

КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ

КАФЕДРА КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И РАДИОСПЕКТРОСКОПИИ

ЛАБОРАТОРНЫЙ
ПРАКТИКУМ
ПО КУРСУ

КВАНТОВАЯ РАДИОФИЗИКА

**ЛАЗЕР
НА КРИСТАЛЛЕ ИТТРИЙ АЛЮМИНИЕВОГО
ГРАНАТА С НЕОДИМОМ**

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

Никитин С.И.
Низамутдинов А. С.
Нуртдинова Л. А.

2013 г.

УДК 535.14; 535.374:621.375.8

Методическое пособие к лабораторной работе «Оптический квантовый генератор на кристалле иттрий алюминиевого граната с неодимом» по курсу «Квантовая радиофизика» для бакалавров по направлению «Радиофизика», для специалистов по специальности «Радиофизика и электроника» Института физики.

Составители: доц. Никитин С.И.
асс. Низамутдинов А. С.
н.с. Нуртдинова Л. А.

Рецензент:

Институт физики Казанского (Приволжского) федерального университета,
2013

Введение

Цель работы: на примере лазера на алюмоиттриевом гранате с неодимом ознакомиться с физическими принципами работы лазеров в режиме свободной генерации, а также в режиме модуляции добротности; приобрести навыки юстировки резонатора и измерения энергии и длительности импульса генерации; измерить зависимости энергетических характеристик генерации от мощности накачки; рассчитать коэффициент полезного действия лазера, его пороговую мощность и эффективность системы накачки.

Для выполнения работы студенты должны обладать знаниями о свойствах спонтанных и вынужденных переходов квантовых систем, о принципах усиления электромагнитного излучения в квантовых системах, свойствах открытых резонаторов, продольных и поперечных модах открытых резонаторов, должны иметь представление о различных режимах работы лазеров (стационарный режим, режим модуляции добротности).

1 Твердотельные оптические квантовые генераторы

В оптических квантовых генераторах (лазерах) на твердых телах в качестве активных сред используются кристаллические или аморфные (стекла) среды, в которые вводятся примеси некоторых элементов. Индуцированное излучение и генерация происходят при переходах между энергетическими уровнями активных центров (ионов примеси, центров окраски), которые называют активаторами. Концентрация примесных ионов в матрице обычно составляет не более нескольких процентов.

Активные примесные центры находятся в электрическом поле кристаллической решетки. Это приводит к расщеплению и уширению дискретных уровней энергии активаторов. Характер и величина внутрискристаллического поля сказываются как на ширине и положении полос поглощения активаторов, так и на величине вероятностей излучательных и безызлучательных переходов.

Из всего многообразия сред, принципиально пригодных для создания лазеров, на практике наиболее широко используются лишь некоторые из них. Наиболее распространенными в настоящее время являются среды, активированные ионами Nd^{3+} , например, стекло (фосфатное или силикатное), иттрий-алюминиевый гранат $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$, ванадат иттрия YVO_4 . Для получения инверсной населенности в твердотельных ОКГ обычно используется метод оптической накачки. Поскольку в двухуровневой квантовой системе с помощью оптической накачки невозможно создать условия инверсной заселенности из-за одинаковой вероятности процессов поглощения и вынужденного излучения (подробнее см., например, [1-5]), оптические квантовые генераторы работают либо по трехуровневой, либо по четырехуровневой схеме.

1.1 Четырехуровневая схема лазерной генерации

На рисунке 1.1 представлена схема состояний активной среды, работающей по четырехуровневой схеме лазерной генерации. Накачка в данном случае схожа с накачкой в трехуровневой схеме лазерной генерации, и осуществляется за счет переходов между состояниями 1 и 4, а также 4 и 3. Вынужденный переход поглощения между состояниями 1 и 4 имеет вероятность W_{14} и переводит активаторы из основного состояния 1 в возбужденное состояние 4. Далее быстрый безызлучательный переход с состояния 4 на состояние 3, имеющий вероятность ω_{43} , переводит активаторы на энергетическое состояние, из которого и осуществляется вынужденный переход испускания света, имеющий вероятность W_{32} . Именно между состояниями 3 и 2 создается инверсная населенность, которая необходима для получения оптического усиления. На рисунке 1.1 ω_{43} – вероятность спонтанного перехода с состояния 4 на состояние 3.

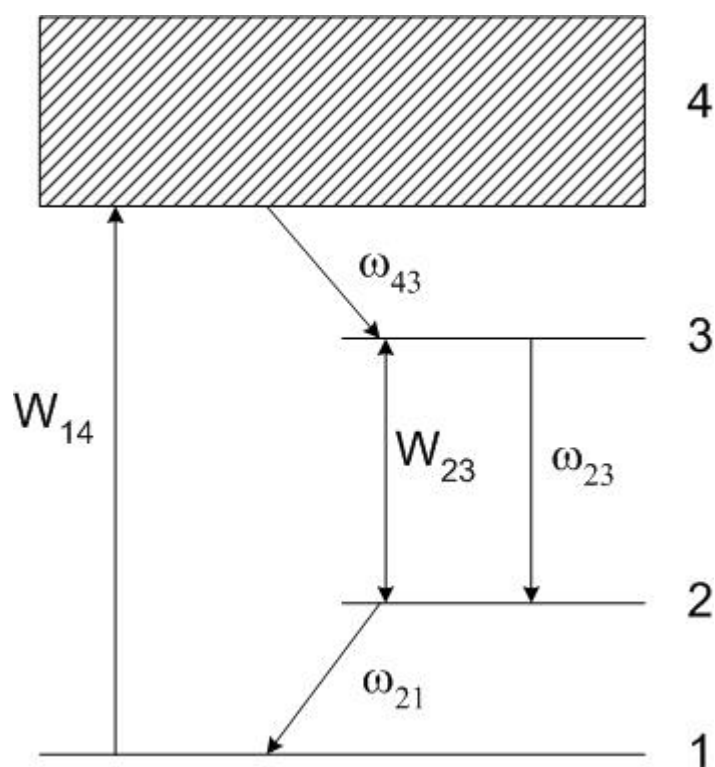


Рис.1.1 Четырехуровневая схема лазера

Принципиальной особенностью данной схемы лазерной генерации является то, что каналы накачки и лазерной генерации в ней оказываются разделены, поскольку в этой схеме в качестве нижнего лазерного уровня

выступает не основное, а возбужденное состояние квантовой системы, обозначенное на рис. 1.1 цифрой 2. То есть лазерная генерация развивается за счет вынужденного излучательного перехода с возбужденного метастабильного состояния 3 на возбужденное состояние с меньшей энергией 2. Далее быстрый безызлучательный переход с состояния 2 на состояние 1, имеющий вероятность ω_{21} , с высокой скоростью опустошает нижний уровень лазерной генерации 2.

В этом случае при условии $E_2 - E_1 \gg kT$ (то есть состояния 1 и 2 разделены достаточным энергетическим зазором, чтобы состояние 2 не было населено при данной температуре активной среды) нижний лазерный уровень до включения излучения накачки пуст, и, следовательно, нет необходимости расходовать мощность накачки на выравнивание населенностей. Для того чтобы получить инверсию населенностей между состояниями 3 и 2, необходимо накопить на уровне 3 порядка $N \exp(-E_2/kT)$ частиц. При $E_2 \sim kT$ четырехуровневая схема переходит в трехуровневую.

1.2 Энергетические характеристики лазерной генерации

Лазерная генерация возникает, если усиление электромагнитной волны за один полный проход резонатора превышает ее ослабление за счет потерь (полезные потери – K_r , связанные с выходом излучения через полупрозрачное зеркало, и суммарные потери внутри резонатора – ρ , называемые вредными).

Рассмотрим условие возникновения лазерной генерации [1].

При распространении электромагнитной волны интенсивности I в активной среде вдоль некоторого направления происходит усиление ее интенсивности:

$$dI = G \cdot I \cdot dx. \quad (1.1)$$

Величина G называется коэффициентом квантового усиления активной среды. Этот коэффициент характеризует относительное изменение интенсивности волны при прохождении через элементарный слой среды.

Коэффициент усиления активной среды зависит от величины разности населенностей энергетических уровней. Для системы из двух энергетических уровней, причем цифрой 2 обозначим уровень с большей энергией, а цифрой 1 – с меньшей, можно показать [1], что:

$$G = (B_{12} h \nu_{21} / c) (N_2 - N_1 g_2 / g_1), \quad (1.2)$$

где B_{12} - коэффициент Эйнштейна для индуцированного поглощения, ν_{21} – частота колебаний электромагнитного поля излучения, резонансного переходом между энергетическими уровнями 1 и 2, N_2 и N_1 – населенности энергетических уровней 2 и 1 соответственно (концентрация частиц, находящихся в соответствующем энергетическом состоянии), g_2 и g_1 - статистические веса (кратность вырождения) соответствующих уровней.

Формула 1.2 выражает условие инверсии населенностей, и из нее видно, что для того, чтобы коэффициент усиления принимал положительные значения необходимо, чтобы населенность на возбужденном состоянии (N_2) была больше, чем на нижнем (N_1).

Очевидно, если учесть как усилительные свойства активной среды, так и потери, то изменение интенсивности волны в активной среде будет выражаться следующим соотношением:

$$dI = (G - \rho) \cdot I \cdot dx, \quad (1.3)$$

где α' - суммарные потери резонатора, за исключением потерь на вывод излучения из резонатора. Проинтегрировав уравнение (1.3) в пределах полного обхода резонатора, и учитывая, что усиление и потери имеют место лишь в объеме активной среды ($2l$), получим:

$$I = I_0 \exp[2l(G - \rho)], \quad (1.4)$$

где I_0 - начальная интенсивность излучения.

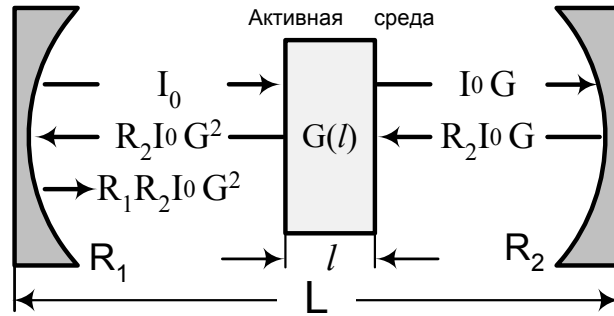


Рис.1.2 Схема развития лазерной генерации

После двух отражений интенсивность излучения (рис.1.2) составит:

$$I' = I_0 \exp[2l(G - \rho)] \cdot R_1 \cdot R_2, \quad (1.5)$$

где R_1 и R_2 – коэффициенты отражения зеркал резонатора.

Излучение будет незатухающим, когда интенсивность I' будет больше начальной или равна ей, т.е. $I' \geq I_0$. Логарифмируя это условие, получим

$$G \geq \rho + \frac{1}{2l} \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right) = G_{\text{пор}} \quad (1.6)$$

– **условие самовозбуждения лазера.** Генератор самовозбудится, если коэффициент квантового усиления его активной среды больше или равен пороговому коэффициенту усиления $G_{\text{пор}}$, определяемому равенством (1.6).

Величина K_r , определяемая как

$$K_r = \frac{1}{2l} \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right), \quad (1.7)$$

называется коэффициентом потерь на вывод излучения из резонатора, или **коэффициентом полезных потерь**, и имеет размерность см^{-1} .

Коэффициент усиления активной среды, работающей по четырехуровневой схеме, как уже было отмечено выше, определяется инверсной населенностью:

$$G = (hv/c) B_{32} \Delta N, \quad (1.8)$$

где hv – энергия одного кванта; c – скорость света в среде; B_{32} – коэффициент Эйнштейна для вынужденного перехода в канале генерации (вынужденный переход происходит между состояниями, условно обозначенными цифрами 3 и

2); $\Delta N = N_3 - N_2$ – разность населенностей для случая невырожденных состояний 2 и 3. Здесь мы приняли, что состояния 3 и 2 являются невырожденными, что вполне соответствует используемым в практике активным средам.

Для четырехуровневой схемы генерации лазера в приближении малого заселения нижнего лазерного уровня ($N_2 \sim 0$):

$$G = (h\nu/c) B_{32} N_3. \quad (1.9)$$

При стационарном возбуждении число частиц, переведенных оптической накачкой на уровень 3, должно равняться числу частиц, покинувших этот уровень. При отсутствии генерации в канале 3-2:

$$B_{14} U_{\text{нак}} = N_3 W_{32}. \quad (1.10)$$

Здесь $B_{14} U_{\text{нак}}$ – скорость накачки верхнего лазерного уровня, определяющая число активных центров, возбужденных на уровень 4 и перешедших на уровень 3; $U_{\text{нак}}$ – объемная плотность энергии накачки в резонаторе, W_{32} – сумма вероятностей переходов из состояния 3 в состояние 2.

С учетом формул (1.2) и (1.3) имеем

$$G = \frac{h\nu}{c} \frac{B_{32} \eta B_{14} U_{\text{нак}}}{W_{32}}. \quad (1.11)$$

Генерация лазера возможна, когда коэффициент усиления равен или превышает коэффициент суммарных потерь $G \geq K_r + \rho$, что приводит к пороговому условию на скорость накачки верхнего лазерного уровня

$$B_{14} U_{\text{нак}}^{\text{пор}} = \frac{(K_r + \rho) c W_{32}}{h\nu B_{32}}. \quad (1.12)$$

Пороговая скорость накачки $B_{14} U_{\text{нак}}^{\text{пор}}$ – это та минимальная скорость накачки, превысив которую можно получить лазерную генерацию.

С учетом сказанного мощность свободной генерации лазера определяется выражением:

$$W_{\text{ген}} = lS \cdot N \cdot h\nu_{\text{ген}} (B_{14} U_{\text{нак}} - B_{14} U_{\text{нак}}^{\text{пор}}), \quad (1.13)$$

где l и S – длина и площадь поперечного сечения объема, в котором происходит оптическое усиление; N – число активных центров в единице объема; $h\nu_{ген}$ – энергия одного кванта генерируемого лазерного излучения.

Мощность выходящего из резонатора потока излучения лазерной генерации с учетом вредных потерь, а также отражения от зеркал резонатора равна

$$S_{ген} = W_{ген} \frac{K_r}{K_r + \rho}. \quad (1.14)$$

С учетом формул (1.11) - (1.14) мощность выходящего из резонатора светового потока можно представить в виде:

$$S_{ген} = \frac{lS \cdot Nc \cdot W_{32} (G - K_r - \rho) \cdot K_r}{B_{32} (K_r + \rho)}, \quad (1.15)$$

Зависимость мощности генерации от коэффициента полезных потерь K_r представлена на рис. 1.3. Здесь точке О соответствует стопроцентное отражение от зеркал (за пределы резонатора излучение не выходит); в точке А коэффициент усиления сравнивается с коэффициентом суммарных потерь ($K = K_r + \rho$ – пороговое условие генерации). Оптимальное значение коэффициента полезных потерь лазера достигается при:

$$K_r^{opt} = \sqrt{G \cdot \rho} - \rho. \quad (1.16)$$

Данное выражение можно получить, взяв производную выражения 1.15 по параметру K_r и приравняв ее нулю.

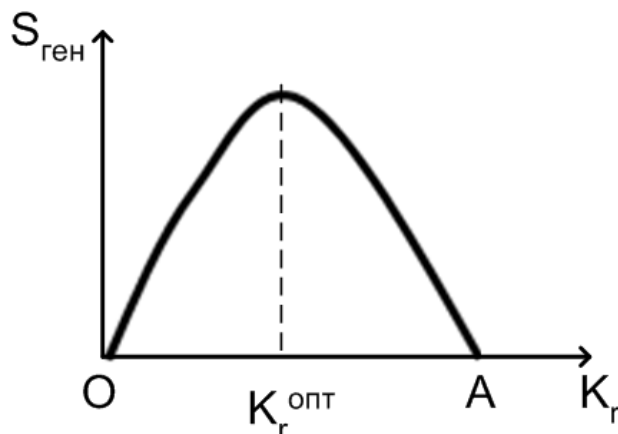


Рис. 1.3. Зависимость мощности генерации от коэффициента полезных потерь K_r .

Существование максимума объясняется тем, что с одной стороны, увеличение коэффициента полезных потерь приведет к увеличению генерируемого выходного потока за пределы резонатора, а с другой – к уменьшению поля в резонаторе и соответственно коэффициента усиления.

1.3 Устройство и принцип работы лазера на кристалле $\text{Nd}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$

Основными элементами твердотельного лазера на кристалле иттрий-алюминиевого граната, активированного ионами Nd^{3+} ($\text{Nd}^{3+}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$), являются: резонатор с помещенной в него активной средой, источник накачки с оптической системой накачки, источник питания и схема запуска.

Источником накачки для твердотельных лазеров служат лампы либо лазерные источники света. Излучаемая источником накачки световая энергия фокусируется в активной среде и частично поглощается ею. Примесные ионы Nd^{3+} активной среды переходят в возбужденные состояния, и создается инверсия населенностей. Возникают условия для усиления светового излучения. При превышении коэффициента оптического усиления над суммарными потерями резонаторе в последнем возбуждаются электромагнитные колебания. Через полупрозрачное зеркало резонатора осуществляется отбор энергии электромагнитного поля, и на выходе

оптической излучающей головки создается монохроматический направленный пучок света.

Активный элемент лазера – представляет собой кристалл иттрий-алюминиевого граната (химическая формула $Y_3Al_5O_{12}$), в кристаллической решетке которого часть ионов иттрия Y^{3+} замещена примесными ионами неодима Nd^{3+} . Электронная конфигурация иона Nd^{3+} – $[Xe]4f^3$, поэтому оптические свойства кристалла $Nd^{3+}:Y_3Al_5O_{12}$ определяются электронными переходами между состояниями электронной 4f-оболочки иона Nd^{3+} (рис. 1.4) [2,6].

В квантовой механике состояние электрона в атоме описывается четырьмя квантовыми числами: главным квантовым числом n (характеризует энергию электронов, занимающих данный энергетический уровень), орбитальным квантовым числом l (определяет квадрат углового момента количества движения $l = \hbar\sqrt{l(l-1)}$) и принимает значения $l=0,1\dots n-1$), орбитальным магнитным квантовым числом m_l (определяет проекцию углового момента на некое выделенное направление и принимает значения $m_l=-l,-(l-1)\dots l$) и спиновым квантовым числом m_s (определяет проекцию вектора спина s на некое выделенное направление и принимает значения $m_s=\pm 1/2$). В случае многоэлектронных атомов каждый (i -ый) электрон электронной оболочки атома можно было бы охарактеризовать орбитальным l_i и спиновым s_i векторами момента количества движения. Однако удобнее пользоваться значительно менее подробной характеристикой, объединяя (связывая) эти моменты по правилу векторного сложения в суммарные моменты количества движения.

Порядок сложения этих моментов l_i и s_i зависит от относительной величины различных взаимодействий между электронами атома. Наиболее распространенной является так называемая связь Рассела-Саундерса (нормальная), которая осуществляется, когда электростатическое взаимодействие электронов (кулоновское отталкивание) велико по сравнению со спин-орбитальным взаимодействием. При такой связи орбитальные и спиновые моменты оптических электронов (моменты количества движения внутренних полностью заполненных оболочек полностью скомпенсированы и полные их

моменты равны нулю) в отдельности складываются по правилам векторного сложения в суммарные орбитальный L и спиновый S моменты атома: $L = \sum l_i$ и $S = \sum s_i$, а полный момент количества движения атома J определяется как их векторная сумма: $J = L + S$. Векторам J , L и S соответствуют квантовые числа J , L и S , которые имеют смысл наибольших значений, которые могут принимать проекции векторов J , L и S на избранное направление. Соответствующие проекции, следовательно, могут принимать значения (в единицах \hbar): $m_L = -L, -(L-1) \dots (L-1), L$ и $m_S = -S, -(S-1) \dots (S-1), S$. При заданных L и S квантовое число J может принимать значения: $J = |L + S|, |L + S - 1| \dots |L - S|$.

Каждый из трех оптических 4f-электронов иона Nd^{3+} характеризуется главным квантовым числом $n=4$, орбитальным квантовым числом $l=3$ и спиновым квантовым числом $m_s = \pm 1/2$, а орбитальное магнитное квантовое число может принимать значения $m_l = -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3$. Согласно принципу Паули в ионе не может быть двух и более электронов с одинаковым набором этих четырех квантовых чисел. Порядок заполнения орбиталей определенного подслоя (в данном случае с $n=4$) регламентируется правилом Хунда, согласно которому, во-первых, суммарное значение спинового квантового числа электронов данного подслоя должно быть максимальным. Это означает, что в каждой из орбиталей подслоя заполняется сначала один электрон, и только после исчерпания незаполненных орбиталей на эту орбиталь добавляется второй электрон. А во-вторых, при совпадении спиновых квантовых чисел суммарный орбитальный момент L должен быть максимальным. Таким образом, три оптических электрона иона Nd^{3+} заполняют f-оболочку с одинаковыми спиновыми квантовыми числами $1/2$, поэтому суммарное спиновое число принимает значение $S=3/2$. Так как главное квантовое число и орбитальный момент тоже одинаковы для этих электронов, их орбитальные магнитные квантовые числа должны отличаться, а суммарный орбитальный момент при этом должен принять максимально возможное значение. Эти условия выполняется, если $m_{l1}=3, m_{l2}=2, m_{l3}=1$. При этом суммарный орбитальный момент $L=6$, полный момент количества движения J принимает значения $9/2, 11/2, 13/2, 15/2$.

Действие кристаллического поля на электроны 4f оболочки экранировано заполненными 5s и 5p оболочками иона неодима. В результате расщепленные в электрическом поле кристалла уровни (расщепление Штарка) группируются около значений энергии близких с положением уровней свободного иона [7]. Электронной конфигурации иона Nd^{3+} ($4f^3 5s^2 5p^6$) соответствует набор дублетных и кватерных термов. Напомним, что символ, характеризующий каждый такой терм, имеет вид $^{2S+1}L_J$. Разрешенные значения L , а именно $L = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, \dots$, принято обозначать прописными буквами соответственно: S, P, D, F, G, H, I... . Таким образом, исходя из приведенных соображений, основным для иона Nd^{3+} является кватерный терм $^4I_{9/2}$, а основным состоянием (с наименьшей энергией) – состояние $^4I_{9/2}$.

На рис. 1.4 представлена упрощенная схема энергетических уровней иона неодима Nd^{3+} , между которыми совершают переходы три 4f электрона внутренней оболочки иона. Спектр поглощения иона неодима состоит из большого числа сравнительно узких полос, наиболее интенсивные из которых отвечают длинам волн 240, 350, 520, 580, 740, 800 и 900 нм. Это переходы на уровни $^4F_{5/2, 7/2}$, $^4S_{3/2}$, $^2H_{9/2}$, которые на рисунке 1.4 условно объединены и обозначены цифрой 4. После поглощения энергии накачки ион неодима за достаточно короткое время $< 10^{-8}$ с переходит в состояние $^4F_{3/2}$.

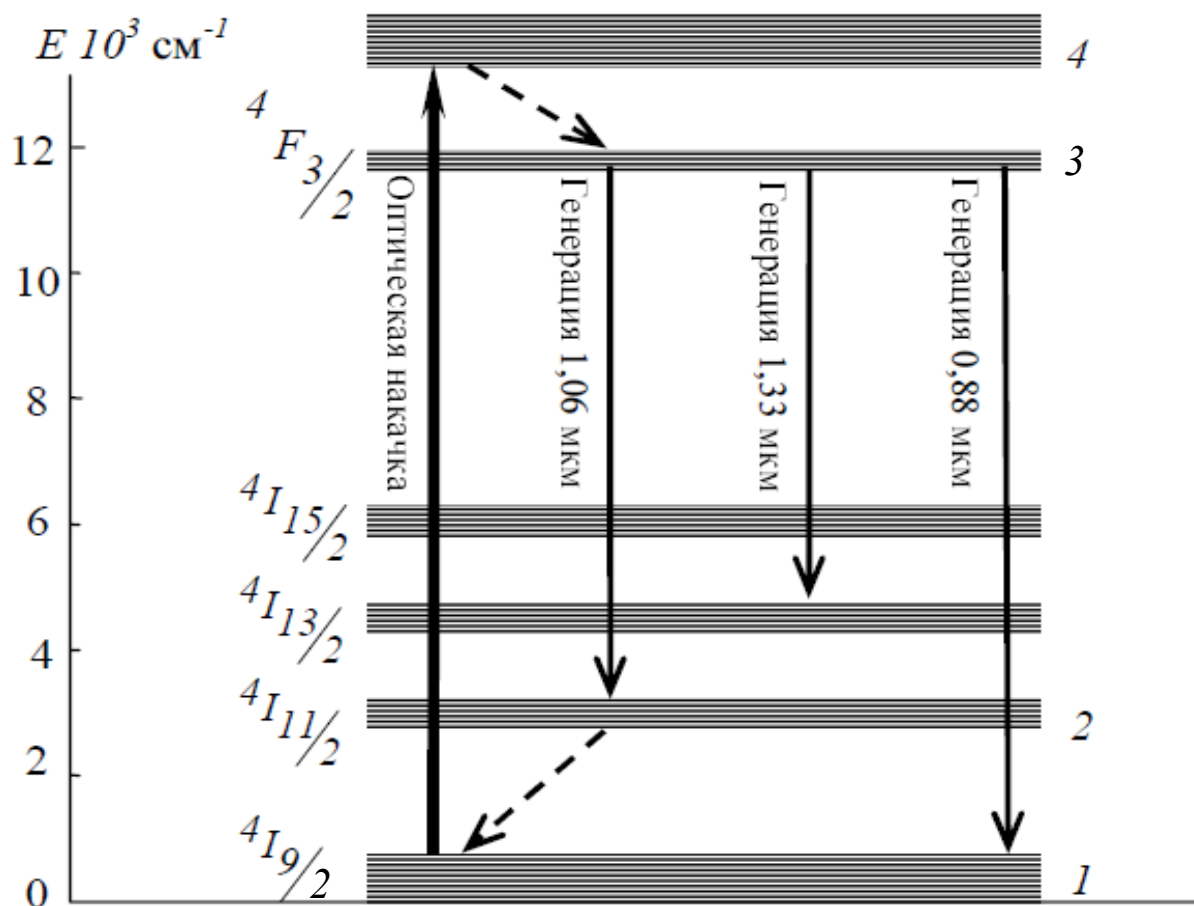


Рис. 1.4 Схема энергетических состояний иона Nd^{3+}

Уровень $4F_{3/2}$ является метастабильным, время жизни которого для кристалла Nd:YAG составляет порядка 200 мкс. Дело в том, что с одной стороны, излучательные переходы на нижележащие уровни ($4I_{9/2}$, $4I_{11/2}$, $4I_{13/2}$, $4I_{15/2}$) запрещены в электродипольном приближении, а значит, вероятность излучательной релаксации мала. А с другой стороны, уровень $4F_{3/2}$ и ближайший снизу уровень $4I_{15/2}$ разделены значительным энергетическим зазором (почти $6\,000 \text{ cm}^{-1}$), значит, безызлучательные переходы вниз также неинтенсивны. Из различных возможных переходов с уровня $4F_{3/2}$ на нижележащие уровни ($4I_{9/2}$, $4I_{11/2}$, $4I_{13/2}$, $4I_{15/2}$) наиболее интенсивным является переход $4F_{3/2} \rightarrow 4I_{11/2}$ (длина волны $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$).

Время жизни уровня $4I_{11/2}$ за счет высокой вероятности безызлучательных переходов на основное состояние $4I_{9/2}$ мало и составляет единицы наносекунд. При этом разница между энергиями уровней $4I_{11/2}$ и $4I_{9/2}$ составляет примерно 2000 cm^{-1} , что на порядок больше величины kT (при комнатной температуре 300

К величина kT составляет 208 см^{-1}), и следовательно, согласно распределению Больцмана, уровень ${}^4I_{11/2}$ в хорошем приближении можно считать практически ненаселенным. Из сказанного ясно, что работу лазера на неодиме можно описать с помощью четырехуровневой схемы (рис. 1.4): накачка осуществляется в канале 1-4 (переход из основного состояния ${}^4I_{9/2}$ на возбужденные уровни), а генерация - в канале 3-2 (переход ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$).

Важными характеристиками лазерных уровней является их ширина и характер уширения. Если взять случай изолированного атома, то ширина уровней определяется временем его жизни на этих уровнях (естественная ширина). В реальных лазерных средах ионы подвергаются воздействию кристаллической матрицы, приводящему к уширению уровней. Так, в стеклах из-за высокой неоднородности локальных электростатических полей ближайшего окружения линия люминесценции $1,06 \text{ мкм}$ неоднородно уширена ($\delta\lambda = 30 \text{ нм}$), в то время как в кристаллах иттрий-алюминиевого граната неоднородное уширение значительно меньше ($\delta\lambda = 0,7 \text{ нм}$).

Упрощенной модели лазера соответствует одномодовый стационарный режим лазерной генерации, при котором в резонаторе возникает и усиливается единственный тип колебаний, а длительность накачки значительно превышает характеристические времена процессов внутри резонатора. В этом случае при установлении колебаний в резонаторе временное распределение интенсивности лазерной генерации представляет собой последовательность убывающих по амплитуде импульсов и в пределе стремится к стационарному уровню [2]. Это наблюдается, например, в газовых лазерах, для которых линии усиления чрезвычайно узки.

Однако твердотельные лазеры гораздо чаще работают в многомодовом режиме, так как в твердых телах энергетические уровни значительно уширены, и в контур усиления попадает несколько типов колебаний с различными частотами (продольных мод). При этом в резонаторе развивается несколько типов независимых друг от друга колебаний, отличающихся частотой излучения и направлением распространения. В этом случае число факторов, определяющих динамику развития лазерной генерации очень велико, а

лазерное излучение в таком режиме представляет собой последовательность нерегулярных по амплитуде и временному положению импульсов – "пичков". В данной работе длительность пичков в кристаллах $Y_3Al_5O_{12}:Nd^{3+}$ составляет обычно несколько десятых долей микросекунды, а временной интервал между ними – единицы микросекунд.

Как уже было сказано, хаотичность пульсаций обуславливается наличием многих типов колебаний в резонаторе, пространственной неоднородностью накачки и ее пульсациями, наличием неоднородностей и нелинейно поглощающих примесей в кристаллах, неоднородностью поля в резонаторе и другими факторами. Хотя детали процесса генерации не воспроизводимы, общий характер, усредненные и интегральные характеристики процесса сохраняются от вспышки к вспышке и в достаточной мере согласуются с теоретическими представлениями.

Процесс генерации импульсных лазеров характеризуют двумя основными величинами: энергией излучения в импульсе, длительностью импульса генерации, средней мощностью излучения, которая определяется как отношение энергии излучения в импульсе к периоду следования импульсов.

Энергию излучения лазерной генерации определяют величина энергии накачки и коэффициент пропускания выходного зеркала резонатора. Анализируя процесс генерации, можно показать, что энергия лазерного излучения пропорциональна превышению энергии накачки над ее пороговым значением. Энергия, излучаемая лампой накачки к моменту возникновения лазерной генерации расходуется на обеспечение условий, необходимых для возникновения генерации. Остальная энергия расходуется на создание избытка возбужденных частиц над пороговым значением. Это количество частиц непосредственно участвует в процессах индуцированного излучения и обуславливает излучаемую лазерным генератором энергию. Таким образом, для энергии излучения лазера $E_{лаз}$ можно записать соотношение:

$$E_{лаз} = C(E_{нак} - E_{нак}^{пор}), \quad (1.17)$$

где C – дифференциальный коэффициент полезного действия, определяемый эффективностью преобразования активным элементом энергии излучения

лампы накачки в инверсную населенность, эффективностью отражателя, внутренними потерями в резонаторе и пропусканием полупрозрачного зеркала;
 $E_{нак}$ – энергия накачки; $E_{нак}^{пор}$ – пороговое значение энергии накачки.

Коэффициент полезного действия лазера (КПД) η может быть выражен:

$$\eta = E_{лаз} / E_{нак} . \quad (1.18)$$

Характерные экспериментально наблюдаемые зависимости энергии излучения и КПД лазера от уровня энергии накачки приведены на рис.1.5.

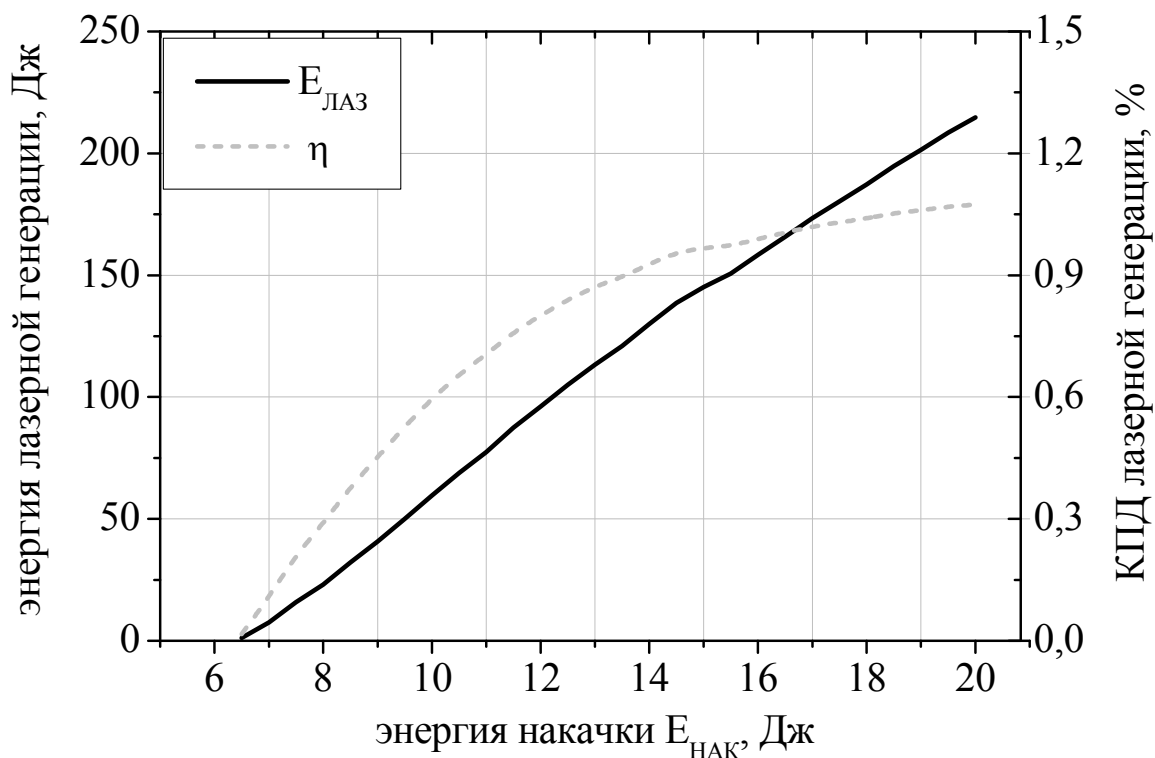


Рис.1.5. Характерные зависимости энергии излучения $E_{лаз}$ и КПД лазера η от энергии накачки (электрическая энергия, сообщаемая импульсной лампе).

2 Практические упражнения

Часть 1. Изучение режима свободной генерации лазера на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом $Nd^{3+}:Y_3Al_5O_{12}$

Цель работы: освоение метода юстировки резонатора твердотельного лазера, измерение порога генерации и коэффициента полезного действия (КПД) лазера на иттрий алюминиевом гранате, измерение временных характеристик лазерной генерации и наблюдение на экране осциллографа пичковой структуры излучения лазера в режиме свободной генерации, определение КПД лазера, пороговой мощности и эффективности системы накачки.

Блок-схема установки по изучению характеристик лазера на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом в режиме свободной генерации приведена на рис.2.1.

Излучатель лазера состоит из квантрона с активным элементом 1 и резонатора, включающего два плоских диэлектрических зеркала, расположенных параллельно друг другу в держателях 3 и 4. Квантрон, кроме активного элемента – кристаллического стержня $Nd^{3+}:YAG$ длиной 80 мм, содержит систему оптической накачки (импульсная лампа 2 и отражатель).

Квантрон устроен таким образом, чтобы как можно большая часть энергии, которая излучается лампой, поглотилась в активном элементе, причем равномерно по всему объему.

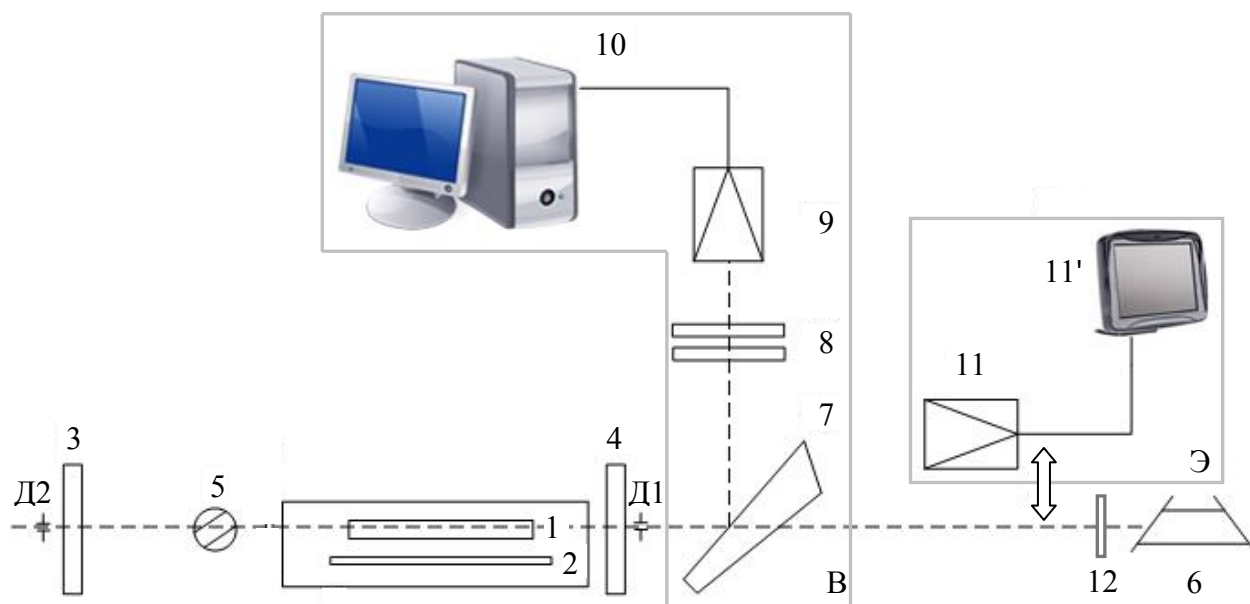


Рис.2.1 Блок-схема лабораторной установки, цифрами обозначены: 1 – активный элемент, 2 – лампа накачки, 3 – «глухое» зеркало резонатора ($R=99.9\%$), 4 – «выходное» зеркало ($R=60\%$), 5 – шторка, Д1 и Д2 – юстировочные диафрагмы, 6 – юстировочный диодный лазер, 7 – оптический клин, 8 – ослабляющие фильтры, 9 – лавинный фотодиод, 10 – персональный компьютер с интегрированной платой цифрового запоминающего осциллографа BORDO, 11 и 11' – измеритель мощности Thorlabs, 12 – экран или ловушка лазерного излучения. В – система регистрации временных характеристик, Э – система регистрации энергетических характеристик.

Кроме того, для отвода выделяющегося при работе лампы тепла через квантрон протекает охлаждающая жидкость (деионизованная вода). Между активным элементом 1 и глухим зеркалом 3 расположена шторка 5 для перекрытия канала генерации в условиях, когда лазер не готов к работе. Винты на держателях зеркал позволяют юстировать глухое зеркало 3 и выходное зеркало 4. Для удобства юстировки предусмотрены диафрагмы Д1 и Д2, а также юстировочный лазерный диод 6.

Для измерения длительности импульсов лазерного излучения используется **система регистрации временных характеристик (В)**, состоящая из оптического клина 7, ослабляющих фильтров 8, лавинного фотодиода 9. Часть лазерного излучения отражается от клина 7, светофильтрами 8 ослабляется до необходимого уровня, который определяется параметрами фотодиода, и попадает на фотодиод 9. Здесь

оптический сигнал преобразуется в электрический с минимальными искажениями, и его форму можно наблюдать на экране осциллографа *10*.

Для измерения средней мощности генерации используется **система регистрации энергетических характеристик** генерации (\mathcal{E}), состоящая из измерительной головки *11* и блока измерителя мощности с индикатором *11'* (Thorlabs PM100D). Система регистрирует среднюю мощность излучения, поэтому при работе лазера в импульсном режиме энергия импульса генерации определяется отношением средней мощности к частоте следования импульсов.

Упражнение 1. Юстировка резонатора и активного элемента лазера

Рассмотрим теперь последовательность юстировки оптического резонатора методом «оптического рычага».

Резонатор лазера, используемого в настоящей работе, является открытым плоско-параллельным резонатором Фабри-Перо. Это означает, что положительная обратная связь в нем организована плоскими зеркалами, установленными параллельно друг другу. Излучение лазерной генерации распространяется вдоль оси, перпендикулярной этим зеркалам. Юстировка резонатора данного лазера заключается в прецизионной настройке параллельности зеркал резонатора. Для этого используется **метод оптического рычага**, который основан на свойствах прямолинейного распространения света в однородной среде и высокой направленности лазерного излучения. При помощи диафрагм Д1 и Д2 однозначным образом задается ось резонатора (через две точки прямую линию можно провести лишь одним способом), относительно которой устанавливаются зеркала. Для юстировки лазера необходимо провести через диафрагмы луч юстировочного лазера, а затем, последовательно, начиная с наиболее дальнего от юстировочного лазера, устанавливать оптические элементы и возвращать отражения луча юстировочного лазера от поверхностей на диафрагму, ближайшую к юстировочному лазеру. Этим обеспечивается нормальное падение юстировочного луча на оптические элементы схемы (перпендикулярность поверхности оптического элемента к оптической оси резонатора). С учетом конструкции лазера, а именно высоты и положения оптических элементов, отверстия для вывода излучения в корпусе, производители предусматривают заранее специальные установочные места для диафрагм.

Не откручивайте и не смещайте установочные места для диафрагм!

1. Подготовьте излучатель лазера к работе в режиме свободной генерации. Для этого не включая лазер снимите крышки 24-26. Ознакомьтесь с устройством излучателя, определите положение квантрона, зеркал и их юстировочных винтов (см. рис. 2.2).

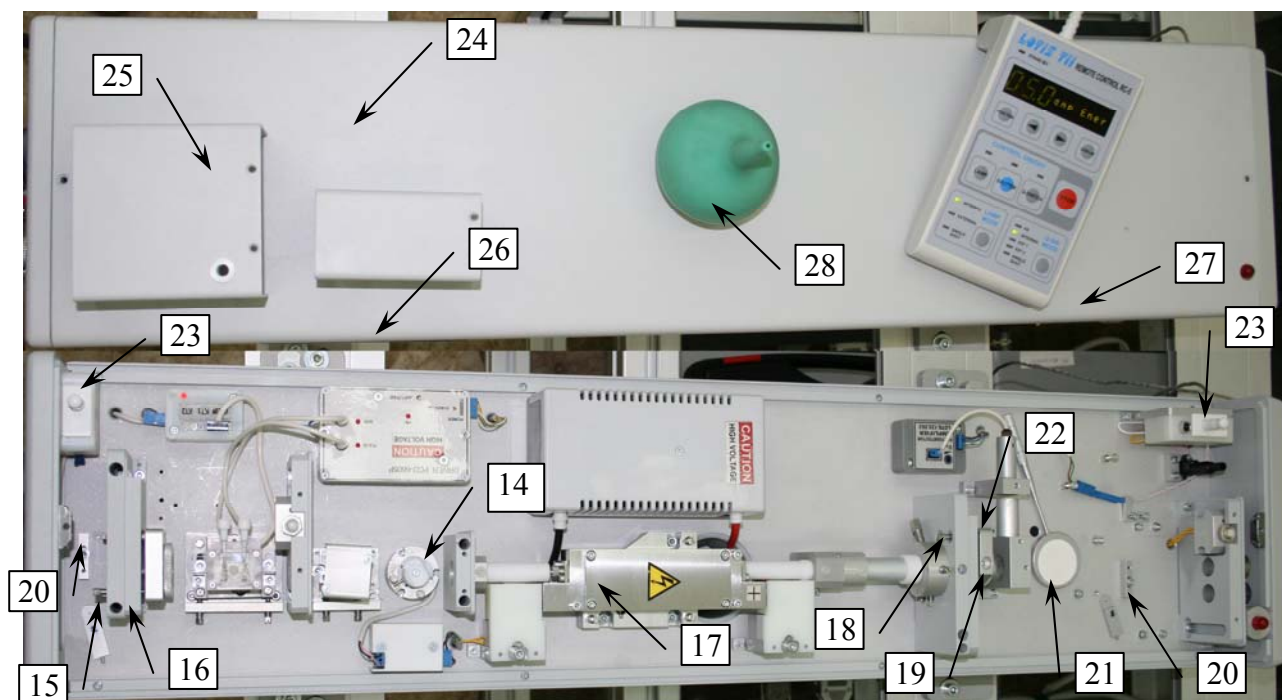


Рис. 2.2 Лазерный излучатель LS 2131У. 14 – шторка, 15 – винт юстировки держателя “глухого” зеркала, 16 - держатель “глухого” зеркала, 17 – квантрон с активным элементом и лампой накачки, 18 – винт юстировки “выходного” зеркала, 19 – винт крепления выходного зеркала, 20 – место установки диафрагмы, 21 – визуализатор, 22 – “выходное” зеркало, 23 – выключатели блокировки излучателя, 24-26 защитные крышки узлов излучателя, 27 – пульт ДУ, 28 – груша

2. Проведите юстировку резонатора, которая заключается в том, чтобы установить зеркала резонатора 3 и 4 параллельно друг другу и перпендикулярно оптической оси активного элемента.

Не касайтесь поверхностей оптических элементов! Частицы грязи, оставленные на рабочих поверхностях элементов лазерного резонатора, в мощных полях генерируемого излучения приводят к разрушению этих поверхностей. Частицы пыли удаляются самостоятельно с поверхностей оптических элементов струей воздуха (при помощи груши 28). Частицы жира, остающиеся пальцами рук, удаляются лаборантом при помощи ватного тампона, смоченного очищенным этиловым спиртом или ацетоном.

Порядок юстировки следующий:

- извлеките крышку окна канала излучения на передней стенке излучателя над надписью «1064 nm». Установите юстировочный лазер 6 в юстируемый держатель и закрепите их на оптическом столе на расстоянии не менее 50 см от выходного окна лазера. Затем установите диафрагмы Д1 и Д2 в гнезда 20. Снимите выходное зеркало 4, поверните внутрирезонаторную шторку 5. Включите юстировочный лазер 6 и добейтесь такого его положения, чтобы луч прошел через диафрагму Д1, активный элемент 1, глухое зеркало 3 и диафрагму Д2. При этом на диафрагме Д1 будут заметны лучи, отраженные от глухого зеркала и от торца активного элемента. Не убирайте юстировочный лазер пока не завершите выполнять все Упражнения данной работы;

- поворачивая юстировочные винты держателя глухого зеркала, добейтесь того, чтобы отраженный от него луч осветил отверстие диафрагмы. Вставьте выходное зеркало 4 с коэффициентом отражения $R = 20\%$ и повторите для него ту же операцию. Перед установкой очистите поверхности зеркала 4 струей воздуха при помощи груши 28. В случае если отраженные от зеркал лучи слабо заметны из-за комнатного освещения, рекомендуется снять диафрагму Д1 и проводить юстировку по диафрагме, расположенной непосредственно на юстировочном лазере 6;

- **выключите юстировочный лазер!**

- поверните шторку 5, уберите диафрагму Д1 и закройте крышки 25 и 26.

Перед юстировочным лазером 6 установите экран или ловушку. Попадание на него мощного лазерного излучения приведет к разрушению излучающей поверхности диода!

- на расстоянии 20-30 см перед излучателем установите визуализатор 21;

Лазер, используемый в настоящей работе, имеет длину волны лазерной генерации 1064 нм. Это излучение ближнего инфракрасного диапазона, и человеческий глаз не чувствителен к такому свету, то есть луча не будет видно. Для визуального контроля лазерной генерации в настоящей работе используется так называемый визуализатор, который светится зеленым цветом при облучении его инфракрасным излучением.

- **Наденьте защитные очки.** Включите лазер. Для этого включите блок питания лазера поворотом ключа. При снятой защитной крышке 24 должна сработать защитная блокировка, отключающая лазер, сопровождаемая периодическим звуковым сигналом. Для того чтобы продолжить работу, поднимите вверх до щелчка выключателя 23. Затем на пульте дистанционного управления (ДУ) 27 нажмите кнопку **Lamp**. Через 5-10 с включается силовая часть, поджигается дежурная дуга (индикатор **Lamp** на ДУ мигает или непрерывно светит зеленым цветом), и оптическая система накачки начинает работать, лазер прогревается. Если индикатор **Lamp** на ДУ мигает, то для ускорения прогрева можно установить энергию накачки на 12 - 15 Дж. После прогрева лазера (индикатор **Lamp** на ДУ перестает мигать и светится зеленым светом) можно приступить к работе.

3. С помощью пульта дистанционного управления установите режим свободной генерации (**FR**). Установите энергию накачки на уровне 7 Дж (чуть выше порога генерации) и нажмите кнопку **Shutter**. При этом открывается внутрирезонаторная шторка 5 (используется для обеспечения безопасности при работе с лазером), и при правильной юстировке лазера возникает генерация. На визуализаторе должно наблюдаться зеленое пятно генерации. Отсутствие генерации свидетельствует о недостаточно точной юстировке и большом коэффициенте потерь в резонаторе. В этом случае можно попытаться получить генерацию путем увеличения энергии накачки (до 10-12 Дж), а затем, наблюдая за пятном на визуализаторе, медленно и аккуратно поворачивая выходное зеркало 4 юстировочными винтами, добиться более точной юстировки резонатора и снижения порога генерации. Если при максимальной энергии накачки 15 Дж генерация не появляется, то необходимо заново провести юстировку резонатора. Выключите лазер (нажав последовательно кнопки **Shutter** и **Lamp** на пульте ДУ) и повторите процедуру юстировки зеркал резонатора.

4. Получив лазерную генерацию, добейтесь правильной круглой формы пятна и его равномерной освещенности поворачивая винты юстировки держателя выходного зеркала 4.

Перед юстировкой зеркала в режиме лазерной генерации убедитесь в том, что лазерная генерация происходит в свободном режиме (на пульте ДУ установлен режим FR). Юстировка лазера в режиме модуляции добротности может привести к пробоем оптических элементов резонатора!

5. Нажатием кнопки **Shutter** остановите генерацию, а нажатием кнопки **Lamp** выключите импульсную лампу накачки.

6. Закройте излучатель крышкой 24. **Лазер готов к работе.**

Упражнение 2. Определение порога генерации и КПД генерации

Порогом генерации называется минимальное значение энергии накачки, при котором возникает генерация. Наличие генерации фиксируется визуально по характерной яркой зеленой точке на визуализаторе, установленном между выходным отверстием лазера и головкой измерителя энергии 11.

1. **Наденьте защитные очки.** Включите лазер LS-2132У в режиме свободной генерации (см. Упражнение 1) и, пользуясь визуализатором, установите приемник 11 так, чтобы все излучение генерации попадало в его входное отверстие. Подготовьте систему регистрации энергетических характеристик генерации к работе.

2. Проведите измерение зависимости энергии генерации лазера от энергии накачки. Измерения проведите для трех резонаторов с различными коэффициентами полезных потерь K_r (выходное зеркало 4 с различными коэффициентами отражения). Для замены выходного зеркала резонатора необходимо:

- выключить лазер;
- снять крышки с блока излучателя 24 и выходного блока 26;
- ослабить винт крепления 22 выходного зеркала 4 и, взявшись за рифленую оправу, аккуратно извлечь зеркало;
- установить зеркало с другим коэффициентом отражения, закрепив его винтом 22, и провести юстировку этого зеркала резонатора (см. п. 2

упражнения 1). Перед установкой очистите поверхности зеркала струей воздуха при помощи груши 28.

3. Завершив измерения, **выключите лазер!** Выключите измеритель мощности лазерного излучения, уберите его в бокс.

4. Установите выходное зеркало с коэффициентом отражения 20%.

5. Постройте графики зависимости энергии генерации лазера от энергии накачки для трех резонаторов с различными значениями коэффициента отражения выходного зеркала резонатора (значение коэффициента отражения зеркала указано на оправе зеркала). Определите порог генерации для каждого резонатора с различными значениями полезных потерь. Оцените погрешность измерений.

6. Объясните полученные зависимости.

7. Используя имеющиеся данные, постройте график зависимости мощности генерации лазера от коэффициента полезных потерь при нескольких различных энергиях накачки. Оцените оптимальное значение коэффициента полезных потерь (длина резонатора $L=550$ мм, длина активного элемента $l=100$ мм).

Упражнение 3. Наблюдение временной зависимости лазерной генерации

Целью настоящего упражнения является наблюдение пикового режима генерации твердотельных лазеров на примере лазера на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом в режиме свободной генерации.

Для изучения временной зависимости генерации в упражнении используется лавинный фотодиод и запоминающий цифровой осциллограф BORDO, интегрированный в персональный компьютер. Временное разрешение лавинного фотодиода составляет около 20 нс. Излучение гранатового лазера направляется на фотодиод оптическим клином 9.

Ни в коем случае не устанавливайте фотодиод напротив лазерного резонатора и не снимайте рассеиватель с его входного отверстия!

Попадание на него мощного лазерного излучения приведет к разрушению светочувствительной поверхности диода!

1. Настройте систему измерения длительности импульсов генерации. Для этого, используя луч юстировочного лазера, отраженный от зеркала 4, установите элементы 7 - 10 так, как показано на рис. 2.1. Клин 7 следует устанавливать таким образом, чтобы отраженное от поверхности клина лазерное излучение не попало в апертуру выходного отверстия лазера – отраженное излучение может повредить оптические элементы лазерного резонатора. Подключите выход фотодиода ко входу осциллографической платы или к осциллографу. **Выключите юстировочный лазер.**

Перед юстировочным лазером 6 установите экран или ловушку. Попадание на него мощного лазерного излучения приведет к разрушению излучающей поверхности диода!

2. Включите запоминающий осциллограф BORDO с запуском в автоматическом режиме. Установите время развертки 10 мкс/дел, наблюдайте запись прямой линии на экране осциллографа. Затем переведите осциллограф в ждущий режим с внутренней синхронизацией по положительному фронту.

3. Установите минимальную развертку по амплитуде 10 мВ/дел, установите уровень синхронизации 5 мВ/дел.

4. **Наденьте защитные очки.** Включите лазер в режиме свободной генерации (**FR** на пульте ДУ) при значении энергии накачки близком к пороговому (6.5-7 Дж).

5. При помощи визуализатора убедитесь, что отраженный от клина 7 лазерный луч попадает на рассеиватель лавинного фотодиода.

6. Визуально наблюдайте на экране осциллографа временную развертку излучения гранатового лазера. Величина сигнала на экране осциллографа при этом не должна превышать 0,7 В. Если величина сигнала превышает 0,7 В, перед фотоприемником установите дополнительные светофильтры для ослабления светового потока. Сохраните полученную осциллограмму.

Измерьте длительность одного пичка и длительность лазерной генерации в целом.

7. Прделайте пункт 5 для энергий накачки выше пороговой (~ 12 Дж).
8. **Выключите лазер** и другие приборы.
9. Объясните полученные результаты.

Часть 2. Изучение режима модуляции добротности лазера на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом

Цель работы: на примере лазера на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом ознакомиться с физическими принципами формирования лазерного импульса в режиме активной модуляции добротности; приобрести навыки юстировки резонатора и электрооптического затвора (ячейки Поккельса); изучить зависимость длительности импульса генерации от мощности накачки и времени задержки включения затвора; освоить методики оптимизации энергетических и временных характеристик генерации.

Описание метода модуляции добротности

Метод модуляции добротности позволяет вместо серии коротких низкоинтенсивных пичков получать лазерную генерацию в виде коротких импульсов, длительность которых составляет несколько наносекунд, а пиковая мощность может достигать десятков мегаватт. Основная идея метода модуляции добротности состоит в следующем. Предположим, что в резонатор лазера помещен затвор. Если затвор закрыт, что соответствует высокому уровню потерь, то генерация возникнуть не может и инверсия населенностей может достичь значения, которое намного превышает инверсию населенностей в режиме свободной генерации. Если теперь резко открыть затвор, то есть уменьшить потери, то усиление существенно превысит потери и накопленная энергия выделится в виде короткого и мощного импульса. Поскольку при этом происходит переключение добротности резонатора от низкого значения к высокому значению, то данный метод называется модуляцией добротности [1-5].

Для реализации режима модуляции добротности используют различные типы затворов, в том числе: электрооптические затворы, механические модуляторы, акустооптические модуляторы добротности, модуляторы на основе насыщающихся поглотителей. В зависимости от метода воздействия на затвор различают **пассивную** модуляцию и **активную** модуляцию. При пассивной модуляции в резонатор помещают поглощающую среду (раствор красителей или кристалл с центрами окраски), которая просветляется при увеличении интенсивности проходящего через нее излучения, тем самым уменьшаются потери. При активной модуляции добротности осуществляют внешнее управление характеристиками затвора.

Для активной модуляции добротности оптического резонатора наиболее широко используются электрооптические (ячейка Погкельса, ячейка Керра) и магнитооптические затворы (ячейка Фарадея). Действие этих затворов основано на эффекте изменения оптической анизотропии кристалла под действием электрического или магнитного поля. Помещая в резонатор управляющий элемент, увеличивают потери в начальный период импульсной накачки, не позволяя развиваться лавинному процессу вынужденных переходов. Накачка активной среды лазера происходит в условиях, когда добротность оптического резонатора низка и коэффициент потерь превышает коэффициент усиления. Генерация не развивается, и в активной среде достигается высокая степень инверсии на генерируемой паре уровней. Затем добротность резонатора резко увеличивается за счет уменьшения внесенных потерь. Вследствие большого превышения коэффициента усиления над коэффициентом потерь запасенная в активном элементе энергия излучается в течение десятка наносекунд в виде мощного светового импульса.

Типичная схема развития генерации при активной модуляции добротности представлена на рис. 2.3. С целью получить максимальную энергию генерации $E_{\text{лаз}}$ при импульсной накачке (энергия накачки $E_{\text{нак}}$) добротность резонатора Q (рис. 2.3(a)) увеличивают в момент времени t_1 , когда коэффициент усиления $K_{\text{ус}}$ достигает максимума. При этом коэффициент

усиления (рис. 2.3, б) оказывается существенно выше коэффициента потерь $K_{\text{пот}}$, обеспечивая генерацию мощного лазерного импульса (рис. 2.3(в)).

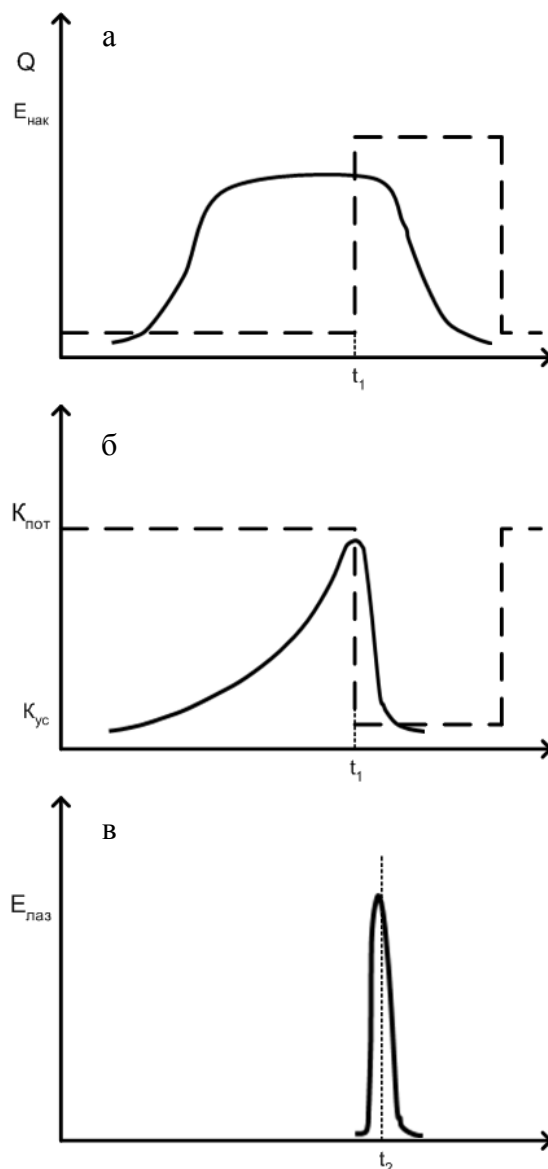


Рис. 2.3 Динамика развития лазерного импульса при активной модуляции добротности

В настоящей работе используется метод электрооптической модуляции добротности оптического резонатора на основе ячейки Погкельса, представляющей собой кристалл, в котором проявляется линейный электрооптический эффект: изменение показателя преломления пропорционально напряженности приложенного электрического поля [8]. В качестве таких кристаллов обычно используют одноосные электрооптические кристаллы [дигидрофосфат аммония - ADP ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$), дигидрофосфат калия - KDP (KH_2PO_4), дейтерированный дигидрофосфат калия - DKDP (KD_2PO_4)], которые под воздействием электрического поля становятся двуосными.

Наибольшее распространение в настоящее время получили кристаллы DKDP, которые характеризуются в 3-4 раза более высоким электрооптическим коэффициентом и соответственно меньшим рабочим напряжением по сравнению с другими кристаллами. Следует отметить, что такие кристаллы, как правило, являются сильно гигроскопичными (способными поглощать водяные пары из воздуха), что отрицательно сказывается на их оптическом качестве. Поэтому кристалл затвора помещается в специальный термостат, поддерживающий температуру кристалла значительно выше комнатной (около 50° С), что затрудняет доступ к кристаллу водяных паров и существенно продлевает срок его службы.

Оптические свойства кристаллов, обладающих двулучепреломлением, описываются эллипсоидом показателя преломления (рис. 2.4), три главные полуоси которого соответствуют показателям преломления: n_x , n_y , n_z , которые справедливы для света, поляризованного в направлении осей кристалла OX, OY и OZ [8]. То есть скорость распространения света в таком кристалле будет зависеть от направления распространения.

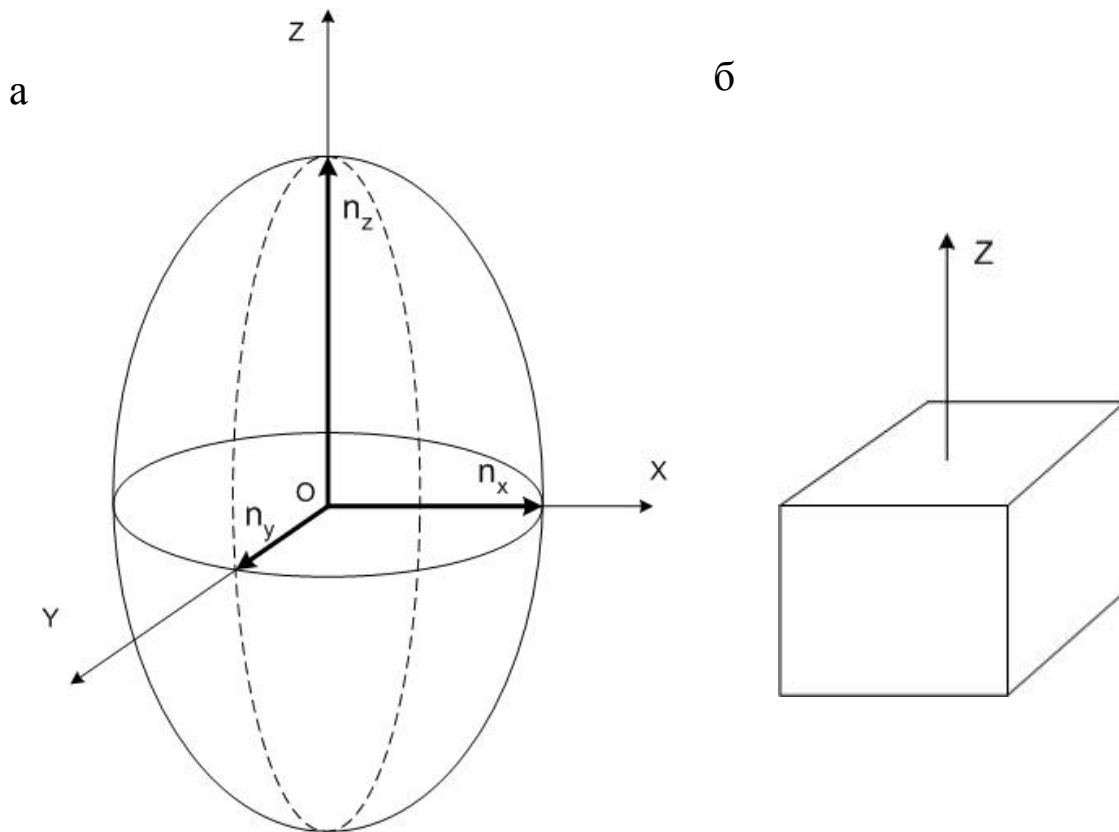


Рисунок 2.4. (а) эллипсоид показателей преломления одноосного кристалла, (б) – одноосный кристалл с указанной оптической осью Z.

Этот эллипсоид позволяет установить, как ведет себя в кристалле свет с определенным направлением распространения и поляризацией. Для одноосного кристалла KDP, используемого в настоящей работе значения показателей преломления для света, распространяющегося вдоль оптической оси (то есть для поляризации света в плоскости, перпендикулярной оптической оси) $n_x = n_y$, при этом сечение эллипсоида показателя преломления плоскостью, перпендикулярной оптической оси кристалла (Z), представляет собой окружность. Это значит, что при распространении света вдоль оптической оси такого кристалла двулучепреломление не проявляется.

При наложении электрического поля эллипсоид показателя преломления кристалла деформируется и поворачивается на 45° , причем угол поворота не зависит от величины поля. При этом сечение эллипсоида показателя преломления плоскостью, перпендикулярной оптической оси кристалла (Z), под воздействием поля деформируется в эллипс с главными диэлектрическими осями, составляющими угол 45° с исходными (рис. 2.5 (а)).

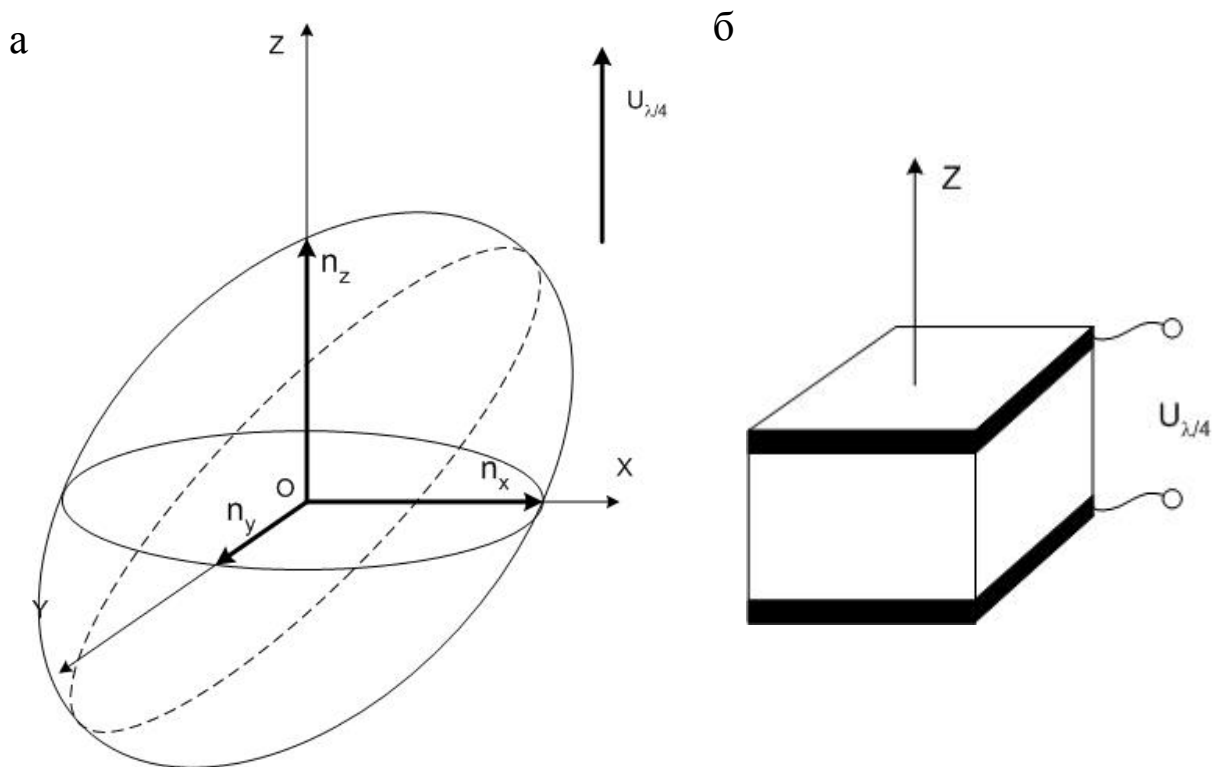


Рисунок 2.5. (а) эллипсоид показателей преломления одноосного кристалла с электрооптическим эффектом Поккельса при приложенном вдоль оптической оси напряжении, (б) – соответствующий одноосный кристалл с указанной оптической осью Z.

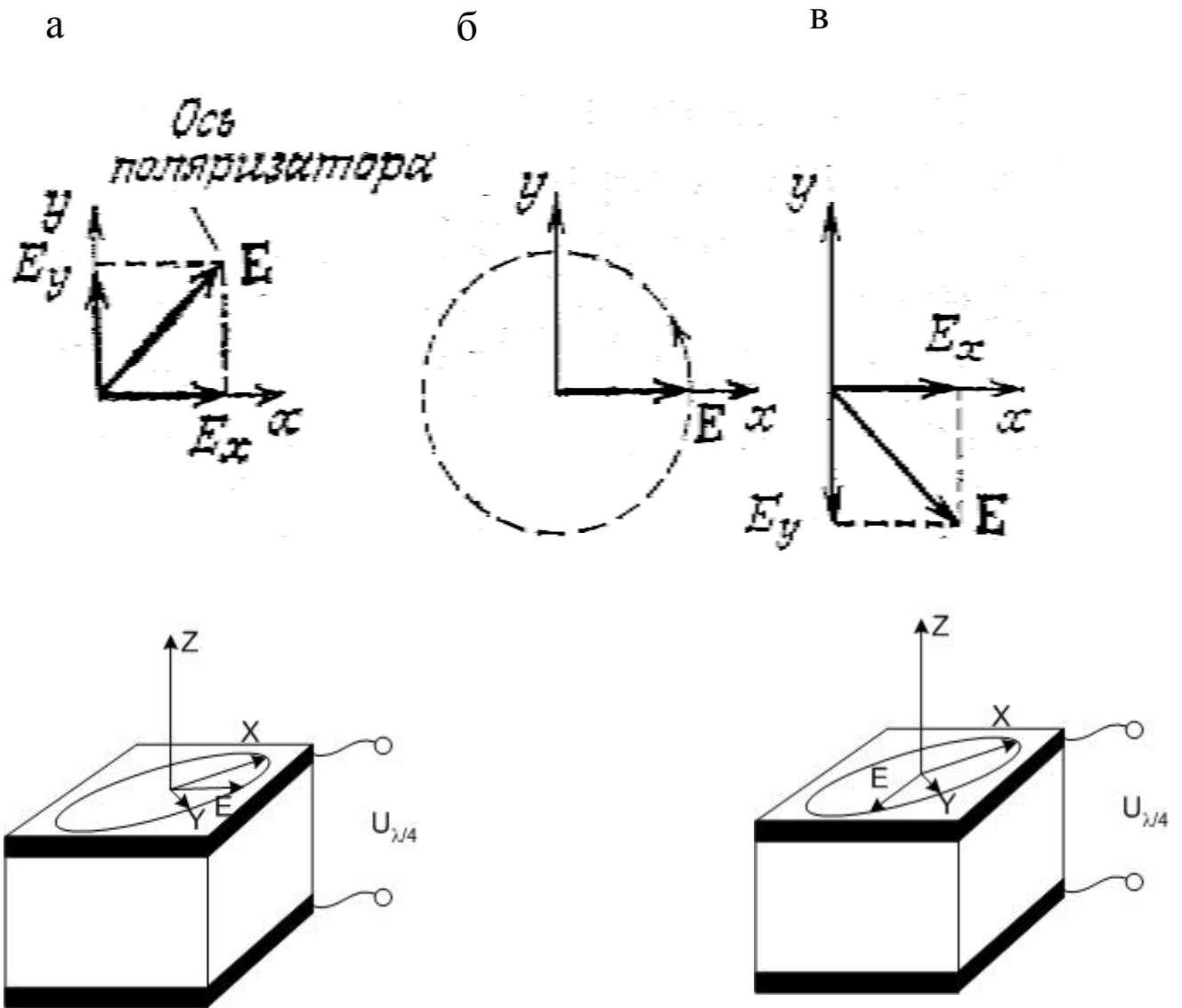


Рисунок 2.6. Направления компонент электрического поля E_x и E_y , оптической оси ячейки поляризатора и главных осей ячейки Поккельса Z , X и Y в плоскости, перпендикулярной оптической оси Z ячейки Поккельса (соответствует направлению распространения света вдоль оптической оси Z) при приложенном четвертьволновом напряжении. (а) – на входе в ячейку Поккельса, (б) – после первого прохода ячейки Поккельса, (в) – на выходе ячейки Поккельса после второго прохода.

Если падающий на кристалл свет распространяется вдоль оси Z , и вектор его поляризации составляет угол 45° с наведенными осями, световую волну можно разбить на две волны равной амплитуды и ортогональными направлениями поляризации (рис. 2.6 (а)). Эти две волны будут распространяться в данном кристалле с разной скоростью. Таким образом, на

выходе из кристалла между этими поляризационными компонентами образуется разность фаз:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot n_0^3 \cdot r_{63} U, \quad (2.1)$$

где λ - длина волны падающего на кристалл света; n_0 - показатель преломления материала затвора для обыкновенной волны; r_{63} - электрооптический коэффициент; U - электрическое напряжение, приложенное к кристаллу. В зависимости от величины $\Delta\Phi$ свет из линейно-поляризованного на входе кристалла становится в общем случае эллиптически поляризованным на его выходе (при значении $\Delta\Phi = \pi/2$ свет будет иметь круговую поляризацию) (рис. 2.6. (б)). То есть фактически для света, распространяющегося вдоль оптической оси кристалла, кристалл электрооптического затвора при поданном на него напряжении работает как поляризационная четвертьволновая пластинка ($\lambda/4$).

На рис. 2.7 (а) показана схема используемого в работе лазера, в котором модуляция добротности осуществляется затвором, состоящим из поляризатора и электрооптического кристалла DKDP, на который подается четвертьволновое напряжение $U_{\lambda/4}$, соответствующее разности фаз $\pi/2$.

Поляризатор и кристалл электрооптического затвора сориентированы друг относительно друга таким образом, чтобы главные диэлектрические оси кристалла затвора при включенном четвертьволновом напряжении находились под углом 45° к плоскости поляризации света на выходе поляризатора. В этом случае прошедший от активного элемента через поляризатор и кристалл электрооптического затвора свет приобретает круговую поляризацию (рис. 2.6 (б) и рис. 2.7.(б)). После отражения от глухого зеркала поляризованный по кругу свет еще раз проходит через электрооптический кристалл. При этом разность фаз между поляризационными компонентами световой волны становится равной π , что соответствует повороту плоскости поляризации света на 90° (рис. 2.6 (в)). То есть после двух проходов через кристалл затвора при включенном четвертьволновом напряжении свет становится линейно

поляризованным, и плоскость поляризации оказывается повернутой на 90° относительно плоскости поляризации света на входе в кристалл затвора.

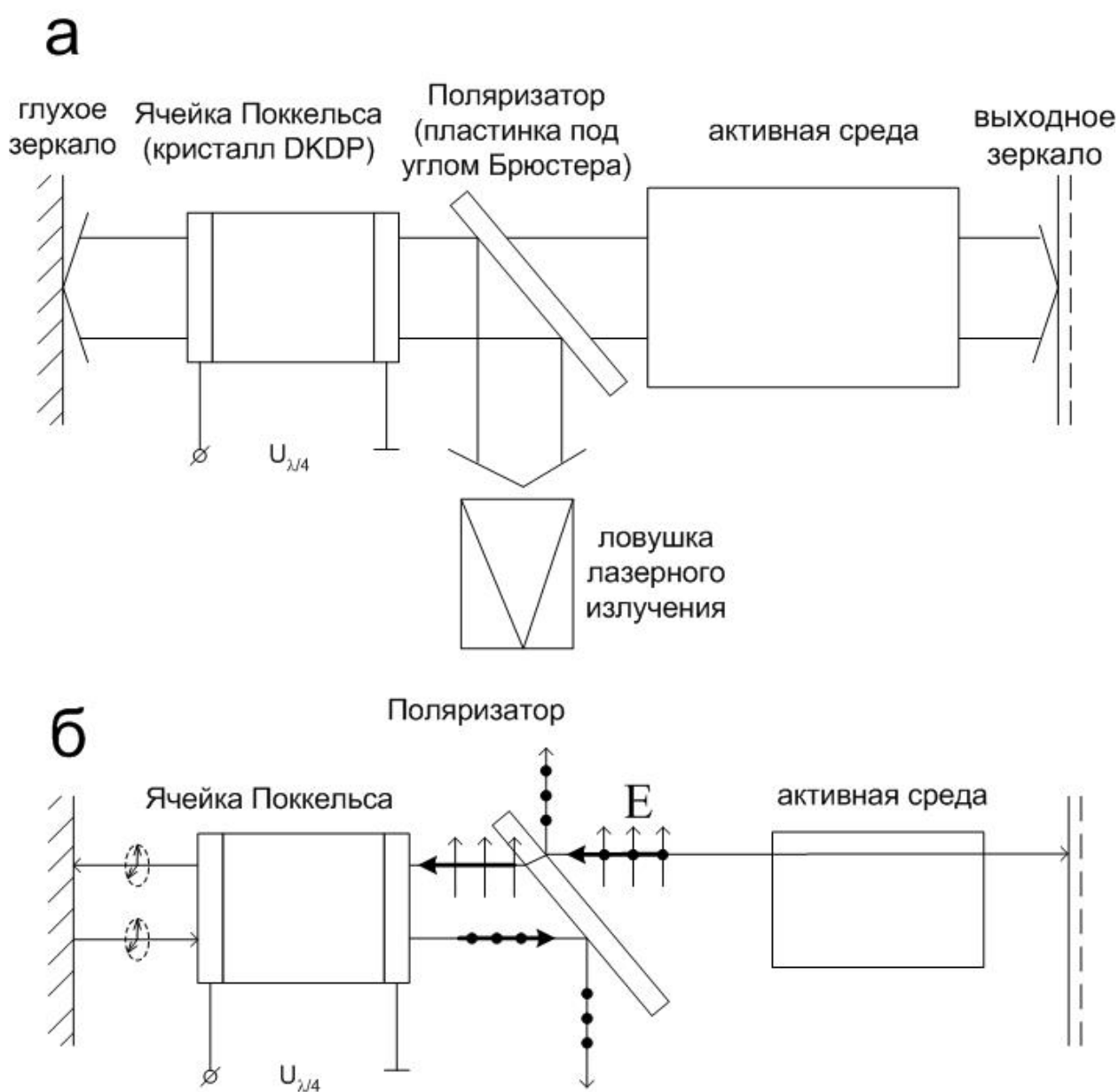


Рис. 2.7 (а) - схема лазерного резонатора с модулятором добротности на основе ячейки Поккельса, (б) направления компонент электрического поля и направление распространения излучения в резонаторе при закрытом затворе (на электрооптический кристалл подано напряжение $U_{\lambda/4}$).

Поляризатор представляет собой пластинку, ориентированную в резонаторе так, чтобы выполнялся закон Брюстера для света, распространяющегося вдоль оптической оси резонатора (см. рис. 2.7 б) [8]. То есть излучение, поляризованное в плоскости падения, проходит сквозь

пластинку, не испытывая отражения, а для излучения поляризованного под углом 90° к плоскости падения, напротив, коэффициент отражения составит 100%. В такой ситуации на обратном пути излучение отражается поляризатором и не возвращается в активную среду лазера. Таким образом, при подаче на кристалл четвертьволнового напряжения электрооптический затвор оказывается закрытым.

Затвор открывается при снятии напряжения, поскольку при этом двулучепреломление исчезает, и падающий свет проходит сквозь него без изменения поляризации. Таким образом, за счет изменения напряжения на электрооптическом кристалле осуществляется управление пропусканием затвора, а следовательно, и добротностью резонатора.

Строго говоря, прошедшее через поляризатор (пластинку под углом Брюстера) излучение не становится поляризованным в плоскости падения полностью. Это значит, что при закрытом затворе обратно в активную среду все же попадает определенное количество излучения. Следует понимать, что узел электрооптического затвора, включающий электрооптический кристалл и поляризатор, находясь в закрытом состоянии, вносит хоть и значительные, но конечные потери в резонатор, а значит, существуют такие значения энергии накачки, при которых в принципе возможно превышение коэффициента усиления над потерями и развитие лазерной генерации при закрытом затворе.

Блок-схема установки по изучению характеристик лазера на иттрий-алюминиевом гранате с неодимом в режиме свободной генерации приведена на рис.2.8.

Модуляция добротности осуществляется электрооптическим затвором (13 на рис. 2.8 и 29 на рис. 2.9), который располагают ближе к “глухому зеркалу резонатора”, а именно между шторкой 5 и зеркалом 3. В остальном конфигурация лазера, используемого в лабораторной работе, не меняется.

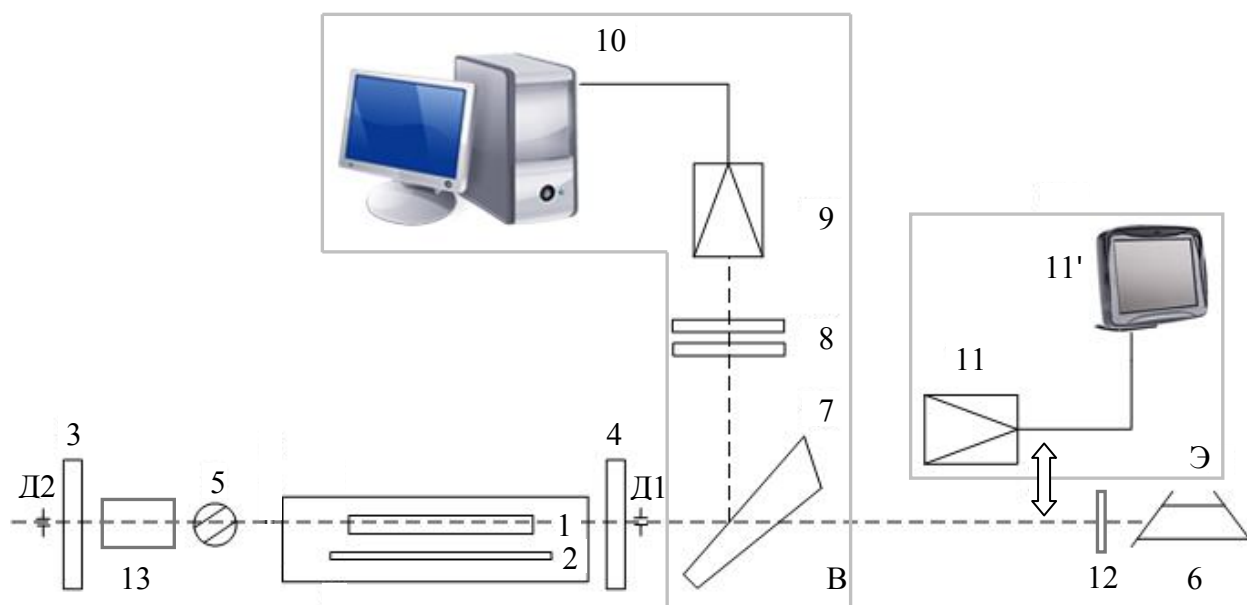


Рис.2.8 Блок-схема лабораторной установки, цифрами обозначены: 1 – активный элемент, 2 – лампа накачки, 3 – «глухое» зеркало резонатора ($R=99.9\%$), 4 – «выходное» зеркало ($R=60\%$), 5 – шторка, Д1 и Д2 – юстировочные диафрагмы, 6 – юстировочный диодный лазер, 7 – оптический клин, 8 – ослабляющие фильтры, 9 – лавинный фотодиод, 10 – персональный компьютер с интегрированной платой цифрового запоминающего осциллографа BORDO, 11 и 11' – измеритель мощности Thorlabs, 12 – экран или ловушка лазерного излучения, 13 – узел электрооптического затвора. В – система регистрации временных характеристик, Э – система регистрации энергетических характеристик.

Упражнение 1. Юстировка резонатора лазера с модулятором добротности

Методика юстировки выполняется по такому же алгоритму, что и в Упражнении 1 Части 1 настоящего пособия.

Резонатор лазера, используемого в настоящей работе, является открытым плоскопараллельным резонатором Фабри-Перо. Это означает, что положительная обратная связь в нем организована плоскими зеркалами, установленными параллельно друг другу. Излучение лазерной генерации распространяется вдоль оси, перпендикулярной этим зеркалам. Юстировка резонатора данного лазера заключается в прецизионной настройке параллельности зеркал резонатора. Для этого используется метод оптического рычага, который основан на свойстве прямолинейного распространения света в однородной среде и на свойстве направленности лазерного излучения. При помощи диафрагм Д1 и Д2 однозначным образом задается ось резонатора (через две точки прямую линию можно провести лишь одним способом), относительно которой устанавливаются зеркала. Для юстировки лазера необходимо провести через диафрагмы луч юстировочного лазера, а затем, последовательно, начиная с наиболее дальнего от юстировочного лазера, устанавливать оптические элементы и возвращать отражения луча юстировочного лазера от поверхностей на диафрагму, ближайшую к юстировочному лазеру, обеспечивая тем самым нормальное падение юстировочного луча (перпендикулярность поверхности оптического элемента к оптической оси резонатора). С учетом конструкции лазера, а именно высоты и положения оптических элементов, выходного отверстия в корпусе, производители предусматривают заранее специальные установочные места для диафрагм.

Не откручивайте и не смещайте установочные места для диафрагм!

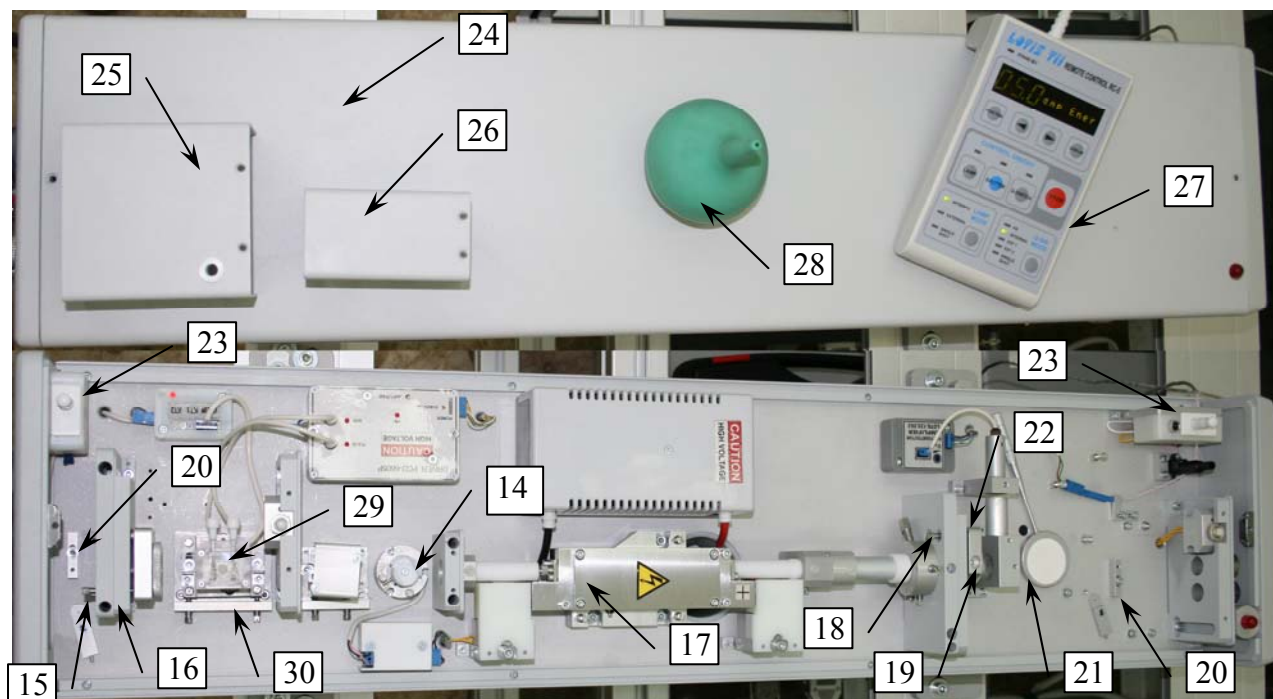


Рис. 2.9 Лазерный излучатель LS 2131У. 14 – шторка, 15 – винт юстировки держателя “глухого” зеркала, 16 – держатель “глухого” зеркала, 17 – квантрон с активным элементом и лампой накачки, 18 – винт юстировки “выходного” зеркала, 19 – винт крепления выходного зеркала, 20 – место установки диафрагмы, 21 – визуализатор, 22 – “выходное” зеркало, 23 – выключатели блокировки излучателя, 24-26 защитные крышки узлов излучателя, 27 – пульт ДУ, 28 – груша, 29 – электрооптический затвор, 30 – посадочное место для электрооптического затвора.

Снимите крышки 24-26 (см. рис. 2.9). При открывании защитной крышки 24 срабатывает защитная блокировка, отключающая лазер. Для того чтобы продолжить работу, поднимите вверх выключатели 23. Ознакомьтесь с устройством излучателя, определите положение квантрона, зеркал и их юстировочных винтов (см. рис. 2.9). Проведите юстировку резонатора, которая заключается в том, чтобы установить зеркала резонатора 3 и 4 параллельно друг другу и перпендикулярно оптической оси активного элемента. Порядок юстировки следующий:

- извлеките крышку окна канала излучения на передней стенке излучателя над надписью «1064 nm». Установите юстировочный лазер 6 в юстируемый держатель и закрепите на оптическом столе на расстоянии 50 см от выходного окна лазера. Затем установите диафрагмы $D1$ и $D2$ (см. рис. 2.8) в гнезда 20. Снимите выходное зеркало 4 (см. рис. 2.8), поверните внутрирезонаторную шторку 5. Включите юстировочный лазер 6 (см. рис. 2.8) и добейтесь такого его положения, чтобы луч прошел через диафрагму $D1$ (см. рис. 2.8), активный элемент 1 (см. рис. 2.8), глухое зеркало 3 и диафрагму $D2$.

При этом на диафрагме $Д1$ будут заметны лучи, отраженные от глухого зеркала и от торца активного элемента;

- поворачивая юстировочные винты держателя глухого зеркала, добейтесь того, чтобы отраженный от него луч попал в отверстие диафрагмы $Д1$.

- установите кристалл электрооптического затвора 29 на предназначенную для него площадку 30 в резонаторе так, чтобы юстировочный луч проходил через центры круглых отверстий, находящихся на торцах пластикового корпуса затвора. Не прилагая больших усилий и используя шестигранный ключ, закрепите кристалл в таком положении с помощью винтов;

Не дышите на кристалл затвора и не допускайте попадание на него влаги! Не размыкайте электрическую цепь термостата электрооптического затвора!

- установите диафрагму $Д1$ и выходное зеркало резонатора 4 с коэффициентом отражения $R = 20\%$. Направьте отраженный от выходного зеркала луч точно назад в отверстие диафрагмы $Д1$;

- закройте блок затвора и выходной блок соответствующими крышками. Поднимите кнопки блокировки общей крышки излучателя 23 вверх до щелчка и на расстоянии 20-30 см перед излучателем установите визуализатор;

- включите блок питания лазера поворотом ключа. **Наденьте защитные очки.** Для включения накачки лазера нажмите кнопку **Lamp**. Для ускорения прогрева лазера можно установить энергию накачки на уровне 10-15 Дж соответствующей кнопкой блока ДУ;

- после прогрева лазера (индикатор **Lamp** на ДУ перестает мигать и светится постоянно зеленым светом) установите энергию накачки на уровне 7-8 Дж (вблизи пороговой).

- включите лазер в режиме свободной генерации (**FR** на пульте ДУ). Проконтролируйте пятно генерации на визуализаторе. Винтами юстировки держателя выходного зеркала 4 добейтесь правильной круглой формы пятна и максимальной его яркости. Отсутствие генерации свидетельствует о

недостаточно точной юстировке и большом коэффициенте потерь в резонаторе. В этом случае можно попытаться получить генерацию путем увеличения энергии накачки (до 10-12 Дж), а затем, наблюдая за пятном на визуализаторе, медленно и аккуратно поворачивая выходное зеркало 4 юстировочными винтами, добиться более точной юстировки резонатора и снижения порога генерации. Если при максимальной энергии накачки 15 Дж генерация не появляется, то необходимо заново провести юстировку резонатора;

Перед юстировкой зеркала в режиме лазерной генерации убедитесь в том, что лазерная генерация происходит в свободном режиме (на пульте ДУ установлен режим FR). Юстировка лазера в режиме модуляции добротности может привести к пробоем оптических элементов резонатора!

- подготовьте лазер к работе в режиме активной модуляции добротности (моноимпульсном режиме). Для этого переведите лазер в режим **Internal** [кнопка на пульте дистанционного управления (ДУ)]. При этом на затвор подается **высокое** запирающее постоянное $\lambda/4$ **напряжение** $\sim 4,5$ кВ. **Будьте осторожны, не касайтесь подводящих проводов!**;

- лазер начнет работать в режиме активной модуляции добротности после нажатия кнопок **Shutter** (открытие шторки), и **Q-Switch** (модуляция добротности) на пульте ДУ. При этом должна возникнуть генерация, которая фиксируется с помощью визуализатора, установленного на выходе излучателя (наблюдается зеленое свечение). Мощность генерируемого излучения в режиме модуляции добротности будет значительно превышать таковую в режиме свободной генерации, что будет выражаться в увеличении яркости пятна генерации на визуализаторе и более громких щелчках;

- остановите подачу разрядных импульсов на лампу нажатием кнопки **Lamp** (циклическое нажатие кнопки **Lamp** эквивалентно функциям **Старт - Стоп**);

- закройте излучатель крышкой. **Лазер готов к работе**;

- настройте систему измерения длительности импульсов генерации. Для этого, используя луч юстировочного лазера, отраженный от зеркала 4, установите элементы 7 - 10 так, как показано на рис. 2.1. Подключите выход лавинного фотодиода 9 к входу осциллографической платы или к осциллографу.

Упражнение 2. Измерение зависимости энергии генерации от времени задержки выключения напряжения на модуляторе относительно включения лампы накачки и наблюдение временного распределения интенсивности генерации

При осуществлении активной модуляции добротности необходимо синхронизировать момент выключения электрооптического затвора с моментом включения лампы накачки с определенной задержкой.

1. Правильно отъюстируйте все элементы установки! (см. Упражнение 1)
2. **Наденьте защитные очки.** Включите лазер LS-2132У и, пользуясь визуализатором, установите приемник *I2* так, чтобы все излучение генерации попадало в его входное отверстие. Подготовьте систему регистрации энергетических характеристик генерации к работе.
3. Проведите измерения зависимости энергии импульса генерации лазера от времени задержки включения запуска электрооптического затвора (ЭОЗ). Для этого установите энергию накачки 15 Дж, затем выведите на табло пульта ДУ индикацию времени задержки включения запуска ЭОЗ, для чего необходимо произвести следующие действия на пульте ДУ:

- **Одновременное нажатие кнопок «FUNCTION» и «DISPLAY»** переводит пульт ДУ в дополнительное меню пользователя и выводит на индикатор частоту повторения импульсов накачки **«Output Lamp Pulse Repetition Rate Hz»**. Нажимая кнопку **«DISPLAY»**, вызвать задержку запуска электрооптического затвора – **«Delay of Q-Switch mks»**. Далее кнопками **« > »** или **« < »** можно изменять значение времени задержки. На пульте ДУ в это время отображается время задержки в мкс. Для возврата в основное меню последовательно нажимайте кнопку **«DISPLAY»** до появления значений энергии накачки **«Pump Lamp Energy J»**.

4. Изменяя время задержки от 100 мкс до 220 мкс, проведите измерения энергии генерации лазера с шагом 10 мкс. Оцените погрешность измерений с учетом класса точности измерительных приборов. При выполнении упражнения также наблюдайте визуально осциллограммы лазерного импульса и сохраняйте их.

5. Выключите лазер и другие приборы!

6. Постройте график зависимости энергии импульса генерации лазера от времени задержки включения запуска электрооптического затвора. Объясните полученный результат.

7. Определите оптимальное значение времени задержки, которое соответствует максимальному значению энергии генерации.

8. Постройте осциллограммы временного распределения интенсивности генерации для оптимального значения задержки, а также для двух неоптимальных: до и после оптимального значения.

9. Объясните полученные результаты.

Упражнение 3. Определение порога и КПД генерации

Выполнение данного упражнения практически не отличается от выполнения аналогичного упражнения при исследовании режима свободной генерации. Предварительно необходимо установить на пульте ДУ оптимальное значение времени задержки импульса синхронизации. Это значение определяется по зависимости, измеренной в предыдущем упражнении, и соответствует максимальному значению энергии генерации.

- Настройте систему измерения энергии лазерной генерации.
- **Наденьте защитные очки.** Включите лазер.
- Проведите измерение зависимости энергии генерации от энергии накачки для оптимального значения времени задержки, а также двух неоптимальных: до и после оптимального значения.
- По измеренным данным постройте графики зависимости энергии генерации от энергии накачки, определите пороговую энергию накачки, КПД генерации, дифференциальный КПД генерации.
- Сравните результаты, полученные в режимах модуляции добротности и свободной генерации.

Теоретические вопросы к работе «Оптический квантовый генератор на кристалле иттрий алюминиевого граната с неодимом»

1. Уравнение переноса излучения в усиливающей среде. Коэффициент усиления.
2. Инверсия населенностей.
3. Основные методы создания инверсии в средах. Трехуровневая система. Четырехуровневая система.
4. Спектр мод резонатора.
5. Динамика процессов в лазере. Режим стационарной генерации.
6. Порог генерации, КПД генерации, дифференциальный КПД генерации.
7. Режим модуляции добротности.
8. Лазер на кристалле иттрий алюминиевого граната с неодимом.

ЛИТЕРАТУРА

1. О.Звелто, Принципы лазеров. М.: «Лань», 2008.
2. Н.В.Карлов, Лекции по квантовой электронике. М.: «Наука», 1988.
3. Л.В.Тарасов. Физика лазера. М.: Книжный дом «Либроком», 2011.
4. Ю.Айхлер, Г.И.Айхлер, Лазеры. Исполнение, управление, применение. М.: «Техносфера», 2008
5. В.И.Дудкин, Л.Н.Пахомов, Квантовая электроника. Приборы и их применение. М.: «Техносфера», 2006.
6. Зверев, Г. М. Лазеры на алюмоиттриевом гранате с неодимом / Г. М. Зверев [и др.]. М.: Радио и связь, 1985. 144 с.
7. Каминский А. А., Лазерные кристаллы// М.:Наука, 1975
8. Г.С. Ландсберг, Оптика. Учебное пособие для вузов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010.