

Лекция

Тема: Лазеры. Лазерное
излучение и его основные
параметры. Лазерная
медицина

План лекции:

- Квантовые переходы.
- Распределение по энергетическим уровням. Активная среда.
- Общий принцип действия лазера.
- Работа рубинового и гелий – неоновых лазеров.
- Особенности лазерного излучения.
- Характеристики лазерного излучения, применяемого в медицине.
- Использование лазерного излучения в диагностике.
- Использование лазерного излучения в терапии.
- Использование лазерного излучения в хирургии

Общие принципы работы лазеров. Энергетические уровни, спонтанное и индуцированное излучение, населенность уровней, активная среда

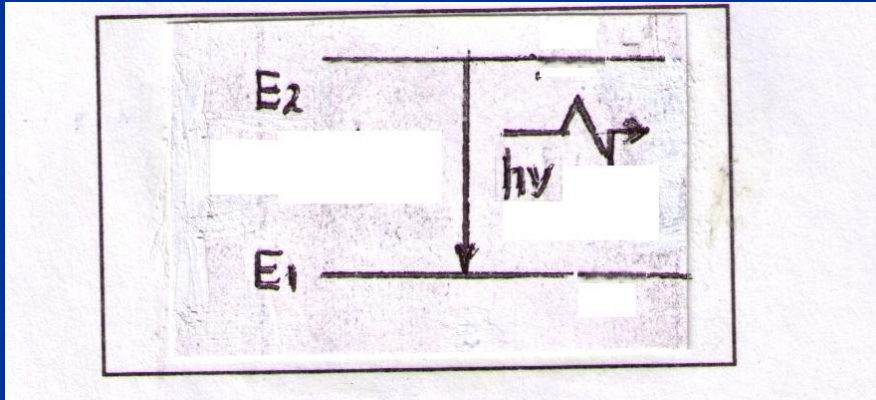
- В основе работы лазеров лежат фундаментальные процессы взаимодействия электромагнитных волн с веществом.
- Внутренняя энергия частиц может принимать ряд определенных дискретных значений, соответствующих энергетическим состояниям или энергетическим уровням. Самый нижний энергетический уровень с наименьшей энергией частицы называется **основным**, остальные энергетические уровни с более высокой энергией частицы — **возбужденные**. Переходы частиц с уровня на уровень могут быть **излучательными** или **поглощательными**.

1. Квантовые переходы

- Переход с более высокого энергетического уровня может происходить самопроизвольно и носит название спонтанного излучения (Рис. 1а). Такой переход сопровождается излучением кванта энергии

$$h\nu = E_2 - E_1, \text{ где } h = 6,62 \cdot 10^{-34}$$

- постоянная Планка, ν - частота излучения.



- При спонтанном переходе различные частицы излучают независимо, поэтому фазы излучаемых ими фотонов не связаны между собой. **Фотон – это элементарная частица света, обладающая волновыми свойствами и энергией**

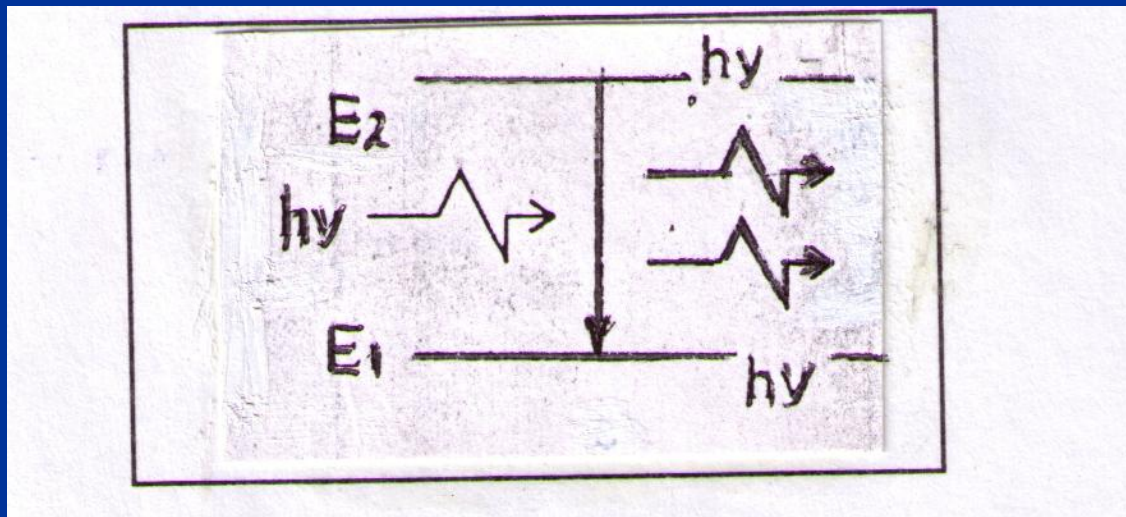
$$E = h\nu.$$

- Спонтанное излучение ненаправлено, неполяризовано и немонохроматично.

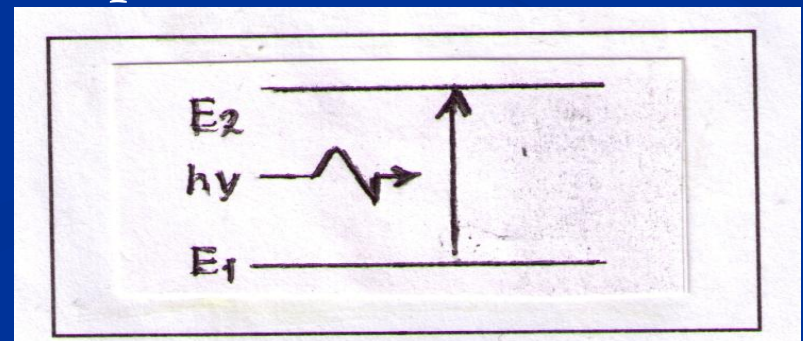
Если частицы находятся во внешнем электромагнитном поле, то переход с верхнего энергетического уровня на нижний происходит быстрее, особенно если частота внешнего электромагнитного поля определяется соотношением

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}.$$

- Внешнее поле увеличивает вероятность перехода с более высокого уровня на более низкий и излучение кванта энергии. Излучение под действием электромагнитной волны носит название **индуцированного (вынужденного излучения)**. (Рис. 1в)



- При этом интенсивность электромагнитной волны, проходящей через среду, увеличивается. **Главное свойство индуцированного излучения: частота, поляризация, направление распространения кванта энергии вынужденного излучения совпадают с соответствующими характеристиками внешнего поля.**
- Под действием внешнего электромагнитного поля частица может переходить с нижнего на более высокий уровень, поглотив квант энергии $h\nu$.
- Такой переход носит название **резонансного поглощения.** (Рис. 1с)

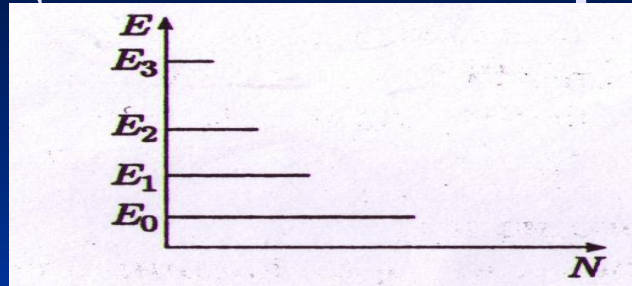


- Поглощение фотонов уменьшает интенсивность света проходящего через среду.
- Существуют два конкурирующих друг с другом процесса: резонансного поглощения и вынужденного излучения, какой из этих процессов доминирует, определяется соотношением между числом возбуждённых и невозбуждённых частиц.

2. Распределение по энергетическим уровням. Активная среда

- В состоянии термодинамического равновесия распределение частиц по энергетическим уровням за счёт тепловой энергии определяется распределением Больцмана:
- $N_i = N_0 \exp(-E_i / kT)$,
- где N_i – число частиц находящихся на i -м энергетическом уровне и называется населённостью уровней, E_i – энергия этого уровня, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, N_0 – число частиц на основном уровне.

Схематично данное распределение представлено на рис. 2



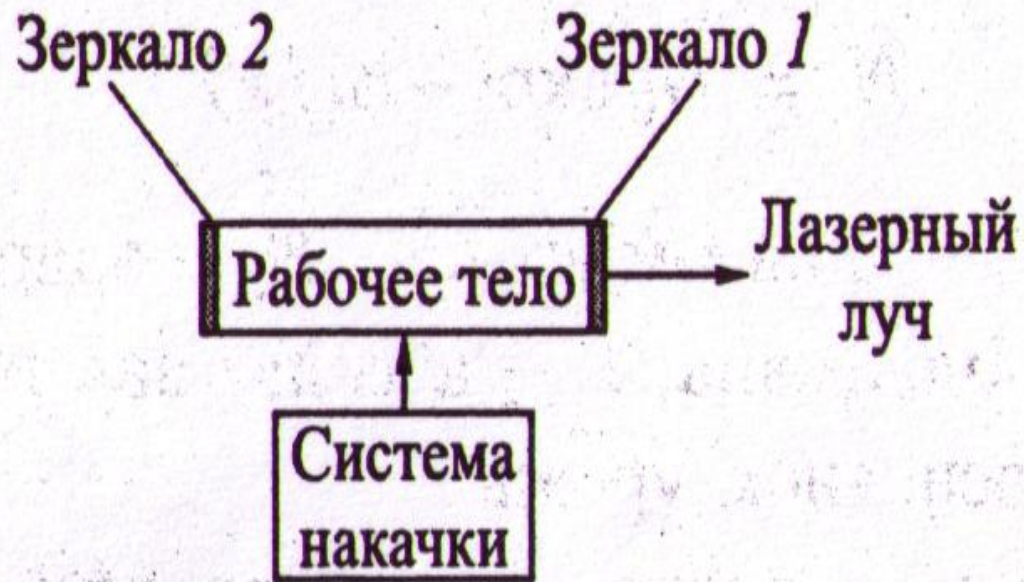
- Видно, что число частиц, находящихся на основном уровне, больше, чем на любом возбуждённом уровне. Поэтому процесс поглощения доминирует и усиление электромагнитной волны в такой системе невозможно.
- Для того чтобы доминировал процесс излучения фотонов, и имело место усиление электромагнитной волны, необходимо создать такое состояние среды, при котором число частиц на одном из верхних уровней было больше, чем на основном. Такое состояние называют средой с инверсной населённостью или активной средой.

Инверсная населённость – такое состояние среды при котором число частиц на одном верхних уровнях больше, чем на основном.

- **Активная среда – среда, приведённая в состояние с инверсной населённостью.**
- **Состояние инверсной населённости можно создать, используя разные методы накачки.**
- **Накачка – это процесс, под действием которого атомы переводятся с основного уровня на более высокий.**

3. Общий принцип действия лазера

- **Оптический квантовый генератор – лазер** (аббревиатура от английского названия **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation** – усиление света с помощью вынужденного излучения).
- Явление вынужденного излучения используется в лазерах. На рис.3 представлено схематическое устройство лазера.



- Любой лазер содержит 3 компонента:
- рабочее тело,
- система накачки,
- оптический резонатор.

- **Рабочее тело** – некоторая среда, которая внешним воздействием переводится в активное состояние. В зависимости от типа рабочего тела лазеры делятся на газовые, твёрдотельные, жидкостные, полупроводниковые
- **Система накачки** – устройство для приведения рабочего тела в активное состояние. Накачка может быть непрерывной или импульсной. Используют следующие виды накачки:
 - • **"Оптическая накачка"** - возбуждение интенсивным светом.
 - • **Возбуждение газовой среды электрическим разрядом.**
 - • **Электрический ток** используется для накачки полупроводниковых или химических лазеров.
- **Оптический резонатор**-это устройство, обеспечивающее положительную обратную связь и формирующее когерентный луч с очень малой степенью расходимости. В простейшем случае оптический резонатор представляет собой два плоскопараллельных зеркала (обращенных друг к другу) установленных на одной оси, и между которыми помещается рабочее тело. Одно из зеркал полупрозрачно.

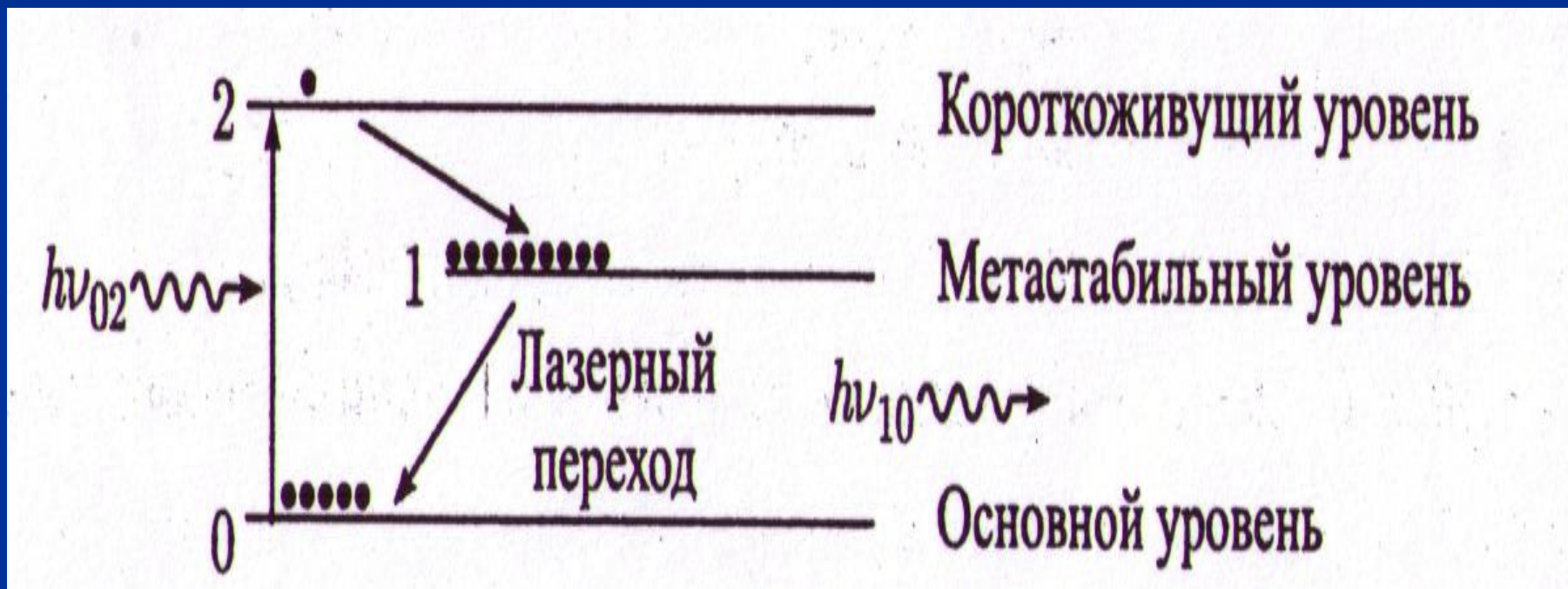
Процесс генерации излучения

- Система накачки создаёт в рабочем теле **инверсную населённость**. После этого начинается процесс спонтанного возвращения частиц в невозбуждённое состояние. При этом частицы испускают фотоны.
- Те фотоны, которые после спонтанного излучения движутся вдоль оси резонатора в направлении перпендикулярном зеркалам З1 и З2, будут поочередно отражаться от них и усиливаться при каждом проходе через активную среду. За счёт этого возрастает число их взаимодействий с возбуждёнными атомами и происходит «лавинообразное» нарастание индуцированных фотонов. Многократно усиленный поток фотонов выходит через полупрозрачное зеркало, создавая мощный пучок почти параллельных когерентных лучей.

4. Работа рубинового и гелий-неонового лазера

- Таким образом, инверсию населенностей уровней можно создать только, если использовать более двух уровней из большого набора состояний атомной системы. Возможны трех- и четырехуровневые системы.
- Рассмотрим создание инверсной населённости на примере трёхуровневой системы, используемой в рубиновых лазерах.
- Рубин-это кристаллическая окись алюминия Al_2O_3 , являющаяся прозрачным и бесцветным веществом. В это вещество внедрены атомы хрома, которые придают рубину розовый цвет и именно он обеспечивает лазерную генерацию.

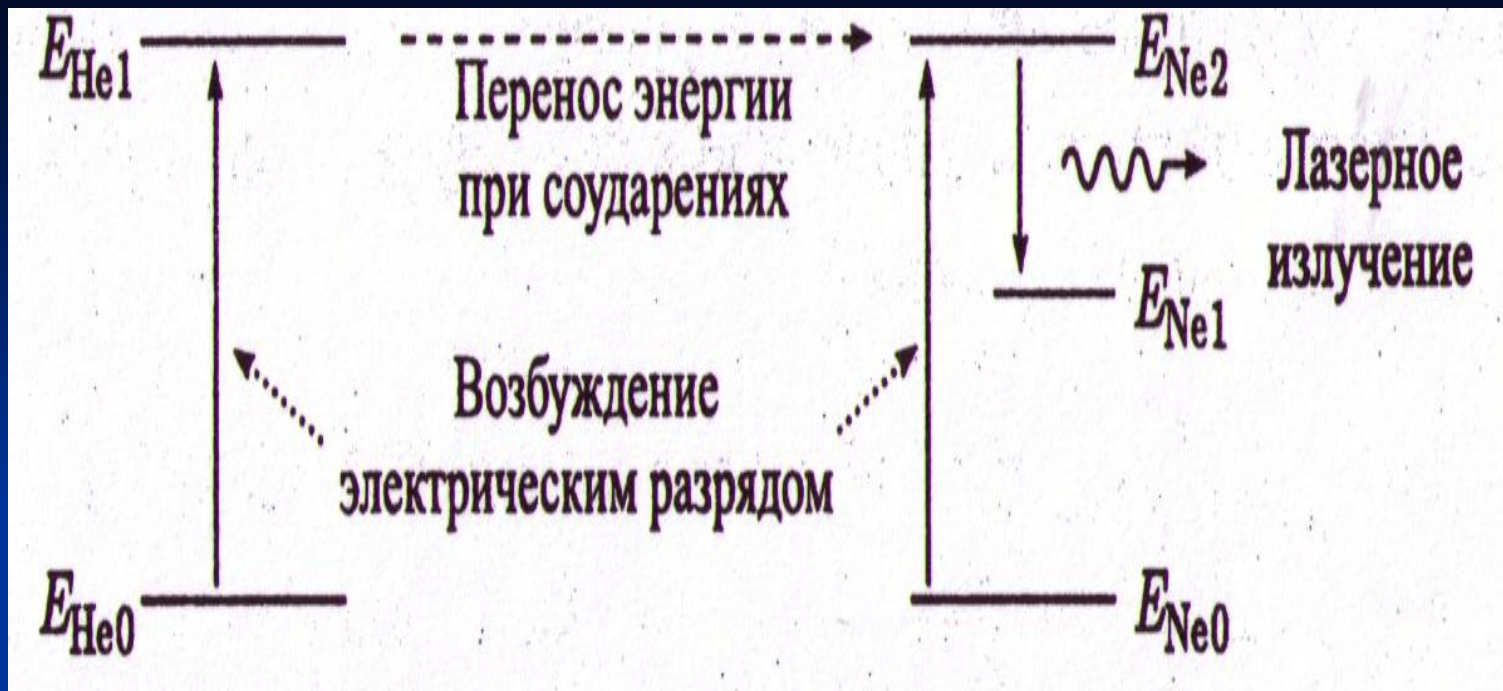
Из всего множества энергетических уровней атома хрома используются три: основной, первый (метастабильный - время жизни около 3 сек.) и второй уровень с малым временем жизни 10^{-9} - 10^{-8} сек. (Рис.4).



- Для создания инверсной населённости рубин облучают мощным импульсом света. В результате облучения на уровне 2 накапливаются возбуждённые частицы, которые в процессе релаксации опускаются на уровень 1, где их число превысит количество частиц на нулевом уровне. Таким образом, между уровнями 0 и 1 будет создана инверсная населённость. В результате которой переход фотонов с уровня 1 на уровень 0 происходит спонтанно и сопровождается излучением с длиной волны $\lambda = 694,3$ нм.

Гелий – неоновый лазер

- Широкое распространение в реабилитационной медицине получил гелий-неоновый лазер. В нём используется четырёхуровневая система создания инверсной населённости. Активной средой является смесь газов гелия и неона в соотношении 10:1. Лазерный переход происходит в неоне, то есть атомы неона являются излучающими, атомы гелия – вспомогательными, необходимыми для создания инверсной населённости атомов неона. На рис.5 показаны энергетические уровни атомов гелия и неона.



- Подача энергии при возбуждении (накачка) осуществляется через электрический разряд. 1ый возбуждённый уровень атома гелия совпадает с уровнем 2 для атома неона. Поэтому при соударении возбуждённых атомов гелия с невозбуждёнными атомами неона происходят передача энергии последним и перевод их в возбуждённое состояние 2.

- Таким образом, атомы гелия способствуют увеличению населённости уровня 2 атомов неона. В результате создаётся активная среда, состоящая из атомов неона с инверсной населённостью уровней 2 и 1. Спонтанный переход отдельных атомов неона с энергетического уровня 2 на уровень 1 вызывает появление фотонов. При дальнейшем взаимодействии этих фотонов с возбуждёнными атомами неона возникает индуцированное когерентное излучение последних. Чаще всего используются гелий – неоновые лазеры с длиной волны $\lambda=632,8$ нм, мощностью 100 мВт.

5. Особенности лазерного излучения

- Устройства лазера и свойства вынужденного излучения обуславливают отличие лазерного излучения от излучения обычных источников света. Лазерное излучение (ЛИ) характеризуется следующими важнейшими свойствами.

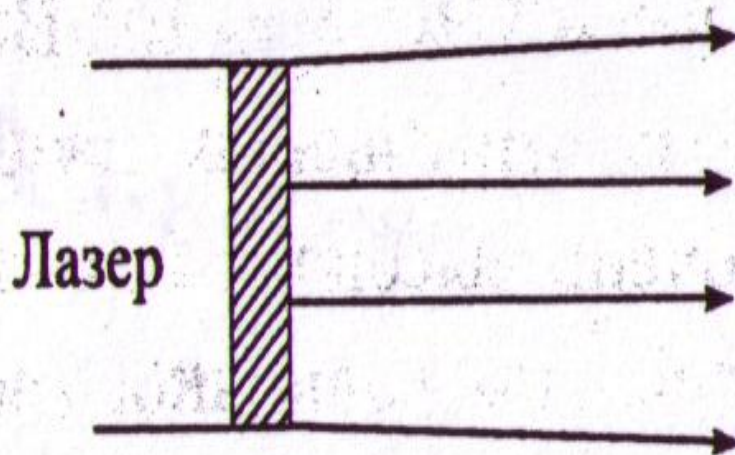
- **Высококогерентность.** Излучение является **высококогерентным**, что обусловлено свойствами вынужденного индуцированного излучения. При этом имеет место не только временная, но и пространственная когерентность: разность фаз в двух точках плоскости, перпендикулярной направлению распространения, сохраняется постоянной (рис 6а).
- **Монохроматичность.** Лазерное излучение является в **высокой степени монохроматическим**, то есть содержит волны практически одинаковой частоты (рис.6в).

- **Высокая яркость.** У лазеров, работающих в видимом диапазоне, яркость лазерного излучения (сила света с единицы поверхности) очень велика. Даже самые слабые лазеры имеют яркость 10^{15} кд/м² (для сравнения: яркость Солнца $L \sim 10^9$ кд/м²).
- **Малый угол расходимости в пучке.**
Коллимированность, то есть все лучи в пучке почти параллельны друг другу. Минимальный возможный угол расходимости составляет $\varphi = 10^{-4} - 10^{-5}$ (рад). (рис.6).
- **Поляризованность.** Лазерное излучение полностью поляризовано.

а) Когерентность



б) Коллимированность



в) Монохроматичность

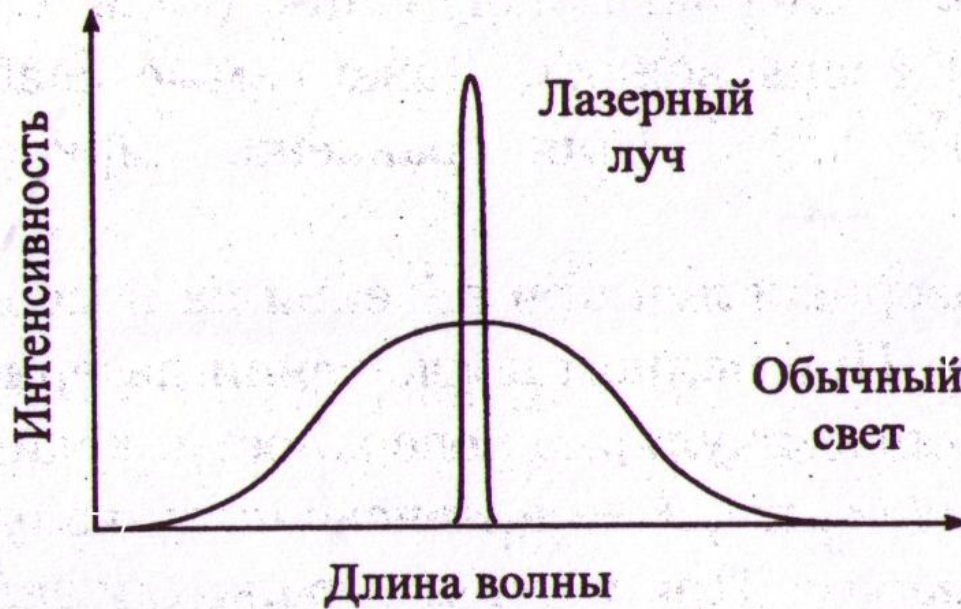


Рис. 6 Когерентность (а), коллимированность (б), монохроматичность (в) лазерного излучения

6. Характеристики лазерного излучения, применяемого в медицине

- **1. Длина волны излучения.** Длина волны излучения (λ) лежат в диапазоне **0,2-10 мкм**, то есть от ультрафиолетовой до инфракрасной области.
- **2. Мощность излучения.** Мощность излучения (P) медицинских лазеров варьируется в широких пределах, определяемых целями применения. Для непрерывных медицинских лазеров **$P=0,01-100$ Вт**. Для хирургических лазеров **$P_{и}=10^3-10^8$ Вт**, а длительность импульса **$t_{и}=10^{-9}-10^{-3}$ с**.
- **3. Энергия в импульсе излучения.** Энергия одного импульса лазерного излучения ($E_{и}$) определяется соотношением **$E_{и}=P_{и} \cdot t_{и}$** . Для хирургических лазеров **$E_{и}=0.1-10$ Дж**.
- **4. Частота следования импульсов.** Эта характеристика (f) импульсных лазеров показывает количество импульсов излучения, генерируемых лазером за 1 с. Для терапевтических лазеров **$f=10-3000$ Гц**, для хирургических **$f=1-100$ Гц**.

- **5. Средняя мощность излучения.** Эта характеристика ($P_{\text{ср}}$) импульсно-периодических лазеров показывает, какую энергию лазер излучает за 1с.
- **6. Интенсивность (плотность мощности).** Эта характеристика (I) определяется как отношение мощности лазерного излучения к площади поперечного сечения пучка. Для непрерывных лазеров $I=P/S$.
- **7. Доза облучения.** Эта величина характеризует энергию, которая приходится на единицу площади облучаемой поверхности за весь сеанс. Для непрерывных лазеров $D=It$, где t - время облучения в секундах.
- **8. Плотность энергии в импульсе.** Эта величина характеризует энергию, которая приходится на единицу площади облучаемой поверхности за один импульс, и определяется соотношением $W=E_{\text{и}}/S$, где S (см^2)-площадь светового пятна (то есть поперечного сечения лазерного луча) на поверхности биоткани. Для хирургических лазеров $W \approx 100 \text{ Дж/см}^2$.
- **9. Фокусное расстояние фокусирующего элемента.** При использовании лазера в качестве скальпеля необходимо его луч сфокусировать на биоткани в виде малого светового пятна (иначе вместо тонкого разреза получится широкий ожог). Для этого обычно используются линзы. Характеристикой фокусирующего элемента является его фокусное расстояние F .

- **10. Диаметр фокального пятна.** Если лазерный пучок с однородным распределением интенсивности и фазы по сечению фокусируется линзой с фокусным расстоянием F , то минимальный достижимый диаметр пучка $d \approx 10-100d_{\min}$, где $d_{\min} \approx \lambda$.

■ **7. Взаимодействие лазерного излучения с биообъектами**

- Процессы, характеризующие виды взаимодействия ЛИ с биообъектами, можно разделить на 3 группы:
- • невозмущающее воздействие (не оказывающее заметного действия на биообъект);
- • фотохимическое действие (возбуждённая лазером частица либо сама принимает участие в соответствующих или другой частице, участвующей в химических реакциях, либо передаёт свое возбуждение);
- • фоторазрушение (за счёт выделения тепла или ударных волн).

8. Использование лазерного излучения в диагностике

- Лазерная диагностика представляет собой невозмущающее воздействие на биообъекты, использующее когерентность лазерного излучения.
- **Основные методы диагностики:**
- • **Интерферометрия.** При отражении лазерного излучения от шероховатой поверхности образуются вторичные волны, которые интерферируют между собой, образуя картину из светлых и тёмных пятен, расположение которых даёт информацию о поверхности объекта.

- • **Голография.** С помощью лазерного излучения получают 3-мерное изображение объекта. В медицине этот метод позволяет получать объёмные изображения внутренних полостей желудка, глаза и т.д.
- • **Рассеяние света.** Позволяет определять размеры частиц среды (от 0,02 до 300 мкм) и степень их деформации.
- • **Эффект Доплера.** Этот метод основан на измерении доплеровского сдвига частоты ЛИ, который возникает при отражении даже от медленно движущихся частиц. Таким способом измеряется скорость кровотока в сосудах, подвижность бактерий и т.д.

- **Лазерная масс-спектрометрия.** Этот метод используют для исследования химического состава объекта. Микропробы испарённого ЛИ биологического вещества подвергают масс-спектральному анализу, по результатам которого судят о составе вещества.
- **•Лазерный анализ крови.** Лазерный луч , пропускаемый через узкий кварцевый капилляр, по которому прокачивается специально обработанная кровь , вызывает флуоресцентное свечение клеток крови, которое специфично для каждого типа клеток в заданном объёме крови. Определяются точные количественные показатели по каждому типу клеток.

9. Использование лазерного излучения в терапии

- В терапии используются низкоинтенсивные лазеры (интенсивность $0.1-10 \text{ Вт/см}^2$). Низкоинтенсивные лазеры не вызывают заметного деструктивного действия на ткани непосредственно во время облучения.
- **Распространённые методы лазеротерапии:**
- **Терапия с помощью красного света.** Излучение **He-Ne** лазера с длиной волны **632,8 нм** используется с противовоспалительной целью для лечения ран, язв, ишемической болезни сердца.
- **Терапия с помощью синего света.**
- Лазерное излучение с длиной волны в синей области видимого света используется, например, для лечения желтухи.
- Фотодинамическая терапия опухолей используется при удалении опухолей, доступных для облучения светом- происходит их разрушение.

10.Использование лазерного излучения в хирургии

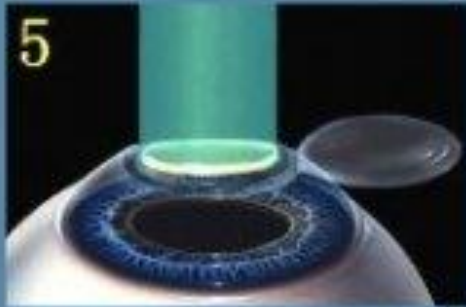
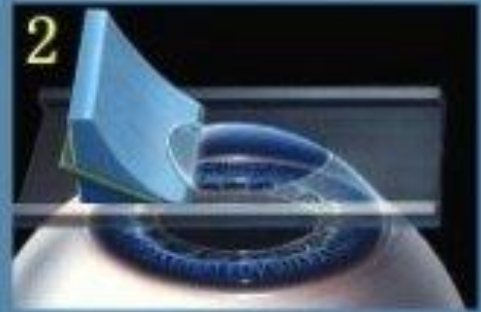
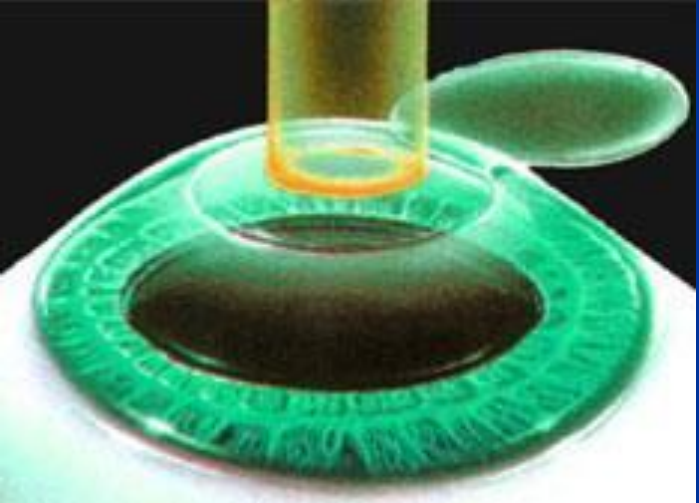
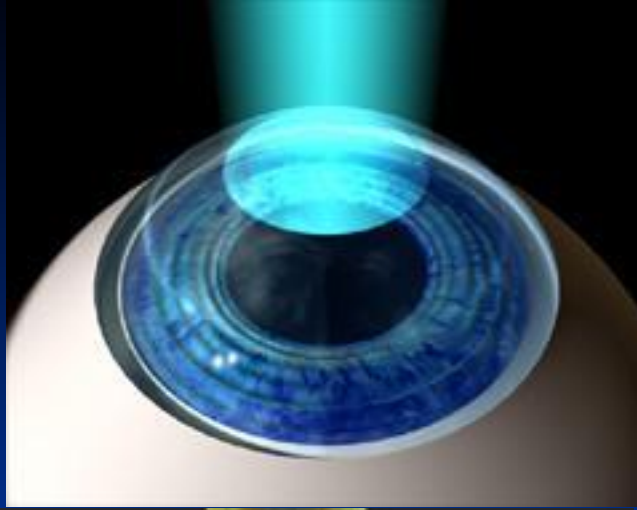
- В хирургии используются высокоинтенсивные лазеры. Лазерный луч используется в качестве универсального светового скальпеля. При воздействии на биоткань лазерного излучения большой интенсивности происходит её нагрев, коагуляция, испарение или же абляция. Эти явления используются в лазерной хирургии для рассечения тканей, удаления её патологических участков, остановки кровотечения, сваривания биотканей. Выбирая должным образом длину волны излучения, его интенсивность и длительность воздействия, можно получать различные хирургические эффекты. Так, для разрезания биологических тканей часто используется сфокусированный луч непрерывного CO_2 -лазера, имеющего длину волны $\lambda=10,6\text{мкм}$, мощность $2\cdot 10^3\text{Вт/см}^2$. Применение лазерного луча в хирургии обеспечивает избирательное и контролируемое воздействие.

Некоторые области хирургического применения лазеров:

- **Лазерная сварка тканей.** Соединение рассечённых тканей— это необходимый этап многих операций.
- **Разрушение пигментированных участков.** Для этой цели используются лазеры работающие в импульсном режиме. Данный метод используется для лечения ангиом, татуировок, склеротических бляшек в кровеносных сосудах и т.п.
- **Лазерная эндоскопия.** Внедрение эндоскопии позволяет избежать больших открытых операций, лазерное излучение доставляется к месту воздействия с помощью волоконно-оптических световодов, которые позволяют подводить лазерное излучение к биотканям внутренних полых органов.

- **Лазерный пробой.** Короткоимпульсные лазеры в сочетании со световодами применяют для удаления бляшек в сосудах, камней в желчном пузыре и почках.
- **Лазеры в офтальмологии.** Это операции на стекловидном теле; приваривание отслоившейся сетчатки и заваривание её сосудов (**офтальмокоагуляция**); лечение глаукомы путём «прокалывания» лазерным лучом отверстий (диаметром 50-100мкм) для оттока внутриглазной жидкости. Применяется послойная абляция тканей роговицы для коррекции зрения. При использовании эксимерного лазера (длина волны – 193нм, продолжительность импульса-10-25нс) осуществляется холодное выпаривание (абляция) поверхностных слоёв роговицы на глубину до 120мк. Эксимерные лазеры под компьютерным контролем способны производить коррекцию нарушений рефракции (от-20 до +20дптр). Время лазерного вмешательства не превышает одной минуты.





Пластина, контролирующая интервал

Толщина 0,16 мм

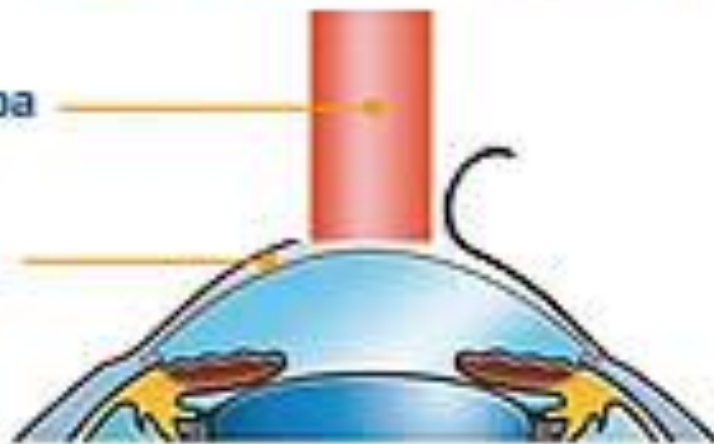
Лезвие микроножа

Роговица



Луч лазера

Роговица



Роговица



