

Фокусировка лазерного излучения

Для успешной реализации любого технологического процесса лазерной обработки необходима разработка соответствующей оптической системы, являющейся важным элементом современной лазерной установки

Под оптической системой в широком смысле слова следует понимать оптический резонатор лазера, фокусирующую, управляющую оптику и другие оптические элементы системы преобразования параметров лазерного луча.

Характеристики оптических резонаторов, применяемых в лазерных технологических установках

Система зеркал, расположенная определенным образом и обеспечивающая существенное увеличение эффективной длины активной среды в результате многократного отражения излучения между зеркалами, называется оптическим резонатором.

В ранних конструкциях твердотельных технологических лазеров были использованы оптические резонаторы с плоскопараллельными зеркалами. Однако в таком резонаторе имеют место большие дифракционные потери, и лазерное излучение на выходе из него характеризуется нестабильностью энергетических параметров

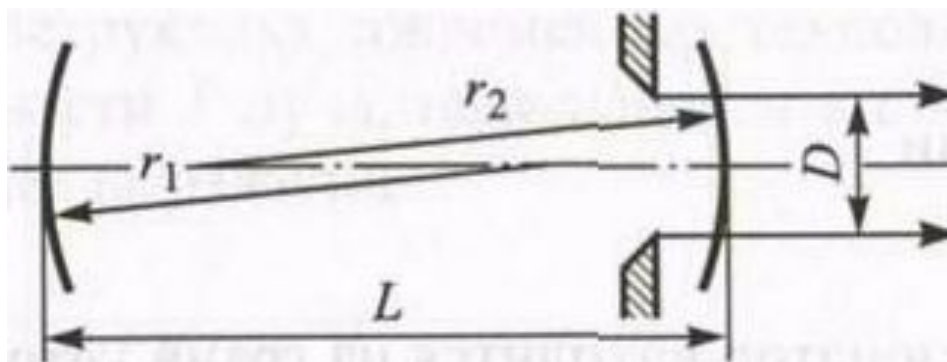


Рис. 1.22. Основные параметры резонатора

В современных оптических резонаторах, как правило, применяют сферические зеркала или комбинации сферического и плоского зеркал. Основными параметрами оптического резонатора являются радиусы кривизны отражающих поверхностей r_1 и r_2 , расстояние между зеркалами L , а также диаметр апертурной диафрагмы D ограничивающей поперечный размер пучка (рис. 1.22). Оптические резонаторы характеризуются следующими обобщенными параметрами:

$$q_1 = \lambda - L/r_1$$

$$q_2 = \lambda - L/r_2$$

При выполнении условия $0 < q_1 q_2 < 1$

резонатор называется устойчивым. В таком резонаторе луч света, отклонившийся от оптической оси, при многократных отражениях от зеркал остается вблизи оси.

Если это условие не выполняется, т.е. произведение больше 1 или меньше 0, то луча от резонатор является неустойчивым. Т.е. незначительное отклонение луча от оптической оси после серии отражений приведет к его удалению от оси и выходу луча из резонатора. При выполнении этого условия резонатор находится на грани устойчивости /

В современных лазерах используют как устойчивые, так и неустойчивые резонаторы. В ряде случаев, особенно в лазерах с оксидом или диоксидом углерода в качестве активной среды, иногда предпочтительней применять неустойчивые резонаторы. Следует отметить, что световой пучок на выходе из такого резонатора имеет кольцеобразное поперечное сечение.

Лазерное излучение, формируемое в резонаторе, характеризуется острой направленностью, т. е. малой угловой расходимостью. Это означает, что энергия лазерного излучения может быть эффективно передана на большое расстояние сфокусирована на весьма малых площадках.

Расходимость лазерного излучения может быть вызвана : дифракцией луча на выходной апертуре резонатора, оптической неоднородностью рабочей среды лазера, деформацией зеркал резонатора и др.

Практическую ценность при проведении технологических процессов представляет такой показатель, как энергетическая расходимость, определяемая плоским или телесным углом при вершине конуса, внутри которого распространяется заданная доля энергии или мощности пучка излучения. Данный показатель может быть рассчитан по специальной методике.

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ЛАЗЕРНЫХ УСТАНОВОК

Лазерное излучение, полученное на выходе из резонатора лазерной установки, нельзя непосредственно использовать для обработки материалов. Это связано с тем, что диаметр излучения составляет от нескольких миллиметров до нескольких десятков миллиметров и при этом не обеспечивается высокая степень концентрации энергии. Для увеличения концентрации энергии необходимо преобразовать лазерное излучение таким образом, чтобы на поверхности обрабатываемой детали лазерный луч имел значительно меньший диаметр (порядка сотых или десятых долей миллиметра). Это достигается с помощью оптических фокусирующих систем—линзовых или зеркальных.

В различных технологических процессах лазерной обработки материалов возникает необходимость изменить направление лазерного излучения, переместить лазерный луч в процессе обработки. С этой целью используются различные зеркальные оптические системы преобразования лазерного излучения.

В зависимости от назначения зеркала геометрическая форма его поверхности может быть плоской либо криволинейной (сфера, парабола, гипербола и др.).

Плоские зеркала применяют для поворота лазерного излучения.

Криволинейные зеркала (в первую очередь сферические) используют для фокусировки лазерного излучения.

Зеркала технологических лазеров в основном изготавливают с металлической отражающей поверхностью. При попадании лазерного излучения на поверхность металла происходит зеркальное отражение, диффузное рассеяние и поглощение в приповерхностном слое. Чтобы уменьшить диффузное рассеяние и поглощение, поверхность зеркала тщательно обрабатывают для достижения минимально возможной шероховатости. Металл для зеркал выбирают из условия обеспечения максимальной отражательной способности, характеризуемой коэффициентом $R_{отр}$

зеркального отражения, представляющего собой отношение зеркально отраженной энергии к энергии падающего излучения. Чем ближе $R_{отр}$ к единице, тем выше качество зеркала и меньше потери энергии излучения при отражении. В табл. 1.1 даны значения $R_{отр}$ ряда металлов для различной длины волны лазерного излучения.

1.1. Коэффициент отражения различных металлов

Металл	R _{отр} , % при длине волны лазерного излучения, мкм			Металл	R _{отр} , % при длине волны лазерного излучения, мкм		
	0,69	1,06	10,6		0,69	1,06	10,6
Al	87	93	98	Cr	56	58	93
Ag	95	97	99	Ni	68	75	95
Cu	82	91	99	Сталь	58	63	93...95

Требования к материалу, используемому для изготовления зеркал:

- $R_{отр} \geq 98\%$;
- **высокий коэффициент теплопроводности** для быстрого отвода теплоты от рабочей поверхности зеркала;
- **высокая твердость** с целью облегчить полирование поверхности зеркала, обеспечить ее стойкость к разрушениям и низкую шероховатость $R_a \leq 10—20 \text{ нм}$;
- **химическая стойкость** поверхности зеркал к воздействию окружающей среды в процессе эксплуатации.

-

Для этого используют многослойные покрытия из различных материалов. Например, зеркало на медной основе, на которую наносят слой никеля (облегчает полирование), а затем напыляют слой золота (обеспечивает высокий коэффициент отражения и практически не окисляется в процессе эксплуатации)

Как правило, металлические поверхности зеркал подвергают суперполированию (т. е. обработке суперабразивной суспензией) с целью уменьшить шероховатость до $R_a \leq 1—10 \text{ нм}$. После полирования и суперполирования осуществляют финишную обработку (ионно-лучевую; плазменную; химическую и др.).

В последние годы широко применяют **алмазное точение**, повышающее производительность изготовления зеркал в 6—10 раз по сравнению с суперполированием.

При большой мощности излучения технологического лазера ($P > 1$ кВт)

применяют охлаждаемые; (как правило, проточной водой) зеркала

с целью не допустить перегрева и окисления рабочей поверхности зеркала и уменьшить его тепловые деформации.

Для лазерной обработки применяют разнообразные оптические системы. В большинстве случаев основной задачей является обеспечение относительного перемещения луча и обрабатываемой детали. В случае обработки тяжелых, крупногабаритных деталей перемещают лазерный луч, а в случае обработки малогабаритных деталей—обрабатываемую деталь.

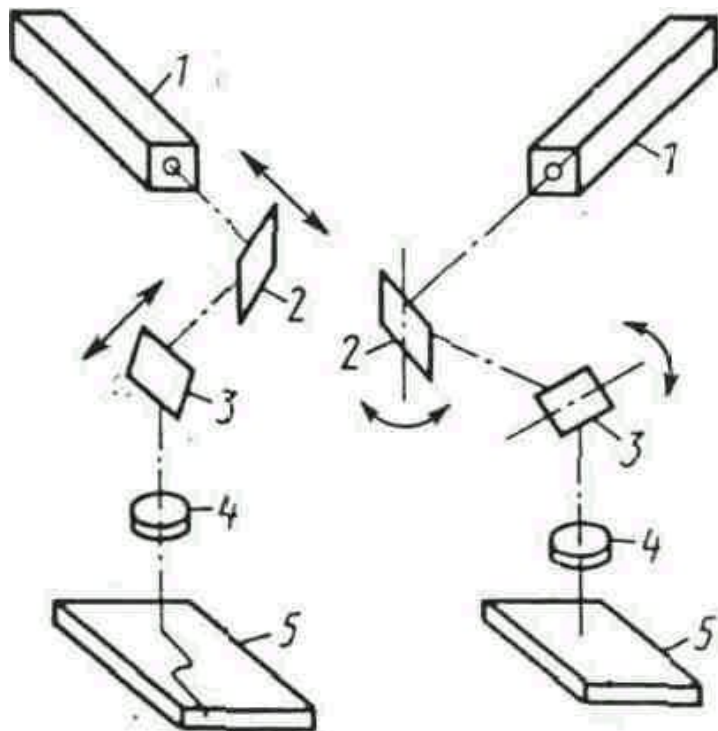


Рис. 1

Рис. 1 . Системы перемещения луча путем линейных перемещении или поворота двух зеркал:

1 — лазер, 2, 3 — плоские зеркала, 4 — фокусирующее устройство, 5 — обрабатываемая деталь.

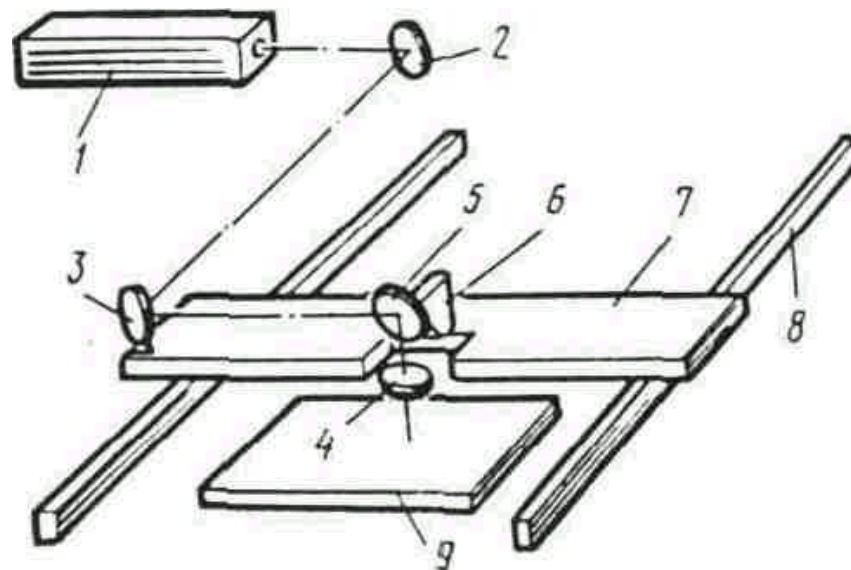


Рис. 2

Рис. 2. Система перемещения луча тремя зеркалами;

1 — лазер, 2, 3, 5 — плоские зеркала. 4 — фокусирующее устройство, 6 — каретка для крепления зеркала, 7 — подвижная рама, 8 — рельс. 9 — обрабатываемая деталь.

Обработка неподвижных деталей может осуществляться по любому заданному контуру с помощью двух подвижных зеркал (рис. 1). Плоские зеркала 2 и 3 (рис. 1) перемещаются линейно: зеркало 2—вдоль оси выходящего из лазера / луча, а зеркало 3—вдоль оси луча, отраженного от зеркала 2. Фокусирующее устройство 4 и зеркало 3 перемещаются синхронно с зеркалом 2. Перемещение луча можно осуществить и путем поворота зеркал 2 и 3 в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

На рис. 2 система перемещения лазерного луча с помощью трех поворотных плоских зеркал, содержащая подвижную раму 7, перемещающуюся по рельсам 8 над обрабатываемой крупногабаритной деталью 9. Зеркало 2 направляет лазерный луч параллельно направлению перемещения рамы 7, зеркало 3—вдоль рамы 7. Зеркало 5 установлено на каретке 6, перемещающейся совместно с фокусирующим устройством 4 вдоль рамы 7.

Известно большое число конструкций оптических систем, используемых для управления перемещением лазерного луча по различным траекториям для обработки простых и сложных деталей. Следует также отметить, что лазерное излучение легко поддается регулированию и управлению путем его деления на несколько частей с помощью простые оптических устройств.

Для фокусировки лазерного излучения применяют как прозрачную оптику проходного типа (линзы), так и отражательную металлооптику (зеркала).

Для фокусировки лазерного излучения малой мощности ($P = 1\text{—}3$ кВт) используют прозрачные линзы, а для фокусировки , лазерного излучения повышенной мощности — зеркала, обеспечивающие значительно больший срок службы. Применяют как одиночные фокусирующие зеркала, так и более сложные по конструкции, но зато и более эффективные двух зеркальные объективы Кассегрена

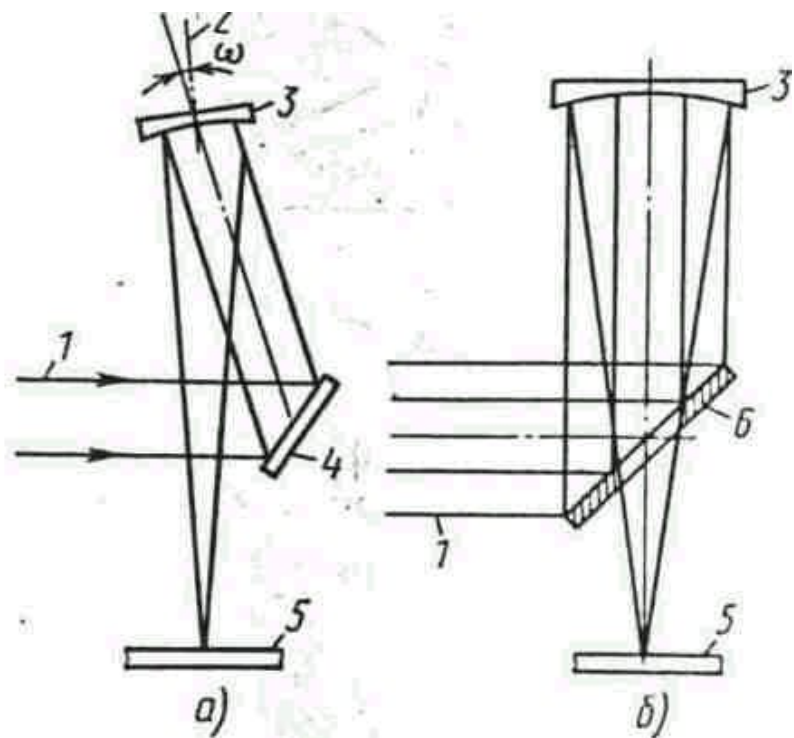


Рис. 3. Схемы лазерной обработки с
 одиночным фокусирующим
 зеркалом, наклоненным под углом к
 лучу (а) и соосным с лучом (б): 1 —
 лазерный луч, 2 — ось зеркала. 3 —
 фокусирующее зеркало, 4 — плоское
 сплошное зеркало, 5 —
 обрабатываемая деталь, б —
 плоское кольцевое зеркало

На рис. 3 показаны схемы лазерной обработки с использованием вогнутого фокусирующего зеркала и поворотного плоского зеркала.

На рисунке представлены две схемы. В первой схеме, исходное лазерное излучение 1 имеет сплошное сечение, в этом случае применяют плоское сплошное зеркало 4 и фокусирующее сферическое зеркало 3, установленное под углом ω к оси падающего на него луча.

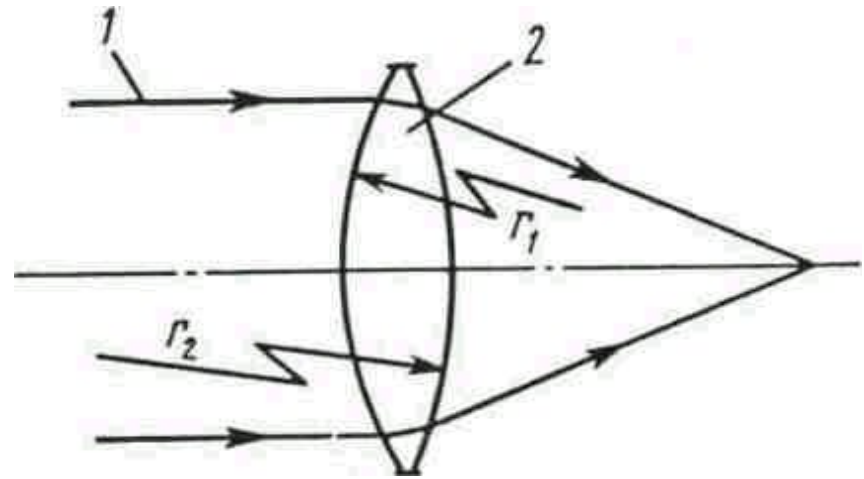
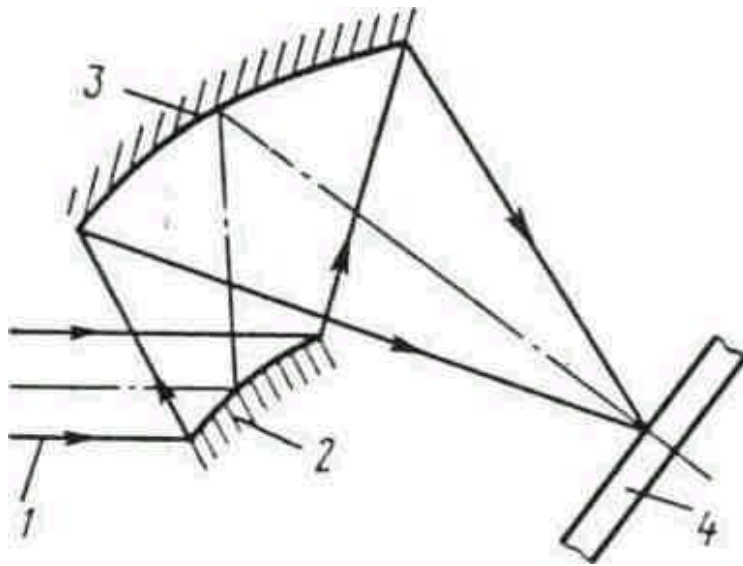
Во второй схеме, где исходное лазерное излучение 1 имеет кольцевое сечение применяют плоское кольцевое зеркало 6.

Наибольшими возможностями фокусировки лазерного излучения облагают внеосевые объективы Кассегрена (рис. 4), состоящие из выпуклого зеркала 2 и вогнутого зеркала 3.

Этот двух зеркальный объектив позволяет достичь высокой концентрации энергии лазерного излучения.

Фокусировка лазерного излучения сравнительно небольшой мощности (до 1—3 кВт) осуществляется линзами из оптически прозрачных материалов. Наилучшие условия фокусировки (т. е. минимальный диаметр пятна сфокусированного излучения) удастся получить при фокусировке луча двояковыпуклой линзой (рис. 5) с неравными радиусами кривизны поверхности ($r_1 < r_2$); при этом линза должна быть установлена более выпуклой стороной к излучению. •

Для технологических CO₂-лазеров с длиной волны излучения $\lambda = 10,6$ мкм в качестве материала при изготовлении линз используют искусственные оптические кристаллы из хлористого натрия (NaCl), хлористого калия (КС1), фтористого натрия (NaF) и др. Также используют оптические линзы из германия (Ge), селенида цинка (ZnSe), кремния (Si), арсенида галлия (GaAs), имеющие более высоким коэффициент преломления и вследствие этого увеличенные потери на отражение. Поэтому на эти материалы наносят интерференционные просветляющие покрытия. Простые, дешевые в изготовлении линзы из монокристаллов КС1 и NaCl, имеющие небольшие показатели преломления и обеспечивающие малые потери на отражение, используют без покрытия. Недостатками этих материалов являются их гигроскопичность, низкая прочность и малая стойкость при эксплуатации.



Рис; 4. Схема внеосевого фокусирующего объектива Кассегрена:
 / — лазерный луч. 2 — выпуклое зеркало, 3 — вогнутое зеркало. 4 — обрабатываемая деталь

Рис. 5. Схема фокусировки излучения прозрачной линзой:
 / — лазерный луч, 2 — двояковыпуклая линза ($R_1 < R_2$)

Фокусировка излучения твердотельных технологических лазеров с длиной волны $\lambda=0,69$ мкм и $\lambda=1,06$ мкм осуществляется стеклянными линзами.

Для сварки кольцевых швов на плоскости предлагается применять аксиконы в виде прозрачных конусов, обращенных основанием к лучу (рис. 6), или экраны с кольцевым отверстием, преобразующие излучение сплошного сечений в кольцевое излучение. Полученное таким образом кольцевое излучение далее проходит через фокусирующую систему для увеличения концентрации энергии путем уменьшения ширины кольца излучения, что создает на свариваемом изделии кольцевое распределение энергии. Сварка деталей может быть выполнена за один импульс без перемещения луча или деталей. Из-за большой площади поперечного сечения сфокусированного излучения использование описанного устройства не позволяет обеспечивать высокую плотность энергии на свариваемых деталях. Поэтому область применения такого способа ограничивается сваркой ил наплавкой с малой глубиной проплавления.. Этот способ можно рекомендовать для термообработки кольцевых участков, где требуемая плотность мощности несколько меньше, чем для сварки и наплавки.

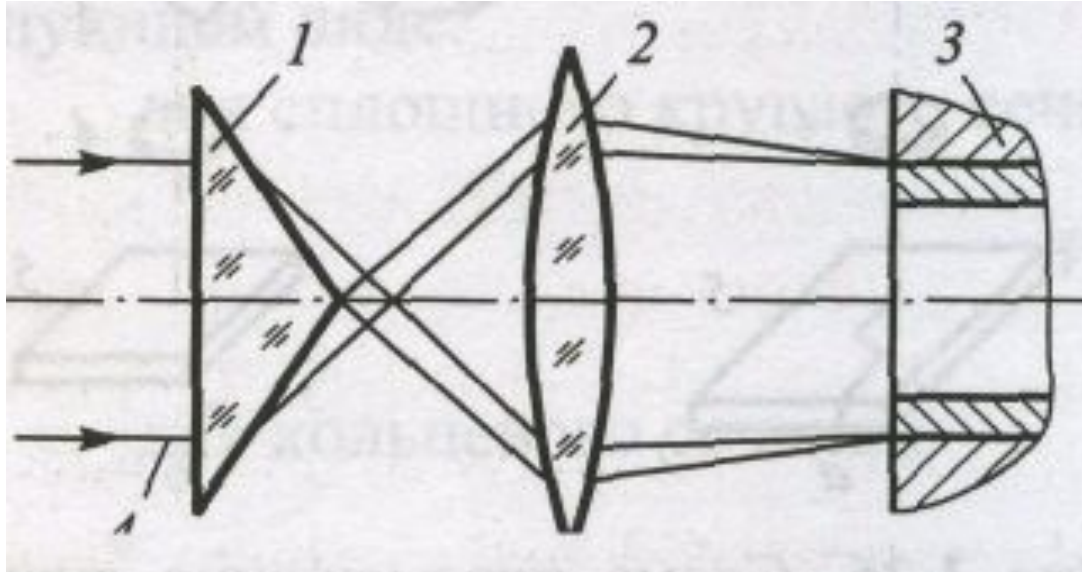


Рисунок 6 Преобразование излучения сплошного круглого сечения в излучение кругового сечения: 1 – аксикон; 2- фокусирующая линза; 3 – деталь; 4 – лазерный луч.

Определенный интерес представляет лазерное устройство для обработки поверхностей цилиндрических деталей, состоящее из трех конических зеркал и фокусирующей линзы (рис. 7). Зеркало 2 имеет внешнюю отражательную поверхность, а зеркала 3 и 6 — внутреннюю. Зеркала 2 и 6 преобразуют исходное излучение сплошного или кольцевого сечений в кольцевое излучение большего диаметра. Сфокусированное линзой 5 лазерное излучение после отражения устройством зеркалом 3 попадает на деталь 4. Обработка деталей осуществляется сразу по всей кольцевой поверхности. Плотность энергии на поверхности деталей можно регулировать перемещением линзы вдоль ее оси. Недостатком этого устройства является низкая плотность энергии на обрабатываемой поверхности.

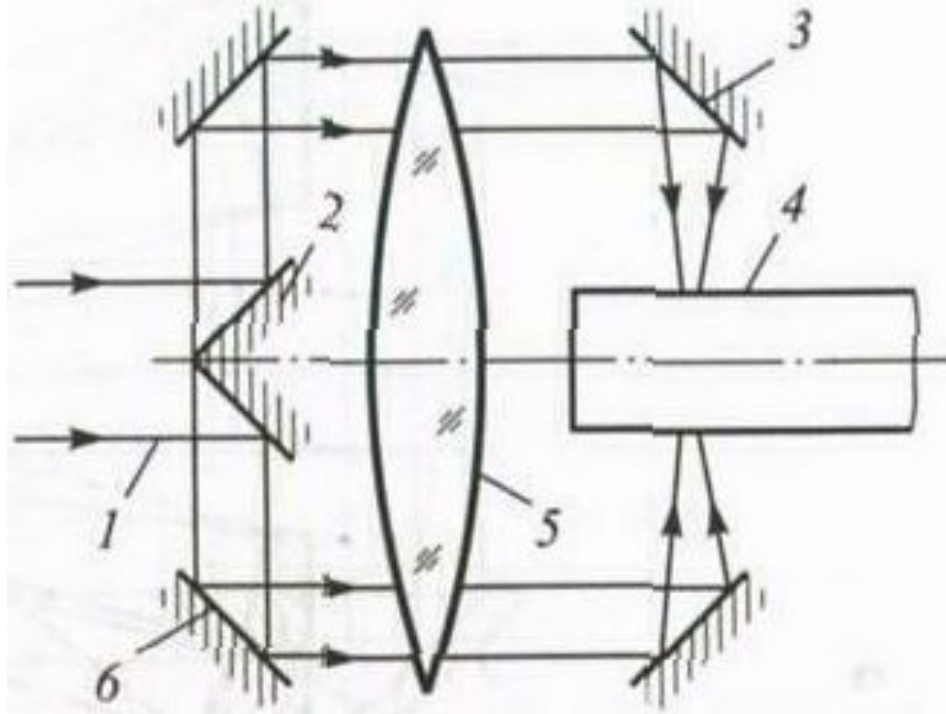


Рисунок 7. Схема для обработки поверхностей цилиндрических деталей.

Лазерное излучение легко поддается регулированию и управлению путем его деления на несколько частей с помощью простых оптических устройств. Это свойство излучения можно эффективно использовать при осуществлении подогрева околошовной зоны в целях уменьшения скорости охлаждения в процессе сварки, подогрева шва или наплавленного металла сразу после осуществления сварки для проведения местного отпуска и в других целях. Известна простая система для деления лазерного луча с помощью фокусирующей линзы с центральным отверстием (рис. 8). Часть лазерного луча 2 беспрепятственно проходит через отверстие 1 в фокусирующей линзе 3 к свариваемой детали 4 и образует на соединяемых кромках детали круглое пятно нагрева с низкой плотностью энергии, достаточной для осуществления подогрева. Периферийная часть лазерного луча фокусируется линзой в месте сварки

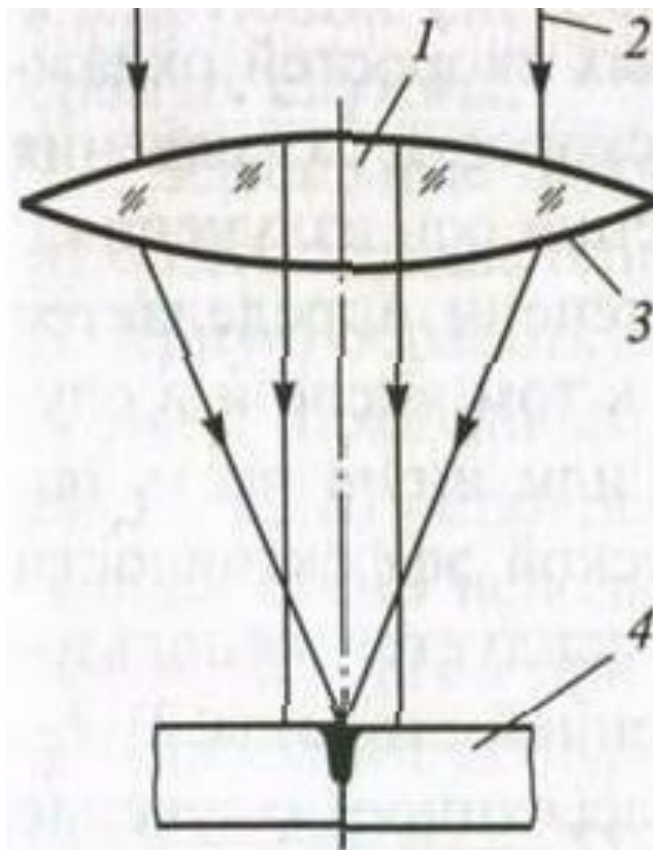


Рисунок 8. Схема сварки с подогревом околошовной зоны.

Лазерный луч можно разделить с помощью устройства, выполненного по конструкции осесимметричного обращенного объектива Кассегрена (рис. 9), Лазерный луч / отражается от выпуклого зеркала 2 и попадает на я кольцевых вогнутых зеркала 4 и 5, имеющих различные фокусные расстояния. Часть излучения, попавшего на внутреннее зеркало 5, фокусируется на малое пятно в целях получения высокой концентрации энергии для обработки детали Фокусное расстояние внешнего зеркала 4 больше, чем внутреннего; с помощью этого зеркала осуществляется фокусировка лазерного излучения в виде кольцевого сечения. Плотность энергии такого излучения должна быть достаточной для подогрева свариваемых кромок и достижения требуемых скоростей охлаждения шва и околошовной зоны. Температура подогрева и скорость охлаждения регулируются перемещением внешнего зеркала 4 в направлении оси излучения

Оптические системы обеспечивают возможность плавного регулирования интенсивности излучения непосредственно в процессе обработки. Это достигается перемещением фокусирующей системы вдоль оси излучения, вследствие чего фокус линзы удаляется или приближается к обрабатываемой поверхности. При этом концентрация энергии в пятне нагрева уменьшается.

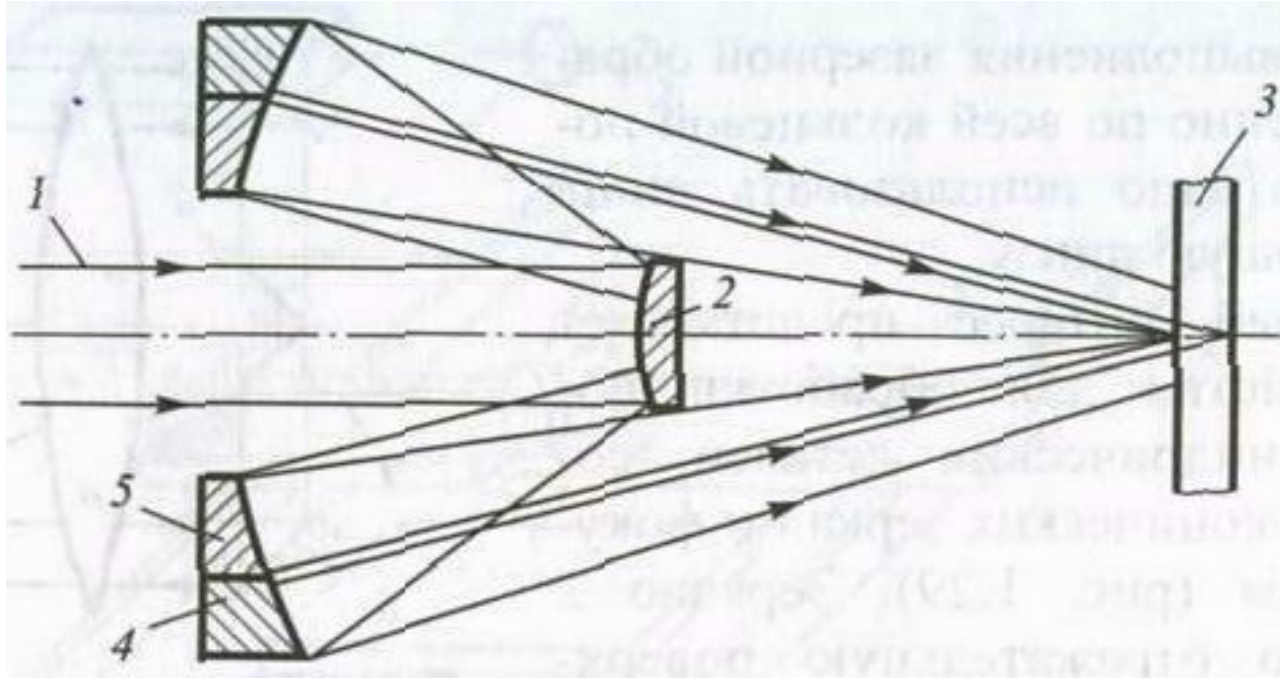


Рисунок 9. Схема устройства для сварки с подогревом с помощью осесимметричного обращенного объектива Кассегрена.

Для фокусировки лазерного излучения применяют как прозрачную оптику проходного типа (линзы), так и отражательную металлооптику (зеркала). Фокусирующие прозрачные линзы используют при мощности лазерного излучения до 1 кВт. В случае более высоких значений мощности применяют зеркальные фокусирующие системы из металлооптики, обеспечивающие значительно больший срок их службы.

Зеркальные фокусирующие системы используют в виде одиночного фокусирующего зеркала или какого-либо варианта двухзеркального объектива Кассегрена. Лазерную обработку одиночным фокусирующим зеркалом можно осуществлять по схемам, показанным на рис. 10. Фокусирующее сферическое зеркало 1 (см. рис. 10, а) установлено под углом ω к оси падающего на нее лазерного луча. В данной схеме используется дополнительно плоское отклоняющее зеркало 2, которое необходимо при обработке крупногабаритных деталей. Если обрабатываемые детали имеют небольшие размеры, то лазерное излучение можно направлять непосредственно на фокусирующее сферическое зеркало (по траектории отраженного от плоского зеркала излучения). В схеме, приведенной на рис. 10, б, используется плоское кольцевое зеркало б, а фокусирующее сферическое зеркало 2 установлено соосно с падающим излучением. Такую схему фокусировки целесообразно применять в тех случаях, когда лазерное излучение имеет кольцевое сечение

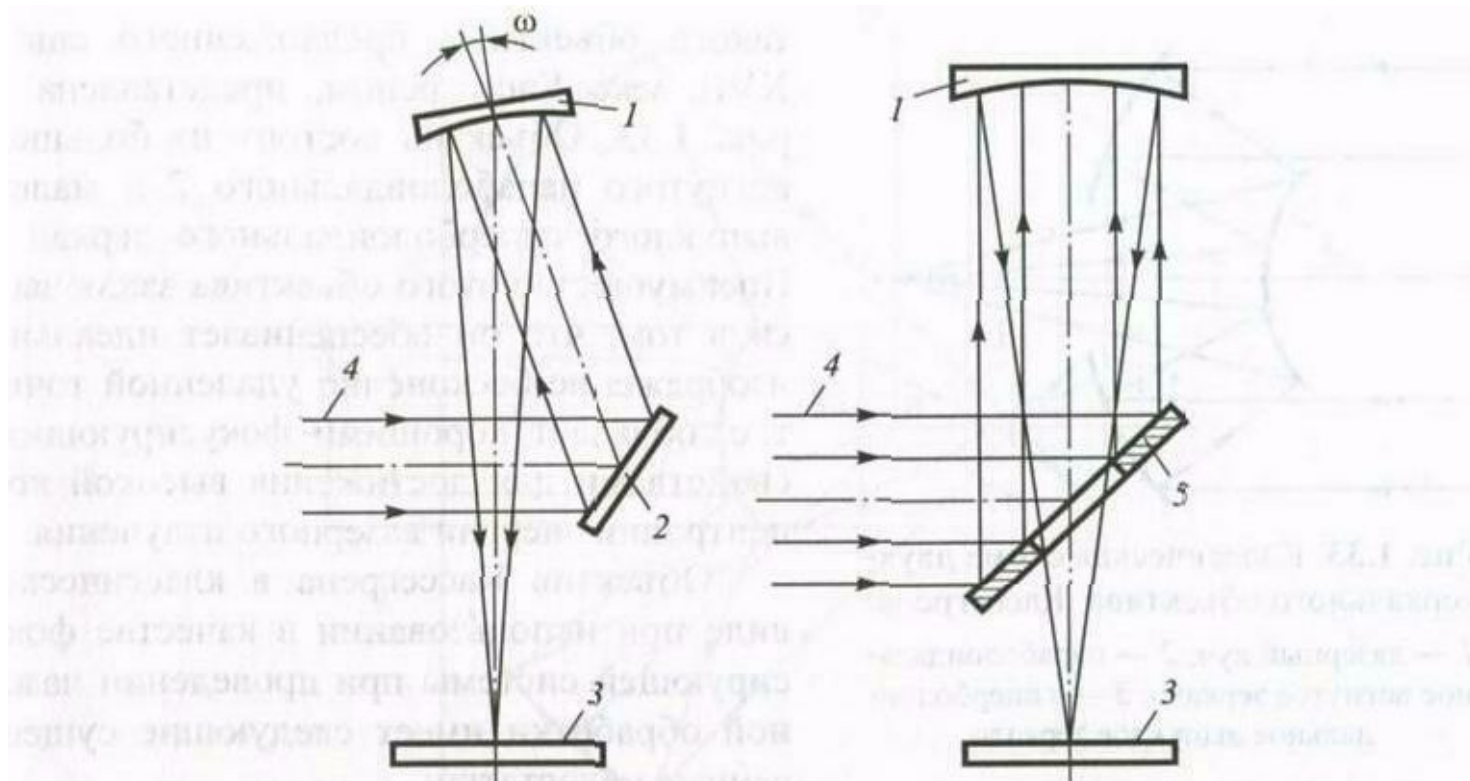


Рис. 10. Схемы обработки с плоским (а) и плоским кольцевым (б) одиночным фокусирующим зеркалом:

1 — сферическое зеркало; 2 — плоское отклоняющее зеркало; 3 — деталь; 4 — лазерный луч; 5 — плоское кольцевое зеркало.

Перспективными при фокусировке мощного лазерного излучения для технологических целей являются двухзеркальные объективы. Классическая схема такого объектива, представлена рис. 11. Объектив состоит из большого вогнутого параболического 2 и малого выпуклого гиперболического зеркала 3. Преимущество этого объектива заключается в том, что он обеспечивает идеальное изображение бесконечно удаленной точки, т.е. обладает хорошими фокусирующими свойствами для достижения высокой концентрации энергии лазерного излучения.

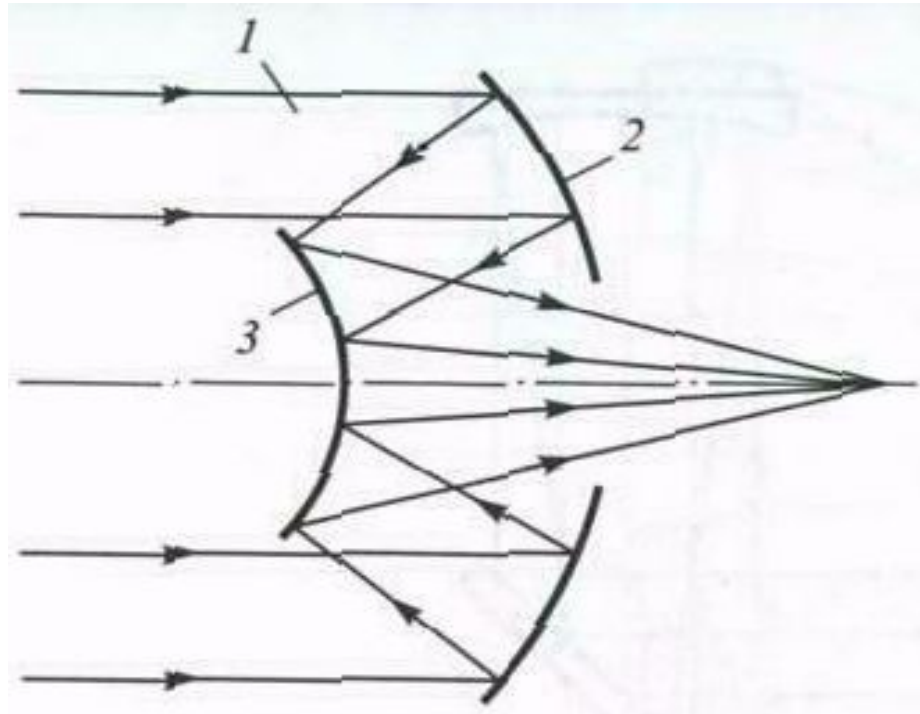


Рисунок 11. Классическая схем двухзеркального объектива Кассегрена

Объектив Кассегрена в классическом виде при использовании в качестве фокусирующей системы при проведении лазерной обработки имеет следующие существенные недостатки:

экранирование излучения малым зеркалом в случае, когда внутренний диаметр кольцевого луча меньше диаметра малого зеркала;

сложность изготовления параболоидальных и гиперболоидальных зеркальных поверхностей;

высокая концентрация энергии на малом зеркале, что приводит к геометрическому искажению отражающей поверхности вследствие тепловых деформаций и ухудшению фокусирующих характеристик.

При лазерной обработке для устранения недостатков классической схемы было предложено использовать обращенный осевой объектив Кассегрена (рис. 1.34), состоящий из двух сферических зеркал. Применение такой схемы фокусировки позволяет устранить второй и третий недостатки классической схемы с сохранением возможности экранировки центральной части лазерного излучения. Поэтому при использовании в технологии такого объектива необходимо, чтобы лазерный луч имел строго кольцевое сечение с внутренним диаметром $d_{в}$ меньшим диаметра малого зеркала D . Кроме того, накладывается ограничение на расстояние от лазера до места обработки, так как с удалением от резонатора правильная кольцевая форма излучения искажается.

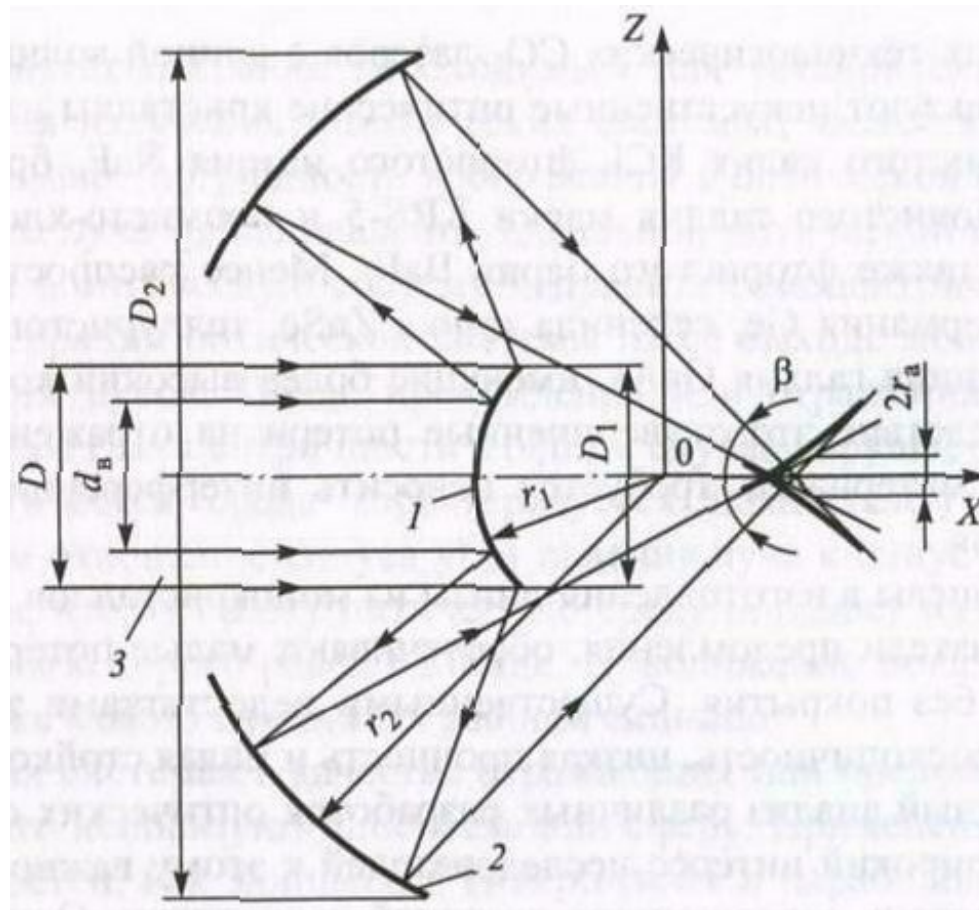


Рис. 12 Схема фокусировки лазерного излучения обращенным осевым объективом

Кассегрена:

1 — малое выпуклое сферическое зеркало; 2 — большое вогнутое кольцевое сферическое зеркало; 3 — лазерный луч

СВОЙСТВА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Энергетические характеристики лазерного излучения.

Основной энергетической характеристикой лазерного излучения является его мощность P . Для лазеров, работающих в импульсном и импульсно-периодическом режимах генерации, к таким характеристикам относятся энергия лазерного импульса W_i , его длительность t_i частота следования этих импульсов f_i , а также средняя $P_{ср}$ и импульсная P_i мощности излучения. (см. форм.)

Технологические процессы часто характеризуют плотностью мощности или плотностью энергии, т. е. мощностью или энергией, приходящейся на единицу поверхности в пятне нагрева,

Важной энергетической характеристикой также является КПД лазера.

Общий энергетический КПД лазера определяют как отношение мощности или энергии излучения (в случае импульсного режима работы) к потребляемой для генерации электрической мощности (или энергии).

Монохроматичность лазерного излучения.

Она характеризует свойство лазеров излучать в узком диапазоне длин волн. Ширина спектра излучения лазера зависит от числа линий, на которых происходит генерация.

При проведении технологических процессов монохроматичность лазерного излучения имеет важное значение. Так, отсутствие хроматических аберраций при фокусировке позволяет получить малый диаметр пятна излучения в зоне обработки. Кроме того, важное значение это свойство имеет при использовании технологий, основанных на селективности воздействия лазерного излучения на определенные компоненты обрабатываемого материала.

Когерентность лазерного излучения.

Под когерентностью понимают согласованное протекание во времени и пространстве нескольких колебательных или волновых процессов. При этом волны имеют одинаковый период и неизменный сдвиг фаз колебаний в каждой точке. В случае когда излучение лазера когерентно, связанные с ним колебания электромагнитного поля имеют постоянный во времени сдвиг фазы для двух произвольных точек.

Необходимо разделять временную и пространственную когерентность.

Первая имеет место при наличии разности оптического пути лазерных лучей, а вторая — при рассмотрении фазовых свойств излучения из разных, разнесенных точек поперечного сечения пучка.

Поскольку лазерное излучение генерируется вследствие согласованного вынужденного излучения света во всем объеме активной среды, пространственная когерентность света на выходе из резонатора лазера сохраняется в пределах всего поперечного сечения пучка.

В результате пространственно-временной когерентности лазерные источники **имеют низкую расходимость**, что позволяет не только передавать энергию излучения на значительные расстояния с минимальным рассеянием, но и фокусировать луч в пятно малого диаметра, что имеет большое значение при проведении технологического процесса. Кроме того, взаимодействие когерентного верного излучения с поверхностью может сопровождаться образованием поверхностных электромагнитных волн, которые можно использовать для создания периодических поверхностных структур. Это свойство используют при создании многолучевых или многоканальных лазерных систем, если большое число пространственно –разнесенных лазеров, параллельные пучки которых с помощью фокусирующих систем собирают на изделии в одно пятно. Если излучение на выходе всех лазеров когерентно и относительный сдвиг фаз равен нулю, то при это можно получить максимальную интенсивность, а следовательно, достичь высоких технологических показателей работы лазера.

Поляризация лазерного излучения. Она характеризует ориентацию вектора электрического поля в электромагнитной волне. Если в каждой точке светового пучка вектор электрического поля E колеблется вдоль одной линии в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны, то имеет место линейная (плоская) поляризация (рис. 1.21, а)

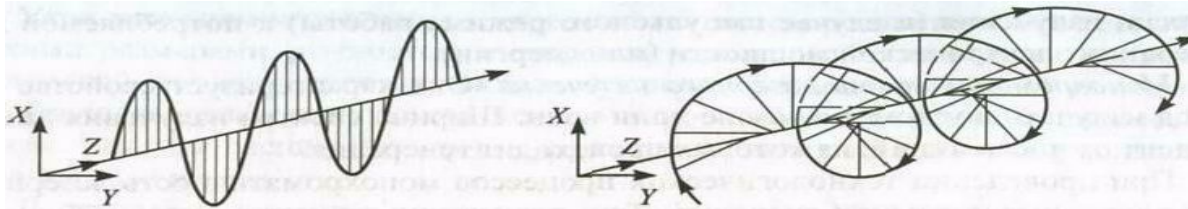


Рис. 1.21. Линейная (а) и круговая (б) поляризация световой волны

Поляризация лазерного излучения может оказывать существенное влияние на эффективность проведения технологических процессов. От нее зависит коэффициент поглощения обрабатываемой поверхности. Лазерные пучки с различными направлениями поляризации имеют различные коэффициенты поглощения в широком диапазоне углов падения излучения. Поляризацию излучения необходимо выбирать с учетом особенностей конкретной технологии.