

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
(МГИУ)

Ю.В. Курочкин

**СПЕЦИАЛЬНОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ  
ОБОРУДОВАНИЕ И ОСНАСТКА  
ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

МОСКВА  
2000

УДК 621. 7, 621. 9  
К 93

**Курочкин Ю.В. *Специальное технологическое оборудование и оснастка лазерной обработки: Учебное пособие.* - М.: МГИУ, 1999. - 90 с.**

В учебном пособии рассмотрены вопросы принципиального устройства и проектирования специального технологического оборудования и оснастки, используемых при лазерной обработке. Кратко изложены физические основы генерации лазерного излучения и практического применения его в технологии машиностроения.

Последовательно рассмотрены типы технологических лазеров, их устройство, приспособления для транспортировки, фокусировки и управления лазерным излучением.

Учебное пособие написано по курсу "Проектирование специального технологического оборудования и оснастки и предназначено для студентов специальностей 1207, 1201, 1208.

Ил. 49, табл. 6, список литературы. 11.

Подготовлено к печати на кафедре технической физики

Редактор С.В. Мухин

---

ЛР № 020407 от 12.02.97.

Подписано в печать 12.05.2000

Сдано в производство 15.05.2000

Формат бумаги 60×90/16

Бум. множит.

Усл. печ. л. 5,75 Уч.-изд. л. 6,0

Тем. план 1999 г., № 1-21

Тираж 125

Заказ №

---

РИЦ МГИУ, 109280, Москва, Автозаводская, 16

ISBN 5-276-00050-6

© Ю.В. Курочкин, 2000

© МГИУ, 2000

## Условные обозначения и сокращения

АИГ	–	алюминиево-итриевый гранат
АЛТК	–	автоматизированный лазерный технологический комплекс
БГИ	–	блок генерации излучения
БПЛ	–	быстропроточный лазер
ГКР	–	газоразрядная камера
ГЛР	–	газозлазерная резка
ГРЛ	–	газоразрядный лазер
ИОТЛ	–	инженерные основы технологических лазеров
ИЭП	–	источник электропитания
ЛДО	–	лазер диффузного охлаждения
ЛИ	–	лазерное излучение
ЛТ	–	лазерный технологический
ЛТУ	–	лазерная технологическая установка
ОР	–	оптический резонатор
РДД	–	регулятор дискретного действия
САУ	–	система автоматического управления
СТФИ	–	система транспортировки и фокусировки излучения
ТЛ	–	технологический лазер
УФ	–	ультрафиолетовое излучение

## Введение

Настоящее пособие предназначено для студентов специальностей 1201, 1207, 1208 по курсу "Проектирование специального технологического оборудования и оснастки". С учетом того, что непосредственная разработка и проектирование генераторов лазерного излучения является задачей специализированных отраслей промышленности, в настоящем курсе акцент сделан на конструктивных и технологических особенностях лазерных технологических комплексов, сведения о которых необходимы для разработки и проектирования конкретных технологий в машиностроительном производстве.

При написании пособия использовались материалы отечественных и зарубежных авторов.

Пособие предназначено как для лекционных курсов, так и для самостоятельной работы студентов соответствующих специальностей.

# 1. Физические основы генерации лазерного излучения

## 1.1. Инверсная заселенность и усиление света

С энергетической точки зрения лазерное излучение является следствием высвобождения внутренней энергии ансамбля частиц (молекул, атомов, ионов), возбужденных за счет внешнего источника накачки.

Известно, что частицы вещества в твердом, жидком или газообразном состоянии могут находиться в различных энергетических состояниях, которые формально описываются уровнями энергии  $i$ , каждый из которых имеет энергию  $E_i$  и заселен определенным количеством частиц  $N_i$  (заселенность уровня). Уровень  $i = 0$  называется основным и обладает наименьшей энергией и наиболее устойчивым состоянием. С ростом номера уровня  $i > 0$  увеличивается энергия и уменьшается устойчивость состояния.

В соответствии с законами квантовой механики при изменении энергетического состояния частицы (переход с одного уровня энергии на другой) происходит излучение ( $E_2 \rightarrow E_1$ ) или поглощение ( $E_1 \leftarrow E_2$ ) фотона с энергией

$$h\nu_{21} = E_2 - E_1, \quad (1)$$

где  $h$  – постоянная Планка;  $\nu$  – частота колебаний, связанная с длиной волны электромагнитного излучения  $\lambda = c/\nu$ , где  $c$  – скорость света.

Процессы излучения или поглощения в системе частиц зависят от характера распределения по энергетическим уровням (заселенность различных уровней) и факторов взаимодействия с внешней средой.

Если система находится в состоянии термодинамического равновесия с внешней средой, то распределение частиц по уровням энергии или заселенность  $i$ -го уровня, равная числу частиц с данной энергией в единице объема, определяется известной формулой Больцмана (рис. 1,а).

$$N_i = N_0 g_i \exp(-E_i / kT),$$

где  $N_0$  – полное число частиц;  $N_i$  – число частиц на  $i$ -ом уровне;  $g_i$  – параметр вырождения уровня;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура.

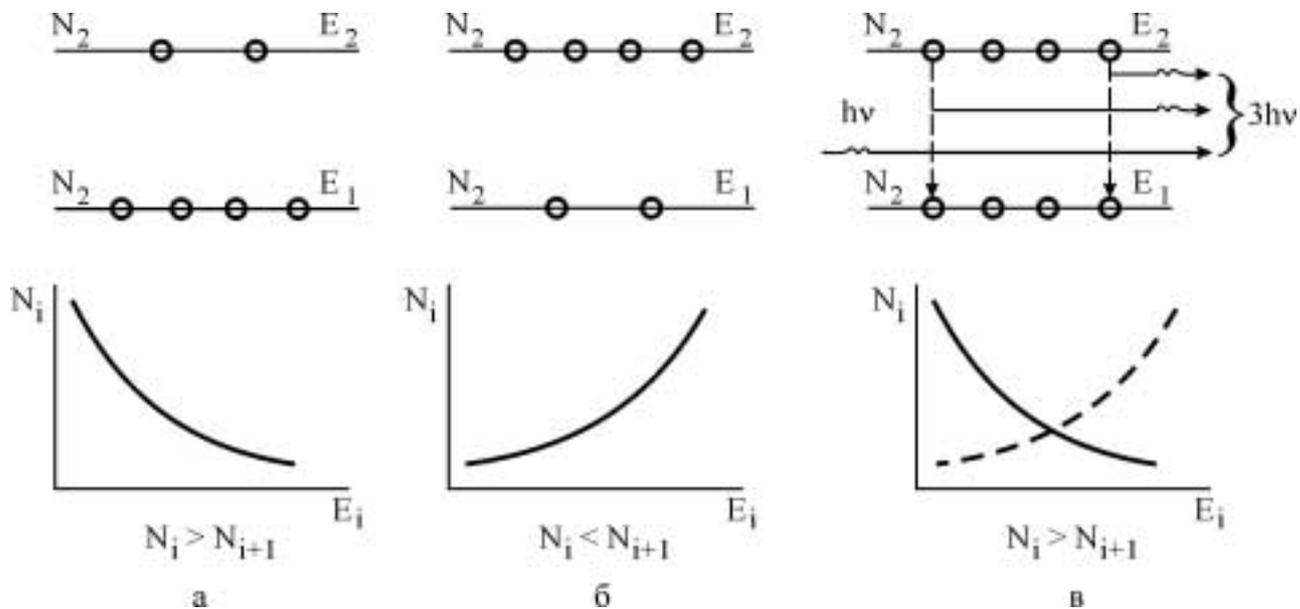


Рис. 1. Схема распределения частиц по уровням энергии

Равновесное "больцмановское" распределение (см. рис.1,а) означает, что с увеличением энергии частиц, их количество относительно общего числа уменьшается ( $N_2 < N_1$ ). Если в результате внешнего воздействия (накачки) удастся реализовать ситуацию, когда  $N_2 > N_1$ , то говорят о нарушении равновесия системы или о инверсной "анти-больцмановской" заселенности уровней (рис. 1,б).

Согласно второму закону термодинамики любая система стремиться к равновесию. При наличии какого либо внешнего возмущения (например, квант излучения  $h\nu$ ) неравновесная система с инверсной заселенностью ( $N_2 > N_1$ ) может вернуться к исходному равновесному состоянию ( $N_1 > N_2$ ). При этом каждый переход частиц с уровня  $E_2$  на уровень  $E_1$  будет сопровождаться излучением дополнительного кванта энергии в соответствии с выражением (1); в результате этого энергия, затраченная на создание инверсной заселенности, т.е. приведение системы в неравновесное состояние, выделится в виде энергии излучения, которое и называют вынужденным, или лазерным, излучением (рис. 1,в). Для того чтобы акт излучения при переходе частиц не был однократным, необходимо возобновлять инверсную заселенность уровней. Эту роль выполняют источники внешней накачки, которыми могут являться электрический разряд, химическая реакция, тепловой нагрев и т.д.

Для количественной оценки степени заселенности и, следовательно, эффективности накачки вводится понятие коэффициента усиления инверсной среды. Дело в том, что, помимо вынужденного излучения при взаимодействии кванта света со средой, возможны

процессы поглощения, а также спонтанного излучения.

Спонтанное излучение происходит самопроизвольно при переходе частиц с различных энергетических уровней ( $E_{i+1} \rightarrow E_i$ ), и эти переходы не связаны друг с другом во времени. Результатом таких переходов является излучение нагретых тел, газов, солнца, это излучение некогерентно, т.е. отдельные акты излучения не согласованы во времени, и немонохроматично, т.е. представляет собой набор электромагнитных волн различной длины.

В отличие от спонтанного излучения вынужденное, или индуцированное, излучение когерентно, поскольку вынужденные переходы происходят одновременно, и испускаемое излучение по частоте соответствует кванту, вызвавшему это излучение, т.е. оно монохроматично.

Процессы поглощения сопровождаются переходом частицы на более высокий энергетический уровень.

Генерация излучения является результатом конкуренции процессов вынужденного излучения и поглощения. Рассмотрим простейшую систему с двумя энергетическими уровнями  $i = 1, 2$  и с соответствующей заселенностью уровней  $N_1, N_2$ . На систему действует внешнее излучение с интенсивностью  $J$ . Тогда число квантов, рождающихся в процессе вынужденного излучения  $Z_{21}$ , пропорционально интенсивности  $J$  и количеству частиц на верхнем (возбужденном) уровне  $N_2$ .

$$Z_{21} = B_{21} J N_2.$$

Число квантов, поглощаемых при переходе частиц с нижнего на верхний уровень, определится

$$Z_{12} = B_{12} J N_1,$$

где  $B_{21}$  и  $B_{12}$  – вероятности актов вынужденного излучения и поглощения, соответственно соответствующее числу фотонов, поглощаемых (излучаемых) в среднем одной частицей за единицу времени при единичной плотности излучения. Очевидно, что изменение интенсивности излучения или световой энергии при прохождении через среду на пути  $dx$  будет равно разности числа квантов, излученных и поглощенных, умноженных на энергию одного кванта:

$$\frac{dJ}{dx} = (Z_{21} - Z_{12}) h\nu;$$
$$dJ = J(B_{21}N_2 - B_{12}N_1) h\nu dx.$$

Обозначив  $h\nu(B_{21}N_2 - B_{12}N_1) = K$ , можем записать:

$$dJ/J = K dx.$$

Интегрируя последнее выражение и считая, что при  $x = 0$ ,  $J = J_0$ , где  $J_0$  – начальная интенсивность излучения, получим:

$$J(x) = J_0 \exp(Kx).$$

Полученное выражение определяет изменение интенсивности излучения при прохождении его в направлении  $x$  через среду, обладающую свойствами, определяемыми коэффициентом  $K$ .

$$K = h\nu(B_{21}N_2 - B_{12}N_1). \quad (2)$$

В зависимости от заселенности уровней  $N_2 > N_1$  или  $N_2 < N_1$  коэффициент  $K$  может иметь положительное или отрицательное значение. При этом как положительное, так и отрицательное значение коэффициента поглощения  $K$  имеет реальный физический смысл (рис. 2).

В нормальных условиях при термодинамическом равновесии населенность энергетических уровней убывает по мере возрастания их энергии согласно распределению Максвелла-Больцмана, т.е.  $N_2 \ll N_1$  в этом случае коэффициент поглощения согласно (2) положителен ( $K > 0$ ). Это означает, что интенсивность света  $J = f(x)$  уменьшается за счет поглощения в веществе  $\Delta J < 0$  (см. рис. 2). Среда, в которой процессы поглощения и излучения равновероятны, характеризуется состоянием с населенностями уровней  $N_2$  и  $N_1$ , соответствующим распределению Больцмана. Коэффициент поглощения такой среды равен нулю ( $K = 0$ ). Интенсивность света при прохождении через вещество не изменяется ( $\Delta J = 0$ ). Наконец, в среде с инверсной населенностью  $N_2 \ll N_1$  вероятность вынужденного излучения значительно больше, чем вероятность поглощения. Это соответствует отрицательному коэффициенту поглощения ( $K < 0$ ) и, следовательно, увеличению интенсивности света при прохождении через вещество ( $\Delta J > 0$ ).

Обозначив коэффициент усиления  $\alpha$ , обратный коэффициенту поглощения  $\alpha = -K$ , получаем выражение Бугера для усиления света

$$J = J_0 e^{\alpha x}.$$

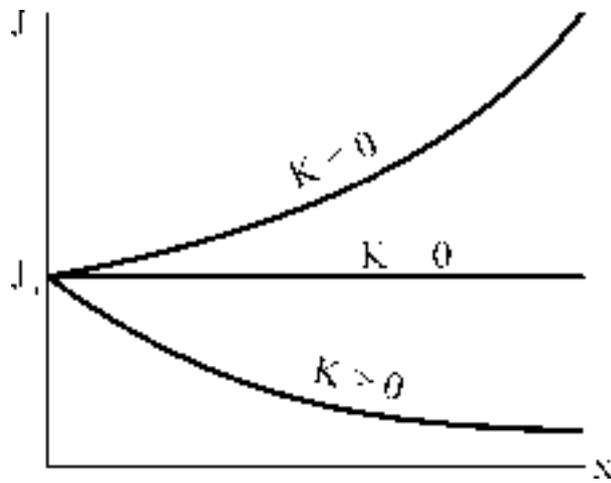


Рис. 2. Различные случаи изменения коэффициента поглощения

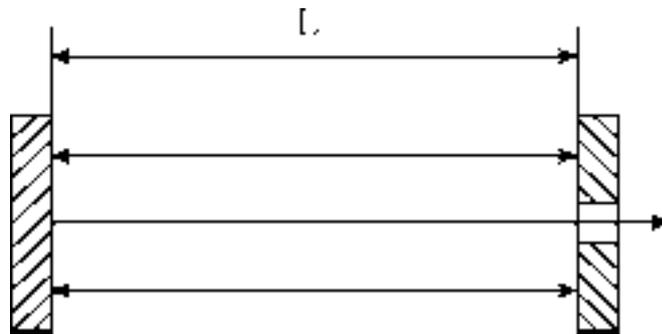


Рис.3. Принципиальная схема резонатора

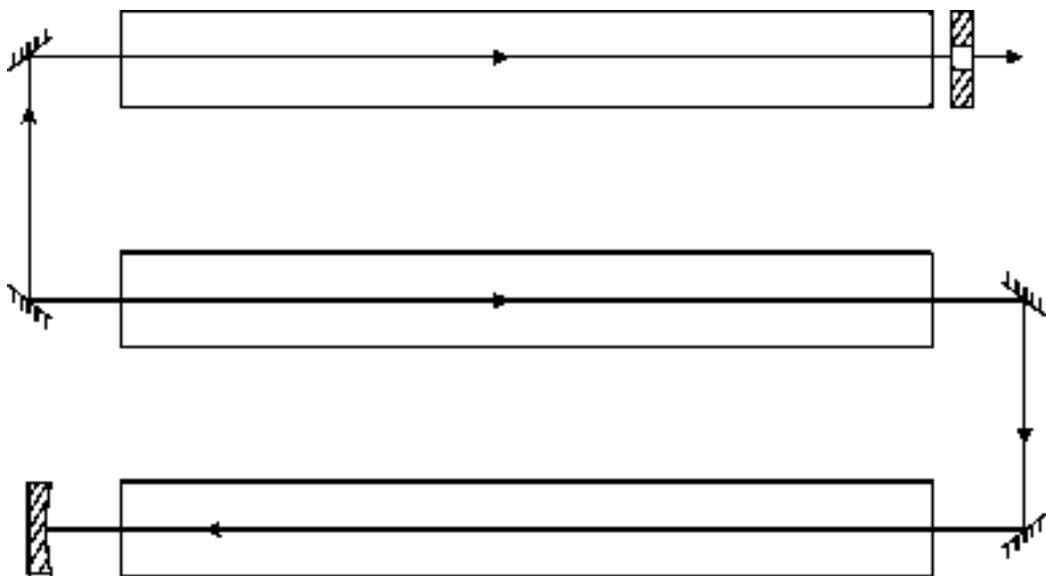


Рис. 4. Схема резонатора с увеличенной длиной активной среды

Таким образом, усиление и генерация когерентного света на основе вынужденного излучения возможны, если создать среду с инверсной населенностью.

## 1.2. Генерация лазерного излучения

Создание инверсной среды с положительным коэффициентом усиления является необходимым, но недостаточным условием генерации лазерного излучения. Переход от усиления к генерализации осуществляется, как и в радиотехнике, путем введения обратной связи. Для этого достаточно заставить пучок света многократно проходить через активную среду, что легко осуществимо с помощью системы зеркал. Если увеличение интенсивности излучения превышает неизбежные потери, то усилитель света превращается в генератор, который и называют лазером. Применяемая при этом система зеркал называется резонатором. Для возбуждения генерации обычно нет необходимости в постороннем источнике излучения генерируемой частоты, так как для этого достаточно начального уровня спонтанного излучения в самом газе.

В общем смысле резонатор является колебательной системой, в которой возможно накопление энергии колебаний, здесь - электромагнитных колебаний в оптическом диапазоне. В этом случае длина волны намного меньше размеров резонатора, что позволяет применять так называемые открытые резонаторы. Открытые резонаторы состоят из системы зеркал (в простейшем случае – два зеркала), которые не ограничены боковыми поверхностями. Существуют два основных типа резонаторов, устойчивые и неустойчивые, по характеру сохранения запаса световой энергии.

Принципиальная схема оптического резонатора представлена на рис. 3. Одно из зеркал является полностью отражающим, другое полупрозрачным, т.е. способным пропускать часть излучения.

В результате накачки в среде с инверсной населенностью образуются фотоны спонтанного излучения в самых различных направлениях. Фотоны, распространяющиеся в направлениях, несовпадающих с осью оптического резонатора, вскоре покидают полость резонатора, тогда как фотоны, двигающиеся вдоль оптической оси резонатора, отражаясь на зеркалах, могут многократно проходить через активную среду. В результате взаимодействия этой группы фотонов с возбужденными атомами возникнут новые фотоны, характеризующиеся тем же значением частоты, фазы излучения и направлением распространения. Таким образом, интенсивность излучения внутри резонатора будет нарастать до величин, определяемой усилительными свойствами среды, скоростью накачки и потерями в резонаторе.

Если приращение светового потока превышает суммарные потери в резонаторе, возникает генерация лазерного излучения, которое

покидает резонатор через зеркало, являющееся полупрозрачным или имеющее отверстие для выхода излучения.

Потери в резонаторе складывается из поглощения излучения на зеркалах, т.к. коэффициент отражения зеркал всегда менее 100 %, из-за рассеивания излучения, т.е. сама генерация, с точки зрения баланса энергии внутри резонатора, также может быть отнесена к "потерям".

Обозначив приращение светового потока как

$$\Delta J^+ = J - J_0,$$

а потери как  $\Delta J^- = a J_0$ , где  $a$  – коэффициент суммарных потерь, и учитывая, что  $J = J_0 \exp(\alpha L)$ , получим условие генерации излучения в общем виде:

$$\Delta J^+ \geq \Delta J^-$$

или

$$J_0 e^{\alpha L} - J_0 \geq a J_0;$$

$$e^{\alpha L} \geq (a+1).$$

Из этого условия следует, что для генерации излучения при определенном значении коэффициента  $a$  необходимо иметь высокий уровень усиления (коэффициент  $\alpha$ ), или увеличивать расстояние между зеркалами резонатора  $L$ .

Коэффициент усиления зависит от эффективности накачки, т.е. от совершенства процесса создания инверсной среды, а расстояния между зеркалами увеличивает за счет создания многопроходных резонаторов (рис. 4).

Применительно к твердотельным лазерам широкое распространение получил оптический метод накачки. Рассмотрим принципиальные схемы и совокупность элементов рабочего процесса в целом для типовых конструкций технологических лазеров с электроразрядным возбуждением (рис. 5). Рабочая камера 1 снабжена верхней 2 и нижней 3 системой электродов, между которыми возбуждается электрический разряд (тлеющий) от источника электропитания 4. В поперечном направлении к разряду с помощью компрессора 7 по газовому контуру 6 прокачивается рабочая смесь газов – азота, углекислого газа и гелия. В боковых стенках рабочей камеры имеются отражающие 5 и полупрозрачные 8 зеркала, образующие оптический резонатор лазера. Молекулярно-кинетические процессы, проходящие в смеси газов под действием электрического разряда, упрощенно можно представить следующим образом (рис. 6).

При соударении электронов происходит заселение верхних  $i > 0$  колебательно-возбужденных уровней азота. Верхний уровень излучающей молекулы углекислого газа является резонансным с уровнем

$i = 1$  азота, за счет чего происходит заселение возбужденных уровней  $\text{CO}_2$ . Нижний уровень  $\text{CO}_2$  расселяется за счет столкновения с атомами гелия. Таким образом поддерживается постоянная инверсная заселенность уровней  $\text{CO}_2$ , переходы с которых сопровождаются излучением квантов с длиной волны 10,6 мкм.

### 1.3. Способы накачки и принципиальная схема технологического лазера

Состояние инверсной населенности может быть получено в газах, жидкостях, в твердых телах. Поэтому по виду используемой среды генераторы лазерного излучения делятся на газовые, твердотельные, жидкостные. Индуцированное излучение может быть получено при оптических переходах между колебательно-возбужденными уровнями молекул, возбужденными уровнями атомов или ионов. В соответствии с этим генерируемое излучение будет иметь различные длины волн. Так, например, излучение лазера на углекислом газе имеет длину волны 10,6 мкм. Твердотельный лазер на иттрий-алюминиевом гранате (ИАГ) – 1,06 мкм.

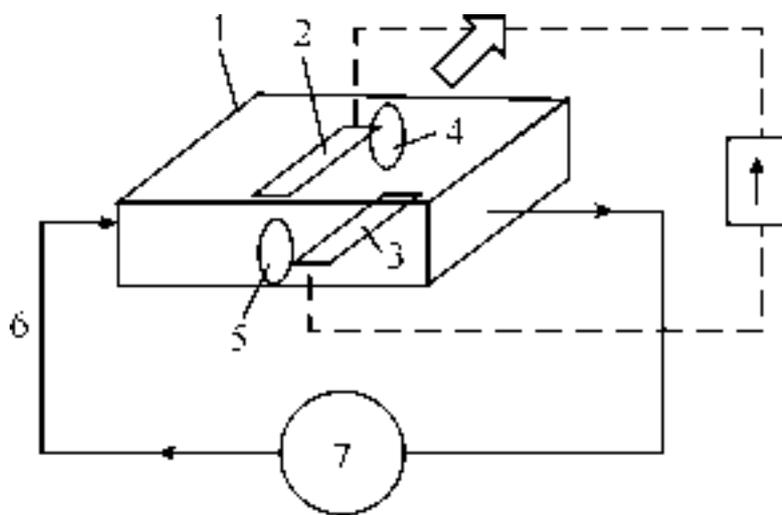


Рис. 5. Принципиальная схема прокачного  $\text{CO}_2$ -лазера с электроразрядной накачкой

Для возбуждения рабочей среды лазеров, т.е. создания инверсной населенности уровней, применяют следующие способы накачки. Наибольшее распространение для газовых лазеров получила накачка с помощью электрического разряда. В этом случае возбуждение молекул происходит за счет соударения электронов с молекулами



где  $i$  – номер колебательно-возбужденного уровня.

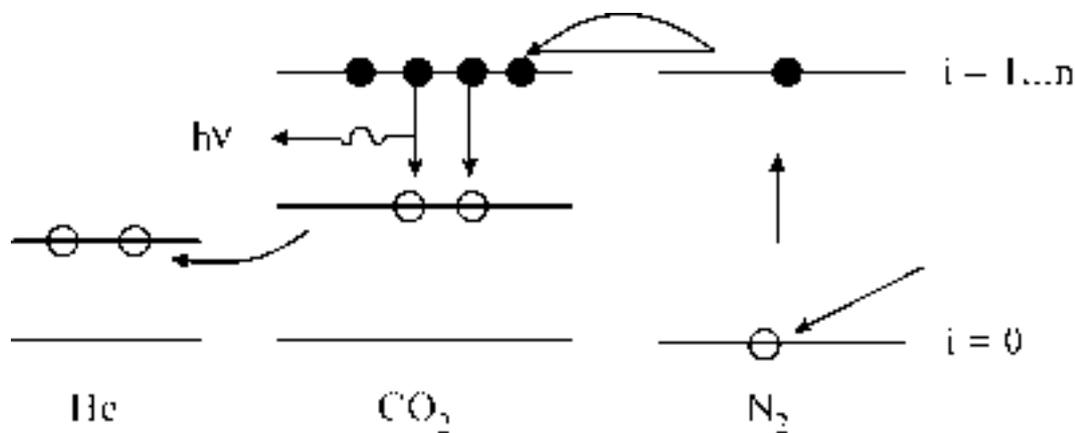


Рис. 6. Схема молекулярно-кинетических процессов в рабочем теле CO<sub>2</sub>-лазера

Тепловой метод возбуждения связан с предварительным нагревом рабочей среды и ее быстрым охлаждением при сверхзвуковом расширении газа. Такие системы получили название газодинамических лазеров. Химический способ накачки основан на колебательном возбуждении молекул, образующихся в результате химической реакции.

Поскольку описанные процессы происходят в сечении, где установлены зеркала, возникает генерация излучения, выходящего через полупрозрачное зеркало. Генерация излучения происходит при следующих характерных значениях параметров:

Ток разряда	0,1 ... 1 А
Напряжение разряда	1 – 10 кВ
Состав рабочей смеси	CO <sub>2</sub> ; N <sub>2</sub> ;He – 1:3:10
Давление в камере	5 – 20 мм рт. ст.
Скорость прокачки смеси	0 – 200 м/с.

В зависимости от режима работы лазеры делятся на непрерывные, импульсные и импульсно-периодические.

Основными характеристиками лазерного излучения с точки зрения технологических возможностей лазеров являются энергия излучения, длина волны, длительность и форма импульсов (для твердотельных лазеров), расходность пучка.

Длина волны излучения важна при выборе оптики. Газовые лазеры на CO<sub>2</sub> генерируют излучение с длиной волны 10,6 мкм, что соответствует дальнейшей инфракрасной области излучения, не видимой глазом. Твердотельные лазеры, работающие на стекле с неодимом и на ИАГ, генерирует импульсы света с длиной волны 1,06 мкм, что

соответствует ближней инфракрасной области излучения, также не видимой глазом. Рубиновые лазеры генерируют излучение с длиной волны 0,69 мкм, что соответствует красной области спектра.

Основным параметром, определяющим технологические возможности лазера, является его мощность или энергия (для импульсных лазеров). Наиболее мощными в настоящее время являются газовые лазеры на углекислом газе – существуют CO<sub>2</sub>-лазеры мощностью до 100 кВт. Обычно лазеры на CO<sub>2</sub> работают в режиме непрерывной генерации. Для твердотельных лазеров наиболее распространен импульсный режим работы (тогда их характеризуют энергией импульса), хотя некоторые из них могут работать и в непрерывном режиме. Для выбора технологии имеет значение как длительность, так и форма импульса.

Возможность передачи лазерного луча на большие расстояния и фокусировки его в минимальное пятно определяется расходимостью пучка. С расходимостью связано определение размера фокального пятна: чем меньше расходимость луча, тем в меньшее пятно он может быть сфокусирован.

## 2. Основные условия промышленного применения технологических лазеров

### 2.1. Технологические особенности лазерного излучения

Такие физические характеристики лазерного излучения, как когерентность, монохроматичность, интенсивность, обусловили его применение в различных технологических процессах тепловой и селективной обработки материалов и веществ.

Создание технологических лазеров мощностью непрерывного излучения в несколько кВт и пиковой мощностью импульсного (длительностью  $10^{-8} \dots 10^{-6}$  с излучения в сотни МВт позволяет достичь при фокусировке этого излучения интенсивностей до  $10^7$  Вт/см<sup>2</sup> в непрерывном режиме и до  $10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup> в импульсном режиме. Лазерное излучение при интенсивности  $10^4 \dots 10^7$  Вт/см<sup>2</sup> и длительности воздействия  $10^{-3} \dots 1$  с применяется для термических видов технологии (закалка, наплавка, сварка, резка, пробивка отверстий и др.). Высокая монохроматичность лазерного излучения в совокупности с высокими значениями интенсивности при кратковременности ( $10^{-9} \dots 10^{-7}$  с) импульса излучения позволяет использовать его для целей селективной технологии (лазерная химия, биология, разделение изотопов и т.п.).

При термическом воздействии лазерного излучения на поверхность металла энергия электромагнитной волны преобразуется в тепловую энергию электронов и решетки в тонком скин-слое глубиной  $10^{-6}$  см; в диэлектриках, непрозрачных для лазерного излучения, глубина поглощения также достаточно мала и может составлять  $10^{-1} \dots 10^{-4}$  см. Эта особенность лазерного излучения как поверхностного источника теплоты приводит к таким основным преимуществам лазерной обработки материалов, как высокий КПД использования энергии излучения, локальность воздействия, определяющая отсутствие деформаций изделия после лазерной обработки; отсутствие необходимости в доводочных операциях; быстрота переходов между фазовыми состояниями металла, что обуславливает повышенную износостойкость и коррозионную стойкость обработанных изделий. Когерентность лазерного излучения, возможность быстрого перемещения пучка и изменения его мощности приводят к таким преимуществам, как возможность хорошей фокусировки (обуславливающей локальность и прецизионность обработки), высокая производительность процесса (при достаточной мощности излучения) и возможность обработки любых материалов (при достаточной интенсивности сфокусированного пучка).

## 2.2 Требования к промышленным технологическим лазерам

Технологические лазеры (ТЛ) и комплексы лазерного технологического оборудования, сконструированные и выполненные с учетом требований максимальной реализации физических преимуществ лазерного излучения, а также с учетом технико-экономических требований промышленной эксплуатации, демонстрируют такие преимущества лазерной технологии, как гибкость (быстрая перестраиваемость на разные виды обработки), безотходность, малые габариты производственной линии, бесшумность, надежность и воспроизводимость обработки, возможность полной автоматизации.

Технологический лазер представляет собой устройство, предназначенное для работы в составе комплекса промышленного оборудования, производящего изделия машиностроения, приборостроения или материалы (вещества) с заданными физическими и химическими характеристиками. Поэтому ТЛ должен удовлетворять, во-первых, общим требованиям, предъявляемым к любому промышленному технологическому оборудованию; во-вторых, специфическим требованиям, предъявляемым со стороны лазерного технологического процесса или связанным с особенностями лазерного луча как рабочего инструмента.

Для выполнения этих требований ТЛ должен обладать соответствующими параметрами конструкции и рабочего тела, быть полностью автоматизированным, являться составной частью автоматизированного лазерного технологического комплекса; конструкция ТЛ и условия его эксплуатации должны обеспечивать полную безопасность в работе и удовлетворять гигиеническим, экологическим и эстетическим требованиям.

Особой группой условий промышленного применения ТЛ является технико-экономическая целесообразность использования каждого конкретного вида лазерной технологии при изготовлении определенных промышленных изделий. Этот вопрос должен всегда рассматриваться, во-первых, применительно к текущему состоянию промышленной технологии и, во-вторых, в перспективе на ближайшие пятилетки.

*Требования к параметрам лазерного излучения со стороны лазерных технологических процессов.* Основными требованиями, определяющими физическую возможность того или иного процесса лазерной обработки изделий (при термической технологии) или веществ (при селективной технологии), являются интенсивность излучения на поверхности обрабатываемого изделия (или в сечении пучка

при обработке веществ) и длительность воздействия излучения. Соответствующие величины для процессов термической лазерной обработки изделий представлены в табл. 1.1. Следующим важным требованием является средняя мощность излучения, определяющая производительность процесса, а в некоторых случаях – и его принципиальную физическую возможность (например, в случаях сварки с глубоким проплавлением). Диапазон мощностей ТЛ от 0,5 до 5 кВт в настоящее время, по экспертным оценкам, покрывает большую часть потребностей применения ТЛ в технологии машиностроения.

Требования к угловой расходимости и апертуре пучка лазерного излучения связаны с требованиями достижения необходимой интенсивности излучения при фокусировке.

Длина транспортировки излучения определяется размерами лазерного технологического поста и длинами перемещения зоны фокусировки излучения на обрабатываемом изделии. Допустимые величины нестабильностей полной мощности излучения угловой расходимости и углового положения оси пучка определяют качество процесса лазерной обработки (однородность закаленного или наплавленного слоя, однородность глубины и ширины проплавленной зоны при сварке, шероховатость реза и т.д.)

Таблица 1.1

Процесс лазерной технологии Параметр	Поверхностная термообработка	Сварка	Резка	Пробивка отверстий
Интенсивность излучения на поверхности обрабатываемого изделия, Вт/см <sup>2</sup>	0,5·10 <sup>4</sup> ... ...2·10 <sup>5</sup>	2·10 <sup>5</sup> ... ...2·10 <sup>6</sup>	2·10 <sup>6</sup> ... ...10 <sup>7</sup>	10 <sup>7</sup> ...10 <sup>8</sup>
Длительность воздействия излучения, с	10 <sup>-2</sup> ...1	10 <sup>-3</sup> ...1	10 <sup>-3</sup> ...1	10 <sup>-5</sup> ...10 <sup>-3</sup>
Диапазон средней мощности излучения, кВт	1...5	2...5	0,5...5	0,5...2
Угловая расходимость по уровню 0,86 полной мощности, мрад	2...5	1...2	0,3...1	0,5...1
Апертура пучка, мм	20...80	20...30	10...30	20...40
Длина транспортировки излучения, м	3...10	3...10	1...15	1...5

Допустимая нестабильность полной мощности, %	±3	±3	±2	± 2
Допустимая нестабильность угловой расходимости, %	± 2	±3	±2	± 2
Допустимая угловая нестабильность оси пучка, мрад	0,2	0,25	0,03	0,05
Поляризация излучения	Линейная	Круговая	Круговая	Круговая

Анализ требований к качеству лазерной обработки изделий приводит к довольно жестким значениям допустимых величин нестабильности мощности лазерного излучения в диапазоне частот  $0...10^3$  Гц. Что касается нестабильностей угловых параметров пучка, то диапазон частот нестабильностей расширяется до  $10^3...10^5$  Гц, поскольку нестабильности угловых параметров пучка на высоких частотах приводят к эквивалентному увеличению угловой расходимости излучения.

В случае процессов селективной атомно-молекулярной лазерной технологии (лазерный химический синтез, лазерная сверхтонкая химическая очистка веществ и т.п.) добавляются требования к другим параметрам лазерного излучения: монохроматичности  $\left[\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)_{\max} \leq 10^{-8}...10^{-9}\right]$ , диапазону длин волн излучения ( $\lambda=0,2...20$  мкм), длительности импульса ( $\tau_{\text{и}}=10^{-12}...10^{-7}$  с) и пиковой мощности ( $P_{\text{имп}}=10^8...10^{10}$  Вт).

*Требования к промышленной эксплуатации оборудования со стороны лазерной технологии.* Помимо общепромышленных технико-экономических и эксплуатационных требований к оборудованию для лазерных технологических операций (прежде всего к ТЛ), специфические особенности эксплуатации лазерной техники добавляют ряд особых требований. В совокупности все эти требования можно подразделить на три группы.

1. Техничко-экономические требования: независимо от вида лазерной технологии как технологический лазер, так и другие системы лазерных технологических комплексов (технологический пост, система транспортировки и фокусировки излучения, лазерный робот, САУ) должны обладать полным ресурсом работы не менее  $10^4$  ч, характеризоваться высоким средним процентом (не менее 90%) времени работы оборудования с генерацией и использованием лазерного

излучения; быть компактными, экономичными в расходовании электроэнергии, рабочих газов, жидкостей, эксплуатационных материалов и деталей; лазерный технологический комплекс должен быть полностью автоматизированным.

2. Технические требования к помещению, инженерным и энергетическим системам предприятия, на котором используется лазерный технологический комплекс: должны быть обеспечены надлежащие мощность и стабильность силовой электросети, давление, расход и качество охлаждающей воды и сжатого воздуха; должны быть в пределах нормы уровни вибрации и шума, электромагнитных наводок, а также температуры, влажности и запыленности воздуха. Конкретные значения всех этих норм зависят от типа, модели и исполнения ТЛ и технологического комплекса, так как в последнее время наметилась тенденция к созданию максимально самообеспеченных конструкций (с автономными замкнутыми системами охлаждения и газообеспечения, активными фильтрами, фильтрами газов и жидкостей, защитой оптических элементов и т. п.).

3. Требования обеспечения санитарно-гигиенической и экологической безопасности эксплуатации лазерного оборудования. Эти требования имеют не только социально-экономический, но и юридический характер; они определяются официальными государственными "Санитарными нормами и правилами устройства и эксплуатации лазеров".

*Требования экономики изготовления ТЛ* включают: модульность конструкции ТЛ; максимальное использование готовых промышленно выпускаемых комплектующих узлов и изделий; унификацию и стандартизацию ТЛ и его комплектующих; использование недорогих и недифицитных материалов в конструкции ТЛ; высокий уровень конструкторской проработки ТЛ, заключающийся в минимальном числе отдельных блоков, в максимальном обеспечении ТЛ необходимыми в эксплуатации механическими, оптическими и электронными аксессуарами, в оптимальном сопряжении ТЛ с остальными частями автоматизированного лазерного технологического комплекса и в разумном соотношении универсализации и специализации ТЛ. Поскольку размер амортизационных отчислений составляет около половины стоимости 1 кВт·ч лазерной энергии, экономичность изготовления ТЛ является одним из принципиальных факторов, определяющих перспективность промышленного внедрения лазерной технологии.

Все изложенное определяет в совокупности понятие "промышленный ТЛ". К промышленным лазерам предъявляют следующие

требования:

1. Необходимые параметры: уровень мощности, качество и стабильность излучения – в зависимости от вида лазерной технологии, для которой данный ТЛ предназначен.

2. Экономичности эксплуатации и изготовления, отражающихся в минимальной стоимости кВт·ч энергии излучения, на величинах общего и межремонтного ресурса и надежности.

3. Управляемость системой автоматического управления мощностью и пространственным положением пучка, а также основными внутренними параметрами ТЛ.

4. ТЛ должен быть схемной и конструктивной составной частью АЛТК.

5. Безопасность в эксплуатации, высокий уровень гигиеничности и дизайна.

6. Наличие промышленного выпуска ТЛ и его комплектующих.

### **2.3 Автоматизированные лазерные технологические комплексы**

Лазерный технологический комплекс предназначен для выполнения операций лазерной обработки изделий

Оборудование для лазерной обработки вообще и для сварки в частности включает в себя следующие основные элементы: 1) технологический лазер; 2) систему отклонения и фокусировки луча; 3) систему наблюдения; 4) оснастку для крепления и перемещения детали; 5) средства контроля за параметрами процесса.

Все эти элементы входят в состав *лазерной технологической установки* (рис. 7).

Основным элементом оборудования является *технологический лазер*, отличающийся надежностью и простотой эксплуатации в жестких условиях производства, а также имеющий высокий ресурс работы и воспроизводимость параметров излучения. Устройство и принципы работы технологических лазеров подробно рассмотрены в учебном пособии В.С. Голубева и Ф.В. Лебедева "Инженерные основы создания технологических лазеров" (М.: Высшая школа, 1987), а также в монографиях.

Выбор типа лазера для осуществления той или иной сварочной операции должен осуществляться с учетом следующих положений и рекомендаций:

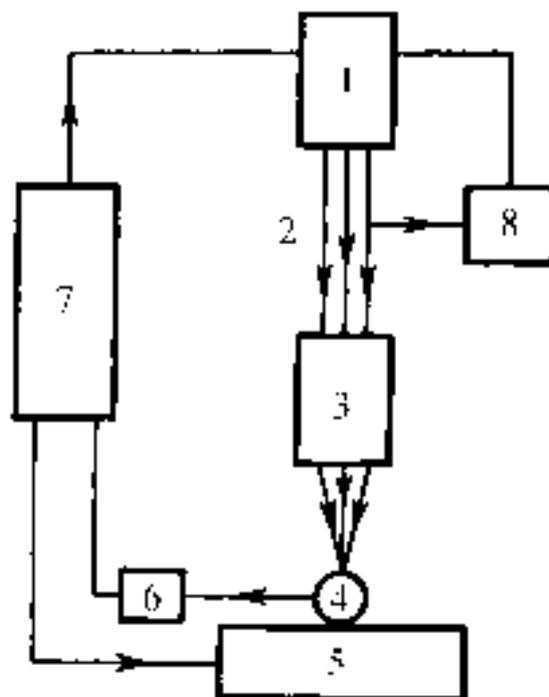
1) на основании чертежа детали и технического задания на ее изготовление определить технологические операции, при выполнении которых потребуется лазер;

2) установить требуемую глубину проплавления и ширину шва; учесть при этом состав свариваемого материала;

3) оценить масштабы производства, его тип и требуемую производительность;

4) определить возможности предприятия по затратам на приобретение и эксплуатацию того или иного типа лазера;

5) рассчитать экономическую эффективность от применения лазерной сварки; (или веществ) как автономно, так и в составе более общего комплекса оборудования.

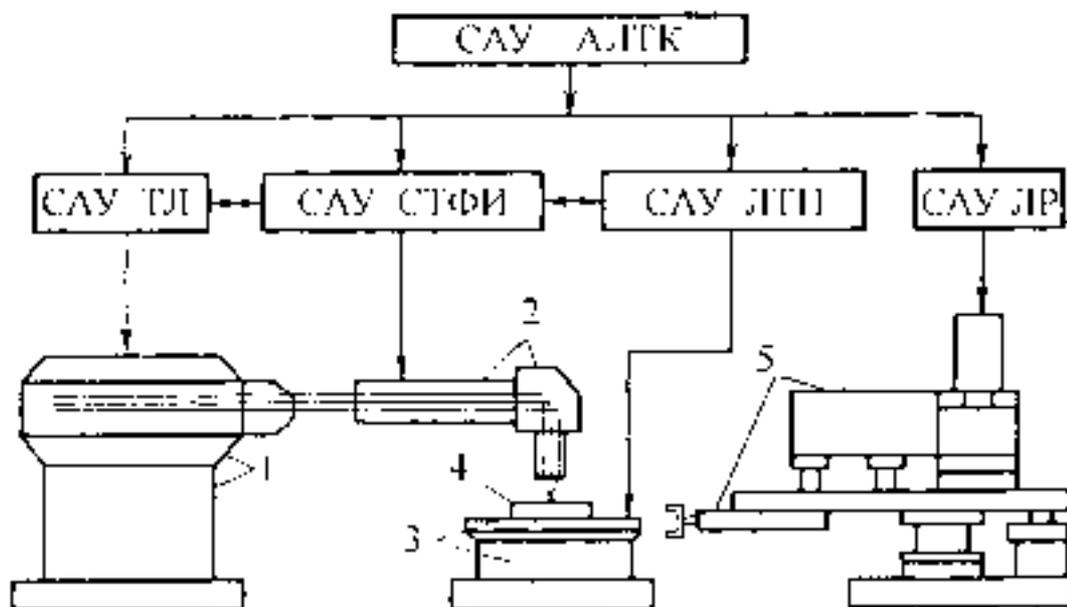


*Рис. 7. Структурная схема лазерной технологической установки:*

1 – технологический лазер; 2 – лазерное излучение; 3 – оптическая система; 4 – обрабатываемая деталь; 5 – устройство для закрепления и перемещения детали; 6 – датчики параметров технологического процесса; 7 – программное устройство; 8 – датчики параметров излучения

Для реализации таких преимуществ лазерной технологии, как высокие скорости, прецизионность, локальность обработки, а также для обеспечения требований безопасности в работе, безаварийности, высокого ресурса, минимума обслуживающего персонала, лазерный технологический комплекс (АЛТК) должен быть полностью автоматизирован, а в случае его использования в составе более общего комплекса оборудования также роботизирован. В состав АЛТК входят основные системы (см. рис. 8): 1 – технологический лазер (ТЛ), 2 – система транспортировки и фокусировки излучения (СТФИ), 3 – лазерный технологический пост (ЛТП), 4 – обрабатываемое изделие, 5 – лазерный робот. Лазерный технологический пост должен осуществлять относительные перемещения образца и пучка, подачу вспомогательных газов. При наличии робота в составе АЛТК в его функции входит, кроме возможного манипулирования обрабатываемым образцом, снятие заготовки с конвейера, установка ее в манипулятор, снятие изделия с манипулятора и передача на конвейер. Система ав-

томатического управления (САУ) АЛТК предназначена для программного или адаптивного управления всеми его системами и включает ЭВМ верхнего уровня, управляющую системами автоматического управления технологическим лазером (ТЛ), транспортировки и фокусировки излучения (СТФИ), лазерным технологическим постом (ЛТП) и лазерным роботом, и соответствующие устройства связи.



*Рис.8 Схема автоматизированного лазерного технологического комплекса (АЛТК)*

АЛТК для задач селективной лазерной технологии по своим задачам и составу относится к химико-технологическим промышленным автоматизированным комплексам. В их состав входит ТЛ, СТФИ, САУ и вместо ЛТП – химический реактор с системой прокачки и сбора вещества.

Общепромышленные эксплуатационно-экономические требования к АЛТК исходят из условий конкурентоспособности и экономической целесообразности лазерной технологии в промышленном производстве. АЛТК должны быть так же надежны, как обычное механическое металлообрабатывающее оборудование, но в то же время — более гибкие по ассортименту деталей, обрабатываемых на одном базовом ЛТП и ТЛ.

Опыт внедрения лазерных технологических процессов на промышленных предприятиях показал целесообразность комплексного подхода к разработке (или выбору) собственно лазерного (ТЛ, СТФИ) и вспомогательного (ЛТП, робот) технологического оборудования АЛТК.

## 2.4. Экономические аспекты и перспективы промышленного применения технологических лазеров

Основным показателем, определяющим экономическую целесообразность затрат на создание и внедрение технологических лазеров и АЛТК, является годовой экономический эффект. Он представляет собой суммарную экономию всех производственных затрат (живого труда, материалов, капиталовложений), которую получает народное хозяйство в результате производства и использования АЛТК. Определение годового экономического эффекта основывается на сопоставлении приведенных затрат по базовой технике, учитывающих прежде всего стоимость 1 машинного часа эксплуатации оборудования, и вновь применяемых АЛТК. При определении годового экономического эффекта должна быть обеспечена сопоставимость сравниваемых вариантов базовой и новой техники по объему производимой продукции, качественным параметрам, фактору времени, социальным факторам производства и использования продукции (престижность профессии, эстетичность оборудования, отсутствие загрязнения окружающей среды).

Годовой экономический эффект от внедрения АЛТК должен оцениваться с учетом всех основных преимуществ лазерной; обработки с применением АЛТК.

В эксплуатационных расходах АЛТК доля затрат на амортизационные отчисления и на расходующиеся материалы составляет около 70%, что указывает основное направление работ по снижению этих затрат - удешевление изготовления и эксплуатации технологических лазеров за счет применения прогрессивных решений в конструкции и материалах ответственных узлов, широкой стандартизации и унификации ТЛ и комплектующих их изделий.

При внедрении технологических лазеров в электронной и приборостроительной промышленности был решен широкий круг задач, (подгонка резисторов, пробивка отверстий, сварка корпусов микросхем, балансировка, скрайбирование и многое другое). Здесь был продемонстрирован настолько существенный экономический эффект, что большая доля всех операций по изготовлению многих изделий была переведена на лазерную технологию.

Имеющийся опыт создания и внедрения технологических лазеров в промышленность показывает, что необходимо постоянное и глубокое сравнительное изучение процессов, оборудования и экономики лазерной и конкурирующих с ней промышленных технологий. Наиболее перспективно внедрение ТЛ в отрасли, где требуется высо-

кокачественная обработка дорогостоящих изделий (приборостроение, электроника, прецизионное и уникальное машиностроение). Целесообразно внедрение лазерной обработки крупносерийных изделий на крупных машиностроительных предприятиях, а также выполнение мало серийных заказов для опытно-экспериментальных предприятий. АЛТК необходимо рассматривать как составную часть более общих роботизированных автоматизированных комплексов машиностроительного и приборостроительного оборудования.

Причины быстрого увеличения производства ТЛ в развитых странах состоят в следующем: во-первых, лазерная технология позволяет резко снизить применение дорогостоящих материалов при изготовлении изделий прецизионного машиностроения и приборостроения; во-вторых, современное быстрое развитие техники требует налаживания быстрого выпуска экспериментальных партий изделий с помощью гибкоперестраиваемых АЛТК, которые по гибкости перестройки значительно превосходят металлорежущее оборудование; в-третьих, современные АЛТК достигли такого технического уровня, что по надежности они превосходят обычные металлорежущие станки (простой на ремонт и наладку занимают не более 2...5% времени). АЛТК укомплектованы полным набором вспомогательной оснастки и обеспечены полным послепродажным сервисом фирмы-изготовителя, включая обучение обслуживающего персонала. Поэтому АЛТК постоянно находят хороший сбыт, хотя цена лазерного оборудования велика из-за его высокой потребительной стоимости. Однако совершенствование технологии производства ТЛ и переход к их серийному выпуску приводит к снижению их стоимости, что способствует росту сбыта и производства ТЛ и АЛТК.

Конструкции и характеристики ТЛ и АЛТК будут продолжать улучшаться, стоимость 1 кВт·ч лазерной энергии снижаться за счет применения прогрессивных компоновочных решений, новых материалов с высоким ресурсом работы, новых методов накачки, использования полной автоматизации ТЛ и АЛТК на базе микропроцессорной техники.

Ожидается создание и внедрение промышленных ТЛ повышенной (свыше 5 кВт) мощности для решения таких задач термической лазерной технологии, как лазерная термообработка в энергетических отраслях промышленности (борьба с коррозией и износом материалов в больших масштабах, лазерная сварка толстостенных конструкций и т.п.). Одновременно ожидается широкое промышленное применение импульсно-периодических ТЛ в задачах атомно-молекулярной лазерной технологии (лазерный химический синтез, сверх-

тонкая очистка веществ, лазерное изготовление пленочных структур в микротехнологии).

В перспективе (до 2000 г.) предполагается рост использования ТЛ в обработке материалов в объеме до 10...15% общей стоимости продукции машиностроения и приборостроения развитых стран.

## **2.5. Основные требования по обеспечению безопасности при работе с технологическими лазерами**

Технологический лазер является источником нескольких видов опасности, главным из которых является его излучение. Поэтому при разработке и эксплуатации ТЛ и лазерных технологических комплексов необходимо выполнять "Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров".

Правила являются обязательными при проектировании, строительстве, эксплуатации и реконструкции предприятий, цехов, участков, предназначенных для работ с применением лазеров.

Правила отмечают, что в зависимости от конструкции лазера и условий его эксплуатации на обслуживающий персонал могут воздействовать следующие опасные и вредные производственные факторы: лазерное излучение (прямое, рассеянное, отраженное); световое излучение от импульсных ламп накачки и зоны взаимодействия лазерного излучения с материалами мишени; ультрафиолетовое излучение от ламп накачки или кварцевых газоразрядных трубок; шум и вибрация, возникающие при работе лазера; ионизирующее излучение; высокое напряжение в электрической цепи питания ламп накачки или газового разряда; электромагнитные поля ВЧ- и СВЧ-диапазона от генераторов накачки; инфракрасное излучение и тепловыделения от оборудования и нагретых поверхностей; запыленность и загазованность воздуха рабочей зоны продуктами взаимодействия лазерного луча с мишенью; агрессивные и токсические вещества, используемые в конструкции лазера.

Все перечисленные вредные факторы, за исключением лазерного излучения, рассматриваются в соответствующих нормативных документах, регламентирующих правила техники безопасности и промышленной санитарии при работе с общепромышленным оборудованием; эти правила полностью распространяются на лазерное оборудование.

Биологические эффекты воздействия лазерного излучения (ЛИ) на организм (прежде всего на кожу и глаза) зависят от энергетической экспозиции облучения, длины волны ЛИ, времени воздействия и площади облучаемого участка, от частоты повторения и длитель-

ности импульсов.

За предельно допустимые уровни лазерного излучения (ПДУ) принимаются энергетические экспозиции (в Дж/см<sup>2</sup>) облучаемых тканей.

ПДУ лазерного излучения относятся к спектральному диапазону от 0,2 до 20 мкм и регламентируются для роговицы, сетчатки глаза и кожи.

При непрерывной лазерном излучении ПДУ установлены в зависимости от длины волны ЛИ:

1) для ультрафиолетовой области спектра ( $\lambda = 0,2... 0,4$  мкм) нормируется энергетическая экспозиция ( $H_{y\phi}$ ) на роговице глаза и коже за общее время облучения в течение рабочего дня. "Правила" приводят таблицу для  $H_{y\phi}$  в зависимости от  $\lambda$ ; для оценок можно пользоваться формулой

$$\lg[H_{y\phi}] \leq -14,2 + 31\lambda;$$

2) для видимой ( $\lambda = 0,4...0,75$  мкм) и ближней ИК-области спектра ( $\lambda = 0,75...1,4$  мкм) ПДУ, не вызывающие первичных биологических эффектов ( $H_n$ ), регламентируются для роговиц глаза и определяются по формуле

$$H_n = H_1 \cdot k_1,$$

где  $H_1$  – энергетическая экспозиция на роговице глаза в зависимости от длительности воздействия  $\tau$  и углового размера  $\theta$  источника излучения при максимальном диаметре зрачка глаза;  $k_1$  – поправочный коэффициент на длину волны лазерного излучения и диаметр зрачка глаза.

Для  $\theta = 1...5$  мрад можно пользоваться оценочной формулой

$$\lg H_1 \cong -3 + 0,251 \lg[\tau].$$

Для максимального диаметра зрачка (0,8 мм) величину  $k_1$  можно принять равной:

$$k_1 \cong 1 \text{ при } 0,4 < \lambda < 1 \text{ мкм,}$$

$$\lg k_1 \cong -2,54 + 2,5\lambda \text{ (мкм) при } 1 < \lambda < 1,4 \text{ мкм;}$$

3) для дальней ИК-области спектра ( $9,3 < \lambda < 20$  мкм) ПДУ лазерного излучения ( $H$ ) на роговице глаза и коже можно оценить по формуле

$$\lg H = -0,55 + 0,57 \lg[\tau] + 0,01(\lg \tau)^2.$$

В диапазоне  $\tau = 10^{-4} \dots 1$  с можно приближенно полагать

$$H \cong 0,2\sqrt{\tau}.$$

*Классификация лазеров по степени опасности генерируемого ими излучения.* Лазеры по степени опасности генерируемого ими излучения подразделяются на четыре класса: I класс – выходное излучение лазера не представляет опасности для глаз и кожи; II класс – выходное излучение представляет опасность при облучении глаз прямым или зеркально отражённым излучением; III класс – выходное излучение представляет опасность при облучении глаз прямым, зеркально отраженным, а также диффузно отраженным излучением на расстоянии 10 см от диффузно отражающей поверхности и (или) при облучении кожи прямым и зеркально отраженным излучением; IV класс – выходное излучение представляет опасность при облучений кожи диффузно отраженным излучением на расстоянии 10 см от диффузно отражающей поверхности.

Для лазеров II...IV классов и лазерных установок, в состав которых входят лазеры этих классов, определение уровней облучения персонала должно проводиться периодически, не реже одного раза в год в порядке текущего санитарного надзора.

*Требования к устройству и эксплуатации лазеров.* В паспорте и технических данных на лазер должны быть указаны следующие параметры излучения: длина волны; мощность (энергия); длительность импульса; частота повторения импульсов; начальный диаметр и расходимость пучка; класс лазера по первичным и вторичным биологическим эффектам.

Лазеры III...IV классов, генерирующие излучение в видимом диапазоне, и лазеры II...IV классов с генерацией в ультрафиолетовом и инфракрасном диапазонах должны снабжаться сигнальными устройствами, работающими с момента начала генерации и до ее окончания.

Лазеры IV класса должны снабжаться ключевым тумблером. Конструкция лазеров IV класса должна обеспечивать возможность дистанционного управления.

Все системы наблюдения и средства коллективной и индивидуальной защиты (очки, маски) должны обеспечивать снижение интенсивности лазерного излучения до ПДУ.

Лазеры должны быть маркированы знаком лазерной опасности в соответствии с ГОСТом (рис.9).

Для кратковременного перекрытия прямого лазерного излучения, а также для ограничения его распространения за пределы области обрабатываемой детали (материала) лазеры III...IV классов должны снабжаться экранами (заслонками), изготовленными из огнестойкого, неплавящегося светопоглощающего материала, препятствующими распространению излучения. Лазеры II...IV классов до начала их эксплуатации должны быть приняты комиссией, назначенной администрацией учреждения с обязательным включением в ее состав представителя Госсаннадзора.



Рис. 9. Знак  
"Лазерная опасность"  
(ГОСТ 12.4.026)

*Требования к производственным помещениям, размещению оборудования и организации рабочих мест.* Лазеры IV класса должны размещаться в отдельных помещениях.

Внутренняя отделка стен и потолка помещений должна иметь матовую поверхность. Для лазеров III...IV классов двери помещений должны быть оборудованы внутренними замками, табло "Посторонним вход воспрещен" и знаком лазерной опасности (для лазеров II...IV классов).

В технологических процессах должны применяться лазерные установки закрытого типа.

**Запрещается:** проводить визуальную юстировку и наблюдение лазеров II...IV классов без необходимых средств защиты (глаз, кожи); в момент генерации излучения осуществлять визуальный контроль попадания луча в мишень (III...IV класс), направлять излучение лазера на человека; обслуживать лазеры III...IV классов одним человеком; находиться в зоне наблюдения лицам, не связанным с настройкой, испытанием и эксплуатацией лазеров; размещать в зоне лазерного луча предметы, вызывающие его зеркальное отражение, если это не связано с производственной необходимостью.

При использовании лазеров II...III классов в целях исключения облучения персонала необходимо либо ограждение лазерно-опасной зоны, либо экранирование пучка излучения. Экраны и ограждения должны изготавливаться из материалов с наименьшим коэффициентом отражения на длине волны генерации лазера, быть огнестойкими и не выделять токсических веществ при воздействии на них лазерного излучения.

## 3. Схемы и конструкции технологических лазеров

### 3.1. Введение

К настоящему времени получили достаточно широкое промышленное применение в основном два класса технологических лазеров:

технологические лазеры с оптической накачкой на твердых кристаллах (ЛИГ: Nd и др.);

газоразрядные технологические лазеры на  $\text{CO}_2$  с диффузионным (ЛДО) или с конвективным (БПЛ) охлаждением рабочей смеси.

ТЛ этих классов в наибольшей степени удовлетворяют в совокупности требованиям лазерной технологии и условий промышленной эксплуатации прежде всего по уровню мощности излучения, оптического качества лазерного пучка, ресурсу работы, экономичности изготовления и эксплуатации. Твердотельные ТЛ широко применяются в процессах термической технологии обработки изделий приборостроения и микроэлектроники. Газоразрядные  $\text{CO}_2$ -ТЛ наряду с традиционным применением в приборостроении начинают все шире применяться (при больших мощностях) в термических процессах (резка, сварка, закалка, наплавка) изготовления изделий машиностроения. Промышленный ТЛ включает в свой состав следующие узлы (системы).

1. Активный элемент, предназначенный для обеспечения процесса генерации, инверсно заселенной лазерной средой с высоким КПД генерации излучения. В твердотельном ТЛ активный элемент представляет собой "кван-трон", включающий в свой состав рабочее тело кристалл), лампу накачки и отражатель (концентратор излучения лампы накачки). В газоразрядном ТЛ активный элемент представляет собой газоразрядную камеру (ГРК) с рабочим газом (рабочей смесью). Для обеспечения постоянства состава и давления рабочего газа ТЛ этого класса должен иметь систему газообеспечения.

2. Источник электропитания (ИЭП) активного элемента.

3. Систему охлаждения, которая должна обеспечивать оптимальную температуру активной среды и достаточно низкую температуру узлов конструкции ТЛ, гарантирующую большой ресурс его работы. В ГРЛ система охлаждения рабочего газа имеет прокачное средство (вентилятор или компрессор).

4. Оптический резонатор с устройством вывода излучения. Оптический резонатор должен обеспечивать высокие значения энергетической эффективности генерации излучения и оптического качества

ва лазерного пучка.

5. Систему транспортировки и фокусировки излучения (СТФИ).

6. Систему автоматического управления (САУ) ТЛ. Она является подсистемой системы управления автоматизированного ЛТК и предназначена: для обеспечения автоматического вывода ТЛ на заданный режим генерации излучения; обеспечения безаварийности и безопасности функционирования ТЛ; активной стабилизации параметров лазерного излучения и внутренних технологических параметров ТЛ; управления временным ходом мощности лазерного излучения, необходимым для выполнения процесса лазерной обработки изделий в АЛТК.

Конструктивно ТЛ может быть исполнен как в виде моноблока, включающего в себя все перечисленные узлы (системы), так и в виде отдельного блока генерации излучения (включающего в себя активный элемент, оптический резонатор и систему охлаждения) и различных агрегатных блоков, блоков питания и управления.

Операция подготовки ТЛ к включению и выводу его на рабочий режим в твердотельных ТЛ состоит в последовательном включении систем охлаждения и термостабилизации, электропитания и управления. В случае ГРЛ эта операция усложняется и включает следующие этапы:

1. Подготовка установки к включению, т.е. проверка выполнения мер безопасности, наличия юстировки резонатора, проверка и включение систем охлаждения, газообмена, электропитания и управления.

2. Откачка газовакуумного контура лазера, наполнение контура рабочей смесью.

3. Последовательное включение блоков термостабилизации, автоматов системы силового электропитания, прокачного средства, насосов для прокачки хладагентов.

4. Закрывание затвора котировочного лазера и затвора резонатора.

5. Включение первичной цепи ИЭП, выпрямителя предыонизатора, высокого напряжения ИЭП.

6. Выведение величины тока основного разряда на нужный режим.

7. Открывание затвора резонатора, контроль мощности лазерного излучения; в случае необходимости, подъюстировка резонатора по показателям измерителя мощности и регулировки мощности лазерного излучения (варьированием тока источника электропитания).

8. Проверка и протоколирование параметров ТЛ в рабочем режиме. Современные ТЛ обеспечиваются микропроцессорными сис-

темами автоматического управления, выполняющими всю процедуру подготовки, включения и вывода ТЛ на режим генерации.

Рассмотрим общие особенности устройства твердотельных и газоразрядных (на  $\text{CO}_2$ ) технологических лазеров; дополнительно остановимся отдельно на техническом описании тех отечественных моделей ТЛ, промышленный выпуск которых освоен или запланирован, а также коротко ознакомимся с конструкциями и характеристиками некоторых зарубежных промышленных моделей газоразрядных ТЛ.

### 3.2. Твердотельные ТЛ

Основным видом твердотельных ТЛ, выпускаемых предприятиями промышленности, являются лазеры на АИГ:Nd или на стекле с Nd. На основе унифицированного ряда этих лазеров электронной промышленностью налажен серийный выпуск лазерных технологических установок серии "Квант" для операций термической лазерной технологии (ЛТ) в электронике (пробивка отверстий, резка, сварка, термоупрочнение, скрайбирование, подгонка резисторов и др.), а также перспективных видов ЛТ (маркировка, анализ сверхчистых веществ, УФ- и рентгенолитография, лазерный отжиг).

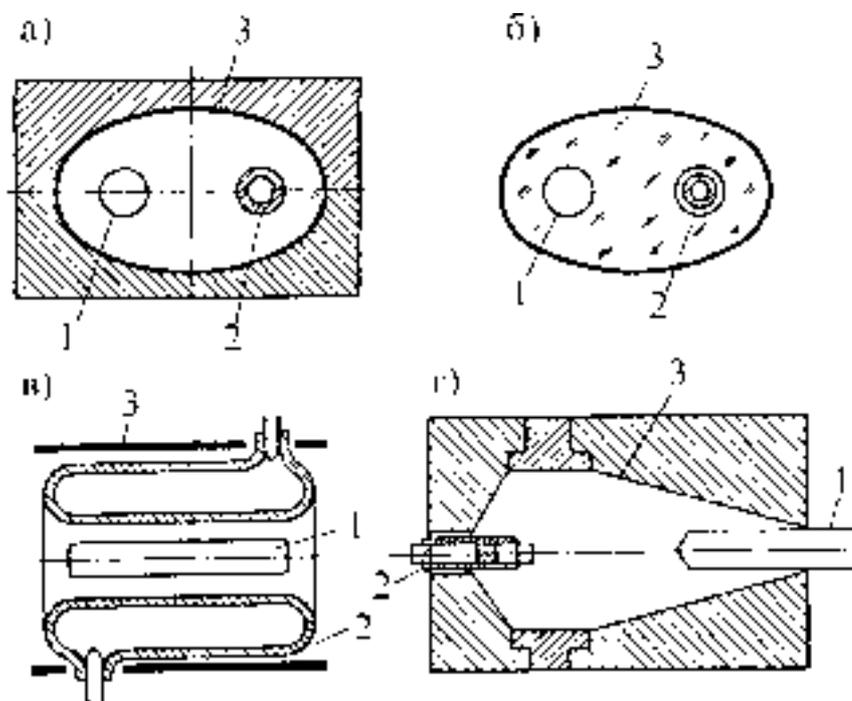


Рис. 10. Схемы устройства излучателей твердотельного лазера:

*а, б* – с отражателем (Д) в виде эллиптического цилиндра с размещением активного элемента (1) и импульсной лампы (2) вдоль фокальных осей; *в* – с полостной лампой (2), размещаемой внутри цилиндрического отражателя (3), вдоль оси лампы размещается активный элемент (1); *г* – с отражателем в виде двух конусов (3), активный элемент (1) и лампа (2) размещаются вдоль общей оси конусов

Возможны различные режимы генерации лазеров на АИГ :Nd. При непрерывной накачке в режимах свободной генерации и с модуляцией добротности – при частотах  $10^3 \dots 5 \cdot 10^4$ ;  $10^5 \dots 10^6$  и  $10^8 \dots 10^9$  Гц; при импульсной накачке как в режиме свободной генерации, так и в режиме модуляции добротности – с частотами повторения  $0,1 \dots 500$  Гц.

**Излучатели твердотельных лазеров.** Излучатель включает в себя следующие узлы: активный элемент 1; осветительную систему 2; отражатель 3 (рис. 10, а–в).

Активный элемент (кристалл, стержень) состоит из стекла или АИГ, с присадкой ионов Nd (длина генерации  $\lambda = 1,06$  мкм).

Особенности активных элементов из стекла с Nd: высокая оптическая однородность, низкая угловая расходимость излучения (диаметр пятна фокусировки достигает  $5 \dots 20$  мкм). Возможны большие размеры стержня ( $\ell = 260$ ,  $D = 10 \dots 15$  мм) и соответственно увеличенная энергия генерации в импульсе (до 10 Дж), ресурс – до  $10^6$  вспышек. Недостатком этого материала является сравнительно низкая теплопроводность, что не позволяет получать высокие средние мощности в режиме повторяющихся импульсов (частотой  $\sim 1$  Гц).

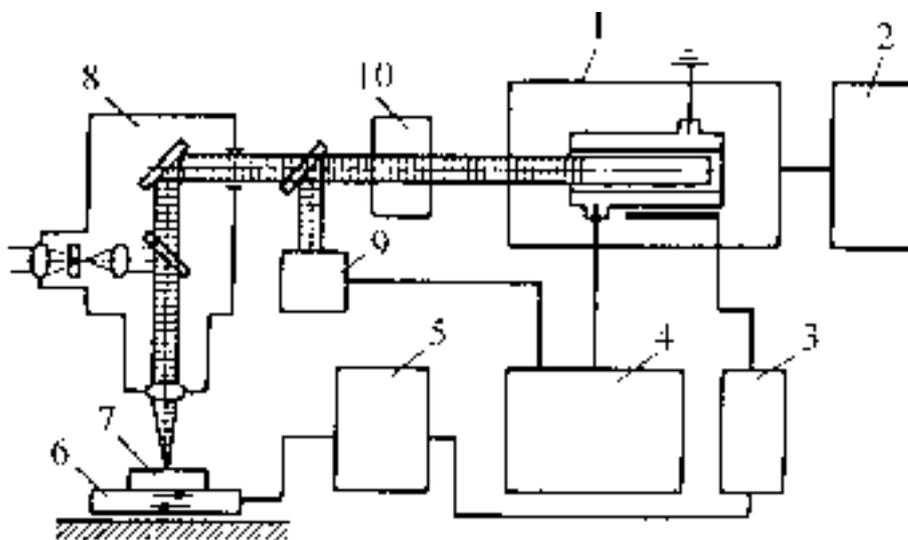
Особенности активных элементов из АИГ: Nd: повышенный КПД (до  $1,5 \dots 2\%$ ); выше срок службы элемента, ниже уровни накачки, меньше габариты; более высокая, чем у стекла, теплопроводность, ниже коэффициент термического расширения, выше механическая прочность и температурная стабильность, возможны частоты повторения импульсов до 10 Гц при средней мощности до 100 Вт, возможен непрерывный режим генерации при средней мощности до 100 Вт; возможен режим модулированной добротности (при частоте повторения до 40 кГц). Недостатком этого материала является его более высокая стоимость по сравнению со стеклом.

**Осветительная система.** Наиболее распространена осветительная система с одной прямой лампой накачки и цилиндрическим отражателем (кругового или эллиптического сечения, см. рис. 10, а, б); используются также симметричный кольцевой электроразрядный осветитель (рис. 10, в) и конические отражатели (рис. 10, г). Однако оптимальной оказалась конструкция осветителя в виде стеклянного или кварцевого блока эллиптического сечения (рис. 10, а, б), его отражающая поверхность покрывается слоем серебра.

**Лампы накачки.** Как для непрерывных, так и для импульсных ТЛ применяются дуговые криптоновые лампы, например в ЛТУ "Квант-10" используются лампы ИФП-5000, в ЛТУ типа "Квант-11" – ИФП-800.

**Оптический резонатор.** Минимальную угловую расходимость  $\theta$  обеспечивают плоские зеркала (параллельность  $10''$ ). С увеличением длины резонатора  $l$  угол  $\theta$  уменьшается: при  $l = 500$  мм угловая расходимость  $\theta$  (АИГ)  $= 5...30$ ,  $\theta$  (стекло)  $= 1...10^{-1}$ . Использование резонатора с вогнутыми зеркалами приводит к увеличению  $\theta$ , но при этом растет и КПД лазера (так как увеличивается добротность неаксиальных мод колебаний). Увеличение коэффициента отражения  $R_{от}$  и ресурса зеркал достигается применением многослойных интерференционных покрытий. Применение вращающихся зеркал эксцентрично оси луча позволяет использовать всю площадь зеркала 6...10 раз и увеличивает срок службы зеркала до 5000 ч.

**Оптические системы твердотельных ЛТУ.** Оптические системы выполняют следующие функции: передают энергию лазерного излучения к месту обработки, регулируют параметры излучения, формируют пучки с высокой плотностью мощности, наводят излучение на обрабатываемую точку, контролируют процесс обработки материала. Изменение направления пучка производят призмами полного внутреннего отражения или интерференционными зеркалами. Защиту объектива от паров, капель, плазмы, аэрозолей осуществляют с помощью прозрачной движущейся ленты, струи воздуха, электромагнитных полей и т.д.



*Рис. 11. Структурная блок-схема лазерной технологической установки с твердотельным ТЛ:*

*1 – излучатель; 2 – система охлаждения; 3 – блок поджига лампы; 4 – источник питания; 5 – программирующее устройство; 6 – предметный (рабочий) стол; 7 – обрабатываемый образец; 8 – оптический блок; 9 – система автоматической стабилизации выходной энергии; 10 – устройство дозирования энергии*

При применении твердотельных ЛТУ часто используют проекционные методы обработки, когда поверхность детали размещается в плоскости изображения диафрагмы (массы).

Наблюдение за обрабатываемым объектом ведется с помощью микроскопов, причем фокусирующая и визуализирующая системы должны иметь общий объектив.

Рассмотрим в качестве примера одну из широко применяемых лазерных технологических установок твердотельных ТЛ.

*Лазерная технологическая установка "Квант-16"* предназначена для сварки металлических листов толщиной до 0,5 мм и термической обработки на глубину до 0,1 мм. Излучателем установки (блок-схема на рис. 11) является ТЛ на основе активного элемента из неодимового стекла.

Параметры ТЛ: длина волны излучения 1,06 мкм; энергия в импульсе до 30 Дж; частота повторения импульсов 0,1 Гц; стабильность энергии импульса  $\pm 10\%$ ;

Параметры пятна фокусировки 0,7...1,4 и 2...5 мм; мощность, потребляемая от сети, 6 кВт, потребление воды 5л/м (0,3 м<sup>3</sup>/ч).

Блок охлаждения ТЛ (дистиллированной водой) содержит центробежный насос, бак, теплообменник, реле расхода воды, панель управления. Предметный стол включает в себя микрометрическую головку, пару, рейка – шестерня, фиксирующий винт, винты крепления приспособления, шариковые направляющие. Оптический блок включает в себя: датчик энергии (на основе фотодиода ФД-24К), съемную телескопическую систему, узел бипризмы (для разделения фокального пятна на два), поворотное интерференционное зеркало, фокусирующий объектив, светоделительную пластину, окулярное устройство канала наблюдения с защитным светофильтром, зеркалом, тубусной линзой и бинокулярной насадкой.

Запуск ТЛ производится оператором в режиме моноимпульса или в полуавтоматическом режиме.

**Твердотельные ТЛ непрерывного действия.** Наиболее широко используются лазеры на АИГ:Nd, генерирующие излучение с длиной волны 1,06 мкм, а также вторую и третью гармоники, что достигается с помощью нелинейных кристаллов.

Выпускаемые ТЛ непрерывного действия серии ЛТН имеют КПД до 3% благодаря использованию квантрона К-301 с одной криптоновой дуговой лампой ДНП-6/90, эллиптическим отражателем из кварцевого стекла и высококачественным активным элементом из АИГ:Nd размером 6,3 X 100 мм. Начиная с мощности 250 Вт, в ТЛ этого типа применяется несколько квантронов. Так, в ЛТН-103 ис-

пользуется два квантрона, находящихся в общем резонаторе. Некоторые примеры и характеристики этой серии приведены в табл. 3.1. В перспективе предусмотрены разработка и выпуск ТЛ непрерывного действия мощностью до 0,5...1 кВт за счет каскадного размещения квантронов.

Таблица 3.1

Тип технологического лазера	Длина-волны-излучения, мкм	Средняя мощность излучения, Вт	Частота повторения импульсов, кГц	Диаметр-луча на выходе, мм	Расходимость излучения, рад	Масса установки, кг
<i>Лазеры, непрерывного действия</i>						
ЛТН-101	1,064	63	–	4	$1 \cdot 10^{-2}$	190
ЛТН-102А	1,064	125	–	4	$1 \cdot 10^{-2}$	220
ЛТН-102Б	1,32	31	–	4	$1 \cdot 10^{-2}$	220
ЛТН-103	1,064	250	–	4	$1,2 \cdot 10^{-2}$	340
ЛТН-401А	0,532	1	–	4	$1 \cdot 10^{-2}$	210
ЛТН-401Б	0,532	2	–	4	$1 \cdot 10^{-2}$	210
<i>Импульсные лазеры</i>						
ЛТИ-501	1,064	8	5...50	1,5	$1,0 \cdot 10^{-3}$	225
ЛТИ-502	1,064	16	8...50	1	$2,0 \cdot 10^{-3}$	225
ЛТИ-504	1,064	4	5...25	2	$2,0 \cdot 10^{-3}$	280
ЛТИ-701	0,532	4	1...25	0,8...1	$1,5 \cdot 10^{-3}$	225
ЛТИ-702	0,532	2	1...25	0,8...1	$1,5 \cdot 10^{-3}$	225

**Твердотельные ТЛ импульсного действия.** Импульсный режим работы ТЛ осуществляется двумя способами: либо посредством модуляции добротности при непрерывной накачке, либо посредством импульсной накачки (как в режиме модуляции добротности, так и в режиме свободной генерации).

Первый способ реализован в лазерах серии ЛТИ (см. табл. 3.1), разработанных на единой основе с лазерами серии ЛТН. Для модуляции добротности в лазерах серии ЛТИ используется акустический затвор МЗ-301. При выключении затвора лазеры работают в непрерывном режиме с сохранением мощности излучения.

Второй способ реализован в ЛТУ серии "Квант". Конструкция лазеров, работающих в режиме свободной генерации, оказывается простейшей, а энергия в импульсе – наивысшей (до 30 Дж) при высокой средней мощности излучения (до 125Вт).

Основные технические характеристики твердотельных технологических лазеров приведены в табл. 3.1.

### 3.3. Газоразрядные лазеры с диффузионным охлаждением рабочей смеси (ЛДО)

**Общая характеристика ЛДО.** Технологические  $\text{CO}_2$ -лазеры рассматриваемого типа были разработаны в 1964 г. Основные технические параметры и эксплуатационные характеристики промышленных ЛДО приведены в табл. 3.2. Техническое развитие конструкций однолучевых ЛДО показало, что оптимальный диапазон их выходной мощности находится в области до 0,5...1 кВт. Простота организации газового разряда и устройства оптической схемы устойчивого резонатора, позволяющей достаточно близко сопрягать апертуру пучка выходного излучения с диаметром газоразрядных труб при числе Френеля  $N_F \cong 1$ , привели к тому, что однолучевые ЛДО стали основным типом ТЛ с гауссовым пучком излучения, обладающим также высоким уровнем стабильности мощности и угловой стабильности оси пучка. Технологический лазер с высоким качеством пучка излучения, генерирующий пучок с гауссовым радиальным распределением интенсивности, соответствующим поперечной моде  $\text{TEM}_{00}$ , условно называют *одномодовым*.

Одномодовые ЛДО обладают следующими достоинствами.

1. Пучок их излучения легко трансформируется и фокусируется в пятно размером 50...100 мкм, что позволяет получить интенсивность излучения в пятне свыше  $10^7$  Вт/см<sup>2</sup>

2. Ось пучка сохраняет стабильное угловое положение благодаря ее совпадению с осью симметрии профиля ненасыщенного коэффициента усиления активной среды. Это позволяет контролировать с высокой точностью местоположение сфокусированного пучка на обрабатываемом изделии.

3. Малая апертура генерируемого пучка (10...30 мм) позволяет использовать относительно дешевые оптические элементы, механические узлы и приводы.

Одномодовые ЛДО используются в задачах прецизионной лазерной резки, размерной обработки, гравировки, пробивки отверстий (они, как правило, имеют наряду с непрерывным также импульсно-периодический режим генерации), а также в задачах лазерной сварки и поверхностной термической обработки. Примеры такого типа промышленных ТЛ приведены в табл. 3.2 (E-775, M1000).

Таблица 3.2

Модель ЛДО	Технические параметры						Эксплуатационные характеристики					
	Р <sub>н</sub> , кВт	Нестабильность (ΔP/P) %	Апертура пучка, мм	Мода генерации (или K <sub>θ</sub> )*	Угловая расходимость, мрад	Габариты, м	Состав смеси CO <sub>2</sub> :N <sub>2</sub> :He и давление, торр	Газозопотребление, м <sup>3</sup> /ч	Водопотребление, м <sup>3</sup> /ч	Межпрофилактическое время, ч	Наличие ИПР	Наличие МПСАУ
"Кохерент" E-775	0,8	±2	18	90% TEM <sub>00</sub>	1,5	4,6X0,94X0,66	4,5:13,5:82; 25	0,08	2,2	500	t <sub>и</sub> ≥0,1 мс F <sub>и</sub> ≤2,5кГц	+
"Фотон" "Соурсиз" M1000	1,0	±2	10	95% TEM <sub>00</sub>	1,55	3,85X1,05X1,8	1:2:22; 20	0,9	0,9	500	+	+
ЛГН-702	0,8	±5	40	K <sub>θ</sub> =0,08	3	6,47X0,716X1,26	1:2:10; 7,5	0,24	1,2	40	–	–
"Юпитер"	0,3	±5	80	K <sub>θ</sub> =0,04	3	1,5X0,27X0,17	1:2:7; 15	0,16	0,3	600	F <sub>и</sub> ≤200 кГц P <sub>и</sub> =10 P <sub>ср</sub>	–
"ИГ-ЛАН-3"	0,3	±3	94	K <sub>θ</sub> =0,04	5	5,6X0,8X1,8	1:1,8:5,6; 20	0,9	10		–	–
МТЛ-2	2,0	±5	94	K <sub>θ</sub> =0,08	2,5	1,9X0,8X1,7		0,3	3,5		+	+

$K_{\theta} = \theta_d / \theta < 0$ , где  $\theta_d$  – дифракционная расходимость на апертуре пучка на выходе;  $\theta$  – фактически наблюдаемая расходимость пучка.

Однолучевые промышленные ЛДО типа ЛГН-702 (см. табл. 3.2), а также аналогичные по конструкции ЛДО с меньшими мощностями излучения [ИЛГН-703 (600 Вт), ИЛГН-702 (150 Вт), ИЛГН-704 (45 Вт)] генерируют негауссовы пучки излучения и поэтому обладают меньшими возможностями для фокусировки пучка. Эти ТЛ предназначены в основном для поверхностной термообработки.

Особый тип ЛДО представляет собой "Юпитер" (см. табл. 3.2), в котором используется несамостоятельный разряд в коаксиальной трубе с предыонизацией периодическими импульсами высокого напряжения. Этот ТЛ генерирует когерентный коаксиальный пучок, преобразуемый с помощью конических зеркал в пучок кругового сечения. "Юпитер" предназначен для поверхностной термообработки, сварки, гравирования и других задач термической обработки материалов (промышленный выпуск этого ТЛ еще не освоен).

Достичь уровень мощности излучения более 1 кВт в однолучевых ЛДО с самостоятельным разрядом можно только при общей длине разрядной области  $\geq 20$  м, что при обычной схеме расположения разрядных трубок, последовательно включенных в оптический резонатор, приводит к необходимости использования различного вида сверток оптического тракта. Это позволяет сократить габариты лазера, но ухудшает стабильность выходных параметров, увеличивает потери на поворотных зеркалах, усложняет настройку и эксплуатацию оптической системы резонатора. Замена схемы ЛДО с последовательным включением разрядных трубок в резонатор на схему с параллельным расположением трубок малого диаметра внутри общего резонатора, образованного двумя плоскими зеркалами, позволяет снять ограничения на мощность.

Лазеры с диффузионным охлаждением с параллельным расположением трубок называются *многолучевыми*. При сохранении общих достоинств (большая экономичность изготовления, эксплуатации) многолучевые ЛДО имеют дополнительные преимущества по сравнению с быстро проточными лазерами (БПЛ): высокую стабильность параметров излучения (мощности, угловой расходимости, углового положения оси диаграммы направленности), причем в отличие от быстро проточного газоразрядного лазера увеличение мощности лазера не сопровождается ухудшением качества излучения: высокую компактность блока генерации; возможность создания практически любого распределения плотности мощности на поверхности изделий. Многолучевая схема ЛДО была впервые реализована в образце лазера типа "ИГЛАН" (см. табл. 3.2) мощностью излучения 3 кВт, в котором применен разряд постоянного тока. Другой вариант многолуче-

вого лазера, в котором для возбуждения активной среды используется емкостный безэлектродный разряд переменного тока частотой  $F = 10 \dots 20$  кГц, реализован в образцах лазеров типа МТЛ (см. табл. 3.2). Метод накачки переменным током позволяет получить ряд преимуществ: ликвидировать активные балластные сопротивления и тем самым поднять технический КПД лазера; снизить рабочее напряжение при одновременном увеличении рабочего давления; упростить конструкцию газоразрядного блока, повысить его компактность, технологичность и надежность; устранить металлические электроды в зоне разряда, где они подвержены эрозии и окислению.

Таблица 3.3

Параметры	Модель			
	М185	М375	М575	М775
$P_n$ , Вт	185	375	575	775
$P_{\text{пик}}$ , кВт, в ИПР	1	2	3,5	3,5
Газопотребление, л/ч	20	40	80	80
Водопотребление, м <sup>3</sup> /ч	1,1	1,3	2,2	2,2
Габариты кожуха (длина, ширина, высота), м	3X0,8X0,66	4,6X0,94X0,66	4,6X0,94X0,66	4,6X0,94X0,66

Основным недостатком многолучевых лазеров является сравнительно большая общая апертура пучка, представляющего собой набор параллельных пучков от каждой трубки, при относительно высокой расходимости излучения, определяющейся диаметром одиночной трубки. Это создает трудности для систем транспортировки излучения и препятствует острой фокусировке луча. Поэтому эти ТЛ наиболее перспективны для поверхностной термообработки, где требуемый уровень плотности мощности не превышает  $\sim 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>.

Рассмотрим устройство технологических ЛДО, выпускаемых отечественной промышленностью, а также фирмы "Кохерент".

*Одномодовые ЛДО фирмы "Кохерент"* (табл. 3.3). В качестве характерного примера данного типа ЛДО можно рассмотреть технологический лазер "Эверлэйз". Эти ТЛ выпускают в нескольких моделях на разные уровни номинальной мощности излучения  $P_n$  (от 100 до 800 Вт). Каждая модель имеет диапазон регулировки мощности  $(0,3 \dots 1,1) P_n$ ; нестабильность мощности не превышает  $\pm 2\%$ ; рабочая смесь –  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 4,5:13,5:82$ ; минимальная длительность импуль-

сов в импульсно-периодическом режиме составляет 100 мкс, максимальная частота следования импульсов – 2,5 кГц. Остальные важнейшие технические параметры одномодовых промышленных лазеров представлены в табл. 3.3.

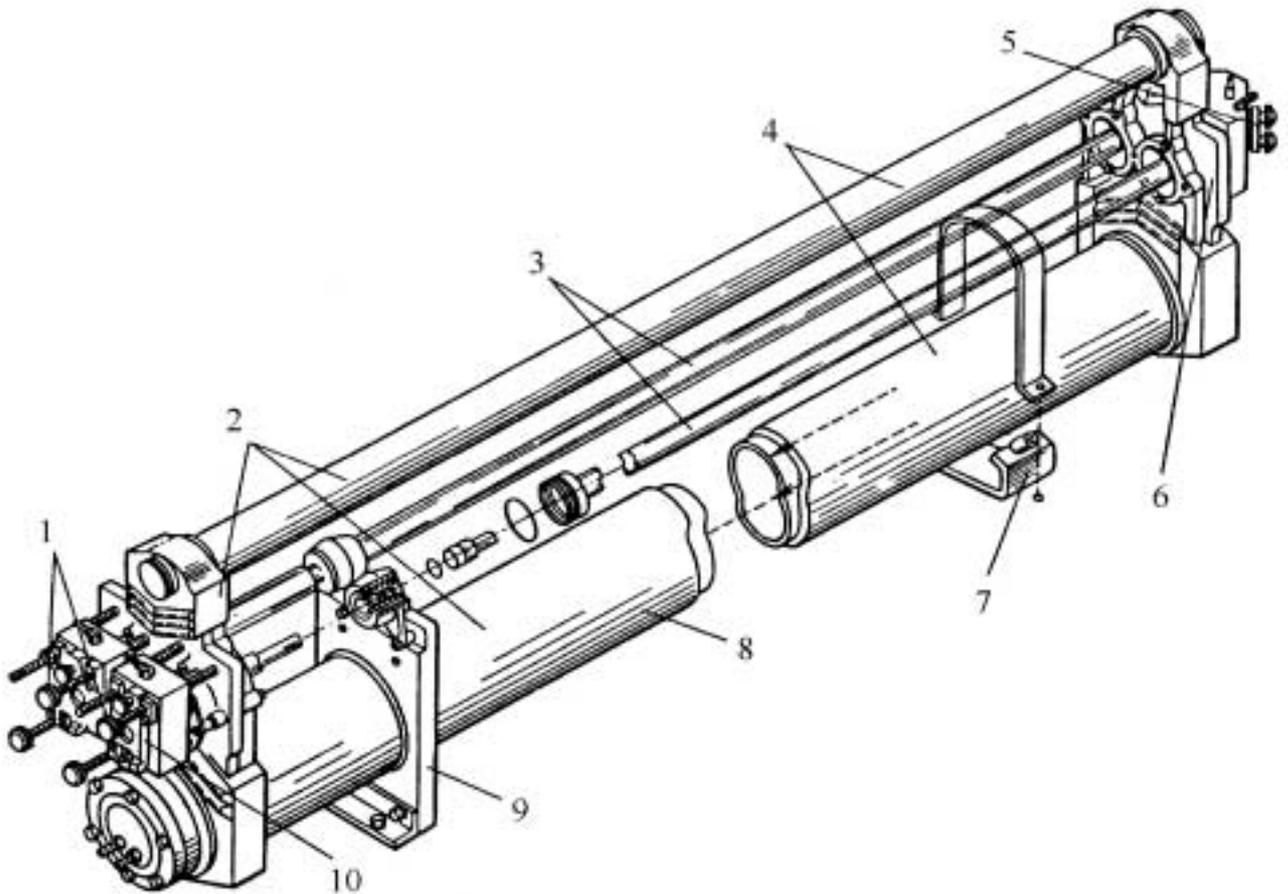
Конструктивно ТЛ сконструирован в виде единого блока, в котором смонтирован оптический резонатор с секциями газоразрядных труб 3 (рис. 12), схема охлаждения и термостабилизации система газообмена и схема электропитания. Ток разряда стабилизирован с точностью 0,1%; элементы блока электропитания термостабилизированы. Для работы в импульсно-периодическом режиме в секциях газоразрядных труб предусмотрены поджигающие электроды; в источнике питания имеется импульсный блок модуляции разряда. Оптический резонатор и секции газоразрядных труб 3 крепятся к стальной оптической скамье 6 и трубе 8. Секции газоразрядных труб охлаждаются маслом и термостабилизируются с точностью  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  (вместе с резонатором) с помощью теплообменника масло – вода, поворотные зеркала резонатора 5 термостабилизируются с точностью  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ . Излучение лазера линейно поляризовано, это реализуется с помощью зеркала, стоящего в резонаторе под углом  $45^{\circ}$  к оси. Юстировка резонатора производится на заводе-изготовителе, при эксплуатации ТЛ необходима только подъюстировка выходного зеркала по максимуму выходной мощности.

Автоматическая микропроцессорная система контроля и управления ТЛ выполняет функции блокировок, контроля тока и напряжения разряда; контроля выходной мощности излучения (с помощью непрерывного измерителя мощности); программного задания-циклограммы мощности излучения.

ТЛ обеспечиваются набором внешних оптических устройств и других аксессуаров: коллиматором-расширителем лазерного пучка; охлаждаемыми зеркалами для поворота пучка на  $90^{\circ}$ ; фокусирующими линзами с фокусным расстоянием  $F = 3,8...25,4$  см из просветленных ИК-окон (GaAs, ZnSe, Ge); устройством тонкой подъюстировки фокуса с микроскопом и телевизионной системой для установки луча на объект; сопловым блоком для лазерной обработки; пультом дистанционного управления; устройством для перемещения луча.

*Многолучевой ТЛ "ИГЛАН-3"* предназначен для лазерной поверхности термообработки (см. табл. 3.2, рис. 13). Лазер состоит из четырех основных систем: лазерной головки I, газовой системы II, системы охлаждения III и системы электропитания и стабилизации разряда IV.

Лазерная головка содержит оптический резонатор, представляющий собой охлаждаемый жесткий корпус, на торцах которого в юстировочных устройствах установлены плоские зеркала резонатора. Одно из них – глухое охлаждаемое – изготовлено из меди. Второе – выходное полупрозрачное – изготовлено в виде плоскопараллельной пластины из кристалла селенида цинка и имеет коэффициент отражения  $R_{от} = 0,29$ .



*Рис. 12. Конструкция оптического резонатора и газоразрядного блока одномодового ТЛ:*

*1 – юстировочные винты; 2 – штанги оптической скамьи резонатора; 3 – газоразрядные трубы; 4 – направление потока хладагента; 5 – поворотные зеркала; 6 – концевые плиты; 7 – опоры резонатора; 8 – стальная труба; 9 – монтажная плата для электродов; 10 – съемные оптические держатели*

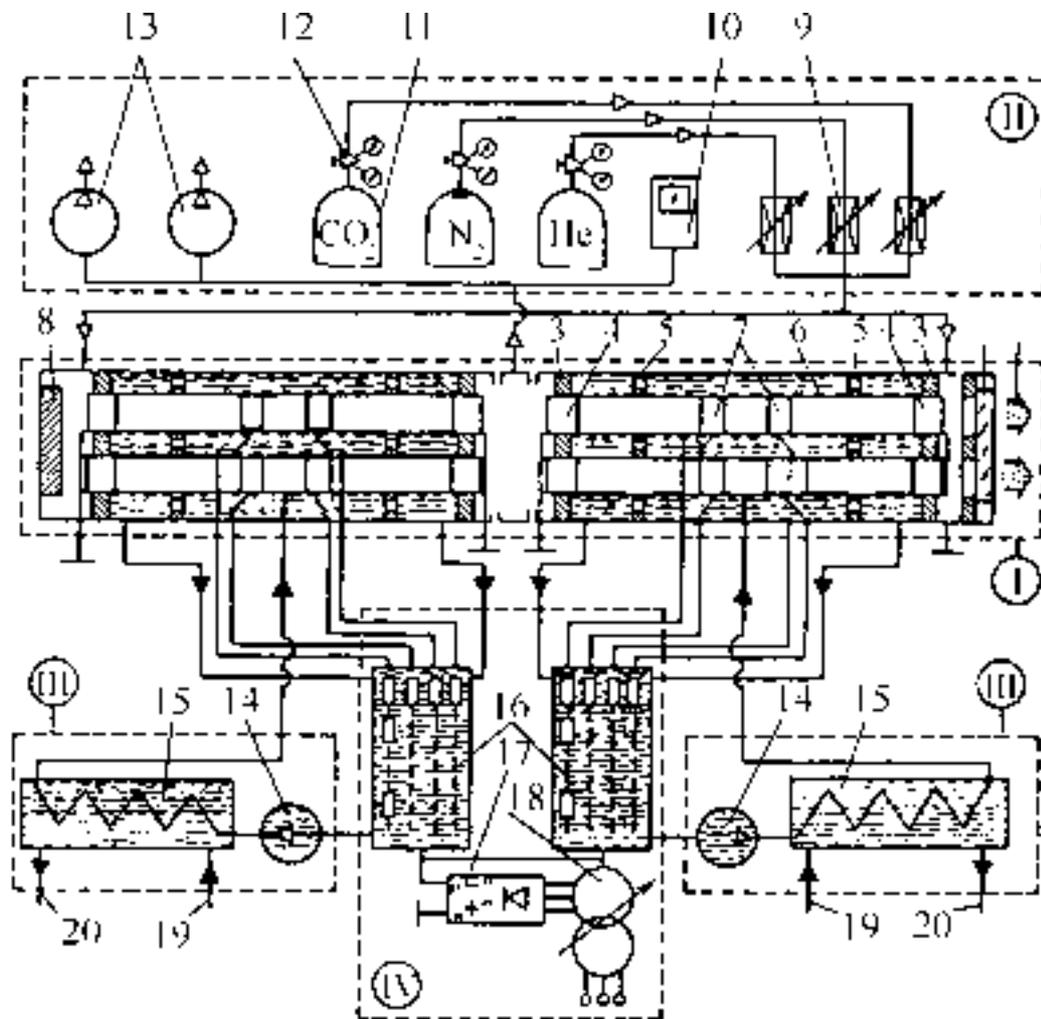


Рис. 13. Принципиальная схема многолучевого ТЛ "ИГЛАН-3":

1 – лазерные лучи; 2 – охлаждаемое выходное зеркало; 3 – сепаратор-уплотнитель; 4 – анод; 5 – сепаратор; 6 – разрядная трубка; 7 – катод; 8 – охлаждаемое глухое зеркало; 9 – натекатель; 10 – вакуумметр ВДГ-1; 11 – баллон с рабочим газом; 12 – редуктор; 13 – вакуумный насос; 14 – маслонасос; 15 – теплообменник; 16 – бак с балластными сопротивлениями; 17 – выпрямитель; 18 – регулируемый высоковольтный трансформатор; 19, 20 – подача и слив охлаждающей воды

Внутри корпуса лазерной головки последовательно размещены два одинаковых газоразрядных блока, в каждом из которых в заранее отъюстированных направляющих сепараторах собран пучок параллельно расположенных разрядных стеклянных трубок, внутренний диаметр которых равен 10 мм, а толщина стенки – 1 мм. Каждая разрядная трубка состоит из двух секций длиной 90 см, разделенных вставкой, служащей для предотвращения пробоя между катодами секций. Общее число каналов в лазере "ИГЛАН-3" равняется 37, при этом общий диаметр лазерного луча составляет 94 мм.

Электродами служат тонкие металлические цилиндры, прилегающие к внутренним поверхностям разрядных трубок. Все аноды соединены между собой и подключены к заземленному плюсу высоковольтного источника питания. Катоды изолированы друг от друга; для стабилизации разряда в катодную цепь каждой секции разрядной трубки включено балластное сопротивление, равное 306 кОм. Рабочее напряжение на разряде составляет 12,2 кВ при токе через разрядную трубку 18 мА.

Газовая система состоит из двух вакуумных насосов-баллонов с рабочими газами, регулируемых редукторов и натекателей. При этом номинальный расход газов составляет 25 норм. л/м.

Система охлаждения разрядных трубок представляет собой замкнутый контур, по которому циркулирует трансформаторное масло, охлаждаемое проточной водой посредством теплообменника. Герметизация разрядных трубок и электроизоляция катодных выводов осуществляются с помощью специальных уплотнений.

Источник питания содержит высоковольтный трансформатор и выпрямитель, собранный по трехфазной мостовой схеме. Мощность лазерного излучения определяется с помощью специального графитного калориметра. Нестабильность средней выходной мощности за 8 ч непрерывной работы не превышает 3%.

*Многолучевой ЛДО с накачкой разрядом переменного тока типа МТЛ-2.* Основные технические характеристики его приведены в табл.3.2. Этот лазер состоит из следующих основных функциональных систем, конструктивно объединенных в единый моноблок (см. рис. 14): лазерной головки *I*, содержащей пакет разрядных трубок и оптический резонатор; источника электропитания *II*, обеспечивающего переменный ток с частотой  $F = 18$  кГц, возбуждающей активную среду лазера; системы охлаждения газоразрядного блока *III*; системы газообеспечения *IV*; системы управления.

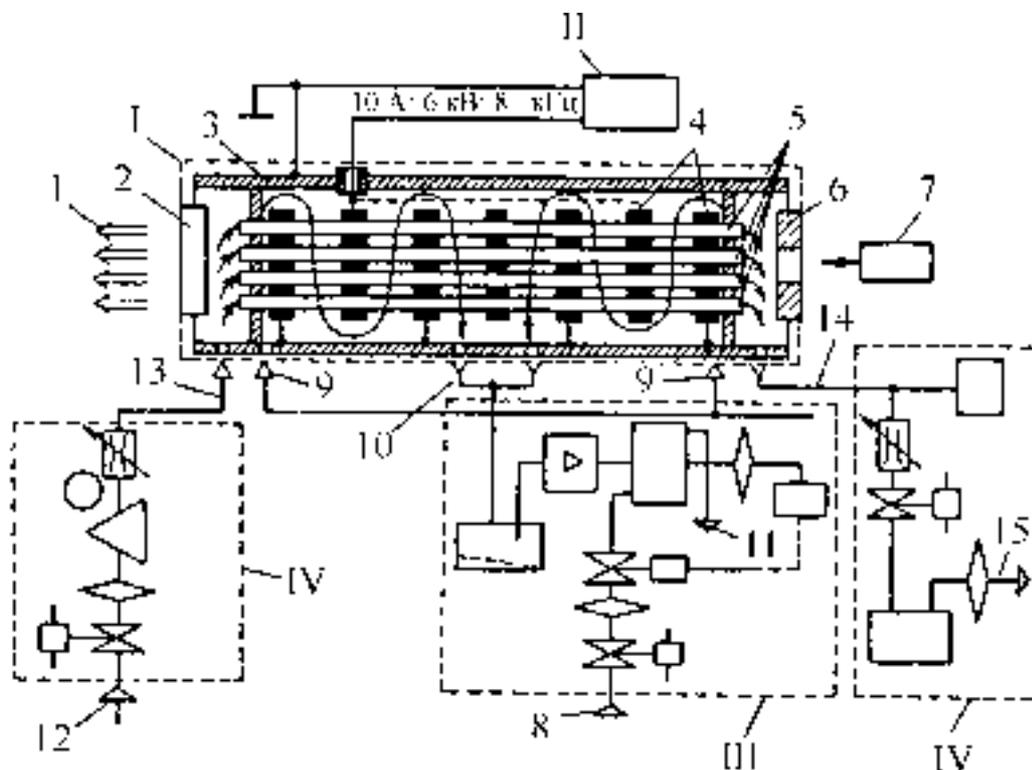


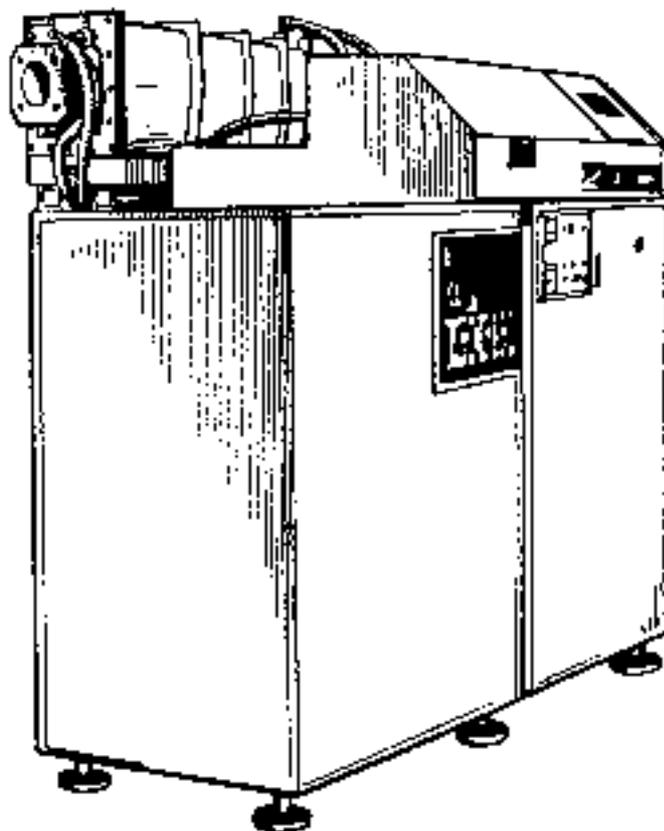
Рис. 14. Схема устройства технологического лазера МТЛ-2:

*I* – лазерная головка; *II* – источник электропитания; *III* – система охлаждения; *IV* – система газообеспечения; 1 – выходящий пучок излучения; 2 – выходное зеркало резонатора; 3 – корпус лазерной головки; 4 – сепараторы токоподводы; 5 – газоразрядные трубки; 6 – заднее зеркало резонатора; 7 – юстировочный (гелий-неоновый) лазер; 8 – подача воды; 9 – вход масла в лазерную головку; 10 – выход масла из лазерной головки; 11 – слив воды; 12 – подача рабочей смеси газов ( $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$ ); 13 – вход рабочей смеси в лазерную головку; 14 – выход рабочей смеси из лазерной головки; 15 – выхлоп отработавшей смеси в атмосферу

На верхней плоскости моноблока (рис. 15) устанавливается лазерная головка с дополнительными устройствами – юстировочным He-Ne-лазером, оптическим затвором, измерителем мощности, и в отдельном кожухе – микропроцессорная система автоматического управления. Конструкция лазерной головки обеспечивает виброизоляцию от корпуса моноблока, виброизоляционную установку вакуумного и масляного насосов на несущем каркасе.

Лазерная головка содержит жесткий термостабилизированный корпус, на торцах которого в котировочных устройствах установлены плоские охлаждаемые зеркала резонатора. В центре заднего медного зеркала имеется отверстие, закрытое кварцевым диском, для ввода излучения котировочного He-Ne-лазера через центральную трубку пакета разрядных трубок. Выходное полупрозрачное зеркало изготовлено в виде плоскопараллельного диска из  $\text{KCl}$  или  $\text{ZnSe}$  покрытием, обеспечивающим оптимальную прозрачность. Несущая

конструкция корпуса лазерной головки выполнена в виде рамы из четырех полых стальных труб, по которым хладагент (масло) подается на охлаждение газоразрядных трубок. Количество трубок в пакете составляет 85 (длина каждой трубки 1550 мм). Полный световой диаметр лазерного пучка в плоскости выходного окна составляет 94 мм.



*Рис. 15. Многолучевой технологический лазер МТЛ-2*

Кварцевые разрядные трубки ( $D_{\text{внутр}} = 5$  мм) устанавливаются в отверстиях сепараторов, часть которых жестко крепится к несущему каркасу и определяет положение оси пакета трубок. Electroдами емкостного разряда переменного тока служат тонкостенные металлические цилиндры, плотно прилегающие к наружной поверхности трубок и расположенные вдоль трубки на расстоянии 120 мм друг от друга. Торцы трубок в пакете жестко связываются между собой герметиком.

Источник электропитания (ИЭП) имеет номинальную мощность 25 кВт и рабочую частоту 18 кГц. Он состоит из тиристорного преобразователя частоты и высоковольтного согласующего блока, который повышает выходное напряжение преобразователя частоты с 400...800 В до 5...10 кВ, а также обеспечивает согласование внутреннего сопротивления преобразователя с нагрузкой. В состав высоковольтного блока входят повышающий трансформатор и согласо-

щий реактивный элемент (дроссель).

Система охлаждения (см. рис. 14, III) включает в себя маслосос, теплообменник "масло – вода", маслобак, управляемые электроклапаны. Система поддерживает постоянную температуру масла на входе в лазерную головку с точностью  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ .

Система газообеспечения (см. рис. 14, IV) обеспечивает точность поддержания расхода по каждому из газов ( $\text{CO}_2$ , Ne, He) не более  $\pm 1\%$ , что достигается двойным редуцированием давления.

Микропроцессорная система управления обеспечивает выполнение операций по включению лазера: контроль состояния его основных систем, автоматическое регулирование и стабилизацию основных параметров – тока разряда, давления и расхода газовой смеси. Эта система обеспечивает заданное, стабильное значение выходной мощности МТЛ-2 регулировкой частоты источника электропитания с использованием сигнала обратной связи от датчика мощности излучения, стабилизацией давления рабочей смеси и температур хладагента, охлаждающего разрядные трубки.

### 3.4. Быстропроточные газоразрядные ТЛ

**Общая характеристика быстропроточных лазеров (БПЛ) и их систем.** Создание мощных технологических лазеров (как непрерывного, так и импульсно-периодического действия) оказалось возможным за счет применения способа конвективного (быстропроточного) охлаждения рабочей смеси, приведшего к созданию быстропроточных лазеров.

Способ конвективного охлаждения рабочей смеси ГРЛ позволяет обеспечить удельный объемный энергопотребление до  $1...10 \text{ Вт/см}^3$ , на 2 – 3 порядка превышающий это значение для ЛДО. Быстропроточные газоразрядные лазеры могут генерировать лазерное излучение мощностью свыше 1 кВт при удельных габаритах, составляющих  $\sim 1...3 \text{ м}^3$ ; объема конструкции на 1 кВт выходной мощности лазера.

## Технические параметры

Модель БПЛ	Р, кВт	Нестабильность мощности излучения, %	Апертура пучка, мм	Мода генерации	Угловая нестабильность оси пучка, мрад	Угловая расходимость, мрад
Модель 820 ("Спектра-Физикс")	1,5	$\pm 2$	24	TEM <sub>00</sub>	0,15	1,4
"ЛАТУС-31"	1,5	5	40	TEM <sub>00</sub> и м/м		4,9
ЛОК-2	1,2	$\pm 5$	60	Кольцо	0,2	0,7
ТЛ-5	5	$\pm 3$	54	«	0,2	1,0

В технологических БПЛ применяется несколько схем организации электрического разряда, отличающихся прежде всего наличием (несамостоятельный разряд) или отсутствием (самостоятельный разряд) внешнего ионизатора (электронного пучка и др.). Повышенная устойчивость несамостоятельных разрядов с электронным пучком дает возможность создать компактный электроионизационный технологический лазер мощностью свыше 5 кВт с давлением рабочей смеси до 0,1 МПа (1 ата) и с большим уровнем удельного объемного энерговыклада – до 1 кВт/см<sup>3</sup>. Примерами таких ТЛ могут служить лазеры НРЛ фирмы "Авко" (США), электроионизационный ТЛ мощностью 10 кВт (созданный в СССР под руководством акад. Н. Г. Басова).

Техническая сложность устройств внешней ионизации вызвала развитие БПЛ с самостоятельным разрядом. Этот тип разряда имеет несколько модификаций геометрии электродной системы газоразрядной камеры, каждая из которых оптимальна для определенного уровня давления, скорости и состава рабочей смеси. Наиболее распространены две схемы газоразрядной камеры: поперечного разряда с секционированием электродов, снабженных индивидуальными балластными сопротивлениями; продольного разряда как с секционированием, так и без секционирования электродов.

Схемы ГРК поперечного разряда с частым секционированием одного из электродов употребляются для лазеров с повышенным

давлением молекулярного газа в рабочей смеси (до 30 торр). Примером БПЛ с такой схемой газоразрядной камеры является лазер ЛТ-1 мощностью 5 кВт (разработки ИАЭ им. И.В. Курчатова). Опыт создания и эксплуатации ЛТ-1 использован при разработке промышленного БПЛ мощностью 5 кВт типа ТЛ-5 (НИЦТЛ АН СССР, ВНИИЭСО<sup>1</sup>) (табл. 3.5).

Таблица 3.5

*Эксплуатационные характеристики*

Габариты, м	Состав смеси CO <sub>2</sub> : N <sub>2</sub> : He и давление, торр	Газо- по- треб- ление, м <sup>3</sup> /ч	Водоп- отреб- ле- ние, м <sup>3</sup> /ч	Меж- про- филак- ти- ческий ресурс, ч	Наличие МПСАУ
2,1X1,2X1,9	4:17:79; 30	0,056	2,3	500	+
1,18X0,67X0,56	(2...30):(4...90):(0...70)	0,005		300	-
23X0,9X0,8	1:3:2; 15	1.5	4	100	-
2.5X2X2	0,05:95:0; 25	3,0 (N <sub>2</sub> )	7,0	250	+

Схемы ГРК с частым секционированием электродов позволяют также осуществлять достаточно однородный и устойчивый разряд в безгелиевой смеси газов (в ТЛ-5). Быстропроточный газоразрядный лазер с поперечным разрядом при малой степени секционирования электродов требует, как правило, смеси с большим содержанием гелия. При давлении молекулярной компоненты до 10...15 торр это позволяет реализовать такие преимущества богатых гелием смесей, как использование прокачного средства с малой степенью сжатия, высокую оптическую однородность активной среды. Примерами таких БПЛ служат лазеры фирмы "Спектра Физике" (США) мощностью от 1,5 до 6 кВт, близкие по конструкции лазеры "Хебр" (НРБ) мощностью 1,2 и 2,5 кВт и лазер ЛОК-2 (ИТПМ<sup>2</sup> СО АН СССР, ВНИИ-ЭТО<sup>3</sup>) мощностью 1,2 кВт.

<sup>1</sup> Всесоюзный НИИ электросварочного оборудования.

<sup>2</sup> Институт теоретической и прикладной механики.

<sup>3</sup> Всесоюзный НИИ электротермического оборудования.

Быстропроточные газоразрядные лазеры с продольным разрядом в диэлектрических трубах генерируют пучок лазерного излучения, близкий к гауссову. Примером таких БПЛ являются лазеры фирмы "Рофин Синар" (ФРГ) с мощностью излучения от 1 до 3 кВт и лазер в ЛТУ "ЛАТУС-3", генерирующий как многомодовый, так и одномодовый пучок мощностью 1...1,5 кВт.

Для повышения удельных энергетических характеристик и надежности ГРК получили развитие схемы комбинированного разряда, содержащего фазы как несамостоятельного, так и самостоятельного разряда (с ионизацией короткими периодическими импульсами высокого напряжения; с разрядом переменного тока частотой  $10^4$  Гц; с ВЧ-разряда частотой  $10^6...10^7$  Гц). Эти схемы по параметрам удельного объема энерговклада и рабочего давления занимают промежуточное положение между самостоятельным разрядом и несамостоятельным разрядом с внешней ионизацией.

В БПЛ на смеси  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$  уровень удельного массового энерговклада составляет не более 300 Дж/г (что соответствует нагреву смеси до  $150...200^\circ\text{C}$ ) и энергосъема 30...40 Дж/г. Это означает, что 1 кВт выходной мощности лазеров с самостоятельным разрядом (давление 10...50 торр) требует объемного расхода рабочей смеси 0,5...2 м<sup>3</sup>/с; соответствующее значение для лазеров с несамостоятельным разрядом (или импульсно-периодических лазеров атмосферного давления) на порядок меньше, поэтому при той же мощности их габариты значительно меньше.

Прокачка рабочей смеси БПЛ требует создания перепада давлений прокачным средством со степенью сжатия  $\Pi_k = 1,01...1,5$ . Небольшое сжатие, которое может быть обеспечено вентиляторами, характерно для БПЛ с малым удельным массовым энерговкладом, большим содержанием гелия в рабочей смеси и с умеренной скоростью потока. Быстропроточные газоразрядные лазеры с самостоятельным разрядом при малом содержании гелия в смеси требуют больших скоростей потока, длинных ГРК и соответственно компрессоров для прокачки смеси, характеризующихся большими значениями сжатия.

БПЛ любой модели требуют наличия системы регенерации рабочей смеси. Этому требованию удовлетворяют БПЛ с хорошей герметичностью контура, выполненного из вакуумно-чистых материалов. Особо важными системами БПЛ, от которых, в первую очередь, зависит энергетическая эффективность и стабильность излучения, а также надежность и ресурс работы ТЛ, являются газоразрядные камеры и источники питания, наиболее ответственными элементами

конструкции которых являются: электроды; элементы внутренней электроизоляции ГРК; вакуумные токовводы; устройства охлаждения (электродов, балластников и пр.); блок балластных сопротивлений. Общие требования к конструкции газоразрядной камеры таковы: обеспечение минимального газоотделения из вакуумных уплотнений, креплений и соединений элементов конструкций; обеспечение высоковольтной электроизоляции элементов ГРК друг от друга и от корпуса установки; обеспечение безаварийного охлаждения элементов ГРК; применение эффективных, высокоресурсных, технологичных в изготовлении и эксплуатации электродных элементов.

Для быстропротекающих газоразрядных лазеров с самостоятельным разрядом постоянного тока необходимы источники питания в диапазоне мощностей 10...100 кВт при напряжении 2...20 кВ, со стабильностью мощности не более 0,1%. Желательно секционирование выходов этих источников, что позволит уменьшить номиналы балластников и увеличить устойчивость разряда.

Рассмотрим устройство технологических БПЛ, выпускаемых отечественной промышленностью, а также промышленных БПЛ фирмы "Спектра Физике" (США).

БПЛ с продольной прокачкой, используемый в *лазерной технологической установке "ЛАТУС-31"* отличается малым расходом рабочих газов (один баллон гелия – на 500 ч эксплуатации), малым вспомогательным временем подготовки установки к работе; ресурсом работы 5000 ч, регламентным ресурсом 800 ч, ресурсом безотказной работы 300 ч (см. табл. 3.4). БПЛ предназначен для поверхностной термообработки и сварки изделий. Быстрая ( $v = 120$  м/с) продольная прокачка смеси осуществляется через четыре пары параллельных газоразрядных трубок; при последовательном сложении лучей, общая оптическая длина активной среды  $L = 1,6$  м (рис. 16, а, б).

В блоке питания лазера используется трехфазный высоковольтный регулятор переменного напряжения дискретного действия (РДД). Не изменяя формы напряжения, он обеспечивает наименьшие пульсации высокого напряжения; может быть объединен с силовым трансформатором. Регулировка осуществляется по первичной стороне трансформатора, вторичная – соединена с выпрямителем. В РДД есть система стабилизации выходного напряжения. Модулятор питания позволяет перейти на импульсный режим. Имеется система формирования вспомогательного импульса напряжения для поджига разряда.

Газовакуумная система имеет ручное и автоматическое управление (откачка и напуск смеси производятся автоматически, за 2 мин).

Обеспечивается автоматическое поддержание давления в газовакуумном контуре периодическая (1 раз в смену) перезаправка рабочей смесью.

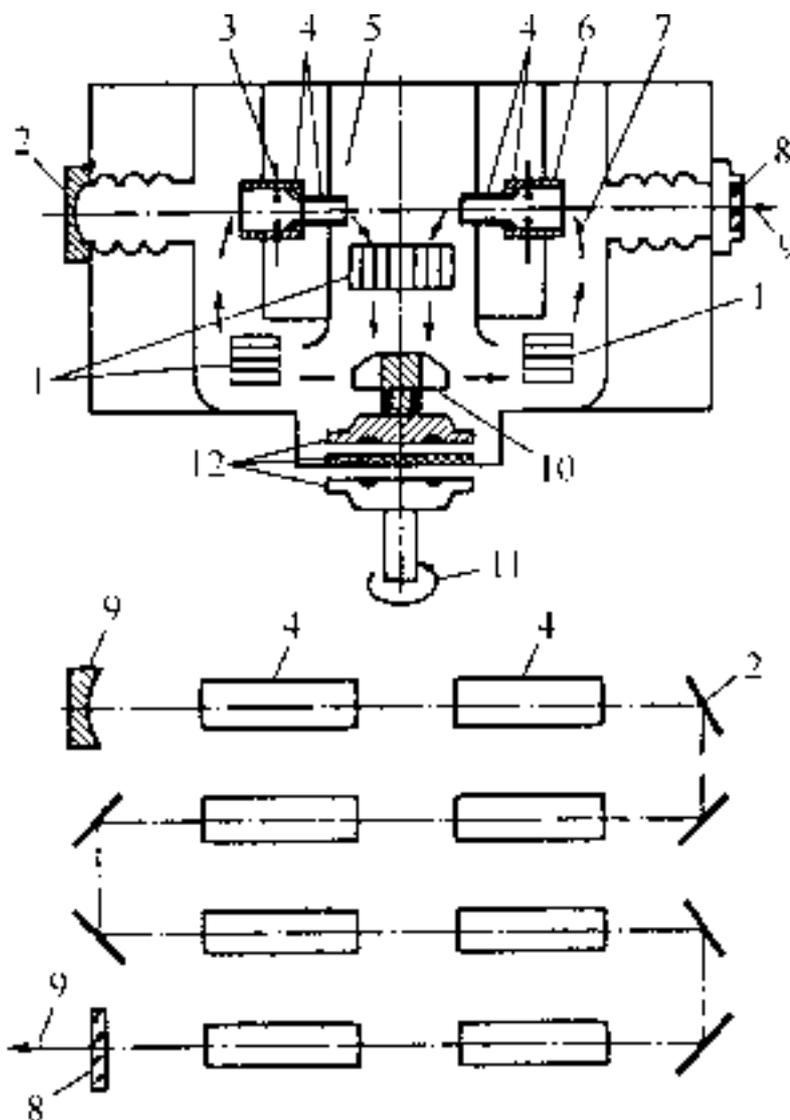


Рис. 16. Схема БПЛ, используемого в ЛТУ "ЛАТУС-31":

а – газоразрядная и технологическая схемы; б – оптическая схема; 1 – теплообменники; 2 – зеркала оптического резонатора; 3 – аноды; 4 – кварцевая часть газоразрядной трубки; 5 – катоды (заземленный корпус); 6 – керамическая часть газоразрядной трубки; 7 – направление газового потока; 8 – выводное окно; 9 – выходящий пучок лазерного излучения; 10 – вентилятор; 11 – привод вентилятора; 12 – магнитная муфта

*Технологический быстропроточный газоразрядный лазер ЛОК-2 непрерывного действия* предназначен в основном для поверхностной термообработки (см. табл. 3.5).

Конструктивно лазер ЛОК-2 представляет собой герметичную вакуумную емкость (рис. 17), составленную из последовательно установленных ГРК, теплообменника вентилятора, диффузора и элементов для поворота газового потока, образующих газодинамический

контур. В каналах контура установлены элементы для выравнивания профиля скорости газового потока.

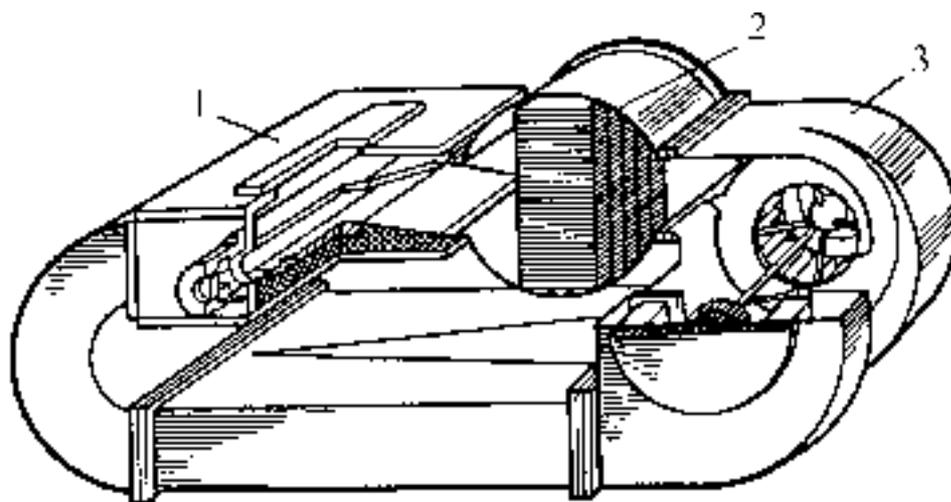


Рис. 17. Схема конструкции лазера "ЛОК-2":

1 – ГРК; 2 – теплообменник; 3 – вентилятор

Газоразрядная камера (рис. 18) является частью газодинамического контура, в которой расположены: катод, анод, вспомогательный электрод. Катод изготовлен из медной трубки диаметром 14 мм и охлаждается водой. По торцам на катод надеты изоляторы. Анод из меди, имеющий плоскую рабочую часть размером 100X600 мм, заделан в изолятор и охлаждается водой. Расстояние между катодом и анодом 70 мм. Канал для движения газа в области электродов формируется с помощью изоляторов из стекла и является сужающимся перед электродами и расширяющимся за ними по направлению движения газа. На входе перед изоляторами, формирующими канал ГРК, установлена решетка для выравнивания профиля скоростей газового потока.

Теплообменник 2 (см. рис. 17) состоит из ребристых радиаторов, охлаждаемых водой. Площадь поверхности ребрения  $22 \text{ м}^2$ . Теплообменник рассчитан на мощность 30 кВт при температуре газа на выходе не более  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  – на входе.

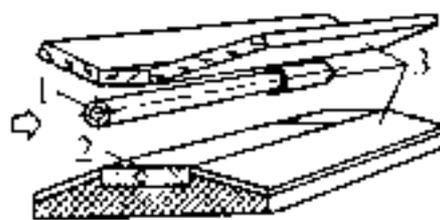


Рис. 18. Электронная система ГРК лазера "ЛОК-2"

1 – катод; 2 – анод; 3 – изоляторы

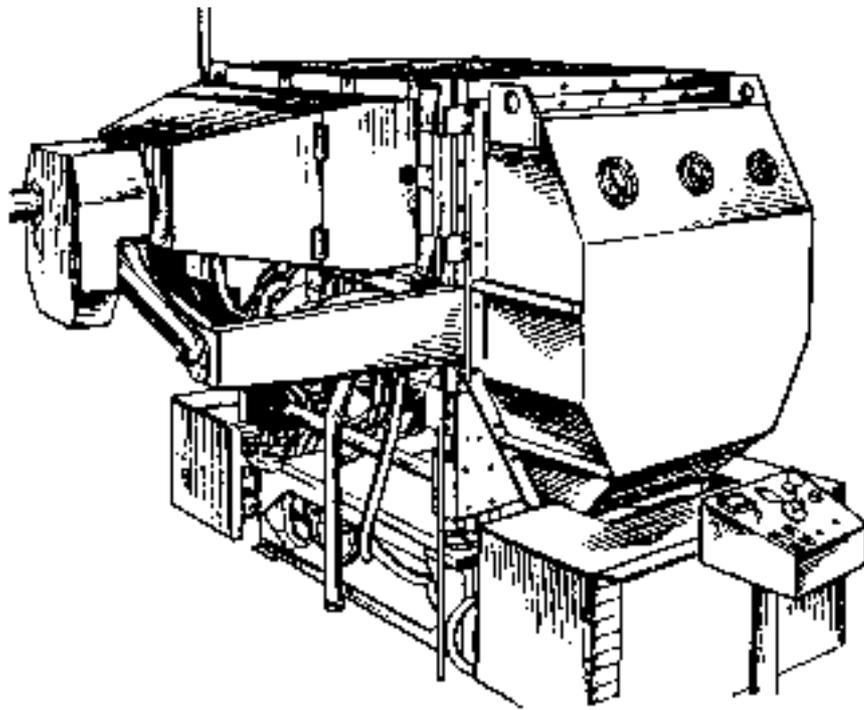
Вентилятор 3 (см. рис. 17) центробежного типа разработан специально для работы в условиях низких давлений, характерны для лазерных газовых смесей. В общем корпусе вентилятора образовано два спиральных диффузора и установлены два рабочих колеса правого и левого вращения. Колеса закреплены на общем валу, который вращается в подшипниках закрытого типа. Центробежный вентилятор прост в изготовлении и имеет большой диапазон устойчивых режимов работы, что обеспечивает изменение расхода газа от 0 до 5 м<sup>3</sup>/с при различных давлениях газа в контуре.

Резонатор лазера ЛОК-2 – неустойчивый конфокальный. Выходное зеркало плоское, установлено под углом 45° к оптической оси резонатора. Излучение в виде кольца диаметром 80 мм выводится через окно из монокристалла NaCl.

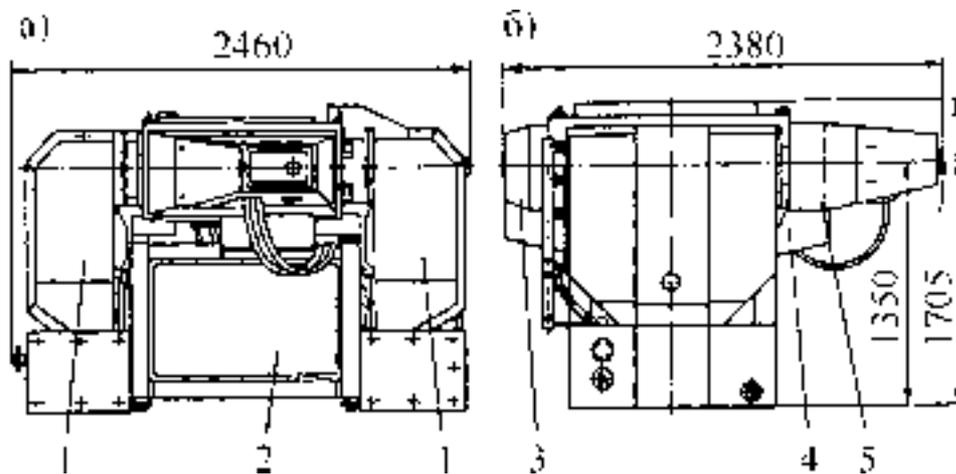
*Быстропроточный промышленный лазер ТЛ-5* (см. табл. 3.4) предназначен в основном для лазерной сварки и резки толстостенных материалов. Лазер состоит из блока генерации излучения (БГИ) (рис. 19), пульта оперативного управления, системы электропитания и управления, системы газообмена. Блок генерации излучения помимо узлов, представленных на рис. 19 включает в себя водоохлаждаемые балластники, юстировочный блок, систему измерения мощности излучения, состоящую из измерителя калориметрического типа и измерителя проходного типа, систему охлаждения и термостабилизации. Несущей конструкцией БГИ (рис. 20,21) является рама, к которой крепятся стойки газопроводов и корпус ГРК. Рама устанавливается на виброизолирующие опоры. Внутри стоек установлены теплообменники. В переднем кожухе 5 (см. рис. 20,21) расположены: выходное окно из КС1 и измеритель мощности проходного типа. Компрессор установлен на самостоятельные виброизолирующие опоры. Газоразрядная камера (см. рис. 20) состоит из катодной платы и плоского водоохлаждаемого анода, изготовленного из нержавеющей стали.

Катодная плата состоит из 17 рядов катодов "ножевого" типа, эмитирующая поверхность такого катода представляет узкую (0,5...1 мм) полоску металла, расположенную в плоскости керамической катодной платы и ориентированную длинной стороной (40 мм) перпендикулярно направлению потока. Размеры ГРК:  $H = 6$  см,  $L_{||} = 40$  см,  $L_0 = 100$  см; скорость потока газа на входе в ГРК составляет 100 м/с.

Прокачное средство представляет собой высокооборотный ( $n_{об} = 9000$  об/мин) электрокомпрессор ( $\pi_k = 1,2$ ;  $Q = 7$  м<sup>3</sup>/с) осевого типа специальной разработки, в конструкции которого используется встроенный электродвигатель.

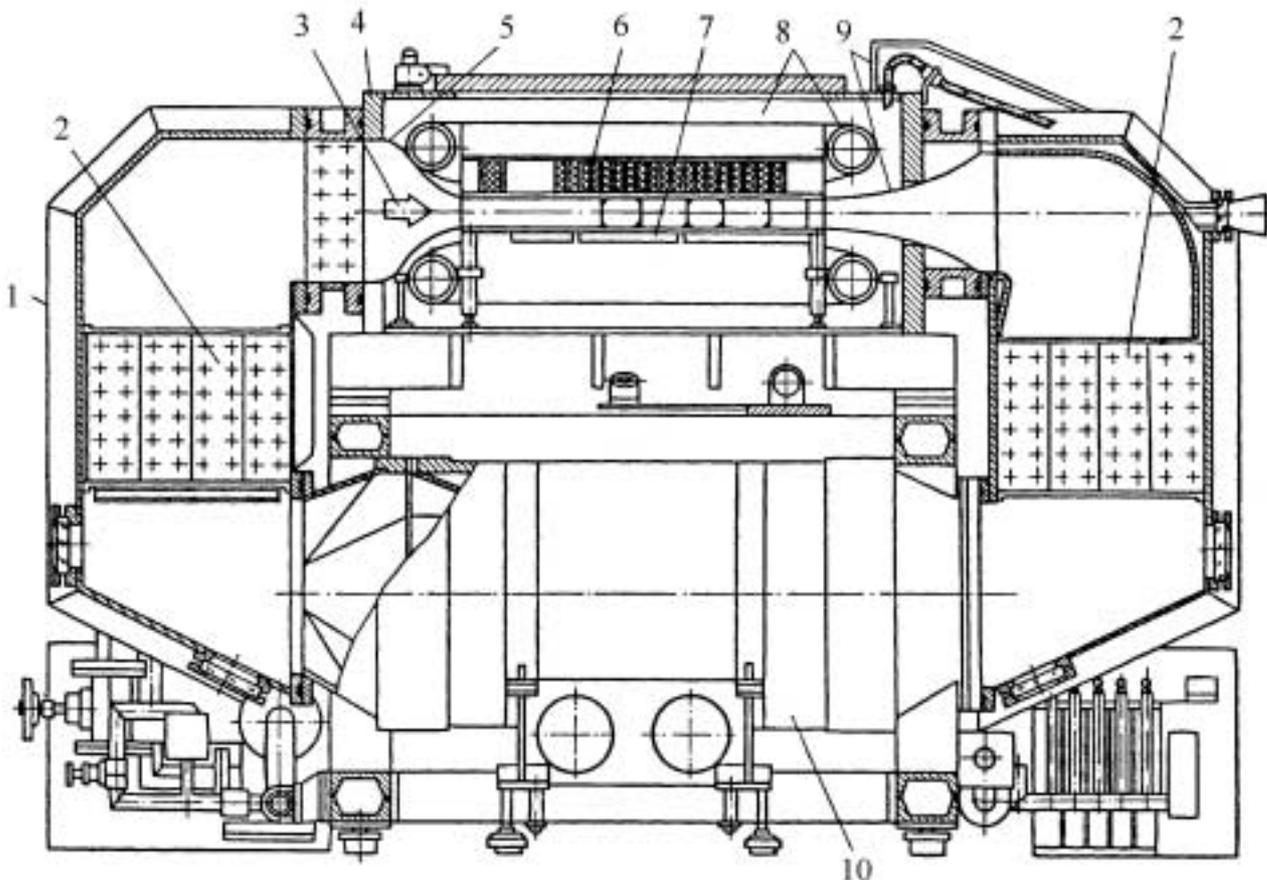


*Рис. 19. Внешний вид блока генерации излучения лазера ТЛ-5*



*Рис. 20. Габаритный чертеж блока генерации излучения ТЛ-5:*

а – вид спереди; б – вид сбоку; 1 – стойки газопроводов; 2 – компрессор; 3 – кожух задний; 4 – ГРК; 5 – кожух передний; 6 – ось пучка излучения



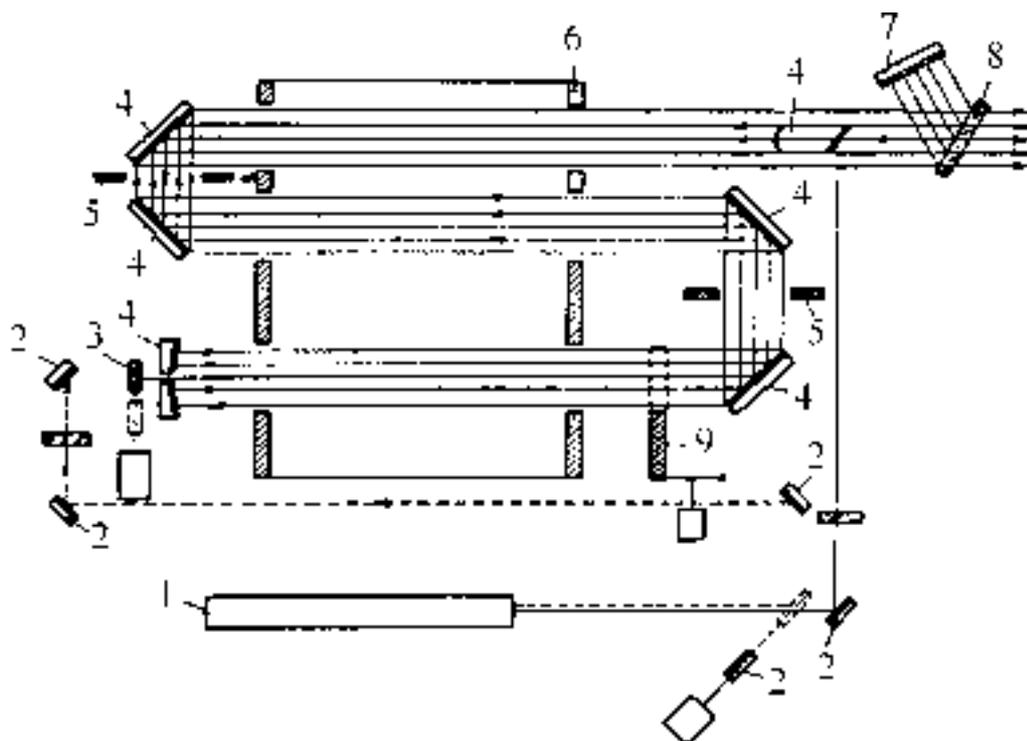
*Рис. 21. Блок генерации излучения быстроточного лазера ТЛ-5 (схема):*

1 – газовакуумный контур; 2 – теплообменники; 3 – направление газового потока; 4 – ГРК; 5, 9 – диффузор и конфузор; 6 – катодная плата; 7 – анод; 8 – блок оптического резонатора (ОР); 10 – компрессор

Блок оптического резонатора (рис. 22) собран по схеме неустойчивого конфокального трехпроходного резонатора. Зеркала имеют каналную систему водяного охлаждения и состоят из медных корпуса и крышки.

Для ограничения апертуры поля излучения с целью устранения паразитных мод генерации, возникающих при отражении дифрагированного излучения от поверхностей электродов ГРК, в схеме оптического резонатора (ОР) предусмотрены диафрагмы. Вогнутое зеркало ОР имеет в центре сквозное отверстие диаметром 3 мм для ввода в резонатор пучка юстировочного лазера. Для перекрытия рабочего излучения лазера ТЛ-5, выходящего из полости резонатора через отверстие в вогнутом зеркале, служит оптический затвор. Затвор резонатора предназначен для быстрого (не более 100 мс) прерывания генерации излучения без отключения разряда в ГРК. Калориметрический дисковый измеритель мощности измеряет непосредственно часть

мощности, отраженную от выходного окна внутрь резонатора. Проложной измеритель мощности установлен в переднем кожухе.



*Рис. 22. Схема блока оптического резонатора лазера ТЛ-5:*

1 – юстировочный лазер; 2 – зеркала для поворота пучка юстировочного лазера;  
3 – оптический затвор; 4 – зеркала; 5 – диафрагма; 6 – стенки ГРК; 7 – измеритель  
мощности; 8 – выходное окно; 9 – затвор резонатора

Система газообмена, обеспечивающая подпитку газовакуумного контура свежей рабочей смесью, автоматическую откачку контура и автоматическое поддержание давления и влажности рабочей смеси, содержит форвакуумные насосы, осушительные адсорберы с нагревателями, газодувку для прокачки воздуха при регенерации адсорберов, увлажнитель рабочей смеси, регуляторы давления, игольчатые вентили, клапаны электромагнитные и вакуумные, дроссель – натекаатель воздуха и фильтр-влагомаслоотделитель.

Система охлаждения включает в себя блок автоматической термостабилизации оптического резонатора и выходного окна, а также магистралей охлаждения теплообменников, катодов, анода, блока балластных нагрузок.

Схема силового электропитания состоит из блоков: вводных автоматов, электропитания основного разряда, электропитания предыонизатора, электропитания компрессора. Блок электропитания основного разряда (рис. 23) представляет собой высоковольтный регулируемый тиристорный выпрямитель ТДЕ-5/20000А (5 кВт, 20 А) и

сглаживающий емкостной фильтр.

Микропроцессорная система автоматического управления лазером обеспечивает:

1) управление источником электропитания ГРК, двигателем компрессора, системой вакуумирования и газообмена, системой термостабилизации, затвором резонатора, затвором юстировочного лазера;

2) контроль и измерение напряжения и тока ГРК и предыонизатора, мощности излучения, давления рабочей смеси, температуры и расхода охлаждающей воды;

3) аварийно-предупредительную сигнализацию о ситуациях: "мало давления воды в сети"; "нет протока воды"; "разгерметизация контура"; "перегрев воды"; "низкое давление в контуре"; "отключение автоматики"; "включение" (термостабилизации компрессора, отсечного клапана, высокого напряжения), "открыт-закрыт затвор резонатора";

4) защиту агрегатов при аварийных ситуациях и указательную сигнализацию для определения причин отключения установки этими защитами.

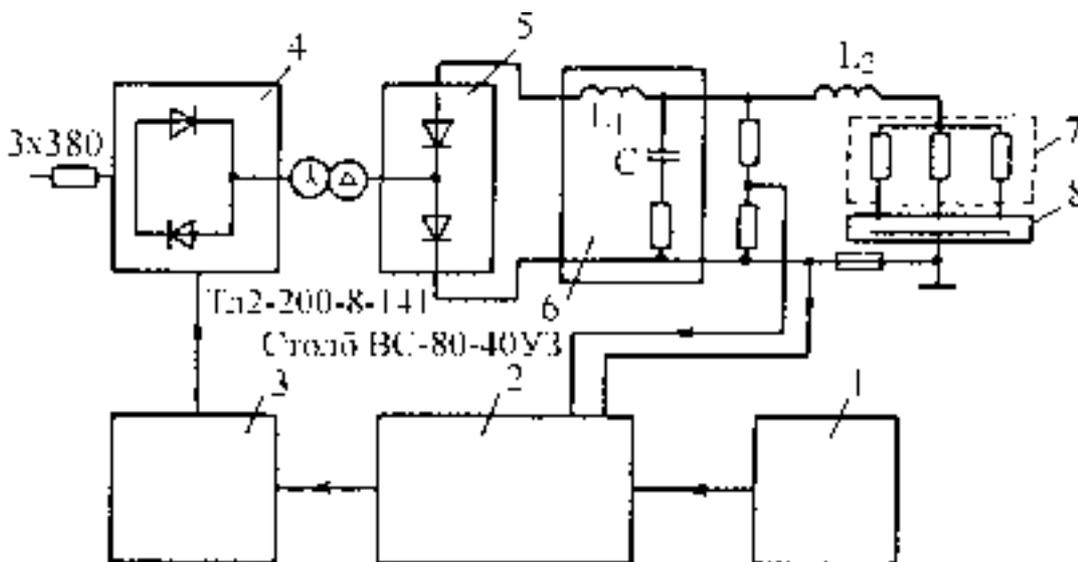
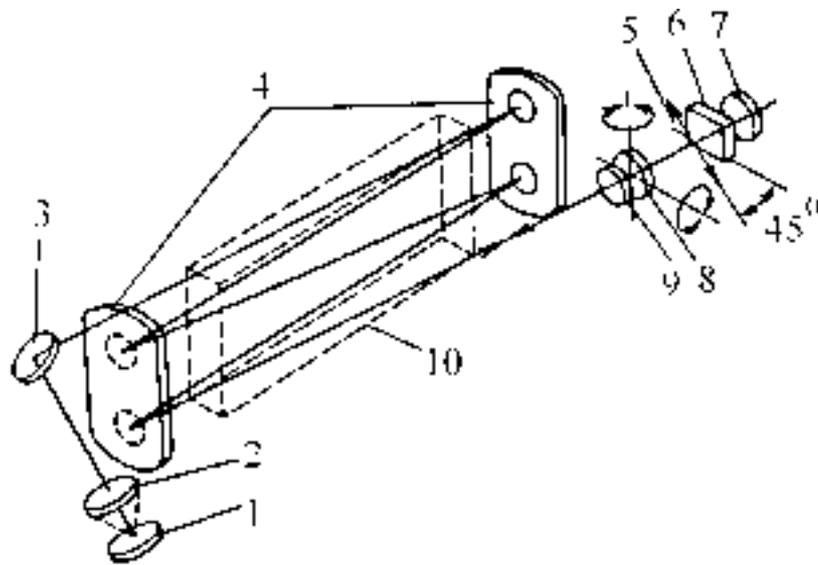


Рис. 23. Блок-схема источника электропитания основного разряда ТЛ-5:

1 – источник управляющего сигнала; 2 – схема сравнения; 3 – блок фазового управления; 4 – трехфазный тиристорный регулятор; 5 – трехфазный мостовой выпрямитель; 6 – сглаживающий фильтр; 7 – блок балластных резисторов; 8 – газоразрядная камера



*Рис. 24. Схема оптического резонатора лазера Модель 820 ("Спектра Физике"):*

1 – датчик мощности излучения; 2 – заднее зеркало; 3 – поляризатор; 4 – поворотное зеркало; 5 – направление вектора линейной поляризации; 6 – оптический затвор; 7 – выходное окно; 8 – выходное зеркало; 9 – выходная апертура; 10 – зона разряда

*Промышленный технологический быстропроточный газоразрядный лазер модель 820 фирмы "Спектра Физике" (США).* Данная модель учитывает особенности эксплуатации ТЛ в промышленности и предназначена для лазерных технологических операций резки, сварки и поверхностной термообработки).

Важным отличием этой модели является контролируемая поляризация его излучения (линейная или круговая), что достигается введением поляризаторов в оптическую схему его резонатора (рис. 24).

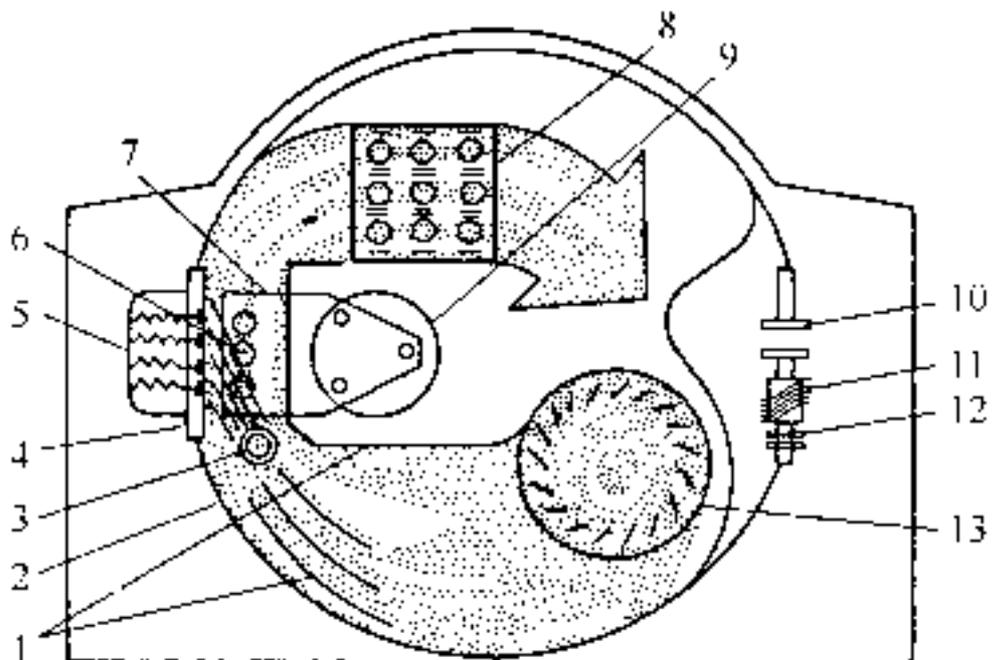
Преимущества и основные особенности этой модели ТЛ: в качестве средства прокачки применен диаметральный вентилятор, что значительно улучшило компоновку лазерной головки (рис. 25);

лазерная головка, блок питания и система управления совмещены в одном конструктивном модуле (рис. 26);

ТЛ снабжен системой транспортировки луча с воздушной продувкой системами фокусировки и сканирования, устройствами для манипулирования обрабатываемыми образцами;

применено замкнутое водяное охлаждение источника питания с использованием теплообменника "вода – воздух";

имеется система замкнутого охлаждения электродов газоразрядной камеры деионизованной водой;



*Рис. 25. Поперечный разрез лазерной головки лазера Модель 820 ("Спектра Физике"):*

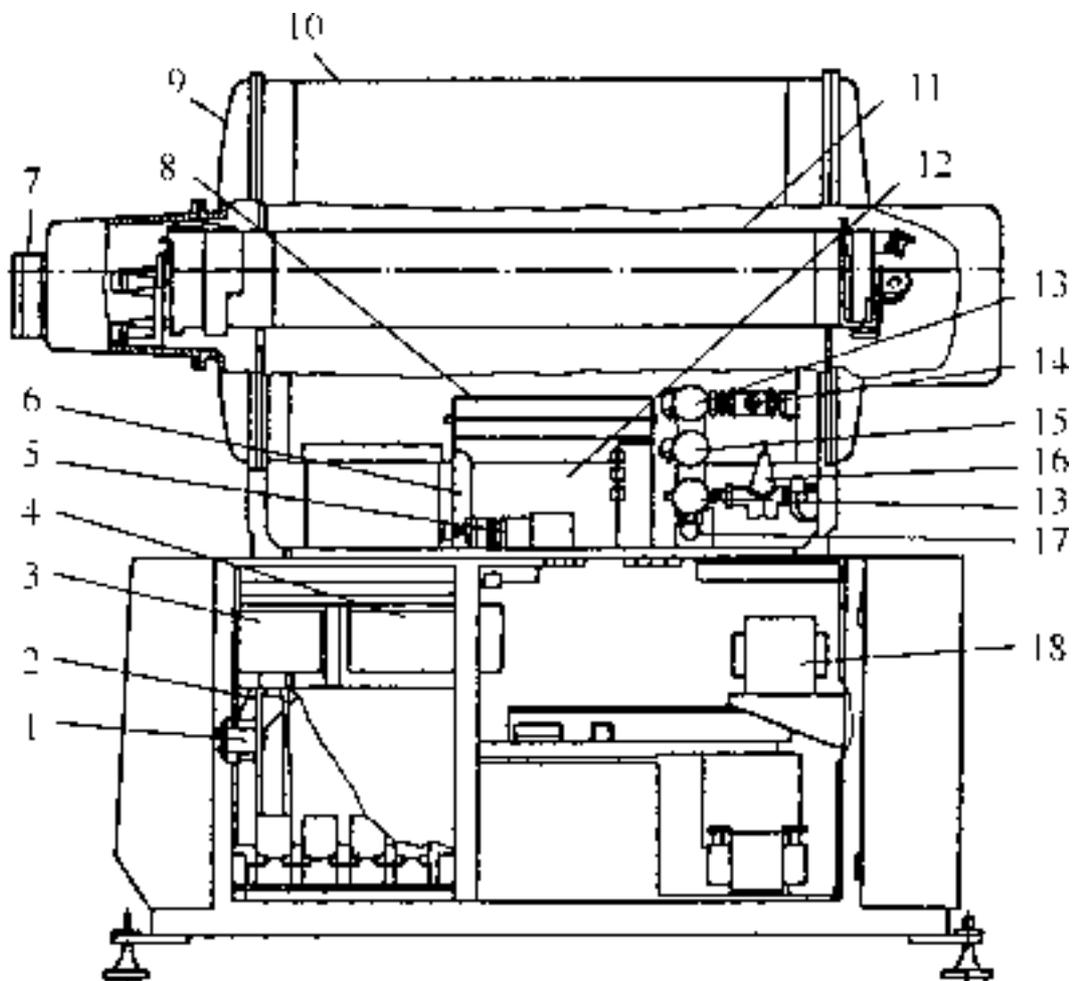
1 – направляющие газового потока; 2 – вакуумная камера; 3 – катод; 4 – анод; 5 – балластные резисторы; 6 – зона разряда и генерации; 7 – монтажная плита для оптических элементов; 8 – теплообменник; 9 – графито-пластиковая труба оптической скамьи резонатора; 10 – вакуумный разъем; 11 – электрические разъемы; 12 – ввод водяного охлаждения; 13 – диаметральный вентилятор

осуществляется непрерывный контроль мощности лазерного излучения с помощью быстродействующего датчика (см. рис. 24), установленного позади частично пропускающего (0,5%) заднего зеркала оптического резонатора;

все дверцы и крышки лазерной головки (см. рис. 26) обеспечивают быстрый оперативный доступ к любому элементу лазера;

микропроцессорная система автоматического управления ТЛ позволяет осуществить полный пуск нерабочего состояния путем нажатия одной кнопки.

Раздельно диагностируются 24 функции блокировок и диагностики. Имеется встроенный микропроцессорный программатор мощности для лазерной сварки. Имеется возможность подъюстировать выходную мощность и выходное зеркало кнопками контрольной панели; выходная мощность стабилизируется по току питания разряда через обратную связь от датчика мощности. Все индикаторы блокировки и диагностики размещены на единой контрольной панели оператора с сенсорными кнопками.



*Рис. 26. Общий вид лазера Модель 820 ("Спектра Физике"):*

1 – трансформатор; 2 – штанги заземления; 3 – блок электропитания оптического затвора; 4 – блок стабилизации тока ГРК; 5 – водяной насос; 6 – переключатель протока; 7 – выходное окно; 8 – деионизационный фильтр; 9 – крышка вакуумной камеры; 10 – вакуумная камера; 11 – оптическая скамья резонатора; 12 – теплообменник водяной манометр; 14 – переключатель потока; 15 – регулятор давления; 16 – термометр; 17 – игольчатый клапан; 18 – трансформатор

**Устройство отдельных систем ТЛ.** Вакуумный корпус лазерной головки (см. рис. 26) имеет литые крышки из алюминиевого сплава, к которым крепится скамья оптического резонатора, блок вентилятора, блок теплообменников газ – вода, монтажные, элементы газоразрядной камеры и системы газоподачи. Оптическая система (см. рис. 24) смонтирована на базе трубы из графитопласта (см. рис. 25) с низким коэффициентом термического расширения, играющей роль оптической скамьи, что обеспечило энергетическую и модовую стабильность излучения; котировочные узлы и подвески изготовлены из инвара. Все оптические элементы, кроме выходного зеркала и окна, смонтированы на оптической скамье резонатора и отъюстированы на заводе-изготовителе. Монтаж оптических элементов осуществляется на болтах через упругие прокладки с предварительным натягом; ох-

лаждение производится с тыла, через предварительно натянутые платы. Возможна замена зеркал без их переюстировки.

Электродная система ГРК состоит (см. рис. 25) из водоохлаждаемого трубчатого катода и секционированного анода, имеющего вид медных пластинок; вытянутых вдоль потока, смонтированных на водоохлаждаемой изолирующей плате; балластные резисторы – водоохлаждаемые. В ГРК имеется система электронной защиты от дугового пробоя. Источник питания ГРК состоит из трехфазного контроллера, повышающего трансформатора (до 1600 В), выпрямителя и фильтра.

Система газообмена (рис. 25) имеет три режима работы: первый – заполнение через вентиль 20 лазерной головки 13 до 1 ата (1 ата = 0,1 МПа) смесью газов  $N_2 + 10\% O_2$  без включения вентилятора; второй – рабочий режим непрерывной подпитки (в количестве около 1% от общего расхода рабочей смеси в контуре); третий – работа без  $CO_2$ , но с включенным разрядом.

Ресурсы основных элементов ТЛ: выходного зеркала – 2000 ч; поворотных и поляризующего зеркал – 5000 ч; выходного окна (ZnSe) – 4000 ч; замена патронов деионизаторов – через 6 мес.; замена газовых фильтров – через 1 год, периодичность чистки электродов – 400 ч.

### 3.5. Схемы систем транспортировки излучения

Для передачи излучения в зону обработки используются различные способы преобразования лазерного пучка с помощью оптических и оптико-механических систем. Эти способы можно условно разделить на две группы: с постоянной (рис. 27, а, б) и переменной (рис. 27, в, г) длиной оптического тракта от излучателя лазера до зоны обработки.

При постоянной длине оптического тракта перемещается либо заготовка, либо излучатель, либо излучатель и заготовка одновременно (рис. 27, а). Только в частном случае резки по окружности при постоянной длине оптического тракта излучатель лазера и обрабатываемая заготовка неподвижны, а излучение передается в зону обработки с помощью подвижной системы оптических элементов (рис. 27, б). При переменной длине оптического тракта излучатель неподвижен, а излучение передается в зону обработки с помощью подвижной системы оптических элементов (рис. 27, в, г). Для заготовок малой массы в этом случае может быть предусмотрено перемещение.

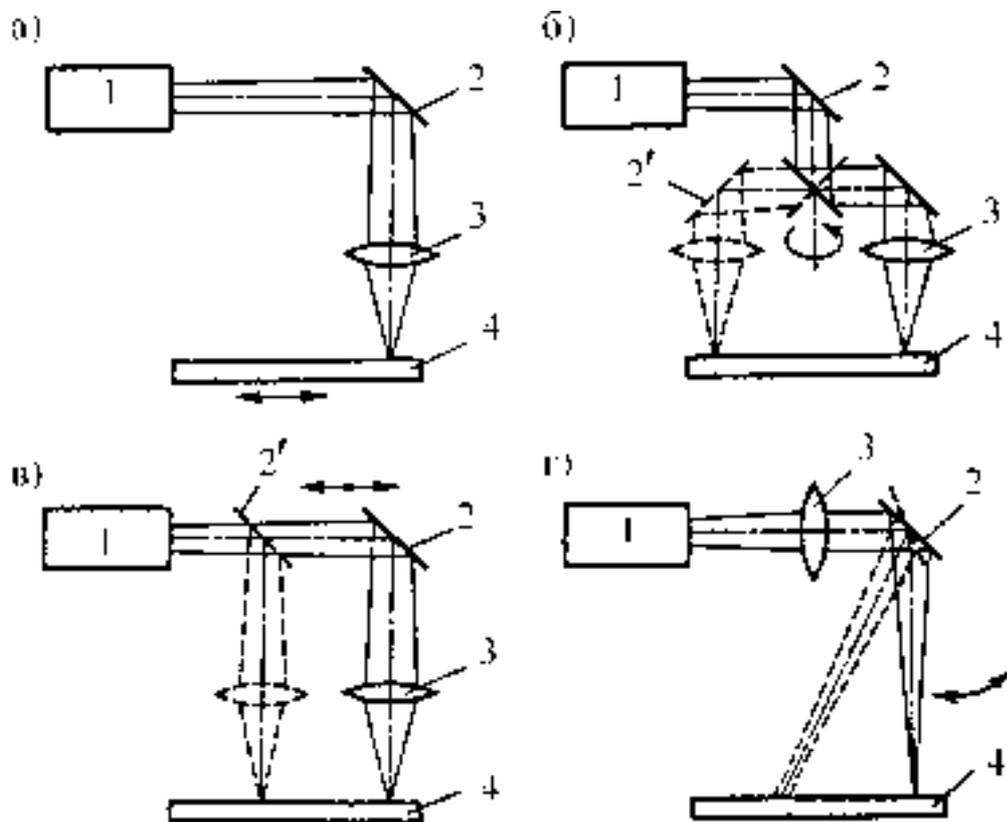


Рис. 27. Основные схемы передачи лазерного излучения в зону обработки:

1 – излучатель; 2 – зеркала; 3 – объектив; 4 – обрабатываемый материал

Установки с постоянной длиной оптического тракта используются в основном для обработки заготовок небольших габаритов и массы. Для таких установок характерна стабильность плотности мощности излучения в зоне обработки.

Наиболее простым способом повышения точности и динамической устойчивости системы автоматического управления при повышении ее быстродействия является уменьшение массы подвижных элементов кинематической цепи. При обработке крупногабаритных заготовок этого можно достичь в установках, в которых обрабатываемый материал и излучатель неподвижны, а лазерное излучение передается в зону обработки с помощью системы подвижных оптических элементов (рис. 27, в, г).

К недостатку технологических лазерных установок со значительной переменной длиной оптического тракта следует отнести нестабильность оси диаграммы направленности излучателей, изменение пространственной структуры лазерного пучка и его диаметра при фокусировке на поверхность разрезаемого материала, приводящие к изменению плотности мощности и отклонению параметров техноло-

гического процесса от заданных.

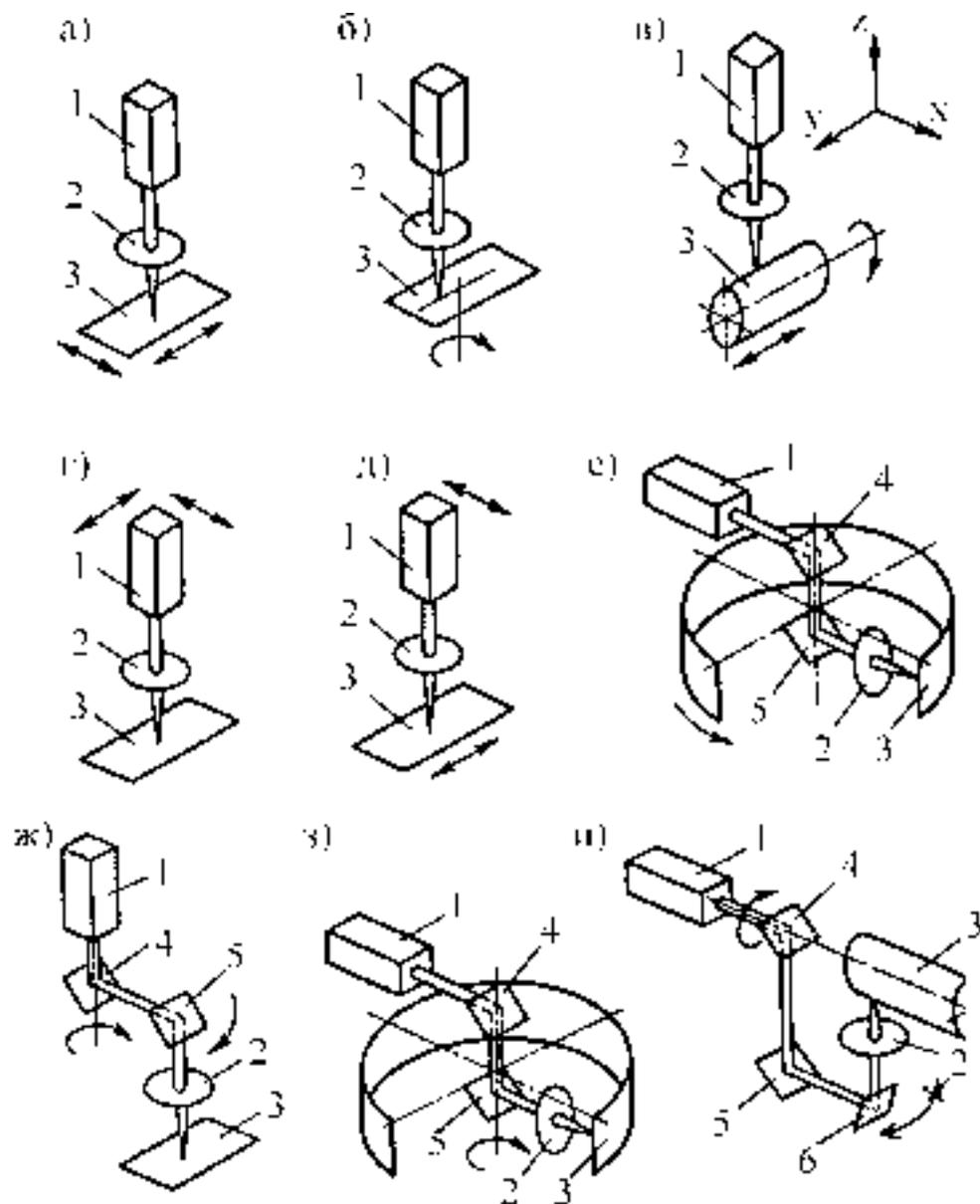
При использовании лазерных технологических установок с изменяемой длиной оптического тракта повышается производительность обработки за счет увеличения быстродействия системы автоматического управления, повышается кинематическая точность вследствие уменьшения инерционности кинематической цепи, снижается стоимость изготовления и эксплуатации за счет уменьшения массы подвижных блоков, общих габаритов и занимаемой производственной площади, улучшается динамическая устойчивость следящих систем приводов и уменьшается мощность электродвигателей приводов. В результате основные технико-экономические показатели при обработке крупногабаритных заготовок повышаются. Однако при этом изменяется плотность мощности излучения в зонах обработки, расположенных на различном удалении от излучателя, и, следовательно, снижается точность обработки.

При повышенных требованиях к точности размеров зоны обработки необходимо принимать специальные меры для уменьшения изменения или стабилизации плотности мощности излучения в зоне обработки. К ним относятся: уменьшение расходимости излучения, коррекция пространственной структуры лазерного пучка с помощью оптико-механических систем, изменение параметров движения фокусирующего устройства.

Рассмотрим различные варианты передачи излучения в зону обработки.

Простейшим способом, относящимся к первой группе транспортировки излучения в зону обработки, является передача с помощью фокусирующего объектива, установленного между неподвижным излучателем лазера и обрабатываемым материалом. Заготовка при резке может перемещаться поступательно в плоскости, перпендикулярной оси сфокусированного лазерного пучка, или вращаться относительно его оси (рис. 28, *а, б, в*).

Для поворота лазерного пучка на необходимый угол между излучателем и объективом размещается зеркало или система зеркал либо призм (рис. 28, *е*). В устройствах для раскроя заготовок возможен вариант перемещения излучателя с объективом относительно неподвижной заготовки или одновременное перемещение как излучателя, так и заготовки (рис. 28, *г, д*). Однако при обработке крупногабаритных заготовок это является недостатком, так как необходимо перемещать излучатель и обрабатываемые заготовки, имеющие значительные габариты и массу.



*Рис. 28. Схемы передачи лазерного излучения в зону обработки при постоянной длине оптического тракта:*

*1 – излучатель; 2 – объектив; 3 – обрабатываемый материал; 4, 5, 6 – зеркала*

Кроме того, подвижный излучатель связан с неподвижной частью установки кабелями высокого напряжения и системой шлангов для подачи охлаждающей жидкости, газа для активной среды, технологического газа для улучшения условий обработки и защиты объектива от повреждения продуктами обработки. При использовании мощных газовых лазеров перемещение излучателя становится конструктивно нецелесообразным.

Для исключения перемещения излучателя и обрабатываемой заготовки лазерное излучение передается в зону обработки с помощью системы зеркал или призм и объектива, вращающихся вокруг оси лазерного пучка или вокруг обрабатываемой заготовки (рис. 28, ж, з, и).

Но эти способы передачи излучения в зону обработки имеют ограниченное применение, так как они могут быть использованы только при обработке по окружности плоскостей и тел вращения.

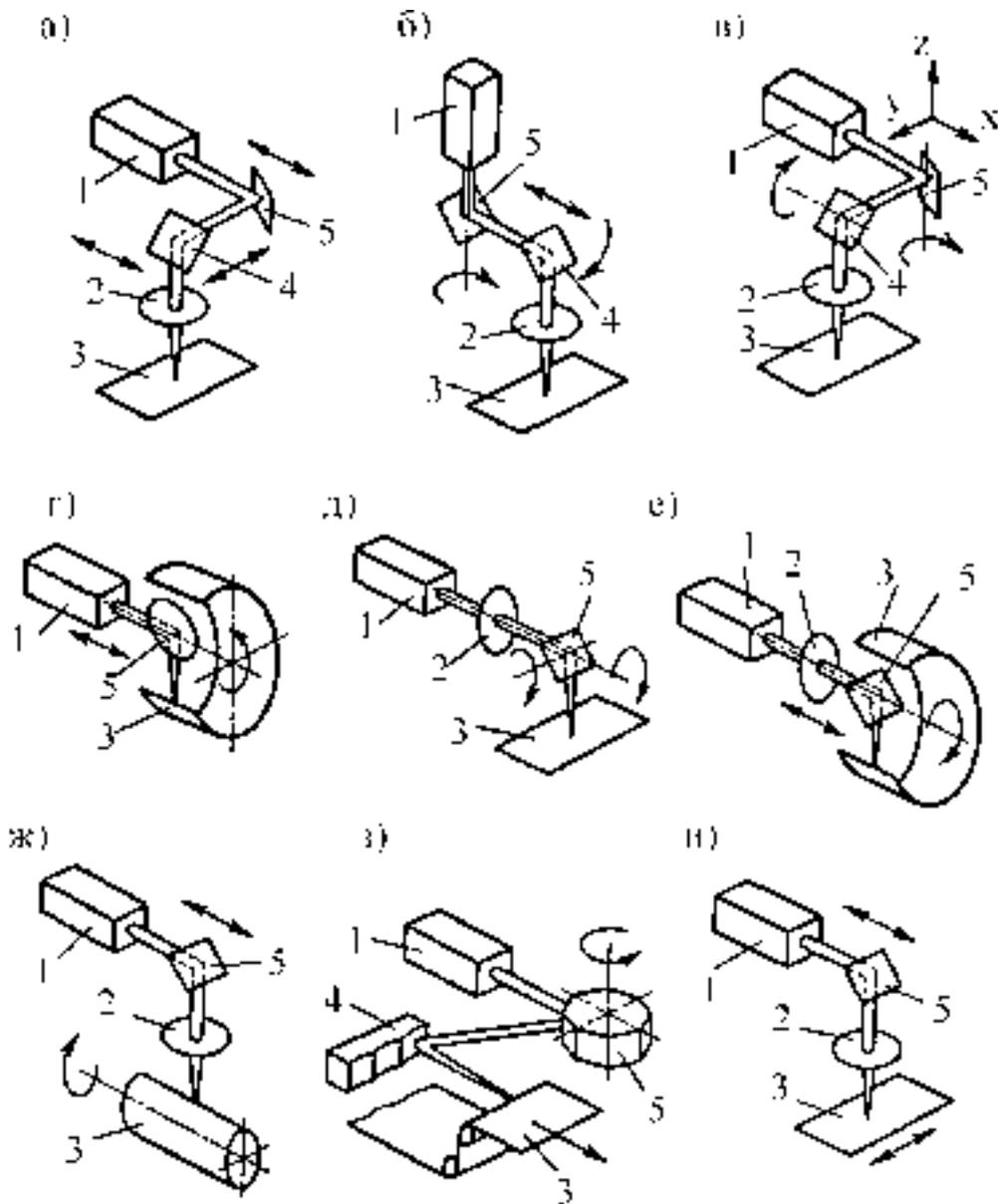
Вторая группа способов передачи излучения в зону обработки по оптическому тракту переменной длины может быть представлена вариантом (рис. 29, *a*), который предусматривает совместное перемещение зеркал 4, 5 и объектива 2 по оси  $x$ , а по оси  $y$  только движение зеркала 4 с объективом 2.

Поступательное перемещение зеркал и объектива можно заменить сложением вращательного движения зеркал 4, 5 и объектива 2 вокруг оси излучателя 1 с поступательным перемещением зеркала 4 и объектива 2 в направлении, перпендикулярном оси излучателя 1.

При небольшом поле обработки перемещение лазерного пучка по двум координатам можно осуществить путем вращения зеркал 4 и 5 вокруг взаимно перпендикулярных осей (рис. 29, *e*). Лазерный пучок можно поворачивать и фокусировать с помощью только одного сферического зеркала 5 (рис. 29, *z*). На рис. 29, *d* показана схема передачи излучения в зону обработки с помощью зеркала 5, закрепленного в карданном подвесе и поворачивающегося относительно двух взаимно перпендикулярных осей. Повороты зеркала позволяют обрабатывать заготовку по заданному контуру.

Для обработки внутренней полости цилиндрической заготовки используется вращение зеркала 5 и объектива 2 вокруг оси лазерного пучка и одновременное их перемещение вдоль этой оси (рис. 29, *e*).

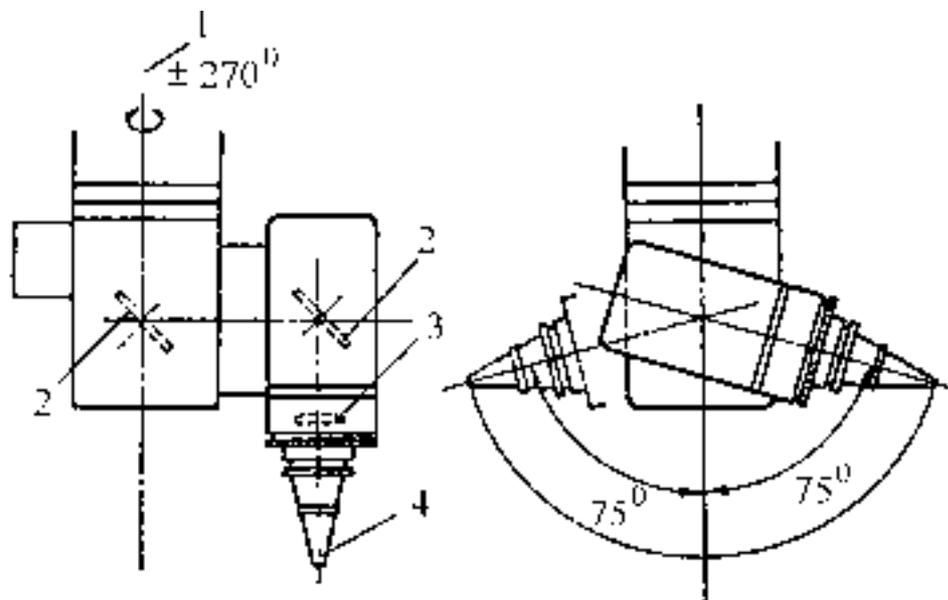
При обработке материалов, поставляемых в рулонах (металлической фольги), или легких длинномерных труб одновременно перемещают зеркало 5, объектив 2 и заготовку 3, которая может вращаться вокруг оси, перпендикулярной оси лазерного пучка, или поступательно перемещаться перпендикулярно оси лазерного пучка (рис. 29, *ж*, *и*). Для передачи излучения при перфорации листовых материалов применяют вращающийся многогранный зеркальный барабан 5 и неподвижную систему зеркал 4 (рис. 29, *з*).



*Рис. 29. Схемы передачи лазерного излучения в зону обработки при переменной длине оптического тракта:*

*1 – излучатель лазера; 2 – объектив; 3 – обрабатываемый материал; 4, 5 – зеркала*

В последнее время разрабатывается все больше установок для лазерной обработки объемных деталей (например, кузовов автомобилей). Для того чтобы осуществить резку деталей объемной формы, необходимо обеспечить пять степеней свободы относительно перемещения лазерного пучка и заготовки. Этот вариант можно реализовать комбинацией некоторых рассмотренных вариантов. Например, пять степеней свободы обеспечивается при вращении зеркала 5 вокруг оси  $x$ , вращении зеркала 4 с зеркалом 5 и объективом 2 вокруг оси  $z$  (см. рис. 29, ж) и поступательном перемещении излучателя 1 по трем осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .



*Рис. 30. Схема устройства, применяемого для лазерной резки объемных деталей:*

*1 – ось лазерного излучения; 2 – зеркала; 3 – линза; 4 – сопло*

В таком варианте ось сфокусированного лазерного пучка будет всегда перпендикулярна поверхности разрезаемого материала. На рис. 30 представлена схема устройства, с помощью которого можно осуществить обработку объемных деталей.

Описание и технические характеристики выпускающегося у нас в стране и за рубежом лазерного технологического оборудования для разделения материалов, которое может использоваться и для резки металлов, представлено в кн. А.М. Григорьянца и А.А. Соколова "Лазерная обработка неметаллических материалов" (М.: Высшая школа, 1988).

### **3.6. Автоматизация процесса лазерной резки**

В современных устройствах для лазерной резки параметры процесса, зависящие от свойств материала, конструкции деталей, энергии, затрачиваемой на разрушение, скорости и характеристик реза, обуславливают параметры лазерного излучения. Такие автоматизированные системы строятся по двухуровневому принципу. На нижнем уровне находятся управляющие устройства для стабилизации или измерения параметров лазера и программные устройства для перемещения луча лазера по заданному контуру детали. Связь между группами устройств осуществляет система автоматизации второго

уровня. Современное развитие микроэлектроники позволяет использовать на обоих уровнях микропроцессорные устройства.

В реальных лазерных технологических комплексах параметры излучения лазера стабилизируются в требуемых пределах и могут изменяться беспрограммно в небольших интервалах. К таким характеристикам относятся: энергетические параметры (КПД, выходная энергия или мощность), угловая расходимость и пространственное распределение излучения, режим работы и временные характеристики излучения.

При поддержании на постоянном уровне параметров излучения собственно управление процессом резки сводится к управлению технологией обработки.

Автоматическое управление перемещением луча лазера по плоскости резания может осуществляться с помощью систем непрерывного копирования чертежа обрабатываемой детали или на основе числового задания траектории движения луча. Первый вариант осуществляется в фотокопировальных системах, а второй – в виде систем числового программного управления (ЧПУ).

В первом случае системы основываются на преобразователях визуальной графической информации (чертежей, схем, графиков), предназначенных для кодирования графически заданных функций и выработки электрических сигналов (в непрерывной или цифровой форме), имеющих общий с преобразуемым графиком закон изменения в зависимости от изменения аргумента. Применять преобразователи графической информации можно в непосредственной связи с обрабатывающим узлом через временной интервал (т. е. данные можно хранить и использовать по мере надобности). Сигнал для преобразователя снимается с пера, следующего по линиям чертежа, или с фотодатчика. Преобразователи графической информации строятся на основе методов следящего и развертывающего считывания. При следящем считывании совмещается линия чертежа с положением считывающего органа (растр-элемента) – электронного или светового луча, фоточувствительной головки, перекрестия визира. Для случая визира необходима обратная связь устройства через человека-оператора. В устройствах развертывающего типа применяется метод динамического компенсационного измерения. При пересечении растр-элемента с линией графического изображения вырабатывается импульс-отметка, временное положение которого через масштабные импульсы переводится в значение графических координат. Выходные сигналы могут быть получены в аналоговой или цифровой форме. Управление преобразователем графиков может быть автономным



ки (скорости) и качества реза. При ГЛР сложно поддерживать скорость резки оптимальной на протяжении всего процесса из-за нестабильности свойств лазерного излучения, неравномерности толщины разрезаемых деталей, изменения условий фокусировки. Уменьшение скорости резки по отношению к оптимальной приводит к снижению производительности обработки, тогда как ее повышение – к понижению качества получаемого реза.

Система, схема которой показана на рис. 31, работает следующим образом. Выходящий из излучателя 1 лазерный луч 2 фокусируется линзой 3 на обрабатываемую деталь 10. Соосно с излучением в зону резки через сопло 4 направляется рабочий газ. С помощью механизма 6 управления скоростью привода 5 рабочего стола вручную устанавливается оптимальная или близкая к ней скорость резки заготовки из заданного материала заданной толщины. Затем механизм управления переводится в автоматический режим работы. При оптимальной скорости резки заготовка прорезается насквозь на расстоянии  $x_1$  от оси лазерного луча. Выходящая из полости реза струя рабочего газа диаметром  $D_{стр}$  проходит между датчиками давления 8 и 9, не попадая на них. В том случае, если скорость резки будет меньше оптимальной, прорезание закончится на расстоянии от оси луча меньше  $x_1$ . При этом выходящая газовая струя отклонится от исходного положения и попадет на датчик давления 8, и он сработает. При превышении же оптимальной скорости резки полное прорезание не успеет произойти за время прохождения лучом расстояния  $x_1$ , поэтому разрезание в нижних слоях материала произойдет без участия лазерной энергии (лишь за счет рабочего газа) и закончится на расстоянии от оси луча больше  $x_1$ . В этом случае сработает датчик давления 9. Сигналы с датчиков давления поступают на вход схемы коммутации 7, которая в зависимости от того, какой из датчиков сработал, выдает соответствующий управляющий импульс на механизм управления, что вызывает изменение скорости перемещения рабочего стола 11. После достижения оптимальной скорости датчики давления отключаются, скорость движения стола стабилизируется.

### **3.7. Технологическое оснащение лазерных комплексов для резки**

К технологическому оснащению лазерных комплексов для резки следует отнести: системы передачи лазерного излучения в зону обработки; устройства установки и закрепления обрабатываемого материала; вентиляционные системы удаления продуктов лазерной обработки. Завершающим этапом преобразования лазерного пучка с по-

мощью оптических или оптико-механических систем является фокусировка. Простейшее устройство для фокусировки показано на рис. 32, а. Для подачи газа в зону обработки между линзой и обрабатываемым материалом расположено сопло в виде усеченного конуса. Газ, выходящий под давлением из сопла соосно лазерному пучку, кроме технологических функций выполняет функцию защиты линзы от продуктов лазерной обработки.

Поверхность линзы фокусирующего устройства, обращенную к обрабатываемому материалу, защищают также с помощью прозрачных неподвижных и вращающихся экранов, вращающихся металлических дисков с окнами на пути прохождения лазерного пучка, экраннирующих диафрагм, магнитных и электроразрядных устройств.

Для фокусировки излучения мощных (свыше 3 кВт) технологических лазеров в целях сохранения высокого ресурса службы фокусирующих элементов целесообразен переход на металлооптику. Примером лазерной резки с применением металлических зеркал, фокусирующих излучение, выходящее из неустойчивого резонатора, может служить конструкция, показанная на рис. 32, б. Кольцевой пучок лазерного излучения входит в устройство через плоское, прозрачное для данной волны излучения окно 7. С помощью зеркальных поверхностей 3 пучок отклоняется в сторону разрезаемого материала и, проходя через сопло 6, фокусируется на обрабатываемом изделии. Газ под давлением подается через отверстия 8 во внутреннюю часть устройства, одновременно охлаждая зеркальные поверхности.

Устройство может иметь также оптическую систему для визуального контроля положения обрабатываемой детали относительно сфокусированного лазерного пучка. Подвижные фокусирующие устройства снабжаются автоматическими следящими системами взаимного положения объектива и обрабатываемой детали. Как уже отмечалось выше, для контроля этого положения применяются контактные, индуктивные и емкостные датчики.

Подвижные фокусирующие устройства устанавливаются на каретках, которые перемещаются по линейным или круговым направляющим в соответствии с заданным законом движения.

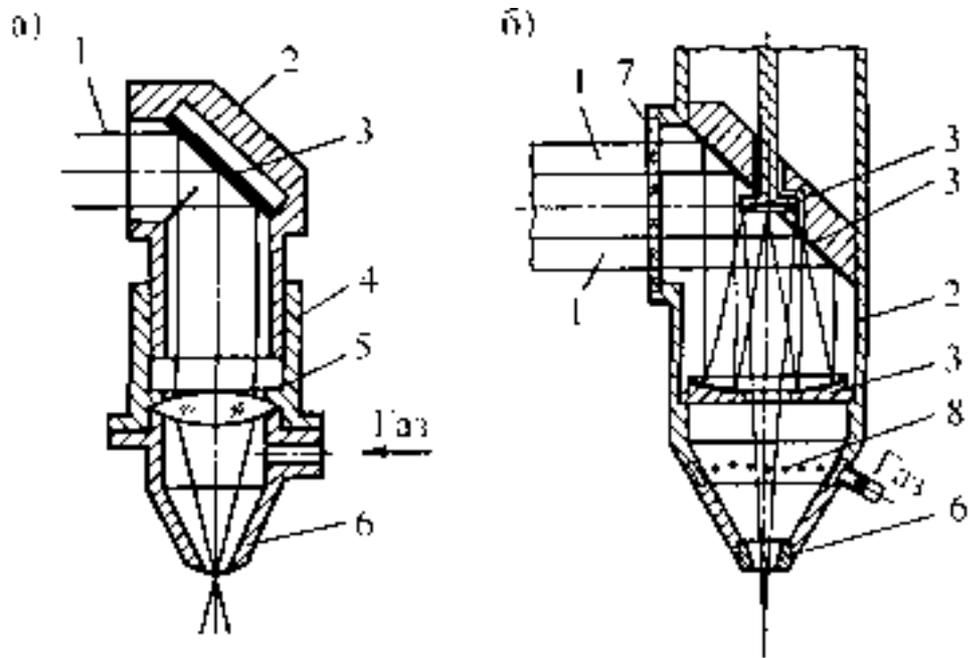


Рис. 32. Конструкция газолазерных резаков:

1 – лазерный пучок; 2 – корпус; 3 – зеркало; 4 – тубус; 5 – линза; 6 – сопло;  
7 – плоское окно; 8 – отверстия для подачи газа

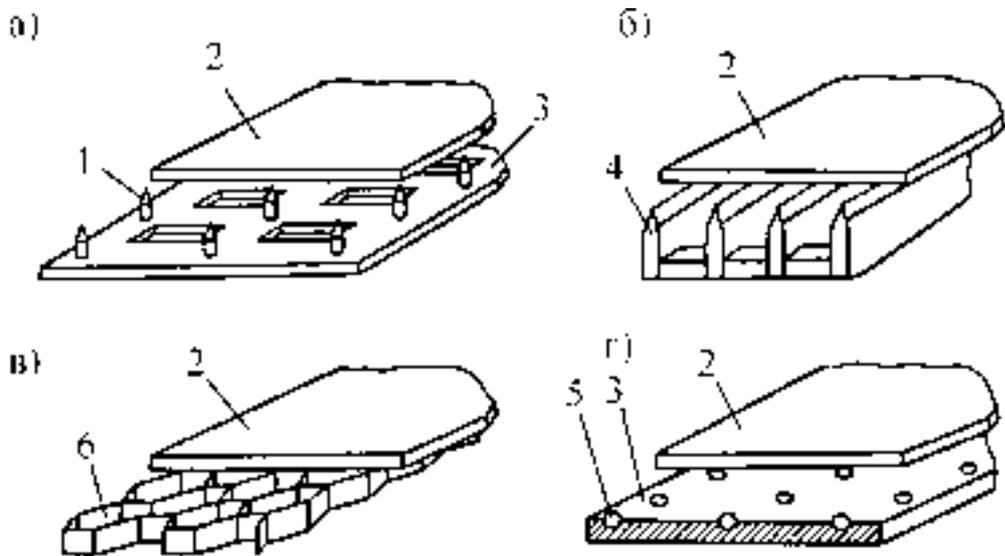


Рис. 33. Рабочая поверхность стола:

1 – стержни; 2 – обрабатываемый материал; 3 – поверхность стола; 4 – пластины;  
5 – шарики; 6 – сотовые панели

Рабочая поверхность стола 3 (рис. 33, а – г) лазерной установки и поверхность обрабатываемого материала 2, обращенная к столу, не должны подвергаться воздействию лазерного излучения. Поэтому рабочая поверхность стола выполняется в виде точечных или линей-

ных элементов, соединенных между собой в опорные блоки. Точечными опорными элементами могут быть стержни 1 (рис. 33, а) и шарики 5 (рис. 33, з), линейными – наборы отдельных пластин 4 (рис. 33, б) или сотовые панели 6 (рис. 33, в). Для рассеяния лазерного пучка поверхности опорных элементов стола, обращенные к обрабатываемому материалу, изготавливаются коническими, сферическими, пирамидальными или призматическими. При обработке материалов с малой жесткостью в качестве опорной поверхности стола могут быть использованы перфорированные плиты.

Обычно опорные элементы неподвижны относительно стола. Когда листовый материал во время обработки перемещается относительно стола, на поверхности последнего располагаются в гнездах вращающиеся шарики (рис. 33, з). Разрезаемый лист, закрепленный в захватах исполнительного механизма лазерной технологической установки, катится на опорных шариках, не контактируя непосредственно с неподвижным столом.

Неподвижные опорные элементы стола изготавливаются из материала с высокой теплопроводностью (алюминий, латунь, медь).

Стол лазерной технологической установки выполняется как неподвижным, так и с возможностью возвратно-поступательного, вращательного и других движений. На рабочей поверхности неподвижного стола обрабатываемый материал чаще всего не закрепляется. При необходимости фиксации обрабатываемого материала применяются специальные приспособления.

Продукты лазерной обработки (газ, частицы материала) удаляются из рабочей зоны вентиляционной системой. При этом может быть осуществлен отсос продуктов обработки как со всего рабочего поля стола установки, так и местный – из зоны воздействия лазерного излучения. Разряжение под рабочим столом, образующееся в результате работы вентиляционной системы, используется и для закрепления обрабатываемого материала к поверхности стола.

## Заключение

Изучение дисциплины ИОТЛ в современном виде показывает, что новая область техники – инженерные основы технологических лазеров – находится в стадии становления и развития. Далеко не все типы лазеров и виды соответствующего технологического и инженерного оборудования достигли уровня промышленно выпускаемых изделий, образцов, удовлетворяющих всем требованиям лазерной технологии и промышленной эксплуатации. Соответственно, значительная часть сведений, излагаемых в курсе, относится к результатам пока чисто научных исследований; эти сведения необходимы для понимания перспектив развития лазерной техники.

Другим итогом изучения курса является вывод о необходимости глубокого знания устройств лазерной техники не только ее разработчиками, но и пользователями, занимающимися проблемами лазерной технологии. Зная потребности промышленного предприятия в данном виде лазерной обработки, технолог, владеющий основами ИОТЛ, сможет обосновать выбор нужного типа ТЛ и его внешней технологической оснастки или выбор нужного АЛТК и обеспечить оптимальные условия эксплуатации ТЛ в условиях промышленного предприятия.

Дальнейшее развитие дисциплины ИОТЛ связано, с одной стороны, с усовершенствованием техники созданных типов лазеров, а с другой – с созданием и развитием новых типов ТЛ.

Усовершенствование техники созданных типов ТЛ происходит по следующим направлениям: повышение средней мощности лазеров; улучшение угловой расходимости и стабильности излучения; повышение экономичности, надежности и ресурса лазеров; создание оптических систем формирования, позволяющих иметь любое нужное пространственное распределение излучения; создание адаптивных автоматизированных систем управления ТЛ в реальном масштабе времени, в соответствии с требованиями оптимального хода технологического процесса лазерной обработки.

В ближайшие годы ожидается создание (или развитие) новых типов ТЛ: газодинамических  $\text{CO}_2$  лазеров; импульсно-периодических эксимерных газоразрядных лазеров (с длиной волны излучения 0,16...0,3 мк, средней мощности до 1 кВт и более); химических лазеров, твердотельных лазеров на новых кристаллах со средней мощностью до 1 кВт и выше.

## Список литературы

1. Абильтсиитов Г.А., Велихов Е.П., Голубев В.С. Мощные газоразрядные CO<sub>2</sub> лазеры и их применение в технологии. – М.: Наука, 1984.
2. Абильтсиитов Г.А., Голубев В.С., Лебедев Ф.В. Перспективы схемы и методы накачки мощных CO<sub>2</sub> лазеров для технологии // Изв. АН СССР. Сер. физическая. 1983. 47. № 8. С. 1497 – 1506.
3. Басов Н.Г., Данилычев В. А. Мощные лазеры в технологии // Наука и человечество. 1985. С. 261 – 278.
4. Веденов А.А. Физика электроразрядных CO<sub>2</sub>-лазеров. – М.: Энергоиздат, 1982.
5. Велихов Е.П., Баранов В.Ю., Летохов В.С. Импульсные CO<sub>2</sub>-лазеры и их применение для разделения изотопов. – М.: Наука, 1983.
6. Велихов Е.П., Баранов В.Ю., Летохов В.С. Газовые лазеры/ Под ред. Р.И. Солоухина. – Новосибирск: Наука, 1977.
7. Велихов Е.П., Баранов В.Ю., Летохов В.С. Лазеры в технологии / Под ред. М. Ф. Стельмаха. – М.: Энергия, 1975.
8. Летохов В.С. Мощные лазеры и их применение. – М.: Советское радио, 1980.
9. Устинов Н. Д. Справочник по лазерам / Под ред. А.М. Прохорова, Т. I и II. – М.: Советское радио, 1978.
10. Голубев В.С., Лебедев Ф.В. Инженерные основы создания технологических лазеров. - М.: Высшая школа, 1987.