

Лекция 10. Лазерные технологические установки на основе твердотельных лазеров.

1. Сравнительные характеристики активных сред твердотельных лазеров.

Среди множества кристаллов с различными примесями наиболее широкое применение нашли $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$ (рубин) и $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Nd}^{3+}$ (иттрий-алюминиевый гранат - YAG). Прочие лазерные кристаллы по разным причинам применяют гораздо реже, в лабораторной лазерной технике. Промышленность выпускает также лазеры на основе различных стекол с Nd^{3+} (для технологических лазеров) и волокон с Er^{3+} , Yb^{3+} (для волоконных лазеров).

1.1. РУБИНОВЫЙ ЛАЗЕР

Первым квантовым генератором оптического диапазона, с появлением которого началось бурное развитие не только квантовой радиофизики и квантовой электроники, но и новейший этап развития оптики в самом широком смысле, был лазер на монокристалле рубина (1960 год).

Рубиновый лазер был первым из класса лазеров, которые принято называть твердотельными. К ним относятся все лазеры на основе легированных ионных кристаллов - диэлектриков, а также легированных стекол. Сюда же следует отнести и лазеры на ионных кристаллах с центрами окраски. В них принципиально возможна лишь оптическая накачка.

Использование оптической накачки накладывает определенные условия на материал кристаллической матрицы и легирующей примеси. В качестве матриц пригодны прозрачные бесцветные кристаллы, имеющие хорошую механическую прочность, высокую оптическую однородность, достаточную теплопроводность и термостойкость, химическую стойкость. Важно, чтобы существовала технология выращивания и обработки монокристаллов необходимого оптического качества.

Особое требование к лазерным оптическим элементам - достаточная стойкость материала как к интенсивному лазерному излучению (лучевая прочность), так и к излучению накачки, в первую очередь к УФ-излучению.

Легирующая примесь прежде всего должна быть "родственной", хорошо растворимой в расплаве материала матрицы. Пригодны только примеси замещения, не подверженные сегрегации на границах кристаллов.

Спектр энергетических уровней примесного центра (иона) - наиболее важный фактор; от него зависит эффективность работы лазера. Перечислим основные требования к спектру примесного иона:

- 1) уширение нижних (лазерных) уровней, то есть уширение линии люминесценции, должно быть умеренным, порядка нескольких см^{-1} ;
- 2) уширение верхних уровней (вспомогательных уровней накачки) желательно иметь значительным, в десятки см^{-1} и более для эффективности накачки широкополосными источниками излучения;
- 3) время жизни верхнего лазерного уровня должно быть на порядок более, чем время жизни вспомогательных высоковозбужденных состояний;

4) квантовый выход фотолюминесценции должен быть как можно больше; для этого основным каналом распада вспомогательного уровня должен быть переход на верхний лазерный уровень;

5) желательно, чтобы нижний лазерный уровень был не основным, а первым возбужденным состоянием, отстоящим от основного по энергии по крайней мере на несколько кТ;

6) желательно, чтобы разность энергий вспомогательного и верхнего лазерного уровней была как можно меньше, чтобы был более высоким КПД.

Практически такие свойства имеют только ионы переходных металлов, лантаноидов и актиноидов, т.е. d – и f-элементов. Электронные плотности основного и низших возбужденных состояний внутренних электронных оболочек достаточно хорошо экранированы наружными оболочками и потому слабее подвержены возмущениям, приводящим к уширению линии люминесценции. Высокие возбужденные состояния, напротив, экранированы слабо и потому их уширение на порядок сильнее, чем у лазерного перехода. Условия (5) и (6) не обязательные; для рубина, в частности, (5) не выполнено, и он работает по трехуровневой схеме. Условие (1) также не всегда выполняется, но лазерная генерация получена в четырехуровневых системах с хорошим квантовым выходом люминесценции (например, в неодимовом стекле).

Рубиновый лазер, как и большинство иных твердотельных лазеров, по своим свойствам далек от идеального генератора строго монохроматических электромагнитных колебаний оптического диапазона, и пространственная конфигурация его излучения далека от простой структуры наподобие плоской волны. Излучение его обычно нестационарно даже на протяжении микросекунд. При всем этом особенности работы квантовых генераторов оптического диапазона были впервые продемонстрированы, изучены, осознаны именно на примере рубинового лазера. Опыт исследований характеристик и режимов работы рубиновых лазеров, исследования свойств их излучения стал основой современного бурного развития квантовой электроники и квантовой оптики. На этой базе исследования привели к появлению более совершенных, зачастую более близких к идеальным генераторов высококогерентного оптического излучения.

С появлением новых лазеров на основе гранатов рубиновые лазеры утратили свое первенство. Тем не менее, их до сих пор применяют для решения многих технических и научных задач, где требуются мощные источники излучения видимого диапазона. Немаловажно и то, что на установках с рубиновыми лазерами впервые были получены и исследованы разнообразные режимы излучения - хаотические и регулярные пульсации, формирование коротких мощных импульсов, формирование сглаженных импульсов, комбинированные режимы излучения.

1.1 Физические основы работы рубинового лазера

Рубин представляет собой ионный кристалл окиси алюминия (глинозем, корунд, лейкосапфир или просто сапфир) Al_2O_3 с замещением части ионов Al^{3+} на Cr^{3+} . Нелегированный корунд - кристалл, по твердости уступающий только алмазу, с заметным двулучепреломлением (показатель преломления для обыкновенной волны 1.76). Теплопроводность его при комнатной температуре на порядок хуже,

чем у металлов, а при снижении температуры теплопроводность растет, достигая максимума вблизи температуры жидкого азота, где она становится лучше, чем у меди.

Природные рубины с густо-красной окраской, которую создает большая концентрация хрома (порядка одного процента), высоко ценимые ювелирами, для лазерной техники непригодны. Природные рубины имеют много дефектов, внутренних напряжений, посторонних химических примесей и макровключений, и не достигают нужных для лазерной техники размеров. Концентрация хрома в них существенно выше оптимальной. Поэтому в лазерной технике применяют только синтетические монокристаллы розового рубина со строго нормированными химсоставом и оптическими характеристиками.

У монокристалла розового рубина хорошо заметен дихроизм. Поликристаллы рубина для лазеров непригодны из-за чрезмерного внутреннего светорассеяния и искажений волнового фронта на оптических неоднородностях. В монокристаллах оптические неоднородности могут возникать из-за локальных внутренних напряжений и неравномерного легирования. Оптимальной принято считать концентрацию ионов хрома около 0,05% (по массе). Повышение концентрации хрома, во-первых, снижает однородность накачки за счет более сильного светопоглощения. Во-вторых, при высокой концентрации легирующих ионов их уровни энергии испытывают уширения и сдвиги за счет взаимодействий между близко расположенными ионами. Чисто кулоновское взаимодействие дает сдвиг и некоторое неоднородное уширение. Обменное взаимодействие из-за перекрытия волновых функций локализованных состояний ионов превращает уровень энергии в квазинепрерывную полосу (примесную зону), внутри которой облегчена пространственная миграция энергии возбуждения и релаксационные процессы. Результатом обменного взаимодействия будет дополнительное однородное уширение. Изредка используют рубины с содержанием хрома до 1%. В этих случаях нужна очень мощная накачка, но и энергия излучения может быть гораздо большей.

Систему уровней энергии ионов Cr^{3+} , показанную на рис. 1а, приближенно описывает простая трехуровневая схема. Излучение накачки поглощается на переходах ${}^4\text{A}_2 - {}^4\text{F}_{1,2}$ (сине-зеленая и фиолетовая полосы поглощения). Время жизни ${}^4\text{F}$ -состояний мало ($10^{-7}..10^{-8}$ с); его определяют безызлучательные переходы в метастабильное состояние ${}^2\text{E}$, расщепленное на два близких (29 см^{-1}) подуровня, 2А и Е. Их заселенности при комнатной температуре практически одинаковы ($kT \approx 200 \text{ см}^{-1}$). Переходы из этих долгоживущих состояний (3 мс) в основное и способны дать лазерную генерацию на линиях R1 (693,4 нм) и R2 (692,9 нм). Указанные длины волн лазерных переходов относятся к комнатной температуре; при понижении температуры кристалла они уменьшаются под влиянием решетки.

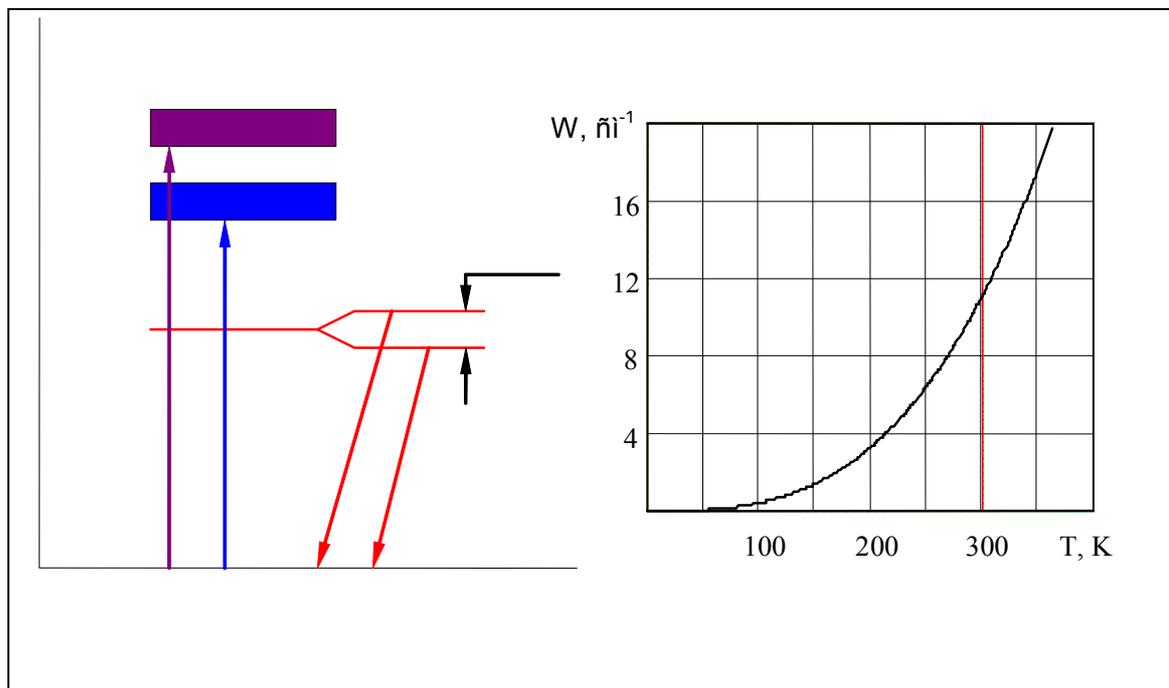


Рис. 1. Схема энергетических уровней. Зависимость уширения спектральной линии лазерного перехода от температуры.

Важнейшие параметры лазерного перехода в рубине (R_1):

Длина волны при 300 К -	693,4 нм
Длина волны при 77 К -	692,3 нм
Ширина линии перехода при 300 К	11 см^{-1}
Температурный коэффициент уширения при 300 К	0.2 $\text{см}^{-1}/\text{град}$
Время жизни верхнего лазерного уровня	3 мс

В этой схеме принципиально важно то, что нижним рабочим уровнем служит основное состояние; поэтому большую часть энергии накачки приходится затрачивать на опустошение основного состояния более чем на половину от равновесной заселенности. Только в этом случае за счет большого времени жизни ионов хрома в состоянии 2E между рабочими уровнями рубинового лазера возникает инверсия заселенностей и, как следствие, усиление света и возможность лазерной генерации. Для рубинового (и вообще трехуровневого) лазера разумно определить два пороговых уровня мощности накачки:

- порог инверсии - мощность, необходимая для уменьшения в два раза заселенности основного состояния; при этом заселенности нижнего и верхнего рабочих уровней лазера будут равными;
- порог генерации - мощность, необходимая для полной компенсации потерь излучения в лазере усилением активной среды.

В рубине с типовой концентрацией хрома (0,05%) и зеркалами хорошего качества порог генерации лишь немного превышает порог инверсии. Это означает, что усиление света в рубине выше порога инверсии быстро растет при увеличении мощности накачки. На практике для получения генерации достаточно иметь

выходное зеркало с отражением лишь в единицы процентов. Лазер с выходным зеркалом в виде плоского торца активного элемента для достижения порога генерации потребует примерно на 25% большую мощность накачки, чем лазер с типовым выходным зеркалом (50%).

Уширение спектральной линии лазерного перехода сильно зависит от температуры T кристалла (примерно как T^3); при $T = 300 \text{ K}$ оно равно 11 см^{-1} (см. рис. 1б). Такая зависимость, во-первых, указывает на воздействие колебаний решетки кристалла на ионы хрома и на однородный характер уширения. Во-вторых, такая зависимость требует эффективного охлаждения кристалла при работе с большими частотами повторения импульсов и тем более при непрерывной накачке. Неоднородная часть уширения в рубине обычно менее $0,1 \text{ см}^{-1}$, и ее разумно принимать во внимание только при низких температурах, когда однородная компонента становится сравнимой с неоднородной.

Еще одно важное свойство трехуровневой активной среды - поглощение на частоте самого лазерного излучения в пассивных (не освещенных интенсивным излучением накачки) участках рабочего вещества. Наличие таких пассивных областей из-за неудачной конструкции ухудшает рабочие характеристики рубинового лазера, в первую очередь снижая энергию и мощность излучения, а также влияет на динамику его излучения (зависимость мощности от времени, характер самопроизвольных пульсаций излучения и т.п.).

Типовой режим работы лазера на рубине - импульсный. Так как время жизни верхнего лазерного уровня порядка миллисекунды, то имеет смысл использовать световые импульсы накачки длительностью от сотен микросекунд до единиц миллисекунд. Для накачки используют линейные импульсные газоразрядные лампы с ксеноном или криптоном (100 Торр), дающие практически белый свет с существенной долей его в сине-зеленой и фиолетовой области спектра, где ионы хрома имеют сильные полосы поглощения.

В рубиновом лазере просто получать различные динамические режимы излучения. Для этого следует ввести в резонатор лазера нелинейный поглотитель. На рабочей частоте рубинового лазера некоторые стандартные окрашенные стекла проявляют зависимость пропускания от плотности потока энергии излучения.

Типовой режим свободной генерации рубинового лазера - пиковый, с хаотическими пульсациями мощности излучения от максимальной до срыва генерации на периоды времени от долей до десятка микросекунд. Длительности отдельных пиков - порядка микросекунды. Часто можно наблюдать переходы от хаотических пульсаций к регулярным и наоборот.

Внося в резонатор потери, растущие при росте интенсивности излучения, можно уменьшать глубину пульсаций. При этом срезаются самые высокие пики и устраняются кратковременные срывы генерации. Регулируя уровень подобных (фототропных) потерь, зависящих от освещенности поглотителя, можно либо полностью сглаживать импульс свободной генерации, либо получать пульсации излучения на фоне гладкого импульса - подставки. При этом соотношение средней и пиковой мощностей излучения будет меняться в широких пределах. Такие возможности регулирования режима излучения полезны в лазерной технологии.

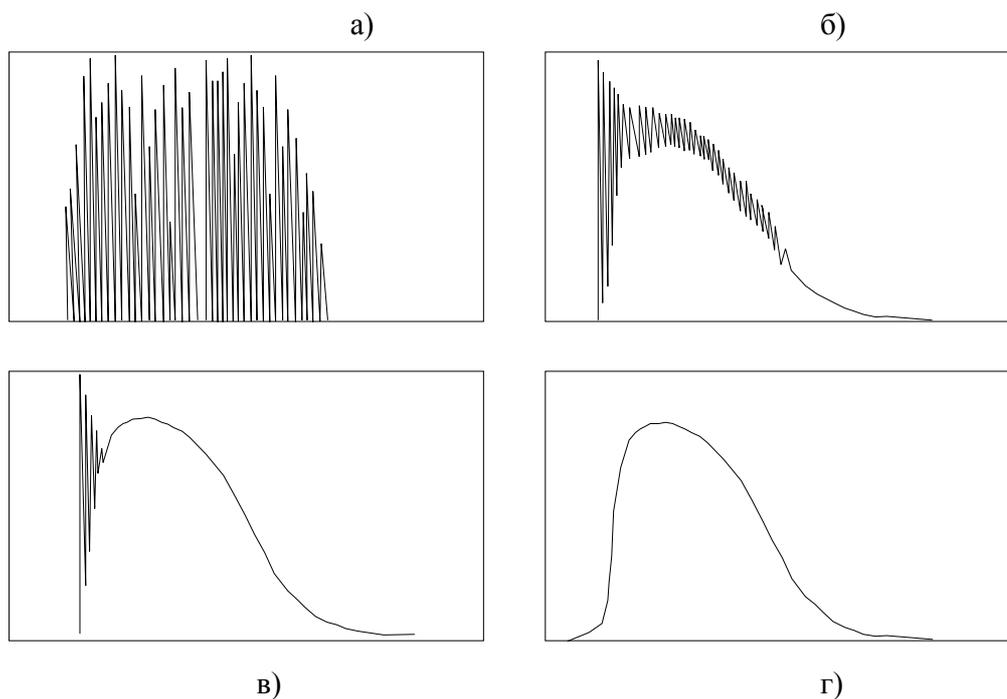


Рис. 2. Осциллограммы импульсов рубинового лазера. а)- в режиме свободной генерации, б), в) – в режимах сглаживания г) – в квазистационарном режиме.

1.2. Устройство и важнейшие характеристики рубинового лазера

Активные элементы рубиновых лазеров имеет форму цилиндра диаметром от 5 до 16 мм и длиной от 80 до 240 мм. Типовое отношение длины к диаметру равно примерно 15 - 20. Обычная концентрация ионов хрома - 0,05%. Рубин обладает двулучепреломлением и дихроизмом, поэтому для улучшения однородности излучения ось активного элемента чаще всего выбирают совпадающей с оптической осью монокристалла. Влияние дихроизма на эффективность накачки следует учитывать при монтаже активного элемента в осветитель, согласуя направление наибольшего поглощения с направлением излучения ламп. Иногда ось активного элемента ориентируют ортогонально оптической оси монокристалла. В этом случае излучение лазера будет иметь линейную поляризацию, направление которой жестко привязано к ориентации оптической индикатриссы кристалла. Ориентацию оптической оси кристалл наследует от ориентации затравки на стадии выращивания слитка.

Номенклатура размеров активных элементов, выпускаемых промышленностью, согласована с номенклатурой импульсных газоразрядных ламп. Особенность рубинового лазера как трехуровневого требует добиваться как можно более однородного освещения активного элемента по всему его объему. Для этого длина ламп, размеры корпуса осветителя, светоотражателя и активного элемента должны быть оптимально согласованы.

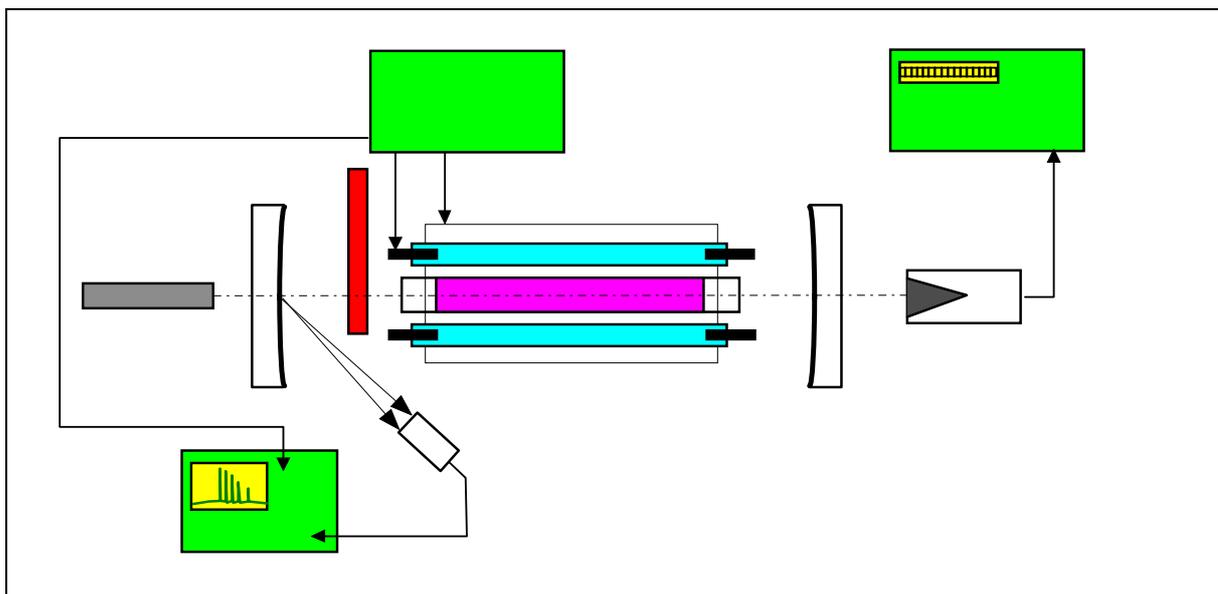


Рис. 3 Структурная схема рубинового лазера. Излучатель показан в продольном разрезе.

Часто описываемые в учебной и справочной литературе отражатели с эллиптическими поверхностями, сложные в изготовлении, применяются редко. Практический опыт показывает, что гораздо большее значение имеет предельно компактное размещение ламп накачки и активного элемента, а диффузный светорассеиватель обеспечивает гораздо лучшую равномерность накачки в сравнении с зеркальными.

Торцы активного элемента должны быть плоскими и отполированными по наивысшему классу точности. Торцы для удобства юстировки оптической схемы выполняют параллельными. Их плоскости могут быть ортогональными оси активного элемента или скошенными (чаще всего для проходных усилительных каскадов и для лазеров с особыми требованиями к спектру излучения, где недопустимо влияние излучения, отраженного от торца, за счет его интерференции с исходным излучением). Иногда торцы срезают под углом Брюстера; в этом случае излучение лазера также линейно поляризовано, а в проходном усилителе обеспечивается наилучшая развязка входа от выхода.

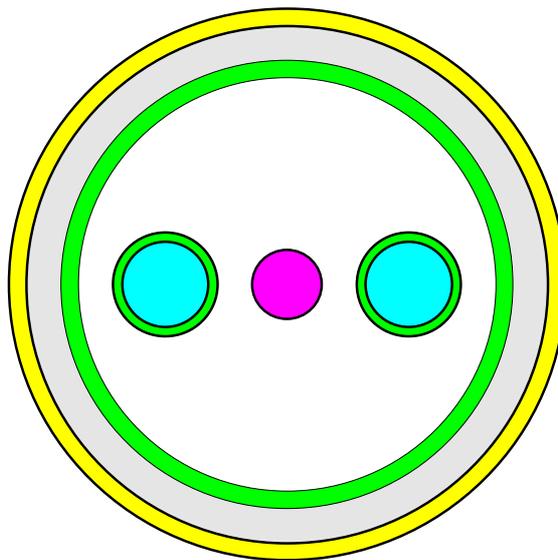


Рис. 4 Поперечный разрез излучателя рубинового лазера

Цилиндрическим поверхностям активных элементов обычно придают шероховато-полированную зернистую структуру, которая нарушает полное внутреннее отражение и подавляет возможную паразитную генерацию лазера на кольцевых типах колебаний.

Длительность светового импульса накачки выбирают от сотен микросекунд до нескольких миллисекунд, в согласии с допустимой мощностью и энергией возбуждения ламп накачки. Генерация длится заметно меньше, чем накачка; она начинается с задержкой по отношению к началу импульса накачки, так как для накопления ионов хрома на верхнем рабочем уровне и существенного опустошения нижнего уровня (для достижения порога инверсии) требуется значительная энергия. Эту задержку следует учитывать при необходимости активного управления излучением лазера. Например, иногда требуется быстрое включение генерации лазера в строго определенный момент времени. Для подобного управления (его называют активной модуляцией добротности, или потерь) используют быстродействующие оптические затворы на основе эффектов Керра или Поккельса. Понятно, что затвор имеет смысл открывать только тогда, когда накопленная в среде энергия превосходит не только порог инверсии, но и порог генерации системы с открытым затвором.

В простейшей схеме лазера реализуется так называемый режим свободной генерации, когда отсутствует непосредственное управление параметрами активной среды и резонатора. Характер излучения в этом случае определяют свойства резонатора и нелинейности активной среды.

В твердотельных лазерах в пределы спектрального диапазона, где усиление превосходит потери, попадает огромное число собственных типов колебаний (мод) резонатора, различающихся по продольному индексу. Генерация получается многочастотной. Поэтому монохроматичность излучения лазера на рубине невысока (ширина спектра порядка единиц обратных сантиметров). Кроме того, для мод с различными поперечными индексами добротности могут различаться

слабо из-за большого значения числа Френеля в реальных лазерных системах. Генерацию на многих поперечных типах колебаний традиционно (и не вполне точно) называют многомодовой. Многомодовый режим дает невысокую пространственную когерентность излучения и сложную, непредсказуемую форму волнового фронта.

В рубиновом лазере чаще всего свободная генерация имеет пиковый характер; его принято считать типичным для лазеров с плоскими зеркалами. Для этого случая в излучении участвует мало поперечных мод, индексы их невелики, и генерация происходит почти независимо в отдельных узких (порядка миллиметра) продольных нитях, параллельных оси резонатора. Длительность генерации в таком канале порядка десятков наносекунд, а амплитуда случайна. Излучение отдельных областей зависит от многих факторов (степень возбуждения, качество кристалла и прочих оптических элементов в рабочей области спектра, пространственная однородность накачки, рассеяние излучения и др.). Поэтому время возникновения каждого пика случайно, что и наблюдают как неупорядоченные во времени и по амплитуде резкие изменения мощности лазерной генерации.

При конфигурации резонатора, близкой к конфокальной, число излучаемых поперечных мод резко возрастает (до десятков тысяч), поля отдельных мод сильно перекрываются, излучение в значительной степени усредняется и в пространстве и во времени, и генерация по динамике более похожа на непрерывное излучение в течение всего периода, пока накачка превышает порог генерации. Такой режим называют гладким или беспиковым. Часто возникают регулярные пульсации излучения, при которых амплитуды импульсов и частота их повторения сильно коррелированы с текущей мощностью накачки. Можно наблюдать переходы от хаотических пульсаций к регулярным и наоборот.

Для эффективного сглаживания излучения в режиме свободной генерации можно использовать нелинейный (фототропный) поглотитель, у которого поглощение излучения лазера возрастает с увеличением его интенсивности. Проще всего использовать окрашенное стекло с полосой поглощения на удвоенной частоте лазерного излучения. Для рубинового лазера более всего подходит стекло КС-15 толщиной в несколько миллиметров. Так как сечение двухквантового поглощения пропорционально интенсивности излучения, то такой поглотитель эффективно работает только при значительной мощности генерации, подавляя пики излучения выше некоторого среднего уровня. Так обеспечивается дополнительное сглаживание импульса свободной генерации.

На осциллограмме сглаженного импульса свободной генерации (рис. 2в) видно, что сглаженному импульсу предшествует короткий быстро затухающий цуг пиков (лидер), с которого начинается процесс развития генерации. По-видимому, с увеличением числа фактически генерируемых мод пульсации ослабевают, и генерация переходит в беспиковую стадию.

Средняя мощность излучения рубинового лазера в режиме свободной генерации обычно около 10^5 Вт (10^2 Дж/ 10^{-3} с). В пиковых режимах при нерегулярных пульсациях излучения пиковая мощность может превышать среднюю примерно на два порядка. Такие отдельные пики мощности в режиме свободной генерации случайны, нестабильны, непредсказуемы и практически

невоспроизводимы. Энергия лазерного импульса ограничена объемом активного элемента, и для увеличения пиковой мощности излучения лазера обычно стараются укоротить длительность импульса, по возможности сохраняя его энергию. Для этого используют уже упомянутый способ модуляции добротности (потерь) резонатора. По существу при активной модуляции добротности в резонатор с максимально возможной скоростью включают в резонатор сильно отражающее зеркало. Для этого оптимален момент, когда в активном элементе за счет ранее начатой накачки накоплена максимальная энергия. В идеале включить обратную связь (резонатор) желательно за время прохода излучения по длине резонатора (несколько наносекунд). Технически это удастся сделать за десятки наносекунд.

На практике для формирования коротких мощных импульсов часто применяют способ так называемой пассивной модуляции добротности. Для этого используют поглощающий элемент, просветляемый спонтанным излучением активной среды. Его помещают между активным элементом и зеркалом. В качестве просветляющегося фильтра используют либо раствор красителя, либо кристалл или стекло с подходящей полосой резонансного поглощения в диапазоне линии усиления лазера. Для рубинового лазера хорошо подходит стекло КС-19. Пока поглотитель не насыщен, он эффективно поглощает спонтанное излучение активной среды и эффективно “отключает” зеркало от участия в развитии генерации. По мере накопления инверсии в активном веществе заселенность верхнего лазерного уровня и мощность спонтанного излучения растет. В некоторый момент она может оказаться достаточной для насыщения поглотителя. При этом зеркало оказывается “включенным” в резонатор, начинает развиваться вынужденное излучение, которое по мере роста интенсивности улучшает и ускоряет просветление поглотителя. В результате практически вся накопленная в активной среде энергия накачки переходит в излучение за несколько обходов света по резонатору (за наносекунды). Так формируются “гигантские” импульсы излучения лазера. Энергия такого импульса обычно составляет единицы джоулей, но пиковая мощность может достигать сотен мегаватт.

Если после формирования гигантского импульса накачка продолжается, то подобным же образом могут сформироваться еще один или несколько импульсов. Количество и частота повторения импульсов зависят от порога насыщения поглотителя (то есть от концентрации красителя или толщины стекла). За время действия накачки (порядка миллисекунды) при умеренном пороге насыщения поглотителя в рубиновом лазере могут сформироваться регулярные последовательности в десятки импульсов, упорядоченных во времени и по амплитуде гораздо сильнее, чем пички свободной генерации.

Существует простой способ управления частотой повторения регулярных импульсов в режиме пассивной модуляции добротности. Если фототропное стекло перекрывает только часть апертуры активного элемента, то это равносильно снижению порога просветления поглотителя. В этом случае в непокрытой части апертуры начинает развиваться свободная генерация, излучение которой очень быстро просветляет поглотитель, и далее развивается гигантский импульс, в формировании которого принимает участие уже весь активный элемент. Чем

меньше перекрыта поглотителем апертура активного элемента, тем чаще повторяются регулярные импульсы и тем меньше энергия в каждом отдельном импульсе.

Характер развития генерации лазера с пассивным фототропным затвором особенно нагляден при высоком уровне потерь в полностью включенном резонаторе. На рис. 3б показана осциллограмма излучения рубинового лазера с пассивным затвором (КС-19, 1,5 мм), у которого выходным зеркалом служит торец активного элемента. Виден рост излучения на стадии, предшествующей быстрому формированию гигантского импульса, и спад излучения за задним фронтом гигантского импульса. Рост спонтанного излучения в лазере с более добротным резонатором (при 50% выходном зеркале) заметно меньше, а спад за фронтом гигантского импульса – глубже.

2.1 Твердотельные Nd:YAG-лазеры с ламповой накачкой.

Исторически твердотельные Nd:YAG-лазеры с ламповой накачкой были лазерными источниками, составившими основную конкуренцию рубиновым лазерам в технологических применениях. Схема таких лазеров представлена на рис. 2.1. Это проверенное надежное решение, ведь компоненты таких лазеров отрабатывались в течение нескольких десятилетий, и сегодня их производством занимаются сотни компаний во всем мире. Однако «ламповым» лазерам присущ ряд недостатков, вынуждающих в некоторых случаях искать им замену: невысокий коэффициент полезного действия, большое энергопотребление, необходимость во внешнем водяном охлаждении и в периодической замене ламп накачки.

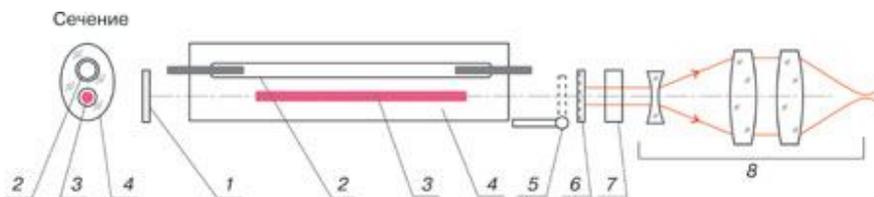


Рис. 2.1 Вариант исполнения Nd:YAG-лазера с ламповой накачкой: 1 — заднее зеркало, 2 — лампа накачки, 3 — кристалл Nd:YAG, 4 — отражатель, 5 — заслонка, 6 — выходное зеркало, 7 — модулятор света, 8 — фокусирующая оптическая система

2.2. Твердотельные лазеры с диодной накачкой.

Развитие и совершенствование лазерной техники в 90-е гг. привели к распространению твердотельных лазеров, включая и Nd:YAG-лазеры, где ламповый источник света (оптическая накачка) заменен полупроводниковыми лазерами (диодами). Это лазеры с полупроводниковой накачкой, один из вариантов оптической схемы которых представлен на рис. 2.2. Главное отличие этих лазеров от «ламповых» заключается в более высокой (на порядок!) эффективности преобразования излучения мощных лазерных диодов, что позволяет избежать высокого электропотребления, интенсивного внешнего водяного охлаждения (обычно внутренний контур водяного охлаждения активного

тела лазера все же необходим). Очевидно, это делает системы с такими лазерами очень удобными в эксплуатации. Их главным преимуществом является высокий (более 50% к.п.д.)

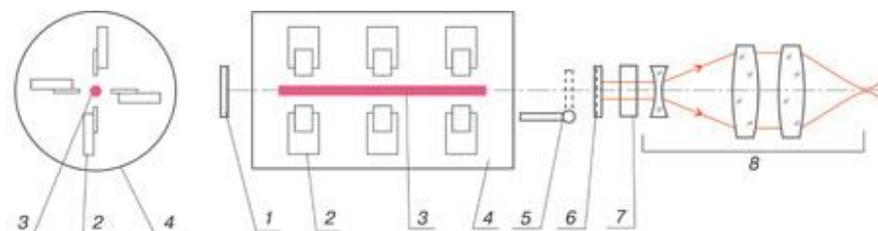


Рис.2.2. Вариант исполнения Nd:YAG-лазера с полупроводниковой накачкой: 1 - заднее зеркало, 2 - лазерные диоды оптической накачки, 3 - кристалл Nd:YAG, 4 - корпус, 5 - заслонка, 6 - выходное зеркало, 7 - модулятор света, 8 - фокусирующая оптическая система

2.3. Волоконные лазеры.

Из лазеров с полупроводниковой накачкой, в свою очередь, наиболее популярными становятся волоконные лазеры (Fiber Laser или Faser). Сегодня эти устройства достигли уровня характеристик, в первую очередь, мощности, надежности, позволяющих с успехом использовать их для решения различных задач лазерной обработки материалов. Очень часто волоконные лазеры заменяют в приложениях лазеры других типов, например, твердотельные Nd:YAG-лазеры. Они представляют собой практически идеальные преобразователи световой энергии лазерных диодов накачки в лазерное излучение с рекордным КПД, по сравнению, например, с Nd:YAG-лазерами. Создание таких лазеров явилось результатом многолетнего развития лазерной техники.

Говоря о технической стороне дела, стоит остановиться на некоторых конструктивно-технологических и эксплуатационных достоинствах систем с волоконными лазерами.

Сначала остановимся немного на технических особенностях самих волоконных лазеров с полупроводниковой накачкой. Самое общее представление о них давалось на страницах настоящего журнала примерно год назад в общем обзоре лазеров, применяемых для технологий Computer-to-Plate. Напомним некоторые наиболее важные особенности этих лазеров. На рис. 2.3 представлена схема работы волоконного лазера с полупроводниковой накачкой и в общем виде весь оптический тракт вплоть до обрабатываемого материала.

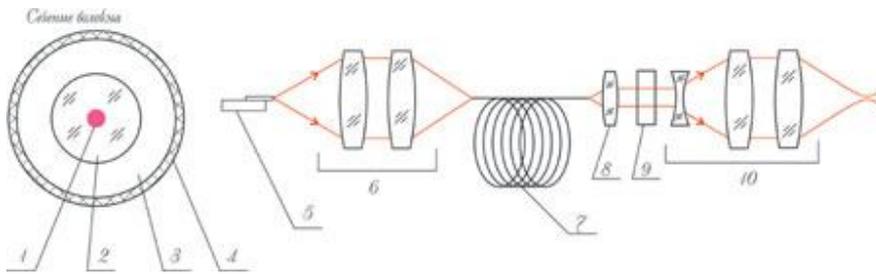


Рис. 2.3. Оптическая система с волоконным лазером: 1 — сердцевина, легированная металлом, диаметр 6–8 мкм; 2 — кварцевое волокно, диаметр 400–600 мкм; 3 — полимерная оболочка; 4 — внешнее защитное покрытие; 5 — лазерные диоды оптической накачки; 6 — оптическая система накачки; 7 — волокно (до 40 м); 8 — коллиматор; 9 — модулятор света; 10 — фокусирующая оптическая система

Главная особенность этого лазера в том, что излучение здесь рождается в тонком, диаметром всего в 6–8 мкм, волокне (сердцевине — например, активная среда иттербий), которое фактически находится внутри кварцевого волокна диаметром 400–600 мкм. Излучение лазерных диодов накачки вводится в кварцевое волокно и распространяется вдоль всего сложного составного волокна, имеющего длину несколько десятков метров. Упрощенно говоря, это излучение «пересекает», то есть оптически накачивает сердцевину, именно в ней на атомах иттербия (Yb) происходят те замечательные физические превращения, приводящие к возникновению лазерного излучения. Вблизи концов волокна на сердцевине делают два так называемых дифракционных зеркала — в виде набора «насечек» на цилиндрической поверхности сердцевины (дифракционные решетки); таким образом создается резонатор волоконного лазера. Общую длину волокна и количество лазерных диодов выбирают, исходя из требуемой мощности, эффективности. На выходе получается идеальный одномодовый лазерный пучок с весьма равномерным распределением мощности, что позволяет сфокусировать излучение в пятно малого размера и иметь большую, чем в случае мощных твердотельных Nd:YAG-лазеров, глубину резкости, а это чрезвычайно важно для лазерных систем свойство, особенно для многолучевых оптических систем (рис. 2.4.). Также стоит отметить, что ряд свойств излучения волоконных лазеров, например, характер поляризации пучка, делает более удобным и надежным управление этим излучением с помощью акусто-оптических компонентов, позволяет реализовать многолучевые схемы записи изображений. В целом повышается надежность всего оптического тракта лазерной системы. Поскольку оптическая накачка идет по всей длине волокна, отсутствуют, например, такие свойственные обычным твердотельным лазерам эффекты, как термолинза в кристалле, искажения волнового фронта вследствие дефектов самого кристалла, девиация луча со временем и др. Эти эффекты всегда были препятствием для достижения максимальных возможностей твердотельных систем. В волоконном же лазере сам принцип его устройства и работы гарантирует высокие «отчетные характеристики» и делает такие лазеры совершенными, практически идеальными преобразователями светового излучения в лазерное.

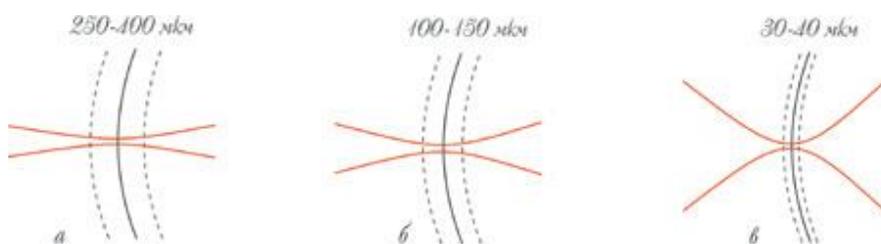


Рис. 2.4. Форма пучка разных лазерных источников: а — волоконные лазеры, одномодовый режим; б — Nd:YAG-лазеры, многомодовый режим; в — излучение лазерных диодов

Интересна история развития этих лазеров. Первоначально это были усилители волоконных линий связи, в которых используется такой же физический принцип усиления сигнала, что и при генерации лазерного излучения. Такие усилители широко используются в системах телекоммуникации на базе оптических волокон. Развитие этих устройств привело к тому, что мощность создаваемого ими оптического излучения достигла уровней нескольких десятков ватт, а это сделало возможным их применение в задачах лазерной обработки материалов. Для одной из таких задач — удаления тонкого черного слоя на цифровом фотополимере — эти лазеры подходят наиболее оптимально, можно сказать, идеально.