. 6. Излучение He-Ne лазера (ОКГ) проходит через поляризационную развязку Р и линзу Л и поступает на вход сканирующего интерферометра (СИ).

Поляризационная развязка предотвращает попадание в лазер излучения, отразившегося от элементов оптического тракта. Это излучение может существенно повлиять на работу лазера и даже привести к срыву генерации. Развязка состоит из поляроида и пластинки  $\lambda/4$ , главные направления которой установлены под углом  $45^\circ$  по отношению к разрешённому направлению поляроида. После развязки Р свет приобретает циркулярную поляризацию (например, по правому кругу). При отражении от передней поверхности линзы, от зеркала сканирующего интерферометра и т. п. свет распространяется в обратном направлении в виде левополяризованной волны. Такая волна, пройдя через пластинку  $\lambda/4$ , вновь приобретает линейную поляризацию. Однако направление колебаний в этой волне оказывается перпендикулярным направлению разрешённых колебаний поляроида, так что до лазера волна не доходит.

Линза Л служит для формирования луча, поступающего на вход сканирующего интерферометра. Линза снабжена поперечными и продольными салазками для юстировки прибора на максимум сигнала.

С выхода сканирующего интерферометра излучение поступает на фотодиод ФД. Напряжение с фотодиода через усилитель подаётся на вертикальный вход электронного осциллографа ЭО.

ОКГ питается от блока питания БП-1, фотодиод и усилитель — от БП-2. Напряжение на пьезоэлемент сканирующего интерферометра подаётся с блока питания БП-2 и регулируется ручкой 1.

## ЗАДАНИЕ

В работе предлагается исследовать доплеровский контур спектральной линии: определить межмодовое расстояние и приборную ширину отдельной моды излучения лазера; оценить газокINETическую температуру в разряде; рассчитать дисперсионную область, разрешающую способность и коэффициент отражения зеркал сканирующего интерферометра.

**Помните, что прямой лазерный луч опасен для глаз!**

1. Включите в сеть осциллограф и блоки питания фотодиода и лазера. Если через 2–3 минуты лазер не загорится, нажмите кнопку «пуск» на блоке БП-1.
2. Поставьте линзу посредине между лазером и сканирующим интерферометром. Временно выведите линзу из луча с помощью поперечных салазок.
3. Совместите прямой и отражённый лучи, осторожно вращая винты 1 и 2 на первом (по ходу луча) зеркале интерферометра: два пятна на пластинке  $\lambda/4$  должны совпадать. Затем винтами 1 и 2 второго зеркала совместите пятна на первом зеркале.
4. Настройте поляризационную развязку. Для этого сначала вращением поляроида добейтесь максимальной яркости луча. Можно наблюдать за пятном на пластинке  $\lambda/4$  или на листе бумаги.  
Вращая пластинку  $\lambda/4$ , погасите отражённый луч: рассеянный свет на оправе лазерного окна не меняет яркости, если перекрывать луч между интерферометром и пластинкой  $\lambda/4$ . При этом яркие пятнышки (отражение от любой стеклянной поверхности) могут появляться и пропадать.
5. Слегка перемещая фотодиод вверх-вниз и в сторону, получите на экране осциллограмму типа показанной на рис. 5а. Найдите максимальный сигнал.
6. Для уменьшения расходимости пучка (усиления сигнала) введите линзу в луч. Чуть смещая линзу, добейтесь стабильности и симметрии картины. Это важнее получения максимума, т. к. при максимальном сигнале в лазер всё-таки идёт обратный луч, и лазер работает нестабильно.

Снова подстройте второе зеркало винтами 1 и 2, чтобы добиться совмещения пятен на первом зеркале. Убедитесь, что луч попадает на фотодиод, и добейтесь максимального сигнала на осциллографе.

7. Изменяя напряжение на пьезокристалле (амплитуду качаний СИ), проследите, как изменяется количество доплеровских контуров за один проход интерферометра. Подберите напряжение, при котором на экране укладывается 1–2 контура за период качания.
8. Рассчитайте межмодовое расстояние резонатора ОКГ в единицах  $\nu$  и  $\lambda$ , используя формулу (2). Длина лазера  $L$  указана на установке;  $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ .

Сосчитав число промежутков между модами на экране, оцените видимую ширину спектральной линии неона  $\Delta\lambda(\text{Ne})$ .

Полагая, что ширина спектральной линии обусловлена эффектом Доплера и что видимая ширина линии неона порядка полуширины доплеровского контура ( $\Delta\lambda(\text{Ne}) \approx \Delta\lambda_D$ ), оцените среднюю скорость атомов неона  $v_x$  и газокINETическую температуру  $T$  в разряде:

$$\frac{\Delta\lambda_D}{\lambda} \simeq \frac{v_x}{c}; \quad \frac{mv_x^2}{2} \simeq \frac{kT}{2}. \quad (8)$$

Здесь  $v_x$  — скорость молекул неона вдоль оси лазера;  $m_{\text{Ne}} = 20,2 \text{ а. е. м.}$ ;  $1 \text{ а. е. м.} = 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ г}$ .

9. Рассчитайте дисперсионную область  $\Delta\lambda_{\text{СИ}}$  сканирующего интерферометра по формуле (4) для  $l = 9 \text{ см}$  и сравните её с видимой шириной линии неона  $\Delta\lambda(\text{Ne})$ .
10. Сравнив ширину отдельной моды на полувысоте с межмодовым расстоянием, оцените разрешение  $\delta\lambda$  сканирующего интерферометра и разрешающую способность  $R$  по формуле (5).  
Оцените коэффициент отражения зеркал интерферометра  $r$  по формуле (6).
11. Зарисуйте в тетради вид осциллограммы спектральной линии (качественно); укажите измеренные параметры.
12. Отключите осциллограф и оба блока питания.

### Контрольные вопросы

1. Объясните основные процессы, приводящие к появлению инверсной заселённости уровней неона.
2. Почему плоскопараллельные пластинки, закрывающие с торцов рабочую кювету с гелий-неоновой смесью, устанавливают под углом Брюстера?
3. Что такое моды? Получите формулу (2) для межмодового расстояния.
4. В чём состоит условие возбуждения лазера?

5. Выведите формулу (6) для разрешающей способности интерферометра Фабри–Перо.
6. Как работает поляризационная развязка?
- 7\* При какой длине кюветы He-Ne-лазера, независимо от уровня накачки, генерация возможна не более чем на одной моде (одномодовый лазер)?

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ландсберг Г.С. Оптика. — М.: Наука, 1976. Гл. XI, §§ 225, 227, 228.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. IV. Оптика. — М.: Наука, 1986. Гл. XI, § 122.
3. Кингсеп А.С., Локишин Г.Р., Ольхов О.А. Основы Физики. — Т. I. Механика, электричество и магнетизм, колебания и волны, волновая оптика. — М.: Физматлит, 2001. Ч. 3, гл. 8, § 8.9.
- 4\* Квантовая электроника. Маленькая энциклопедия. — М.: Сов. энциклопедия, 1969. С. 110–115, 165–177, 325–329. 414–415.