

А.А. Данков

**УПРАВЛЕНИЕ ИННОВАЦИОННЫМИ ПРОЦЕССАМИ
ПРИ РАЗРАБОТКЕ ОПТИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ
ГЕНЕРАТОРОВ И УСИЛИТЕЛЕЙ**



Санкт-Петербург
2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

А.А. Данков

**УПРАВЛЕНИЕ ИННОВАЦИОННЫМИ ПРО-
ЦЕССАМИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ОПТИЧЕСКИХ
КВАНТОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ И УСИЛИТЕЛЕЙ**

Учебное пособие

Санкт-Петербург

2017

Данков А.А. Управление инновационными процессами при разработке оптических квантовых генераторов и усилителей. – СПб: Университет ИТМО, 2017. – 105 с.

В пособии рассмотрены вопросы, связанные с применением лазеров в оптических приборах и системах: виды лазерных излучений оптических квантовых генераторов и усилителей, основные параметры и характеристики лазерных излучений, режимы работы лазеров и их основные эксплуатационные параметры, виды лазерных систем. В ходе освоения курса учащиеся должны не только ознакомиться с основными характеристиками лазерных излучений и видами лазерных приборов, но и самостоятельно определять область назначения, активно применять светоэнергетические расчеты основных параметров лазерных систем на практике при обучении. Учащиеся должны уметь анализировать и выявлять наиболее оптимальные способы и средства применения лазеров в конкретной задаче, делать экспертные заключения, участвовать в дискуссиях, обсуждая проблемные вопросы, непосредственно связанные с лазерной техникой

Пособие адресовано студентам, обучающимся по направлению подготовки 27.04.05 «Инноватика»

Рекомендовано к печати УМС ИМБИП, протокол № 8 от «15» марта 2017г.

Университет ИТМО – ведущий ВУЗ России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2017

©Данков А.А., 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Пояснительная записка	5
Глава 1. Виды лазерных излучений и оптических квантовых генераторов, усилителей	7
1.1. Спонтанное и вынужденное излучения	7
1.2. Состояния квантовых систем	11
1.3. Твердотельные оптические квантовые генераторы	15
1.4. Газовые оптические квантовые генераторы	24
1.5. Жидкостные оптические квантовые генераторы	27
1.6. Полупроводниковые оптические квантовые генераторы	29
1.7. Оптические квантовые усилители	32
1.8. Инновации в разработке квантовых генераторов и усилителей	37
Глава 2. Основные характеристики лазерных излучений	41
2.1. Спектральные характеристики лазерных излучений	41
2.2. Пространственные характеристики лазерных излучений	44
2.3. Энергетические характеристики лазерных излучений	51
2.4. Временные характеристики лазерных излучений	54
2.5. Режимы лазерных излучений	55
2.6. Эксплуатационные параметры лазеров	58
Глава 3. Лазерные приборы и системы	60
3.1. Лазерные локационные системы	60
3.2. Лазерные гироскопы	65
3.3. Лазерные импульсные дальномеры	70
3.4. Лазерные фазовые дальномеры	76
3.5. Лазерные системы связи	80

3.6. Доплеровские системы	83
3.7. Лазерные геодезические приборы	86
3.8. Лазерные приборы в медицине	89
3.9. Лазерные технологические установки	94
Список принятых обозначений	99
Литература	100

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Целью учебно-методического пособия является ознакомление обучающихся с основными принципами и теоретическими основами создания и применения лазеров в оптических приборах и системах. Названная цель достигается посредством решения следующих **задач**:

- рассмотреть виды лазерных излучений и состояния квантовых систем;
- рассмотреть виды оптических квантовых генераторов и оптических квантовых усилителей;
- определить основные инновации, применяемые при разработке квантовых генераторов и усилителей;
- разобрать основные параметры и характеристики лазерных излучений;
- раскрыть основные режимы работы лазеров;
- показать основные эксплуатационные параметры лазеров;
- подробно рассмотреть принципы действия, основные особенности элементной базы лазерных приборов и систем, применяемых в инженерно-строительной, воздушно-космической, морской, оборонной, медицинской и геологической сферах.

При выборе оптических квантовых генераторов и усилителей для выполнения конкретных задач предварительно осуществляется анализ имеющегося арсенала, режимов работы в заданной области применения. Проводится предварительная оценка основных параметров и характеристик требуемого лазерного излучения, расчет оптической системы для формирования лазерного излучения, энергетические расчеты искомых лазерных каналов и систем. При отсутствии имеющихся лазерных приборов и систем, осуществляется разработка перспективной или модернизация существующей лазерной системы, которая будет удовлетворять заданным тактико-техническим требованиям.

Вышесказанное обуславливает трехглавную структуру по содержанию настоящего учебного пособия. В первой главе рассмотрены виды лазерных излучений и виды оптических квантовых генераторов и усилителей, которые позволяют обучающимся войти разобраться с основными отличиями и принципами действия по данным вопросам. Во второй главе рассматриваются основные параметры и характеристики лазерных излучений, а также режимы работы лазеров и их эксплуатационные параметры. Третья глава, посвящена описанию значительной группы лазерных приборов и систем применительно к различным сферам жизнедеятельности.

В целом, настоящее пособие предназначено для ознакомления обучающихся с основными понятиями и характеристиками лазерной техники, проектированием лазерных оптико-электронных приборов, источников и приемников лазерного излучения, а также вопросов аналогичной направленности.

ГЛАВА 1. ВИДЫ ЛАЗЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ И ОПТИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ, УСИЛИТЕЛЕЙ

1.1. Спонтанное и вынужденное излучения

Оптические квантовые генераторы (ОКГ) и усилители (ОКУ) основаны на использовании явления возникновения когерентного, вынужденного, направленного излучения в результате воздействия приложенной энергии возбуждения (накачки).

По используемой активной среде оптические квантовые генераторы и усилители можно разделить на твердотельные, газовые, жидкостные и полупроводниковые. В свою очередь, твердотельные ОКУ подразделяются на ОКУ бегущей волны и ОКУ резонаторного типа.

Квантовая система представляет собой микросистему, состоящую из элементарных частиц (молекул, атомов, ионов и электронов), взаимодействие между которыми рассматривается на основе законов квантовой механики.

Квантовые системы могут находиться (рис. 1) в определенных энергетических состояниях. Каждому состоянию соответствует свой энергетический уровень. Низший энергетический уровень квантовой системы называется *основным*. Все остальные вышерасположенные уровни называются *возбужденными*. Элементарная частица, находящаяся на одном из этих уровней, также называется возбужденной.

Возможные энергетические уровни отделены друг от друга *запретными зонами*. Переход атомной частицы с одного энергетического уровня на другой называется *квантовым переходом*. Переход частиц из одного энергетического состояния в другое может происходить только скачкообразно.

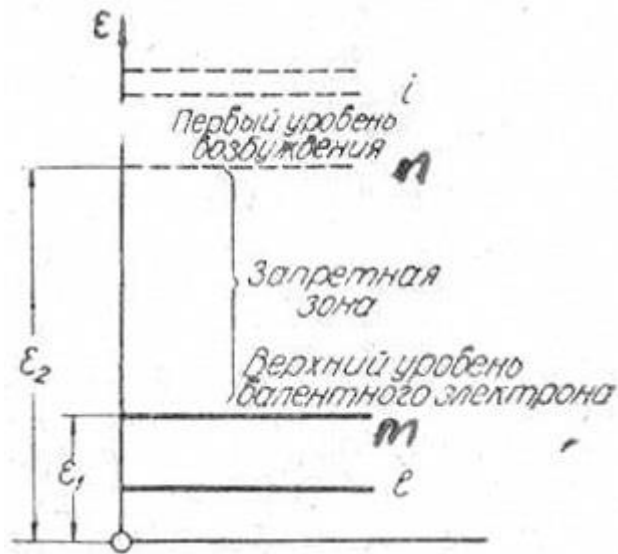


Рисунок 1 – Состояние квантовых систем

Находясь на основном уровне, атомная частица способна только поглощать энергию. При сообщении частице дополнительной энергии она переходит на более высокий энергетический уровень. Передача такой дополнительной энергии возможна либо при столкновении элементарных частиц, либо путем восприятия частицей одного из видов электромагнитного излучения.

При переходе с верхнего энергетического уровня на нижний атомная частица отдает свою энергию в виде излучения (кванта энергии)

где ϵ_n, ϵ_m - энергии частицы, соответствующие нижнему m и верхнему

$$\Delta\epsilon = h\nu = \epsilon_n - \epsilon_m,$$

n уровням;

h – постоянная Планка;

ν – частота излучения.

Частота излучения определяется из выражения:

$$\nu = \frac{\epsilon_n - \epsilon_m}{h}.$$

Атомная частица может самопроизвольно перейти с верхнего энергетического уровня на нижний, без какой-либо связи с внешним воздействием. Возникшее при этом излучение называется *спонтанным*.

Вероятность того, что в единицу времени атом с уровня n перейдет спонтанно на уровень m (рис. 1), называется *вероятностью спонтанного перехода* и обозначается через A_{nm} .

Если на уровне n находится N_n атомных частиц, то полное число переходов с уровня n на уровень m будет равно $N_n \cdot A_{nm}$ в 1 сек. Излученная мощность на частоте ν_{nm} будет равна

$$\Delta \epsilon' = N_n (\epsilon_n - \epsilon_m) \cdot A_{nm}.$$

Спонтанное излучение для каждого атома вещества происходит в разные моменты времени, в результате чего испускание фотонов носит беспорядочный характер. Световые волны, испускаемые источником при спонтанном излучении, не являются синфазными, они могут усиливать или гасить друг друга совершенно случайным образом. Такое излучение, являющееся несинфазным, называется *некогерентным излучением*.

Проведенный анализ энергетического состояния отдельного свободного атома применим и к целым системам, состоящим из атомов, молекул и ионов. Однако в этом случае картина распределения энергетических уровней значительно меняется, так как электромагнитные поля отдельных частиц оказывают взаимное влияние, в результате которого вместо отдельных энергетических уровней в атомах вещества образуются энергетические полосы и зоны. Тогда при квантовом переходе возбужденных частиц с таких полос эти частицы отдают энергию в виде целой полосы частот.

Таким образом, спонтанное излучение, характерное для тепловых источников, является сложным, т. е. представляет собой совокупность большего или меньшего числа однородных излучений и может иметь линейчатый, полосатый, или сплошной спектр.'

Между различными энергетическими уровнями имеют место не только спонтанные, но и вынужденные переходы элементарных частиц, вызванные внешним электромагнитным полем (излучением), частота которого совпадает с частотой спонтанного излучения. Элементарная частица при этом излучает фотон с энергией той же частоты. Возникшее излучение в этом случае называется *вынужденным* (индуцированным).

Отличительным свойством такого вынужденного излучения является то, что оно когерентно (синфазно) с индуцирующим излучением. В результате такого явления пришедший извне фотон (излучение) получает приращение за счет фотона, излученного возбужденным атомом.

В свою очередь, эти два фотона являются индуцирующим излучением для следующих возбужденных атомов и, воздействуя на них, вызывают новый квантовый индуцированный переход с испусканием новых фотонов. В результате получается лавинообразный процесс.

В то время как спонтанное излучение частиц является хаотическим и некогерентным в широком диапазоне волн индуцированное излучение явля-

ется когерентным, т. е. частицы излучают одновременно и в одной фазе в очень узком диапазоне длин волн.

Вероятность вынужденного излучения обозначается через B_{nm} . Полная вероятность того, что атомная система в единицу времени перейдет с уровня n на уровень m , определяется как

где u_ν – плотность внешнего (вынуждающего) излучения на частоте,

$$P_{nm} = A_{nm} + u_\nu \cdot B_{nm}$$

соответствующей энергии перехода.

Первый член данного выражения характеризует вероятность спонтанного излучения, второй член – вынужденного.

При наличии внешнего излучения квантовые системы могут переходить с более низкого энергетического уровня на более высокий. Полная вероятность такого перехода обозначается через P_{mn} .

Вероятности спонтанного и вынужденного излучений связаны между собой. Соотношения между величинами A и B известны, под названиями соотношений Эйнштейна

$$B_{nm} = B_{mn}$$

$$A_{nm} = \frac{8\pi \cdot h \cdot \nu^3}{c^3} \cdot B_{nm}$$

(для газов);

$$A'_{nm} = \frac{8\pi \cdot h \cdot \nu^3 \cdot n_0^3}{c^3} B_{nm}$$

(для твердых тел),

где c – скорость света в среде;

n_0 – показатель преломления твердого тела.

1.2. Состояния квантовых систем

Основным состоянием квантовой системы является состояние с наименьшей энергией. Однако, вследствие хаотического теплового движения молекул, часть энергии этого движения переходит в энергию внутренних движений и колебаний атомов, поэтому и на верхних энергетических уровнях может находиться определенное количество частиц. Обычно чем выше уровень, тем меньше частиц на нем находится.

Рассмотрим одну из квантовых систем, обладающую двумя энергетическими уровнями, причем на каждом из них находится произвольное число частиц. В случае термодинамического равновесия системы распределение частиц по уровням характеризуется формулой Больцмана

$$N_i = N_0 \cdot e^{-\frac{\varepsilon_i}{kT}},$$

где N_i – число частиц на i -м уровне;

N_0 – общее число элементарных частиц;

ε_i – энергия i -го уровня;

k – постоянная Больцмана;

T – абсолютная температура.

Из этого соотношения следует, что при любом положительном значении T число частиц с возрастанием энергии уровней убывает, т. е. имеют место неравенства:

При неравновесном состоянии системы на более высоком уровне расположено больше частиц, чем на более низком. Формально такое распреде-

$$N_l > N_m \text{ при } \varepsilon_l < \varepsilon_m.$$

ление частиц по энергетическим уровням получается, если считать температуру T «отрицательной». В этом случае соблюдается условие:

$$N_l < N_m \text{ при } \varepsilon_l < \varepsilon_m.$$

Такое состояние системы, у которой на верхнем уровне имеется больше частиц, чем на нижнем, условно называется *состоянием с «отрицательной» температурой* в отличие от состояния с положительной температурой, соответствующего термодинамическому равновесию.

Квантовые системы, находящиеся в состоянии с положительной и «отрицательной» температурой, по-разному взаимодействуют с проходящей через них электромагнитной волной, имеющей частоту

$$\nu = \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_l}{h}.$$

Если волна проходит через систему, находящуюся в состоянии с положительной температурой, то происходит поглощение энергии этой волны квантовой системой. В этом случае интенсивность падающей волны превосходит интенсивность выходящей волны (рис. 2):

$$J_0 > J.$$

Если же электромагнитная волна проходит через квантовую систему, находящуюся в состоянии с «отрицательной» температурой, то имеет место,

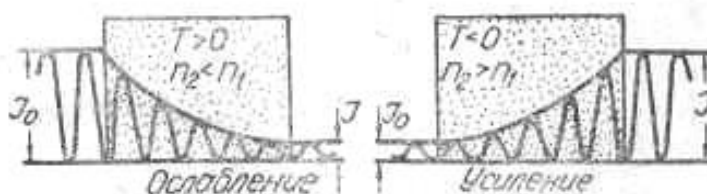


Рисунок 2 – «Отрицательное» поглощение энергии

так называемое, «отрицательное» поглощение, которое выражается в виде усиления энергии проходящей волны

Таким образом, квантовая система, находящаяся в состоянии с «отри-

$$J > J_0.$$

цательной» температурой, может стать источником увеличения электромагнитной энергии. Для этого необходимо возбудить систему, т. е. обеспечить перевод ее частиц на верхние энергетические уровни и каким-либо способом поддержать избыток частиц в этом состоянии. Для достижения такого возбужденного состояния квантовая система совсем не обязательно должна поглощать энергию на частоте перехода (т. е. на частоте излучения фотона при квантовом переходе).

Итак, чтобы усилить электромагнитное излучение за счет внутренней энергии частиц вещества (квантовой системы), необходимо иметь активное вещество и источник энергии, который переводил бы частицы системы в возбужденное состояние. Кроме того, необходимо перевести частицы на такие энергетические уровни, на которых они могли бы находиться сравнительно долгое время с тем, чтобы произошло их накопление на этом уровне.

Активное вещество должно обладать резкими линиями поглощения. Этих линий должно быть немного, и они должны быть узкими. Полосы поглощения вещества должны быть сильными и относительно широкими.

Процесс перевода атомов в возбужденное состояние путем «впрыскивания» в систему электромагнитной энергии на длине волны, отличной от длины волны индуцированного излучения, называется «накачкой».

При значительной перенаселенности верхнего энергетического уровня, происшедшей в результате «накачки», и при большом коэффициенте усиления, обеспечивающем компенсацию потерь энергии в активном веществе, квантовый усилитель переходит в режим генерации энергии, которая может быть непрерывной, если поддерживается перенаселенность верхнего уровня.

1.3. Твердотельные оптические квантовые генераторы

Принципиальная схема ОКГ на твердом теле представлена на рисунке 3. Генератор состоит из следующих элементов: активного вещества, размещенного в объемном резонаторе, образованном двумя плоскопараллельными зеркалами, источника возбуждения («накачки») и источника питания.

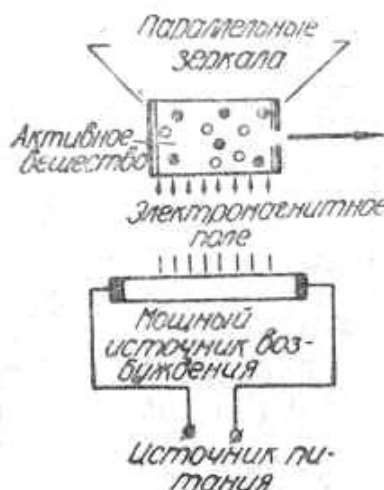


Рисунок 3 – Принципиальная схема твердотельного ОКГ

Активная среда служит для перевода атомных частиц на возбужденные уровни, накопления их там и излучения электромагнитной энергии при переходе частиц с высших уровней на низшие.

Объемный резонатор – предназначен для концентрации электромагнитной энергии требуемой мощности и частоты.

Источник «накачки» – служит для возбуждения атомных частиц, участвующих в квантовых переходах.

Принцип действия

В качестве примера разберем работу ОКГ на рубине с примесью ионов трехвалентного хрома ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}^{3+}$). Источником возбуждения служит импульс

сная лампа, излучение которой содержит зеленую часть видимого спектра ($\lambda = 5600\text{Å}$). Источником питания лампы является конденсатор большой емкости, заряжаемый от выпрямителя.

Оптический квантовый генератор работает следующим образом. Заряженный от выпрямителя конденсатор разряжается через импульсную лампу. При облучении кристалла рубина зелеными лучами лампы ионы хрома, поглощая это излучение, возбуждаются и переходят на верхний энергетический уровень. Возвращение ионов в исходное состояние осуществляется двумя последовательными; переходами (рис. 4).

При первом переходе атомы, отдают часть своей энергии кристаллической решетке (безизлучательный переход на промежуточные R -уровни) и некоторое время пребывают в так называемом метастабильном состоянии. При отсутствии воздействия извне они остаются в этом состоянии несколько миллисекунд, а затем возвращаются в исходное состояние. Фотоны, испускаемые при втором переходе, имеют при комнатной температуре длину волны $0,6943 \text{ мк}$.

Возвращение ионов с R -уровня в основное состояние происходит лавинообразно. Достаточно одному из ионов совершить переход, как выделившийся при этом квант энергии вызывает стимулированное излучение другого иона и т. д.

В результате все ионы, находящиеся на R -уровне, одновременно совершают переход на основной уровень, излучая энергию на частоте перехода (т. е. с длиной волны ($\lambda = 6943\text{Å}$)). Это излучение является *когерентным* и *монохроматическим*.

Для получения значительного усиления электромагнитной волны необходимо заставить участвовать в излучении

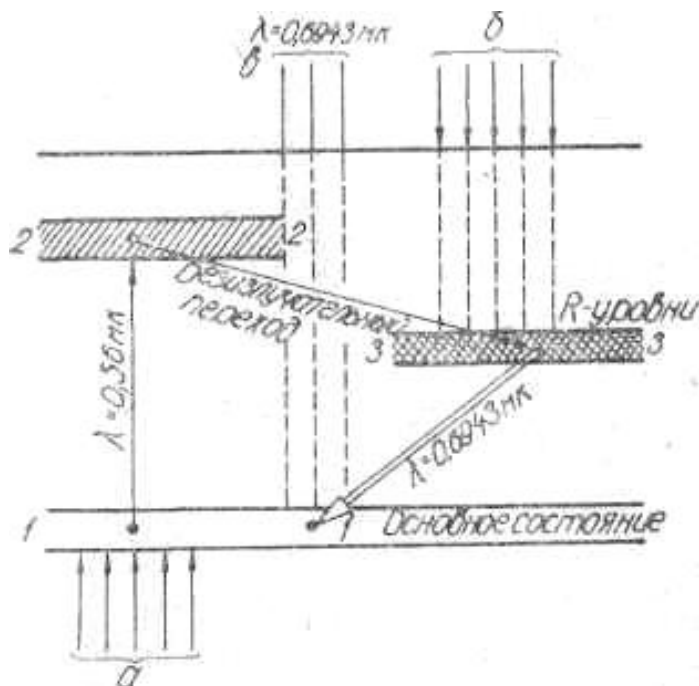


Рисунок 4 – Возвращение ионов в исходное состояние
 1-1—нижние уровни (основное состояние); 2-2—уровни поглощения;
 3-3—метастабильные уровни (R-уровни); а—излучение накачки;
 б—принимаемое (усиливаемое) излучение; в—усиленное излучение.
 Направление излучений а, б, в показано условно.

возможно большее число возбужденных частиц. Этого можно достигнуть увеличением размеров активного вещества и использованием эффекта многократного отражения излучения от двух отражающих поверхностей, расположенных по торцам активного вещества, т. е. путем помещения активного вещества в объемный резонатор.

Работа объемного резонатора

Принципиальная схема работы объемного резонатора изображена на рисунках 5 и 6. До возникновения лавины фотонов (рис. 5, а) ионы хрома кристалла рубина находятся в основном состоянии (черные кружки). При световой «накачке» (стрелки на рис. 6, б) большинство ионов переводится в возбужденное состояние (белые кружки).

Лавинообразный поток фотонов возникает, когда хотя бы один возбужденный ион спонтанно испускает фотон параллельно оси кристалла (горизонтальные стрелки на рис. 6, в). Фотоны, испускаемые в других направлениях, выходят за пределы кристалла, а фотон, движущийся параллельно оси кристалла, побуждает другой ион испустить

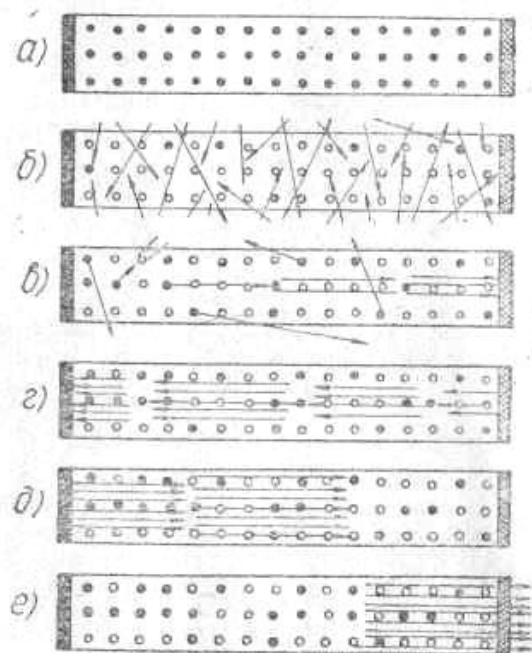


Рисунок 5 – Схема работы объемного резонатора

второй («индуцированный») фотон. Этот процесс продолжается (рис. 5, г, д), и лавина фотонов, отражаясь от зеркальных поверхностей объемного резонатора, перемещается взад и вперед вдоль кристалла, чем достигается большое усиление мощности излучения. Это излучение выводится наружу через полупрозрачное зеркало объемного резонатора.

Математически работа объемного резонатора описывается следующим образом:

Интенсивность параллельного пучка в активной среде будет возрастать согласно уравнению

$$J_v = J_{v_0} \cdot e^{-k_v \cdot l},$$

$$\alpha = -k_v.$$

где l — длина активной среды генератора;

J_0 — начальная интенсивность излучения;

k_v — коэффициент поглощения активной среды (рубина).

Для удобства дальнейших рассуждений введем коэффициент излучения среды, а, причем излучение, вышедшее из точки O (рис. 6), испытывает два отражения, прежде чем оно вернется в эту точку. При одном прохождении через вещество интенсивность излучения увеличивается в G раз

$$G = e^{2\alpha l},$$

где G – коэффициент усиления среды.

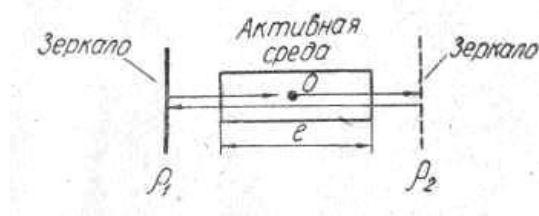


Рисунок 6 – Схема работы объемного резонатора

За два прохождения (1 цикл), без учета потерь на пропускание, интенсивность увеличится в $G_{\text{ц}}$ раз

$$G_{\text{ц}} = e^{2\alpha \cdot l},$$

а с учетом коэффициентов отражения зеркал коэффициент усиления цикла будет равен

$$G_{\text{ц}} = \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot e^{2\alpha l},$$

где ρ_1 и ρ_2 — коэффициенты отражения зеркал.

Коэффициенты отражения двух зеркал резонатора можно заменить средним энергетическим коэффициентом отражения ρ

$$\rho = \sqrt{\rho_1 \cdot \rho_2}.$$

Для возможности приведения выражения к виду, удобному для анализа, введем в наши рассуждения коэффициент потерь γ

$$\gamma = -\ln \rho.$$

Тогда это выражение можно привести к следующему виду:

$$G_{\text{ц}} = \rho_1 \cdot \rho_2 \cdot e^{2\alpha l} = e^{2(\alpha l - \gamma)},$$

а следующее выражение к

$$J_{\nu} = J_{\nu_0} e^{2(\alpha l - \gamma)}.$$

Если $\alpha l > \gamma$, то интенсивность излучения J_ν будет возрастать, если $\alpha l < \gamma$, то интенсивность J_ν будет убывать.

Выражение

$$\alpha l = \gamma$$

характеризует условие самовозбуждения квантового генератора с зеркальным резонатором.

По конструктивному выполнению объемные резонаторы могут быть следующими:

- резонаторы с использованием рабочего тела излучателя;
- резонаторы с вынесенными зеркалами;
- резонаторы с переменной добротностью.

В случае использования в качестве резонатора рабочего тела излучателя его торцовые поверхности должны быть отполированы с высокой точностью. Отклонения от параллельности торцовых поверхностей не должно превышать 3". На торцовые поверхности наносится серебряное или диэлектрическое покрытие с определенными оптическими характеристиками.

В последнее время стали пользоваться резонаторами с вынесенными зеркалами.

Иногда между активным веществом и одним из зеркал помещают оптическое устройство с регулируемой прозрачностью. Это обеспечивает возможность регулировать добротность объемного резонатора в широких пределах и, следовательно, управлять излучением генератора.

Характеристики излучения

Выходящая со стороны полупрозрачной пластины электромагнитная волна имеет почти плоский фронт и поэтому угол расхождения волны очень мал и определяется только дифракцией

$$\theta = \frac{\lambda}{d} \text{ рад},$$

где θ – угловой раствор луча;

λ – длина волны;

d – диаметр источника излучения (рубина).

В связи с тем, что излучение оптических квантовых генераторов может быть сфокусировано с помощью обычных оптических систем на площадки очень малых размеров, это позволяет получить высокие концентрации плотности лучистого потока.

Облученность в центре дифракционного пятна, получаемого с помощью квантового генератора, равна

$$E = \frac{\Phi \cdot S}{\lambda^2 \cdot f^2},$$

где Φ – лучистый поток квантового генератора;

S – входная площадь оптической системы;

f – фокусное расстояние оптической системы

λ – длина волны излучения.

Эта облученность может достигать значения 10^{12} — 10^{16} $вт/см^2$. Такие плотности энергии в сотни миллионов раз превышают плотность энергии, которая может быть получена при использовании солнечного излучения.

Спектральная плотность лучистого потока квантового генератора также достигает значительной величины, составляющей 10^{11} — 10^{18} $вт/см^2мк$, что также превосходит спектральную плотность солнечного лучистого потока в сотни миллионов раз.

Излучение квантового генератора является *монохроматичным*. Это обусловлено тем, что вынужденное излучение представляет собой резонансный процесс. Например, ширина линии излучения рубинового ОКГ составляет около $0,1 \text{ \AA}$.

Выходной сигнал ОКГ пространственно когерентен и когерентен по времени. Это означает, что все волновые фронты выходящего излучения плоские и перпендикулярны направлению распространения, а также осуществляется строгое фазовое соответствие между волной, испускаемой в один момент времени, и волной, испускаемой через некоторый промежуток времени.

Твердые активные вещества

Большую часть этой группы составляют различные кристаллические вещества. Кроме рубина, сюда относятся кристаллы с рубиновой сердцевиной, покрытые сапфировой оболочкой, а также кристаллы различных галогидных соединений, солей вольфрамовой, титановой и молибденовой кислот и других материалов с примесью редкоземельных элементов. Излучения этих материалов лежат в широком диапазоне от ультрафиолетовой до дальней инфракрасной области спектра и могут быть как импульсными, так и непрерывными. Известны случаи применения в качестве активного вещества специальных сортов стекла. Так, были разработаны генераторы на стекле с примесью трехвалентного неодимия, а также на литий-магний-алюминиево-сили-катном стекле, активизированном иттербием (излучение на волне 3125 Å). Для получения стимулированного излучения могут быть также использованы пластмассы и стекла. В последнем случае активному веществу может быть придана любая необходимая форма, например оптические волокна длиной до 50 см, диаметром 1 мм могут собираться в жгут. К пластмассам относятся, в частности, так называемые хелаты. В качестве основы в них применяются лю-сит и плексиглас, активированные европием, самарием и иттербием).

В таблице 1 приведены типы твердотельных ОКГ с различной активной средой и различными активными примесями.

Таблица 1 – Типы твердотельных ОКГ

Кристаллы и другие материалы	Активная примесь	Длина волны <i>мк</i>	Режим генерации	Рабочий темп °К
Оксид алюминия (рубин)	Хром	0,69-2,61	Импульсный непрерывный	300
Оксид иттрия, пластмассы, хелат в спиртовом растворе	Европий	0,61	Импульсный 1	300
Фтористые кальций, стронций	Самарий	0,7-0,71	Непрерывный импульсный	77
Стекло	Иттербий	1,02	Импульсный	77
Вольфрамат кальция	Прозеодим	1,05	Импульсный	77
Различные фториды, молибдаты, ; стекла	Неодим	1,06	Непрерывный импульсный	300
Фтористый кальций	Туллий	1,12	Импульсный	20
Вольфрамат . каль-	Эрбий	1,61	Импульсный	77

ция				
Фтористый кальций, вольфрамат кальция, стекло	Гольмий	2,05-2,09	Импульсный	—
Фтористый кальций	Диэпрозий	2,36	Импульсный непрерывный	77
Различные фториды	Уран	2,48-2,6	Импульсный	77

1.4. Газовые оптические квантовые генераторы

Применение в качестве активного вещества газовых сред облегчает получение непрерывного вынужденного излучения, поскольку для перевода вещества в возбужденное состояние в этом случае требуется меньшая энергия.

Газовый ОКГ состоит из тех же основных элементов, что и твердотельный ОКГ, т. е. из активного вещества, резонатора и источника накачки. Впервые в качестве активного вещества применялась смесь гелия и неона, взятая в отношении 10:1 при общем давлении порядка 1 мм рт.ст. На рисунке 7 приведена схема энергетических уровней He и Ne .

Вынужденное излучение $He-Ne$ смеси обеспечивается следующим образом.

При электрическом разряде, подобном тлеющему разряду в обычной неоновой лампе, атомы гелия возбуждаются и переходят с основного 1^1s уровня на метастабильный уровень 2^3s . При неупругих столкновениях возбужденных атомов He с атомами Ne , находящимися на основном уровне, энергия возбуждения передается атомам Ne , которые переходят на один из четырех метастабильных уровней $2s$, а избыток энергии превращается в тепло.

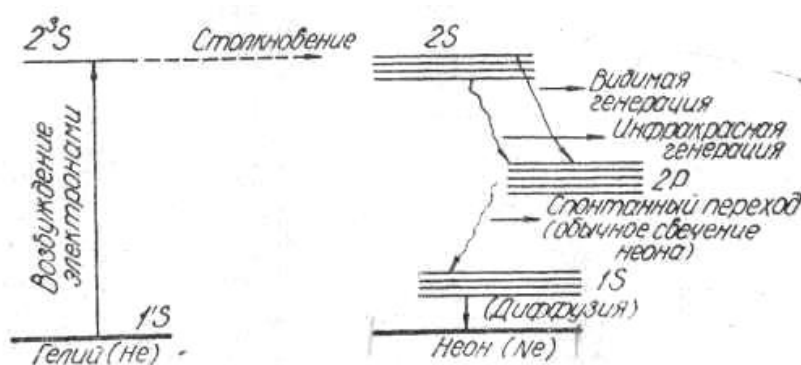


Рисунок 7 – Схема энергетических уровней He и Ne

При переходе атомов Ne с уровней $2s$ на уровни $2p$ излучается энергия.

В зависимости от перехода $2s \rightarrow 2p$ излучается энергия различной длины волны $\lambda_1 = 0,6328 \text{ мк}$ и $\lambda_2 = 1,15 \text{ мк}$. Переход атомов с уровня $2p$ на уровень $1s$ сопровождается спонтанным излучением в красно-оранжевой части спектра. Переход с уровня $1s$ на основной уровень – *безизлучательный*.

Устройство газового ОКГ показано на рисунке 8. Смесь газов заключена в трубку из стекла. Зеркала, образующие объемный резонатор, устанавливаются с концов газоразрядной трубки. Возбуждение газового, разряда производится или высокочастотным полем частотой $20\text{—}30 \text{ мГц}$ или постоянным током.

Кроме смеси гелий-неон, в настоящее время получена генерация (таблица 2) более чем на 170 длинах волн при помощи различных газовых смесей, чистых газов и на парах воды. Выяснено, что условия усиления света определенных длин волн при помощи вынужденного излучения удовлетворяются при электрическом разряде почти в любом газе. Подробно исследованы инертные газы: гелий, неон, аргон, криптон, ксенон.

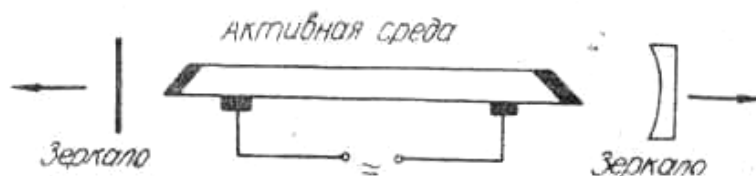


Рисунок 8 – Устройство газового ОКГ

В появилось большое количество сообщений о получении большой мощности и к.п.д. от ОКГ *непрерывного излучения*. Так, от генератора на иттриево-алюминиевом гранате с примесью неодимия получено излучение 42 Вт на волне $\lambda = 1,06 \text{ мк}$. На смеси углекислого газа, азота и гелия получено излучение $106,5 \text{ Вт}$ при к.п.д. $6,2\%$. Для возбуждения этого ОКГ применялся источник постоянного тока. При использовании же для этого генератора переменного тока удалось получить *квазинепрерывное* излучение мощностью 183 Вт при к.п.д. $7,4\%$. Плазменная трубка имела длину $2,3 \text{ м}$ и диаметр $7,8 \text{ см}$. Длина волны излучения составляла $\lambda_1 = 10,5915 \text{ мк}$ и $\lambda_2 = 10,6324 \text{ мк}$. *Квазинепрерывность* излучения заключается в том, что действие ОКГ возникает только в моменты пиков колебаний переменного, тока источника накачки. Мощность непрерывного излучения может быть увеличена в несколько раз путем увеличения диаметра и длины газоразрядной трубки. Охлаждение таких ОКГ может быть воздушным или водяным.

В сине-зеленой области на длине волны $\lambda = 0,522 \text{ мк}$ получено непрерывное излучение 18 Вт от ОКГ на смеси паров ртути с аргоном.

Таблица 2 – Характеристики газовых ОКГ

Активная среда	Длина волны, мк	Режим работы	Рабочая температура
Гелий Неон Аргон Криптон Ксенон Окись углерода Азот Кислород	Более 170 длин волн между 0,3 мк и 133 мк	Непрерывный и импульсный	Комнатная температура

Достоинства газовых лазеров: непрерывный режим работы, высокая монохроматичность и направленность излучения

1.5. Жидкостные оптические квантовые генераторы

Активной средой такого генератора является спиртовой раствор бензоплацетоната европия. Этот генератор излучал на длине волны $\lambda = 0,613 \text{ мк}$. В качестве активной среды в жидкостных ОКГ могут использоваться также жидкости, активированные гадолинием, неодимом, самарием, иттербием.

Жидкий материал, подобно газу и твердой активной среде, помещается в резонатор с зеркалами. Одним из преимуществ жидкостных ОКГ является простота их изготовления. В таких генераторах облегчается охлаждение активного вещества путем циркуляции самой жидкости в приборе. Жидкости интересны еще тем, что они не накладывают ограничения на размеры активного вещества.

В этот же период времени был создан новый оптический квантовый генератор (рис. 9), работа которого основана на эффекте стимулированного комбинационного рассеяния. ОКГ состоит из рубинового квантового генератора с устройством для получения гигантских импульсов («затвором») и кюветы с жидкой активной средой.

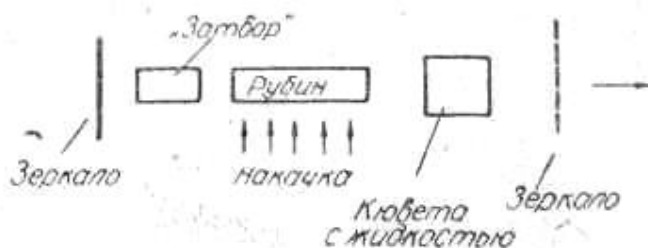


Рисунок 9 – Схема жидкостного ОКГ

Работа такого генератора заключается в следующем. При возбуждении рубинового генератора его излучение воздействует на жидкость и возбуждает ее. На выходе кюветы наблюдается когерентное излучение на нескольких длинах волн, отличающихся от длины волны излучения рубина. Переизлучаемые частоты равняются сумме или разности частот падающего излучения и собственной частоты излучения жидкой среды. Если возбуждающее излучение (рубина) с энергией $h\nu_0$ взаимодействует с молекулой среды (жидкости), не находящейся в состоянии колебания, то возбуждающее излучение отдает соответствующую часть энергии, превращаясь в свет меньшей частоты

$$h\nu_1 = h\nu_0 - h\nu_{il}$$

где ν_0 – частота излучения рубина;

ν_{il} – частота излучения жидкой среды;

ν – частота переизлучения.

Если молекула жидкой среды обладает, большей энергией, то возбуждающее излучение отбирает от молекулы избыток энергии.

Вынужденное излучение жидкости наблюдается только тогда, когда мощность излучения рубинового ОКГ превосходит определенное пороговое значение. Этим объясняется необходимость использования в данном устройстве «затвора».

Коэффициент преобразования излучения в таких ОКГ составляет 20-30%.

В качестве жидкой среды используются дейтерий-бензол, нитробензол, пиридин, толуол, бензол и т. д.

1.6. Полупроводниковые оптические квантовые генераторы

Физика оптического излучения полупроводника состоит в следующем. Энергетический спектр полупроводника представляет собой энергетические зоны (рис. 10): заполненную (или валентную) и свободную (или зону возбуждения). Между ними расположена запрещенная зона. Несмотря на наличие этой зоны, полупроводник обладает электропроводностью. Это объясняется тем, что в нем всегда имеется некоторое количество свободных одиночных атомов или ионов, не вошедших в систему, кристалла (и не закрепленных в узлах кристаллической решетки), которые появляются в полупроводнике из-за наличия посторонних примесей.

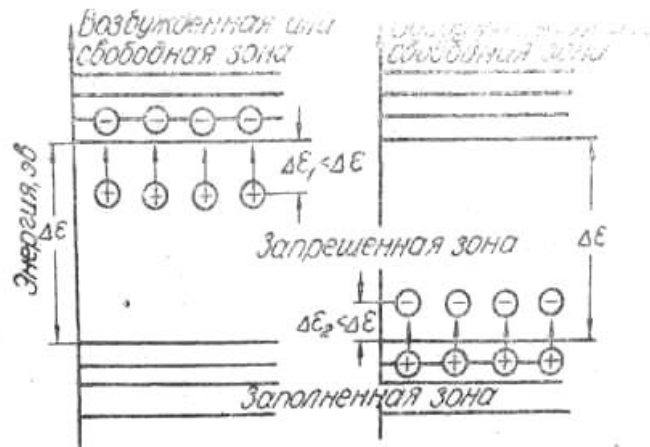


Рисунок 10 – Схема полупроводникового ОКГ

Эти примеси вызывают появление в запрещенной зоне отдельных локальных энергетических уровней, которые как бы сужают эту зону. Электроны *примесных* уровней в случае, если они расположены ближе к зоне возбуждения, способны преодолевать зону $\Delta\epsilon_1 < \Delta\epsilon$ и переходить в зону возбуждения. При этом образуется избыток электронов.

Примесные уровни могут находиться вблизи заполненной зоны. В этом случае при переходе электронов на локальный уровень в заполненной зоне образуется избыток свободных мест – «дырок». Таким образом, наличие примесей способствует образованию локальных уровней, что приводит к перенаселенности возбужденной зоны электронами, а заполненной зоны – «дырками». При рекомбинации электрона с «дыркой», т. е. при переходе электрона из возбужденной зоны в заполненную, выделяется энергия в виде кванта светового излучения (фотона) или в виде кванта звукового излучения (фонона). При пропускании электрического тока через полупроводник возникает большое количество рекомбинаций и наблюдается интенсивное излучение.

При малых плотностях тока через *p–n*-переход интенсивность излучения невелика, причем излучение *когерентно* и *немонохроматично*. При увеличении плотности тока выше некоторого критического значения, когда число фотонов, возникающих при рекомбинации, превышает число фотонов, поглощаемых в веществе, излучение становится *когерентным*, ширина спектральной линии излучения сужается, а *интенсивность* излучения резко возрастает.

Полупроводниковый диод изготавливается в виде заготовки, имеющей форму куба, либо в виде параллелепипеда (рис. 11), две противоположные грани которого, представляющие объемный резонатор, делаются параллельными и обрабатываются с высокой точностью. Две другие грани служат контактами, к которым прикладывается напряжение. Размеры диода невелики и не превышают $0,5 \text{ мм}^3$.

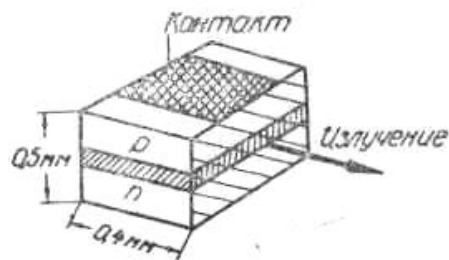


Рисунок 11 – Схема полупроводникового диода

Для получения излучения к контактным пластинам прикладывается напряжение импульсами длительностью от 5 до 20 мсек. Интенсивность и характер спектрального распределения излучения зависят от величины плотности тока, протекающего через диод.

В качестве материалов в полупроводниковых ОКГ используются (таблица 3) арсенид галлия *GaAs*, фосфид галлия, сурьмянистый индий *InSb* с различными примесями (*Zn, Cd, Te, Se, Sn*) и другие. Эти генераторы используются для получения импульсного и непрерывного излучения при комнатных и пониженных рабочих температурах.

Таблица 3 – Характеристик полупроводниковых ОКГ

Активная среда	Длина волны света, мк	Режим генерации	Рабочая температура °К
Арсенид-фосфид галлия (<i>GaAs—P</i>).	0,65-0,85	Импульсный	90
Арсенид галлия (<i>GaAs</i>)	0,84	Импульсный непрерывный	300 и 77
Фосфид индия (<i>InP</i>)	0,91	Импульсный непрерывный	90 и 20
Арсенид индия (<i>In As</i>)	3,1	Импульсный непрерывный	77 и 4

Достигнутая мощность излучения в импульсном режиме составляет сотни ватт, в непрерывном – единицы ватт (7,5 вт на ОКГ из *GaAs* при $\lambda = 0,84$ мк). Диапазон излучения: видимый свет и ближняя инфракрасная область (0,6 – 8 мк). Коэффициент полезного действия составляет 30 – 60% (теоретически возможен к.п.д. 100%).

1.7. Оптические квантовые усилители

В оптическом и инфракрасном диапазонах возможно создание двух типов оптических квантовых усилителей:

– ОКУ бегущей волны (проходной),

– ОКУ резонаторного типа (регенеративный).

Проходные ОКУ (бегущей волны)

Оптический квантовый усилитель бегущей волны может применяться как усилитель мощности излучения квантового генератора, а также как усилитель принимаемых сигналов в различных оптических системах. Он может быть импульсным (для усиления импульсных сигналов) и непрерывного действия.

Схема двухкаскадного проходного ОКУ изображена на рисунке 12. Один каскад усилителя состоит из активной среды (усилителя) и невзаимного элемента. В невзаимный элемент входят два поляризатора и элемент, в котором происходит вращение плоскости поляризации луча.

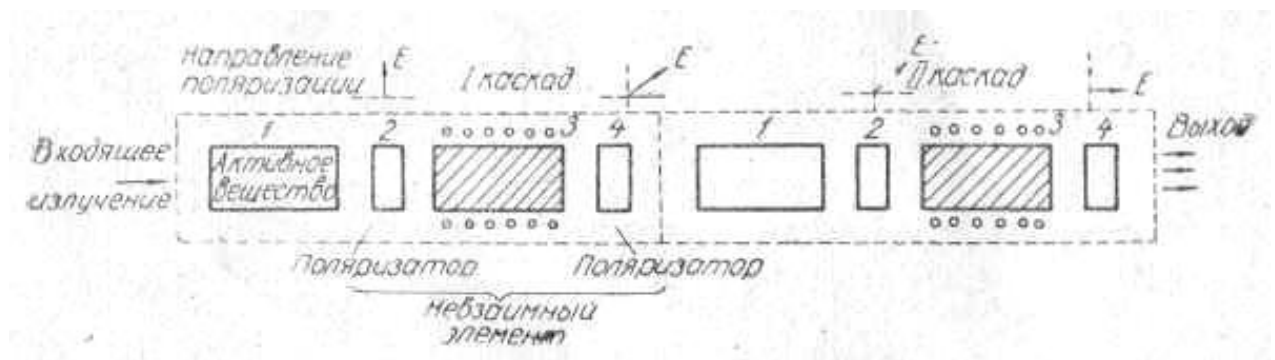


Рисунок 12 – Схема проходного ОКУ

В первых ОКУ в качестве активной среды использовался рубин.

В невзаимном элементе (изоляторе) сигнал проходит с малыми потерями только в одном направлении. В противоположном направлении этот сигнал сильно ослабляется

Практически потери в невзаимном элементе в обратном направлении должны быть более чем в 2 раза больше, чем в прямом направлении.

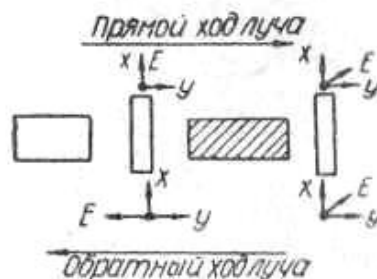


Рисунок 13 – Схема работы усилителя

Усилитель работает следующим образом. Входящее излучение усиливается активной средой (рис. 12) и поступает на поляризатор 2, который задает ей плоскость поляризации (на рис. 12 показано стрелкой). Вращающая среда 3 поворачивает плоскость поляризации на 45° по часовой стрелке, и волна проходит через поляризатор 4, который пропускает излучение, поляризованное под 45° . Волна, идущая справа налево (рис. 13), после прохождения через поляризатор 4 и поворота плоскости поляризации на 45° по часовой стрелке в среде 3, поляризована в направлении, которое не пропускает поляризатор 2. Таким образом, обратная волна гасится (поглощается).

В качестве вращающей среды могут использоваться, в частности, оптические материалы (таблица 4), в которых наблюдается вращение плоскости поляризации света под воздействием магнитного поля (эффект Фарадея).

Угол поворота плоскости поляризации равен

$$\varphi = \rho' \cdot l \cdot H,$$

где l — длина пути света в веществе;

H — напряженность магнитного поля;

ρ' — постоянная Верде.

В качестве поляризаторов могут использоваться поляроидные пленки, пластинки турмалина, призмы Николя и другие.

Коэффициент усиления G_{ν_0} , одного каскада проходного усилителя определяется по следующей формуле:

$$G_{\nu_0} = e^{\alpha_{\nu_0} \cdot l_0},$$

где α_{ν_0} — коэффициент усиления среды

$$(\alpha_{\nu_0} = -k_{\nu_0});$$

l_0 — длина активной среды.

ОКУ бегущей волны обладают очень низким уровнем шумов. Коэффициент усиления одной секции составляет порядка 6 – 7 дб. Эти усилители могут усиливать изображения. Полоса пропускания порядка 10^{15} гц.

Таблица 4 – Характеристики проходных ОКУ

Материал	Постоянная Верде на $\lambda=0,6328$ мк (мин/гс·см)	Затухание на 1 см длины	Оптическое ка- чество
ZnS	0,176	Высокое	Очень хорошее
ZnS	0,234 ($\lambda = 0,666$ мк)	33 %	Хорошее
CdS	0,33	20%	Хорошее
GaAs	0,3 ($\lambda = 1,06$ мк)	90%	
KPS-5	0,4	Низкое	Очень низкое
Si	0,1 ($\lambda = 1,3$ мк)	20%	Очень хорошее
Liln.	0,0823	Низкое	Хорошее, но ма- териал
Иттриевый гранат YIG	300	Низкое	очень нестойк
Стекло: SFS-1	0,83	2%	Хорошее
SFS-6	0,074	2%	Очень хорошее
SFS-6FA	0,053	1%	Очень хорошее

Резонаторные ОКУ

Принципиальная схема оптического квантового, усилителя резонаторного типа изображена на рисунке 14. Видно, что она очень похожа на схему твердотельного ОКГ (см. рис. 3). Отличие генератора от усилителя следующее.

1. У генератора одно из зеркал объемного резонатора полупрозрачно, а у усилителя обе зеркальные пластины полупрозрачны.
2. Генератор имеет более мощный источник накачки.

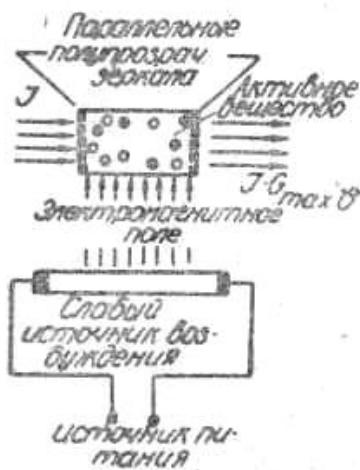


Рисунок 14 – Схема резонаторного ОКУ

В отличие от ОКУ бегущей волны в резонаторном усилителе используется многократное прохождение лучистого потока, который требуется усилить. Таким образом, мы имеем здесь большую длину пути.

Усиление будет наблюдаться при условии, если испускаемая энергия при излучении достаточна для преодоления потерь в стенках резонатора. Коэффициент усиления резонаторного ОКУ на частоте излучения ν_0 равен

$$G_{\max \nu_0} = \frac{(1 - \rho)^2 \cdot G'_{\nu_0}}{(1 - \rho G'_{\nu_0})^2},$$

где ρ – коэффициент отражения зеркал;

G_{ν_0} – усиление среды за одно прохождение (коэффициент усиления одного каскада ОКУ бегущей волны);

l_0 – длина активной среды;

α_{ν_0} – линейный коэффициент усиления среды.

Коэффициент усиления ОКУ резонаторного типа обычно лежит в пределах 10 – 30 дб, т. е. больше коэффициента усиления ОКУ бегущей волны. ОКУ бегущей волны работает более стабильно при колебаниях энергии оптической накачки.

Коэффициент усиления резонаторного ОКУ очень сильно зависит от коэффициента усиления G_{ν_0} . Например, при изменении G_{ν_0} от 1,09 до 1,11 (т. е. на 1 %) $G_{\max \nu_0}$ изменяется от 30 до 110 (т. е. от 4 до 10 дб).

Работа резонаторного ОКУ сильно зависит от температуры. При изменении Δt на $0,002^\circ\text{C}$ (при $p = 0,9$; $l = 100$ см, $G_{vo} = 1,1$) коэффициент усиления изменяется в 2 раза.

1.8. Инновации в разработке квантовых генераторов и усилителей

В процессах проектирования, разработки, испытаний и эксплуатации образцов лазерных приборов и систем, повсеместно используются инновационные технологии, позволяющие моделировать, производить предварительные расчеты, внедрять совершенно новые и прорывные элементы (узлы) и комплексы при создании опытных изделий и серийном изготовлении.

Управление инновационными процессами при разработке лазерных приборов и систем осуществляется в рамках общепринятых принципов управления инновационными процессами в экономических системах, которые должны учитывать необходимые особенности самого инновационного процесса, общие принципы управления организацией (предприятием) и характерные черты участников инновационного процесса. Анализ данных характеристик позволяет определить ряд базовых принципов управления инновационными процессами.

К основным принципам эффективного управления инновационным циклом при разработке квантовых генераторов и усилителей относятся: самоорганизация; организация информационных потоков; цикличность; предвидение; лояльность; целостность; непрерывность; целенаправленность; научная обоснованность; ответственность; развитие; гармоничность; ресурсное обеспечение; последовательность; вариантность; преодоление сопротивления; наличие обратных связей и др.

Следование данным принципам способствует успешной реализации инновационных процессов, увеличению интеллектуального капитала организации (предприятия), развитию процесса генерирования новых знаний и интеллектуальной деятельности.

Быстрые изменения внешней среды оказывают значительное влияние на управление инновационным процессом и определяют высокие требования к образованию персонала и его личным качествам, наиболее значимыми из которых являются инициатива и предпринимательская способность.

Управление инновационным процессом в разработке и изготовлении лазерных приборов и систем должно обеспечивать выполнение следующих основных функций:

- 1) познавательную (приращение общих знаний);
- 2) информационную (их распространение);

- 3) исследовательскую (целевое приобретение знаний в определенной области);
- 4) преобразовательную (улучшение существующих и создание принципиально новых объектов и процессов);
- 5) экономическую (сокращение затрат труда);
- 6) мотивационную (стимулирование творчества);
- 7) социально-потребительскую (обеспечение людей все более совершенными благами и услугами);
- 8) ресурсосберегающую и природосберегающую (создание технологий, обеспечивающих охрану окружающей среды и экономию естественных ресурсов).

На предприятиях инновационные процессы должны охватывать научную, информационную, проектно-конструкторскую и производственную деятельность. Нельзя также не учитывать при организации инновационных процессов экономико-управленческую и социально-культурную деятельность. Наиболее значимым для организации инновационного процесса является материально-техническая база научных и проектных разработок. Рациональное построение и управление инновационными процессами зависит от оптимизации затрат на создание лазерных приборов и систем (как инноваций), сроков их реализации, а также рыночных возможностей.

Управление самым простейшим типом инновационного процесса, который представляет относительно обособленную последовательность действий с конечным результатом и набором традиционных способов в качестве средств реализации, сводится к распределению ресурсов для обеспечения данного процесса и созданию определенных стимулов к участию в этом процессе всех участников.

Действенным инструментом управления процессом внедрения инновации может служить контроль перехода от одной операции инновационного процесса к другой. С другой стороны, некоторые операции процесса внедрения инновации необходимо представить в виде обособленных элементов, вход в которые являются результаты предыдущих операций, а выход представляет продукция данной стадии.

Успешность внедрения инновации в значительной мере определяется степенью беспрепятственности прохождения по логической цепочке операций. Этого можно достичь путем согласования смежных подразделений при переходе от одной операции к другой. Не маловажно для этого и стимулирование организаций, ответственных за соответствующие операции.

Таким образом, эффективное управление инновационными процессами в разработке лазерных приборов и систем связано с объединением в процессе деятельности предприятий всех элементов системы «наука—технология—производство—потребление», которое должно предусматривать создание разветвленной системы сбытового и сервисного обслуживания для стимулирования научных исследований и активизации изобретательской деятельности на основе подключения нового типа связей—обратных связей в инновационном процессе.

ГЛАВА 2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И РЕЖИМЫ ЛАЗЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

2.1. Спектральные характеристики лазерных излучений

Спектральные характеристики и параметры описывают спектр лазерного излучения, т.е. распределение энергии (мощности) излучения по длинам волн или частотам. К ним относятся: частота лазерного излучения; длина волны лазерного излучения; ширина линии лазерного излучения; ширина огибающей спектра лазерного излучения; ширина активной части огибающей спектра; число спектральных линий излучения.

Частота лазерного излучения ν_0 – это средняя (центральная) частота, соответствующая максимуму спектральной линии спонтанного излучения, возникающего при переходе частиц с верхнего инвертированного уровня на нижний. Известно, что лазерное излучение возникает лишь на переходах между энергетическими уровнями частиц, на которых получено инверсное распределение населенностей. Спектральная линия спонтанного излучения на переходах между этими же уровнями имеет некоторый вид (контур) $\varphi(\nu)$, который определяет и частотную зависимость усиления на этом переходе (рис. 1.1):

$$\varphi(\nu) = \chi(\nu).$$

Центральная частота ν_0 контура $\varphi(\nu)$ и есть частота лазерного излучения. Аналогичным образом определяется и длина волны лазерного излучения

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0}.$$

Конкретная частота (длина волны) лазерного излучения может и не совпадать с центральной частотой (длиной волны) данного перехода.

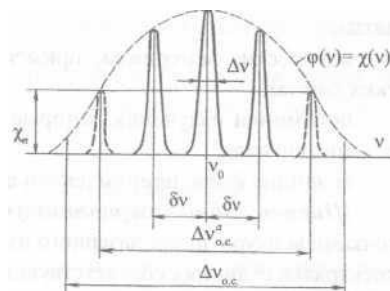


Рисунок 15 – Спектральные характеристики лазерного излучения

Однако, ввиду того, что ширина спектра лазерного излучения, за которую можно принять, например, ширину активной части огибающей спектра, очень мала по сравнению с частотой (длиной волны), то в пределах всей ширины спектра все частоты (длины волн) излучения можно выразить одним и тем же числом с достаточной точностью. Например, если $\Delta\nu^{a_{oc}}/\nu = 10^{-6}$, то все частоты (длины волн) будут иметь одно и то же значение с точностью до шестого знака после запятой.

В активной среде лазера может быть реализовано сразу же несколько инвертированных переходов. Если они расположены (по шкале частот) достаточно близко друг к другу, то излучение лазера происходит одновременно на нескольких частотах (длинах волн), как, например, происходит в аргоновом лазере. Если же переходы расположены достаточно далеко друг от друга, то излучение происходит, как правило, на частоте одного выбранного перехода, как в гелий-неоновом лазере. Наконец, если состав активной среды плавно меняется, то частота излучения также меняется в пределах некоторого спектрального интервала. Таким образом, частота (длина волны) лазерного излучения определяется природой активной среды. Для данной активной среды в некоторых случаях она зависит от температуры среды (рубиновый и полупроводниковый лазеры).

Частота (длина волны) лазерного излучения определяет многие стороны практического применения лазеров:

- видимый диапазон излучения (0,4 – 0,76 мкм) или невидимый;
- условия прохождения излучения через оптические элементы и среду распространения излучения;
- величину расходимости излучения и размер сфокусированного пятна;
- оптические материалы, применяемые для изготовления оптических систем;
- приемники излучения, которые можно использовать для детектирования сигнала;
- величину фона, принимаемого вместе с сигналом.

Ширина линии лазерного излучения $\Delta(\nu)$ – это расстояние между точками контура линии лазерного излучения (имеется в виду отдельная спектральная линия), соответствующее половине интенсивности линии в максимуме (см. рис. 15). Если излучение происходит на единственной спектральной линии, то ее ширина представляет собой ширину спектра лазерного излучения и определяет степень монохроматичности и когерентности излучения.

Ширина огибающей спектра лазерного излучения $\Delta(\nu)_{oc}$ представляет собой расстояние между точками линии, огибающей спектр лазерного излучения, т.е. линии спонтанного излучения, соответствующей заданному уровню спектральной плотности мощности лазерного излучения. Заданный уровень определяется отношением спектральной плотности мощности в выбранной точке к ее значению в максимуме, например, ширина огибающей может быть выражена по уровню 0,1 или 0,5 и т.д. Ширина огибающей спектра определяет максимально возможную ширину спектра лазерного излучения на частоте данного перехода.

Как уже говорилось, контур спектральной линии спонтанного излучения является одновременно и контуром усиления. Поэтому, если на графике $\varphi(\nu)$ отложить потери энергии в виде линии χ_n , параллельной оси частот (это можно сделать, так как потери практически не зависят от частоты), то эта линия отсечет на огибающей спектра участок, в пределах которого усиление превышает потери. Эта часть контура перехода называется *активной частью контура* (огибающей спектра) $\Delta(\nu)_{oc}^a$ и определяет реальную ширину спектра лазерного излучения в зависимости от уровня потерь энергии (мощности). Ширина активной части контура определяет и число спектральных линий лазерного излучения, соответствующих данному переходу. Очевидно, что это число для одной моды равно

$$\frac{\Delta\nu_{oc}^a}{\delta\nu} \pm 1, \text{ где } \delta\nu$$

где $\delta\nu$ – расстояние между спектральными линиями.

Напомним, что расстояние между линиями определяется длиной резонатора

$$\delta\nu = \frac{c}{2nL}, \text{ где } n$$

– показатель преломления среды внутри резонатора;

L – длина резонатора. При многомодовом излучении число спектральных линий увеличивается в число раз, равное числу мод в излучении.

2.2. Пространственные характеристики лазерных излучений

Пространственные параметры и характеристики описывают распределение интенсивности поля лазерного излучения в пространстве. К ним относятся следующие параметры лазерного излучения: ближняя и дальняя зоны; диаметр пучка; расходимость; диаграмма направленности; ось диаграммы направленности.

При описании пространственных параметров и характеристик лазерного излучения фундаментальное значение имеет понятие гауссова пучка.

Гауссовым называют пучок, в котором плотность мощности (энергии) в поперечном сечении пучка распределяется по закону Гаусса:

$$M_r = M_0 e^{-\frac{2r^2}{\omega^2}},$$

где r - расстояние от оси пучка до рассматриваемой точки, а масштаб этого сечения ω увеличивается по обе стороны относительно некоторой плоскости, в которой масштаб имеет минимальное значение ω_0 , по гиперболическому закону.

Гауссов пучок соответствует пучку основной моды лазерного излучения, сформированного устойчивым резонатором произвольной конфигурации, свойства которого описываются в приближении эквивалентного конфокального резонатора (ЭКР). Пучок, содержащий моды более высокого порядка, является гауссо-эрмитовским (лагерро-гауссовым): в нем распределение плотности мощности описывается произведением функции Гаусса на полиномы Эрмита (Лагерра), а огибающая распределения описывается функцией Гаусса. Поэтому такой пучок в некоторых отношениях подобен гауссовому пучку, но имеет (в данном сечении) больший масштаб распределения, чем пучок основной моды. Этот масштаб постоянен для всех сечений, поэтому увеличение масштаба в гауссо-эрмитовском (лагерро-гауссовом) пучке происходит также по закону гиперболы. Мы рассмотрим в основном пространственные параметры и характеристики гауссова и гауссо-эрмитовского пучков.

Лазерные пучки являются когерентными, и их распространение в свободном пространстве описывается законами дифракции. Известно, что при рассмотрении явлений дифракции вводят понятия зоны дифракции Френеля и зоны дифракции Фраунгофера. Первая зона характеризуется тем, что здесь за счет разных путей распространения лучей от плоскости дифракции до некоторой точки в плоскости анализа (наблюдения) существует набег фаз между различными лучами. Поэтому в зоне Френеля распределение амплитуды (интенсивности) в поперечном сечении на различных удалениях от плоскости дифракции может изменяться. Во второй зоне набег фаз практически отсутствует. По отношению к пучку излучения лазера эти зоны принято называть ближней (френелевской) и дальней (фраунгоферовской) зонами лазерного излучения.

Если лазерный пучок ограничен круглой диафрагмой, в плоскости которой волновой фронт близок к плоскому, а распределение интенсивности равномерное, то положение дальней зоны определяется условием:

$$Z \gg \frac{D^2}{\lambda},$$

где D - диаметр апертуры (диафрагмы).

Для гауссова пучка в качестве D следует принять диаметр пучка основной моды в плоскости перетяжки, если в этой плоскости нет реальной диафрагмы. Из определения дальней зоны следует, что в сечениях пучка, расположенных на расстояниях Z от плоскости дифракции, удовлетворяющих выражению выше, распределение интенсивности не меняется. Значит, не меняется и распределение интенсивности по угловым направлениям, которое называется диаграммой направленности лазерного излучения. Поэтому дальнюю зону можно определить и как область пространства вдоль оси лазерного пучка, расположенную на таком расстоянии от лазера, начиная с которого диаграмма направленности остается постоянной.

Как правило, распределение интенсивности в поперечном сечении лазерного пучка является симметричным относительно оси резонатора Z или относительно двух взаимно-перпендикулярных плоскостей, проходящих через ось Z . В этом случае ось Z представляет собой ось пучка, а также ось диаграммы направленности лазерного излучения.

Перейдем теперь к определению диаметра пучка лазерного излучения. Диаметр пучка определяется двумя способами. В первом диаметр пучка определяется как расстояние между двумя точками в поперечном сечении пучка, расположенными симметрично относительно оси пучка, в которых плотность мощности уменьшается в заданное число раз по отношению к максимальной плотности. Например, для гауссова пучка за диаметр можно принять удвоенный размер пятна (масштаб сечения) $D = 2\omega$. В этом случае диаметр пучка будет определен по спаду интенсивности в e^2 раз по отношению к интенсивности на оси пучка. Для основной моды легко найти диаметр пучка по любому уровню интенсивности, если известен D . Из выражения для M_r следует, что

$$r = \omega \sqrt{0,5 \ln \frac{M_0}{M}}$$

Следовательно

$$D_{\text{отн}} = 2\omega \sqrt{0,5 \ln \frac{M_0}{M}},$$

где отношение M_0 / M определяет выбранный уровень спада интенсивности, по которому определяется величина D .

Например, $D_{0,5} = 0,59D$. За величину диаметра пучка мод более высокого порядка можно принимать наибольшее расстояние между двумя точками, в которых интенсивность уменьшается в заданное число раз по отношению к максимальной интенсивности. Очевидно, что диаметр пучка моды более высокого порядка всегда больше диаметра пучка основной моды, и чем больше порядок моды, тем больше отношение диаметров. Это отношение будем называть коэффициентом моды k_m . Следует отметить, что k_m , определенные для разных уровней спада интенсивности* отличаются друг от друга. Если пучок многомодовый, то величину k_m можно найти только экспериментальным путем, так как аналитические выражения, описывающие распределение интенсивности, в этом случае очень сложны. Модовый состав в этом случае знать не нужно. Если величина k_m по заданному уровню спада интенсивности известна, то она сохраняет свое значение для любого сечения пучка.

При втором способе определения диаметра пучка за него принимается диаметр поперечного сечения, внутри которого проходит заданная доля энергии или мощности лазерного излучения. Для гауссова пучка существует простая связь между диаметром, определенным по спаду интенсивности, и диаметром, определенным по величине мощности (энергии).

$$\Phi_r = \Phi_0 \left(1 - e^{-\frac{2r^2}{\omega^2}} \right),$$

где Φ_r - поток через сечение, ограниченное радиусом r ; Φ_0 - полный поток излучения лазера.

Отношение r/ω определяется отношением интенсивностей, а Φ_r/Φ_0 представляет собой заданную долю энергии или мощности в сечении с радиусом r .

$$\frac{\Phi_r}{\Phi_0} = 1 - \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2}\right), \text{ т. е. } \frac{\Phi_r}{\Phi_0} = 1 - \frac{M}{M_0}.$$

Таким образом, если диаметр определен по спаду интенсивности в M/M_0 , то ему соответствует диаметр, определенный по доле энергии (мощности) в Φ_r/Φ_0 , и наоборот. Если диаметр определен по спаду интенсивности в e^2 раз, то этот диаметр соответствует сечению, через которое проходит 86,5% от полной мощности излучения.

Далее можно получить формулу связи между диаметрами пучка, определенными по разным уровням содержания энергии (мощности) в заданном сечении:

$$D = D_{0,86} \sqrt{0,5 \ln \left(\frac{\Phi_0}{\Phi_0 - \Phi_r} \right)},$$

Для мод более высокого порядка диаметр пучка будет в некоторое число раз больше, но коэффициент мод, определенный из соотношения диаметров, найденных по содержанию энергии, будет отличаться от величины k_m , определенной ранее.

Также двумя способами определяется и расходимость лазерного излучения. Согласно первому определению это плоский или телесный угол, характеризующий диаграмму направленности лазерного излучения в дальней зоне по заданному уровню плотности энергии или мощности излучения по отношению к их максимальному значению. Для гауссова пучка плоский угол, характеризующий расходимость лазерного излучения, определяется как:

$$\theta_p = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{D_z}{Z}$$

где D_z - диаметр пучка, определенный по заданному уровню спада интенсивности.

Величина θ_p определяется параметрами резонатора лазера. При определении θ по спаду интенсивности в e^2 раз

$$\theta_{p, 1/e^2} = 2 \sqrt{\frac{2\lambda}{\pi R_3}}$$

где R_3 - конфокальный параметр резонатора.

Расходимость по другому уровню спада интенсивности будет определяться подобно

$$\theta_p = \theta_{p, 1/e^2} \sqrt{0,5 \ln \left(\frac{M_0}{M} \right)}$$

Графически θ_p можно показать следующим образом (рис. 16).

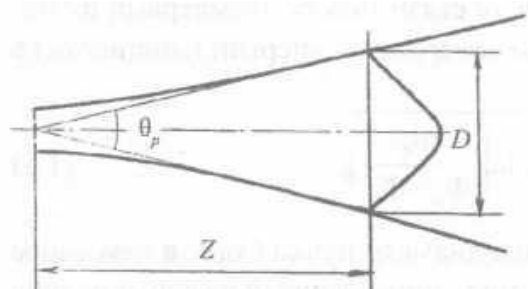


Рисунок 16 – Пространственные характеристики ЛИ

Рассмотрим гауссов пучок, распространяющийся в положительном направлении оси Z от плоскости перетяжки. В каждом сечении пучка отме-

тим точки, в которых интенсивность падает в некоторое число раз, например, в e^2 раз, по сравнению с интенсивностью на оси пучка. Соединив эти точки плавной линией, получим огибающую пучка по заданному уровню. Эти огибающие представляют собой гиперболы, а угол между асимптотами к этим гиперболам и представляет собой расходимость лазерного излучения (см. рис. 16). Пучок мод более высокого порядка имеет большую расходимость, причем, во сколько раз размер пятна мношмодового излучения больше, чем размер пучка основной моды, во столько же раз больше и расходимость пучка, т.е.

$$\theta_{p.m.n} = \theta_{p.o.o} k_m.$$

Второе определение расходимости лазерного излучения следующее: это телесный угол, или соответствующий ему плоский угол, внутри которого распространяется заданная доля энергии или мощности лазерного излучения. Эта расходимость называется энергетической. Между энергетической расходимостью и расходимостью, определенной ранее, которую мы будем называть угловой, существует связь, которая определяется выражением (Φ_r / Φ_0) . Связь между энергетическими расходимостями, определенными по разным уровням содержания мощности (энергии) в телесном угле, аналогична:

$$\theta_{\Phi} = \theta_{0,86} \sqrt{0,5 \ln \left(\frac{\Phi_0}{\Phi_0 - \Phi_r} \right)},$$

где $\theta_{0,86}$ – плоский угол, соответствующий телесному углу, в котором содержится 86 % энергии излучения.

Таким образом, для определения диаметра пучка и расходимости лазерного излучения применяются различные подходы, и один и тот же пучок может характеризоваться различными параметрами. Поэтому для каждого конкретного прибора нужно знать, каким образом определяется тот или иной параметр и по какому уровню.

При использовании лазера в приборе выбор пространственных параметров лазера играет большую роль. От распределения интенсивности в поперечном сечении пучка зависит точность определения центра пятна при использовании пучка для задания опорного направления; величина энергии, которая теряется при виньетировании на оптических элементах, а также распределение энергии в дифракционной картине, возникающей при ограничении пучка. От диаметра и расходимости пучка зависит выбор оптической системы, предназначенной для формирования пучка; плотность энергии, которую можно получить при фокусировании пучка или при облучении объекта, расположенного в дальней зоне, и т.д.

2.3. Энергетические характеристики лазерных излучений

Энергетические характеристики определяют величины энергии и мощности лазерного излучения, плотности этих величин. Вместе с пространственными параметрами они определяют фотометрические соотношения в лазерном пучке.

Такие параметры лазерного излучения как энергия излучения Q , энергия импульса излучения $Q_{и}$, мощность излучения Φ , средняя мощность излучения $\Phi_{ср}$, максимальная мощность импульса излучения $\Phi_{иmax}$, плотность энергии M_w и мощность M_p излучения, средняя плотность энергии $Q_{ср}$, мощности $M_{ср}$ (усредненные по сечению пучка) определяются общепринятым образом и не требуют особого пояснения. Заметим лишь, что непрерывное излучение характеризуется величиной мощности излучения, а излучение в виде импульсов – либо мощностью, либо энергией, причем эти величины связаны между собой через длительность импульса. Режим регулярной последовательности импульсов характеризуется средней мощностью излучения:

$$\Phi_{ср} = \Phi_{и} \frac{\Delta t}{T},$$

где Δt - длительность импульса, T -период повторения импульсов.

Следует также заметить, что значение энергии и мощности лазерного излучения определяется таким образом, чтобы характеризовать излучение полностью (а не по какому-либо уровню).

Фотометрические величины в лазерном излучении имеют некоторые особенности, которые определяются следующими факторами:

- отсутствием в лазере реальной излучающей поверхности;
- модовым составом излучения, что является причиной принципиально неравномерного распределения энергии излучения в поперечном сечении пучка и по угловым направлениям;
- особой структурой пучка, определяемой дифракционным характером расходимости излучения, имеющем место при отсутствии реального ограничения пучка.

Следует также отметить, что к лазеру как источнику излучения нельзя применять законы теплового излучения (законы Кирхгофа, Стефана-Больцмана, Вина) вследствие совершенно различной природы теплового излучения и излучения лазера.

Дадим определение некоторых фотометрических величин применительно к лазерному излучению. Энергия излучения (лучистая энергия) Q_e

представляет собой поток вынужденного излучения лазера, проходящего через поперечное сечение пучка в заданный промежуток времени. Если излучение происходит в видимом диапазоне спектра, то наряду с лучистой энергией можно использовать понятие световой энергии Q_v . Поток излучения (лучистый поток) Φ_e представляет собой энергию вынужденного излучения (энергию генерации), проходящего через поперечное сечение пучка в единицу времени:

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$$

Если излучение происходит в видимом диапазоне спектра, то наряду с потоком излучения можно использовать $\Phi_v = 683\Phi_e V_\lambda$, е светового потока Φ_v . Поскольку излучение лазера монохроматично, то переход от энергетических величин к световым осуществляется соотношением:

где 683 – световой эквивалент лучистой энергии на длине волны, соответствующей максимуму чувствительности глаза ($\lambda = 0,55$ мкм), лм/Вт; V_λ – коэффициент относительной видности глаза на длине волны излучения лазера.

Энергетическая сила света (сила излучения) I_e (в видимом диапазоне спектра сила света I_v) - величина лучистого потока, приходящаяся на единицу телесного угла:

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\omega}$$

Пользоваться величиной I_e (или I_v) можно лишь в дальней зоне, где пучок характеризуется постоянной расходимостью.

Поверхностная плотность потока излучения (энергетическая светимость) M_e (при видимом излучении светимость M_v) определяет величину лучистого потока, излучаемого с единицы поверхности излучателя:

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{ds}$$

По отношению к лазерному излучению поверхностную плотность можно определить как отношение потока к площади поперечного сечения пучка. Понятие энергетической светимости полностью совпадает с понятием энергетической освещенности (облученности) E_e .

Лучистость (энергетическая яркость) L_e (в видимом диапазоне яркость L_v) представляет собой величину лучистого потока, распространяющегося в

единице телесного угла с единицы площади излучающей поверхности. Понятие яркости применительно к лазерному излучению следует применять очень осторожно и обоснованно, так как многие лазеры эквивалентны точечному излучателю, к которому это понятие неприменимо. Естественно, что излучение лазера не подчиняется закону Ламберта, и яркость нельзя определять, пользуясь выражением:

$$L_e = \frac{M_e}{\pi}$$

Энергетическое количество освещения (энергетическая экспозиция) H_e – произведение энергетической освещенности (облученности) па время действия излучения: $H_e = dE_e dt$.

2.4. Временные характеристики лазерных излучений

К временным характеристикам относятся частота повторения импульсов лазерного излучения и длительность импульсов лазерного излучения. Частота повторения – это число импульсов лазерного излучения за одну секунду. Длительность импульсов – время, в течение которого мгновенная мощность лазерного излучения превышает значение, соответствующее уровню 0,5. При задании другого уровня его значение указывается в 1срмине. Например, для уровня 0,1 – длительность импульсов лазерной) излучения по уровню 0,1.

Частота повторения импульсов играет большую роль в приборах, с помощью которых определяется положение в пространстве объектов, быстро изменяющих свои координаты (необходимо, чтобы за промежуток между импульсами объект не вышел за пределы поля наблюдения). Длительность импульсов излучения необходимо учитывать при выборе приемника излучения (его постоянной времени).

2.5. Режимы лазерных излучений

Режим непрерывного генерирования лазерного излучения (непрерывный режим) – режим работы лазера, при котором спектральная плотность мощности лазерного излучения на частоте генерирования не обращается в нуль при заданном интервале времени, значительно превышающем период колебаний. Лазеры, работающие в непрерывном режиме, часто называют непрерывными лазерами.

Режим импульсного генерирования лазерного излучения (импульсный режим) – режим работы лазера, при котором его энергия излучается в виде импульсов. Лазеры, работающие в импульсном режиме, часто называются импульсными лазерами. Импульсы могут быть одиночными (когда промежу-

ток между импульсами произвольный), представлять собой серии регулярных импульсов с произвольным промежутком между сериями или регулярную последовательность импульсов в течение всей работы.

Режим свободного генерирования лазерного излучения (свободный режим) – режим импульсного генерирования лазерного излучения, при котором добротность оптического резонатора не меняется в течение длительности импульсов лазерного генерирования.

Моноимпульсный режим – режим модуляции добротности резонатора лазера с импульсной оптической накачкой, при котором за время действия импульса накачки генерируется один импульс лазерного излучения.

Режим модуляции добротности резонатора – режим импульсного генерирования лазерного излучения, при котором накопление энергии производится в лазерной активной среде, а ее вывод осуществляется путем быстрого изменения добротности резонатора (от минимальной до максимальной). Поясним этот режим с помощью рис. 17. По оси ординат здесь отложены величины инверсии в активной среде ΔN , плотность излучения накачки M_n и плотность мощности генерации M_r , по оси абсцисс – время.

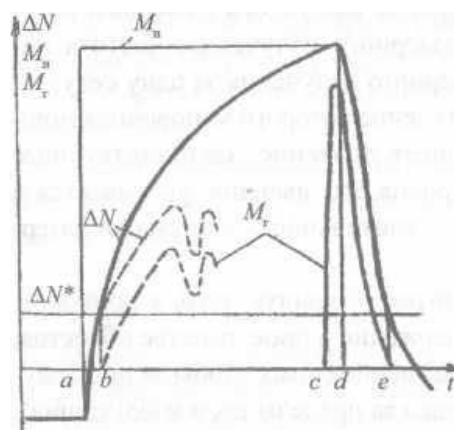


Рисунок 17 – Режим модуляции добротности резонатора

Излучение накачки представлено в виде импульса длительностью ad . Величина ΔN^* означает пороговую величину инверсии, т.е. величину инверсии, при которой начинается генерация. Пунктиром показаны величины ΔN и M_r в режиме свободной генерации. Как видно из рисунка, начиная с момента a инверсия увеличивается, сначала быстро, а затем ее рост замедляется из-за спонтанных процессов в среде. Резонатор лазера перекрыт, что соответствует его минимальной добротности (большим потерям энергии). При достижении почти максимальной инверсии (в момент c) резонатор открывается и развивается мощный импульс излучения (длительностью ce). Развитие генерации приводит к резкому уменьшению инверсии. Получающиеся импульсы генерации характеризуются мощностью порядка сотен и тысяч Мегаватт и длительностью от единиц до десятков наносекунд. В литературе еще встречается название этого редкими как режим гигантских импульсов.

Технически модуляция добротности резонатора осуществляется следующими основными способами:

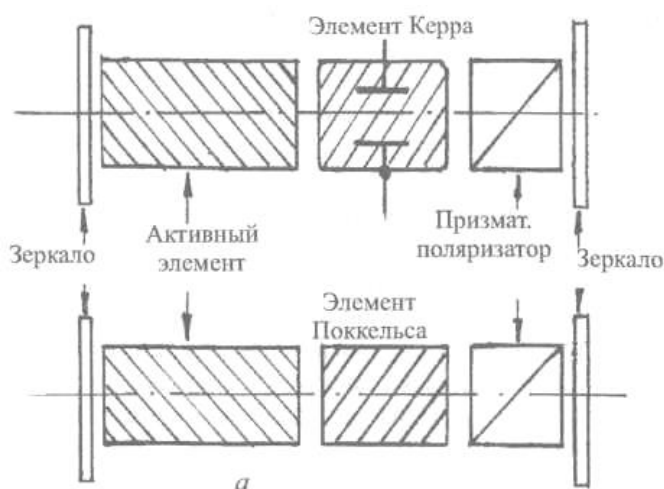
1. В резонатор лазера помещают электрооптический элемент (например, элемент Керра или Поккельса). При подаче напряжения на момент он не пропускает излучение, в момент c напряжение быстро снимается и происходит излучение импульса (рис. 18, *а*).

2. Вместо одного зеркала резонатора используют вращающуюся прямоугольную призму (рис. 18, *б*). Добротность резонатора здесь максимальна в момент, когда гипотенузная грань призмы параллельна второму зеркалу резонатора.

3. В резонатор лазера помещают ячейку с просветляющимся раствором. Просветление раствора происходит «автоматически» под действием спонтанного излучения активного элемента (рис. 18, *в*).

Режим синхронизации мод – режим работы лазера, при котором создаются определенные фазовые соотношения между модами резонатора. В зависимости от этих соотношений режим характеризуется различными параметрами излучения. В одном из режимов излучение происходит в виде импульсов с частотой, примерно равной $c / 2L$ (где c – скорость света; L – длина резонатора), причем мощность в импульсе достигает $10^{12} - 10^{13}$ Вт при длительности $10^{12} - 10^{13}$ с.

Многомодовый режим генерирования лазерного излучения (многомодовый режим) – режим работы лазера, при котором лазерное излучение содержит как продольные, так и поперечные моды, причем поперечных мод больше, чем одна.



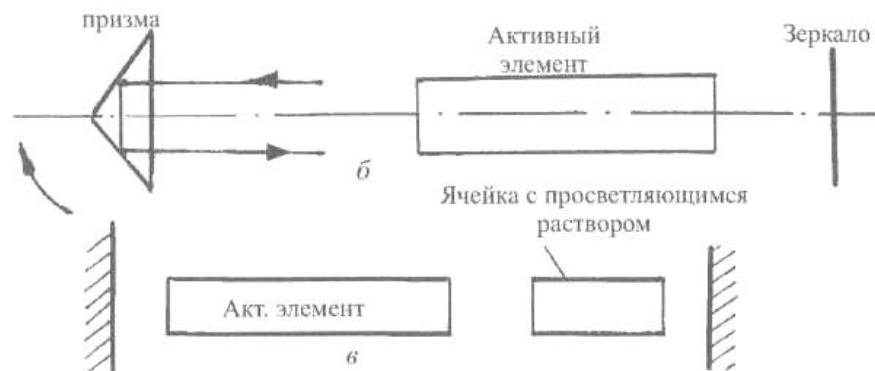


Рисунок 18 – Способы модуляции добротности резонатора:
a – электрооптических затворов; *б* – вращающейся призмы;
в – пассивного затвора

Одномодовый режим генерирования лазерного излучения (одномодовый режим) – режим работы лазера, при котором лазерное излучение содержит только одну поперечную и несколько продольных мод.

Одночастотный режим генерирования лазерного излучения (одночастотный режим) – режим работы лазера, при котором лазерное излучение содержит только одну продольную моду (одну спектральную линию).

2.6. Эксплуатационные параметры лазеров

Эксплуатационные параметры и характеристики определяют свойства лазера как прибора. Дадим их краткую характеристику.

Коэффициент полезного действия – представляет собой отношение энергии генерации к электрической (или какой-либо другой) энергии, потребляемой источником накачки.

Потребляемая мощность (энергия) – характеризует возможность работы лазера в системах с ограниченным энергоснабжением.

Рабочая температура – температура, при которой функционирует активный элемент или другие части лазера, определяет необходимость системы охлаждения. В свою очередь, система охлаждения является важным ограничивающим фактором при использовании лазеров в полевых условиях и на борту летательных аппаратов.

Время готовности лазера к работе – время, необходимое для достижения лазером номинальных значений параметров излучения с момента его включения. Оно зависит от требований, которые предъявляются к параметрам излучения.

Время непрерывной работы – время, в течение которого лазер работает до его выключения.

Ресурс работы (долговечность, срок службы) лазера – время работы до выхода из строя одного из основных элементов лазера. Оно является одним из основных экономических критериев качества лазера.

Габариты и масса лазера, как правило, определяются отдельно ним излучателя лазера, который содержит активный элемент и резонатор, и системы накачки, которая преобразует энергию внешнего источника к виду, необходимому для подачи на активный элемент лазера.

ГЛАВА 3. ЛАЗЕРНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

3.1. Лазерные локационные системы

Обнаружение и измерение координат удаленных объектов методами оптической локации в настоящее время производится с помощью оптических локационных лазерных систем (ОЛЛС). В результате анализа параметров отраженного сигнала могут быть измерены координаты, угловые и линейные скорости, ориентация объекта в пространстве и т. п. Применение в оптических локационных системах (ОЛС) лазеров в качестве источников излучения значительно улучшает параметры ОЛС. Лазерное излучение является монохроматическим, когерентным, направленным, интенсивным и поляризованным. Благодаря этому в ОЛЛС можно формировать узкие диаграммы направленности при сравнительно небольших размерах передающих оптических систем, осуществлять эффективную пространственную и спектральную селекцию сигнала на фоне помех. В ряде случаев в ОЛЛС используется возможность с помощью лазеров генерировать очень короткие ($10^{-8} - 10^{-12}$ с) и мощные импульсы излучения. Благодаря высокой частоте оптического сигнала имеется большой доплеровский сдвиг частоты, что позволяет измерять малые скорости перемещения объекта. Небольшая ширина диаграммы направленности дает возможность работать при малых углах места, так как практически устраняются отражения от земной поверхности и местных предметов. По сравнению с радиолокационными системами ОЛЛС обладают высокой точностью и разрешающей способностью при измерении дальности и угловых координат, большей помехозащищенностью и меньшими размерами.

Наряду с достоинствами ОЛЛС присущи и определенные недостатки: сильное ослабление оптического излучения в дожде, снеге и тумане; сложность наведения узкого луча на объект и получения больших полей обзора. Поэтому иногда целесообразно использовать ОЛЛС в комплексе с радиолокационными, телевизионными или радиометрическими системами

Практическое использование ОЛЛС началось с создания лазерных дальномеров, которые появились в 1961 г., т. е. через год после изобретения лазера. Хотя первые дальнометры были несовершенны, но уже через несколько лет появились довольно сложные системы, с помощью которых решались комплексные задачи.

Так, например, уже в 1965 г. была создана лазерная система слежения с автоматическим повторным поиском и захватом цели, предназначенная для системы точного слежения за ракетой «Сатурн-5» в начальной стадии полета с погрешностью порядка $\pm 1''$ в пределах поля $1^\circ \times 1^\circ$. Средняя квадратическая

ошибка слежения за уголковым отражателем на расстоянии 1 км в приземном слое из-за дрожания и мерцания составила несколько угловых секунд.

С развитием элементной базы, совершенствованием методов генерирования и приема когерентного оптического излучения сфера применения ОЛЛС непрерывно расширялась. В настоящее время ОЛЛС используются в метрологии, геодезии, авиационной и космической съемках и т. д. С их помощью решаются такие задачи, как исследование динамики континентов, контроль окружающей среды, наблюдение за ИСЗ и Луной и т. д.

В ОЛЛС используются, в основном, два метода обработки полученной от объекта информации: *фотографический* и *электронный*. В некоторых ОЛЛС для определения расстояний используется электронный метод, а для определения угловых координат объекта – фотографический. Рассмотрим принцип построения ОЛЛС оптико-электронного типа (рис. 19).

Основными частями аппаратуры являются: оптический передающий блок, система наведения и слежения, оптический приемный блок, блок обработки, индикаторное или регистрирующее устройство. Зондирующий сигнал формируется в лазерном источнике 2. Форма этого сигнала определяется схемой управления 5. Сформированный пучок коллимируется оптической передающей системой 1. Расходимость луча на выходе оптического блока обычно составляет 0,1 – 10 *мрад*. Отраженное от объекта излучение собирается приемной оптической системой 10, пропускается через узкополосный светофильтр 11 и преобразуется фоточувствительным элементом 12 в электрический сигнал. Усиленные сигналы с выхода приемного блока поступают в блок обработки, в который поступает также опорный сигнал. Принятый и опорный сигналы позволяют измерить дальность по времени распространения сигнала до объекта и обратно. Одновременно фиксируются угловые координаты объекта.

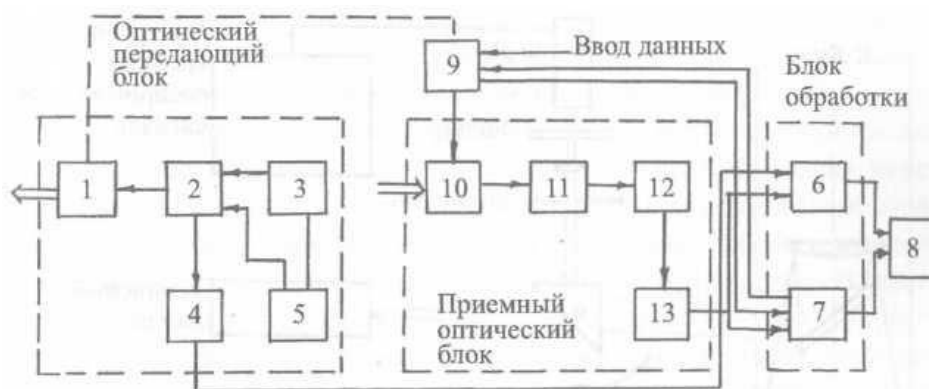


Рис. 20 – Структурная схема оптической локационной системы обзора пространства, слежения и измерения координат:

1 - передающая оптическая система; 2 - лазерный источник излучения; 3 - блок питания; 4 - схема формирования опорного сигнала; 5 - блок управ-

ления; 6 - блок измерения дальности; 7 - блок измерения угловых координат; 8 - регистратор; 9 - система наведения и слежения; 10 - приемная оптическая система; 11 - узкополосный интерференционный светофильтр; 12 - фотодетектор; 13 - усилитель

Одним из первых применений ОЛЛС явилась оптическая локация Луны. В качестве приемо-передающей оптической системы был использован телескоп Крымской астрофизической обсерватории с диаметром главного зеркала 2,6 м (рис. 21), а в качестве отражателя использовались уголкового отражатели, установленные на откидывающейся крышке отечественного луннохода. Расстояние до Луны было определено с точностью до 3 м.

Характеристики ОЛЛС Крымской астрофизической обсерватории

Приемо-передающая система:

телескоп диаметром	2,6 м
фокусное расстояние	42,5 м
Энергия импульса (рубиновый лазер)	4 Дж
Длительность импульса	20 нс
Частота повторения импульсов	4 / мин
Начальный диаметр пучка	15 мм
Угловое поле (расходимость пучка на выходе лазера)	15'
Расходимость пучка на выходе телескопа	5"
Полоса пропускания фильтра (пропускание 40%)	1 нм
Квантовый выход фотоумножителя (ФЭУ-77)	9 %
Точность измерения времени	±10 нс

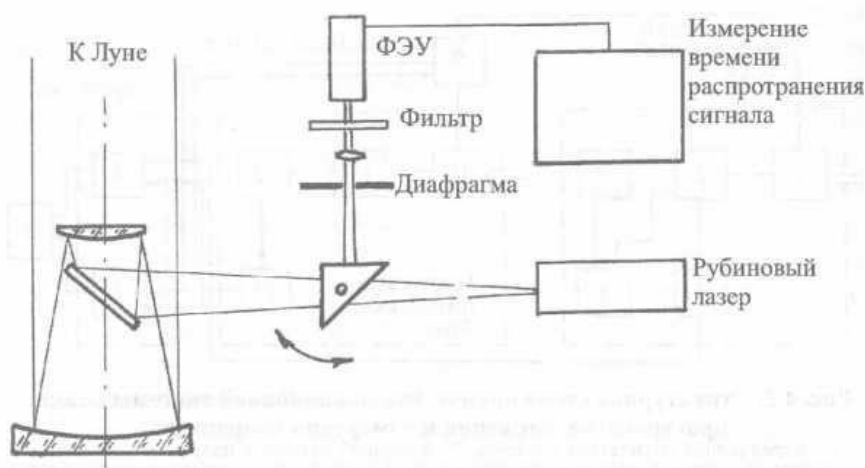


Рисунок 21 – Оптическая схема установки для лазерной локации Луны

Сеансы лазерной локации были начаты в 1969 г. Использовались угольковые отражатели, доставленные на Луну космическими кораблями «Аполлон». В отдельных сеансах погрешность определения расстояния составляла 5-10 см (относительная погрешность $3 \cdot 10^{-10}$). Кроме наблюдения за спутниками и Луной, ОЛЛС применяются для решения многих других задач в системах автономного сближения космических аппаратов, в высотомерах различного назначения, в профилометрах, для измерения высоты до облаков (например, ДОЛ-1 с диапазоном измерения от 15 до 4000 м) и т. д.

ОЛЛС делятся на *импульсные* и *непрерывные* в зависимости от того, как формируется выходное излучение во времени. Импульсные ОЛЛС характеризуются меньшей точностью измерений расстояний, но большей дальностью действия, чем фазовые. Аппаратурная точность современных лазерных дальномеров достигла такого уровня, что основным препятствием к дальнейшему увеличению точности измерений является влияние внешних условий.

Одним из применений ОЛЛС является лазерное зондирование атмосферы. Принцип действия зондирующих ОЛЛС-лидаров заключается в том, что в атмосферу посылается мощный импульс излучения и анализируется интенсивность и спектр отраженного (рассеянного) сигнала. Выделяя ту или иную характеристику сигнала, можно судить о параметрах атмосферы: температуре, давлении, влажности, скорости ветра и его направлении. Изменяя частоту излучения посылаемого импульса, оказывается возможным получить информацию о пространственном распределении температуры, давления и концентрации составляющих атмосферу газов. Наконец, отраженный сигнал несет информацию о степени загрязненности атмосферы различными аэрозолями. Многоволновые лидары используются для получения информации о высотном распределении параметров микрочастиц. В таких лидарах производится одновременная регистрация сигнала упругого рассеяния и рамановского сигнала рассеяния азота. К таким приборам можно отнести лидары серии MRL-400 фирмы «Оптосистемы». Прибор работает с неодимовым лазером на гранате и генерацией второй и третьей гармоник в импульсном режиме и определяет следующие величины: обратное рассеяние на длинах волн 355; 532; 1064 нм; общее ослабление на длинах волн 355 и 532 нм; коэффициент деполяризации; содержание водяных паров; средний и эффективный радиусы аэрозолей; комплексный показатель преломления; поверхностная и объемная концентрация аэрозоля.

Поскольку отраженный сигнал, очевидно, имеет небольшую интенсивность, в качестве источников излучения в лидарах используют мощные твердотельные или газовые лазеры, работающие в импульсном режиме. Кроме необходимости получить большую мощность, работа в импульсном режиме позволяет получить дополнительную информацию об удалении зондируемого участка атмосферы, а по характеру размытия импульса – о свойствах сре-

ды. Большое значение в лидарах имеет возможность перестройки частоты излучения лазера.

3.2. Лазерные гироскопы

Предпроектная деятельность и ранние стадии проектирования образцов и комплексов ВВТ характеризуются большой неопределенностью и отсутствием жестких регламентаций процессов реализации. Именно здесь принимается большинство решений из числа важнейших по степени их влияния на окончательный результат. Исследование информационных процессов, предшествующих проектированию, целеполагание, формирование пакета альтернатив, выбор альтернатив и их проработка до уровня, позволяющего провести экспертизу, - это то, что обычно относят к ранним стадиям проектной деятельности.

Основой лазерного гироскопа является так называемый кольцевой лазер, резонатор которого состоит из зеркал, расположенных по периметру некоторого контура (кольца). Наиболее часто используется резонатор, зеркала которого расположены в вершинах равностороннего треугольника (рис. 22).

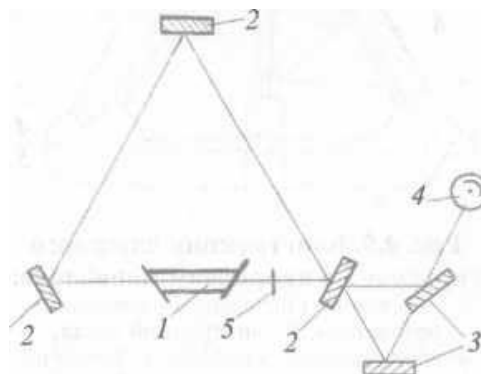


Рисунок 22 – Схема кольцевого лазера

Если в контур резонатора 2-2-2 поместить активную среду 1, то в нем будут распространяться колебания генерации по часовой стрелке и против нее. Эти колебания выводятся из резонатора через одно из зеркал 2, которое делается частично прозрачным, и с помощью некоторого устройства 3, показанного на рисунке 22, направляются на фотоприемник (фотоумножитель) 4. Конструктивно схема может быть выполнена в виде моноблока (рис. 23).

Если контур неподвижен, т.е. не вращается вокруг оси, перпендикулярной плоскости контура, то частоты обоих колебаний одинаковы. В этом случае с выхода приемника 4 снимается постоянный сигнал (частота оптического излучения значительно превышает величину $1/\tau$, где τ – постоянная времени приемника). Если же контур вращается вокруг оси с угловой скоростью Ω , то частоты колебаний, распространяющихся в противоположных направлениях, становятся различными. Разность частот двух колебаний оказывается равной

$$\Omega = f\lambda L / (4S).$$

где S - площадь; L - периметр контура; X - средняя длина волны колебаний.

Если оба колебания направляются на фотодетектор, то выходной электрический сигнал будет содержать частоту, равную разности частот колебаний, т. е. $f = \Delta\nu$. Частота f называется *частотой биений*. Отсюда

$$\Delta\nu = 4\Omega S / (\lambda L),$$

Таким образом, зная или измеряя частоту биений и параметры контура, можно определить угловую скорость вращения контура. Этот метод измерения угловых скоростей является очень чувствительным, так как частоты оптического излучения очень велики и даже небольшая скорость вращения вызывает большую разность частот.

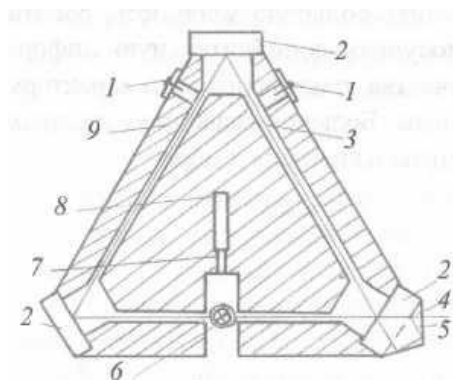


Рисунок 23 – Конструкция лазерного гироскопа в кварцевом моноблоке: 1 - клеммы питания; 2 – зеркала резонатора; 3 - внутренний канал; 4 - расщепляющая призма; 5- выход на фотодетектор; 6 - диафрагма; 7 - экран; 8 - катод; 9 - кварцевый моноблок

Как видно из уравнения для $\Delta\nu$, частота биений теоретически пропорциональна угловой скорости вращения контура. Однако существует явление, которое искажает эту зависимость. Оно называется захватом частот и состоит в том, что при малых скоростях вращения чистота биений исчезает (излучение происходит на одной частоте, которая получает некоторое преимущество в интенсивности перед другой). Поэтому зависимость f от Ω выглядит следующим образом (рис. 24).

Для устранения явления захвата частоты встречных волн искусственно разносят, т.е. увеличивают разность между ними. Это делается с помощью так называемых невзаимных элементов (элемент 5 на рис. 22). Сущность работы невзаимного элемента состоит в том, что он неодинаково действует на встречные волны. Например, если векторы электрических полей встречных волн вращаются в разные стороны, а в невзаимном элементе скорость враще-

ния для одной волны увеличивается, а для другой уменьшается (например, за счет эффекта Фарадея), то оптические пути встречных волн становятся неодинаковыми и возникает разностная частота даже в отсутствии вращения. Таким образом, с помощью невзаимного элемента устраняется явление захвата частот. Кроме того, устраняется неоднозначность отсчета направления движения, присущая квантовому гироскопу, так как при наличии невзаимного элемента вращение контура в разные стороны приводит либо к уменьшению, либо к увеличению частоты, созданной невзаимным элементом. То, что кольцевой лазер называется квантовым гироскопом, объясняется следующим образом. В формуле для $\Delta\nu$ Ω – есть проекция угловой скорости вращения контура на ось, перпендикулярную плоскости контура. Поскольку любой кольцевой лазер вращается вместе с Землей, то выходной сигнал лазера будет зависеть от ориентации оси вращения контура относительно вектора угловой скорости вращения Земли: устройство как бы чувствует направление вектора угловой скорости.



Рисунок 24 – Зависимость частоты биений от скорости вращения контура

Изменение положения контура приводит к изменению выходного сигнала. Это справедливо не только для кольцевых лазеров, размещенных на Земле. Таким образом, функции кольцевого лазера похожи на функции гироскопа. Преимущества квантового гироскопа перед механическими следующие:

- отсутствие движущихся (вращающихся) частей;
- меньшая потребляемая мощность (несколько десятков ватт);
- большее быстродействие (квантовый гироскоп начинает работать почти мгновенно после включения, а механический требует значительного времени для достижения заданного числа оборотов);
- большая теоретическая чувствительность (она достигает примерно $2,5 - 10^{-4}$ град/час);

- сигнал квантового гироскопа легко выражается в цифровой форме (частота есть число периодов колебаний в единицу времени), что позволяет использовать его совместно с компьютером.

Из принципа работы квантового гироскопа ясно, что он может быть использован для измерения широты точки на Земле, направления меридиальной плоскости (т.е. работать как квантовый компас), определения вертикали в данной точке Земли, а также для измерения угловой скорости вращения и углов поворота. В последнем случае выходной сигнал устройства интегрируется.

Чувствительность квантового гироскопа пропорциональна периметру кольцевого резонатора. Для увеличения длины кольцевого резонатора возможна спиральная конструкция с небольшим размером одного витка. В этом случае в качестве активной среды удобно использовать полупроводниковые элементы или волоконно-оптические квантовые генераторы (например, волоконный источник излучения ASE на стекловолокне, легированном эрбием, с длиной волны излучения 1536 нм производства Пермской научно-производственной приборостроительной компании).

3.3. Лазерные импульсные дальномеры

Лазерные дальномеры активного типа подразделяются на импульсные, фазовые и интерференционные дальномеры.

Лазерные импульсные дальномеры – определяют дальность до измеряемого объекта по времени распространения лазерного импульса (до объекта и обратно).

Лазерные фазовые дальномеры – измеряют дальность до объекта путем определения сдвига фазы гармонически модулированного оптического излучения лазера или светодиода по отношению к опорному колебанию.

Интерференционные лазерные дальномеры – принцип действия основан на подсчете интерференционных полос при перемещении реперного световозвращающего элемента от нулевого положения до требуемого. Дальномеры такого типа применяют при высокоточном технологическом контроле различных объектов.

Рассмотрим принцип действия лазерных импульсных дальномеров. Он основан на измерении интервала времени между моментом излучения зондирующего лазерного моноимпульса (старт-импульс) и моментом приема излучения, отраженного от объекта (стоп-импульс) (рис. 25). Источником излучения в таких приборах является импульсный лазер (обычно твердотельный или полупроводниковый), излучение которого коллимируется с помощью оптической формирующей системы. При формировании лазерного импульса часть лазерного излучения отводится (например, с помощью светоделителя)

на фотоприемное устройство (ФПУ1). Отраженное от объекта излучение попадает в приемный канал, состоящий из приемного объектива, ФПУ2 (приемника излучения) и усилителя сигнала. Измеритель временных интервалов (ИВИ) начинает работу в момент излучения лазерного импульса по сигналу ФПУ1 и завершает ее в момент приема отраженного излучения по сигналу ФПУ2, выдавая цифровой код полученного результата. Блок синхронизации и управления осуществляет интерпретацию и повышение точности полученных результатов, формирует сигнал на индикаторе, а также принимает команды органов управления.

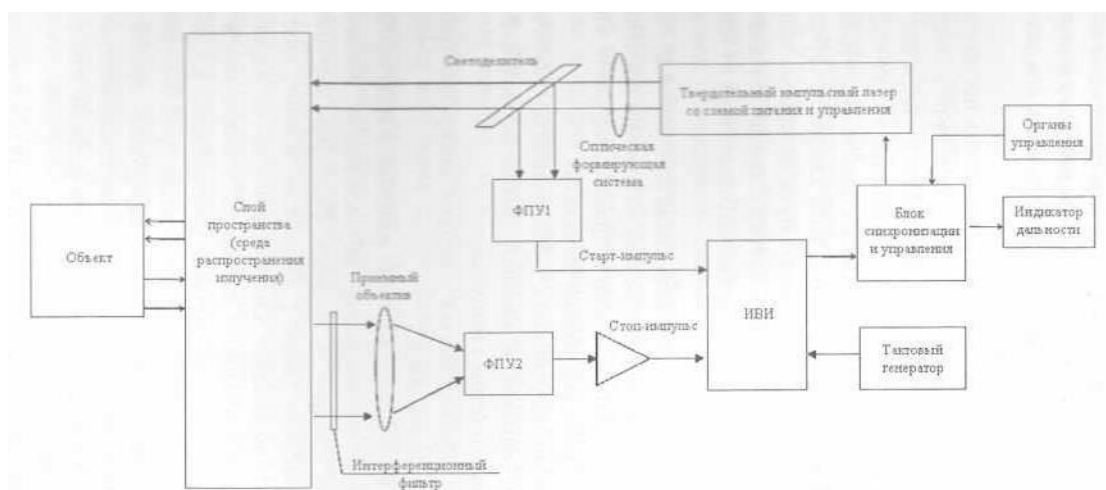


Рисунок 25 – Схема лазерного импульсного дальномера

При постоянной скорости распространения электромагнитного излучения в слое среды (атмосфере, космосе, воде) дальность до объекта можно рассчитать с помощью следующего выражения (при этом учитывается, что лазерное излучение проходит двойное расстояние):

$$l = \frac{c\Delta t}{2n},$$

где c – скорость света в вакууме; Δt – интервал времени между моментами посылки и приема излучения зондирующего импульса; n – показатель преломления среды распространения для используемой длины волны излучения.

Как следует из данного выражения, для уменьшения погрешности измерения дальности до объекта необходимо обеспечить постоянство скорости распространения излучения в слое среды и его прямолинейность. Эти условия не всегда выполнимы: например, при расположении дальномера на воздушном судне и сканировании им объектов на Земле необходимо учитывать явление рефракции, приводящее к искривлению оптического пути лазерного

излучения. При лазерной локации в турбулентных средах оптический путь лазерного излучения также искажается (отличается от прямолинейного).

Основной вклад в погрешность измерения дальности до объекта вносят погрешности, возникающие при измерении временного интервала между моментами послышки и приема излучения зондирующего импульса. Среди них можно выделить:

- систематическую погрешность, обусловленную различным временем задержки сигнала в каналах фиксации излучаемого (старт-) и принимаемого (стоп-) импульсов;

- погрешность, обусловленную конечной дискретностью измерителя временных интервалов;

- погрешность временной фиксации импульсов излучения.

Систематическую погрешность, обусловленную различным временем задержки сигнала в каналах фиксации излучаемого (старт-) и принимаемого (стоп-) импульсов, можно либо минимизировать, либо, вследствие систематичности ее характера, учесть при измерении временного интервала. Минимизация данной погрешности возможна при схемной компенсации, а при схеме совмещенного старта, когда старт- и стоп-импульсы подаются на один приемник излучения, она компенсируется полностью. В системах без совмещенного старта эту систематическую погрешность можно учесть с помощью многократного измерения калиброванной дистанции.

Влияние дискретности измерителя временных интервалов при несинхронности его внутренней тактовой частоты с моментами излучения зондирующего импульса можно оценить по дисперсии связанной с ней погрешности:

$$D = \frac{\Delta d^2}{6},$$

где Δd – дискретность измерителя временных интервалов в единицах дальности. Тогда среднее квадратичное отклонение оценки дальности составит $\delta = 0,408 \Delta d$. При использовании тактового генератора для измерителя временных интервалов с частотой 150...300 МГц погрешность, вызванная дискретностью, составит 0,1.. .0,2 м.

Погрешность временной фиксации импульсов излучения в основном связана с приемом отраженного от объекта лазерного импульса – мощность сигнала может изменяться на несколько порядков в зависимости от дальности до объекта и его коэффициента отражения, состояния слоя среды распространения излучения. Кроме того, на сигнал накладываются шумы и помехи приемного канала и канала распространения. Все это приводит к сильным

искажениям формы принятого сигнала и, как следствие, к погрешности фиксации момента прихода данного импульса пороговым устройством (рис. 26).

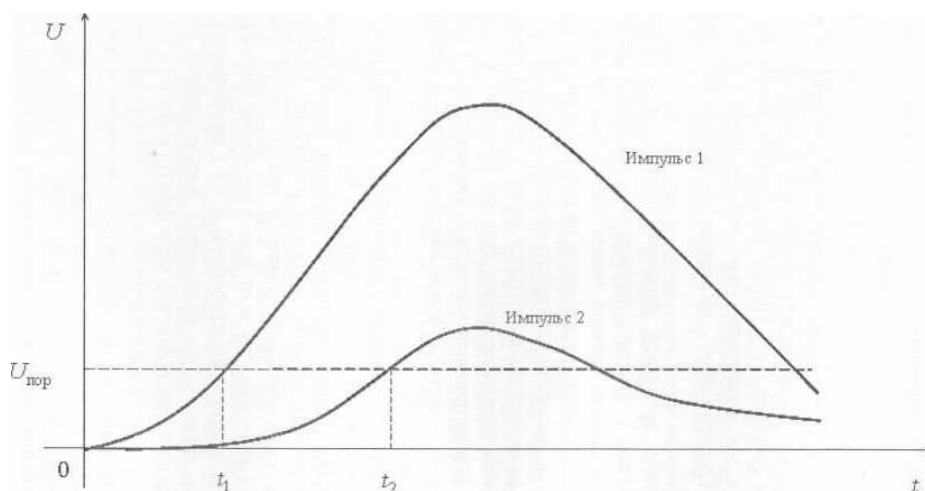


Рисунок 26 – Временная фиксация импульса лазерного излучения

Наиболее распространен метод временной привязки принятого импульса излучения путем фиксации его по уровню пороговым устройством (например, быстродействующим компаратором). В этом случае момент прихода импульса излучения фиксируется при пересечении порога срабатывания и зависит как от длительности фронта импульса, так и от всех параметров (отражающих свойств объекта, состояния атмосферы и т. д.), искажающих форму принятого сигнала. При сохранении формы сигнала разброс момента фиксации равен длительности фронта импульса, поэтому к лазерному источнику в высокоточных дальномерах предъявляют требования минимальности длительности импульса и максимизации добротности. Чаще всего используют импульсные лазеры с длительностью импульса 10 нс и менее. Если требования к точности фиксации импульса очень высоки, применяют методы фиксации максимума импульса и точки пересечения нуля производной. Эти методы сравнительно легко реализуются и дают высокую точность фиксации, однако они эффективны лишь в линейной области изменения сигнала, как правило, в динамическом диапазоне амплитуд, не превышающем 100.

Лазерные дальномерные методы основаны на определении длительности времени, в течение которого импульсный сигнал проходит двойное расстояние от дальномера до отражателя. Лазерные дальномеры должны измерять расстояния от долей метра до десятков километров, что соответствует измерительному временному интервалу от наносекунд до миллисекунд. Время измерения лазерными дальномерами неизменно и определяется оператором. Это упрощает получение удовлетворительного устойчивого разрешения и снижает требования к измерителю временных интервалов (ИВИ). Разрешение ИВИ должно быть намного выше, чем разрешение всей дальномерной системы в целом, определяемое уровнем шумов и временем измерения. Разрешение ИВИ можно улучшить посредством усреднения, что, в свою очередь, увеличивает время измерения.

Еще два ну менее важных параметра измерения временных интервалов – линейность и стабильность. Линейность вместе с флуктуационной погрешностью устройства временной привязки определяет абсолютную точность лазерного дальномера. Стабильность лазерного дальномера определяется не только дрейфом ИВИ, хотя он является одним из основных источников погрешностей. В целом стабильность ИВИ не существенна для точных измерений, поскольку лазерный дальномер неоднократно калибруется в процессе измерений.

Функционально оптические системы дальномеров (формирующая и приемная) должны решать следующие задачи:

- 1) формировать излучение источника (лазера) с заданными расходимостью и неравномерностью распределения силы излучения в индикатрисе, а также с требуемой плотностью мощности в рабочем секторе;
- 2) регистрировать отраженный от объекта лазерный локационный сигнал на данной длине волны в требуемом поле зрения.

При решении типовой задачи определения дальности до диффузно отражающего объекта компоновка дальномера строится по параллаксной схеме, т. е. оптические оси приемного и передающего каналов не имеют общих оптических компонентов и являются параллельными. В ряде специфических случаев, когда требуется определить расстояние до световозвращающих объектов, имеющих узкую индикатрису ретроотраженного излучения, дальномеры строятся по беспараллаксной (совмещенной) схеме. Вместе с тем, параллаксная схема позволяет надежно исключить любые возможности появления внутренних собственных засветок между приемным и передающим каналами дальномера, что ощутимо проявляется в совмещенной схеме.

3.4. Лазерные фазовые дальномеры

Лазерные фазовые дальномеры в отличие от рассмотренных выше импульсных дальномеров обладают существенно меньшей дальностью измерения, но при этом гораздо большей точностью измерений. Такие различия объясняются тем, что в качестве источника излучения в лазерных фазовых дальномерах используется непрерывный полупроводниковый лазер либо светодиод, излучение которых промодулировано одним или несколькими гармоническими сигналами.

В лазерных фазовых дальномерах расстояние определяется сравнением фазы модулирующего сигнала на выходе с приемника излучения (фаза излучения, прошедшего расстояние до объекта о обратно) с фазой опорного сигнала (фаза сигнала на источнике излучения).

Расстояние проходимое световой волной за время t , равно

$$l = ct,$$

где c – скорость света.

За то же время фаза модулированного лазерного излучения, прошедшего путь от источника дальномера до объекта и обратно, изменится на величину

$$\varphi = 2\pi f_m t,$$

где f_m – частота модуляции излучения.

Таким образом, дальность до объекта можно определить из двух выше приведенных выражений как

$$l = c \frac{\varphi}{2\pi f_m}.$$

При измерении фазы возникает погрешность $\Delta\varphi$. Соответствующая погрешность в измерении расстояния Δl составит

$$\Delta l = c \frac{\Delta\varphi}{2\pi f_m}.$$

Анализ данной формулы позволяет заключить, что погрешность измерения дальности Δl тем ниже, чем выше частота модуляции, но для однозначного определения дальности изменение фазы φ на измеряемом расстоянии должно быть меньше 2π , т. е. двойное расстояние не должно превышать длины волны модуляции. Это накладывает ограничение на максимально допустимое значение частоты модуляции f_m . Как правило, в дальномерах используют не одну, а несколько частот модуляции. Низкая частота определяется максимальной дальностью измерения, последующие частоты – погрешностью измерения на предыдущей частоте (аналогично низкой частоте, погрешность более низкой частоты не должна превышать длину волны модуляции следующей частоты). Последняя частота модуляции определяется погрешностью $\Delta\varphi$ и необходимой точностью измерений.

В дальномерах используются интегральные фазовые детекторы, измеряющие разность фаз между входящим и опорным сигналами от 0° до 180° (при большем фазовом диапазоне возникает неоднозначность). В этом случае необходимо, чтобы при прохождении излучением расстояния до объекта и обратно фаза изменялась на величину φ , не превышающую π , т. е. чтобы двойное расстояние до объекта соответствовало половине длины волны ча-

$$2l_{\max} \leq \frac{1}{2} T_1 c,$$

стоты модуляции (рис. 27). При этом максимальная дальность определится с помощью выражения

где T_1 – период модуляции излучения на первой (низкой) частоте.

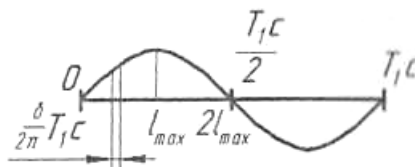


Рисунок 27 – Изображение одного периода моделирующего излучения

На рисунке 28 представлена функциональная схема двухчастотного лазерного фазового дальномера, реализующая классический принцип действия. На выходе генераторов формируются два сигнала в виде меандров с частотой $f_{1м}$ и $f_{2м}$. Эти сигналы логически перемножаются и подаются на драйвер лазера, который, в свою очередь, модулирует ток накачки полупроводникового лазера. Кроме того, эти же сигналы поступают через узкополосные фильтры на два фазовых детектора в качестве опорных напряжений. После отражения от зондируемого объекта модулированное одновременно двумя частотами лазерное излучение с измененной фазой регистрируется ФПУ. Напряжение с выхода ФПУ усиливается широкополосным услителем и подается на узкополосные активные фильтры, настроенные на частоты $f_{1м}$ и $f_{2м}$. Таким образом, из принятого сигнала сложной формы выделяются две гармоники, которые поступают на рабочие входы соответствующих фазовых детекторов.

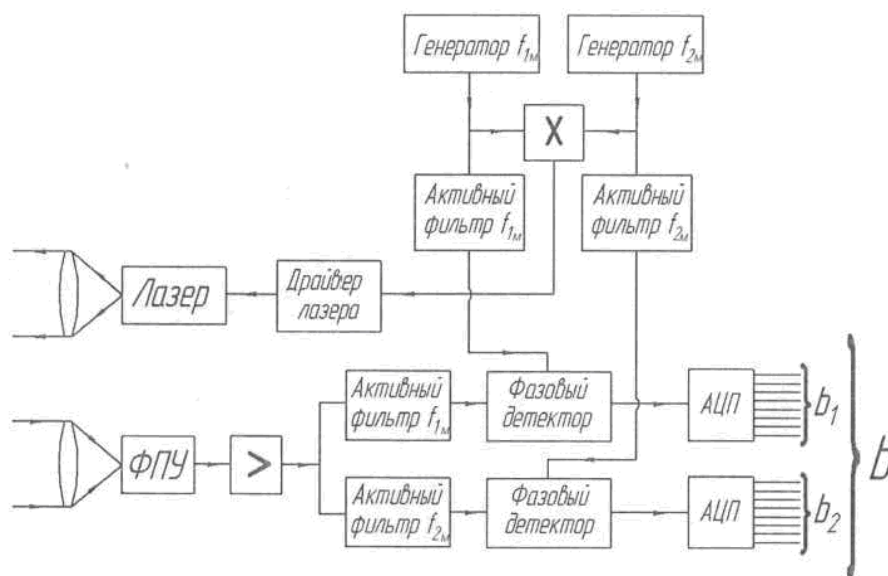


Рисунок 28 – Схема лазерного фазового дальномера

На выходах фазовых детекторов формируются напряжения, пропорциональные смещению фаз φ_1 и φ_2 , которые впоследствии оцифровываются с помощью АЦП. Результатом оцифровки сигналов являются два двоичных числа с разрядностями b_1 и b_2 .

Первое число является грубо определенной дальностью, а второе число – уточнением дальности до значения требуемой погрешности. Для получения итогового результата числа b_1 и b_2 «сшиваются» в одно число с разрядностью $b = b_1 + b_2$, которое и будет соответствовать дальности до объекта (с необходимой точностью).

На рисунке 29 представлены графики сигналов, поясняющие работу лазерного фазового дальномера.



Рисунок 29 – Графики сигналов лазерного фазового дальномера

В последнее время в результате развития современных цифровых технологий появились эффективные методы, позволяющие повысить точность измерения при одновременном снижении требуемых частот модуляции и упрощении общей электрической схемы дальномера. Основным источником погрешности измерения дальности является электронный измеритель фазы – фазометр.

Таким образом, при работе фазового лазерного дальномера, сигнал фотоприемного устройства будет зависеть не только от мощности лазера, но и от величины параллакса. В целом, узкополосный приемный канал лазерного фазового дальномера является более помехозащищенным, чем приемный канал импульсного дальномера.

3.5. Лазерные системы связи

Растущий объем информации требует увеличения числа каналов связи и увеличения пропускной способности существующих каналов. Особенно это касается каналов Земля-спутник, спутник-спутник, спутник-Земля, где требуется передавать огромный объем информации в ограниченные отрезки времени. Для спутниковой связи наиболее подходящими являются оптические каналы.

Во-первых, использование оптической частоты позволяет создавать новые каналы в совершенно другой области спектра, где существуют свободные частотные диапазоны, в то время как радиодиапазон уже почти полностью освоен (явление «тесноты эфира»).

Во-вторых, поскольку частота оптического диапазона намного превышает частоту радиодиапазона, в оптическом диапазоне можно реализовать и большие полосы частот, а это, с одной стороны, дает возможность передавать больший объем информации, а с другой – сокращать время передачи. Например, только видимой части спектра оптического диапазона соответствует полоса частот (для примера взята $\lambda = 0,63 \text{ мкм}$)

$$\Delta\nu = c\Delta\lambda/\lambda^2 \approx 3 \cdot 10^8 \cdot 0,4/0,4 \approx 3 \cdot 10^8 \text{ МГц.}$$

Если для передачи телевизионного канала необходима полоса 6 МГц, то в полосе $\Delta\nu$ можно было бы разместить $3 \cdot 10^8 / 6 = 50$ млн каналов.

В-третьих, оптические системы для передачи оптического излучения имеют гораздо меньшие, в соответствии с длиной волны, размеры, чем антенны радиодиапазона.

В-четвертых, узкие диаграммы направленности обеспечивают большую дальность действия и помехозащищенность.

К недостаткам оптических каналов относятся: ослабление излучения в атмосфере; необходимость точного нацеливания передатчика и приемника.

Сигнал оптической несущей (рис. 30) модулируется сигналом информации и передается с помощью оптической системы в канал (космос, атмосфера, световод). Приемная система (рис. 31) фильтрует и фокусирует излучение на фотодетекторе, где оптический сигнал преобразуется в электриче-

ский. Радиотехническая цепь осуществляет необходимое усиление и фильтрацию передаваемой информации. Для модуляции оптической несущей информационным сигналом используется ЧМ модуляция, ФМ, АМ модуляция, а также модуляция по интенсивности и модуляция по поляризации ПМ.

Фотодетекторы разделяются на два класса: энергетические (приемники прямого детектирования или некогерентные приемники) и гетеродинные (когерентные).

Приемники прямого детектирования применяют тогда, когда информация заключена в изменении мощности сигнала, гетеродинные – при АМ, ЧМ и ФМ модуляции.

Передающая антенна характеризуется диаграммой направленности и усилением. Усиление антенны $G = P_{max} / P_u$, где P_{max} – максимальная плотность мощности в диаграмме направленности; P_u – плотность мощности изотропной, т.е. излучающей во все стороны одинаково, антенны.



Рисунок 30 – Схема передатчика системы связи

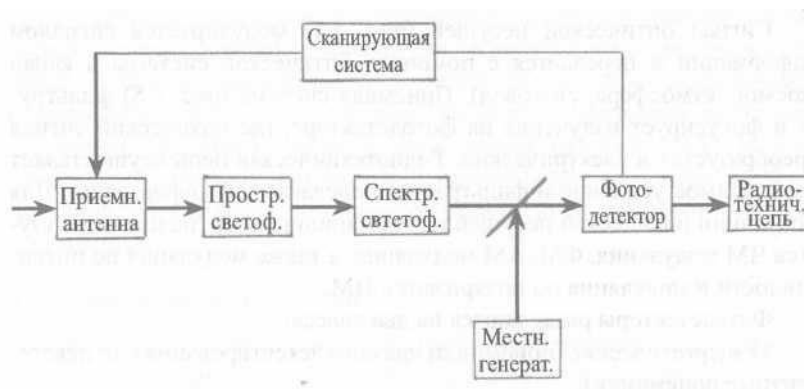


Рисунок 31 – Схема приемника системы связи

Кроме основной задачи – передачи и приема информации, для оптической связи огромное значение имеет проблема обеспечения попадания передаваемого излучения в приемник.

Эта проблема состоит из трех задач:

- 1) наведение луча передатчика на приемную станцию;
- 2) обнаружение приемной станцией луча передатчика;
- 3) сопровождение лучом передатчика приемной станции.

3.6. Доплеровские системы

Доплеровские системы предназначены для измерения скорости различных объектов, а также могут быть использованы для измерения изменения расстояния до них (относительной дальности). Принцип их действия основан на известном эффекте Доплера, который наблюдается как для звуковых, так и для электромагнитных волн. Он заключается в том, что если измерить с помощью фотоприемника частоту излучения движущегося источника, то она оказывается отличной от той, которая наблюдается при неподвижных друг относительно друга приемнике и источнике. Регистрируемая приемником частота равна:

$$\nu = \nu_0 (1 \pm V/c \cos \varphi),$$

где ν - частота, воспринимаемая приемником излучения; ν_0 - частота, излучаемая источником; φ - угол между вектором скорости объекта и направлением приемник-источник; V - скорость перемещения объекта.

Преобразуя данное выражение, получим $\nu - \nu_0 = (\pm \nu_0 V/c \cos \varphi)$.

Для простоты положим, что источник перемещается по линии приемник-источник, т.е. $\cos \varphi = 1$. Обычно разность $\nu - \nu_0$ меньше, чем $\nu + \nu_0$, и поэтому $\nu - \nu_0$ можно назвать разностной частотой f или *частотой биений*.

Наконец, так как $\nu_0 = c / \lambda_0$, то $f = V / \lambda_0$.

В большинстве случаев скорость объектов измеряют не по частоте его собственного излучения, а по отраженному от объекта излучению при облучении его электромагнитными волнами с известной частотой (длиной волны). Поэтому разностная частота удваивается и становится равной:

$$V = f \lambda_0 / 2.$$

Очевидно, что если одновременно с измерением скорости объекта измерять и время, то можно определять и изменения расстояния от приемника до объекта. Точность измерений скоростей и расстояний зависит от стабильности частоты излучения лазера. По этой причине в доплеровских системах применяются, в основном, газовые лазеры.

Доплеровские системы применяются для измерения скорости как наземных, так и воздушных объектов. На рисунке 32 показана упрощенная структурная схема доплеровского измерителя скорости полета самолетов на основе CO_2 -лазера.



Рисунок 32 – Схема доплеровского измерителя скорости

Часто представляет интерес определение не только скорости, но и её направления. Для этого можно использовать те же методы, которые применяются для определения направления сдвига объекта в интерферометрах. Схема получения разностной частоты в доплеровских измерителях аналогична схеме интерферометра. Поэтому можно решить задачу либо путем использования двух фотоприемников, сдвигая доплеровскую составляющую в них на $\pi/2$ и измеряя фазы двух сигналов, либо путем использования двухчастотного лазера.

Лазерные доплеровские измерители скорости (ЛДИС) можно также применять в том случае, когда объект движется перпендикулярно относительно оптической оси прибора. Для этого необходимо создать в поле движения объекта интерференционную картину, при этом объект должен рассеивать излучение. Особенно эффективно применение таких ЛДИС при измерении скоростей потоков жидкостей и газов. Принцип действия измерителя поясняется на рисунке 33.

В исследуемую область направляются два пучка когерентного света (рис. 33, а), которые получаются путем деления амплитуды или волнового фронта пучка лазера. В области пересечения этих пучков образуется интерференционное поле с чередованием максимумов и минимумов. При пересечении этого поля рассеивающей частицей интенсивность рассеянного света будет меняться. Если рассеянный свет собрать линзой и направить на прием-

ник, то его выходной ток будет содержать переменную составляющую с частотой, пропорциональной скорости движения частицы.

Расстояние между интерференционными максимумами (период интерференционной картины) $OB = D$, как видно из рисунке 33, б, где

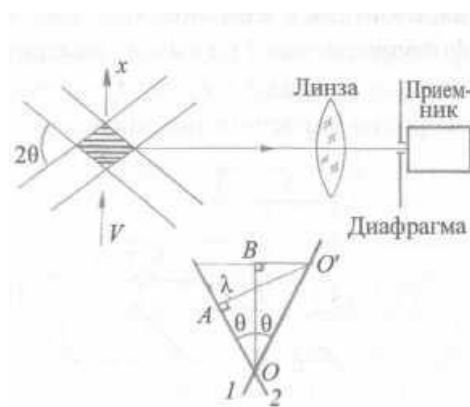


Рисунок 33 – Принцип действия ЛДИС

Среди современных лазерных измерителей скорости и дальности, использующих эффект Доплера, можно выделить прибор ЛИСД-2Ф производства ФГУП «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха. Данный прибор может производить измерения в плотном потоке машин при слабом снеге, дожде и тумане до приближающегося или удаляющегося объекта, движущегося со скоростью до 250 км/ч с погрешностью измерения $1,5 \text{ км/ч}$. Погрешность измерения дальности определяется величиной $\pm(0,3+0,001D) \text{ м}$ в диапазоне от 5 до 1000 м.

3.7. Лазерные геодезические приборы

В инженерных измерениях и строительстве при выполнении многих видов инженерно-геодезических работ применяют лазерные системы и приборы, которые позволяют решать инженерные задачи более эффективно, чем традиционные геодезические средства измерений (теодолиты, нивелиры, приборы для линейных измерений). Лазерные геодезические системы и приборы позволяют автоматизировать процесс измерений и повысить точность.

Появление лазерных геодезических приборов привело к разработке новых методов геодезических измерений. Луч лазера, в отличие от визирной оси геодезических приборов, реально наблюдаем, так как он несет определенную световую энергию в заданном направлении. Благодаря этому открываются возможности автоматизации геодезических измерений и их контроля, особенно при выполнении планировочных работ и при строительстве сооружений линейного типа. Световой луч, ориентированный определенным образом, является опорной линией или создает световую плоскость, относительно которых при помощи фотоприемных устройств могут выполняться необходимые геодезические измерения. Работы по созданию лазерных геодезиче-

ских систем и приборов ведутся во всем мире. В настоящее время разработаны и серийно производятся лазерные нивелиры, теодолиты, центриры, системы для управления работой строительных машин и механизмов, светодальномеры, тахеометры, насадки к теодолитам, нивелирам и др. Лазеры, используемые в геодезических приборах, должны обладать компактностью, надежностью в работе, стабильностью направления лазерного луча, ударопрочностью и влагостойкостью.

Конструктивно геодезические приборы с лазерами, как правило, выполнены так, что лазер установлен параллельно визирной оси геодезического прибора, на котором он смонтирован. Иногда лазерный луч направляется с помощью оптических элементов параллельно визирной оси зрительной трубы, служащей для наведения лазерного луча. Перед выходным отверстием лазера для уменьшения расходимости светового пучка устанавливают телескопическую систему. Если световой пучок пропустить через телескопическую систему, то на выходе угол расходимости пучка уменьшится пропорционально увеличению телескопической системы. Телескопическая система позволяет также сфокусировать лазерный пучок на расстоянии в несколько сотен метров, что значительно облегчает решение различных инженерных задач при работе с лазерными геодезическими приборами. При использовании телескопической системы с увеличением $30\times$ диаметр лазерного пучка на расстоянии 500 м от прибора равен 50 мм .

При выполнении планово-высотных измерений и для задания направления световой луч принимают за опорную линию, относительно которой выполняют соответствующие измерения. Основным преимуществом лазерных геодезических приборов является возможность полной автоматизации измерений за счет создания видимой световой визирной линии или плоскости. При измерениях используют фотоэлектрическую или визуальную индикацию лазерного луча. При визуальной индикации для отсчетов по лучу используется экран, на который нанесена сетка квадратов или линии в виде концентрических окружностей, а также нивелирная рейка. Точность визуального отсчета по световому пятну от лазерного луча зависит не только от диаметра пятна, но и от амплитуды колебания луча, которые вызываются непостоянством значения показателя преломления воздуха.

Увеличение точности визуального отсчета может быть достигнуто путем размещения зонных пластин в телескопической системе. Они представляют собой чередующиеся прозрачные и непрозрачные концентрические кольца, нанесенные на прозрачное основание. При установке такой зонной пластины на выходе из телескопа лазерный пучок вследствие дифракции преобразуется в чередующиеся светлые и темные концентрические кольца. Они позволяют с высокой точностью определять положение оси светового пучка.

При фотоэлектрической индикации используются фотоэлектрические системы различных типов. Наиболее простым лазерным фотоприемником можно считать фотоэлемент, который перемещают вдоль рейки, установленной вертикально или горизонтально. В момент прохождения фотоэлемента через световое пятно регистрируют сигнал на выходе фотоэлемента с помощью индикаторного устройства и фиксируют положение фотоприемника на рейке. Погрешность регистрации положения светового пятна фотоприемником составляет 1 – 2 мм на 100 м.

Лазерные геодезические приборы можно разделить на самостоятельные и используемые как дополнительные устройства к геодезическим приборам классического типа. К первой группе можно отнести лазерный прибор многоцелевого назначения ПИЛ-1, лазерный прибор УНЛЗ-У5, лазерные системы СКП-1, САУЛ-1, УКЛ-1, СЛВ, ПЗНЛ-01, ЛНС. Ко второй группе относятся лазерный нивелир НЛ-1 и лазерные насадки к теодолитам Т1, Т2, Т3, Т16.

Система СКП-1 состоит из лазерного излучателя, закрепленного в точке с известной высотной отметкой и создающего опорную световую плоскость, фотоприемного устройства, закрепленного на рабочем органе землеройной машины, и индикатора, который устанавливается в кабине машиниста. Дальность действия передатчика 500 м, частота вращения пентапризмы 72-108 об/мин. Система САУЛ-1, в отличие от СКП-1, обеспечивает установку световой плоскости с уклоном от 0 до 0,03. В качестве излучателя используется лазер ИЛГН-207 (в современной модификации ГН-2П-1). Система УКЛ-1 была предназначена для автоматического управления рабочим органом землеройной машины и применялась при строительстве каналов, трубопроводов и т.д. В качестве источника излучения использовался лазер ИЛГН-203. Дальность действия системы 500 м, средняя квадратическая погрешность ± 5 мм. Лазерная система СЛВ предназначена для непрерывного контроля за движением землеройной строительной машины по заданному направлению и уклону. Она состоит из лазерного визира ЛВ-78, сканирующей насадки, двух ФПУ и двух индикаторов положения (по направлению и уклону).

Построитель зенитно-надирной линии ПЗНЛ-01 предназначен для нивелирования при проведении строительных и отделочных работ. Излучение полупроводникового лазера, работающего на длине волны 0,65 мкм, совместно с оптической системой и встроенным двигателем автоматически задает горизонтальную плоскость и вертикальную линию. Лазерный геодезический прибор ПИЛ-1 предназначен для геодезических измерений, в которых используются задаваемые лазерным лучом горизонтальные и вертикальные линии и плоскости. Сканирующее устройство позволяет получить световую плоскость или сектор регулируемой величины. Современные образцы прибора такого типа известны под марками LG и KLM.

В целом, все существующие лазерные геодезические приборы, применяемые в строительстве и изысканиях, можно разделить, на две группы: собственно лазерные приборы геодезического назначения и насадки или составные части традиционных геодезических приборов.

3.8. Лазерные приборы в медицине

Свойства лазерного излучения делают лазеры незаменимыми источниками в медико-биологических исследованиях и в медицинской технике в качестве диагностического, терапевтического и хирургического оборудования. Как инструмент медико-биологических исследований лазер, обладая высокой степенью монохроматичности и направленности излучения, дает возможность проводить высокоточные спектроскопические исследования. Другими методами лазерных исследований в биологии и медицине являются микроэмиссионный спектральный анализ и субпикосекундная фотодиссоциация. Монохроматичность и направленность лазерного излучения позволяет проводить широкий спектр диагностических мероприятий по измерению спектрального состава переизлученного потока или по светорассеянию прозрачных или отражающих сред.

В офтальмологии также используется способ испытания сетчатки глаза при катаракте с использованием интерференционной картины. При регистрации разности отражательных спектров от здоровой и патологической тканей с использованием перестраиваемых по частоте лазеров удастся выявить локальные пораженные зоны как на коже, так и внутри тела (желудочно-кишечный тракт, полости рта., глазное дно и т.д.).

Созданная в нашей стране серия *аберрометров MultiSpot* предназначена для автоматического измерения полных аберраций человеческого глаза. Система содержит компенсаторы рефракции и астигматизма, позволяющие увеличивать пределы измерения и легко модифицировать прибор для измерения аккомодации и остроты зрения. Работают эти приборы на полупроводниковых лазерах с длиной волны излучения 780 нм и мощностью излучения 0,1 мВт. Погрешность измерений до 0,1 диоптрии.

Лазерная диагностика используется и в онкологии для распознавания ранней стадии заболевания. Существующие методы спектроскопических исследований позволяют выявить область поражения, содержащую всего 10 пораженных клеток. При этом диагностическое облучение с длиной волны около 530 нм повреждает раковые клетки, т.е. одновременно оказывается и терапевтическое воздействие.

Прибор позволяет осуществить спектрофотометрический анализ флуоресценции под воздействием лазерного возбуждения и определять ничтожно малые количества вещества (10^{-18} г или всего 10 молекул).

Высокая эффективность лазерного излучения как пространственная, так и спектральная (но в меньшей степени) позволяют осуществлять хирургическое и терапевтическое воздействие на организм пациента. Все способы воздействия можно условно разделить на три основные группы:

- 1) термическая лазерная хирургия, включающая коагуляцию, рассечение тканей, испарение;
- 2) нетермическая лазерная микрохирургия на основе оптического пробоя;
- 3) фотохимиотерапия, опухолей.

Первая группа основана на поглощении биологическим веществом лазерного излучения в соответствии с законом Бугера

$$I(\theta, Z) = I_0(\theta) \exp(-\alpha Z),$$

где θ - угловая координата внутри лазерного пучка; α - коэффициент поглощения вещества; Z - глубина проникновения.

Интенсивное поглощение лазерного излучения приводит к повышению температуры в локальной области воздействия лазерного пучка, что приводит к следующим по степени возрастания эффектам: ускорение физиологических процессов; коагуляция; взрывное испарение воды тканей; обугливание; испарение материалов ткани.

При этом за счет коагуляции: образуется бескровный шов; имеет место слабое воздействие на соседние с патологическим участки из-за низкой теплопроводности тканей; исключается заражение режущим инструментом; появляется возможность резания мягких тканей без их дополнительной фиксации; значительно сокращаются потери крови при операциях.

В качестве хирургических инструментов в медицине наиболее часто используются CO₂-лазеры для различных операций на коже и внутри тела, ИАГ-лазеры для внутриполостных операций с использованием гибких оптических кабелей и ионные аргоновые лазеры для операций на глазном дне или в обильно снабжаемых кровью внутренних органах. Такова, например, лазерная медицинская система «Перфокор», предназначенная для лечения ишемической болезни сердца путем создания с помощью лазерного излучения сквозных каналов в сердечной мышце, способствующих восстановлению её кровоснабжения. При этом операция осуществляется на работающем сердце без применения аппаратов искусственного дыхания и кровообращения. Область применения определяется не только мощностью лазера, но и поглощательной способностью биологического материала, который должен подвергаться воздействию. Немаловажное значение имеют и экономические факторы, связанные с высокой стоимостью используемой аппаратуры.

Нетепловая лазерная микрохирургия построена на явлении возникновения оптического пробоя при плотности энергии выше некоторой критической точки, характерной для данного материала (более 10^{10} Вт/см^2). Реализовать этот эффект можно только в оптических прозрачных средах и в весьма малых объемах, и потому техническая реализация данного метода осуществлена при операциях на хрусталике и передней части стекловидного тела глаза с помощью лазера на гранате с неодимом или эксимерных лазеров.

Фотохимиотерапия опухолей достигается путем светового облучения в комбинации с химическими веществами, заполняющими больные области и обладающими высоким коэффициентом поглощения для данного лазерного излучения. В общем случае протекает целая цепь химических превращений, завершающаяся поглощением излучения и разрушением тканей в области патологии. В качестве источников излучения при фотохимиотерапии используются лазеры на красителях или на парах золота ($\lambda = 628 \text{ нм}$). При использовании излучения в области $\lambda = 610 - 635 \text{ нм}$ разрушению подвергаются только поврежденные или раковые клетки при сохранении нормальной ткани.

Достаточно часто лазерное излучение в терапевтических целях соединяют с другими видами электромагнитного излучения. Так, одновременное воздействие излучения гелий-неонового лазера, импульсов электростимуляции и наружного облучения инфракрасным лазером дает возможность оказать эффективную помощь больным, страдающим уроандрологическими заболеваниями, такими как простатит и нарушение половой функции. Такими возможностями обладает, в частности, электро-лазерный терапевтический аппарат Аэлтис-Синхро-02 «Ярило». Для лечения аналогичных заболеваний используются и излучатели в виде светодиодных и лазерных матриц, излучающих в красной и инфракрасной областях спектра с одновременным воздействием вакуума (Алиф-01 «Кальвадос»). Для внедрения лазерных методов в клиническую практику необходимо в каждом случае решать два основных вопроса: является ли новый метод более эффективным и щадящим для больного по сравнению с существующим и целесообразны ли технико-экономические затраты на такого рода лечение.

В настоящее время в медицине применяются следующие методы:

- 1) лазерная фотокоагуляция в офтальмологии и гастроэнтерологии; лазерная микрохирургия в неврологии, гинекологии и ларингологии; оперативная лазерная эндоскопия в гастроэнтерологии, бронхологии и урологии;
- 2) лечение поражения кожи в пластической хирургии и дерматологии;
- 3) фотохимическая терапия опухолей в онкологии;
- 4) нетепловая микрохирургия в офтальмологии.

Широко проводятся исследования возможности использования лазерных методов в кардиологии для лечения нарушения сердечного ритма и тромбоза.

3.9. Лазерные технологические установки

Использование когнитивных моделей при моделировании систем вооружения имеет широкую направленность и разнообразие областей применения.

Для осуществления различных технологических операций – сварки, резки, сверления, плавления, закалки и т.п. – используется высокая пространственная интенсивность лазерного излучения, зависящая от направленности лазерного пучка. Эти свойства позволяют сфокусировать лазерное излучение в пятно с очень малым диаметром (единицы *мкм*) и получить за счет поглощения его обрабатываемым материалом высокую температуру в области взаимодействия. Поглощение лазерного излучения зависит от длины волны излучения, свойств материала, температуры окружающей среды и наличия дополнительных воздействий на процесс взаимодействия излучения с веществом.

В зависимости от достигаемой температуры различают три группы технологических операций:

- 1) тепловая обработка, тепловой удар при температуре ниже точки плавления обрабатываемых материалов;
- 2) резка, сверление, подгонка, фрезерование, удаление материала при температуре выше точки плавления;
- 3) сварка, переплавка, поверхностное легирование при температуре выше точки плавления, но ниже точки испарения материала.

Для реализации вышеперечисленных технологических операций в настоящее время используются лазеры на алюмо-иттриевом гранате с неодимом и CO_2 -лазеры с мощностью излучения в непрерывном режиме $1 - 10 \text{ кВт}$. В последнее время в лазерных технологических установках находят применение импульсные волоконные-лазеры с иттербиевым активатором со средней мощностью излучения несколько десятков *ватт*. Одним из активных предприятий-разработчиков и производителей таких лазерных устройств – является фирма «Лазерный Центр», находящаяся в г. Санкт-Петербурге. Ещё большую эффективность имеют отечественные лазеры предприятия НТО «ИРЭ-Полус», расположенного в г. Фрязино Московской области, которые в непрерывном и квазинепрерывном режимах излучают мощность от 500 Вт до 30 кВт с КПД около 30 %.

Начиная с определенной плотности мощности лазерного излучения, поглощение может принимать более высокие значения, чем определяемые законом Бугера для данного материала, т.е. имеет место нелинейное аномальное поглощение. При этом хорошими поглотителями становятся практически все материалы. При удалении материалов под воздействием лазерного излучения процесс включает три фазы:

1) отражение и поглощение с незначительным проникновением излучения в материал;

2) преобразование излучения в тепло в поверхностном слое, повышение температуры и прогрев более глубоких зон изделия до фазовых превращений (жидкость-пар);

3) перемещение зоны расплава и испарения от поверхности в глубину изделия при непрерывном выбросе материала.

Использование газовых потоков (кислорода или инертных газов), которые подаются коаксиально с лазерным пучком в область взаимодействия, позволяет управлять как скоростью процесса, так и качеством обрабатываемого объема. Газовое сопло служит не только направляющим элементом, но в ряде случаев диафрагмирующим для лазерного пучка.

Кроме того, дополнительными функциями газового потока являются: защита фокусирующей линзы от паров, образующихся при обработке материалов; удаление паров из зазора, образующегося при резке; инициирование реакции окисления между железом и кислородом; защита зазора от атмосферного воздействия с помощью инертных газов; предотвращение возгорания материалов с помощью химически пассивных газов; охлаждение кромок реза; управляемое влияние на профиль шва с помощью смеси газов при сварке.

Установка для лазерной обработки материалов представлена на рисунке 34.

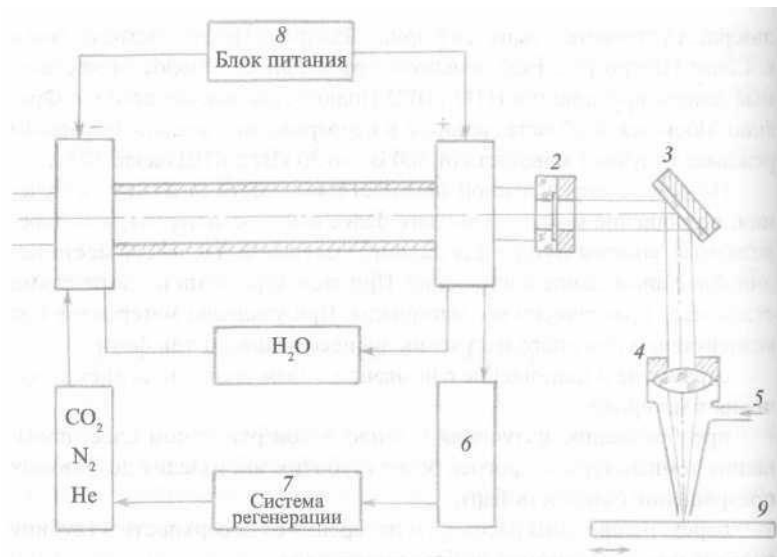


Рисунок 34 – Схема лазерной технологической установки

В состав установки входит: собственно лазер с зеркалами резонатора 1-2, работающий как правило в режимах термодинамического лазера или ТЕА-лазера на CO_2 , оптическая отклоняющая система 3, фокусирующая оптическая система 4, подвод вспомогательных газов для поддува 5, объект воздействия и система управления его перемещением 9, система прокачки рабочего газа 6, система регенерации тазовой рабочей смеси 7, блок питания лазера 8.

Лазерная резка применяется для тонких металлов и неметаллов в тех случаях, когда ее использование исключает ряд предварительных или последующих операций. В качестве примера можно привести технологические лазерные установки для резки кварцевых: труб, изделий для обработки полиметилметакрилата, текстильных материалов и т.п.

Более широкое применение лазерные установки нашли в микроэлектронике и специальных технологиях, таких, как:

обработка тонких металлических пленок толщиной 1-2 мкм; подгонка пленочных резисторов в микроэлектронике;

разделение полупроводниковых дисков и подложек;

выращивание кристаллических тонких пленок путем рекристаллизации аморфных слоев;

легирование и изготовление омических контактов микроэлектронных изделий;

термообработка и отжиг переключательных схем из аморфных и поликристаллических пленок;

поверхностная закалка различных металлических изделий любой формы, включая локализованную закалку в границах определенной области;

локальная переплавка приповерхностных слоев с повышением их прочностных характеристик;

гравировка на поверхностях и материалах, не поддающихся обычным способам механической гравировки.

Кроме твердотельных и газовых молекулярных лазеров, используемых в настоящее время, в технологические установки внедряются и интенсивно разрабатываемые эксимерные лазеры (например, CL-5000 производства фирмы «Оптосистемы» ЦФП ИОФ РАН, г. Троицк), работающие в импульсном режиме в коротковолновой области спектра ($\lambda = 193; 248; 308 \text{ нм}$). Благоприятные возможности для обработки материалов цифрового управления на всех стадиях процесса делает лазерный термический инструмент незаменимым в гибком автоматизированном производстве или в производстве с высокой степенью автоматизации технологического цикла.

Основными при внедрении факторами являются надежная и стабильная работа в течение длительного промежутка времени при стоимости, соизмеримой с другими аналогичными технологиями.

СПИСОК ПРИНЯТЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- E - освещенность
 F - сила воздействия
 G - усиление антенны системы связи
 H - экспозиция
 I - сила света; лучистый поток; сила тока
 J - момент инерции
 L - длина резонатора; лучистость потока
 M - плотность мощности
 N - населенность уровня
 ΔN - инверсия населенностей
 P - мощность лазера; давление окружающей среды
 Q - световая энергия
 R_0 - конфокальный параметр резонатора
 S_λ - спектральная чувствительность приемника
 dS - единица площади
 T - температура; период импульса
 ΔT - разность температур
 V - скорость движения; спектральный коэффициент относительной видности глаза
 b - длина кристалла модулятора
 c - скорость света; удельная теплоемкость
 d - постоянная дифракционной решетки;
 f - фокусное расстояние
 g - обобщенные параметры резонатора
 h - постоянная Планка
 k_{mn} - коэффициент модового состава
 m - масса; отношение сигнал/шум; порядок интерференции; модовый коэффициент
 n - показатель преломления среды; модовый коэффициент
 q - количество электричества; модовый коэффициент
 r - радиус-вектор пространственных координат; размер сечения лазерного пучка
 Δt - время действия излучения; длительность импульса
 w - радиус сечения пучка
 x, y, z - пространственные координаты
 Φ - мощность излучения
 Ω - телесный угол расходимости лазерного пучка
 α - коэффициент теплообмена; коэффициент поглощения
 γ - угол закручивания
 ζ - относительная продольная координата
 η - квантовая эффективность; КПД
 θ - угловая расходимость пучка
 λ - длина волны излучения
 ρ - коэффициент отражения
 τ - время воздействия; коэффициент пропускания
 ν - средняя частота излучения
 $\Delta\nu$ - ширина линии излучения
 $\delta\nu$ - расстояние между спектральными линиями
 φ - угловая величина; распределение плотности потока
 χ - показатель усиления; рассеяния; ослабления
 ω - угловая скорость вращения

ЛИТЕРАТУРА

- I. **Книги, учебники, учебные пособия, монографии и статьи по лазерным приборам и системам**
1. Тепляков Н.А., Ребрин Ю.К. Оптические квантовые генераторы и усилители. – К.: КВИАВУ ВВС, 1967. – 31 с.
2. Шавалов А.В., Фогель С.С. Оптические квантовые генераторы (лазеры). – М.: Издательство иностранной литературы, 1962. – 276 с.
3. Климков Ю.М., Хорошев М.В. Лазерная техника. – М.: МИИГАиК, 2014. – 143 с.
4. Рябов С.Г, Торопкин Г.Н., Усольцев И.Ф. Приборы квантовой электроники / Под ред. М.Ф. Стельмаха. – М.: Радио и связь, 1985.
5. Климков Ю.М. Основы расчета оптико-электронных приборов с лазерами. - М.: Советское Радио, 1978.
6. Климков Ю.М. Прикладная лазерная оптика. – М.: Машиностроение, 1985.
7. Лазерные измерительные системы. Под ред. проф. Д.П. Лукьянова. – М.: Советское радио, 1981.
8. Современные лазерно-информационные и лазерные технологии: сб. трудов ИПЛИТ РАН. Под ред. В.Я. Панченко, В.С. Голубева. – М.: «Интерконтактг» Наука, 2005.
9. Козинцев В.И. и др. Основы импульсной лазерной локации: учебное пособие / Под ред. В.Н. Рождествина. – М.: МГТУ им. Э.Н. Баумана, 2006.
10. Бокшанский В.Б., Бондаренко Д.А., Вязовых И.В. и др. Лазерные приборы и методы измерения дальности: учебное пособие / Под ред. В.Е. Карасика. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 92с.
11. Качмарек Ф. Введение в физику лазеров / Пер. с польск., под ред. М.Ф. Бухенского. – М.: Мир, 1981.
12. Промышленное применение лазеров. Под ред. Г. Кебнера / Пер. с англ., / под ред. И.В. Зуева. – М.: Машиностроение, 1988.
13. Справочник по лазерной технике / Пер. с нем., / под ред. А.П. Напартовича. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
14. Климков Ю.М., Хорошев М.В. Лазеры: учебное пособие. – М.: МИИГАиК, 1991.
15. Каталог-справочник. Лазерные технологические установки, выпускаемые в странах СНГ и Балтии. – М.: НТИУЦ ЛАС, 2013.
16. Денис Л.А., Васильев В.П., Волконский В.Б. и др. Лазерная дальнометрия. – М.: Радио и связь, 1995. – 256с.

17. Барышников Н.В., Бокшанский В.Б., Карасик В.Е. Приемо-передающие устройства лазерных локационных изображающих систем. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 84с.
18. Карасик В.Е., Орлов В.М. Лазерные системы видения. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 352 с.
19. Ключев Н.Ф. Обнаружение импульсных сигналов с помощью накопителей дискретного действия. – М.: Сов. радио, 1963.
20. Лезин Ю.С. Оптимальные фильтры и накопители импульсных сигналов. – М.: Сов. радио, 1969.
21. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981.
22. Barr K. Method for improving the received signal to noise ratio of a laser rangefinder. US Patent No. 7184130, Feb. 27, 2007, US CI.356/4.01, Int. CI. G01S 3/08.
23. Morcom J. / Optical distance measurement. US Patent No. 6753950, June 23, 2004, US CI 356/4,01, Int. CI. G01S 17/00; G01C 3/08.
24. Lee Seok-Hwan et al. Laser rangefinder and method thereof. Intern. Patent WO 2005/006016, 20.01.05, Int. CI Int. CI. G01S 17/10.

II. Нормативные документы

25. ГОСТ 2.105-95. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Общие требования к текстовым документам (с Изменением N 1, с Поправками). – М.: Стандартинформ, 2007. – 28с.
26. ГОСТ 7.32-2001 СИБИД. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления (с Изменением N 1). – М.: Стандартинформ, 2008. – 22с.
27. ГОСТ 24026–80. Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1980.

III. Электронные ресурсы

28. ГОСТ Р 15.201 – 2000. Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство. URL: <http://gostrf.com/normadata/1/4294847/4294847191.pdf>.
29. ГОСТ РВ 15.201-2003. Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Тактико-техническое (техническое)

- здание на выполнение опытно-конструкторских работ. URL: <http://www.twirpx.com/file/378262/>.
- 30.ГОСТ РВ 15.203-2001. Система разработки и постановки продукции. Военная техника. Порядок выполнения опытно-конструкторских работ по созданию изделий и их составных частей. Основные положения. URL: <http://www.twirpx.com/file/378251/>.
- 31.ГОСТ РВ 15.210-2001. Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Испытания опытных образцов изделий и опытных ремонтных образцов изделий. Основные положения. URL: <http://www.twirpx.com/file/520929/>.
- 32.Википедия – свободная энциклопедия. URL: www.ru.wikipedia.org.
- 33.Электронная библиотека МИИГАиК: <http://library.miiigaik.ru>.

При составлении данного пособия использованы книги, учебники, монографии и статьи по лазерным приборам и системам, приведенные в списке использованной литературы. Учебные пособия ВУЗов: МИИГАиК, МГТУ им. Н.Э. Баумана, КВИАВУ ВВС взяты за основу.

Дополнительные источники (цитирование):

- 1) ISSN 0236-3933. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “ Приборостроение”. 2011. [Электронный ресурс]. URL: <http://baumanpress.ru/vestnik/2/173.pdf#8>.
- 2) Занятие 13-ОЭПиС-2016. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.novsu.ru/file/1223778>.
- 3) Криксунов Л.З., Усольцев И.Ф. Инфракрасные устройства самонаведения управляемых снарядов. (1963).djvu. [Электронный ресурс]. URL: <http://inethub.olvi.net.ua>.

[1] СВ-2 (8/10) <http://baumanpress.ru>

[2] Занятие 13-ОЭПиС-2016 <http://novsu.ru>

[3] криксунов л.з., усольцев и.ф. инфракрасные устройства самонаведения управляемых снарядов. (1963).djvu <http://inethub.olvi.net.ua>

[4] Электроника <http://torglocman.com>

[5] Химия нефти и моторного топлива <http://nntu.ru>

[6] Электроника НТБ - научно-технический журнал - Электроника НТБ - Методы повышения точности импульсных лазерных дальномеров <http://electronics.ru>

[7] криксунов л.з., усольцев и.ф. инфракрасные устройства самонаведения управляемых снарядов. (1963).djvu <http://inethub.olvi.net.ua>

[8] fedorov b.f. opticheskie kvantovye generatory. (1966).djvu <http://inethub.olvi.net.ua>

[9] fedorov b.f. opticheskie kvantovye generatory. (1966).djvu <http://inethub.olvi.net.ua>

[10] не указано <http://window.edu.ru>

[11] Активная стереоскопическая оптико-электронная система анализа пространства для транспортных средств <http://dslib.net>

[12] Сущность менеджмента и его значение в условиях рыночной экономики <http://coolreferat.com>

[13] kozincev v.i. i dr. osnovy impul'snoj lazernoj lokacii. (2006).djvu <http://inethub.olvi.net.ua>

[14] не указано <http://bib.convdocs.org>

[15] Игнатов А.Н. Оптоэлектроника и нанофотоника <http://novsu.ru>

[16] Инновационные процессы в экономических системах: сб. науч. ст. <http://pac.by>

[17] Просмотреть файл <http://vak.ed.gov.ru>

[18] pdf <http://ufn.ru>

[19] не указано <http://bib.convdocs.org>

[20] Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых, Выпуск 2 <http://research.ifmo.ru>
Модуль поиска Интернет

Миссия университета – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

КАФЕДРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ И УПРАВЛЕНИЯ ИННОВАЦИЯМИ ИМБИП

Кафедра была основана в 2007 г. Основная цель кафедры - подготовка грамотных специалистов в области таможенного дела и логистики, что, с одной стороны, отвечает потребностям времени. С 2006 г. кафедра ИСиУИ является платформой опорной организации Роспатента в Северо-Западном федеральном округе. Кафедра ведет учебную, научную, проектную и международную деятельность, которая координируется и экспертируется Экспертным Советом по интеллектуальной собственности Северо-Западного федерального округа. Учебная деятельность ведется по программам магистратуры, программам дополнительного профессионального образования и программам Летних школ. Научно-исследовательская деятельность кафедры ведется в рамках открытой в 2008 г. научной школы "Модернизация инновационной среды в целях эффективного развития российской экономики", основанной в 2008 г. профессором, д.э.н., Е.Л.Богдановой и Секции «Интеллектуальная собственность и инноватика» Дома Учёных им. М.Горького Российской Академии Наук, которая функционирует с 2011 г. С сентября 2011 г. кафедра ИСиУИ входит в проект Роспатента и ВОИС по созданию сети Центров поддержки технологий и инноваций – Technology and Innovation Support Centers, целью которых является упрощение доступа к техническим знаниям и повышение эффективности использования патентной информации в ряде стран, в региональных и областных центрах научно-технической информации. Работа кафедры по данному направлению представлена в справочнике Роспатента. В 2011 г. почетным знаком Роспатента "Во благо России" награждена заведующая кафедрой ИСиУИ Богданова Е.Л. В 2014 г. благодаря активному содействию кафедры Университет был награжден высшей наградой Всемирной организации интеллектуальной собственности для Инновационных Предприятий (WIPO Trophy for Innovative Enterprises) в качестве признания вклада Университета в развитие инновационного и технического творчества и содействия развития и охраны интеллектуальной собственности мира. В 2015 г. ведущие преподаватели кафедры награждены дипломами, серебряными и золотыми орденами Салона изобретений и инновационных технологий "Архимед 2015", а в 2016 г. – серебряными и золотыми орденами Салона изобретений и инновационных технологий "Архимед 2016", Почетный знак Салона "Гранд Архимед" вручен заведующей кафедрой ИСиУИ Богдановой Е.Л.

Данков Алексей Александрович

**Управление инновационными процессами при
разработке оптических квантовых генераторов и
усилителей**

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49