

Ярославский государственный педагогический
университет им. К. Д. Ушинского

Лабораторная работа № 8
Определение коэффициента
усиления активной среды
He-Ne лазера
для студентов специальности "математика"

Ярославль
2005

Оглавление

1.	Краткая теория	3
1.1.	Индукцированное (вынужденное) излучение	4
1.2.	Усиление электромагнитного излучения активной средой.	6
1.3.	Принцип действия лазера	8
1.4.	Устройство гелий - неоновго лазера	8
1.5.	Излучение лазера	10
2.	Экспериментальная установка	11
3.	Метод измерения коэффициента усиления	12
4.	Порядок выполнения работы	13
5.	Контрольные вопросы	16
6.	Значения коэффициентов Стьюдента t	16

Лабораторная работа № 8

Определение коэффициента усиления активной среды He-Ne лазера

Цель работы: изучение принципа работы гелий-неонового лазера; определение коэффициента усиления его активного элемента; изучение формы основных мод оптического резонатора лазера; исследование поляризации его излучения.

Приборы и устройства: лазер ЛГН-105, лазер без резонатора, два германиевых фотоэлемента, цифровой амперметр, делительная пластинка, поляроид.

Литература:

1. Ландсберг Г.С. Оптика. М., 1976, стр. 769 - 811.
2. Королев Ф.А. Теоретическая оптика. М., 1966, стр. 439-452.
3. Страховский Г.М. Успенский А.В. Основы квантовой электроники. М., 1979, стр. 7-19, 103-109, 238-245.
4. Матвеев А.Н. Квантовая механика и строение атома. М., 1965.

1. Краткая теория

Настоящая лабораторная работа посвящена изучению и принципа действия и основных элементов конструкции широко используемого на практике гелий-неонового лазера.

Как и в случае работы любого генератора незатухающих колебаний для реализации оптического квантового генератора (ОКГ) первоначально необходимо найти возможность, которая позволила бы каким-либо способом осуществить режим усиления света. Затем, используя положительную обратную связь, можно осуществить автоколебательный режим, то есть получить генерацию света.

Впервые на такую возможность было указано в 1940 г. В.А. Фабрикантом, который предложил для усиления света использовать открытое в 1917 г. А.Эйнштейном явление **вынужденного излучения**.

1.1. Индуцированное (вынужденное) излучение

Для понимания сущности этого явления необходимо рассмотреть элементарные акты взаимодействия электромагнитного излучения с атомной системой. Предположим для простоты, что рассматриваемая нами квантовая система обладает лишь двумя энергетическими уровнями: верхним E_1 и нижним E_2 (рис. 1.1). Рассматривая вопрос об излучении энергии абсолютно черным телом, А.Эйнштейн установил, что квантовые переходы атомной системы связаны с тремя процессами: поглощением энергии системой (рис. 1.1а), спонтанным излучением (рис. 1.1б) и вынужденным излучением (рис. 1.1в). Суть процесса индуцированного (вынужденного) излучения заключается в следующем. Внешнее поле обуславливает не только поглощение энергии, но может вызвать и обратный процесс, а именно переход возбужденного атома в основное состояние с излучением кванта энергии. Этот процесс возможен только в средах, атомы которой имеют метастабильные уровни. Время жизни на этих уровнях велико по сравнению с обычным временем жизни возбужденных уровней ($\tau \sim 10^{-8} \text{ с}$). Причем процесс при равенстве частоты внешнего поля частоте перехода, будет происходить тем вероятнее, чем ближе фаза внешнего поля к фазе излучаемой энергии. Индуцированное излучение является монохроматическим (или близким к нему). При этом с увеличением интенсивности поля монохроматичность вынужденного излучения возрастает. Индуцированное излучение совпадает с вызвавшим его излучением не только по частоте, но и по фазе, т.е. оно является когерентным (точнее, обладает высокой степенью когерентности).

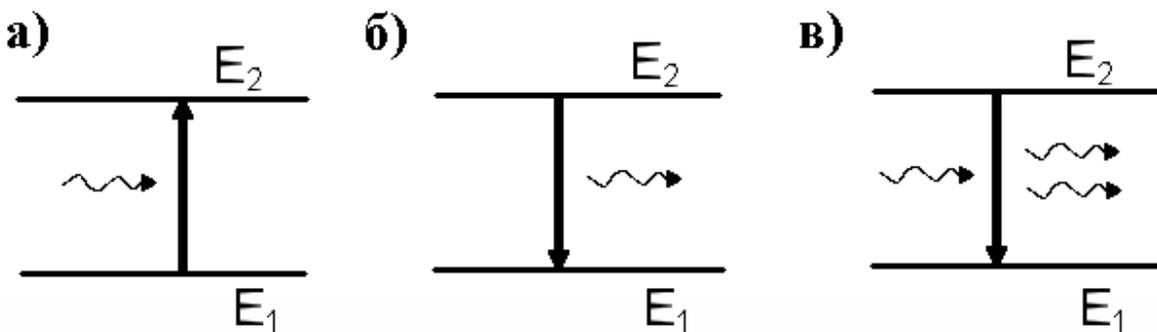


Рис. 1.1

А.Эйнштейн ввел понятие об индуцированном излучении при выводе формулы Планка для плотности излучения абсолютно черного тела. Для этого Эйнштейн ввел три коэффициента, характеризующих вероятность осуществления в единицу времени указанных выше процессов, а

именно: вероятность спонтанного перехода A_{21} , вероятность поглощения $B_{21}\rho(\nu)$ и вероятность вынужденного излучения $B_{12}\rho(\nu)$. Две последние величины связаны с наличием внешнего поля, на что указывает множитель $\rho(\nu)$, представляющий собой плотность энергии излучения на частоте ν в единичном интервале частот. Здесь $\nu = (E_2 - E_1)/h$ — частота перехода для рассматриваемой двухуровневой системы. Средние числа переходов в единицу времени соответственно равны $A_{21}N_2$, $B_{21}N_2\rho(\nu)$ и $B_{12}N_1\rho(\nu)$, где N_2 и N_1 — число частиц на верхнем и нижнем уровнях.

Учитывая условия равновесия теплового излучения, то есть условие равенства переходов $1 \rightarrow 2$ и $2 \rightarrow 1$ в единицу времени, можно записать:

$$B_{12}N_1\rho(\nu) = A_{21}N_2 + B_{21}N_2\rho(\nu)$$

или

$$\rho(\nu)(B_{12}N_1 - B_{21}N_2) = A_{21}N_2.$$

Принимая во внимание распределение частиц по уровням энергии по закону Больцмана:

$$N_2 = N_1 \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right),$$

находим

$$\rho(\nu) = \frac{\frac{A_{21}}{B_{21}}}{\frac{B_{12}}{B_{21}} \exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}.$$

Сравнивая это выражение с формулой Планка для плотности энергии черного излучения:

$$\rho(\nu) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1},$$

приходим к следующим соотношениям между коэффициентами Эйнштейна

$$B_{12} = B_{21}, \quad A_{21} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} B_{21}.$$

Причем коэффициент A_{21} есть величина обратная среднему времени жизни атома в возбужденном состоянии.

1.2. Усиление электромагнитного излучения активной средой. Создание инверсной заселенности.

Если световая волна проходит через вещество, она чаще всего частично поглощается веществом и ее интенсивность уменьшается. Но если волна проходит через вещество в атомах которого существуют инверсная заселенность метастабильных уровней (активное вещество) она усиливается.

Рассмотрим прохождение плоской монохроматической волны интенсивностью J_o через единичный объем исследуемого вещества сечением S . Первоначальная энергия волны была $W_o = J_o S$. После прохождения слоя $dx = c dt$ произойдет

$$dN_1 = B_{12} N_1 \rho(\nu) dt = \frac{1}{c} B_{12} N_1 \rho(\nu) dx$$

актов поглощения фотонов, что приведет к уменьшению энергии на величину

$$dW_1 = h\nu dN_1 = \frac{h\nu}{c} B_{12} N_1 \rho(\nu) dx.$$

Так как $dW_1 = S dJ_{1\nu}$, то заменяя $\rho(\nu) = \frac{J_{o\nu}}{c}$, получим уменьшение спектральной плотности интенсивности

$$dJ_{1\nu} = \frac{h\nu}{c^2 S} B_{12} N_1 J_{o\nu} dx.$$

Пренебрегая долей спонтанного излучения по сравнению с вынужденным (т.е. считая $A_{21} < B_{21} \rho(\nu)$), аналогично для индуцированного излучения получим увеличение спектральной плотности интенсивности.

$$dJ_{2\nu} = \frac{h\nu}{c^2 S} B_{21} N_2 J_{o\nu} dx$$

Так как $B_{21} = B_{12}$, получим общее изменение плотности излучения

$$dJ_\nu = dJ_{2\nu} - dJ_{1\nu} = \frac{h\nu}{c^2 S} B_{12} (N_2 - N_1) J_{o\nu} dx$$

или

$$dJ_\nu = \alpha(\nu) J_{o\nu} dx,$$

где

$$\alpha(\nu) = \frac{h\nu}{c^2 S} B_{12} (N_2 - N_1).$$

Интегрируя, получим:

$$J_\nu = J_{o\nu} \exp(\alpha(\nu)x).$$

Для монохроматической волны частоты ν_o

$$J = J_o \exp(\alpha(\nu_o)x).$$

Если $N_2 < N_1$, $\alpha(\nu) < 0$, получаем закон поглощения света Бугера:

$$J = J_o \exp(-|\alpha(\nu_o)|x).$$

Если $N_2 > N_1$, $\alpha(\nu) > 0$ — так называемое отрицательное поглощение. В этом случае среда усиливает свет. Для того, чтобы осуществить усиление света, необходимо создать инверсную населенность, т.е. такое состояние среды, при котором $N_2 > N_1$.

Двухуровневую систему невозможно использовать для практического создания инверсной заселенности, так как в ней можно добиться только состояния, когда $N_2 = N_1$ (т. е. такая система всегда будет равновесной).

Рассмотрим создание инверсной заселенности в трехуровневой системе, один из уровней которой является метастабильным ($\tau \sim 10^{-3} \text{ с}$) — этот метод был предложен Н.Г.Басовым, А.М.Прохоровым и Ч.Таунсом (рис.1.2). Сначала производится накачка системы: она облучается квантами, равными разности энергий на третьем и первом уровнях $h\nu_{31} = W_3 - W_1$. При поглощении этих квантов электроны в атомах системы переходят с первого уровня на третий, где время жизни $\tau_3 \sim 10^{-8} \text{ с}$, затем спонтанно переходят на второй уровень, который является метастабильным.

Тем самым создается инверсная заселенность: электронов на втором уровне больше, чем на первом. Теперь при попадании на систему кванта равного $h\nu_{21} = W_2 - W_1$, он вызовет индуцированный переход между вторым и первым уровнями и произойдет усиление падающего на систему излучения. Примерно таким образом происходит создание инверсной заселенности в рубиновом лазере, в котором активной средой является рубин с вкраплением атомов хрома. При этом накачка производится облучением рубинового стержня ксеноновой лампой.

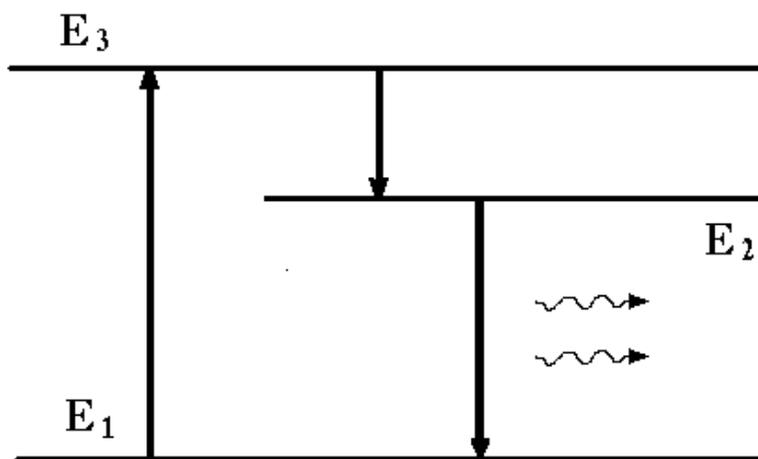


Рис. 1.2. Трехуровневая система

1.3. Принцип действия лазера

Для создания оптического квантового генератора (ОКГ) или лазера необходимо выполнение трех условий.

1. Наличие вещества, в атомах которого есть метастабильные уровни ($\tau > 10^{-8}$ с);
2. Создание инверсной заселенности метастабильных уровней — накачка. Эти два условия достаточны для работы квантового усилителя (ОКУ). Для работы любого генератора необходимо еще третье условие:
3. Создание положительной обратной связи.

Обратная связь в оптическом квантовом генераторе осуществляется при помощи открытого оптического резонатора, представляющего собой систему зеркал. В твердотельных лазерах это посеребренные торцы активного элемента. В газовом лазере трубка помещается между зеркалами. Это могут быть два плоско-параллельных зеркала (интерферометр Фабри-Перо). Для настройки (юстировки) лазера удобнее чтобы одно из зеркал было сферическим или использовать систему двух сферических конфокальных зеркал.

1.4. Устройство гелий - неоновый лазер

1. Активная среда. В гелий-неоновом лазере рабочим веществом (активной средой) является смесь гелия и неона. Схема энергетических уров-

ней этой смеси приведена на рис.1.3. Основным рабочим веществом являются атомы Ne , атомы которого содержат метастабильные уровни $2s$ и $3s$. Однако в чистом неоне созданию инверсной заселенности мешает метастабильный уровень $1s$. Эта трудность устраняется введением в Ne примеси He , у которого энергии двух возбужденных долгоживущих уровней 2^1s и 2^3s почти совпадают с уровнями $2s$ и $3s$ неона.

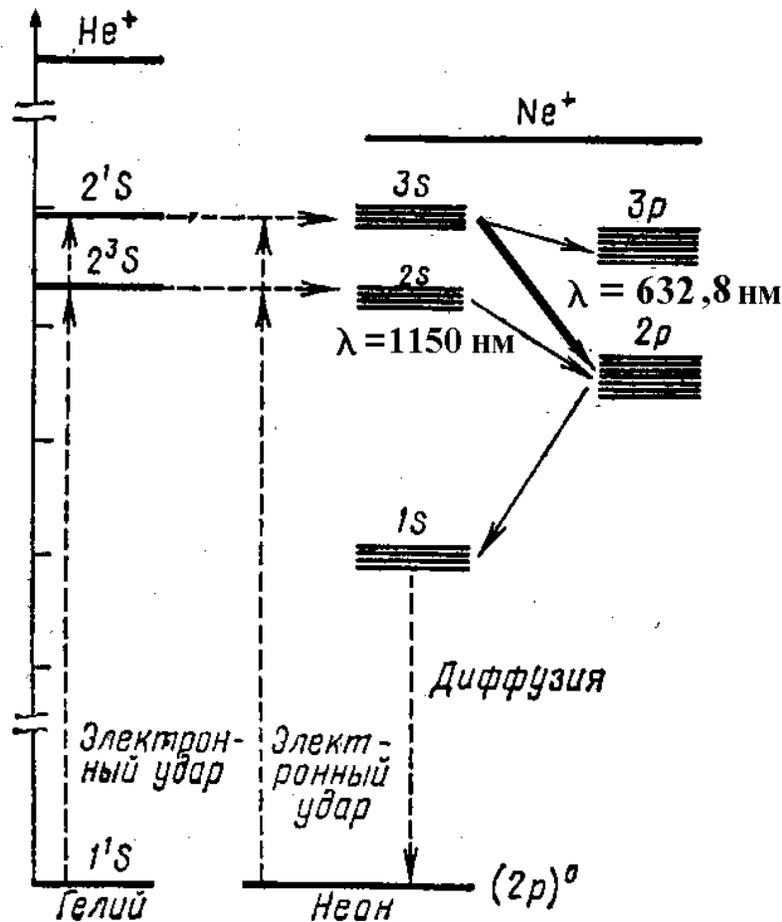


Рис. 1.3. Диаграмма энергетических уровней гелия и неона

2. Создание инверсной заселенности. Для возбуждения активной среды (накачки) используется высоковольтный выпрямитель с выходным напряжением в несколько тысяч вольт. Электрическое поле в газовой смеси создается с помощью специальных электродов. Между катодом и анодом на трубку накладывается напряжение в несколько кВ. Разрядный ток в ней равен нескольким миллиамперам. Атомы He возбуждаются в результате столкновений с электронами газоразрядной плазмы. Затем это возбуждение передается резонансным образом при неупругих соударениях от атомов He к атомам Ne , в результате чего атомы Ne оказываются в возбужденных состояниях $2s$ и $3s$.

3. Обратная связь. Оптическая обратная связь в *He – Ne* лазере осуществляется при помощи одного плоского и одного сферического или двух конфокальных сферических зеркал с большой отражательной способностью: заднее зеркало имеет коэффициент отражения 99,8%, переднее – 97-98%. Для увеличения коэффициента отражения зеркала резонатора делают с многослойным диэлектрическим покрытием (более десятка слоев сульфида цинка, фтористого магния или других веществ).

В оптическом, как и в любом другом резонаторе, условия стационарного состояния выполняются только для тех волн, для которых на оптическом пути внутри резонатора укладывается целое число полуволн. Указанное условие выполняется не только для осевого пучка, но и для ряда приосевых пучков, которые дают в плоскости перпендикулярной оси пучка, сложное распределение амплитуд, зависящее от направления распространения и соответственно от дифракционных потерь. Такие колебания получили название поперечных мод резонатора.

1.5. Излучение лазера

Когда заселенность метастабильных уровней (уровни $2s$ и $3s$ в *He – Ne* лазере) становится достаточной, возникает индуцированное когерентное излучение. С энергетической точки зрения это возникает тогда, когда энергия, накопившаяся в результате процесса усиления излучения активной средой при многократном повторении процесса за счет отражения от зеркал резонатора, становится больше энергии потерь.

Наиболее интенсивное излучение в видимой части спектра в *He – Ne* лазере дает переход $3s \rightarrow 2p$ с длиной волны 632,8 нм (красный луч лазера).

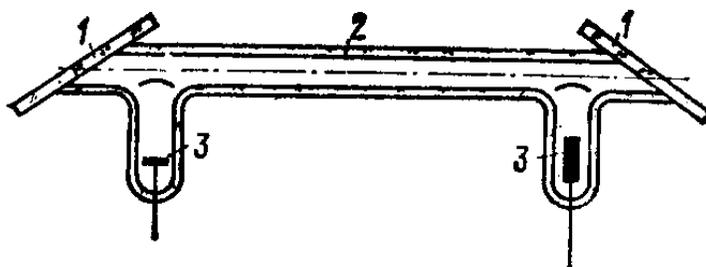


Рис. 1.4. Сечение газоразрядной трубки типичного газового лазера.

1 – сечение торцевых пластинок, наклоненных к оси трубки (оси резонатора лазера) под углом Брюстера;
2 – стенки трубок; 3 – электроды

Коэффициент усиления активного элемента гелий-неонового лазера

2. Экспериментальная установка

зависит от длины трубки, у разных его конструкций она может быть от 15 – 20 см до 1 – 2 м. От длины трубки зависит также расходимость лазерного луча. Реально получена расходимость 1-2 минуты.

Выходные окна трубки *He–Ne* лазера располагаются под углом Брюстера к оптической оси (рис. 1.4). Это, во-первых, увеличивает степень поляризации лазерного луча, а, во-вторых, уменьшает потери при отражении от выходных окошек трубки. (При угле Брюстера поляризованные в плоскости падения лучи полностью без отражения проходят через границу раздела двух сред.)

Кроме очень высокой степени направленности (малой расходимости) *He – Ne* лазер обладает и очень высокой стабильностью частоты. Область частот $\Delta\nu$, в которой может происходить генерация определяется шириной спектральной линии атомов *Ne*, из которой резонатор вырезает более узкие линии, соответствующие собственным частотам резонатора.

Таким образом лазерное излучение обладает высокой степенью когерентности, монохроматичности, поляризации, малой расходимостью и большой спектральной плотностью мощности.

2. Экспериментальная установка

Активной средой в данной установке является смесь гелия и неона, заключенная в стеклянную трубку и возбуждаемая электрическим полем. Практически, это лазер, лишенный резонатора, то есть превращенный в квантовый усилитель. На рисунке 2.1 он обозначен L_2 . Источником излучения служит лазер ЛГН-105 (на схеме – L_1).

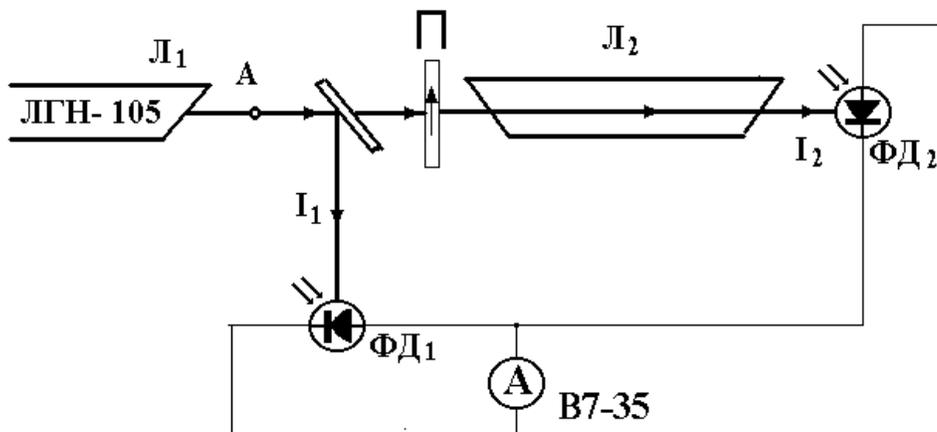


Рис. 2.1

Лазерный луч выходит из L_1 и попадает на делительную пластинку. Отраженный луч J_1 попадает на фотоприемник $\Phi Д_1$. Прошедший через делительную пластинку луч J_2 , попадает на поляроид. Так как луч лазера ЛГН-105 линейно поляризован, то вращением поляроида можно менять интенсивность луча J_2 . Пройдя через поляроид J_2 проходит внутри трубки с активной средой и попадает на фотоприемник $\Phi Д_2$, который помещен внутри корпуса квантового усилителя. Фотоэлемент $\Phi Д_1$, делительная пластинка и поляроид установлены в специальных зажимах и могут сниматься и перемещаться по установочному стержню.

3. Метод измерения коэффициента усиления

Коэффициент усиления активной среды показывает во сколько раз интенсивность электромагнитной волны I_2 , прошедшей через активный элемент больше, чем интенсивность падающей на него волны I_1 , т.е.

$$K = \frac{I_2}{I_1}.$$

Световая волна (луч лазера) на входе и на выходе активного элемента регистрируются в работе при помощи фотодиодов $\Phi Д_1$ и $\Phi Д_2$. Токи в фотодиодах $\Phi Д_1$ и $\Phi Д_2$ можно определить соответственно как $J_1 = S_1 I_1$ и $J_2 = S_2 I_2$, где S_1 и S_2 — коэффициенты светочувствительности фотодиодов. В нашей установке используются одинаковые диоды, поэтому $S_1 = S_2 = S$.

Заменяя интенсивности лучей на фототоки, можно записать

$$K = \frac{J_2}{J_1}.$$

При однократном прохождении световой волны через активный элемент небольшой длины она усиливается незначительно и поэтому J_2 очень немного отличается от J_1 , в то время как по абсолютной величине ток в каждом фотодиоде довольно велик (несколько миллиампер). Чтобы точнее определить разность токов $\Delta J = |J_2 - J_1|$ в данной установке применяется компенсационный метод измерения. Для этого фотодиоды подключаются встречно к цифровому микроамперметру (рис.2.1). Если схе-

4. Порядок выполнения работы

ма будет сбалансирована (ток $J_2 = J_1$) микроамперметр покажет ноль. При малом изменении одного из токов микроамперметр зафиксирует его.

При прохождении луча лазера через активную среду J_2 становится больше J_1 и следовательно

$$K = \frac{J_2}{J_1} > 1,$$

при этом $J_2 = J_1 + |J_2 - J_1|$, следовательно

$$K = \frac{J_1 + |J_2 - J_1|}{J_1},$$

или окончательно

$$K = 1 + \frac{\Delta J}{J_1}.$$

При определении коэффициента K таким образом следует учесть, что на величину ΔJ довольно сильно влияет ток, возникающий в фотодиоде $\Phi Д_2$ за счет засветки от светящейся трубки усилителя \mathcal{L}_2 . Этот ток следует измерить и учесть в формуле для вычисления коэффициента усиления.

Обозначим ток засветки J_o , тогда окончательно рабочая формула примет вид

$$K = 1 + \frac{\Delta J - J_o}{J_1}. \quad (3.1)$$

4. Порядок выполнения работы

ЗАДАНИЕ 1. Подготовка установки к работе.

1. Включить лазер ЛГН-105 тумблером "сеть" на блоке питания лазера. Установить ток разряда с помощью ручки на блоке питания лазера ЛГН-105 около 5 мА.

ЛАЗЕР НЕ ВЫКЛЮЧАЕТСЯ ДО КОНЦА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.

-
2. Собрать схему лабораторной установки (рис. 2.1).

УБЕДИТЬСЯ, ЧТО КВАНТОВЫЙ УСИЛИТЕЛЬ ОБЕСТОЧЕН, снять крышку с корпуса квантового усилителя закрепить фотодиод $\Phi Д_1$, делительную пластинку и поляризатор на установочном стержне.

При правильной юстировке оптической схемы часть луча лазера L_1 должна отражаться от светоделительной стеклянной пластинки и попадать на фотодиод $\Phi Д_1$, а вторая часть луча должна проходить через поляризатор, затем через разрядную трубку квантового усилителя L_2 и попадать на фотодиод $\Phi Д_2$.

Для сборки электрической схемы необходимо соединить клеммы от фотоприемника $\Phi Д_2$ к клеммам фотоприемника $\Phi Д_1$ так, чтобы "+" одного фотоэлемента был соединен с "+" другого. К клеммам фотоприемника $\Phi Д_1$ присоединить выводы от цифрового амперметра. По цифровому амперметру проверить возможность установки нуля на шкале амперметра при вращении поляризатора. (Допускается 1-2 в последнем знаке на шкале индикатора).

3. Блок квантового усилителя закрыть сверху металлической крышкой (при этом нельзя сбивать положение фотоприемника $\Phi Д_2$) и включить тумблер "сеть", расположенный на корпусе квантового усилителя. Далее включить тумблер "высокое" и нажать кнопку "поджиг". Выставить на усилителе ток разряда 22 мА вращением ручек "Грубо" и "Плавно" на корпусе квантового усилителя. Включение усилителя производится только тумблером "высокое".

ЗАДАНИЕ 2. Определение коэффициента усиления активной среды.

Задание рекомендуется выполнять следующим образом.

1. Вращая поляризатор, установите одинаковую интенсивность лучей, падающих на диоды $\Phi Д_1$ и $\Phi Д_2$. При равенстве интенсивностей микроамперметр покажет отсутствие тока. (Допускается 1-2 в последнем знаке на шкале индикатора).
2. При включении квантового усилителя заметим, что через гальванометр пошел ток ΔJ , так как на диод $\Phi Д_2$ стал падать луч I_2 большей интенсивности, чем падавший до включения квантового усилителя луч I_1 .

3. Для определения тока засветки J_o перекройте луч на выходе из лазера L_1 . Микроамперметр в этом случае покажет ток J_o , так как свет трубки работающего усилителя попадает только на диод $\Phi Д_2$.
4. Выключив квантовый усилитель L_2 , перекройте один из лучей лазера после делительной пластинки в любой точке, так чтобы луч лазера попадал только на один фотодиод. По микроамперметру определяют ток J_1 . Измерения следует произвести не менее 7 раз.
5. По полученным данным рассчитайте значение K_{cp} по формуле (3.1) и статистическую среднеквадратичную погрешность ΔK . Запишите окончательный результат в виде $K = K_{cp} + \Delta K$.
6. По полученному значению K_{cp} и среднеквадратичной погрешности ΔK вычислите коэффициент Стьюдента по формуле

$$t_{\alpha_n} = \frac{K_{cp} - 1}{\Delta K}. \quad (4.2)$$

По известному коэффициенту Стьюдента и числу опытов n при помощи таблиц распределения Стьюдента оценить надежность проведенного эксперимента α .

Полученное значение α можно интерпретировать как вероятность, с которой данный эксперимент подтверждает явление усиления излучения гелий-неоновой смесью, используемой в опыте.

ЗАДАНИЕ 3. Исследование поляризации лазерного луча.

Выключить квантовый усилитель из сети. Снять делительную пластинку с направляющего стержня. Фотоэлемент $\Phi Д_2$ отключить от клемм фотоэлемента $\Phi Д_1$. (Фотоэлемент $\Phi Д_1$ напрямую соединяется с микроамперметром). Фотоэлемент $\Phi Д_1$ повернуть так, чтобы луч лазера падал на входное матовое окно фотоэлемента под прямым углом. Перед фотоэлементом устанавливается поляроид. Поворачивая поляроид строят зависимость фототока, создаваемого излучением проходящим через поляроид от угла поворота поляроида $J = f(\varphi)$ в полярных осях координат. Зависимость рекомендуется снимать через 10-15 градусов. Графически сравните полученный результат с теоретической кривой $J = J_o \cos^2 \varphi$.

ЗАДАНИЕ 4. Изучение формы поперечных мод лазерного излучения.

Расширить лазерный луч линзой и пронаблюдать на экране картину получившихся поперечных мод. Картину зарисовать.

5. Контрольные вопросы

1. Что такое спонтанное и вынужденное излучение? В чем их отличие?
2. Что такое инверсная заселенность? Методы ее реализации.
3. Принципы работы лазера.
4. В чем отличие ОКГ и ОКУ?
5. Каким образом осуществляется инверсная заселенность в He-Ne лазере? Какова роль He в этом процессе?
6. Роль обратной связи и метод ее осуществления в ОКГ.
7. Свойства лазерного излучения.
8. Какие преимущества дает в данном эксперименте измерение коэффициента усиления компенсационным методом?
9. Чем определяется состояние поляризации лазерного луча?
10. Что показывает надежность, определенная по формуле (2)?

6. Значения коэффициентов Стьюдента t для различных значений надежности α и числа измерений n

$n \backslash \alpha$	0,5	0,6	0,683	0,8	0,9	0,95
5	0,74	0,94	1,14	1,53	2,13	2,77
6	0,73	0,92	1,11	1,48	2,02	2,57
7	0,72	0,91	1,09	1,44	1,94	2,45
8	0,71	0,90	1,08	1,42	1,90	2,36
9	0,71	0,89	1,07	1,40	1,86	2,31
10	0,70	0,88	1,06	1,38	1,83	2,26
11	0,70	0,88	1,05	1,37	1,81	2,23
12	0,70	0,88	1,05	1,36	1,80	2,20
13	0,69	0,87	1,04	1,36	1,78	2,18
14	0,69	0,87	1,04	1,35	1,77	2,16
15	0,69	0,87	1,04	1,35	1,76	2,14
∞	0,67	0,84	1,00	1,28	1,65	1,96

6. Значения коэффициентов Стьюдента t

$n \backslash \alpha$	0,98	0,99	0,995	0,997	0,998	0,999
5	3,75	4,60	5,60	6,49	7,17	8,61
6	3,36	4,03	4,77	5,40	5,89	6,86
7	3,14	3,71	4,32	4,82	5,21	5,96
8	3,00	3,50	4,03	4,46	4,79	5,40
9	2,90	3,36	3,83	4,21	4,50	5,04
10	2,82	3,25	3,69	4,03	4,30	4,78
11	2,76	3,17	3,58	3,90	4,14	4,59
12	2,72	3,11	3,50	3,79	4,02	4,49
13	2,68	3,06	3,43	3,71	3,93	4,32
14	2,65	3,01	3,37	3,65	3,85	4,22
15	2,62	2,98	3,33	3,59	3,79	4,14
∞	2,33	2,58	2,81	3,00	3,09	3,29