

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ГЕЛИЙ-НЕОНОВОГО ЛАЗЕРА

Цель работы: изучение принципа действия и спектра оптического квантового генератора (на примере гелий-неонового лазера).

Приборы и принадлежности: гелий-неоновый лазер, монохроматор УМ-2, неоновая лампа, поворотная призма, экран.

ВВЕДЕНИЕ

Генераторы света в видимой и ближней инфракрасной областях, которые работают на основе эффекта вынужденного (индуцированного) излучения, называют *оптическими квантовыми генераторами* (ОКГ), а также *лазерами*.¹ В настоящее время создано большое число различных типов лазеров, работающих на разных длинах волн.

Вынужденный переход атома из стационарного состояния с энергией E_2 в стационарное состояние с энергией $E_1 < E_2$ может происходить в присутствии фотонов с энергией $h\nu = E_2 - E_1$. Испускаемые при этом индуцированные фотоны, в отличие от спонтанно излученных фотонов, по всем параметрам (частота, направление распространения, поляризация, фаза) идентичны фотонам, стимулировавшим это излучение. Другими словами, индуцированные фотоны когерентны падающим фотонам и распространяются в том же самом направлении.

Вынужденное излучение может привести к когерентному усилению, а при наличии положительной обратной связи — к генерации оптического излучения.

¹ Laser - английская аббревиатура от "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation". В дословном переводе означает «усиление света с помощью стимулированного испускания излучения». Хотя лазерами принято называть не усилители, а генераторы излучения, но замена слова amplification (усиление) на generation (генерация) дала бы непривычное звучание laser.

Но при прохождении фотонов с энергией $h\nu = E_2 - E_1$ через среду наряду с излучением (спонтанным и вынужденным) происходит процесс поглощения фотонов, который уменьшает мощность проходящего через среду света. Если акты поглощения преобладают, то среда будет ослаблять излучение. Если преобладают акты вынужденного излучения, то среда будет усиливающей.

Для когерентного усиления падающего света с частотой $\nu = (E_2 - E_1)/h$ необходимо создать в среде *инверсную населённость* для пары уровней 1 и 2: число атомов в состоянии с энергией E_2 должно быть больше числа атомов в состоянии с энергией $E_1 < E_2$. Такое состояние среды является неравновесным – в случае термодинамического равновесия населенность уровня тем меньше, чем больше его энергия.

В двухуровневой системе инверсная населённость невозможна. Для ее создания используют один или несколько вспомогательных уровней, помимо двух «рабочих», населённость которых в итоге окажется инверсной.

В импульсных твердотельных лазерах (например, рубиновом) инверсная населенность достигается путем *оптической накачки* верхнего рабочего уровня 2 через дополнительный еще более высокий уровень 3. Инверсия может возникнуть в том случае, если уровень 2 является *метастабильным*.

В газоразрядных лазерах непрерывного действия для создания инверсной населённости уровней применяется *метод резервуара возбуждений*. Рассмотрим этот метод на примере гелий-неонового лазера².

Активной средой является смесь гелия и неона (атомов гелия в 5 – 10 раз больше) при давлении порядка 1 мм рт. ст. Инверсная населённость создаётся в атомах неона, а гелий служит «резервуаром возбуждений» для заселения верхнего рабочего уровня E_2 неона.

На рисунке 5.1 показана упрощенная схема уровней гелия и неона (изображены только необходимые для разъяснения уровни).

² Первый газовый лазер был создан Джаваном, Беннетом и Эрриотом в 1961 г.

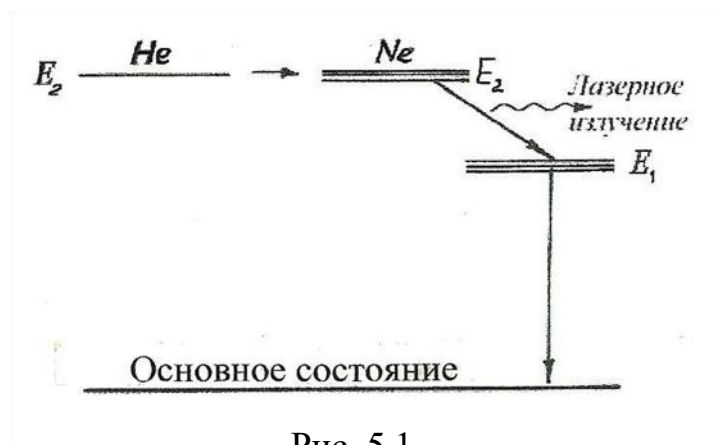


Рис. 5.1

Энергия E_2 возбужденного *метастабильного* уровня гелия почти точно совпадает с энергией E_2 верхнего рабочего уровня неона. Поэтому возбуждённые атомы гелия вместо спонтанного перехода в основное состояние передают избыток своей энергии атомам неона при столкновениях. Небольшое различие энергий уровней восполняется кинетической энергией движущихся атомов. Такая передача энергии называется *резонансным возбуждением*. Таким образом, гелий служит резервуаром возбуждений, с помощью которого непрерывно поддерживается инверсия населённостей между рабочими уровнями E_2 и E_1 в неоне.

Фотон, испущенный спонтанно атомом неона при переходе $E_2 \rightarrow E_1$, индуцирует такие же переходы в других атомах, так что становится возможным когерентное усиление излучения. Коэффициент усиления зависит от длины трубки, и он очень мал (при однократном прохождении трубки усиление составляет доли процента). Эффект усиления света можно увеличить путём многократного прохождения света через один и тот же слой активной среды. Естественно, усиление возможно только для фотонов, распространяющихся вдоль оси трубки.

Более детальная картина уровней гелия и неона и возможных линий генерации представлена на рис. 5.2. Электронная конфигурация основного состояния гелия – $1s^2$. Первые возбужденные состояния соответствуют переходу одного электрона на оболочку $2s$ и имеют электронную конфигурацию $1s2s$. Энергия возбуждения зависит от суммарного спина

электронов и равна 19,8 и 20,6 эВ (меньшая энергия соответствует сонаправленным спинам электронов). Оба уровня метастабильны со временем жизни примерно 10^{-3} с, так как прямые переходы в основное состояние запрещены правилами отбора.

Конфигурация основного состояния неона – $1s^2 2s^2 2p^6$. В возбужденном состоянии один из электронов переходит на более высокие s- или p-оболочки, то есть конфигурация атома становится $2p^5 ns$ или $2p^5 np$ (для простоты в электронной конфигурации указаны только незаполненные оболочки). Конфигурациям $2p^5 ns$ отвечают четыре близко расположенных энергетических уровня, а конфигурациям $2p^5 np$ – 10 уровней. Разность энергии между двумя метастабильными уровнями гелия 2s и уровнями неона с электронными конфигурациями $2p^5 4s$ и $2p^5 5s$ составляет $\sim 0,037$ эВ, поэтому между обеими парами уровней происходит процесс передачи возбуждения.

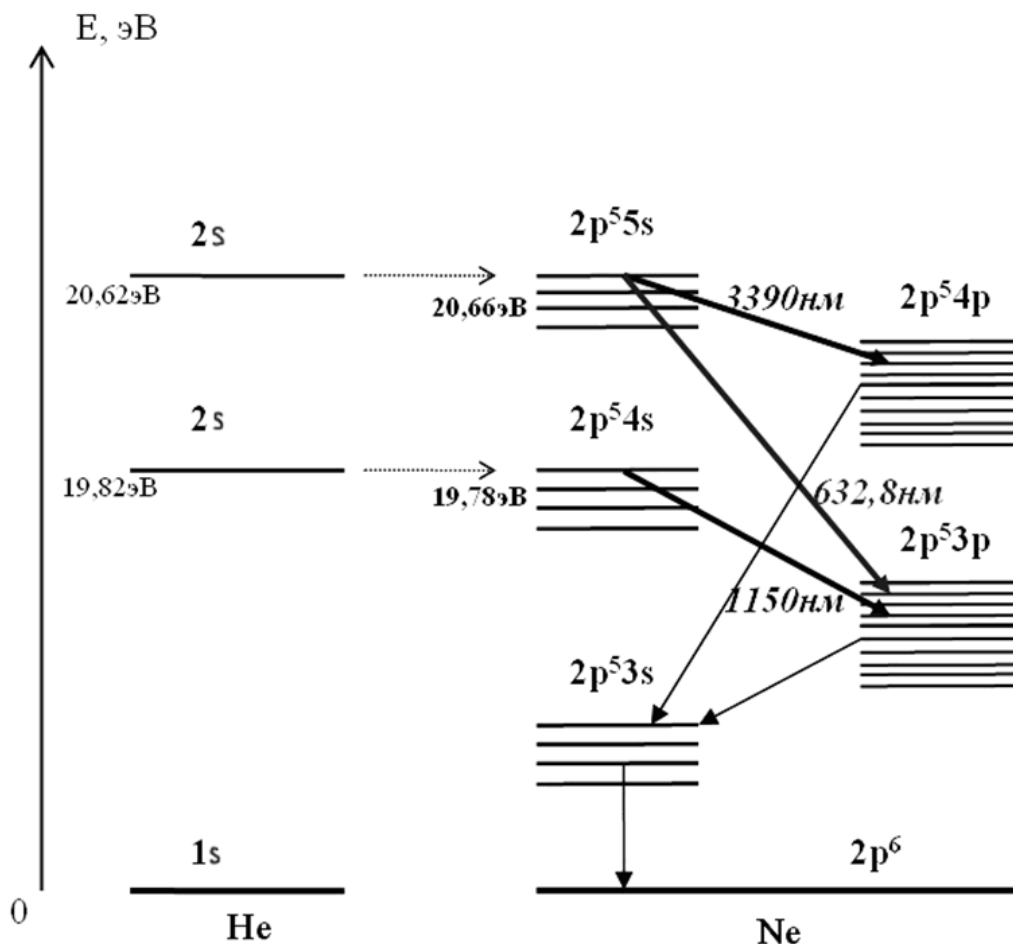


Рис. 5.2

По правилам отбора разрешены переходы с верхних s-уровней неона $2p^55s$ и $2p^54s$ на нижние p-уровни $2p^54p$ и $2p^53p$, а оттуда – на метастабильные уровни $2p^53s$ (с этих уровней атомы неона переходят в основное состояние при соударениях со стенками трубки; чтобы соударения со стенками были достаточно частыми, трубки делаются с маленьким внутренним диаметром порядка 1–2 мм при длине 20–60 см).

Инверсная населённость создается между тремя парами уровней: 5s - 4p, 5s - 3p, 4s - 3p. Соответственно, лазерная генерации возможна на трёх частотах, из них только одна попадает в видимый диапазон (переход 5s - 3p, длина волны 632,8 нм), а две другие лежат в ИК-диапазоне.

Инверсная населенность может создаваться и между другими энергетическими уровнями неона. В настоящее время известно около 27

линий неона, лежащих в диапазоне 630–5400 нм. Однако наиболее интенсивными являются перечисленные выше переходы.

Для создания *режима генерации* часть когерентного излучения должна всё время оставаться внутри активной среды, стимулируя вынужденное излучение фотонов всё новыми и новыми атомами. Это осуществляется с помощью *оптического резонатора* – системы двух зеркал. Именно зеркала превращают прибор в генератор света, обеспечивая *положительную обратную связь*.

В лазерах всех типов активная среда помещается между двумя параллельными зеркалами (которые могут быть плоскими или вогнутыми). Одно из зеркал имеет коэффициент отражения около 99,8% (что достигается за счет применения диэлектрических покрытий³), а другое зеркало (выходное) – 97-98%. Дойдя до выходного зеркала, свет частично проходит сквозь него – эта часть световой энергии (2-3%) излучается лазером вовне. Бóльшая часть фотонов, отразившаяся от выходного зеркала, остается внутри резонатора и индуцирует излучение новых когерентных фотонов.

В стационарном режиме генерации потери энергии (в зеркалах, при рассеянии в газе) должны компенсироваться усилением света в активной среде. Поэтому для возникновения генерации когерентного света усиление в активном веществе должно превышать некоторое пороговое значение. Чем меньше коэффициент отражения выходного зеркала, тем бóльшим пороговым усилением должно обладать рабочее вещество. В списке источников потерь выходное зеркало стоит на первом месте.

Длина газоразрядной трубки гелий-неонового лазера у разных его конструкций может быть от 15–20 см до 1–2 м. От длины трубки зависит коэффициент усиления активного элемента, а следовательно, и мощность

³ Такой близкий к единице коэффициент отражения недостижим с металлическими зеркалами, поэтому используются специальные зеркала, в которых на стеклянную подложку нанесены чередующиеся слои диэлектриков с сильно различающимися показателями преломления. Толщины слоев подобраны таким образом, чтобы все волны, отраженные от границ раздела слоев, на выходе складывались в фазе (усиливающая интерференция), тогда при количестве слоев $N \geq 10$ удастся достичь отражения 99,8 – 99,9%.

генерируемого излучения, а также направленность лазерного луча.

Другим источником потерь являются торцы трубки. Для уменьшения потерь в гелий-неоновом лазере на границе трубки выходные стеклянные окошки делают скошенными под углом Брюстера. Свет, линейно поляризованный в плоскости падения, не испытывает потерь на отражение, в отличие от света любой другой поляризации. Таким образом, окна Брюстера обеспечивают избирательное усиление света, поляризованного в плоскости падения. Поэтому гелий-неоновый лазер генерирует линейно поляризованный свет.

Типичная конструкция гелий-неонового лазера показана на рис. 5.3.

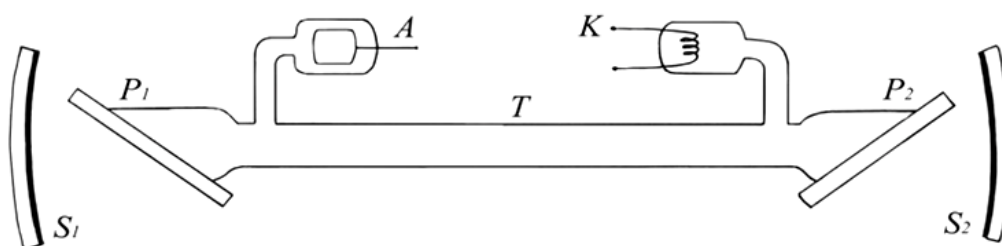


Рис. 5.3

Высоковольтный (1–1,5кВ) электрический разряд поддерживается в трубке T , помещенной между параллельными зеркалами S_1 и S_2 . Трубка герметично закрыта выходными окнами P_1 и P_2 из прозрачного для генерируемого излучения материала.

Оптический резонатор не только усиливает когерентное излучение, но и повышает его *степень монохроматичности*.

В самом деле, чтобы световые волны в резонаторе не гасили, а усиливали друг друга, должно выполняться условие усиливающей интерференции: волна, возвратившаяся в некоторую точку активной среды после отражения от зеркал, должна иметь в этой точке фазу, совпадающую с фазой первичной волны при любом числе отражений от зеркал. Это возможно только при определённой зависимости между длиной волны λ и длиной L активной среды, а именно: между зеркалами резонатора должно

укладываться целое число полуволин:

$$L = n \frac{\lambda}{2}, \text{ или } \lambda = \frac{2L}{n} \quad (n = 1, 2, \dots).$$

Условие резонанса выполняется для частот ν_n таких, что

$$\nu_n = \frac{c}{\lambda_n} = \frac{c}{2L} \cdot n \quad (n = 1, 2, \dots).$$

При интерференции многих когерентных волн интерференционные максимумы интенсивности получаются очень узкими, резкими. Расстояние $\Delta\nu$ между соседними резонансными частотами $\Delta\nu = \frac{c}{2L}$ намного меньше, чем естественная ширина спектральной линии, соответствующей лазерному переходу.

Естественная ширина спектральной линии атома неона определяет область частот, в которой может иметь место генерация света. Оптический резонатор вырезает из этой относительно широкой спектральной линии гораздо более узкие линии, соответствующие собственным частотам резонатора. Именно поэтому лазерное излучение отличается высокой степенью временной когерентности. Чем больше длина трубки L , тем уже линии генерации. Длина когерентности излучения гелий-неонового лазера может составлять от несколько метров до сотен метров.

Так как частоты линий генерации определяются собственными частотами оптического резонатора, стабильность частоты газового лазера определяется стабильностью резонатора, т.е. неподвижностью зеркал. Гелий-неоновый лазер обеспечивает очень высокую стабильность частоты генерации.

Условие резонанса может выполняться не только для осевого пучка, но и для ряда приосевых пучков, которые получили название *поперечных мод* резонатора.

Если усиление достаточно велико, то генерация может возникнуть на нескольких собственных частотах резонатора. Таким образом, лазер не

обязательно генерирует на одной частоте; чаще, наоборот, генерация происходит одновременно на нескольких частотах, которые получили название *продольных мод*. Спектр излучения лазера, как правило, представляет собой набор узких спектральных линий, интервалы между которыми одинаковы и равны $c/2L$.

Чтобы лазер работал на одной частоте (в *одномодовом* режиме), необходимо принимать специальные меры (например, увеличить потери, или изменить расстояние между зеркалами так, чтобы усиливалась только одна мода; для подавления генерации в ИК-диапазоне делают торцевые окна трубки из стекла, сильно поглощающего ИК-излучение). Такой режим работы лазера называется *одночастотным*. В этом случае реализуется максимальная монохроматичность излучения лазера.

Резонатор обеспечивает высокую направленность (малую расходимость) излучения. Длинная узкая лазерная трубка формирует узконаправленный лазерный луч. Однако волновая природа света не позволяет получить узкий параллельный пучок. Явление *дифракции* определяет минимальный угол расхождения пучка θ_{min} . Дифракционный угол расходимости пучка зависит от диаметра пучка D (диаметра выходного зеркала в оптическом резонаторе):

$$\theta_{min} \geq \frac{\lambda}{D}.$$

Гелий-неоновый лазер даёт расходимость в 1–2 угловые минуты. Он имеет малую выходную мощность: $P_{вых}=10 - 100$ мВт при потребляемой мощности $P=20 - 100$ Вт, т.е. его КПД невысок: $\eta=P_{вых}/P \sim 10^{-3}$.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Работу проводят при помощи монохроматора УМ-2, на рельсе которого установлен гелий-неоновый лазер ЛГН-207. Схема установки изображена на рисунке 5.4, общий вид установки – на рисунке 5.5.

Неоновая лампа *НЛ* используется как эталонный источник. Свет от

источника, сфокусированный линзой L на входную щель монохроматора, проходит через объектив $Об_1$ и превращается в параллельный пучок.

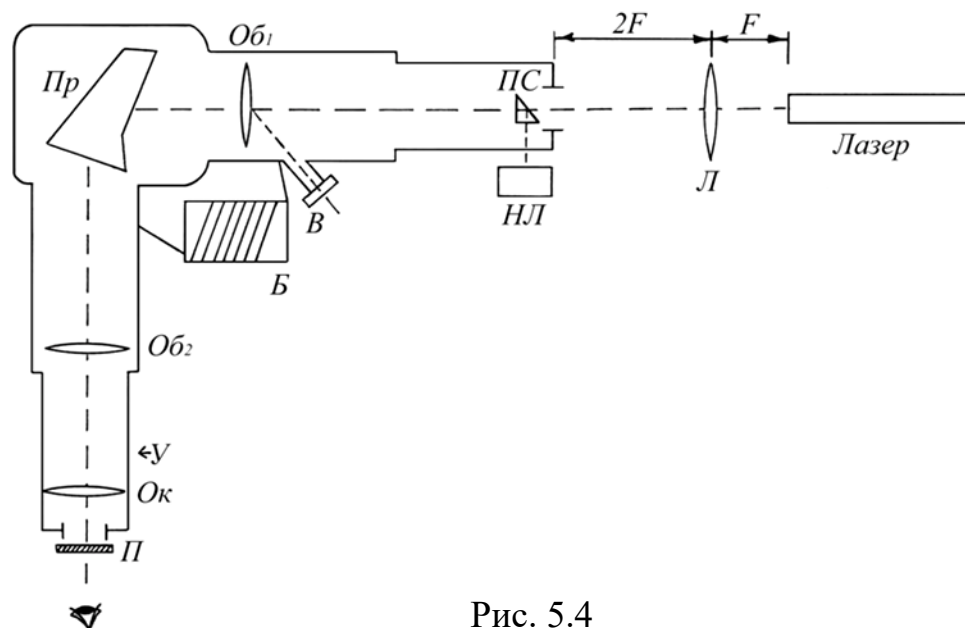


Рис. 5.4



Рис. 5.5

Далее свет разлагается призмой $Пр$ в спектр и фокусируется объективом $Об_2$ в плоскости указателя $У$. Картину наблюдают при помощи окуляра $Ок$, на который для защиты глаз надет поляроид $П$.

При работе с монохроматором сначала следует навести на резкость окуляр, добившись четкого изображения указателя. Затем вращают винт $В$, который перемещает объектив $Об_1$ с тем, чтобы добиться четкости изображения спектральной линии в плоскости указателя (для разных длин волн винт $В$ занимает различные положения). Ширина спектральных линий

устанавливается регулировочным винтом входной щели.

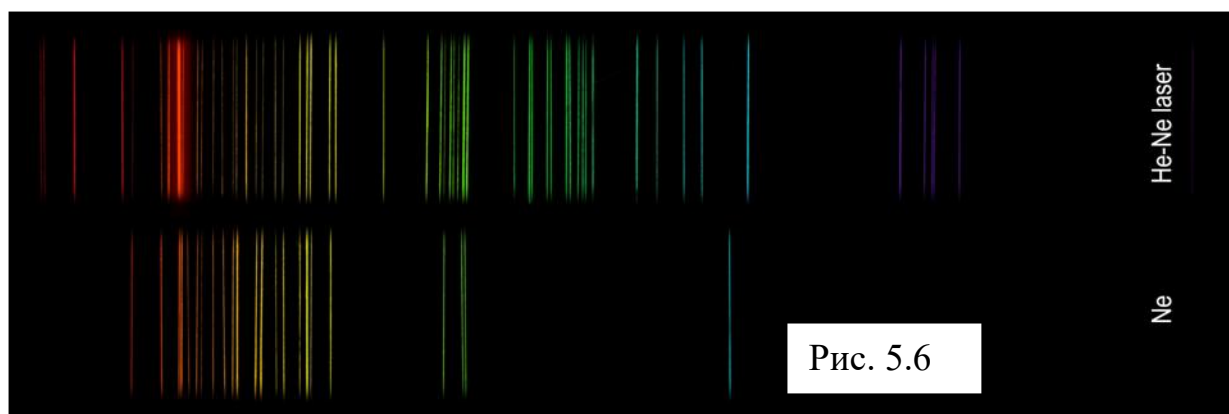
Длины волн спектральных линий определяются следующим образом.

С помощью барабана *Б* указатель совмещается с определенной линией спектра. Затем считываются показания с барабана и по калибровочной кривой, прилагаемой к монохроматору, определяется искомая длина волны. Призма сравнения *ПС* дает возможность одновременно наблюдать два спектра. На призму сравнения подается исследуемый свет лазера и свет от неоновой лампы.

ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Задание 1. Наблюдение спектра излучения гелий-неонового лазера и его исследование с помощью эталонных источников.

1. Включите лазер и в окуляр монохроматора наблюдайте спектр излучения (рис.5.6) гелий-неонового лазера. Найдите основную линию излучения лазера (линию генерации) в красной области спектра. Определите длину ее волны.
2. Включите неоновую лампу и получите спектр Ne в плоскости указателя (с помощью призмы сравнения ПС). Сравните спектр излучения эталонной Ne лампы со спектром излучения He-Ne лазера и убедитесь в том, что
 - линии излучения неона (Ne) присутствуют в спектре излучения He-Ne лазера;
 - линия генерации принадлежит спектру излучения неона;
 - остальные линии принадлежат гелию (He).



3. Найдите яркую желтую линию излучения Ne в спектре He-Ne лазера и измерьте ее длину волны. Кроме того, измерьте длины волн следующих линий:
 - а) всех ярких линий Ne слева от яркой желтой линии;
 - б) наиболее ярких красных линий Ne слева от линии генерации;
 - в) одиночной зеленой и двух близких зеленых линий Ne справа от яркой желтой линии.
4. Измерьте длины волн самых ярких линий Ne в желтой, желто-зеленой, голубой и фиолетовой частях спектра He-Ne лазера.
5. Найдите изученные линии Ne и He в Таблице спектральных линий. С помощью Таблицы спектральных линий уточните измеренные значения длин волн спектров гелия и неона. (Допускается расхождение на $10\text{--}20\text{\AA}$).
6. Данные, полученные при выполнении п. 1-5, занесите в таблицу.

Линии излучения в спектре лазера	цвет	$\lambda_{\text{эксперимент}}$, нм	$\lambda_{\text{табличная}}$, нм
Линия генерации			
Ne			
			
			
He			
			
			

Задание 2. Определение поляризации излучения лазера.

Вращая поляроид на окуляре монохроматора, убедитесь, что излучение лазера линейно поляризовано, а излучение неоновой лампы не поляризовано.

ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Каковы общие принципы работы оптических квантовых усилителей и оптических квантовых генераторов? Выполнение каких условий необходимо для усиления света и для возникновения генерации света?
2. Что такое спонтанное и вынужденное излучения? В чем их отличие?
3. Каковы физический смысл коэффициентов Эйнштейна и связь между ними?
4. Что такое инверсная заселенность? Каким образом осуществляется инверсная заселенность в лазере? Какова роль гелия в этом процессе?
5. На каких спектральных линиях осуществляется генерация в лазере? Являются ли условия генерации на каждой линии независимыми?
6. Как осуществляется «обратная» связь в гелий-неоновом лазере?
7. Какова роль резонатора в формировании геометрии выходного пучка и его спектрального состава?
8. Можно ли сказать, что излучение гелий-неонового лазера монохроматическое?
9. Чем определяется состояние поляризации лазерного луча?