

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»**

ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Методические указания к лабораторным работам

САМАРА 2016

УДК 621.373.8

Составители: В.П. Захаров, Д.Н. Артемьев

Основы квантовой электроники: Метод. указания к лабораторным работам – Самар. нац. исследов. ун-т.; сост. В.П. Захаров, Д.Н. Артемьев; Самара, 2016. - 51 с.

Методические указания к лабораторным работам подготовлены на кафедре лазерных и биотехнических систем Самарского университета и предназначены для студентов дневного отделения, обучающихся по специальности 12.03.05 «Лазерная техника и лазерные технологии» по дисциплине «Основы квантовой электроники».

Табл. 5 Ил. 24. Библиогр. 14 назв.

Рецензент: Кренц А.А., к.ф.-м.н., доцент кафедры физики

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ГАЗОВЫЙ ГЕЛИЙ - НЕОНОВЫЙ ЛАЗЕР

Цель работы: изучение условий возникновения индуцированного излучения, изучение принципа действия и устройства газового гелий-неонового лазера, получение зависимости мощности излучения от тока накачки.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Для работы большинства лазеров требуется выполнение двух основных условий. Во-первых, необходима активная среда, т.е. совокупность атомов, молекул или ионов, которые излучают в оптическом диапазоне спектра электромагнитных волн. Активная среда может быть жидкой, твердой или газообразной, но обязательно обладает свойством усиливать электромагнитное излучение на частоте генерации. Во-вторых, генерация возможна только при наличии в лазерной системе положительной оптической обратной связи. Такая связь обеспечивается оптическим резонатором, который в большинстве случаев состоит из двух зеркал, между которыми помещается активная среда.

1 СПОНТАННОЕ И ИНДУЦИРОВАННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Для получения условий оптического усиления рассмотрим элементарные акты взаимодействия электромагнитного излучения с атомной системой (активной средой). Рассмотрим для простоты двухуровневую систему, т.е. атомы, обладающие двумя энергетическими уровнями E_1 и E_2 ($E_2 > E_1$), которые будем считать невырожденными и бесконечно узкими.

Пусть N_1 - число атомов в единице объема вещества, находящихся на нижнем энергетическом уровне E_1 , а N_2 - на верхнем уровне E_2 . Тогда в результате взаимодействия электромагнитной волны с атомами вещества будут происходить изменения ее интенсивности, обусловленные следующими элементарными

процессами.

1. Резонансное поглощение фотонов частоты

$$\nu_{12} = \frac{E_2 - E_1}{h} = \nu_0,$$

которое будет происходить со скоростью

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

где B_{12} – коэффициент Эйнштейна, такой, что $B_{12}\rho(\nu)$ – вероятность этого вынужденного перехода, а $\rho(\nu)$ – спектральная плотность энергии волны.

2. Спонтанное излучение атомов, при котором они самопроизвольно переходят с верхнего возбужденного состояния E_2 на уровень E_1 . Число этих переходов в единицу времени будет равно

$$\frac{dN_{2сп}}{dt} = A_{21}N_2, \quad (2)$$

где A_{21} – коэффициент Эйнштейна. Так как эти переходы происходят в результате внутренних причин и статически независимы, то спонтанное излучение носит тепловой («шумовой») характер и по отношению к внешнему электромагнитному полю будет некогерентным.

3. Вынужденное, или индуцированное, излучение фотонов частоты $\nu_{12} = \nu_0$, при котором атомы переходят из возбужденного верхнего состояния E_2 на нижнее E_1 под действием внешнего светового поля. Скорость этого процесса будет

$$\frac{dN_{2вын}}{dt} = B_{21}N_2\rho(\nu), \quad (3)$$

Главной особенностью этих переходов является тот замечательный факт, что излучаемый под действием внешнего поля квант полностью когерентен с этим полем, т.е. имеет ту же частоту, фазу, поляризацию и распространяется по тому же направлению. Таким образом, вынужденное излучение является когерентным по отношению к внешнему полю. Общее же излучение системы является смесью некогерентного («шумового») и когерентного излучений.

В состоянии термодинамического равновесия число переходов в единице времени в единице объема с погашением энергии равно числу переходов за то же время с испусканием энергии, так что населенность энергетических уровней в этом состоянии не меняется. Так как в системе акты излучения могут быть как самопроизвольными, так и индуцированными, то для системы, находящейся в термодинамическом равновесии, будет справедливо равенство:

$$A_{21}N_2 + B_{21}N_2\rho(\nu) = B_{12}N_1\rho(\nu), \quad ((4))$$

Откуда:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{B_{12}\rho(\nu)}{A_{21} + B_{21}\rho(\nu)} \quad ((5))$$

Между коэффициентами Эйнштейна существует следующая связь:

$$B_{12} = B_{21} \quad \text{и} \quad A_{21} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} B_{21} \quad ((6))$$

Так как $A_{21} > 0$, то $\frac{N_2}{N_1} < 0$, т.е. в состоянии термодинамического равновесия системы населенность энергетически более высокого уровня E_2 всегда меньше населенности энергетически более низкого уровня E_1 .

Если вероятность спонтанного излучения значительно меньше вероятности индуцированного излучения, то $\frac{N_2}{N_1} \rightarrow 1$. Этот вывод указывает на возможные способы увеличения населенности верхних энергетических уровней.

2 УСЛОВИЯ ОСЛАБЛЕНИЯ И УСИЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассмотрим прохождение плоской монохроматической волны интенсивности $J_{0\nu}$ через единичный объем исследуемого вещества сечением S . Первоначальная энергия волны была $W_0 = J_{0\nu} S$. После прохождения бесконечно тонкого слоя вещества $dx = cdt$ в соответствии с (1) произойдет dN_1 актов поглощения фотонов:

$$dN_1 = B_{12}N_1\rho(\nu)dt = \frac{1}{c}B_{12}N_1\rho(\nu)dx. \quad ((7))$$

Это приведет к уменьшению энергии волны на величину

$$dW_1 = h\nu dN_1 = \frac{h\nu}{c} B_{12} N_1 \rho(\nu) dx. \quad ((8))$$

Так как $dW_1 = S dI_{0\nu}$, а $\rho(\nu) = \frac{I_{0\nu}}{c}$, то

$$dI_{1\nu} = \frac{h\nu}{c^2 S} B_{12} N_1 I_{0\nu} dx. \quad ((9))$$

Аналогично, пренебрегая долей спонтанного излучения по сравнению с вынужденным (т.е. считая $A_{21} \ll B_{21}\rho(\nu)$), за счет индуцированного излучения в соответствии с (7), получим увеличение спектральной плотности излучения

$$dI_{2\nu} = \frac{h\nu}{c^2 S} B_{21} N_2 I_{0\nu} dx. \quad ((10))$$

Так как $B_{21} = B_{12}$, то общее изменение интенсивности после прохождения слоя dx будет

$$dI_\nu = dI_{2\nu} - dI_{1\nu} = \frac{h\nu}{c^2 S} B_{21} (N_2 - N_1) I_{0\nu} dx, \quad ((11))$$

или

$$dI_\nu = \alpha(\nu) I_{0\nu} dx, \quad ((12))$$

где

$$\alpha(\nu) = \frac{h\nu}{c^2 S} B_{21} (N_2 - N_1).$$

Интегрируя (12), получаем

$$I_\nu = I_{0\nu} e^{\alpha(\nu)x}. \quad ((13))$$

Показатель экспоненты $\alpha(\nu)$ определяет характер изменения интенсивности. В обычных условиях сред, близких к равновесию, в соответствии с распределением Больцмана $N_1 > N_2$ и $\alpha(\nu) < 0$, т.е. имеет место ослабление рассматриваемой волны по закону Бугера

$$I_\nu = I_{0\nu} e^{-|\alpha(\nu)|x}. \quad ((14))$$

Если в среде удастся создать условие $N_2 > N_1$, то в этом случае $\alpha(\nu) > 0$ и среда будет усиливать проходящую волну. Среды, для которых выполняется это условие, называются средами с инверсивной заселенностью или активными средами. Естественно, чтобы создать такую среду, необходимо иметь какой-то внешний источник энергии, обычно называемый "накачкой", который с заданной скоростью

переводил бы атомы среды на верхний, возбужденный уровень.

Рассмотренная принципиальная возможность усиления света реализуется в специальных устройствах, получивших название оптических квантовых усилителей света (ОКУ).

Наиболее широкое применение ОКУ получили для усиления излучения твердотельных лазеров, у которых коэффициент усиления значительно больше, чем у гелий-неонового лазера. Пропуская первичное излучение лазера через последовательность предварительно возбужденных активных элементов, удается усилить первичную волну в несколько раз.

3 АКТИВНАЯ СРЕДА ГЕЛИЙ-НЕОНОВОГО ЛАЗЕРА

Рассмотрим особенности создания инверсной заселенности в активной среде гелий-неонового лазера. В нем активная среда представляет собой смесь гелия и неона, находящуюся в стеклянной трубке с давлением около 130 Па (парциальное давление *He* во много раз больше, чем *Ne*). Накачка активной среды производится за счет энергии электрического разряда, возбуждаемого в трубке.

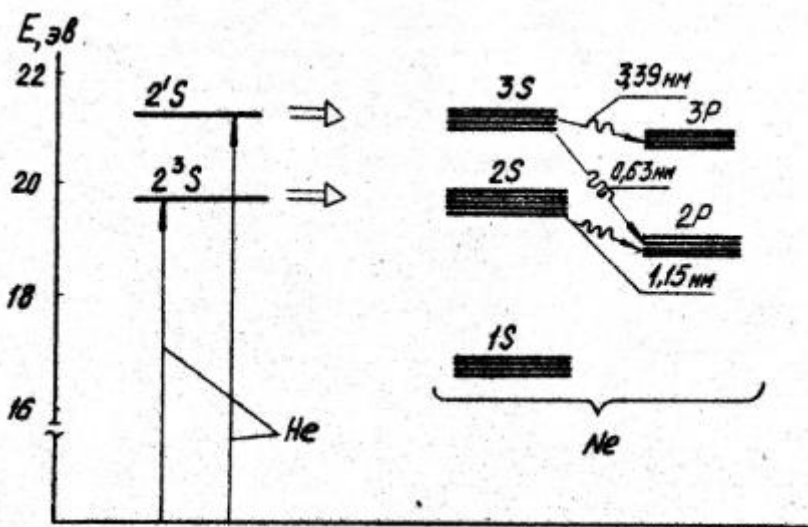


Рисунок 1 – Схема энергетических уровней *He Ne*

На рис. 1 представлена упрощенная схема энергетических уровней *He* и *Ne*. Рабочим веществом лазера является *Ne*. Генерация осуществляется на переходе $3S \rightarrow 2P$ с $\lambda = 0,6328$ мкм. Для создания инверсной заселенности этого перехода необходимо, с одной стороны, обеспечить эффективное заселение верхнего уровня $3S$, а с другой - быстрое опустошение нижнего уровня $2P$. Для выполнения первой задачи используются атомы гелия, которые за счет электронного удара переходят на возбужденные уровни 2^1S и 2^3S (*He*), являющиеся метастабильными, с большим временем жизни ($\tau \approx 10^{-3}$ с), для других уровней с разрешенными переходами характерное время жизни 10^{-10} с.

Так как энергия этих уровней *He* весьма близка к энергии возбужденных уровней *Ne* $3S$ и $2S$, то при столкновениях происходит эффективный обмен энергией, что и обеспечивает большую скорость заселения верхних уровней неона. Опустошение нижнего уровня $2P$ *Ne* происходит в основном за счет спонтанных переходов на уровень $1S$. В опустошении последнего большую роль играет столкновение атомов *Ne* со стенками трубки. Последнее обстоятельство является критерием выбора диаметра трубки активного элемента.

Следует отметить, что наряду с рабочим переходом $\lambda = 632,8$ нм одновременно происходит генерация на переходе $3S \rightarrow 3P$ *Ne* с $\lambda = 3,39$ мкм, которая имеет большую интенсивность. Так как для обоих переходов верхний уровень является общим, то между ними возникает конкуренция, и для эффективной генерации $\lambda = 632,8$ нм необходимо подавить генерацию с $\lambda = 3,39$ мкм, что достигается введением для последней дополнительных потерь, либо подбором коэффициента отражения зеркал, либо за счет изготовления окошек трубки из стекла, имеющего большой коэффициент поглощения для $\lambda = 3,39$ мкм.

4 ОПТИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР

Для генерации оптического излучения, как уже говорилось, необходимо осуществить положительную обратную связь в квантовом усилителе.

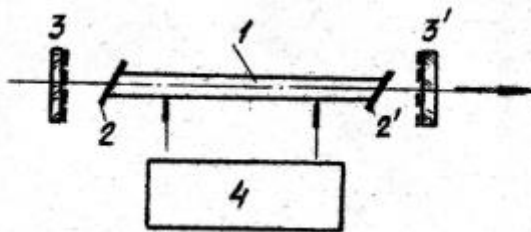


Рисунок 2 – Схема лазера: 1 – трубка; 2, 2' – окна Брюстера; 3,3' – зеркала резонатора, 4 – блок питания

С этой целью активную среду помещают в оптический резонатор (рис. 2), который представляет собой систему двух специально согласованных зеркал 3, 3' (рис. 2). Зеркала подбираются таким образом, чтобы возникшее в резонаторе за счет спонтанных переходов излучение многократно проходило через активную среду, помещенную между этими зеркалами, вызывая явление вынужденного излучения. Простейшим примером такого резонатора является так называемый конфокальный резонатор, состоящий из двух одинаковых сферических зеркал, фокусы которых сопряжены в одной точке. Эта система - типичный резонатор открытого типа, условия резонанса в котором выполняются только для волн, распространяющихся в направлениях, мало отличающихся от направления оптической оси резонатора. Коэффициенты отражения зеркал подбираются таким образом, чтобы, с одной стороны, максимально уменьшить потери при отражении, а с другой стороны, вывести за пределы резонатора максимальную полезную мощность (без срыва генерации). С этой целью одно из зеркал («глухое») выбирается с максимальным коэффициентом отражения, а пропускание другого зеркала («выходного») подбирается так, чтобы общая сумма потерь была бы немного меньше насыщенного коэффициента усиления. Для гелий-неонового лазера глухое зеркало обычно имеет коэффициент отражения около 99,8%, а выходное - около 98-97%. Естественно, что таким условиям могут удовлетворять только зеркала с многослойным диэлектрическим покрытием, имеющие ничтожно малое поглощение.

Важным источником потерь является отражение на границах

активного элемента. Для уменьшения потерь на границе трубки выходные окошки располагаются под углом Брюстера. В этом случае волна, электрический вектор E которой лежит в плоскости падения пучка на окошко, проходит его без потерь на отражение, а волна с перпендикулярной поляризацией будет испытывать на окошке обычное френелевское отражение, приводящее к дополнительным потерям, ведущим к подавлению генерации колебаний с таким направлением поляризации. В результате выходное излучение лазера будет линейно-поляризованным.

Достоинством гелий-неоновых лазеров является высокая когерентность излучения, малая потребляемая мощность и небольшие габариты. Основные недостатки – невысокий КПД (от 0,01 до 0,1%) и низкая выходная мощность, не превышающая 100 мВт (таблица 1)

Таблица 1 – Параметры гелий-неоновых лазеров, работающих на длине волны 0,63 мкм

Тип лазера	Мощность излучения, мВт	Угловая расходимость, мрад	Средний ресурс, ч	Габариты, мм	Масса, кг
Многомодовые					
ЛГ-78	2	3	10000	300x32	1,2
ЛГ-75-1	25	3	–	1100x114x103	10
ОКГ-11	20	4	–	1140x120x120	12
Одномодовые					
ЛГ52-3	2	3	7500	370x126x94	4,5
ЛГ52-2	4	3	–	626x126x94	6,5
ЛГ52-1	8	3	–	770x126x94	9
ЛГ79-1	15	1	5000	794x90x90	6,5

ЛГ38	50	0,6	5000	2000x320x2 90	50
------	----	-----	------	------------------	----

ЗАДАНИЕ 1. ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ИЗЛУЧАТЕЛЯ ГЕЛИЙ-НЕОНОВОГО ЛАЗЕРА ТИПА ЛР75-1

ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: макет гелий-неонового лазера ДР75-1
без источника накачки.

Описание конструкции

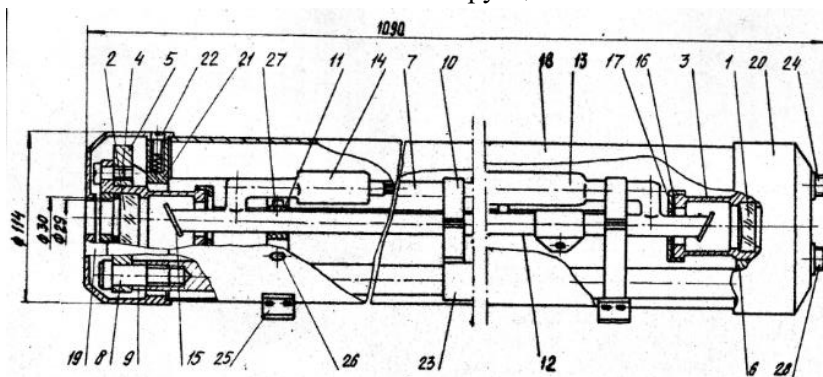


Рисунок 3 – Излучатель лазера ЛГ-75

Лазер состоит из двух частей: излучателя и источника накачки. Излучатель лазера (рис. 3) включает активный элемент, оптический резонатор и корпус.

Оптический резонатор образуется плоским 2 и сферическим 1 зеркалами, закрепленными в стаканы герметизации 3.

Стаканы жестко закреплены винтами 4 во фланцах 5 и 6, стянутых между собой тремя направляющими инваровыми стержнями 7, фланцы 5 и 6 крепятся к инваровым стержням винтами 8 через шайбы 9. Наличие шайб позволяет изменять положение фланцев 5 и 6 с зеркалами относительно оси оптического резонатора путем вращения в небольших пределах котировочных винтов 8. Между инваровыми стержнями с помощью фланцев 10 закреплен активный элемент 12 с подогревным катодом 13 и анодом 14, наполненный смесью неона и гелия.

Торцы активного элемента отшлифованы под углом Брюстера и закрыты выходными окнами 15. Пространство между выходными

окнами и зеркалами герметизировано с помощью резиновых прокладок 16, прижимаемых гайками 17 к стаканам. Зеркала закреплены в стаканы гайками 29 через прокладки 30.

Оптический резонатор с активным элементом помещен в защитный корпус 18 и жестко в нем закреплен. Корпус закрыт с торцов крышками 19 и 20, которые крепятся к фланцам 21 винтами 22. На двух фланцах Ю укреплена плата 23, на которой смонтирована схема автоматического поджига активного элемента.

Питающее напряжение подводится к активному элементу через разъемы 24 и 28 (разъемы 1 и 2 на схеме рис. 4). Выход излучения осуществляется со стороны плоского зеркала.

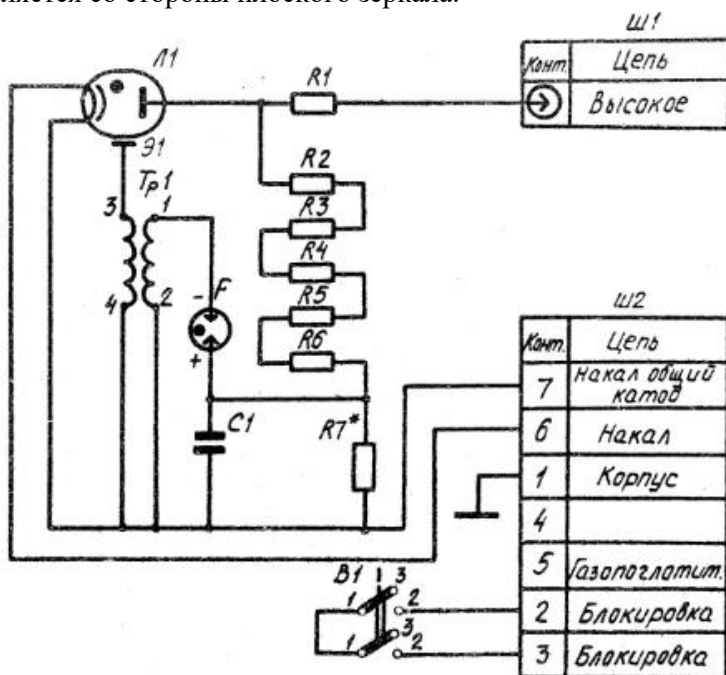


Рисунок 4 – Электрическая схема поджига активного элемента излучателя

Для крепления излучателя лазера на корпусе 18 имеются скобы 25 с резьбовым отверстием в каждой из них.

Поджиг активного элемента излучателя лазера происходит автоматически при разряде конденсатора C_1 через разрядник F

(конденсатор C_1 предварительно заряжается до напряжения пробоя разрядника через делитель напряжения R_2, R_7) на первичную обмотку трансформатора поджига внутри излучателя лазера. Во вторичной обмотке этого трансформатора индуцируется высоковольтное высокочастотное напряжение более 10 кВ, прикладываемого к катоду наружного электрода активного элемента излучателя лазера.

После поджига активного элемента напряжение на конденсаторе C_1 падает и импульс поджига на первичную обмотку трансформатора поджига не поступает. Для ограничения тока разряда и уменьшения релаксационных колебаний в анодную цепь активного элемента включено балластное сопротивление R_1 (рис. 4), состоящее из последовательно соединенных резисторов, расположенных на трех фланцах 10.

ЗАДАНИЕ 2. ИЗМЕРЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ГЕЛИЙ- НЕОНОВОГО ЛАЗЕРА ОТ РАЗРЯДНОГО ТОКА

ПРИНАДЛЕЖНОСТИ: гелий-неоновый лазер ДГ75-1,
фотоприемник излучения ФД24К, микроамперметр.

Факторы, влияющие на мощность излучения лазера

Основные элементы, определяющие выходную мощность излучения, следующие:

Ток разряда. Увеличение тока разряда приводит к повышению концентрации электронов в плазме разряда и, следовательно, эффективности возбуждения компонентов газа. При этом происходит интенсивное заселение энергетических уровней. При некоторых значениях тока разряда интенсивность заселения уровня $1S$ неона и соответственно уровней $2P$ и $3P$ становится преобладающей, что вызывает уменьшение инверсной населенности лазерных переходов и снижение мощности излучения. Оптимальная величина разрядного тока ЛГ75-1 составляет 25 мА.

Общее давление смеси. При малых давлениях (100 – 200 Па) увеличение давления приводит к возрастанию мощности генерации вследствие увеличения концентрации атомов He и Ne . В дальнейшем

существенным оказываемся снижение электронной температуры, что приводит к падению выходной мощности генерации вплоть до срыва.

Диаметр разрядной трубки. Увеличение диаметра ведет к увеличению объема активной среды, следовательно, к возрастанию мощности, однако с возрастанием диаметра падает вероятность дезактивации нижнего лазерного уровня неона при столкновениях со стенкой, что приводит к уменьшению инверсии. Оптимальный диаметр зависит от длины трубки: для трубки длиной 1 м оптимальный диаметр 7-8 мм.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить лазер согласно его инструкции по эксплуатации.
2. Направить лазерный луч на приемную поверхность фотоэлемента.
3. Изменяя ток разряда ручкой "Регулировка тока" на блоке питания, зарегистрировать показания микроамперметра
4. Построить график зависимости: ток разряда – мощность излучения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое излучение называют спонтанным, вынужденным или индуцированным?
2. Какой смысл вероятности коэффициентов Эйнштейна A_{21} , B_{21} , B_{12} ?
3. Какую заселенность энергетических уровней называют инверсной?
4. Получите соотношение между зависимостью уровней и коэффициентами Эйнштейна для равновесного термодинамического состояния системы.
5. Получите выражение для коэффициентов поглощения и усиления активной среды.
6. Каковы процессы, приводящие к возникновению инверсной заселенности в активной среде гелий-неонового лазера?
7. Какова роль оптического резонатора в лазере?
8. Расскажите о факторах, влияющих на мощность излучения лазера.

БИБЛЕОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коэн-Таннуджи, К. Квантовая механика [Текст] / К. Коэн-Таннуджи, Б. Диу, Ф. Лалоэ; перевод с фр. Л. Н. Новикова. - 2-е изд., знач. доп. - Ленанд: Едиториал УРСС - 2000.- 656 с. – ISBN 978-5-9710-1471-3
2. Бруннер, В. Справочник по лазерной технике [Текст] / В. Бруннер; перевод с нем. В. Н. Белоусова.; под ред. А. П. Напартовича. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 544 с.- ISBN 5-283-02480-6
3. Гуртов, В. А. Твердотельная электроника: [Текст] учеб. пособие для вузов / В. Гуртов - М.: Техносфера, 2005. - 407 с.
4. Захаров, В. П. Лазерная техника [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. П. Захаров, Е. В. Шахматов ; Федер. агентство по образованию, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева. - Самара : Изд-во СГАУ, 2006. – 311 с. - ISBN 5-7883-0468-7

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ СО₂-ЛАЗЕРА

Цель работы: изучение принципа работы и конструкции СО₂-лазера диффузионного типа с отпаянным активным элементом, ознакомление с инструкцией по эксплуатации лазера и методами измерения мощности излучения, измерение мощности излучения лазера с помощью проточного калориметра.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

В качестве активных частиц в газовых лазерах используются нейтральные атомы, ионы и молекулы газа. Для нейтральных атомов энергия, соответствующая лазерным переходам, составляет обычно $\Delta E = 0,1 \div 2,0$ эВ. Лазеры на нейтральных атомах являются источниками инфракрасного излучения, лишь некоторые из них генерируют в красной области видимого спектра. Это следует из выражения для энергии кванта $\Delta E = h\nu$, которое иногда записывают как

$$\Delta E = h \cdot \frac{c}{\lambda} = \frac{1,236}{\lambda} [\text{эВ}]. \quad (1)$$

Здесь постоянная Планка h выражена в [эВ с] с учетом соотношения $1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$, скорость света $c = 2,998 \cdot 10^{14} \text{ мкм/с}$, длина волны λ в мкм.

В ионных газовых лазерах энергия излучаемых квантов значительно больше (2 — 5 эВ). Это значит, что ионные лазеры дают преимущественно видимое и ультрафиолетовое излучение. В молекулярных газовых лазерах переходы между рабочими уровнями сопровождаются излучением в инфракрасном и субмиллиметровом диапазонах ($\lambda = 10 \div 100 \text{ мкм}$).

1 ЛАЗЕР НА УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ

1.1. Процессы в активной среде

Широко применяются лазеры, в которых рабочим веществом является смесь газа CO_2 и азота N_2 , в нее добавляется гелий или пары воды. На рисунке 1 приведены энергетические диаграммы колебательных уровней для молекул CO_2 и N_2 , с которыми связаны основные физические процессы в этих лазерах. Индуцированное излучение в лазере на CO_2 вызвано переходами $00^01 \rightarrow 10^00$ и $00^01 \rightarrow 02^00$. Наиболее интересным является переход $00^01 \rightarrow 10^00$ с длиной волны около 10,6 мкм, который может почти полностью подавлять лазерную генерацию на переходе $00^01 \rightarrow 02^00$ на длине волны 9,6 мкм.

Заселение верхнего лазерного уровня 00^01 и создание инверсии населенностей обуславливается несколькими процессами. Первый процесс - возбуждение молекул CO_2 при соударениях с электронами в газоразрядной плазме, в результате которых заселяются в основном колебательные уровни CO_2 , изображенные на диаграмме. Так как время жизни молекул CO_2 в состоянии 00^01 порядка 10^{-2} - 10^{-3} с, в остальных нижележащих уровнях значительно меньше (1-100 нс в зависимости от давления), то инверсия населенностей может быть получена и в чистом CO_2 . Однако эффективность прямого возбуждения молекул CO_2 электронным ударом недостаточно высока. Вторым и основным процессом возбуждения молекул CO_2 связан с резонансной передачей энергии от азота. Этот процесс приводит к селективному заселению только верхнего лазерного уровня 00^01 , т.к. он почти совпадает с колебательным уровнем молекул азота $\nu = 1$.

Дополнительное увеличение инверсии населенностей обеспечивается за счет переходов молекул CO_2 с высоких колебательных уровней (не показанных на диаграмме), которые возбуждаются при столкновениях с электронами и, вероятно, с атомами гелия. Добавление в газовую смесь гелия повышает вероятность перехода молекул CO_2 с нижних уровней 10^00 , 02^00 и 01^00 и способствует тем самым увеличению инверсии населенностей и мощности генерации. Кроме того, гелий, обладающий высокой теплопроводностью, улучшает охлаждение газовой смеси, позволяет

уменьшать тепловое заселение уровней, снижающее инверсию населенностей. Пары воды, иногда добавляемые в газовую смесь, выполняют ту же роль, что и гелии. В процессе работы газовая смесь в лазере на CO_2 разлагается (например, $\text{CO}_2 + e \rightarrow \text{CO} + e^-$). Поэтому в мощных лазерах, где процесс разложения протекает быстро, смесь постоянно прокачивается через газоразрядную кювету, что обеспечивает постоянство ее состава.

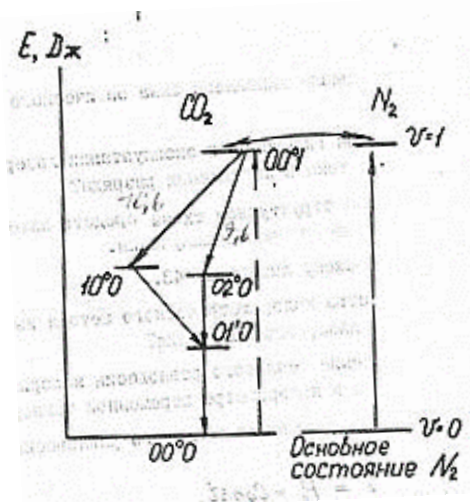


Рисунок 1- Диаграмма нижних колебательных уровней молекул CO_2 и N_2

1.2. Конструкция и основные характеристики

Применяемый в работе лазер ЛГ-43 относится к CO_2 -лазерам с диффузионным охлаждением и отпаянной разрядной трубкой. Основными элементами лазера являются газоразрядная трубка и резонатор, образующие оптическую излучающую головку и источник питания. Несущая часть оптической головки лазера образована тремя инваровыми стержнями диаметром 20 мм, скрепленными двумя фланцами из нержавеющей стали. На этих фланцах укреплены юстировочные механизмы и стеклянная газоразрядная трубка с водяным охлаждением.

К концам рабочей части трубки припаяны коваровые конусы, к которым через гибкие металлические манжеты приварены зеркала

оптического резонатора.

Полностью отражающее зеркало с радиусом кривизны 2 м изготовлено из стали марки ХВГ, предварительно уплотненной на 50% и закаленной. Рабочая сфера его покрыта золотом. Плоское выходное зеркало изготовлено из монокристаллического германия. Внутренняя поверхность его за исключением круглой центральной части диаметром 3 мм, служащей для вывода луча, покрыта золотом; наружная поверхность просветлена сернистым цинком. Коэффициент отражения этого зеркала составляет 92-93%. Диаметр луча непосредственно за выходным окном не меньше 3 мм. Расходимость луча по уровню половинной мощности составляет 4 мрад.

Рабочим составом газоразрядной трубки является смесь газов CO_2 , He, N_2 , H_2 и O_2 в отношении 1,5:11; 2:2; 5:0; 2:0,1 при общем давлении около 15 мм рт.ст.

Для визуализации излучения ЛГ-43 ($\lambda = 10,6$ мкм) в корпусе лазера установлен излучатель гелий-неонового лазера ЛГ-72-1. Красный луч лазера ЛГ-72-1 совмещается с инфракрасным лучом с помощью системы зеркал в корпусе ЛГ-43 (рис. 2).

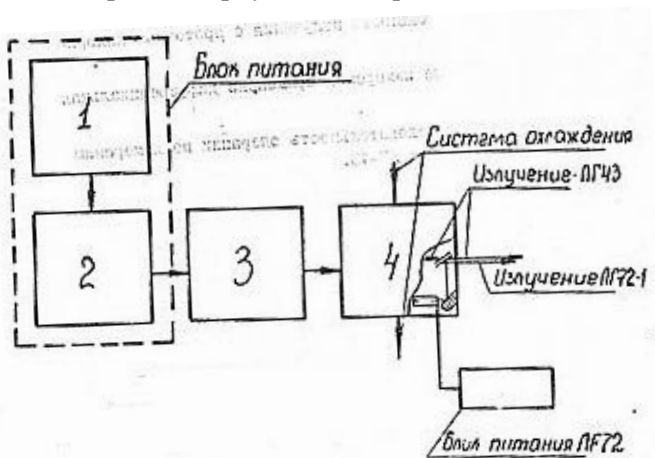


Рисунок 2- Блок-схема лазера ЛГ-43:

- 1- источник света; 2- стабилизатор тока; 3- областное сопротивление; 4- излучатель
Питание излучателя ЛГ-43 осуществляется от источника,

состоящего из блока питания и балластного сопротивления (рис. 2), обеспечивающего:

напряжение холостого хода $21 \div 22$ кВ;

напряжение горения $17 \div 19$ кВ;

регулировку тока от $3 \div 10$ до $30 - 40$ мА; нестабильность тока - не более 2%;

пульсация тока - не более 1%.

Лазер ЛГ-43 нашел широкое применение в научно-исследовательских лабораториях для изучения свойств и неоднородностей атмосферы, диагностики плазмы, разработки систем управления, связи, оптической локации и т.д.

Различные модификации лазера ЛГ-43 нашли применение в медицине (бескровная хирургия) и в технологии (резка стекла методом создания термонапряжений, изготовление типографических печатных форм и форм грамзаписи, подгонка резисторов, резка и раскрой тканей, пластмасс).

2 СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Энергетические параметры лазерного излучения (мощность непрерывного лазера и энергия W излучения импульсного лазера) относятся к важнейшим характеристикам лазеров. В большинстве случаев именно они определяют целесообразность и эффективность использования лазеров в технологии, измерительной технике.

Существующие средства измерения энергетических параметров лазерного излучения можно разделить на два вида: измерительные приборы и измерительные преобразователи. Структурная схема измерительного прибора - ваттметра или джоульметра лазерного излучения (рис. 3(а)) - содержит приемный (первичный) измерительный преобразователь 1, измерительное 2 и отсчетное или регистрирующее устройство 3.

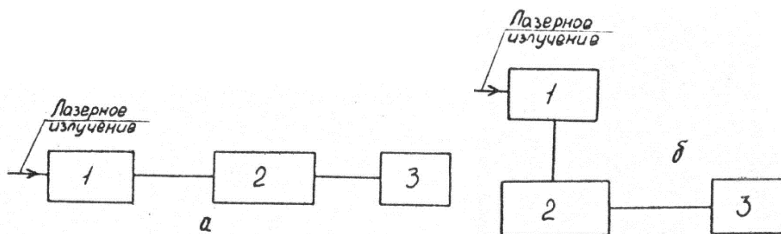


Рисунок 3 – Структурные схемы систем измерений: 1- приемный (первичный) преобразователь; 2- измерительное устройство; 3- регистрирующее устройство

В приемном преобразователе энергия лазерного излучения преобразуется в тепловую, механическую или электрическую энергию, т.е. в виды энергии, доступные для дальнейшего преобразования и измерения.

В средствах измерения энергетических параметров лазерного излучения чаще всего применяют приемные преобразователи: тепловые (калориметрические, термоэлектрические и др.); пироэлектрические; фотоэлектрические - фотопреобразователи с внешним эффектом (фотоэлементы, ФЭУ); фотопреобразователи с внутренним фотоэффектом (фотосопротивления, фотодиоды).

Различают приемные преобразователи поглощающего и проходного типа. В преобразователях поглощающего типа поступающая на выход энергия лазерного излучения почти полностью поглощается и рассеивается в нем (рис. 3(а)). В преобразователях проходного типа рассеивается лишь часть поступившей на вход энергии излучения, как правило, небольшая, а большая часть излучения проходит через преобразователь и может быть использована (рис. 3(б)).

Измерительное устройство средства измерения включает преобразовательные элементы и измерительную цепь. Их назначение - преобразование выходного сигнала приемного преобразователя в сигнал, подаваемый на отсчетное или регистрирующее устройство.

Первичный преобразователь часто конструктивно выполняют в виде отдельного блока.

3 КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

По виду используемых первичных измерительных преобразователей тепловые средства измерений энергетических параметров лазерного излучения классифицируют на калориметрические, болометрические, термоэлектрические, пневматические.

Достоинствами калориметрического метода являются его простота, возможность абсолютной градуировки путем косвенных измерений энергии или мощности постоянного электрического тока (так называемый метод замещения энергии лазерного излучения энергией электрического тока) и возможность достижения высокой точности измерений»

Любая калориметрическая система (рис. 4) содержит калориметрическое тело К, в котором протекает процесс выделения (или поглощения) тепла, и внешнюю оболочку О, с которой происходит теплообмен калориметрического тела путем теплопроводности, конвекции и излучения.

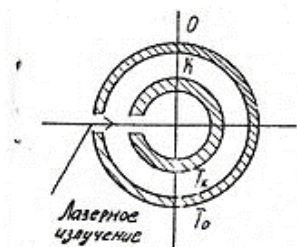


Рисунок 4- Принципиальная схема калориметра

Тепловой поток Φ от калориметра на оболочку в широкой области температур определяется как

$$\Phi = G_T \cdot (T_k - T_o), \quad (2)$$

где G_T - тепловая проводимость среды между калориметрическим телом и оболочкой; T_k - температура калориметрического тела; T_o - температура оболочки.

Уравнение теплового равновесия калориметрического тела с

оболочкой в калориметре переменной температуры в положении бесконечной температуропроводности вещества калориметрического тела имеет вид

$$P(t) = c \cdot \frac{dT(t)}{dt} + \frac{T(t)}{R_T}, \quad ((3))$$

где P(t)- мощность, рассеиваемая в калориметре; C- теплоемкость калориметрического тела; T=T_K-T_O; R_T=G⁻¹- тепловое сопротивление калориметра; t- время, независимая переменная.

Общий интеграл уравнения (3) имеет вид

$$T(t) = e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot A + \frac{1}{c} \cdot \int e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot P(t) dt, \quad ((4))$$

где T=R_T·C; τ-постоянная времени калориметра; A- постоянная интегрирования.

В случае, когда мощность, рассеиваемая в калориметре, не изменяется со временем, т.е. P(t)=P_O=Const, решение (4) имеет вид

$$T(t) = R_T \cdot P_O \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad ((5))$$

Если мощность в калориметре выделяется в виде периодической последовательности прямоугольных импульсов, у которой P_O, t_и и q - импульсная мощность, длительность и скважность соответственно, то

$$T(t \rightarrow \infty) = R_T \cdot P_O \cdot q \quad ((6))$$

Для случая, когда в калориметре рассеивается энергия одиночного прямоугольного импульса, решение (4) преобразуется к виду

$$T(t) = R_T \cdot P_O \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), 0 < t \ll t_u \quad ((7))$$

$$T(t) = R_T \cdot P_O \cdot \left(e^{-\frac{t}{\tau}} - 1\right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, t_u < t \ll \infty$$

Калориметры переменной температуры, работающие в режиме измерения средней мощности (или энергии импульса), вырабатывают электрический сигнал измерительной информации обычно в виде приращения напряжения, пропорционального приращению температуры чувствительного элемента, в свою очередь, пропорциональную средней мощности излучения, воздействующего на приемным элемент преобразователя. При этом уравнение преобразования имеет вид

$$V_{max} = P \cdot S + V_H, \quad (8)$$

где V_{max} - максимальное значение ЭДС термобатареи или падения напряжения на термометре сопротивления в условиях воздействия на калориметрическое тело излучения мощностью $P(t)$; S - коэффициент преобразования мощности; V_H - значение ЭДС или падения напряжения непосредственно перед, измерением мощности.

Наибольшее распространение в отечественной практике получил для работы в режиме измерения средней мощности преобразователь ИМО-2, который благодаря интенсификации стоков тепла по большому количеству коротких электродов термобатареи (рис. 5) от приемного элемента к массивной медной оболочке и далее в окружающую среду работает в режиме преобразования не только энергии, но и средней мощности лазерного излучения.

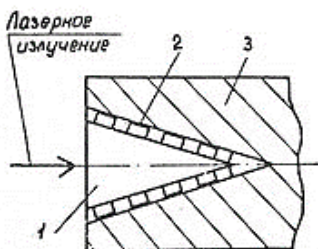


Рисунок 5- Схема преобразователя измерителя ИМО-2: 1- приемный элемент; 2- термобатарея; 3- оболочка

Параметры и краткие характеристики двух промышленных измерителей мощности калориметрического типа приведены в таблице 1.

Таблица 1- Калориметрические измерения мощности лазерного излучения

Тип	Диапазон измерений, Вт	Спектральный диапазон, мкм	Погрешность, %	Краткая характеристика
ИМО-2	$10^{-3} - 100$	$0,33 \div 10,6$	7	Калориметр переменной температуры. Черный медный конус
ОИМ-1	$10^{-4} - 10^{-1}$	$0,3 \div 3,53$	3	Калориметр переменной температуры. Сфера с обратным конусом. Черный и двойной корпус

4 ЗАДАНИЕ. ИЗМЕРИТЬ МОЩНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ СО₂-ЛАЗЕРА С ДИФФУЗИОННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

ПРИБОРЫ И ПРНАДЛЕЖНОСТИ: охлаждаемый калориметр, лазер ЛГ-43, хромель-никелевые термопары, ротаметр, микроамперметр постоянного тока ($0 \div 1 \mu\text{A}$), выпрямитель ВСА-6.

4.1 Проточный калориметр

Для измерения мощности лазерного излучения на уровне $10 \div 100$ Вт может быть применен серийный ваттметр ИМО-2. Это универсальный измеритель, позволяющий определять не только мощность, но и энергию одиночных импульсов излучения. Универсальность прибора, широкий диапазон измеряемых параметров ($10^{-2} \div 10$ Дж, $10^{-3} \div 100$ Вт) привели к сложности схемы, значительной стоимости и габаритам ИМО-2. Такой прибор мало пригоден к эксплуатации в производственных условиях.

Для решения задачи измерения мощности излучения лазера ЛГ-43 разработан калориметрический преобразователь с движущимся теплоносителем (так называемый проточный калориметр) (рис.6).

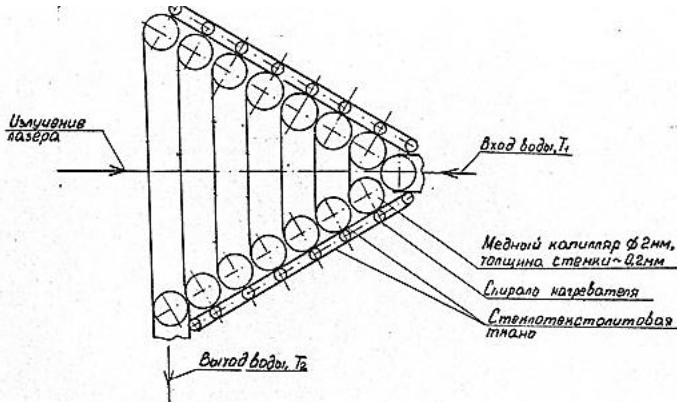


Рисунок 6- Конструкция «ловушки»

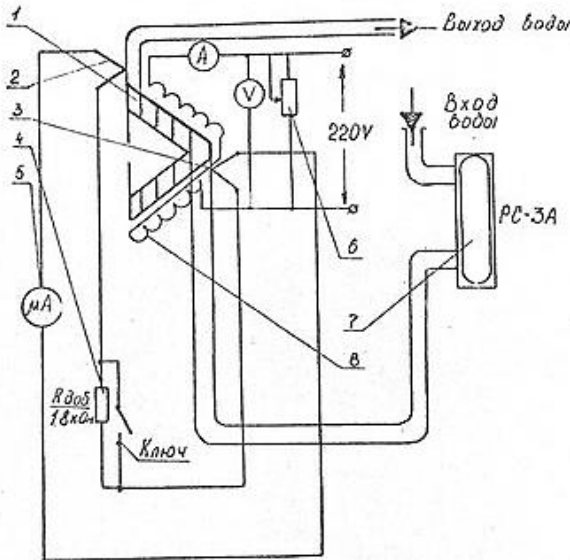


Рисунок7- Схема калориметрического измерителя мощности CO₂-лазера: 1- «ловушка»; 2- горячий спай термопары (T₂); 3- холодный спай термопары (T₁); 4- добавочное сопротивление; 5- микроамперметр; 6- реостат для регулировки напряжения 220 В; 7- ротаметр; 8- спираль нагрева

Процесс измерения мощности излучения сводится к измерению расхода протекающей жидкости (воды) и приращения ее температуры, т.е. к измерению разности температур калориметрической жидкости

между входом ее в приемный преобразователь и выходом из него (рис.7). Если принять, что вся поглощаемая мощность лазерного излучения идет на разогрев жидкости, а ее удельная теплоемкость C и расход G постоянны, то измеряемая мощность P в установившемся режиме может быть определена по формуле

$$P = a \cdot \rho \cdot C \cdot G \cdot \Delta T \quad ((9))$$

где ρ - плотность жидкости; a - коэффициент поглощения приемного элемента; ΔT - приращение температуры жидкости.

Приемный калориметр выполнен в виде конической «ловушки» (рис.6) является приближением к модели абсолютно черного тела ($a \approx 1$).

Излучение лазера нагревает воду в процессе ее движения по спирали приемника. Изменение температуры ΔT определяется с помощью термопары. Хромель-никелевая термопара собрана по дифференциальной схеме. Один спай термопары впаивается на входе охлаждающей жидкости, другой- на выходе. В эту цепь, соединяющую два спая, включается микроамперметр со шкалой 0-1 мкА и ключ с добавочным сопротивлением $R_{доб} = 1,8$ кОм, включенными параллельно. Когда ключ замкнут, то ток идет по нему, когда разомкнут - по $R_{доб}$. ЭДС вычисляется по формуле

$$V = \frac{I_1 \cdot I_2}{I_1 - I_2} \cdot R_{доб}, \quad ((10))$$

где I_1 и I_2 - токи через ключ и добавочное сопротивление.

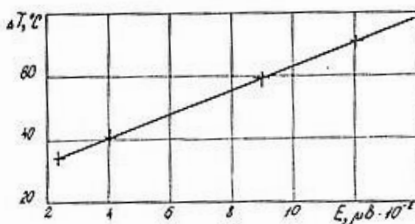


Рисунок 8- Зависимость ЭДС термопары от разности температур на входе в «ловушку» и на выходе из нее

Для построения тарифовочного графика (рис.8) использовалась нагревательная спираль, находящаяся на наружной поверхности

ловушки (рис.6). Нагревательная спираль включалась в электрическую схему (рис.7) и по величине тока и напряжения определялась мощность постоянного тока ($P_{эл}=I \cdot U$), подводимая к ловушке.

Проточные калориметры выгодно отличаются от других калориметрических измерителей. Их параметры можно легко регулировать, изменяя расход и теплофизические свойства калориметрической жидкости. Пределы измерения могут составлять от единиц милливатт до нескольких киловатт. В них почти полностью отсутствует зависимость показаний от юстировки пучка в измерительном преобразователе и от распределения плотности мощности по сечению пучка лазерного излучения. К недостаткам прибора можно отнести большую массу и небольшую надежность.

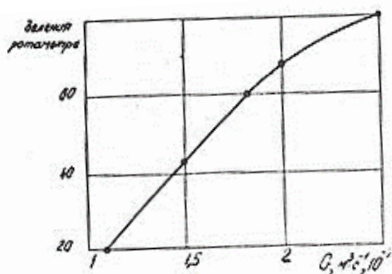


Рисунок 9- Зависимость показаний ротаметра от расхода жидкости

При измерениях лазерное излучение направляют в отверстие приемного конуса. В месте поглощения падающего лазерного излучения возможен локальный перегрев, который может привести к прогару приемного конуса и выходу калориметра из строя. Поэтому расход охлаждающей жидкости (рис.9) должен определяться из условия гарантированного предохранения конуса от прогара.

4.2. Порядок измерения

4.2.1. Перед выполнением операций по измерению мощности излучения лазера ЛГ-43 необходимо изучить инструкцию «Порядок включения и эксплуатации лазерной установки ЛГ-43» (раздел 5).

4.2.2. Подать определенный расход воды в калориметр, контролируя его с помощью ротаметра РС-3А (расход воды

определяется по графику на рис.9).

4.2.3. Включить лазер и направить его излучение в калориметр.

4.2.4. Через 3-4 минуты после выполнения п.4.2.3, снять показания I_1 , и I_2 микроамперметра при переключении ключа К (рис.7).

4.2.5. С помощью выражения (10) и тарированного графика (рис. 8) определить ΔT воды в калориметре.

4.2.6. По формуле (9) найти мощность излучения Р лазера.

4.2.7. Повторить п.п. 4.2.4.-4,2.6. пять раз. Получив значения $P_1 - P_5$, определить погрешность измерений мощности, задавшись доверительной вероятностью 0,95.

5. ПОРЯДОК ВКЛЮЧЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКИ ЛГ-43

1. Техника безопасности

1.1. К выполнению работ по управлению газовым лазером разрешается приступать после предварительного изучения конструкции лазера и принципов его работы.

1.2. Необходимо помнить, что луч, выходящий из излучателя лазера ЛГ-43, невидимый.

1.3. В случае отсутствия экранов, предохраняющих от лазерного излучения, работу необходимо проводить только в защитных очках.

1.4. При измерении параметров лазера ЛГ-43 запрещается смотреть в луч или его зеркальное отражение. С пути следования луча необходимо убрать случайные предметы, которые могут вызвать отражение луча.

1.5. КАТЕГОРИЧЕСКИ ЗАПРЕЩАЕТСЯ:

1.5.1. Работать при открытых крышках и закороченных блокировочных кнопках лазера;

1.5.2. Приступать к работе с лазером без твердого знания принципа его работы и расположения его основных узлов.

1.5.3. Работать в режимах, превышающих технически допустимые.

1.5.4. Вносить в зону излучения блестящие предметы и

производить визуально наблюдение прямого и отраженного излучения (даже в защитных очках).

1.5.5. Производить какие-либо переключения и изменения в электрической схеме лазера.

1.6. Эксплуатацию лазера ЛГ-43 производить в соответствии с «Правилами техники безопасности и производственных санитарии в электронной промышленности» и «Санитарными правилами при работе с лазерами».

2. Подготовка к работе

Внимание! Приступать к работе только при подсоединённых блокировочных и высоковольтных кабелях к стабилизатору тока, блоку балластных сопротивлений и излучателю (рис.2).

3. Порядок работы

3.1. Открыть края напорной магистрали в системе охлаждения излучателя лазера ЛГ-43, убедиться в наличии выхода, воды в магистраль слива. Кран напорной магистрали не следует открывать на полный расход во избежание разрушения стеклянной разрядной трубки.

3.2. Подключить источник питания лазера ЛГ-43 к сети переменного тока с напряжением 380 В.

3.3. Переведите выключатель стабилизатора тока «Сеть» в положение «Вкл.», при этом на передней панели должна загореться сигнальная лампочка «Сеть».

3.4. Прогрейте стабилизатор тока в течение 5 минут.

3.5. Нажмите кнопку «Пуск», при этом должна загореться сигнальная лампочка «Высокое».

3.6. Поверните плавно ручку «Мощность» до момента появления тока разряда излучателя лазера ЛГ-43. Увеличивайте ток нагрузки до 30 мА и $U_H = 15 \div 18$ кВ при помощи кнопок «Ток нагрузки», «Выше» и «Ниже» до появления генерации.

3.7. Контроль тока выведите по прибору «мА» на блоке питания.

4. Порядок включения установки

4.1. На стабилизаторе тока:

4.1.1. Уменьшить до минимума ток нагрузки, нажав на кнопку

«Ниже».

4.1.2. Выведите ручку «Мощность» в крайнее левое положение.

4.1.3. Нажмите кнопку «Стоп», при этом должна погаснуть сигнальная лампочка «Высокое».

4.1.4. Поставьте выключатель «Сеть» в положение «Откл.», при этом должна погаснуть сигнальная лампочка.

4.2. Отключите источник питания от сети 380 В.

4.3. Закройте кран напорной магистрали в системе охлаждения излучателя лазера ЛГ-43.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите основные процессы в активной среде CO_2 -лазера, приводящие к созданию инверсии населенностей.
2. Объясните необходимость введения гелия в состав активной смеси CO_2 -лазера.
3. Из какого материала выполнены окна оптического резонатора лазера ЛГ-43?
4. Назовите порядок включения и эксплуатации лазера ЛГ-43. Каковы значения тока и напряжения разряда?
5. Объясните состав структурной схемы средств измерения энергетических параметров лазерного излучения.
6. Нарисуйте блок-схему лазера ЛГ-43.
7. Каковы достоинства калориметрического метода измерения мощности и энергии лазерного излучения?
8. Составьте уравнение теплового равновесия калориметрического тела с оболочкой в калориметре переменной температуры.
9. Объясните решение уравнения теплового равновесий для случая
$$P(t)=P_0=\text{Const}$$
10. В чем достоинства проточного калориметра? Какова блок-схема измерителя мощности излучения с проточным калориметром?
11. Почему в схеме измерения применена дифференциальная термопара?
12. Объясните последовательность операции по измерению мощности излучения лазера ЛГ-43.

БИБЛЕОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ивашенко, П.А. Измерение параметров лазеров. [Текст] : учеб. пособие / П.А. Ивашенко, Ю.А. Калинин, Б.Н. Морозов - М.: Изд. стандартов, 1982. - 168с.
2. Бурдаев, Б.Я. Измерение энергетических параметров и характеристик лазерного излучения [Текст] / Б.Я. Бурдаев, Р.А. Валитов, М.А. Винокур.; под ред. А.Ф. Котюка. - М.: Радио и связь, 1981. - 286 с.
3. Ишанин, Г. Г. Приемники излучения [Текст] : учеб. пособие / Г. Г. Ишанин, Э. Д. Панков, В. П. Челибанов. - СПб.: Папирус, 2003. - 527 с.
4. Базовые лекции по электронике [Текст] / под общ. ред. В. М. Пролейко. - 2009.- 608 с. - ISBN 978-5-94836-215-1
5. Захаров, В. П. Лазерная техника [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. П. Захаров, Е. В. Шахматов ; Федер. агентство по образованию, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева. - Самара : Изд-во СГАУ, 2006. – 311 с. - ISBN 5-7883-0468-7

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРА НА КРИСТАЛЛЕ РУБИНА

Цель работы: изучение физических процессов в активной среде лазера, ознакомление с правилами эксплуатации и методами измерения энергии излучения, получение зависимости энергии излучения от уровня накачки и качества юстировки резонатора.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

В 1960 году Мейманом был создан первый лазер на кристалле рубина, положивший начало новому классу квантовых приборов - генераторов и усилителей оптического диапазона длин волн. За короткий период было предложено более ста твердых активных сред на основе диэлектриков. Такое быстрое развитие твердотельных лазеров обусловлено принципиальными особенностями этих приборов. Концентрация активных частиц в твердом материале намного превышает концентрацию частиц в газовых средах. Поэтому твердые активные среды характеризуются более высоким коэффициентом усиления, а это позволяет получать большие мощности генерации.

Наряду с рубиновыми лазерами широкое распространение получили лазеры на стекле, активированном неодимом, и лазеры на иттрий-алюминиевом гранате с примесью неодима (ИАГ:Nd). Сравнительная характеристика некоторых типов лазеров на рубине, гранате и стекле с неодимом приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Сравнительные параметры твердотельных лазеров

Параметры	Рубин	Гранат	Стекло
Длина волны излучения, мкм	0,6943	1,064	1,058
Пороговая энергия генерации, Дж	100	5	10-20
Энергия в моноимпульсном режиме, Дж	1500	1000	5000

КПД, %	1,0	1,5-2	5,0 - 6,0
Частота следования импульсов, Гц	1-10	100 и более	10

Из таблицы 1 следует, что в случаях, когда необходимо получить высокие уровни импульсной энергии и большие плотности мощности излучения при небольших частотах следования импульсов, более предпочтительным является использование стекла с неодимом.

Из стекла проще изготовить элементы больших размеров, оно обладает высокой оптической однородностью и низкой стоимостью (примерно 10% от стоимости изготовления рубиновых элементов). Невысокие допустимые частоты следования импульсов излучения на стекле объясняются их малой теплопроводностью.

Лазеры на ИАГ являются единственными из рассмотренных в таблице 1, которые обладают возможностью работы в непрерывном режиме при высоком уровне мощности излучения (до тысячи и более ватт).

Рубиновый лазер имеет преимущества, связанные с видимым диапазоном длины волны излучения, большой механической прочностью и теплопроводностью кристаллов, возможностью выращивания образцов высокого оптического качества.

1 ИНВЕРСИЯ НАСЕЛЕННОСТИ. ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА

В состоянии термодинамического равновесия на нижних энергетических уровнях квантовой системы находится больше частиц, чем на верхних. Число частиц в единице объема, находящихся на данном энергетическом уровне, называется населенностью уровня. В термодинамическом равновесии более высокие энергетические уровни имеют меньшую населенность.

Будем считать, что квантовая система имеет два уровня с энергиями E_n и E_m с населенностями соответственно N_n и N_m , причем $E_m > E_n$, $N_n > N_m$. Полное число частот в единице объема $N_0 = N_n + N_m$. При взаимодействии квантовой системы с электромагнитной волной

населенности уровней изменяются

$$N_m(t) = \frac{N_0}{2} - \frac{N_0 - 2N_m(0)}{2} e^{-2P_n(t)},$$

где $N_m(0)$ - число частиц на верхнем уровне при $t = 0$.

Поскольку $N_0 > 2N_m(0)$ населенность верхнего уровня увеличивается. Это означает, что квантовая система поглощает энергию электромагнитной волны. При $t = \infty$ величина $N_m(t)$ стремится к $N_0/2$, происходит выравнивание населенностей энергетических уровней. Это явление называется насыщением. Таким образом, в нормальных условиях, когда населенность верхних уровней меньше населенности нижних, может происходить только поглощение энергии электромагнитной волны.

Для получения усиления поля электромагнитной волны населенность верхнего уровня должна быть больше нижнего. Если частота электромагнитной волны равна частоте квантового перехода

$\nu_{mn} = \frac{E_m - E_n}{h}$ происходит уменьшение числа частиц с энергией E_m .

При этом электромагнитная волна усиливается. Состояние квантовой системы, при котором $N_m > N_n$ называется состоянием с инверсией населенности. Его принято характеризовать отрицательной температурой (рис.1):

$$T = - \frac{E_m - E_n}{k \ln(N_m/N_n)},$$

где k - постоянная Больцмана.

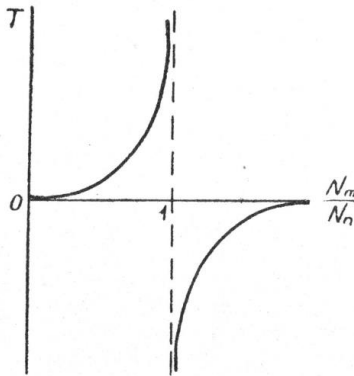


Рисунок 1 – Зависимость абсолютной температуры от отношения населенностей энергетических уровней

Состояние с инверсией населенности является неравновесным. Если не будет притока энергии извне, система быстро перейдет в равновесное состояние с положительной температурой за счет спонтанного излучения.

Переход от положительной к отрицательной температуре происходит через бесконечно большую температуру. В состоянии с отрицательной температурой квантовая система обладает запасом энергии, которую она может излучать в виде электромагнитных волн. Именно на этом явлении основана работа квантовых генераторов и усилителей.

2 СХЕМА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ ИОНОВ Cr^{+3} В КРИСТАЛЛЕ РУБИНА И ПОЛУЧЕНИЕ ИНВЕРСНОЙ НАСЕЛЕННОСТИ

В качестве активного вещества в рубиновом лазере используется розовый рубин, представляющий собой кристалл окиси алюминия Al_2O_3 содержащий в виде примеси $\sim 0,05\%$ ионы хрома Cr^{+3} ($\sim 1,6 \cdot 10^{19}$ ионов в 1 см^3). Именно эти ионы и являются активными центрами в рубиновом лазере.

Возбуждение кристалла рубина осуществляется методом оптической накачки с помощью импульсных источников света

большой мощности. Поглощая излучение накачки в зеленой и синей областях спектра, ионы хрома переходят с основного уровня 4A_2 (рис.2) на уровни 4A_1 и 4A_2 представляющие собой широкие полосы ($\sim 800 \text{ см}^{-1}$)*. Переход от $1/\lambda$ к энергии E осуществляется по формуле

$$E = \frac{hc}{\lambda}, \quad (1)$$

где $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Дж с}$; $C = 2,998 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

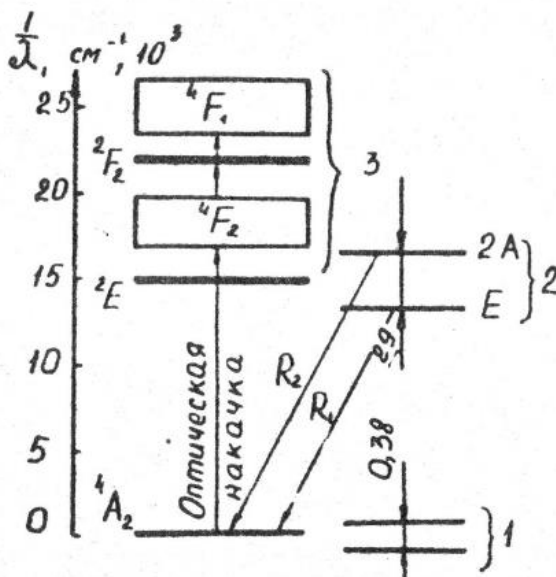


Рисунок 2 – Упрощенная схема энергетических уровней ионов Cr^{+3} в рубине

Кристаллическая решетка Al_2O_3 существенно изменяет структуру энергетических уровней иона хрома. Для наших целей нет необходимости пояснять смысл вводимых обозначений уровней.

Часть возбужденных ионов с этих уровней снова возвращается в основное состояние 4A_2 , а часть (путем безызлучательных переходов) попадает в состояние 2E , включающее два близко (ширина щели 29 см^{-1}) расположенных уровня $2A$ и E . Вероятность перехода с этих уровней в основное состояние очень мала, вследствие чего они имеют большое

время жизни (~ 3 мс). На таких уровнях, называемых метастабильными, происходит накопление возбужденных ионов.

Переходы с уровней E и 2A в основное состояние обуславливают возникновение двух красных линий люминесценции рубина R_1 ($\lambda=0,6943$ мкм) и R_2 ($\lambda=0,6929$ мкм) при температуре 300 К.

Если интенсивность накачки достаточно велика, то накопление ионов на уровнях 2E может привести к созданию инверсной населенности этих уровней по отношению к основному состоянию.

При помещении рубинового стержня в резонатор генерация возбуждается только на линии R_1 , которая имеет несколько большую вероятность перехода, чем линия R_2 . Время релаксации частиц между уровнями E и 2A очень мало ($\leq 10^{-7}$ с). Поэтому при возникновении генерации на линии R_1 , между ними быстро устанавливается термодинамическое равновесие, при котором населенности распределяются по закону Больцмана. Таким образом, генерация на линии R_1 предотвращает достижение порога самовозбуждения для линии R_2 .

Схематически работу рубинового лазера можно описать при помощи системы из трех уровней (рис. 3): 1 - основной уровень; 2 - метастабильный уровень, являющийся верхним уровнем лазерного перехода; 3 - уровень, на который приходят ионы хрома при поглощении излучения накачки. В такой системе нижним уровнем генерации является сильно заселенный основной уровень. Поэтому для достижения инверсной населенности необходимо, грубо говоря, половину всех ионов перевести с нижнего уровня 1 на верхний уровень 2. Для этого требуются очень большие мощности излучения накачки (отсюда высокий порог генерации).

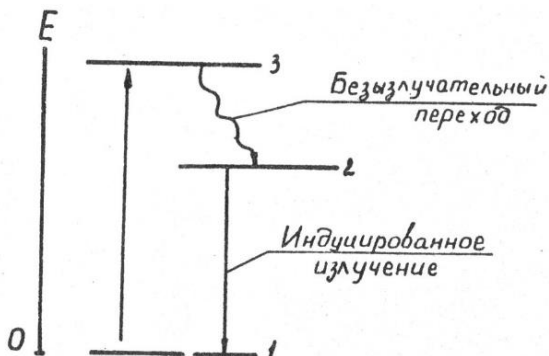


Рисунок 3 – Трехуровневая система с метастабильным уровнем 2

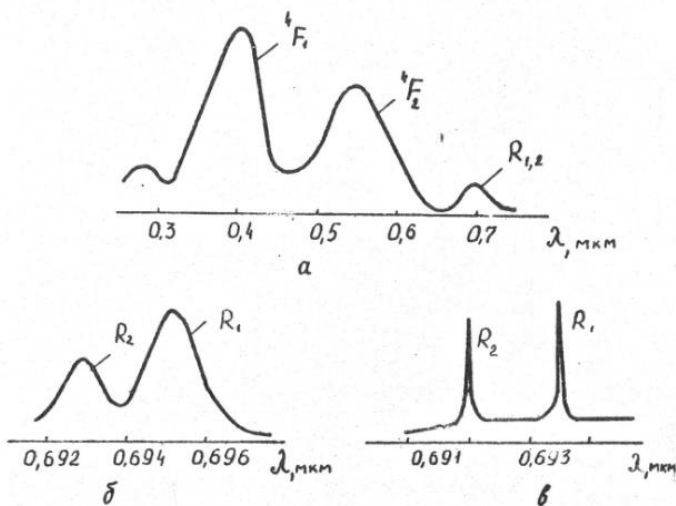


Рисунок 4 – Спектры поглощения (а) и излучения рубина при $T=300$ К (б) и при $T=77$ К (в)

На рис.4 приведены спектры поглощения (рис. 4,а) и излучения (рис. 4.б) рубина. Как видно из рисунка, понижение температуры кристалла до 77 К во много раз сужает ширину линий излучения и несколько сдвигает их в более коротковолновую часть спектра. Так, при температуре 300 К ширина линии излучения составляет 10 - 11 см^{-1} (~ 300 ГГц) и всего 0,3 см^{-1} (10 ГГц) при температуре 77 К.

Вследствие оптической анизотропия кристалла рубина излучение генерации имеет линейную поляризацию.

3 ВЫНУЖДЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Для наглядности сравнения спонтанного испускания (флюоресценции) с вынужденным испусканием, имеющим место в лазере, обратимся к рис. 5. Предположим, что кристалл рубина освещен строго монохроматичным направленным световым пучком с длиной волны λ_{ω} (например, зеленым светом). Если длина кристалла достаточно велика (порядка нескольких сантиметров), световой пучок полностью поглотится и будет наблюдаться флюоресценция, которая в отличие от возбуждающего света не обладает ни направленностью, ни монохроматичностью. Если рассматривать этот процесс как преобразование зеленого излучения в красное, то его можно охарактеризовать следующими особенностями:

Таблица 2 – Характеристика световых пучков

Возбуждающий световой пучок:	Испускаемый световой пучок:
монохроматичный;	две линии флюоресценции R_1 и R_2 ;
направленный;	испускание во всех направлениях;
энергия кванта $h\nu_{\omega}$;	энергия кванта $h\nu_c < h\nu_{\omega}$.

Предположим теперь, что рубиновый стержень помещен в оптический резонатор, состоящий из двух зеркал, одно из которых имеет коэффициент отражения $\tau_1 \approx 1$, а другое полупрозрачное, с коэффициентом отражения $\tau_2 \approx 0,5$. Осветим рубиновый стержень вспышкой мощной импульсной лампы, спектр излучения которой перекрывает диапазон длин волн от инфракрасной до ультрафиолетовой. Если достигается инверсия населенностей уровней 1 и 2 и выполняется пороговое условие лазерной генерации, возникает направленное, монохроматическое, когерентное излучение с высокой спектральной плотностью (рис.5.б).

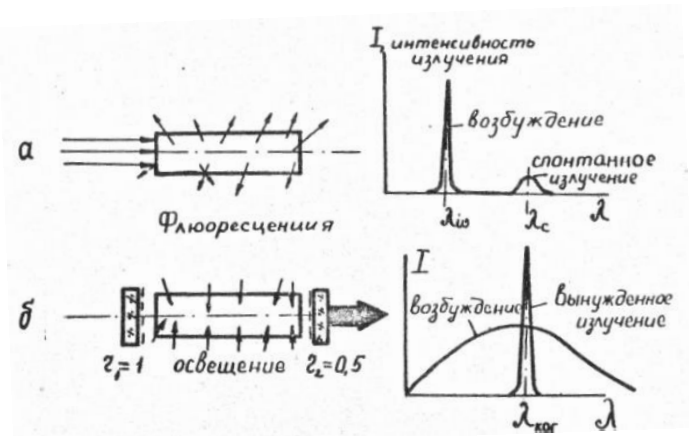


Рисунок 5 – Схемы спонтанного (а) и вынужденного (б) излучения рубина

4 ПИЧКОВАЯ СТРУКТУРА ГЕНЕРАЦИИ

Характерной особенностью генерации рубинового лазера является пиковая структура генерации. Излучение лазера представляет собой хаотическую последовательность отдельных пиков длительностью $\sim 0,1 - 1$ мкс. В типичных условиях, при длительности накачки $0,6 - 1$ мс, полная длительность генерации составляет $\sim 0,3 - 0,5$ мс.

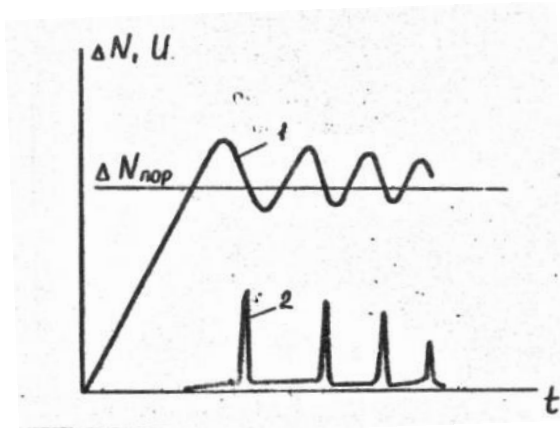


Рисунок 6 – Изменение ΔN (1) и U (2) при пиковой генерации рубинового лазера

Для расчета нестационарной генерации рубинового лазера надо составить дифференциальные уравнения, которые определяют изменение во времени инверсной населенности ΔN и плотности излучения U в резонаторе. Решение этих уравнений, полученное по ЭВМ, представлено на рис. 6. Генерация возникает, когда под действием излучения накачки достигается пороговое значение инверсной населенности $\Delta N_{пор}$, при котором коэффициент усиления равен коэффициенту потерь.

Однако плотность излучения U вначале невелика и скорость вынужденных переходов с верхнего уровня еще меньше, чем скоростей его заселения под действием накачки. Поэтому в течение некоторого времени (~ 1 мкс) ΔN продолжает возрастать, несколько превышая $\Delta N_{пор}$. Если пренебречь незначительным вкладом спонтанного излучения, то

$$\frac{dU}{dt} \sim (\Delta N - \Delta N_{пор})U. \quad (2)$$

Поэтому увеличение разности $\Delta N - \Delta N_{пор}$ приводит к быстрому росту U . Плотность излучения становится настолько большой, что скорость вынужденных переходов превышает скорость заселения верхнего уровня под действием накачки. В результате происходит быстрое уменьшение ΔN . Когда ΔN падает ниже $\Delta N_{пор}$, плотность излучения U начинает уменьшаться. Затем под действием накачки ΔN снова возрастает и весь процесс повторяется.

Процесс генерации импульсных лазеров характеризуют двумя основными величинами: энергией излучения во вспышке, представляющей собой суммарную энергию во всех пиках E_c , и временем генерации τ . Иногда также приводят мощность излучения, под которой понимают усредненное значение мощности за время генерации

$$P_{имп} = \frac{E_c}{\tau}. \quad (3)$$

В таблице 3 приведены параметры нескольких лазеров на рубине.

Таблица 3 – Параметры некоторых типов лазеров на рубине в режиме свободной генерации

Тип, фирма	Е, Дж	Частота повторения, Гц	τ , мс	Расходимость пучка, мрад
ГОР-100М	90-100	1/3 мин	1...1,2	40
ГОР-300	260-300	$3 \cdot 10^{-3}$	0,5	30
Арзни-206	2	2	0,5	30
Laser OA-120	150	2	0,5	10

Указанные в табл. 3 лазеры на рубине применяются при различных исследованиях в области физики, химии, биологии, медицины, а также для пайки, сварки, обработки тугоплавких и сверхпрочных материалов. На рис.7 в качестве примера показан момент пробивания отверстия в металлической фольге (лезвие бритвы) импульсом лазерного излучения.

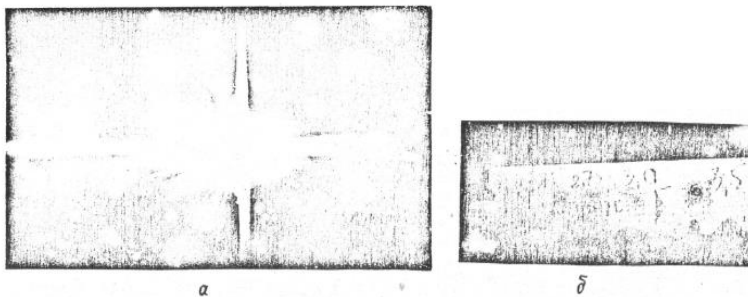


Рисунок 7 – Взаимодействие лазерного излучения с веществом – пластиной (а) и отверстия, полученные в результате этого взаимодействия (б)

5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

5.1 ЛАЗЕР ГОР-100М

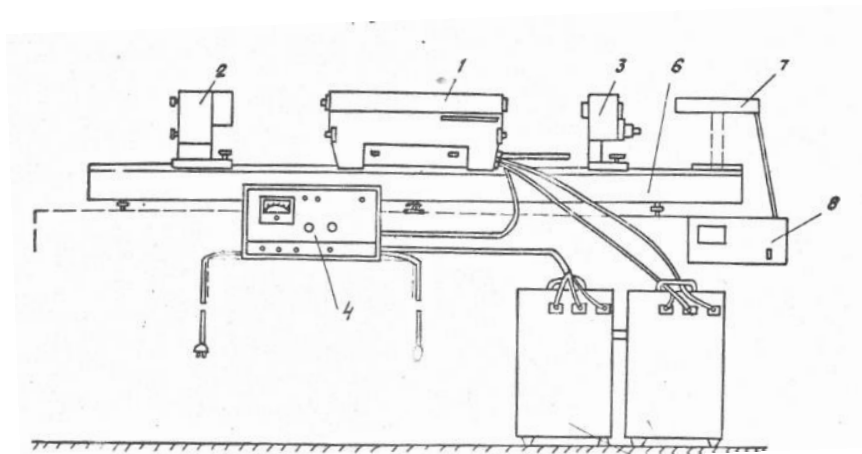


Рисунок 8 – Генератор оптический рубиновый: 1- оптическая головка; 2- выверитель; 3- стойка с выносным зеркалом резонатора; 4- пульт управления; 5- два блока накопительных конденсаторов; 6- станина оптической скамьи; 7,8 - юстировочный лазер

Лазер ГОР-ЮОМ предназначен для получения мощных монохроматических узконаправленных импульсов когерентного излучения. Лазер (рис. 8) состоит из следующих узлов: оптической головки 1, выверителя 2, стойки 3 с выносным зеркалом резонатора (на установке не используется), пульта управления 4, двух блоков 5 накопительных конденсаторов общей емкостью 600 мкф. В состав установки входит вспомогательный He-Ne лазер типа ЛГ78, предназначенный для юстировки (выставления на одной оси) оптических элементов и обрабатываемого объекта, которые устанавливаются на станине 6 оптической скамьи (ОСК-2).

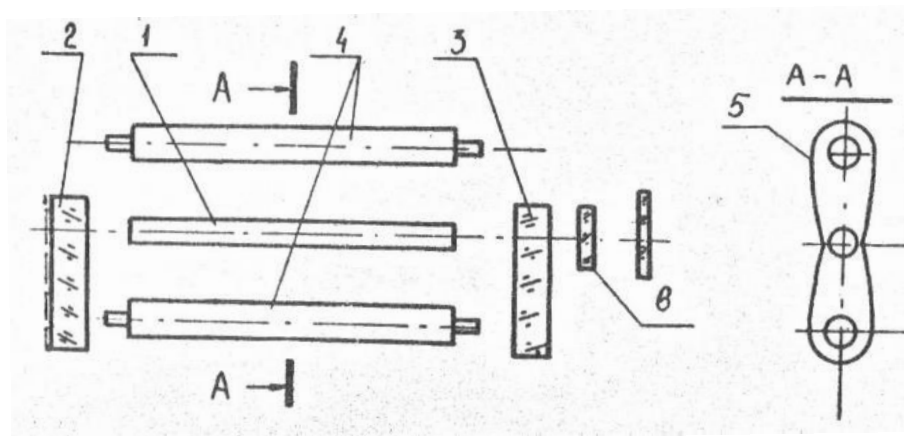


Рисунок 9 – Оптическая схема излучателя

Оптическая схема лазерной головки дана на рис. 9. Рубиновый стержень 1 располагается между зеркалами 2 и 3, которые образуют резонатор. Зеркало 2 имеет многослойное диэлектрическое покрытие с коэффициентом отражения 99,5 % для $\lambda=0,6940$ мкм (для увеличения стойкости покрытия зеркала в процессе эксплуатации прибора оно обращено к торцу рубинового стержня стороной без покрытия). Зеркалом 3 служит плоскопараллельная стеклянная пластина. Торцевой стержень рубинового стержня, обращенный к зеркалу 2, обработан на сферу большого радиуса для коррекции оптической неоднородности материала стержня.

Оптическая накачка рубинового стержня осуществляется импульсными лампами 4 типа ИФП-8000. Для более полного использования светового потока лампы и рубиновый стержень помещены в камеру - отражатель 5 с зеркальной внутренней поверхностью.

Сменные фокусирующие объективы 6 предназначены для концентрации излучения генератора на различные объекты.

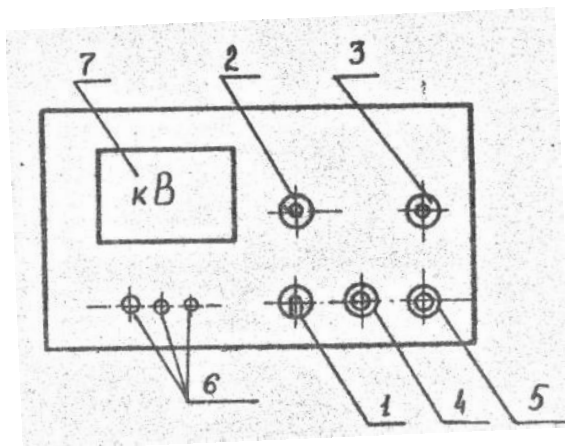


Рисунок 10 – Пульт управления

В пульте управления (рис. 10) размещено большинство элементов электрической части лазера. На панели пульта расположены: тумблер 1 включения прибора в сеть; лампа 2 контроля напряжения сети; лампа 3, сигнализирующая о подаче напряжения на первичную обмотку высоковольтного трансформатора; кнопки включения 4 и выключения 5 высоковольтного трансформатора; предохранители 6 и киловольтметр 7 контроля величины напряжения на накопительных конденсаторах.

5.2 ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Существует достаточно много измерительных систем для определения энергии лазерного излучения.

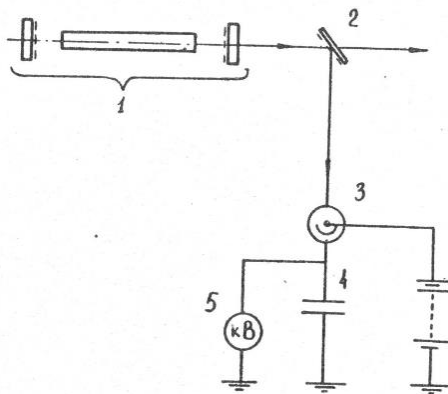


Рисунок 11 – Схема измерения энергии импульса излучения

Одна из простейших измерительных схем дана на рис.11. Импульс излучения, генерируемый лазером 1, попадает на стеклянную пластину 2, коэффициент отражения которой r , и частично отражается на фотоэлемент 3 типа Ф-5. В цепь катода фотоэлемента включен конденсатор 4, обладающий емкостью C . За счет импульса света в цепи фотоэлемента пройдет ток, и конденсатор зарядится до некоторого напряжения U , величина которого измеряется электрическим вольтметром 5 типа С-95. Заряд на конденсаторе можно подсчитать по формуле

$$Q = CU = \int I_{\phi} dt, \quad ((4))$$

где I_{ϕ} - фототок.

Если известна спектральная чувствительность k фотоэлемента (спектральной чувствительностью k фотоэлемента называют отношение фототока к световому потоку, вызвавшему данный фототок), то I_{ϕ} можно подсчитать по формуле

$$I_{\phi} = k \cdot \Phi, \quad ((5))$$

где Φ - величина части светового потока импульса излучения, отраженного стеклянной пластиной 2 на фотоэлемент.

Используя (4) к (5), энергию излучения E_{ϕ} , отраженного в

фотоэлемент, можно выразить соотношением

$$E_{\phi} = \int \Phi dt = \frac{1}{k} \int I_{\phi} dt, \quad ((6))$$

что дает

$$E_{\phi} = \frac{CU}{k}. \quad ((7))$$

Полная энергия E_c импульса лазера рассчитывается по формуле

$$E_c = \frac{CU}{kr}. \quad ((8))$$

где r зависит от сорта стекла и угла отражения.

ЗАДАНИЕ 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГА ГЕНЕРАЦИИ

1. Установите на оптической скамье лазера вместо выверителя 2 (рис. 8) экран в виде диффузора.
2. Подайте на конденсаторы напряжение, заведомо меньшее порогового (1500 В).
3. Проведите наблюдение за появлением генерации на экране при постепенном повышении (по 200 Вольт) напряжения зарядки конденсаторов.
4. Зафиксируйте момент появления генерации, когда на экране возникнет яркое красное пятно диаметром ≈ 5 мм.
5. Определите пороговую энергию накачки рубина. Энергия накачки берется равной электрической энергии батареи конденсаторов.

ЗАДАНИЕ 2. ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРА

Измерение энергии излучения в данной работе производится с помощью измерителя типа ИКТ-1М.

1. Установите на оптической скамье 6 лазера (рис.8) измерительную головку (на место выверителя 2).
2. Подготовьте к работе лазер; включите питание измерительного блока прибора ИКТ-1М.
3. Проведите измерение энергии излучения при нескольких значениях напряжения зарядки конденсаторов ($U = 2,5$ кВ; 3,0 кВ; 3,25

кВ; 3,5 кВ).

4. По результатам измерений постройте зависимость энергии излучения лазера от энергии накачки рубинового стержня.

5. Определите КПД рубинового лазера.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Расскажите о характерных параметрах твердотельных лазеров и областях их применения.

2. В чем заключается явление инверсии населенности энергетических уровней?

3. Объясните понятие "отрицательная температура активной среды". Чем определяется величина отрицательной температуры?

4. Нарисуйте схему энергетических уровней ионов Cr^{+3} в кристалле рубина.

5. Укажите характерные особенности трехуровневой энергетической системы.

6. Как влияет температура рубина на спектр его излучения?

7. Чем отличается флюоресцентное излучение от вынужденного?

8. Объясните механизм пиковой структуры генерации.

9. Нарисуйте оптическую схему излучателя лазера.

БИБЛЕОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Захаров, В. П. Лазерная техника [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. П. Захаров, Е. В. Шахматов ; Федер. агентство по образованию, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева. - Самара : Изд-во СГАУ, 2006. – 311 с. - ISBN 5-7883-0468-7

2. Паршаков, А. Н. Введение в квантовую физику [Текст] : учеб. пособие для вузов по техн. направлениям подгот. и специальностям / А. Н. Паршаков. - СПб. : Краснодар : Лань, 2010. - 351 с. - ISBN = 978-5-8114-0982-2.

3. Звелто, О. Принципы лазеров [Текст] / Пер. с англ. Д. Н. Козлова, С. Б. Созинова, К. Г. Адамович; под науч. ред. Т. А. Шмаонова. - М.: Краснодар, 2008. - 720 с.

4. Пихтин, А.Н. Оптическая и квантовая электроника [Текст] : учеб. пособие для вузов / А.Н. Пихтин. - М.: Высшая школа, 2001. - 573 с.

5. Измерение энергетических параметров и характеристик лазерного излучения [Текст]/ под ред. А.Ф.Котюка. - М.: Радио и связь, 1981. - 288 с.

Учебное издание

ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Методические указания

Составители: Захаров Валерий Павлович
Артемьев Дмитрий Николаевич

Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева
443086, Самара, Московское шоссе, 34