



Московский государственный университет
им. М.В.Ломоносова

Физический факультет

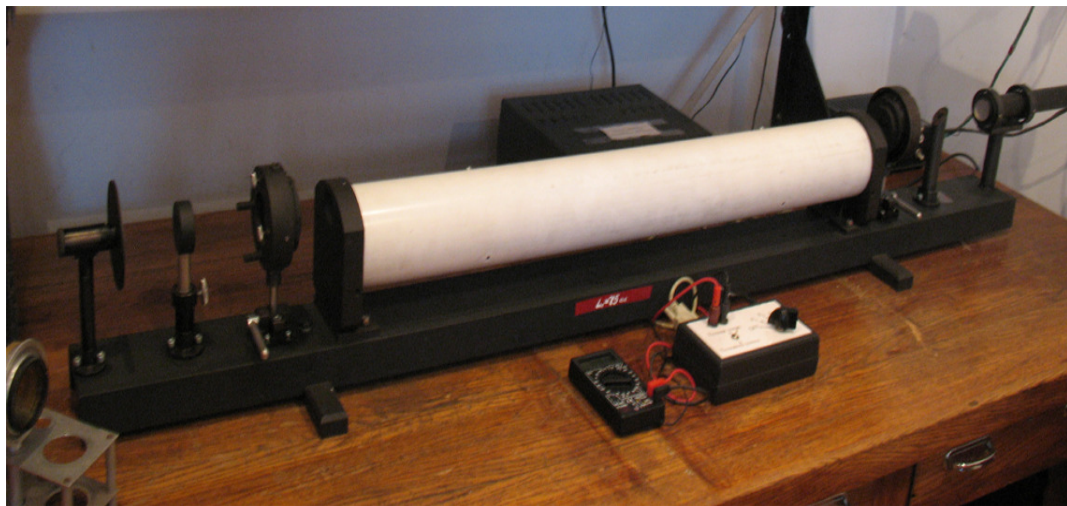
Кафедра общей физики

**Лабораторный практикум по общей физике
(оптика)**

И.В. Митин, В.В. Попов, А.М. Салецкий, Д.Э. Харабадзе

Лабораторная работа № 401А

ИЗУЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА СВЕТА - ЛАЗЕРА



МОСКВА -2012

Цель работы

Ознакомление с работой оптического квантового усилителя и лазера.

Идея эксперимента

Используется активный элемент (трубка He-Ne лазера), для которого измеряется коэффициент усиления путем сравнения двух величин: интенсивности входящего и прошедшего через этот элемент излучения дополнительного He-Ne лазера. За счет установки двух диэлектрических зеркал и дополнительной их настройки на основе трубки со смесью He и Ne реализуется генератор когерентного излучения (лазер). Исследуются спектральный состав (поперечные моды) и поляризация излучения данного лазера.

Теория

Слово «лазер» является аббревиатурой от английского *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, т.е. усиление света посредством вынужденного испускания излучения. Работа лазера основана на трех фундаментальных идеях, родившихся в различное время и в различных областях физики. Первая из них связана с использованием вынужденного испускания света атомами, предсказанного Эйнштейном при анализе формулы Планка для излучения.

Известно, что все вещества представляют собой атомные системы, которые можно характеризовать квантовыми состояниями (уровнями) с дискретными значениями энергии. Состояние атома, соответствующее наименьшей энергии, называется основным, а все остальные – возбужденными. В основном состоянии электрон находится ближе всего к ядру и притяжение между ними максимально. Соответственно, и энергия этого состояния максимальна и равна работе, необходимой для удаления электрона от ядра на бесконечное расстояние. Атом при этом превращается в ион, поэтому эта энергия называется энергией (потенциалом) ионизации и имеет отрицательный знак. Номер энергетического уровня обозначается главным квантовым числом. Чем больше номер уровня, тем ближе атом к состоянию ионизации и тем меньше расстояние между соседними уровнями. Возбужденные состояния атома нестабильны. С течением времени атом по тем или иным причинам переходит в основное состояние с минимумом потенциальной энергии. Возможны также переходы с одного энергетического уровня на другой. Вынужденным, или индуцированным, называется излучение фотонов, при котором атомы (или молекулы) под действием света переходят из возбужденного состояния в невозбужденное.

Вторая идея, лежащая в основе работы лазера, заключается в использовании термодинамически неравновесных систем, в которых возможно усиление, а не поглощение света. В обычных условиях при термодинамическом равновесии населенность атомных уровней подчиняется закону Больцмана, согласно которому на более высоком уровне при любой температуре находится меньше атомов, чем на низком. Для того, чтобы

излучение усиливалось, в среде должно иметь место обратное неравенство (инверсная населенность).

И наконец, третья идея принципа работы лазера – использование положительной обратной связи для превращения усиливающей системы в генератор когерентного излучения. Для ее реализации активную среду помещают в оптический резонатор, который обычно состоит из двух плоских или сферических зеркал. При использовании резонатора часть генерируемого излучения остается внутри рабочего вещества и вызывает вынужденное испускание все новыми и новыми возбужденными атомами.

Теперь перейдем к более подробному рассмотрению процессов взаимодействия излучения с веществом и усиления света, а также оптических резонаторов. Рассмотрим вначале элементарные процессы взаимодействия излучения с веществом. Для простоты будем полагать, что излучение взаимодействует с атомами, которые имеют всего два уровня энергии – E_1 и E_2 .

Поглощение света. В этом случае поглощается фотон с энергией $h\nu_{12}$, а атом совершает квантовый переход $E_1 \rightarrow E_2$ (рис.1, а). Вероятность данного процесса, отнесенная к единице времени равна

$$W_{12} = B_{12}u_\nu, \quad (1)$$

где B_{12} – второй коэффициент Эйнштейна или коэффициент Эйнштейна для поглощения, u_ν – спектральная плотность поглощаемого излучения.

Спектральная плотность поглощаемой мощности равна

$$P_{12}^{\text{погл}} = B_{12}u_\nu N_1 h\nu, \quad (2)$$

где N_1 – число атомов на уровне с энергией E_1 .

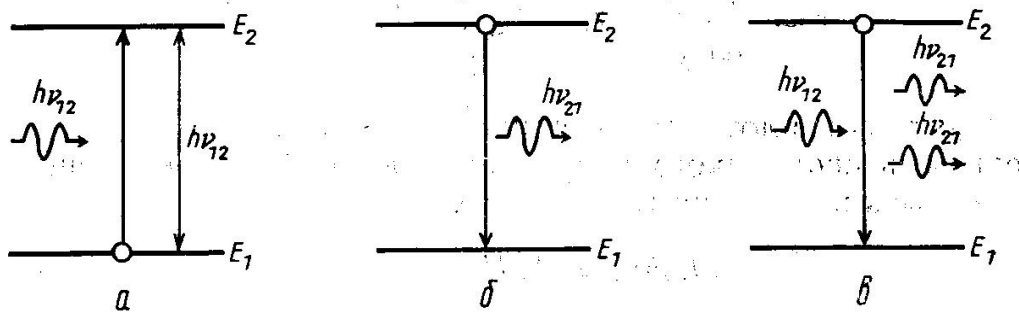


Рис. 1. Возможные переходы в двухуровневой системе.

Спонтанное излучение. Этот вид излучения происходит при самопроизвольном переходе с более высокого уровня E_2 на более низкий E_1 (рис.1, б). Направление, фаза и поляризация вылетающего при спонтанном излучении кванта имеют случайные значения, но энергия и, соответственно, длина волны определены разницей энергий соответствующего перехода. Обозначим отнесенную к единице времени вероятность рассматриваемого процесса через A_{21} . Эта величина является постоянной и относится к конкретному квантовому переходу. Ее принято называть первым

коэффициентом Эйнштейна. Для системы, пребывающей в первом возбужденном состоянии E_2 , где находится N_2 невзаимодействующих атомов, спектральная плотность мощности спонтанного испускания может быть вычислена по формуле

$$P_{21}^{sp} = A_{21} N_2 h \nu_{21}. \quad (3)$$

Вынужденное (индуцированное) излучение. В этом случае испускание фотона вызывается уже существующим полем излучения, причем, подобно спонтанному излучению атом переходит из состояния E_2 в состояние E_1 (рис.1, в). Вероятность такого перехода в единицу времени пропорциональна плотности энергии внешнего электромагнитного поля u_ν на частоте перехода ν_{21} и некоторому коэффициенту B_{21} , характеризующему вероятность излучения атома

$$W_{21}^B = B_{21} u_\nu. \quad (4)$$

Коэффициент пропорциональности B_{21} называется коэффициентом Эйнштейна для вынужденного излучения, он зависит только от свойств атомной системы. При этом, спектральная мощность вынужденного испускания равна

$$P_{21}^B = B_{21} u_\nu N_2 h \nu_{21}. \quad (5)$$

Свойства индуцированных переходов.

1. Вероятность индуцированных переходов отличается от нуля только для случая, когда энергия кванта внешнего светового поля $h\nu$ совпадает с разностью энергий двух рассматриваемых состояний системы.
2. Кванты электромагнитного поля излучения при таких переходах тождественны квантам поля, вызывающего эти переходы.
3. Вероятность индуцированных переходов в единицу времени пропорциональна плотности энергии внешнего поля в единичном спектральном интервале.

Соотношение между вероятностями переходов при тепловом равновесии. Вероятностные коэффициенты Эйнштейна A_{21} , B_{21} , B_{12} не являются независимыми. Соотношение между ними можно найти из рассмотрения случая, когда атомная система будет находиться в термодинамическом равновесии с внешним электромагнитным полем. В этом случае любой процесс, протекающий в такой системе, компенсируется обратным процессом, т.е. соблюдается принцип детального равновесия.

При тепловом равновесии при температуре T распределение частиц по уровням подчиняется распределению Больцмана:

$$\frac{N_2}{g_2} = \frac{N_1}{g_1} \exp \left[-\frac{E_2 - E_1}{kT} \right], \quad (6)$$

где k – постоянная Больцмана, g_1 и g_2 – степени вырождения уровней 1 и 2.

Как видно из этой формулы, в термодинамическом равновесии всегда $N_1 < N_2$, т.е. частиц на нижнем уровне всегда больше.

Запишем условие детального равновесия. В данном случае число атомов, переходящих в единицу времени из состояния 2 в состояние 1, должно быть равно числу переходов в обратном направлении, т.е.

$$N_2(A_{21} + B_{21}u_\nu) = N_1B_{12}u_\nu. \quad (7)$$

Решая (6) и (7) относительно u_ν получаем:

$$u_\nu = \frac{A_{21}}{B_{21}} \left[\frac{g_1 B_{12}}{g_2 B_{21}} \exp\left(\frac{E_2 - E_1}{kT}\right) - 1 \right]^{-1}. \quad (8)$$

Согласно постулатам Эйнштейна спектральная плотность равновесного излучения u_ν определяется формулой Планка:

$$u_\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}. \quad (9)$$

Совместное решение уравнений (8) и (9) позволяет получить соотношения, связывающие коэффициенты A_{21} , B_{21} и B_{12} . Так, при $T \rightarrow \infty$ величина $u_\nu \rightarrow \infty$, а $\exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right) \rightarrow 1$. Тогда, сравнивая асимптотики формул (8) и (9), получаем:

$$g_1 B_{12} = g_2 B_{21}. \quad (10)$$

В случае невырожденных уровней $g_1 = g_2 = 1$, $B_{12} = B_{21}$. Коэффициенты B_{21} и B_{12} определяются только свойствами атомов и не зависят от внешних условий. Поэтому равенство $B_{12} = B_{21}$, полученное для предельного случая $T \rightarrow \infty$ справедливо всегда, в том числе и в отсутствие теплового равновесия.

Сравнение формул (8) и (9) с учетом $B_{12} = B_{21}$ дает следующее соотношение:

$$A_{21} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot B_{21}. \quad (11)$$

Коэффициент A_{21} имеет смысл величины, обратной среднему времени жизни возбужденного состояния атома.

Следует отметить, что при исследовании процессов поглощения света измеряется приведенная спектральная плотность поглощаемой мощности $P_{12}^{\text{прив}}$, определяемая разностью двух вынужденных процессов

$$P_{12}^{\text{прив}} = B_{12}u_\nu h\nu_{12} (N_1 - N_2). \quad (12)$$

Инверсная населенность. В среде с двумя уровнями энергии E_1 и E_2 , между которыми возможен индуцированный переход существуют атомы имеющие энергии как E_1 , так и E_2 . Поэтому фотон с частотой $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$, сталкиваясь с атомами на уровне E_2 будет порождать новый фотон, а, сталкиваясь с атомом на уровне E_1 – будет поглощаться. Следовательно поток фотонов, проходящий через среду будет усиливаться или ослабляться, в зависимости от того на каком из уровней E_2 или E_1 будет находиться больше атомов.

Из распределения Больцмана (6) видно, что в условиях теплового равновесия $N_1 > N_2$ (при отсутствии вырождения уровней). Поэтому из (12) следует, что в условиях термодинамического равновесия $P_{12}^{\text{прив}}$ всегда является положительной величиной и в этих условиях энергия излучения, падающего на вещество, только поглощается.

Если было бы возможно нарушить термодинамическое равновесие и сделать так, что $N_1 < N_2$, то $P_{12}^{\text{прив}}$ в (12) превратилась бы в отрицательную величину. Физически это означало бы, что мощность излучения, выходящая из вещества, больше, чем подводимая к веществу. В этом случае происходило бы усиление света, проходящего через вещество, которое в состоянии $N_1 < N_2$ принято называть активным.

Таким образом, главная задача при создании лазера – обеспечить такие условия, когда термодинамическое равновесие нарушается и частиц с энергией E_2 становится больше, чем с энергией E_1 . Такое состояние среды называется «инверсной населенностью», а процесс ее создания – «накачкой».

Усиление света в инверсной среде. Предположим, нам удалось каким-то способом создать среду с инверсной населенностью. Рассмотрим, что произойдет, если направить в нее поток квантов с энергией $h\nu = E_2 - E_1$.

Часть квантов будет поглощаться атомами, находящимися на уровне E_1 , переводя их в возбужденное состояние. Другая часть может пройти без всякого взаимодействия со средой, не изменяя ее и свое состояние. Наконец, оставшиеся кванты провзаимодействуют с атомами, находящимися в возбужденном состоянии, переводя их на уровень E_1 с и вынуждая излучить тождественный себе квант (рис.2).

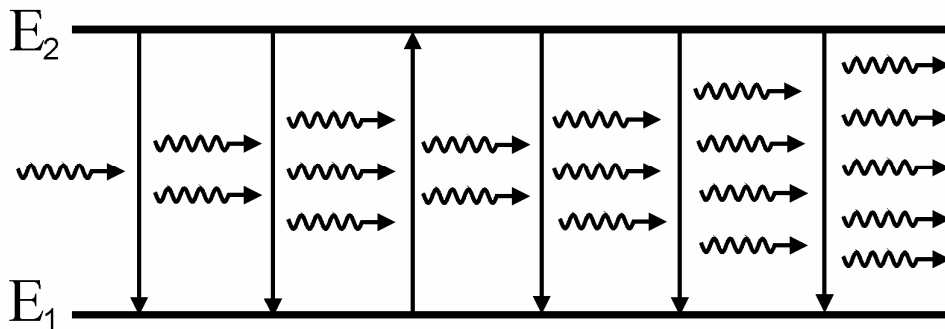


Рис. 2. Усиление излучения средой с инверсной населенностью.

Учитывая, что вероятности вынужденного перехода сверху вниз W_{21} и снизу вверх W_{12} одинаковы, а количество атомов на верхнем уровне выше, чем на нижнем, очевидно, что по мере прохождения количество квантов будет увеличиваться. Это приведет к усилению излучения, которое будет монохроматичным (так как все кванты имеют одну и ту же частоту

$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$) и когерентным (т.е. будут иметь одинаковую фазу). Это и есть то самое «усиление света посредством вынужденного испускания излучения», и это определяет специфику лазерного излучения – монохроматичность и когерентность.

Создание инверсной населенности в He-Ne лазере. На настоящий момент существует множество типов лазеров, которые мы не будем перечислять. Отметим только, что существует два главных параметра, определяющих тип лазера – это активная среда и способ накачки.

Накачка. Чтобы создать среду, где $N_2 > N_1$ и $\alpha(\nu) > 0$, необходимо иметь внешний источник энергии, обеспечивающий так называемую "накачку", который с заданной скоростью переводил бы атомы среды на верхний уровень. При этом величина создаваемой инверсии будет тем больше, чем больше мощность накачки. Для создания инверсной населенности в различных активных средах используются различные способы осуществления накачки. Наиболее распространены оптическая и электрическая накачки.

Оптическая накачка осуществляется путем облучения активного элемента лазера мощным импульсным либо непрерывным излучением специальных ламп накачки, либо излучением другого лазера. Она применяется в основном в твердотельных (рубиновые, активированные стеклянные и на основе различных синтетических кристаллов) и жидкостных лазерах.

Электрические виды накачки применяются в основном для накачки газовых и полупроводниковых активных сред. В частности, используемые в настоящей работе гелий - неоновые активные среды накачиваются с помощью электрического тлеющего разряда постоянного тока

Рассмотрим подробнее принцип создания инверсной населенности в He-Ne лазере.

Гелий-неоновый лазер, как и многие другие газовые лазеры, работает по так называемой «трехуровневой схеме».

Сущность такой схемы следующая: имеются три энергетических уровня: (см. рис.3) .

Рабочими уровнями являются первый (E_1) и второй (E_2), между которыми возможен индуцированный переход, а между первым (E_1) и основным (E_0) – безызлучательный релаксационный переход, энергия которого переходит в

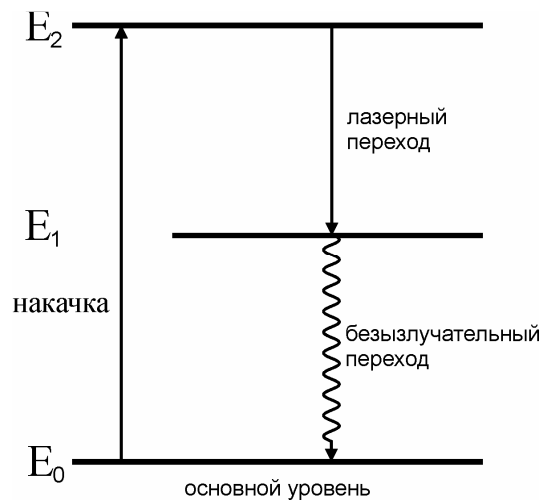


Рис.3. Трехуровневая схема лазерной генерации.

тепловую. В процессе излучения атомы с уровня E_2 будут переходить на уровень E_1 до тех пор, пока их населенности не сравняются, и тогда процесс усиления прекратится. Чтобы этого не произошло, уровень E_1 должен постоянно опустошаться, причем скорость опустошения должна быть не меньше, чем скорость его заселения за счет излучательных переходов. Это условие является кардинальным для возникновения и поддержания лазерного излучения.

Теперь перейдем к рассмотрению особенностей создания инверсной населенности в гелий-неоновом лазере (рис.4).

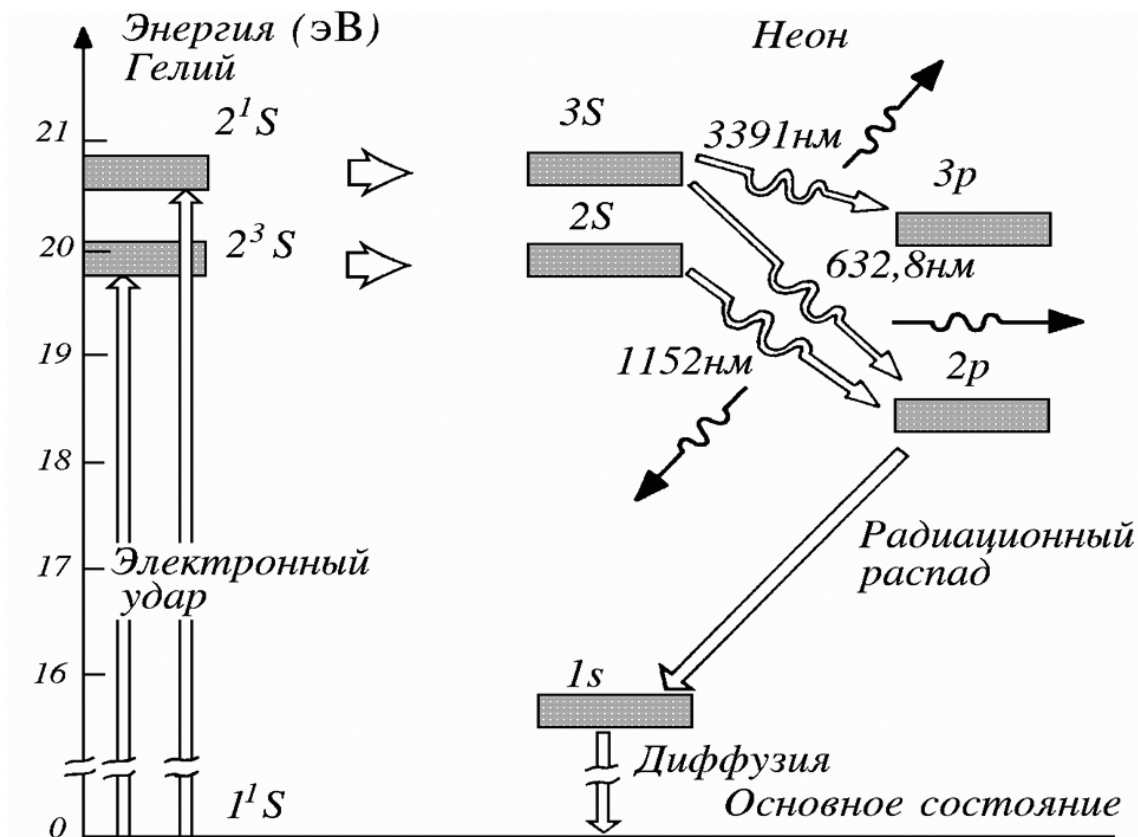


Рис.4. Схема энергетических уровней гелия и неона.

Рабочим веществом лазера является неон. В изучаемом в данной задаче гелий-неоновом лазере генерация осуществляется на переходе $3S \rightarrow 2P$ ($\lambda = 632,8$ нм), $3S \rightarrow 3P$ ($\lambda = 3391$ нм) и $2S \rightarrow 2P$ ($\lambda = 1152$ нм) атомов Ne. Для создания инверсной заселенности уровней этого перехода необходимо, с одной стороны, обеспечить эффективное заселение верхнего уровней $3S$ или $2S$, а с другой – быстрое опустошение нижнего уровней $2P$ или $3P$.

Для выполнения этой задачи используются атомы гелия, которые за счет электронного удара переходят на возбужденные уровни 2^1S и 2^3S , являющиеся метастабильными, с большим временем жизни ($\tau \sim 10^{-3}$ с). Так как энергия этих уровней гелия весьма близка к энергии возбужденных уровней неона $3S$ и $2S$, то при столкновениях происходит эффективный

обмен энергией, что и обеспечивает большую скорость заселения верхних уровней неона (рис.4). Если не принять меры к селекции (что достигается введением дополнительных потерь либо подбором коэффициента отражения зеркал, либо за счет изготовления окошек трубки из стекла с большим поглощением для инфракрасной области спектра. то в спектре будут присутствовать три линии. Первоначально генерация в He-Ne лазере была получена на линии 1,15 мкм и только потом в видимом диапазоне на линии 632,8 нм.

Опустошение нижнего уровня неона 2P происходит в основном за счет спонтанных переходов на уровень 1S, а в опустошении последнего большую роль играют столкновения атомов неона со стенками трубки. Это обстоятельство является критерием выбора диаметра трубки активного элемента.

Коэффициент усиления среды. Пусть световой поток распространяется в активной среде в направлении оси x (рис. 5). Рассмотрим слой вещества толщиной dx . На его поверхность падает световой поток интенсивности I_v . Величина I_v связана со спектральной плотностью энергии равенством

$$I_v = cu_v, \quad (13)$$

где c - скорость света в среде. Вследствие усиления веществом световой поток, достигающий правой границы слоя, будет иметь интенсивность $I_v + dI_v$.

На основании закона сохранения энергии изменение спектральной плотности излучения в слое dx будет равно мощности P_{0v} , выделяемой в единице объема при вынужденных переходах, т.е.

$$P_{0v} = \frac{du_v}{dx} = \frac{1}{c} \frac{dI_v}{dx}. \quad (14)$$

Коэффициент усиления среды $K^{yc}(\nu)$ может быть получен из соотношения

$$dI_v = K^{yc}(\nu) I_v dx. \quad (15)$$

Учитывая, что P_{0v} будет определяться разностью двух вынужденных процессов (5) и (2), получаем

$$K^{yc}(\nu) = \frac{B_{21} h \nu_{21}}{c} (N_2 - N_1). \quad (16)$$

Величина

$$\Delta N = N_2 - N_1 \quad (17)$$

называется инверсной населенностью.

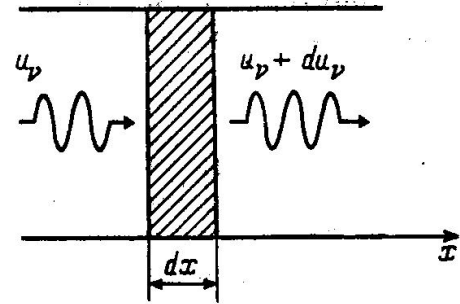


Рис.5. Изменение интенсивности плоской электромагнитной волны при ее прохождении через слой вещества толщиной dx .

Таким образом, характер взаимодействия излучения с реальной средой будет результатом суммирования усиления и поглощения:

$$dI_v = \frac{B_{21}h\nu_{21}}{c}(N_2 - N_1)I_v dx. \quad (18)$$

В активной среде при $N_2 > N_1$ интенсивность излучения будет экспоненциально возрастать, стремясь к бесконечности для большой длины пути.

В реальности, однако, этого не происходит. Необходимым условием усиления излучения является наличие инверсной населенности. Но что происходит с ней по мере увеличения интенсивности излучения? В стационарном случае, когда время рассмотрения свойств среды значительно больше времени переходных и релаксационных процессов, инверсия населенности уровней определяется кинетическим балансом между верхним и нижним уровнями. Верхний уровень заселяется за счет накачки и вынужденного поглощения и расселяется за счет вынужденного излучения. Нижний уровень заселяется, в основном, за счет вынужденных переходов с верхнего уровня и расселяется за счет релаксационных переходов.

При малых уровнях входного излучения скорость накачки превышает скорость расселения верхнего уровня за счет вынужденных переходов, а скорость релаксации нижнего превышает скорость его заселения. Таким образом, поддерживается максимально возможная инверсная населенность, позволяющая значительно усилить входное излучение.

При большой интенсивности излучения верхний уровень опустошается тем быстрее, чем выше интенсивность излучения. В то же время скорость накачки постоянна – она ограничена конструкцией лазера и свойствами среды, поэтому населенность верхнего уровня уменьшается, в сравнении со случаем слабого излучения. Скорость релаксации нижнего уровня также ограничена свойствами среды и конструкцией лазера, в то время, как скорость заселения его увеличивается за счет вынужденных переходов с верхнего уровня.

При определенной интенсивности излучения населенности верхнего и нижнего уровня сравниваются, инверсия пропадает, и среда перестает быть усиливающей. В соответствии с вышеприведенными рассуждениями можно заключить, что, в зависимости от расстояния, пройденного излучением в активной среде, его интенсивность увеличивается вначале экспоненциально, затем скорость роста

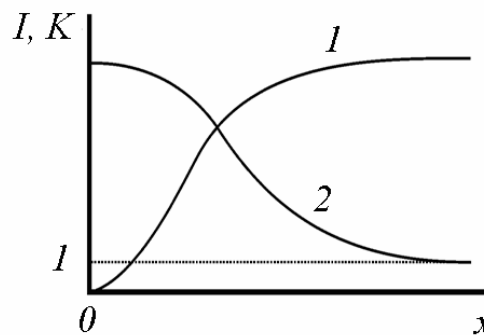


Рис. 6. Зависимость интенсивности световой волны (1) и коэффициента усиления (2) от расстояния x .

интенсивности уменьшается, она достигает максимального значения, а коэффициент усиления прибора падает от максимального до единицы (рис.6).

Следует отметить, что усиленное излучение будет обладать той же направленностью, фазой и поляризацией, что и падающее.

Генерация излучения, резонатор. Назначение резонатора лазера состоит в том, чтобы, многократно пропуская в прямом и обратном направлениях через активную среду возникающее в ней излучение, достичь того уровня, когда усиление за счет индуцированного излучения превышает потери. Если внутри резонатора нет усиливающей среды, то его называют пассивным. При введении такой среды резонатор становится активным. Для получения генерации излучения используется так называемый открытый резонатор. Идея открытого резонатора была предложена А.М. Прохоровым в 1958 г. Заключается она в том, что в активную среду помещаются друг напротив друга два плоскопараллельных зеркала (или наоборот, активную среду помещают между зеркалами). При точной юстировке фотон, испущенный вдоль оптической оси резонатора, будет летать внутри него бесконечно долго, отражаясь то от одного, то от другого зеркала и усиливая интенсивность поля за счет вынужденного испускания излучения встретившихся на пути возбужденных атомов. Но необходимым условием усиления излучения является синфазность. Предположим, что фотон, испущенный из точки 0 центра резонатора длиной L , отразился от правого зеркала, затем от левого и вернулся в точку 0. Для того, чтобы фаза излучения осталась той же, необходимо, чтобы пройденное расстояние $2L$

равнялось целому числу длин волн, т.е. $2L = q\lambda$ или $\lambda = \frac{2L}{q}$. Это означает, что для данного резонатора длиной L возможна генерация только для дискретного набора длин волн, удовлетворяющих требованию $\nu_g = q \frac{c}{2L}$, в то время, как резонансная частота перехода также составляет дискретное значение $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$. То есть, теоретически, резонатор должен иметь длину,

равную величине $L = \frac{q \cdot c \cdot h}{2(E_2 - E_1)}$ с точностью до долей длины волны при

общей длине порядка 1 м, что технически весьма затруднительно. К счастью, за счет столкновений атомов и эффекта Доплера величина ν имеет некоторый разброс – ширину линии, и в эту ширину заведомо попадают несколько собственных частот ν_q резонатора. Поэтому для нескольких ν_q выполняются условия синфазности после двух отражений от зеркал и генерация излучения, если не принимать специальных усилий, всегда идет на нескольких частотах, которые называются *продольными модами** резонатора.

* Модами называют стационарные типы колебаний электромагнитного поля в резонаторе.

Рассмотрим теперь *поперечные моды*. В процессе усиления излучения от спонтанных шумов до стационарного уровня остаются только моды, имеющие минимальные потери на дифракцию. При этом интенсивность на краях зеркал стремится к нулю. Если же какая-либо мода содержит две волны, распространяющиеся под малыми углами $\pm\theta$ к оси резонатора (рис.7), то при сложении этих волн на зеркале создается интерференционная картина с периодом $\frac{\lambda}{2}\theta$. Для того, чтобы интенсивность света обратилась в нуль, необходимо, чтобы на ширине зеркала a укладывалось целое число периодов, т.е. $\theta = \pm n \frac{\lambda}{2} a$, Аналогичное условие должно выполняться и по

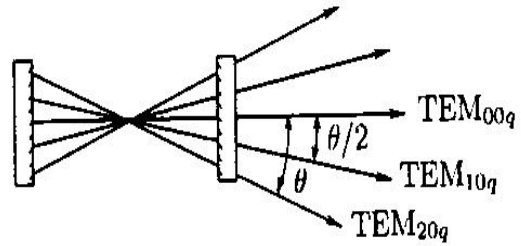


Рис.7. Направления распространения мод с различными поперечными индексами.

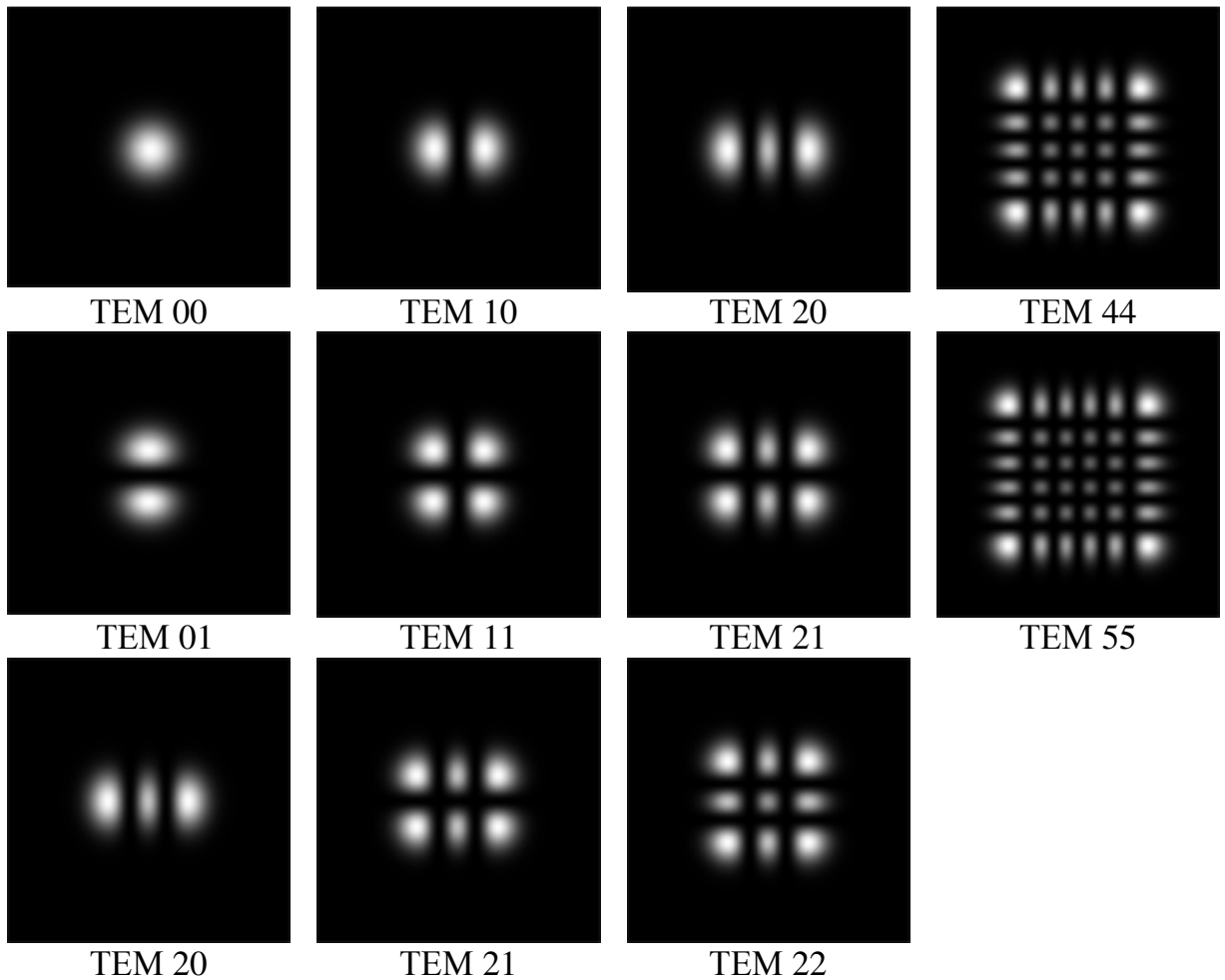


Рис.8. Моды резонатора с прямоугольной симметрией.

второй координате в плоскости зеркала $\theta = \pm m \frac{\lambda}{2} a$. Здесь n и m – целые

числа. Типы колебаний с различающимися значениями поперечных индексов n и m называются *поперечными модами*. В общем случае для классификации лазерных мод применяют обозначение TEM_{nmq} . На рис.8, в качестве примера представлены фотографии моды резонатора с прямоугольной симметрией.

В общем случае резонансные частоты для лазерного резонатора определяются выражением

$$\nu = \frac{c}{2} \left[\left(\frac{n}{2a} \right)^2 + \left(\frac{m}{2a} \right)^2 + \left(\frac{q}{L} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (19)$$

Для оптического резонатора выполняется условие, что n и $m \ll q$. Поэтому из выражения (19) можно определить резонансные частоты для плоскопараллельного резонатора. Для этого выражение (19) следует разложить в степенной ряд, в результате получаем

$$\nu \approx \frac{c}{2} \left[\frac{q}{L} + \frac{1}{2} \frac{(n+m)^2}{q} \frac{L}{4a^2} \right]. \quad (20)$$

Из формулы (20) можно определить разность частот между двумя продольными модами $\Delta\nu_q$ ($\Delta q = 1$):

$$\Delta\nu_q = \frac{c}{2L}. \quad (21)$$

Разность частот между двумя модами, отличающимися значением n на 1 ($\Delta n = 1$), будет равна

$$\Delta\nu_n = \frac{cL}{4qa^2} \left(n + \frac{1}{2} \right), \quad (22)$$

или, если использовать (21)

$$\Delta\nu_n = \Delta\nu_q \frac{L^2}{4qa^2} \left(n + \frac{1}{2} \right). \quad (23)$$

Аналогично для $\Delta m = 1$ получаем

$$\Delta\nu_m = \frac{cL}{4qa^2} \left(m + \frac{1}{2} \right). \quad (24)$$

Резонатор, состоящий из плоскопараллельных зеркал, не очень пригоден для практического использования, т.к. при малейшем отклонении от плоскопараллельности лучи будут быстро выходить за пределы тонкой трубки лазера. Практически чаще используют резонаторы со сферическими зеркалами, фокальные точки которых совпадают и находятся в центре резонатора (конфокальный резонатор). При такой конфигурации излучение, испущенное вблизи оси, может не выходить за пределы активной среды при бесконечном числе отражений. В результате образуются устойчивые конфигурации лучей, у которых для фиксированной частоты ν_q на длине резонатора укладывается разное число полувольт.

Следует иметь в виду, что оптический луч, ограниченный апертурой d подвержен дифракционной расходимости, поэтому при большой длине трубки или большом числе проходов через резонатор внешние участки пучка будут «задевать» стенки трубки, внося, таким образом, потери в резонатор. Еще больше это будет сказываться для мод, где лучи идут не строго параллельно оси трубки. Поэтому минимальные потери будут иметь моды, идущие вблизи оси резонатора. При очень малом коэффициенте усиления или вводя в резонатор диафрагмы, сужающие его световой диаметр, можно получить генерацию только на одной поперечной моде TEM_{00} . Такой режим работы лазера называется *одномодовым*. В этом случае лазерный пучок имеет минимальную расходимость и является гауссовым, т.е. распределение интенсивности в поперечном сечении задается законом Гаусса.

Однако при этом все равно будут существовать несколько продольных мод с разными частотами. Если же еще ввести в резонатор спектральный фильтр, ухудшающий условия генерации на некоторых частотах, можно получить генерацию только на одной продольной моде. Такой режим работы лазера называется *одночастотным*. В этом случае реализуется максимальная монохроматичность излучения лазера.

Вывод излучения из лазера. Как указывалось выше, при прохождении излучения в активной среде оно будет усиливаться. При зеркалах, имеющих коэффициент отражения 100%, один из фотонов, спонтанно испущенных вдоль оптической оси резонатора, будет вызывать вынужденные переходы, усиливающие интенсивность излучения до тех пор, пока не установится баланс между переходами с уровня E_2 на E_1 и обратно, т.е. установится режим стационарной генерации. Интенсивность излучения будет максимальной, а коэффициент усиления равен 1.

Однако полезно использовать излучение, существующее только внутри резонатора, практически невозможно, необходимо вывести его наружу. Для этой цели служат полупрозрачные зеркала. Если одно или оба зеркала сделать частично прозрачными, то часть излучения будет выходить из резонатора, и его можно использовать. Чем больше коэффициент пропускания зеркал, тем большей мощности излучение будет выходить из резонатора. Однако увеличение выходной мощности будет происходить за счет уменьшения интенсивности поля внутри резонатора и при определенном критическом значении пропускания $T_{кр}$. Зеркал потери в резонаторе за счет излучения станут такими большими, что генерация прекратится. Таким образом, понятно, что максимальная мощность выходного излучения будет наблюдаться при некотором оптимальном значении $T_{опт}$, лежащим в интервале от 0 до $T_{кр}$. Теоретически можно рассчитать значение $T_{опт}$, решая довольно сложные кинетические уравнения, учитывающие все проходящие в активной среде процессы, но в рамках данного описания мы этого делать не будем.

Для ясности рассмотрим более подробно процесс генерации в реальном He-Ne лазере.

Для случая стационарной генерации распределение мощности электромагнитного поля внутри резонатора и активного элемента показано на рис.9. В верхней части рисунка изображены два зеркала резонатора: левое с коэффициентом отражения 99,8% и правое с коэффициентом отражения 97%. Между зеркалами находится активный элемент гелий-неонового лазера.

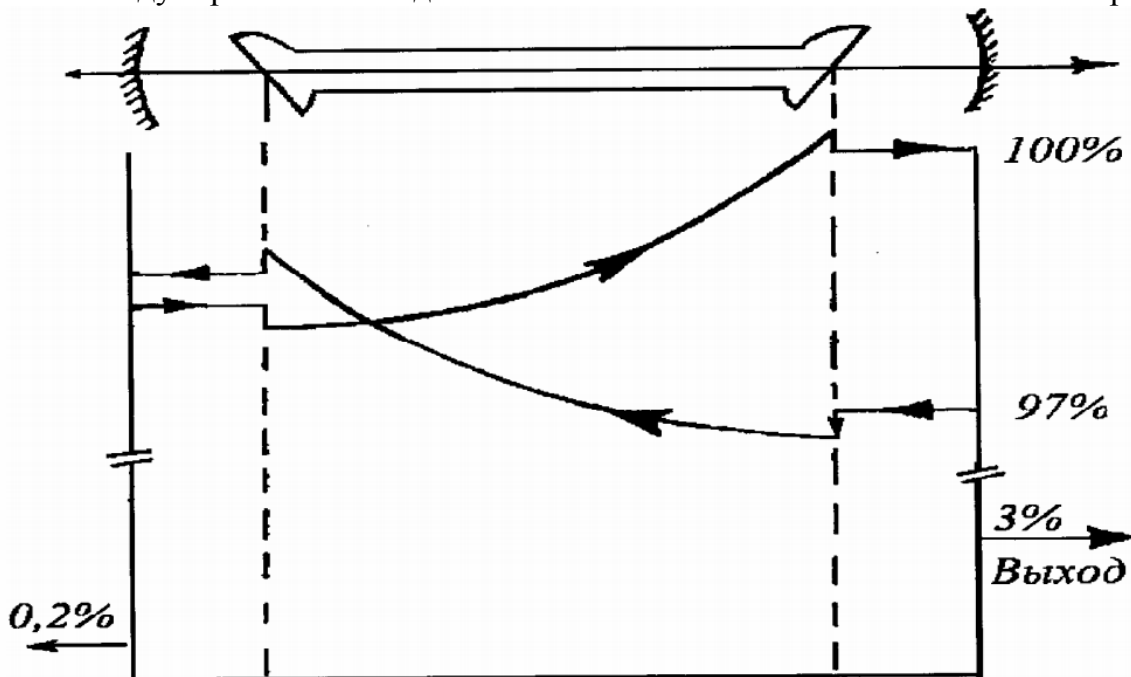


Рис. 9. Распределение мощности электромагнитного поля внутри резонатора и активного элемента.

В нижней части рисунка изображен условно график изменения мощности электромагнитного поля при прохождении световой волны вдоль резонатора. В тех местах резонатора, где волна идет в активной среде, будет происходить усиление. Мощность поля и его интенсивность будут нарастать по экспоненциальному закону. На участках между зеркалами и окнами разрядной трубки волна идет в воздухе, и усиления нет.

Максимальная мощность светового потока принята за 100%. Достигнув правого зеркала, часть потока (около 3%, пренебрегая поглощением в зеркале) выйдет за пределы резонатора; оставшая часть (~97%) отразится и возвратится в резонатор. Испытав небольшие потери на границе брюстеровского окошка за счет рассеяния, поток движется внутри активного элемента с усилением, потом, отразившись от левого зеркала и потеряв за счет этого около 0,2% мощности, движется в обратном направлении.

Очевидно, для того, чтобы получить замкнутый цикл, а следовательно и стационарную генерацию, необходимо, чтобы общие потери были полностью скомпенсированы общим усилением луча. В нашем случае, как видно из рис. 9, увеличение мощности за один цикл несколько превышает потери за счет излучения (~3%), что и обеспечивает режим стационарной работы лазера.

Существенной особенностью трубки He-Ne лазера являются выходные окна, расположенные под углом Брюстера к оптической оси. Так как зеркала резонатора расположены за пределами находящейся в трубке активной среды, то при каждом проходе резонатора излучение должно проходить через два прозрачных выходных окошка, испытывая при этом френелевское отражение. При маленьком коэффициенте усиления френелевские потери могут превысить усиление, делая генерацию невозможной.

При расположении выходных окон под углом Брюстера фотоны, имеющие определенную поляризацию (если вектор E лежит в плоскости падения луча на окошко), будут проходить без потерь на отражение и усиливаться в среде, а для фотонов с перпендикулярной поляризацией возникнут потери вследствие отражения. В результате выходное излучение лазера будет линейно поляризованным.

Следует отметить, что поляризация, в отличие от направленности и монохроматичности, не является необходимым атрибутом лазерного излучения. В других конструкциях лазеров излучение может быть не поляризованным.

Экспериментальная установка

Вид экспериментальной установки представлен на рис.10. В состав экспериментальной установки входят: экспериментальный модуль (1), представляющий собой жесткое основание из стального швеллера, на

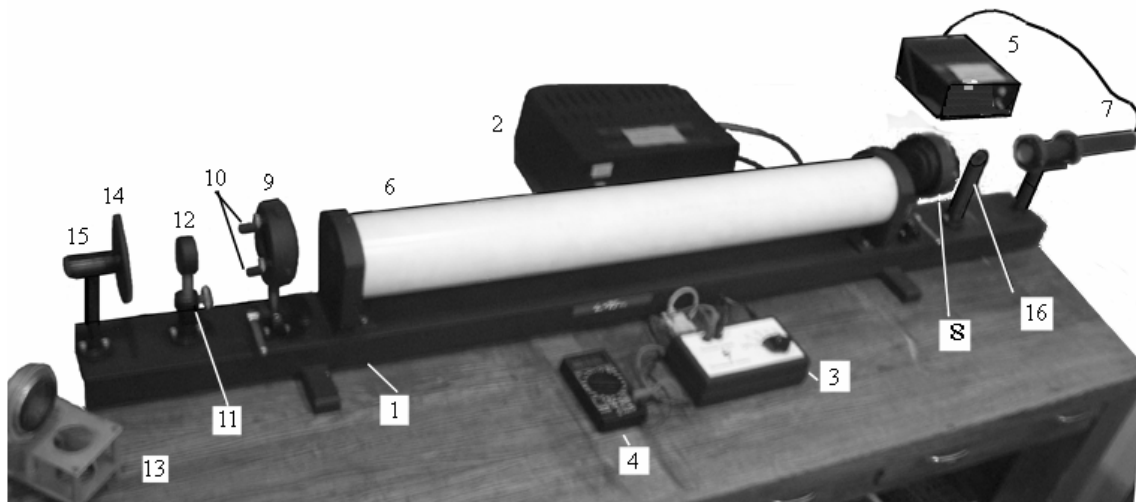


Рис. 10. Фото экспериментальной установки.

котором смонтированы элементы установки, блок питания активного элемента (2), блок управления экспериментальным модулем (3), измерительный прибор (мультиметр) (4) для измерения выходного сигнала, а также блок питания вспомогательного He-Ne лазера (5).

Активный элемент на экспериментальном модуле помещён в защитный кожух (6). На одном краю модуля установлен небольшой гелий-неоновый настроечный (вспомогательный) лазер (7), дающий узкий, хорошо коллимированный пучок света с длиной волны 632,8 нм. Излучение этого

лазера в данной задаче используется для определения коэффициента усиления исследуемого активного элемента (АЭ) и для настройки (юстировки) создаваемого оптического генератора (лазера).

Настроечный лазер установлен заранее и ориентирован так, что его луч направлен точно по оптической оси установки, совпадающей с оптической осью исследуемого АЭ.

На основании смонтированы два поворотных держателя (8, 9) для зеркал резонатора, которые позволяют убирать или помещать зеркала на оптическую ось установки. Наклон каждого из зеркал может изменять относительно двух взаимно перпендикулярных осей, вращая расположенные на держателе два юстировочных винта (10).

За трубой расположено гнездо (11), в которое можно поочередно помещать либо отрицательную короткофокусную линзу (12), либо поляризатор в оправе (12)*. Линза позволяет получить увеличенное изображение поперечной структуры лазерного излучения (поперечные моды). Вращением поляризатора вокруг своей оси осуществляется регулировка интенсивности прошедшего через него излучения. Это излучение в дальнейшем падает на экран (14), в центре которого расположен приемник света – фотодиод F1 (15).

Между активным элементом и настроечным лазером расположена металлическая вертикальная трубка (16), на которой под углом 45° к оптической оси схемы установлена тонкая стеклянная плоскопараллельная делительная пластинка. Она, не изменяя направление луча настроечного лазера, отражает часть его энергии вертикально вниз на приемник света – фотодиод F2, расположенный внутри трубки.

В данной работе настроечный лазер предварительно установлен, положение его выверено заранее и изменению не подлежит!

Критерием правильности положения этого лазера является отсутствие серповидных и спиральных бликов на экране, которые могут возникать при нарушениях юстировки в результате отражения луча от внутренней стенки стеклянной трубки АЭ исследуемого ОКУ.

Ввиду сложности и длительности процесса точной установки (юстировки) настроечного лазера, категорически не рекомендуется самостоятельно проводить какие - либо действия по изменению или по исправлению его положения.

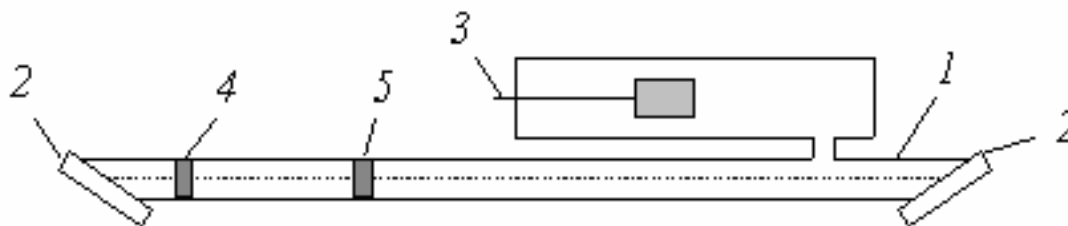


Рис.11. Вид активного элемента

* На рис.10 в гнездо 11 вставлена линза 12.

Активный элемент представляет собой весьма точно изготовленную стеклянную трубку специальной конструкции с внутренним диаметром около 6 мм и длиной около 1000 мм (рис.11). Концы трубки заклеены стеклянными плоскопараллельными пластинками (2), расположенными под углом Брюстера. К трубке АЭ присоединен специальный баллон большего диаметра, служащий резервуаром для гелий-неоновой газовой смеси, в котором находится катод (3). В трубку на разных расстояниях от катода впаяны два металлических кольца – два анода (4 и 5). Коммутация высокого напряжения, подаваемого на тот или иной анод от блока питания АЭ, осуществляется переключателем, расположенным в блоке управления. При этом срабатывает специальное высоковольтное реле, размещенное внутри кожуха (6). Разрядная трубка заполнена смесью спектрально-чистых гелия и неона при общем давлении смеси газов около 130 Па (~1 тор), причем парциальное давление He в несколько раз больше, чем давление Ne (примерно 5:1).

На лицевой панели **блока управления** (рис.12) расположены:

- переключатель высокого напряжения, подаваемого на тот или иной анод АЭ (два положения: «полная длина» и «половина длины*»);

- переключатель режимов работы фотодиодов F1 и F2 (четыре положения: «OFF», «F1», «F2» и «F1 - F2»);

- два гнезда для подключения мультиметра, используемого для измерения напряжения на нагрузочных сопротивлениях при протекании тока от фотодиодов F1 и F2.

Питание блока управления осуществляется от адаптера + 5 Вольт.

Высокое напряжение на аноды АЭ подается при включении тумблера «Сеть» на лицевой панели **блока питания АЭ**.

Мультиметр работает в режиме измерения постоянного напряжения, переключатель режима стоит в положении DCV, шкала 2000mV.

В установке в качестве фотоприемников используются фотодиоды типа ФД-К-155.

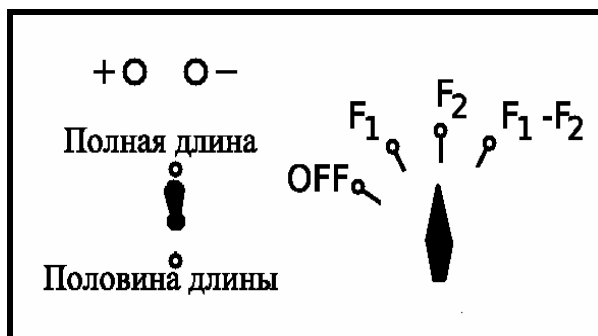


Рис. 12. Лицевая панель блока управления

Проведение эксперимента

Упражнение 1. Определение коэффициента усиления инверсной среды

* Название «половина длины» носит условный характер: соотношение длин требуется определить в процессе выполнения задачи.

При измерении коэффициента усиления сравниваются интенсивности излучения дополнительного лазера ДО попадания в активный элемент и ПОСЛЕ его прохождения через включенный активный элемент (инверсную среду).

Измерения

Для определения коэффициента усиления необходимо измерить интенсивность света на выходе активного элемента, используемого в качестве ОКУ, в двух случаях: **А) – при выключенном АЭ**, когда разряд в трубке АЭ не горит, и **В) – при включенном АЭ**, когда разряд горит и луч, прошедший через трубку, усиливается. Тогда отношение указанных интенсивностей, соответствующих режимам В и А, будет равно измеряемому коэффициенту усиления (без учета потерь на окошках АЭ). Вследствие малого значения коэффициента непосредственно измеряемые величины близки по величине, и погрешность сопоставима с величиной самого эффекта усиления.

С целью повышения точности измерений в данной работе использован **компенсационный метод**, который позволяет надежно измерять не только большую интенсивность луча 1, но также и малую величину добавочной интенсивности, полученной за счет усиления этого луча.

Принципиальная схема измерительной части установки приведена на рис.13.

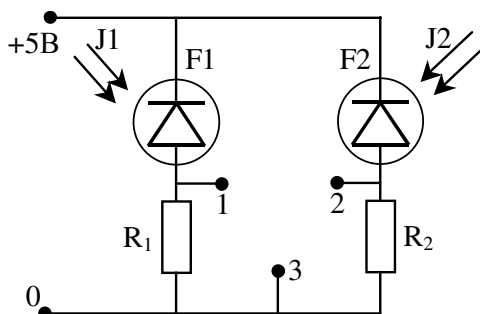


Рис. 13. Схема компенсационных измерений.

Из схемы установки (рис. 6) следует, что луч настроечного лазера с интенсивностью J_0 разделяется делительной пластинкой (9) на два луча: отраженный и прошедший.

Отраженный луч интенсивностью $J_2 = \alpha_2 J_0$ (α_2 – коэффициент отражения пластинки) попадает на фотоприемник F2. Это приводит к появлению **тока I_2** , пропорционального интенсивности J_2 :

$$I_2 = \beta_2 J_2 = \beta_2 \alpha_2 J_0.$$

(β_2 – коэффициент пропорциональности). Измерительный прибор (вольтметр), подключенный к точкам 2 и 3 схемы (переключатель режима измерения установлен в положение F2), покажет напряжение на резисторе R_2 :

$$U_2 = R_2 I_2 = R_2 \beta_2 \alpha_2 J_0.$$

Луч, **прошедший** через пластину с интенсивностью $(1-\alpha_2) J_0$, а затем через активный элемент (АЭ) и поляризатор П, попадает на фотоприемник F1.

Как и для отраженного луча, можно записать выражения для интенсивности J_1 луча, падающего на F1:

$$J_1 = \alpha_1 (1 - \alpha_2) J_0,$$

для силы тока I_1 :

$$I_1 = \beta_1 J_1 = \beta_1 \alpha_1 (1 - \alpha_2) J_0$$

и напряжения между точками 1 и 3 (переключатель режима измерения установлен в положение F1):

$$U_1 = R_1 I_1 = R_1 \beta_1 \alpha_1 (1 - \alpha_2) J_0.$$

Реально невозможно подобрать фотоэлементы и резисторы с абсолютно одинаковыми характеристиками, т.е. в общем случае $R_1 \beta_1 \neq R_2 \beta_2$. Однако, вращая поляририд П, можно в широких пределах изменять интенсивность излучения J_1 , падающего на F1, и, следовательно, коэффициент α_1 . Теперь, если подключить вольтметр к точкам 1 и 2 (переключатель режима измерения установлен в положение F1-F2), то

$$U_{12} = U_1 - U_2 = (R_1 \beta_1 \alpha_1 (1 - \alpha_2) - R_2 \beta_2 \alpha_2) J_0.$$

Вращая поляририд П, можно подобрать α_1 такой, что $U_{12} = 0$, т.е.

$$R_1 \beta_1 \alpha_1 (1 - \alpha_2) = R_2 \beta_2 \alpha_2.$$

В этом случае говорят, что сигналы от фотоэлементов F1 и F2 скомпенсированы, схема сбалансирована. Именно такая компенсация и осуществляется при **выключенном АЭ**.

При включении АЭ балансировка нарушается, так как возрастает освещенность F1, что происходит по двум причинам.

Во-первых, интенсивность растет вследствие усиления луча при прохождении через АЭ:

$$J_{1B} = k J_1 = k \alpha_1 (1 - \alpha_2) J_0,$$

где k – искомый коэффициент усиления АЭ за один проход.

Во-вторых, из-за некогерентной засветки J' , создаваемой светящейся плазмой в АЭ. Некогерентная засветка возникает и при отсутствии прошедшего луча вследствие попадания на фотоприемник излучения от светящейся трубки.

Таким образом, напряжение станет равным

$$\Delta U = (k R_1 \beta_1 \alpha_1 (1 - \alpha_2) - R_2 \beta_2 \alpha_2) J_0 + U' = (k-1) R_1 \beta_1 \alpha_1 (1 - \alpha_2) J_0 + U',$$

так как $R_1 \beta_1 \alpha_1 (1 - \alpha_2) = R_2 \beta_2 \alpha_2$.

Если теперь сделать $J_0 = 0$, т.е. перекрыть исходный луч настроечного лазера, то можно измерить сигнал U' , обусловленный некогерентной засветкой.

Теперь необходимо измерить исходный сигнал U_1 . Для этого следует выключить АЭ и перевести вольтметр в режим измерения F1:

$$U_1 = R_1 \beta_1 \alpha_1 (1 - \alpha_2) J_0,$$

Из формул получаем:

$$\Delta U = (k-1) U_1 + U',$$

$$k = 1 + \frac{\Delta U - U'}{U_1}. \quad (25)$$

Внимание !!! При выполнении упражнений – НЕ ДОПУСКАТЬ попадания в глаза прямого или отраженного лазерных лучей !!!

Порядок выполнения упражнения 1

Включить настроечный He-Ne лазер. Временно поместить перед фотодиодом F1 лист белой бумаги и, наблюдая на нем пятно от настроечного лазера, убедиться в правильности юстировки этого лазера. При правильной юстировке луч настроечного лазера должен проходить точно по оси длинной стеклянной трубки АЭ. Тогда на экране след от луча будет в виде круглого небольшого (около 3-4 мм) пятна.

Убрав лист бумаги, убедиться, что луч настроечного лазера попадает на входное отверстие фотодиода F1. Установить в гнездо (12) поляриод и приступить к балансировке измерительной схемы.

Балансировка

Предварительно следует убедиться в наличии сигналов от обоих фотодиодов F1 и F2, для чего переключатель на блоке управления поочередно установить в соответствующие положения. При этом сигнал от F2 должен быть не менее 100 единиц. Сигнал от F1 должен существенно изменяться при вращении поляроида П.

Установить переключатель режимов измерений в положение (F1-F2) *и вращением поляроида добиться нулевого сигнала на шкале ИП, т.е. произвести балансировку электрической схемы.*

Измерения

Измерения проводятся поочередно для двух различных положений переключателя длины АЭ на блоке управления.

Измерение напряжения ΔU .

Активизация АЭ. Установить на блоке управления переключатель в положение «полная длина». Включить тумблер «Сеть» на блоке питания, в результате АЭ активизируется: возникнет газовый разряд и появится розоватое свечение трубки. В результате баланс в измерительной схеме нарушится, так как увеличится освещенность F1.

Записать в рабочий журнал показания ΔU ИП.

Измерение напряжения U' . Перекрыть исходный луч настроечного лазера так, чтобы его излучение не попадало ни на один из фотодиодов. Тогда $J_0 = 0$, и показания ИП будут соответствовать только напряжению U' , вызванному некогерентной засветкой фотодиода F1. Занести результат в рабочий журнал.

Измерение напряжения U_1 . Погасить разряд в АЭ, для чего выключить АЭ тумблером на блоке питания.

Поставить переключатель режимов в положение F1 и произвести измерение U_1 , величина которого существенно больше, чем ΔU и U' . Занести результат в рабочий журнал.

Указанную процедуру измерений нужно выполнить не менее трех раз, проверяя каждый раз балансировку. Найти средние значения величин ΔU , U' и U_1 и по формуле (38) рассчитать среднее значение коэффициента усиления k_1 активного элемента. Оценить погрешность.

Аналогичные измерения провести и для меньшей длины светящейся области АЭ (переключатель в положении «половина длины»). Полученное значение коэффициента усиления k_2 должно быть несколько меньше, чем в первом случае.

Измеренные значения k_1 и k_2 позволяют рассчитать длину активной области L_2 во втором случае (значение длины L_1 указано на установке). В соответствии с (33) закон изменения интенсивности от длины активной области x имеет вид:

$$I(x) = I_0 \cdot e^{\alpha x} = k \cdot I_0.$$

Для результатов измерений имеем:

$$k_1 = e^{\alpha L_1}; \quad k_2 = e^{\alpha L_2},$$

откуда

$$L_2 = L_1 \frac{\ln k_2}{\ln k_1}. \quad (26)$$

Так как коэффициент усиления незначительно превышает единицу, то, воспользовавшись разложением

$$\ln k = \ln(1 + \Delta k) \approx \Delta k,$$

получим:

$$L_2 = L_1 \frac{\Delta k_2}{\Delta k_1}. \quad (27)$$

где

$$\Delta k = \frac{\Delta I - I'}{I_{1A}}.$$

Рассчитать длину L_2 и оценить погрешность.

После выполнения упражнения переключатель режима измерений перевести в положение (выкл.), вынуть из гнезда поляриод П.

Упражнение 2. Получение генерации лазера и изучение основных мод его оптического резонатора

Для получения генерации необходимо осуществить положительную обратную связь в ОКУ, для чего активный элемент следует поместить в оптический резонатор. Порядок установки и юстировки оптического резонатора следующий.

1. Убедиться в правильности выполненной в упражнении 1 юстировки настроечного лазера относительно оптической оси АЭ.

2. Установить лазерное диэлектрическое «полупрозрачное» зеркало 11, расположенное вблизи фотоприемника F1, на оптическую ось установки.

Внимание! С диэлектрическими зеркалами резонатора лазера следует обращаться очень бережно, поверхность зеркал не трогать руками и не протирать чем-либо!

3. Пользуясь микрометрическими винтами держателя, добиться такого положения зеркала 11, чтобы отраженный от него луч настроечного лазера прошел точно по одной прямой с падающим лучом и попал на выходную диафрагму настроечного лазера (для удобства в выходном окошке настроечного лазера помещена круглая металлическая пластинка-диафрагма с небольшим отверстием). Так как отраженный от зеркала 11 луч должен пройти точно по оси стеклянной трубки АЭ, то процедура настройки (юстировки) требует предельной аккуратности и может занять несколько минут.

Юстировка выполнено правильно, если размер пятна на диафрагме практически совпадает с размером диафрагмы, а при незначительном повороте винтов держателя отраженное пятно на диафрагме перемещается влево-вправо или вверх-вниз. Необходимо как можно точнее совместить отраженное пятно с отверстием диафрагмы.

Аналогичным образом устанавливается и зеркало 10. Однако в этом случае процесс юстировки гораздо проще, так как мало расстояние между настроечным лазером и зеркалом 10.

После установки и юстировки зеркал резонатора нужно включить АЭ (порядок включения описан в упражнении 1). Так как оба зеркала установлены перпендикулярно падающему лучу, то их плоскости должны быть параллельны друг другу, и, следовательно, должна возникнуть генерация. Однако она наблюдается не всегда, что обычно связано с неточной установкой ближайшего к настроечному лазеру зеркала 10. В этом случае, медленно изменяя наклон зеркала 10 около установленного положения, добиться возникновения генерации*.

Получив генерацию, установить в гнездо 12 отрицательную короткофокусную линзу и наблюдать на экране картину распределения интенсивности света в поперечных модах резонатора.

Тонкой регулировкой поворота зеркал 10 или 11 **получить генерацию на нескольких низших поперечных модах. Полученные картины распределения интенсивности зарисовать.**

* Если генерация не возникает, можно проделать такую же операцию с зеркалом 11. Если это не помогло, следует провести повторную установку зеркал с самого начала или обратиться к преподавателю.

Изучение структуры поперечных мод можно производить при различных положениях («полная длина» и «половина длины») переключателя высокого напряжения.

По этому упражнению составить краткий отчет.

Упражнение 3. Исследование состояния поляризации излучения ОКГ
Из гнезда 11 вынуть линзу и на ее место *установить поляроид П.*

Юстировкой резонатора добиться максимальной мощности генерации. Переведя переключатель режима в положение F1 (снимаются показания с фотоприемника F1), вращением поляроида установить по измерительному прибору максимальное значение и записать соответствующее положение поляроида по его шкале, приняв это положение за начало отсчета угла ($\varphi = 0$). Затем, поворачивая поляроид каждый раз на 10-15 градусов, измерить зависимость интенсивности прошедшего через поляроид света от угла поворота поляроида. *Полученные данные оформить в виде графика в полярных координатах. На график нанести теоретическую кривую, соответствующую закону $J \sim \cos^2 \varphi$ (закон Малюса).* При этом рекомендуется максимальные интенсивности для теоретического и для экспериментального графиков нормировать к единице. Угол φ должен изменяться от 0 до 360° .

После окончания работы переключатель режима перевести в положение (выкл.), выключить АЭ тумблером на блоке питания, выключить настроечный лазер.

Сравнивая экспериментальный график с теоретическим, сделать заключение о состоянии поляризации излучения в изученном He-Ne лазере.

По данному упражнению **составить краткой отчет, где представить полученный график и ответить на вопросы:**

- 1) Каково состояние поляризации в луче изученного лазера?
- 2) Чем определяется направление колебаний электрического вектора в лазерном луче?
- 3) В чем суть упомянутого выше закона $J \sim \cos^2 \varphi$ и смысл угла φ ?

Литература

1. Матвеев А.Н. Оптика. М.; Высшая школа, 1985. С.308 - 323.
2. Ландсберг Г.С. Оптика, М. 2003, с.428-436.
3. Левшин Л.В., Салецкий А.М. Лазеры на основе сложных органических соединений. Изд. МГУ, 1992. Гл.1. С.7 - 31.
4. Крохин О.Н. Лазер – источник когерентного света, УФН, 2011г., Т.181, №1, с.3-7.

Контрольные вопросы и задания

1. Кем, когда создан лазер? Какие существуют виды лазеров? В чем отличие от других источников света?
2. Сформулировать общие принципы работы генераторов и усилителей света. Каковы основные условия для осуществления режима усиления, условия стационарной генерации? Что такое коэффициент усиления, как его можно определить экспериментально?
3. Как связаны коэффициенты поглощения и усиления? Запишите закон Бугера.
4. Что такое спонтанное и вынужденное излучение? В чем их отличие? Записать кинетические уравнения для двухуровневой системы.
5. Какова связь между коэффициентами Эйнштейна? Найти их размерность. Каков физический смысл коэффициента Эйнштейна A_{21} ?
6. Что такое инверсная населенность; какими методами она создается в He-Ne лазере? Какова длина волны генерации в He-Ne лазере?
7. Каково назначение и роль резонатора в ОКГ? Что такое открытый резонатор, какие разновидности резонатора Вам известны?
8. Что такое поперечные и продольные моды? Рассчитать величину спектрального интервала между соседними продольными модами в изученном лазере. Какие моды удалось наблюдать в эксперименте?
9. Чем определяется состояние поляризации в излучении лазера? В чем состоит назначение брестеровских окон в АЭ?
10. Нарисуйте схему экспериментальной установки. Какие преимущества дает в измерении коэффициента усиления компенсационная схема? Что, зачем и каким способом компенсируется?
11. Как устроен активный элемент гелий-неонового лазера? Какова роль активной среды, назначение и роль брестеровских окон?
12. Каковы условия стационарной генерации и роль потерь?
13. Каковы условия и порядок проведения балансировки электроизмерительной схемы? Какой измерительный прибор (ИП) использован в данной работе, на каких пределах (шкалах) велись измерения?
14. Написать расчетную формулу для определения коэффициента усиления, пояснить смысл отдельных величин в этой формуле, как они измерялись? Чему равен измеренный коэффициент усиления и как определялась погрешность?
15. Как устроены зеркала для резонатора лазера, каковы их свойства?
16. Какие виды накачки применяются в лазерах, как осуществляется накачка в изученном Вами лазере?
17. На каких переходах и на каких длинах волн возможна генерация в He-Ne лазере?