

Лазерная техника и технология.

ПРОФЕССОР ВЕРЕМЕЕВИЧ А.Н.

Начало XX века -величайшими достижениями человечества .

7 мая 1895 года А.С. Попов продемонстрировал изобретение на устройство связи без проводов, а только через год аналогичное устройство - Маркони Г.

За изобретение – РАДИО – А. С. Попов в 1900 году на Всемирной выставке в Париже был награжден Золотой медалью.

В конце XIX века был создан автомобиль с бензиновым двигателем.

К началу XX века первые линии метрополитена в Лондоне, Нью-Йорке, Будапеште, Вене .

17 декабря 1903года американцы братья Орвилл и Уилбор Райт пролетели 260 м на созданном ими первом в мире аэроплане.

В 1905 году русский инженер И.И. Сикорский первый в мире многомоторный самолет, “ Илья Муромец “.

В 1895 году немецкий физик Рентген открыл новый вид излучения; за это открытие в 1901 году ему была присуждена первая в истории Нобелевская премия.

В 1896 году французский физик Антуан Анри Беккерель открыл явление радиоактивности, (Нобелевская премия – 1903 г).

В 1897 году английский физик Дж. Дж. Томсон открыл электрон и в следующем году измерил его заряд, (Нобелевская премия 1906 года).

14 декабря 1906 года Макс Планк дал вывод формулы для испускательной способности черного тела – этот вывод стал фундаментом квантовой теории – одной из основных физических теорий XX века.

В 1905 году двадцати шести летний Альберт Эйнштейн опубликовал **специальную теорию относительности**. Новый век провозгласил рождение новой физики : отныне прежняя физика получила название “ классическая “. Теперь мы смогли более глубоко постичь законы природы; т.е. исследовать мир атомов и молекул, а также первооснов материи – элементарных частиц. Новые фундаментальные знания позволили развить вакуумную , а позднее – с начала 50 –х годов полупроводниковую электронику , что привело к созданию весьма совершенных систем радиосвязи , радиопреимущества , радиолокации .

В 1947 году был изобретен **транзистор**, в начале 60 –х годов ему на смену пришли **интегральные схемы** – так родилась микроэлектроника.

Развитие атомной и ядерной физики привело к созданию **атомных электростанций (1954 год, Россия, г. Обнинск) и судов с атомными двигателями (1959 г.)**.

Телевидение, электронно-вычислительные машины, компьютеры, промышленные роботы, ракеты, спутники и орбитальные станции – это наша действительность.

И вот в 1960 году человек получил в свое распоряжение всемогущий лазерный луч

А все начиналось с двух работ А. Эйнштейна, опубликованных в 1916 году. Первая называлась “ Испускание и поглощение излучения по квантовой теории “ , а вторая - “ К квантовой теории излучения “

А. Эйнштейн показал, что существует **два различных процесса испускания энергии молекулами вещества**. Наряду с обычным , спонтанным (самопроизвольным) испусканием , возможен процесс испускания под воздействием излучения окружающей молекулы среды. Эйнштейн назвал этот **процесс индуцированным (вынужденным) излучением**. Именно этот процесс и лежит в основе работы лазера .

Лáзер

(light amplification by stimulated emission of radiation)

«усиление света «усиление света посредством вынужденного излучения»),

или **оптíческий квантовый генерáтор** —

это устройство, преобразующее

энергию энергию накачки энергию накачки

(световую энергию накачки (световую,

электрическую энергию накачки (световую,

электрическую, тепловую энергию накачки

(световую, электрическую, тепловую, химическую и

др.)

в энергию когерентного в энергию когерентного

: История изобретения лазеров

1916 год: А. Эйнштейн предсказывает существование явления вынужденного излучения — физической основы работы любого лазера.

Строгое теоретическое обоснование в рамках квантовой механики Строгое теоретическое обоснование в рамках квантовой механики это явление получило в работах П. Дирака Строгое теоретическое обоснование в рамках квантовой механики это явление получило в работах П. Дирака в 1927 Строгое теоретическое обоснование в рамках квантовой механики это явление получило в работах П. Дирака в 1927—1930 гг.

1928 год 1928 год: экспериментальное подтверждение Р. Ладенбургом 1928 год: экспериментальное подтверждение Р. Ладенбургом и Г. Копферманном существования вынужденного излучения.

возможность использования вынужденного излучения среды с инверсией населённостей возможность использования вынужденного излучения среды с инверсией населённостей для усиления электромагнитного излучения.

1950 год 1950 год: А. Кастлер 1950 год: А. Кастлер (Нобелевская премия по физике 1966 года) 1950 год: А. Кастлер (Нобелевская премия по физике 1966 года) 1950 год: А. Кастлер (Нобелевская премия по физике 1966 года) предлагает метод

Первое экспериментальное подтверждение возможности усиления света было получено в 30 –х годах советским ученым **В.А. Фабрикантом**. В 1958 году В. А. Фабрикант, Ф. А. Бутаева и М. М. Вудынский получили авторское свидетельство на изобретение, а в 1962 году и диплом на открытие с приоритетом от 1951 года с формулой открытия: “Установлено неизвестное ранее явление усиления электромагнитных волн при прохождении через среду, в которой концентрация частиц или их систем на верхних энергетических уровнях, соответствующих возбужденному состоянию, избыточна по сравнению с концентрацией в равновесном состоянии”. Таким образом был доказан факт существования индуцированного излучения. С 1950 по 1960 годы работы по изучению возможности применения этого явления на практике были развернуты во многих странах мира. **За основополагающие работы по квантовой электронике советским физикам Н. Г. Басову и А. М. Прохорову и американскому ученому Ч. Таунсу в 1964 году была присуждена Нобелевская премия по физике**

1954 год 1954 год: первый микроволновой 1954 год: первый микроволновой генератор — мазер 1954 год: первый микроволновой генератор — мазер на аммиаке 1954 год: первый микроволновой генератор — мазер на аммиаке (Ч. Таунс 1954 год: первый микроволновой генератор — мазер на аммиаке (Ч. Таунс, Басов Н. Г. 1954 год: первый микроволновой генератор — мазер на аммиаке (Ч. Таунс, Басов Н. Г. и Прохоров А. М. 1954 год: первый микроволновой генератор — мазер на аммиаке (Ч. Таунс, Басов Н. Г. и Прохоров А. М. — Нобелевская премия по физике 1954 год: первый микроволновой генератор — мазер на аммиаке (Ч. Таунс, Басов Н. Г. и Прохоров А. М. — Нобелевская премия по физике 1964 года).

Роль обратной связи играл объёмный резонатор Роль обратной связи играл объёмный резонатор, размеры которого были порядка 12,6 мм (длина волны Роль обратной связи играл объёмный резонатор, размеры которого были порядка 12,6 мм (длина волны, излучаемой при переходе аммиака с возбуждённого колебательного уровня Роль обратной связи играл объёмный резонатор, размеры которого были порядка 12,6 мм (длина волны, излучаемой при переходе аммиака с возбуждённого колебательного уровня на основной).

Для усиления электромагнитного излучения оптического диапазона Роль обратной связи играл объёмный резонатор, размеры которого были порядка 12,6 мм (длина волны, излучаемой при переходе аммиака с возбуждённого колебательного уровня на основной). Для усиления электромагнитного излучения оптического диапазона необходимо было создать объёмный резонатор, размеры которого были бы порядка микрона. Из-за связанных с этим технологических трудностей многие учёные в то время считали, что

В 1961 году А. Джаваном был создан первый газовый лазер, работающий на смеси гелия и неона. В 1962 году появился полупроводниковый лазер на основе кристалла арсенида галлия . В 1964 г . С. Пател создал первый СО₂ –лазер . В 1965 г . Дж. Каспер и Дж. Пиментел создали химический лазер. В 1966 году А. М. Прохоров создал новый тип мощного газового лазера – газодинамического . Таким образом , в период 1962 – 1968 годы были созданы , по существу , все основные типы лазеров и выявлены большинство областей их возможного применения . ***Когда вспыхнул луч первого в мире рубинового лазера, один из коллег Н. Г. Басова и А.М. Прохорова сказал:***

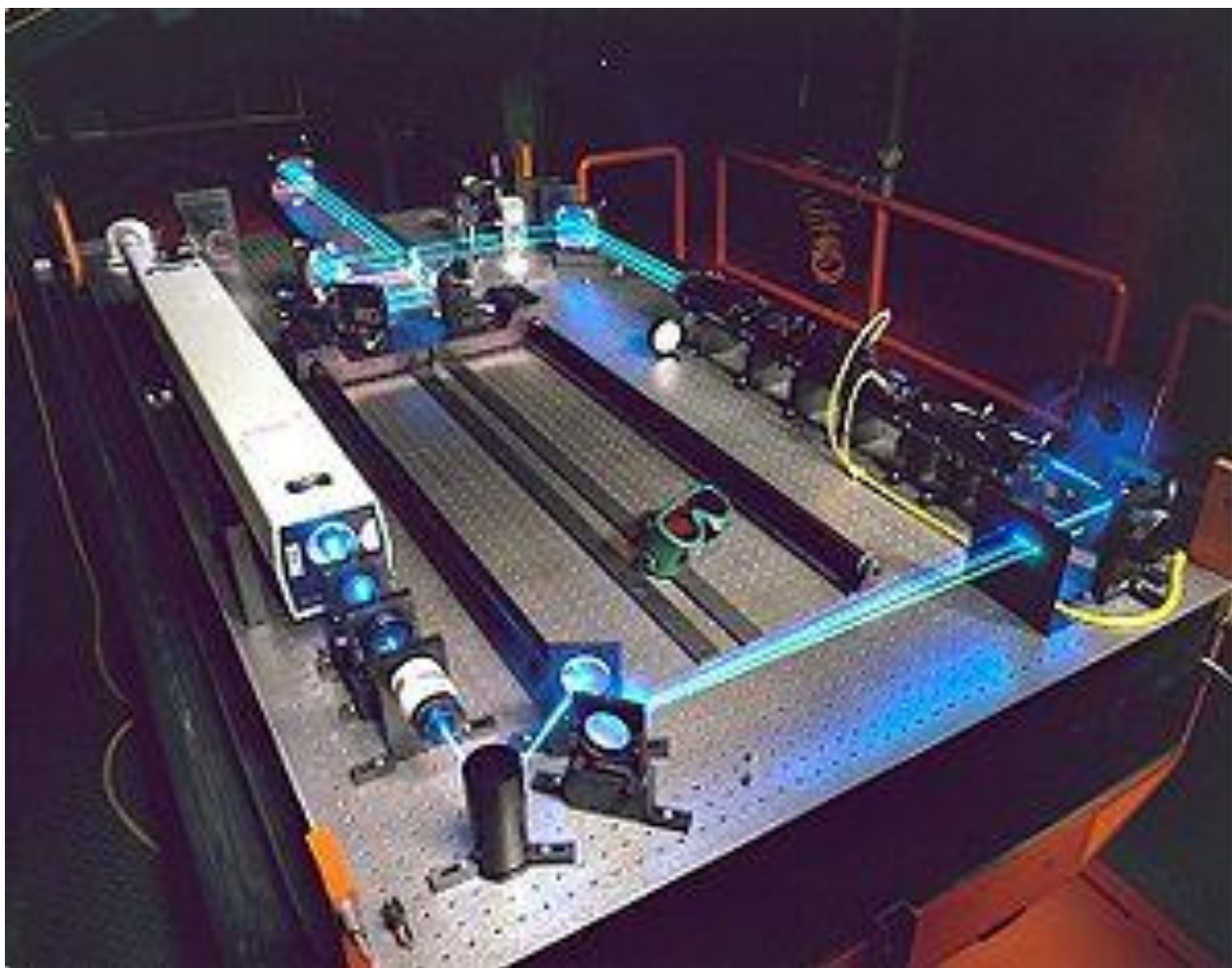
Ну, вот, теперь черный квантовый ящик станет, пожалуй, давать больше, чем в него вкладывают!

Шутка оказалась пророческой. Редко какое другое достижение фундаментальной науки с первых своих шагов опередило столь далеко самые смелые прогнозы .

•Физика лазеров и по сей день интенсивно развивается. С момента изобретения лазера почти каждый год появлялись всё новые его виды, приспособленные для различных целей.

•В 1961 В 1961 г. был создан лазер на неодимовом В 1961 г. был создан лазер на неодимовом стекле, а в течение следующих пяти лет были разработаны лазерные диоды В 1961 г. был создан лазер на неодимовом стекле, а в течение следующих пяти лет были разработаны лазерные диоды, лазеры на красителях В 1961 г. был создан лазер на неодимовом стекле, а в течение следующих пяти лет были разработаны лазерные диоды, лазеры на красителях, лазеры на двуокиси углерода В 1961 г. был создан лазер на неодимовом стекле, а в течение следующих пяти лет были разработаны лазерные диоды, лазеры на красителях, лазеры на двуокиси углерода, химические лазеры.

***Ныне лазер – самый, пожалуй,
популярный инструмент нашего
времени.***



ЛАЗЕР



Лазерное излучение с длинами волн (снизу вверх):
405, 445, 520, 532, 635 и 660 нм.

Классификация лазеров

Виды лазеров

Твердотельные лазеры Твердотельные лазеры на люминесцирующих Твердотельные лазеры на люминесцирующих твёрдых средах Твердотельные лазеры на люминесцирующих твёрдых средах (диэлектрические Твердотельные лазеры на люминесцирующих твёрдых средах (диэлектрические кристаллы Твердотельные лазеры на люминесцирующих твёрдых средах (диэлектрические кристаллы и стёкла). В качестве активаторов Твердотельные лазеры на люминесцирующих твёрдых средах (диэлектрические кристаллы и стёкла). В качестве активаторов обычно используются ионы Твердотельные лазеры на люминесцирующих твёрдых средах (диэлектрические кристаллы и стёкла). В качестве активаторов обычно используются ионы редкоземельных элементов Твердотельные лазеры на люминесцирующих твёрдых средах (диэлектрические кристаллы и стёкла). В качестве активаторов обычно используются ионы редкоземельных элементов или ионы группы железа Твердотельные лазеры на люминесцирующих твёрдых средах (диэлектрические кристаллы и стёкла). В качестве активаторов обычно используются ионы редкоземельных элементов или ионы группы железа Fe. Накачка оптическая и от полупроводниковых лазеров, осуществляется по трёх- или четырёхуровневой схеме. Современные твердотельные лазеры способны работать в импульсном, непрерывном и квазинепрерывном режимах.

Вероятность того, что случайный фотон вызовет индуцированное излучение возбуждённого атома, **в точности равняется вероятности поглощения этого фотона атомом, находящимся в невозбуждённом состоянии.**

Поэтому для усиления света необходимо, чтобы возбуждённых атомов в среде было больше, чем невозбуждённых (так называемая инверсия населённостей).

В состоянии термодинамического равновесия в состоянии термодинамического равновесия это условие не выполняется, поэтому используются различные системы накачки активной среды в состоянии термодинамического равновесия это условие не выполняется, поэтому используются различные системы накачки активной среды лазера (оптические в состоянии термодинамического равновесия это условие не выполняется, поэтому используются различные системы накачки активной среды лазера (оптические, электрические в состоянии термодинамического равновесия это условие не выполняется

Первоисточником генерации является процесс спонтанного излучения, поэтому для обеспечения преобладания поколений фотонов необходимо существование положительной обратной связи, за счёт которой излучённые фотоны вызывают последующие акты индуцированного излучения.

Для этого активная среда лазера помещается в

оптический резонатор.

В простейшем случае он представляет собой два зеркала, одно из которых полупрозрачное — через него луч лазера частично выходит из резонатора. Отражаясь от зеркал, пучок излучения многократно проходит по резонатору, вызывая в нём индуцированные переходы.

Излучение может быть как непрерывным, так и импульсным. Быстрое выключение и включение обратной связи и уменьшения тем самым периода импульсов, позволяет создать условия для генерации излучения очень большой мощности (так называемые гигантские импульсы).

Этот режим работы лазера называют режимом модулированной добротности.

Свойства лазерного излучения

Отличительные особенности лазерного излучения

Лазерное излучение обладает уникальными характеристиками.

Высокая интенсивность и монохроматичность лазерных пучков, возможность достижения высоких значений мощности и плотности потока энергии в некоторых случаях делают его незаменимым при проведении технологических процессов.

Теоретически лазерный луч можно сфокусировать в пятно размером порядка длины волны, однако искажения, вносимые оптическими элементами, несколько увеличивают его радиус r_0 . Несмотря на это он имеет максимальный коэффициент сосредоточенности энергии k и по сравнению с такими традиционными методами обработки, как газопламенная, дуговая, плазменная, электронно-лучевая и другие, при лазерной обработке возможно достижение наибольшей плотности мощности.

Значения k и r_0 в зависимости от метода обработки приведены ниже

	$k, 1/\text{см}^2$	$r_0, \text{см}$
Газовое пламя	$0,2 \cdot 10^0$	$2,0 \cdot 10^0$
Дуга.....	$1,0 \cdot 10^1$	$3,0 \cdot 10^{-1}$
Световой луч	$1,0 \cdot 10^2$	$1,0 \cdot 10^{-1}$
Плазменная струя.....	$4,0 \cdot 10^4$	$5,0 \cdot 10^{-3}$
Электронный луч.....	$2,0 \cdot 10^6$	$8,0 \cdot 10^{-4}$
Непрерывный лазерный луч	$3,0 \cdot 10^6$	$6,0 \cdot 10^{-4}$

Использование лазеров с высокой плотностью мощности излучения позволяет существенно сократить время нагрева, обеспечивая скорость обработки, сравнимую со скоростью протекания физических процессов в объекте облучения.

Лазерное излучение может быть не только непрерывным во времени, но и в виде одиночных или серии импульсов заданной формы с определенной длительностью, частотой следования и пиковой мощностью. Это дает возможность целенаправленно, путем выбора режимов регулировать скорость нагрева, время пребывания материала при высоких температурах и скорость охлаждения.

Кроме того, лазерное излучение обладает таким важным качеством, как

безынерционность,

включения и выключения действия луча, а также смена направления его относительно детали определяются лишь быстродействием исполнительного устройства (оптического затвора, механизма перемещения зеркала или координатного стола).

К тому же существует возможность с помощью светоделительной оптики и зеркал разделять лазерный луч в необходимых пропорциях и направлять его по оптическим трактам на те или иные технологические позиции

Использование устройств, управляющих параметрами лазерной установки на основе адаптивной оптики, автоматизированного газообмена и регенерации рабочей смеси в газовых лазерах, синхронизации векторов перемещения изделия и поляризации излучения и т. д., позволяет изменять характеристики излучения по заданной программе.

Таким образом, применение лазерного излучения дает возможность достичь высокой степени автоматизации процесса обработки

Структура лазерных пучков

Важной характеристикой структуры лазерного пучка является *модовый состав излучения*. Пространственный профиль лазерного луча определяется геометрией лазерного резонатора. Конфигурация электромагнитной волны зависит от формы резонатора в сечении, поперечном к оптической оси. В оптическом резонаторе может существовать набор возможных типов колебаний.

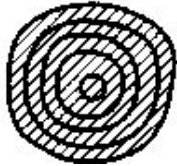
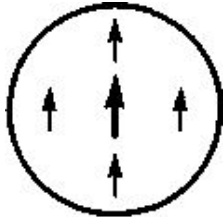
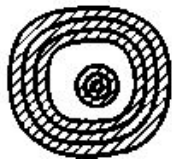
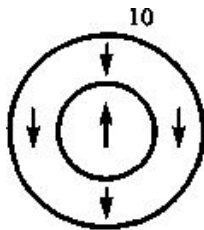
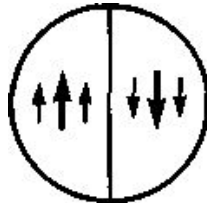
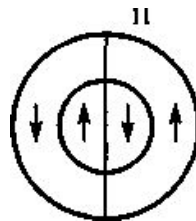
Выделенный вид электромагнитных колебаний, соответствующий определенному устойчивому распределению поля волны в резонаторе, называется ***модой***.

Модовый состав излучения в резонаторе является важной характеристикой лазера, поскольку он определяет спектр и пространственные параметры генерируемого пучка.

Различные колебания в резонаторе характеризуются набором модовых чисел q , m и n , которые принято указывать рядом с буквенным обозначением типа электромагнитных волн (например, $TEM_{q, m n}$).

Символ TEM — это сокращена в переводе с английского стоячая электромагнитная волна; которая в резонаторе имеет как продольную (вдоль оптической оси), так и поперечную структуру распределения электрического поля. Продольное распределение поля описывается модовым числом q . В реальных условиях q , достаточно велико. При описании медового состава его обычно не указывают (TEM _{$m n$})

Поперечная структура поля характеризуется наличием узлов электрического поля по радиусу и углу и описывается числами m и n . В случае цилиндрического резонатора m означает число узлов поля, расположенных на радиусе резонатора, а n — число узлов, находящихся на половине его периметра. Качественный вид распределения амплитуды электромагнитного поля на выходном окне устойчивого полуконфокального резонатора для поперечных мод низшего порядка показан на рис. 1.20. Там же приведены качественно соответствующие этим модам распределения интенсивности излучения в лазерном пучке.

TEM_{00}  TEM_{10}  TEM_{01}  TEM_{11} 

11

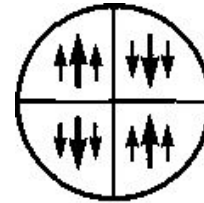
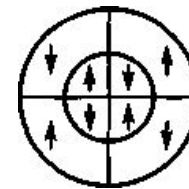
 TEM_{02}  TEM_{12} 

Рисунок. Качественный вид распределения амплитуды электромагнитного поля и структуры линейно поляризованного лазерного пучка в устойчивом полуконфокальном низшего порядка. для некоторых мод

С увеличением поперечных модовых чисел число областей, в которых сосредоточено поле, возрастает, а их характерный размер уменьшается. Так как этот размер определяет дифракционную расходимость лазерного излучения, моды высшего порядка фокусируются хуже. Кроме того, можно показать, что с увеличением модового числа дифракционные потери излучения возрастают.

Пространственные характеристики лазерного излучения

Расходимость лазерного излучения.

Излучение никогда не выходит из лазера в виде пучка параллельных лучей. Лазерный луч расходится (расширяется) в пространстве. Под расходимостью понимают линейный или телесный угол, в котором на значительном удалении от источника излучения сосредоточена основная доля генерируемой энергии или мощности. Расходимость лазерного луча характеризуется полным углом расходимости 2θ , в пределах которого либо содержится определенная доля мощности (примерно 84 %) или энергии лазерного излучения, либо интенсивность снижается в некоторое число раз.

Лазеры могут генерировать излучение с малой угловой расходимостью. Это означает, что возможны передача излучения на большие расстояния и его фокусировка в пятно с малыми размерами.

Угол расходимости в лазере определяется типом резонатора, его геометрическими размерами, точностью юстировки зеркал, качеством их поверхности, оптической неоднородностью активной среды, неравномерностью накачки и т. д.

Расходимость лазерного излучения можно изменить с помощью оптических систем. Так, при расширении луча в n раз его угловая расходимость уменьшается во столько же раз.

Распределение энергии по сечению лазерного луча.

Модовый состав лазерного излучения отражает распределение энергии по сечению пучка. Распределение интенсивности излучения на выходной апертуре лазера определяется типом используемого резонатора и модовым составом возбуждаемых в нем колебаний. Работа на моде TEM_{00} позволяет достичь дифракционного предела расходимости луча. Распределение интенсивности излучения по сечению выходного луча лазера в этом случае имеет вид гауссовой кривой. Поскольку более высоким модам соответствуют большие расходимости, технологические процессы рекомендуется проводить на основной моде TEM_{00} .

При многомодовой генерации распределение интенсивности по выходной апертуре лазера определяется конкретным модовым составом и распределением энергии излучения среди этих мод. Варьированием модового состава излучения можно существенно влиять на распределение интенсивности, подбирая его при проведении тех или иных технологических процессов оптимальным образом.

В случае неустойчивого резонатора распределение интенсивности излучения на выходе лазера в зависимости от формы выходного зеркала и его юстировки может иметь вид кольца, прямоугольной рамки, серпа или уголка.

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 τ

ν частота следования этих импульсов f_i ,

а также средняя $P_{ср}$ и импульсная $P_{И}$ 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 аббераций 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.

Академик В.А. Фабрикант очень образно представил оптическую когерентность:

«В раскаленной нити лампы накаливания, в ярком светящемся шнуре ртутной лампы царит полный хаос. То там, то здесь вспыхивают возбужденные атомы, испускающие цуги световых волн. Эти вспышки отдельных атомов никак не согласованы между собой. Свечение таких источников напоминает гул неорганизованной, чем-то возбужденной толпы. Совсем иная картина в лазере. Здесь все похоже на стройный хор: сначала вступают одни хористы, затем – другие, и сила звучания могуче возрастает. Хор грандиозен по числу участников, как это бывает на праздниках песни в Прибалтике. Расстояние между отдельными группами хористов настолько велики, что слова песни долетают с заметным запаздыванием от одной группы к другой. Дирижера нет, но это не мешает стройности общего звучания, так как хористы сами подхватывают песни в нужные моменты. Тоже происходит с атомами генератора света (имеется ввиду активные центры в активном элементе). Цуги волн, испускаемые отдельными атомами, согласованы друг с другом благодаря явлению индуцированного излучения. Каждый возбужденный атом начинает свою «песню» в унисон с дошедшей до него «песней» другого атома.

Вот это и есть когерентность.»

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 лазерного 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 [ектрического 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)

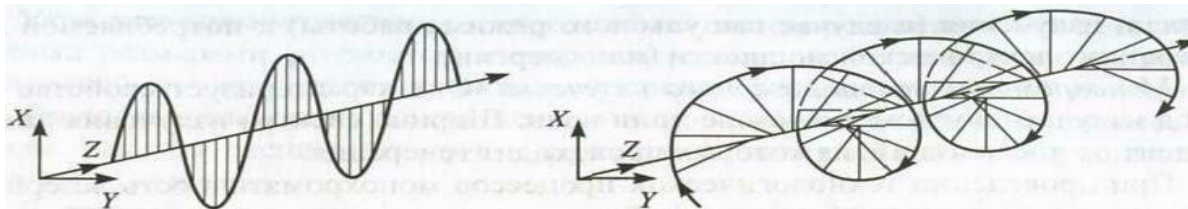


Рис. 1.21. Линейная (а) и круговая (б) поляризация световой волны

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.