

# Современные процессы термоупрочнения

Лазерная и электронно-лучевая  
обработка;

Вакуумное ионно-плазменное  
упрочнение;

Ионное распыление;

Ионное осаждение покрытий;

Ионно-диффузионное насыщение, в  
частности в тлеющем разряде и в среде  
несамостоятельного разряда;

Ионное легирование (имплантация);



# Особенности лазерного термоупрочнения

- Является поверхностным процессом, имеющим большую степень локализаций (деталь не искажает форму, нет коробления);
  - Поверхностное упрочнение проводится на строго требуемых участках детали.
  - Скорость нагрева и охлаждения в зоне термического воздействия велики (миллион градусов в секунду);
  - Время выдержки при высокой температуре практически равно нулю.
  - Нагрев может происходить до максимальных температур, превышающих температуру плавления или испарения металла.
  - Поток фотонов без потерь передаёт свою энергию тонкому слою металла, при этом температура мгновенно возрастает.
  - Полный цикл Т/О – 1-2 секунды.
  - Максимальная глубина закаленного слоя 1-2 мм.
  - С помощью лазера возможно осуществлять все виды скоростной Т/О.
- Механизм упрочнения металлов при лазерной обработке**
- Нельзя выполнять с помощью лазера нормализацию и отжиг.

# Механизмы упрочнения металлов при лазерной обработке

**Упрочнение** – повышение его сопротивления металла пластической деформации и разрушению под действием внешних нагрузок. Пластическая деформация связана с движением двумерных структурных дефектов – дислокаций, т.е. упрочнение является следствием затруднения движения дислокаций.

При применении лазерной обработки возможны следующие виды упрочнения:

- **Твёрдорастворное упрочнение** – упрочнение металлов, находящихся в твёрдых растворах, примесями и легирующими элементами, искажающими кристаллическую решётку, повышая напряжение трения.
- **Дислокационное упрочнение.** Перемещающиеся дислокации испытывают сдерживающее воздействие со стороны других дислокаций, находящихся в металле.
- **Зернограничное упрочнение.** Перемещение дислокаций сдерживают границы зёрен и субзёрен. Чем мельче зёрна, тем сила сдерживания больше.
- **Дисперсионное упрочнение.** Частицы других фаз, остающихся в металле или выделившихся при распаде пересыщенных твёрдых растворов, оказывают значительное сопротивление движению дислокаций.

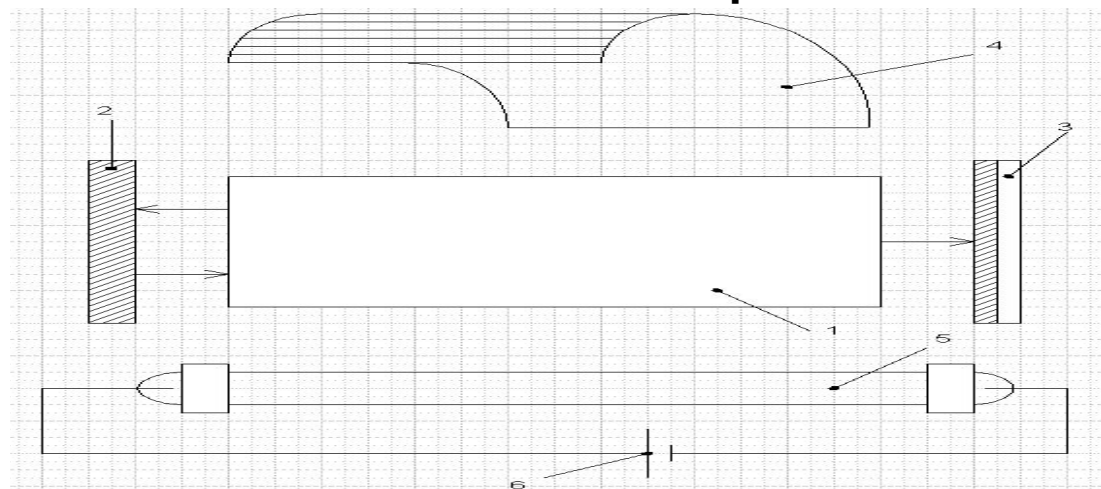
# Принцип работы лазеров

**Лазер** – источник когерентного света.

В основе работы лазеров лежат 3 явления:

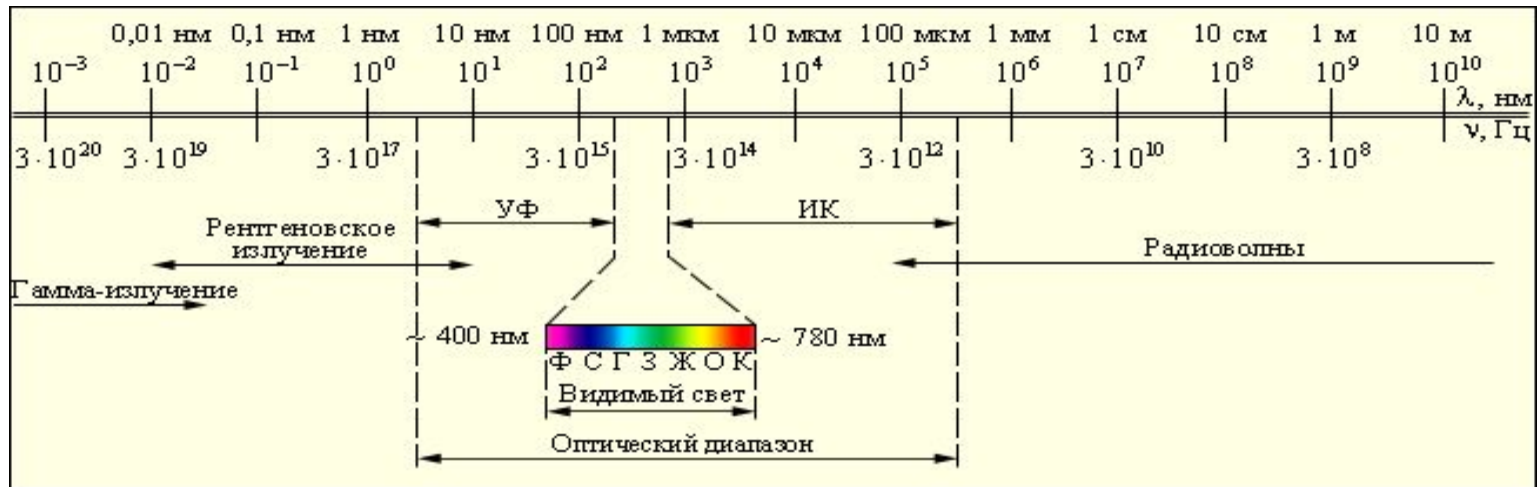
- поглощение веществом энергии;
- спонтанное излучение возбужденной системы атомов;
- вынужденное излучение возбужденной системы атомов.

**Схема лазера**



1- активное лазерное вещество; 2- глухое зеркало; 3- полупрозрачное зеркало;  
4- рефлексор; 5- источник возбуждения; 6- источник питания.

# Основные диапазоны частот и длин волн электромагнитных колебаний



## СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ

В геометрической оптике свет рассматривается в виде прямолинейно распространяющегося потока световых квантов энергия которых равна

$$E_{\text{ф}} = h\nu - \text{квант (частица)}$$

Интенсивность в монохроматическом свете выражается через объёмную концентрацию фотонов ( $n_{\text{ф}}$ ), а их энергия:

$$I = h\nu \cdot n_{\text{ф}} \cdot c$$

# Основные понятия о физических процессах лазерного излучения

- В атомах электроны вращаются вокруг ядер по орбитам, составляющим **дискретные электронные слои**.
- Вращающиеся электроны обладают энергией, зависящей от расстояния данного слоя от ядра. Обычно рассматривается система уровней энергии, которые составляют **энергетический спектр** атома или молекулы.
- Наименьшее возможное энергетическое состояние атома является устойчивым (основное состояние). Переход атома или молекулы в более высокое энергетическое состояние связано с его возбуждением.
- Число частиц в единице объёма вещества, имеющих данный уровень энергии, называют **населённостью энергетического уровня**.
- В возбуждённом состоянии населённость верхних энергетических уровней повышена. Это явление называют **инверсией населённости**.
- Снижение энергии происходит за счёт её выделения в виде квантов. Таким образом осуществляется **излучательный квантовый переход**.
- Излучательные квантовые переходы могут быть **самопроизвольными (спонтанными) и вынужденными**.

# Основные свойства лазерного излучения

Лазерное излучение- оптическое явление, имеющее свойства световых лучей:

- **Когерентность** – согласованное протекание во времени ряда волновых процессов;
- **Направленность** – характеризуется углом расходимости пучка лазерного излучения (от нескольких угловых секунд до нескольких угловых минут);
- **Монохроматичность** – узкий интервал частоты;
- **Яркость** – яркость на несколько порядков больше яркости обычных источников из – за высокой направленности пучка ядерного излучения.
- **Плотность мощности излучения** –  $W_p$  – мощность излучения, падающего на единицу облучённой поверхности, расположенной перпендикулярно к направлению лазерного пучка,

$$W_p = \frac{E}{S\tau_u}$$

где  $\tau_u$  – длительность импульсов лазерного излучения;

$W_p$  – зависит от энергетических и временных параметров и условий фокусировки излучения;

$S$  – площадь облучаемой поверхности;

- **Длина волны** ( $\lambda = 10^{-3} \text{--} 10^2 \text{ мкм}$ );
- **Энергия**  $E$ , Дж, (max  $10^3$  Дж);
- **Мощность**,  $P$ ; для импульсных лазеров – в Дж;
- для непрерывных – в Вт;
- **Длительность импульса**  $\tau_u$ , мс;
- **Пространственное распределение плотности потока** в пятне фокусировки:
- где  $k$  – коэффициент сосредоточенности.

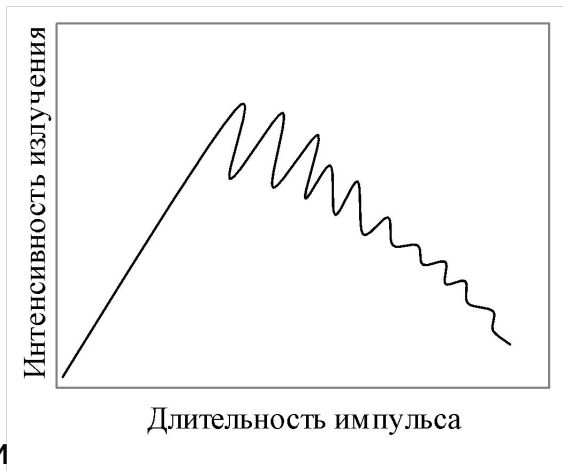
# Структура импульса лазерного излучения

Для повышения стабильности излучения и точного управления им используют **модуляцию лазерного излучения**.

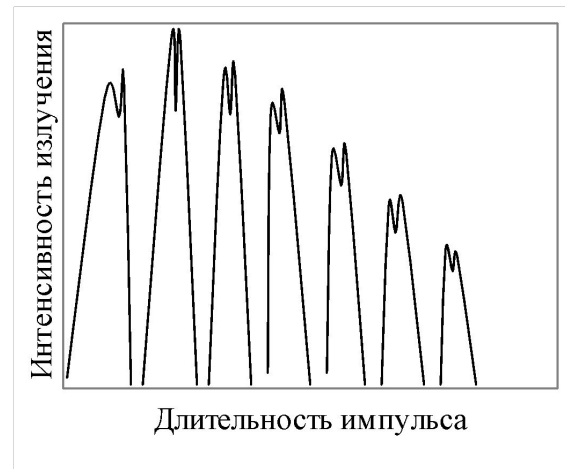
**Модуляция** изменение по определённому закону характера лазерного излучения для получения сигнала с определённой временной зависимостью.

Модуляторы : 1 – резонансные, 2 – внутри резонансные.

## Структура импульса лазерного излучения после модуляции



а- хаоти



б- упорядоченная генерация

**Для работы лазера необходимы условия:**

- наличие активной среды с инверсной населённостью;
- активная среда должна быть помещена в резонатор;
- усилие активной среды должно быть больше некоторого порогового значения



# Активные лазерные вещества

Эффект лазерного излучения имеет место на тех длинах волн, где материал испускает флюоресцентное излучение.

**Лазерные вещества** отличаются высокой флюоресценцией и узкими спектральными линиями флюоресценции, могут быть кристаллическими или аморфными.

Кристалл состоит из основы – диэлектрика (матрицы), в котором должны в узлах решетки равномерно располагаться атомы активатора (атомы матрицы и активатора разные).

В качестве активаторов используют атомы:

- актиноидов;
- редкоземельных и переходных металлов.

## Основные требования к матрице:

- малые потери энергии;
- высокая теплопроводность;
- отсутствие оптических и других неоднородностей;
- высокая прочность, термическая и химическая стойкость и др.

# Классификация активных лазерных веществ

## Кристаллические лазерные вещества:

а) кислородные соединения:

- окислы элементов 3-й группы: рубин, корунд, гранат, неодим, хром.;
- окислы редкоземельных элементов: лантана и иттрия;
- материалы на основе 5-й группы: - ванадаты:  $\text{Ca}_3(\text{VO}_4)_2$ ,  $\text{YVO}_4$ ,  $\text{LaVO}_4$ ; - ниобаты кальция –  $\text{Ca}(\text{NbO}_3)_2$ ;
- фторфосфат кальция –  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}(\text{Nd})$
- материалы на основе кислородных соединений элементов 6-й группы: - вольфраматы  $\text{CaWO}_4$ ,  $\text{SrWO}_4$ , молибдаты  $\text{CaMoO}_4$ ,  $\text{SrMoO}_4$ ;

б) фтористые соединения:

- матрица фториды щёлочно – земельные элементы –  $\text{CaF}_2$ ;  $\text{SrF}_2$ ;  $\text{MgF}_2$ ,  
активатор- ионы урана.

## **Аморфные вещества:**

**Стёкла** – неорганические термопластические материалы.

- силикатные – основа кварц;
- боратные – основа бура;
- свинцовые;
- неодимовые.

## **Лазерные вещества жидкостных лазеров:**

- растворы дикетонатов редкоземельных материалов в органических растворителях;
- растворы неорганических соединений редкоземельных элементов;
- растворы органических красителей: бензольные, азотные, пиридиновые.

## **Лазерные вещества газовых лазеров:**

- гелий – неоновый;
- аргоновый;
- криптоновый;
- азотный и др.

## **Молекулярные вещества:**

- лазеры на основе  $\text{CO}_2$

(применяется диссоциация  $\text{CO}_2$  с образованием  $\text{CO}$  и  $\text{O}_2$ .)

# Геометрические характеристики лазерного луча и распределение интенсивности в пучке

Распределение интенсивности в пучке :

$$P(r) = P_0 \exp(-2r^2/r_0^2),$$

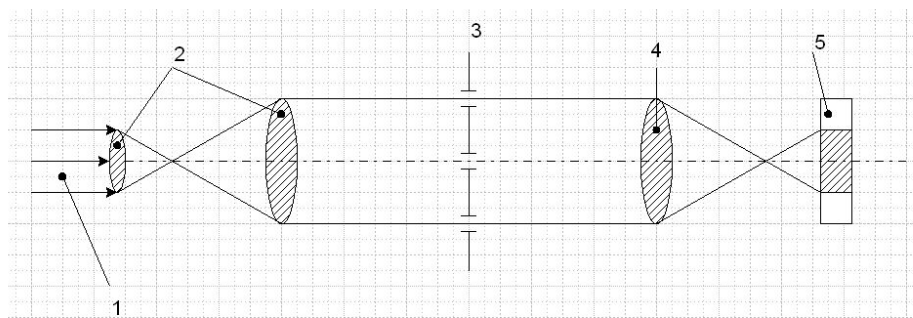
где  $P_0$  – интенсивность в центре пучка;  $r_0$  – радиус пучка, на котором интенсивность снижается в 2 раз.

Общая мощность в этом случае равна  $P = \pi r_0^2 P_0 / 2$ .

Для фокусирования цилиндрических пучков применяют сферические линзы.

Несфокусированное лазерное излучения для обработки материалов не используется ввиду недостаточной плотности мощности.

## Схема фокусирования лазерного пучка



1- лазерное излучение; 2- телескопическая система, расширяющая пучок до размеров трафарет; 3- трафарет; 4- проекционный объектив; 5- деталь