

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа прикладной математики и информатики

# Отчёт о выполнении лабораторной работы

## 4.5.3

### Сканирующий интерферометр

Соболевский Федор Александрович

Старокожко Иван Георгиевич

Б05-111

Апрель 2023

# 1 Аннотация

В данной работе изучены устройство и работа гелий-неонового лазера непрерывного действия и сканирующего интерферометра Фабри-Перо. С помощью интерферометра изучен спектральный состав лазера и его количественные характеристики. По полученным осциллограммам оценены газокINETические и спектральные характеристики лазера и разрешающая способность интерферометра.

## 2 Теоретически сведения

### Лазер и его спектральный состав

**Лазер** есть источник квазимонохроматического и узконаправленного высококогерентного потока излучения, работающий за счёт квантово-механического эффекта вынужденного (индуцированного) излучения. В гелий-неоновом лазере резонатором является система из двух зеркал с высоким коэффициентом отражения — **интерферометр Фабри-Перо** — и активная среда, состоящая из гелия и неона.

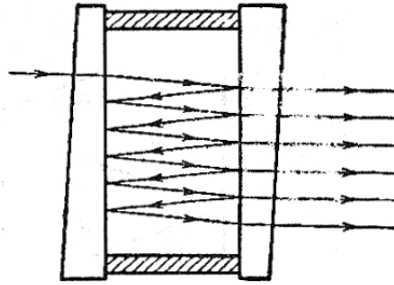


Рис. 1: Принцип работы интерферометра Фабри-Перо

Схематично принцип работы интерферометра Фабри-Перо изображён на рис. 1. Между зеркалами вдоль оси интерферометра многократно отражается свет, при этом максимальным усилением в силу интерференции обладают волны, для которых набег фазы при полном обходе резонатора кратен  $2\pi$ , откуда

$$2L = m\lambda, \quad m \in \mathbb{N}, \quad (1)$$

где  $L$  — длина резонатора. Тогда разность соседних усиливаемых частот излучения есть

$$\nu_{m+1} - \nu_m = \frac{c}{2L}. \quad (2)$$

Соответственно, лазер генерирует отдельные типы колебаний, называемые модами, удовлетворяющие условию (1). Количество мод определяется усилением лазера (см. рис. 2) и шириной спектра генерации, которая, в свою очередь, обусловлена **эффектом Доплера** — явлением изменения частоты генерируемого излучения вследствие хаотического теплового движения излучающих атомов. Частота излучения движущегося источника сдвинута относительно неподвижного источника; в нерелятивистском случае

$$\frac{\Delta\omega_D}{\omega} \sim \frac{v}{c} \cos \alpha, \quad (3)$$

где  $\Delta\omega_D$  — смещение частоты излучения относительно излучения источника,  $\alpha$  — угол между вектором скорости и направлением на наблюдателя. В предположении, что  $\cos \alpha$  случайно меняется в пределах от -1 до 1, усреднением получим приближённую формулу для ширины доплеровского контура:

$$\Delta\omega_D = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}. \quad (4)$$

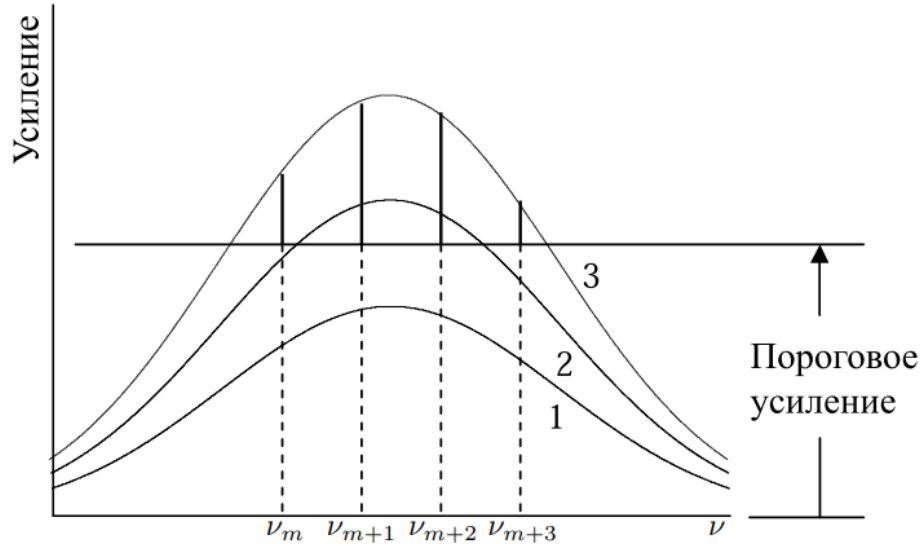


Рис. 2: Зависимость количества мод от усиления лазера

Приведём более точную формулу из спектрометрии:

$$\Delta\nu_D = \sqrt{\ln 2} \cdot \frac{\nu_{max}}{c} \sqrt{\frac{2kT}{m}}, \quad (5)$$

где  $\nu_{max}$  — частота излучения лазера. В данной работе мы предполагаем, что ширина спектра излучения определяется преимущественно эффектом Доплера. В действительности же она также зависит от случайного шума и потерь энергии в системе, поэтому в ходе работы, помимо прочего, проверяется, насколько верно данное приближение.

## Сканирующий интерферометр

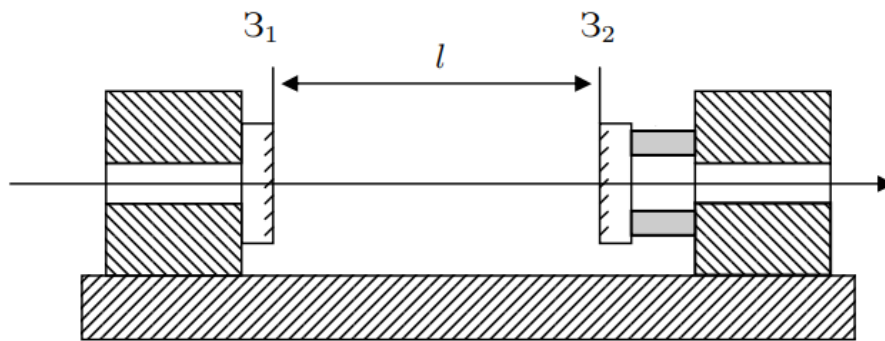


Рис. 3: Схема устройства сканирующего интерферометра

В данной работе для наблюдения спектра излучения лазера использовался **сканирующий интерферометр** — интерферометр Фабри-Перо с быстро изменяющимся во времени расстоянием между отражающими пластинами. Схематично эта система изображена на рис. 3. Для интерферометра выполняются соотношения, аналогичные (1), (2), определяющие длину волны излучения, полностью проходящего через прибор, т. е. его *собственные моды*. Разность частот собственных мод интерферометра называется *дисперсионной областью* и выражается в единицах длины волны как

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{m} = \frac{\lambda^2}{2l}. \quad (6)$$

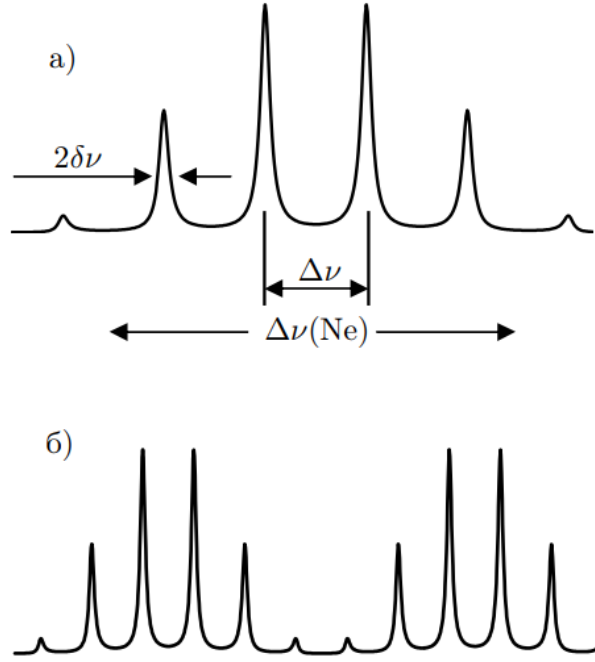


Рис. 4: Характерные осциллограммы: а) при небольшой амплитуде колебаний зеркала ( $\leq \lambda/2$ ), б) при амплитуде колебаний, превышающей  $\lambda/2$

Здесь  $l$  — расстояние между пластинами интерферометра. В данной работе интерферометр используется как оптический прибор высокой разрешающей силы. Разрешающая способность  $R$  определяется как

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda}, \quad (7)$$

где  $\delta\lambda$  — минимальная разность длин волн, разрешаемая прибором вблизи длины волны  $\lambda$ . В случае интерферометра Фабри—Перо две линии считаются разрешимыми, если расстояние между максимумами их контуров равно или превышает ширину контура по уровню 0,5. Разрешающая способность интерферометра Фабри—Перо зависит от длины интерферометра  $l$  и коэффициента отражения зеркал  $r$ :

$$R = \frac{2\pi l}{\lambda(1-r)}. \quad (8)$$

В сканирующем интерферометре величина  $l$  периодически меняется, что обеспечивает прохождение через прибор разных длин волн лазерного излучения в разные промежутки времени и в конечном счёте образует периодический световой сигнал, представляющий собой спектр излучения лазера. Если амплитуда изменения  $l$  больше половины длины волны, то спектральная картина после смещения на  $\lambda/2$  начинает повторяться. Это проиллюстрировано на рис. 4.

### 3 Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки изображена на рис. 5. Излучение He–Ne-лазера 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 П свет приобретает циркулярную поляризацию (например, по правому кругу). При отражении от передней поверхности линзы, от зеркала

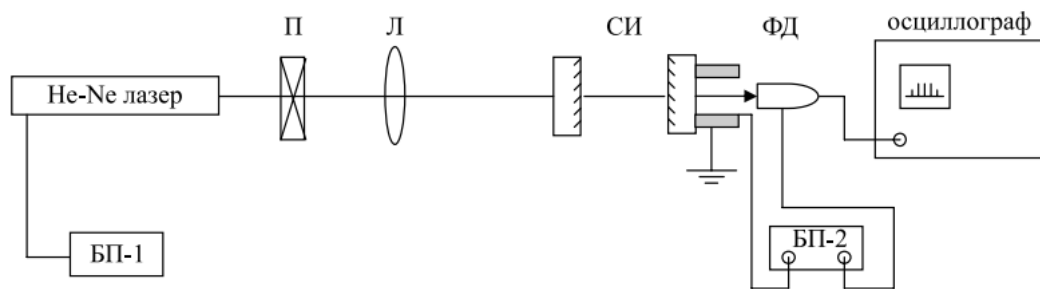


Рис. 5: Схема экспериментальной установки

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, поэтому до лазера отражённая волна не доходит.

Линза  $L$  служит для уменьшения расходимости пучка, поступающего на вход сканирующего интерферометра. Линза снабжена поперечными и продольными салазками для юстировки прибора на максимум сигнала. Излучение, прошедшее сквозь сканирующий интерферометр, поступает на фотодиод  $ФД$ . Напряжение с фотодиода через усилитель подаётся на вертикальный вход электронного осциллографа  $ЭО$ .

Лазер 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.

## 4 Ход работы, результаты

### 4.1 Вид осциллограмм

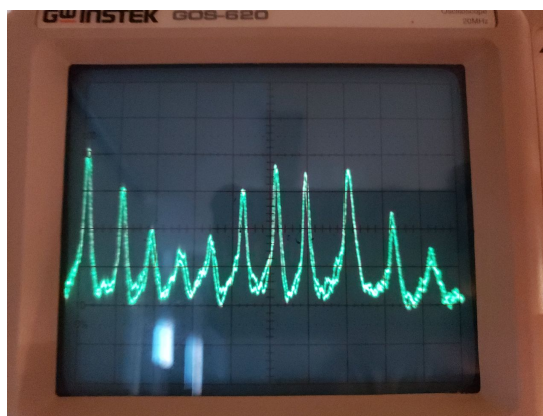


Рис. 6: Осциллограмма спектра лазерного излучения

После настройки приборов на осциллографе была получена картина спектра лазера, изображённая на рис. 6. На ней полностью виден один доплеровский контур, а также половина ещё одного. При уменьшении напряжения на пьезокристалле амплитуда колебаний длины интерферометра и, следовательно, его спектра пропускания, количество мод, укладывающихся в получаемую картину, уменьшается. Это показано на рисунках 7.

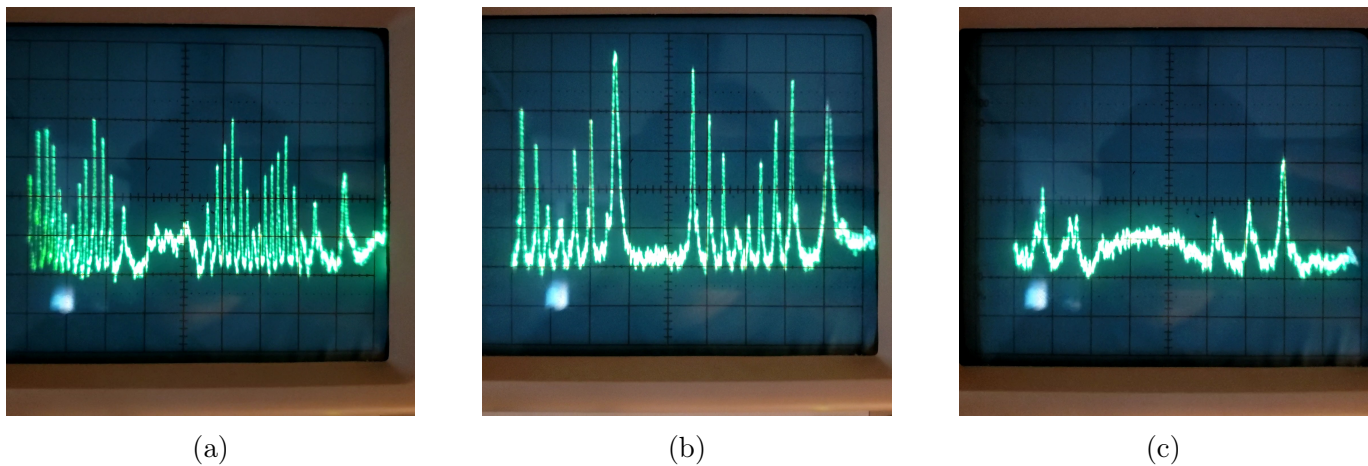


Рис. 7: Изменение изображения при уменьшении напряжения от максимального **7a** до минимального **7c**

## 4.2 Измерения

Так как единственное значение, не являющееся табличным в данной работе — количество мод, укладывающихся в ширину контура, погрешность определения коего затруднительно оценить, то дальнейшие результаты являются качественными, а погрешность их определения не оценивается.

Параметры установки:  $L = 65$  см — длина резонатора лазера,  $l = 9$  см — длина резонатора интерферометра,  $\lambda = 6328\text{\AA}$  — длина волны лазера,  $f = \nu = \frac{c}{\lambda} = 473,8 \cdot 10^{12}$  Гц — его частота,  $\nu_V = 50$  Гц — частота работы пьезоэлектрического элемента.

На основании приведенных выше данных и формулы (2) получим межмодовое расстояние лазера:

$$\delta\nu = \nu_{m+1} - \nu_m = \frac{c}{2L} = \frac{3 \cdot 10^{10} \text{ см/с}}{2 \cdot 65 \text{ см}} = 2,3 \cdot 10^8 \text{ Гц.}$$

В ходе эксперимента на экране осциллографа наблюдалось, что в один доплеровский контур

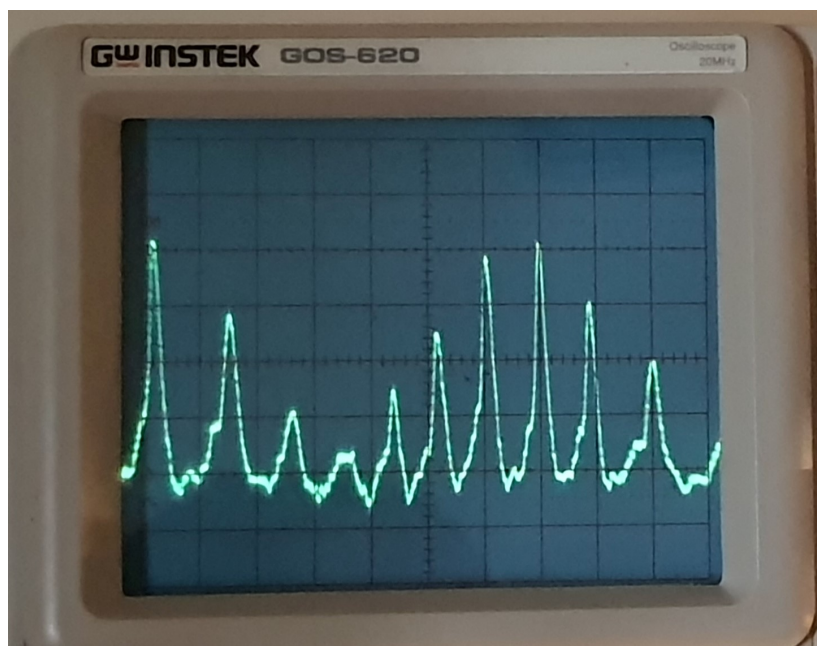


Рис. 8: Осциллограмма спектра лазерного излучения, число пиков в доплеровском контуре укладывается  $n = 8$  пиков — мод, генерируемых лазером (см. рис. **8**). Это соответствует ширине

доплеровского контура в 7 межмодовых расстояний, то есть

$$\Delta\nu(\text{Ne}) = n \cdot \delta\nu = 7 \cdot 2,3 \cdot 10^8 \text{ Гц} = 1,6 \text{ ГГц}.$$

Используя следствия закона Доплера (3), оценим среднюю скорость атомов неона:

$$\frac{\Delta\lambda_D}{\lambda} = \frac{\Delta\nu(\text{Ne})}{\nu} \approx \frac{v_x}{c} \Rightarrow v_x \approx c \frac{\Delta\nu(\text{Ne})}{\nu} = \frac{1,6 \cdot 10^9}{473,8 \cdot 10^{12}} \cdot 3 \cdot 10^{10} \text{ см/с} \approx 1,01 \cdot 10^5 \text{ см/с}.$$

Пользуясь соотношением (5), оценим газокINETическую температуру разряда:

$$\Delta\nu_D = \sqrt{\ln 2} \cdot \frac{\nu_{max}}{c} \sqrt{\frac{2kT}{m}} \Rightarrow T = \left( \frac{c \cdot \Delta\nu_D}{\nu_{max} \sqrt{\ln 2}} \right)^2 \frac{m}{2k}$$

$$T = \left( \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 1,6 \cdot 10^9}{473,8 \cdot 10^{12}} \right)^2 \cdot \frac{20,2 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27}}{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot \ln(2)} \approx 1800 \text{ К}.$$

### 4.3 Разрешающая способность интерферометра

Далее рассчитаем дисперсионную область сканирующего интерферометра, пользуясь соотношением, аналогичным соотношению (2):

$$\Delta\lambda_{\text{си}} = \frac{\lambda}{m} = \frac{\lambda^2}{2l} = \frac{(6328 \cdot 10^{-8} \text{ см})^2}{2 \cdot 9 \text{ см}} \approx 2,2 \cdot 10^{-10} \text{ см} = 0,022 \text{ Å}.$$

Сравним с видимой шириной линии неона:

$$\Delta\lambda(\text{Ne}) = \Delta\nu(\text{Ne}) \cdot \frac{\lambda^2}{c} = 1,6 \cdot 10^9 \cdot \frac{(6328 \cdot 10^{-8})^2}{3 \cdot 10^{10}} = 2,1 \cdot 10^{-10} \text{ см} = 0,0021 \text{ Å}.$$

Тот факт, что дисперсионная область интерферометра близка к ширине контура означает, что длина интерферометра подобрана оптимально для данного излучения, и интерферометр способен обеспечить максимальную разрешающую способность.

Измерив отношение ширины отдельной моды на полувысоте к межмодовому расстоянию, можно получить разрешение  $\delta\lambda$  сканирующего интерферометра и разрешающую способность:

$$\delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2L} \cdot \frac{1,1}{10} = 0,00308 \cdot \frac{1,1}{10} \text{ Å} = 3,39 \cdot 10^{-12} \text{ см} = 0,000339 \text{ Å}.$$

Разрешающую способность найдем, воспользовавшись соотношением (7):

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{6328}{0,000339} \approx 1,86 \cdot 10^7.$$

Пользуясь формулой (8), оценим коэффициент отражения зеркал:

$$r = 1 - \frac{2\pi l}{\lambda R} = 1 - \frac{2\pi \cdot 9 \text{ см}}{6328 \cdot 10^{-8} \text{ см} \cdot 1,68 \cdot 10^7} \approx 0,95.$$

Полученное значение довольно близко к представленному в описании работы (около 98,5%).



## 5 Выводы

В ходе работы удалось оценить качественные и количественные характеристики лазерного излучения гелий-неонового лазера, а также исследовать его модовый состав.

- Эффект Доплера заметно наблюдается на спектральной картине излучения.
- Лазер работает в режиме многомодовой генерации.
- Средняя скорость движения атомов, рассчитанная на основе закона Доплера, составляет  $v_x \approx 1,01 \cdot 10^5 \text{ см/с}$ , что вполне соответствует по порядку скорости свободного пробега атомов в разреженном газе.
- Газокинетическая температура разряда оценивается в  $T = 1800 \text{ K}$ , что хорошо сходится с приблизительными значениями для установок данного типа. Последние два результата позволяют утверждать, что ширину спектра лазера действительно можно считать определяемой преимущественно эффектом Доплера.

Также в работе исследован сканирующий интерферометр.

- При уменьшении амплитуды напряжения на пьезоэлементе число мод, укладывающихся на спектральной картине уменьшается. Также слегка меняется ее вид, что обусловлено изменением амплитуды колебаний по отношению к длине волны лазера.
- Дисперсионная область интерферометра сравнима с шириной доплеровского контура, из чего следует высокая точность и разрешающая способность прибора.
- Рассчитанное разрешение интерферометра составляет  $\delta\lambda = 0,0021 \text{ Å}$ , что приводит к значению разрешающей способности порядка  $R = 1,86 \cdot 10^7$ .
- На основании теоретической формулы для разрешающей способности сканирующего интерферометра Фабри-Перо коэффициент отражения зеркал получен  $r \approx 95\%$ , что неплохо сходится с табличными значениями для установок данного типа (около 95%).