

Применение лазеров в медицине



Профессор Власова О.Л.
Кафедра медицинской физики
<http://medfiz.ru/>

Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций
Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого <http://www.spbstu.ru/>

Лазерные биомедицинские технологии

- **Вынужденное излучение**, являющееся процессом усиления излучения технически реализуется в зависимости от генерируемой длины волны в виде лазера, мазера или гразера
- (**LASER** – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation–усиление света путем вынужденного излучения) или в виде мазера (**MASER**–Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation–микроволновое усиление путем вынужденного излучения) или в виде гразера
- (**GRASER**–Gamma-Ray Amplification of Stimulated Emission of Radiation–усиление гамма-лучей путем вынужденного излучения).

Рекомендуемая литература

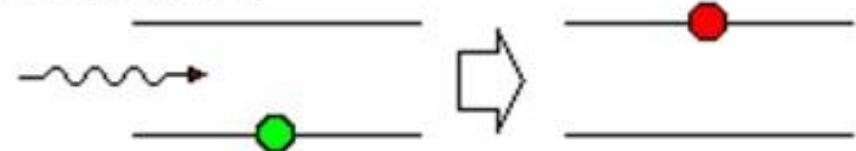
- Прикладная лазерная медицина/Под редакцией Х.-П. Берлиена, Г.Й. Мюллера//Учебное и справочное пособие: Интерэксперт.Москва. 1997. 343 с.



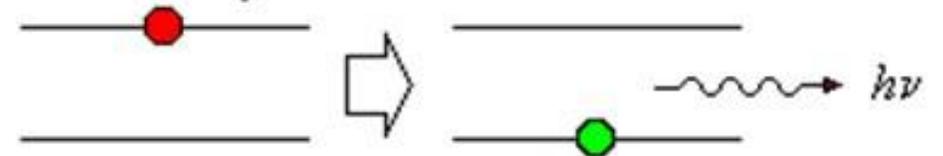
Немного истории

- Принцип действия лазера был описан еще Эйнштейном в далеком **1917** году.
- В **1939** году молодой советский ученый **В.А. Фабрикант** вернулся к введенному Эйнштейном в физику понятию **вынужденного излучения**.
- Исследования Валентина Александровича Фабриканта заложили прочный фундамент для создания лазера.

а) Поглощение



б) Спонтанное излучение



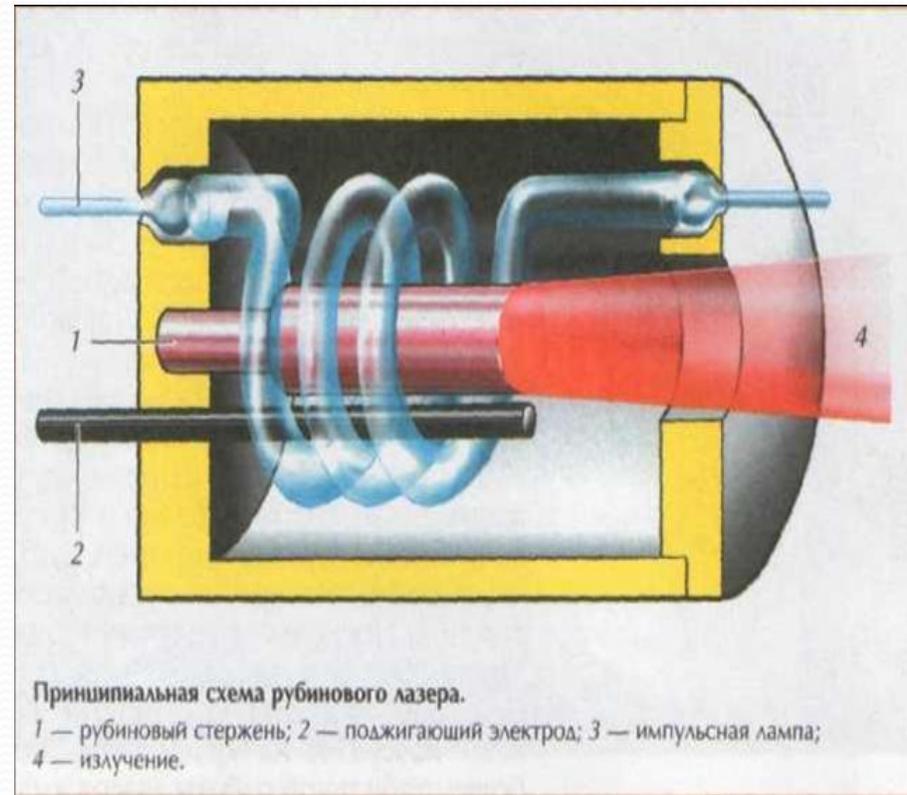
в) Вынужденное излучение



- — невозбужденный атом с энергией E_i
- — возбужденный атом с энергией E_j

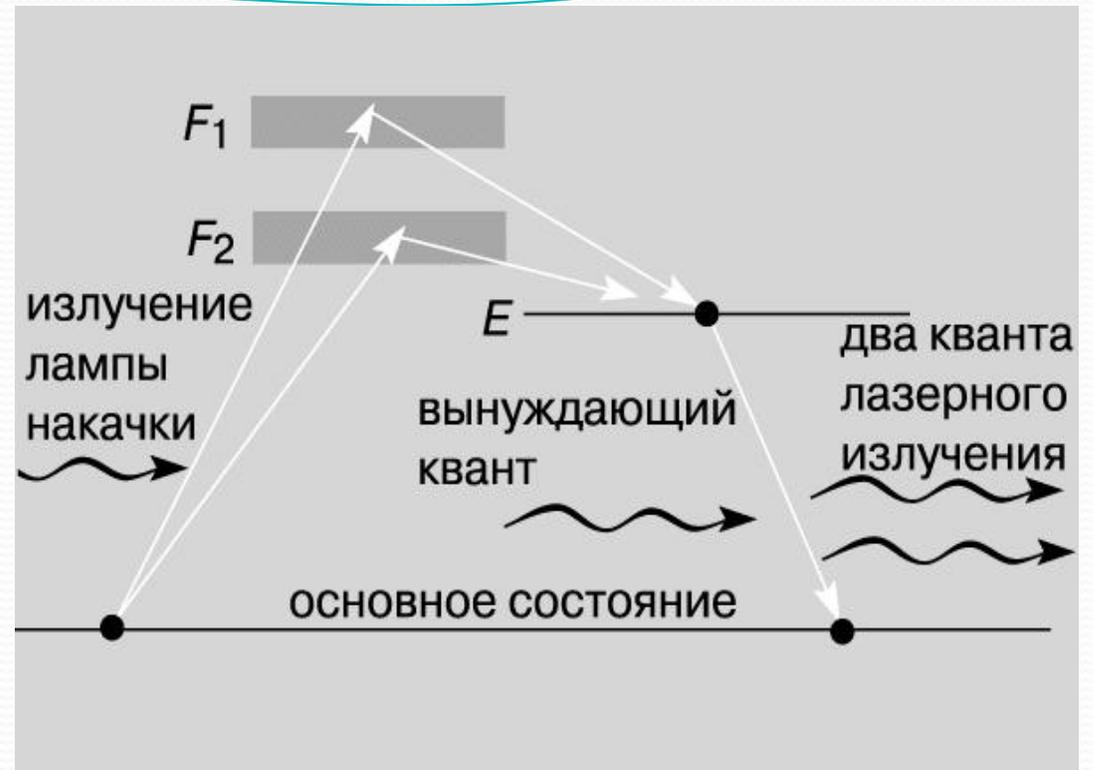
- Однако техническое создание источника вынужденного излучения произошло только в пятидесятые годы благодаря творческой работе **советских ученых Александра Прохорова, Николая Басова и американца Чарльза Харда Таунса.**
- В **1955 г.** советские ученые разработали квантовый генератор — **мазер**, активной средой которого были пары аммиака.
- В **1964** году Басов, Прохоров и Таунс (США) стали лауреатами Нобелевской премии, которой они были удостоены за фундаментальные исследования в области **квантовой электроники**, приведшие к **созданию мазеров и лазеров.**
- Первый работающий **лазер** был построен лишь в **1960 г. Теодором Мейманом**, который работал в компании Hughes Aircraft.
- Для получения миллисекундных импульсов лазерного излучения он использовал кристалл искусственного **рубина** как активную среду. Длина волны того лазера была **694 нм.**
- Через некоторое время был испробован уже лазер с длиной волны в **1060 нм**, что является ближней ИК-областью спектра. В качестве активной среды в этом лазере выступали стеклянные стержни, легированные неодимом.

Создать свой первый лазер Мейману удалось после девяти месяцев непрерывной гонки, работая в лаборатории Hughes Research, которая соревновалась с другими ведущими компаниями, такими как Lincoln Labs, IBM, Westinghouse, Siemens, RCA Labs, GE, Bell Labs, TRG. Затем ему еще долго пришлось бороться за свой приоритет, который в конце концов стал общепризнанным. Последние годы жизни Мейман занимался технологиями применения лазеров в медицине.



ДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРА

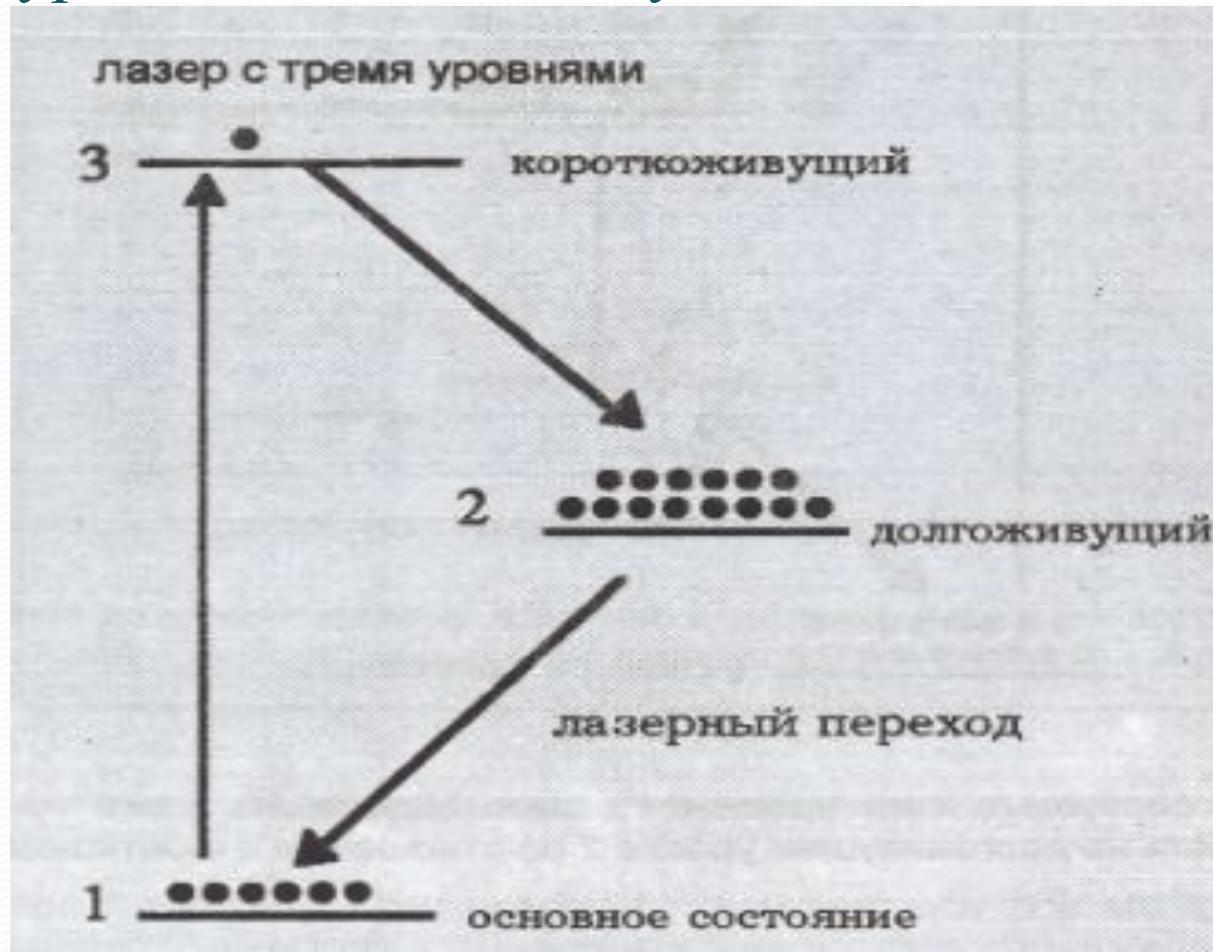
Действие лазера начинается с возбуждения атомов и их переходов на энергетические уровни F_1 и F_2 . Затем каждый возбужденный атом спонтанно (самопроизвольно, т.е. невынужденно) излучает квант (нелазерного излучения) и, потеряв часть своей энергии, переходит на метастабильный уровень E .



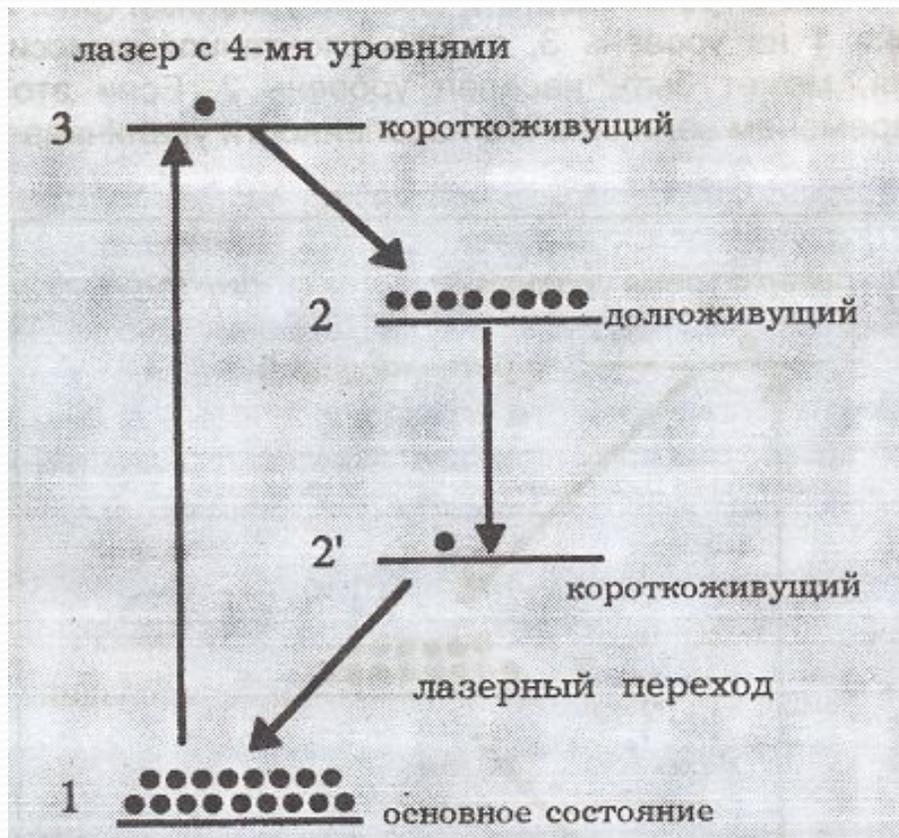
Далее, под воздействием вынуждающего кванта с лазерной длиной волны (такие кванты есть в излучении лампы накачки) атом излучает еще один такой же квант, согласованный по фазе с вынуждающим, и переходит на свой основной энергетический уровень.

- **Генерация лазерного излучения может быть достигнута, если имеется инверсия населенности двух энергетических уровней.**
- Чтобы получить эту инверсию населенности, в лазерную среду должна быть введена энергия в соответствующей форме.
- Этого можно добиться различным образом, независимо от специфического лазерного процесса. Тем не менее, тот или иной метод возбуждения следует выбирать и оптимизировать специально для соответствующего типа лазера.
- Основные методы возбуждения – это возбуждение очень интенсивным светом, так называемая **«оптическая накачка»**, и возбуждение **электрическим газовым разрядом**. В полупроводниковых лазерах возбуждение осуществляется непосредственно **электрическим током**. Для возбуждения могут быть использованы также **химические реакции**.

- С помощью оптической накачки в двухуровневой системе нельзя произвести инверсию населенности. По-другому дело обстоит в системах с тремя и большим числом уровней. В трехуровневой лазерной системе при очень интенсивной накачке с уровня 1 на уровень 3 можно получить на уровне 2 более высокую населенность, чем на уровне 1.



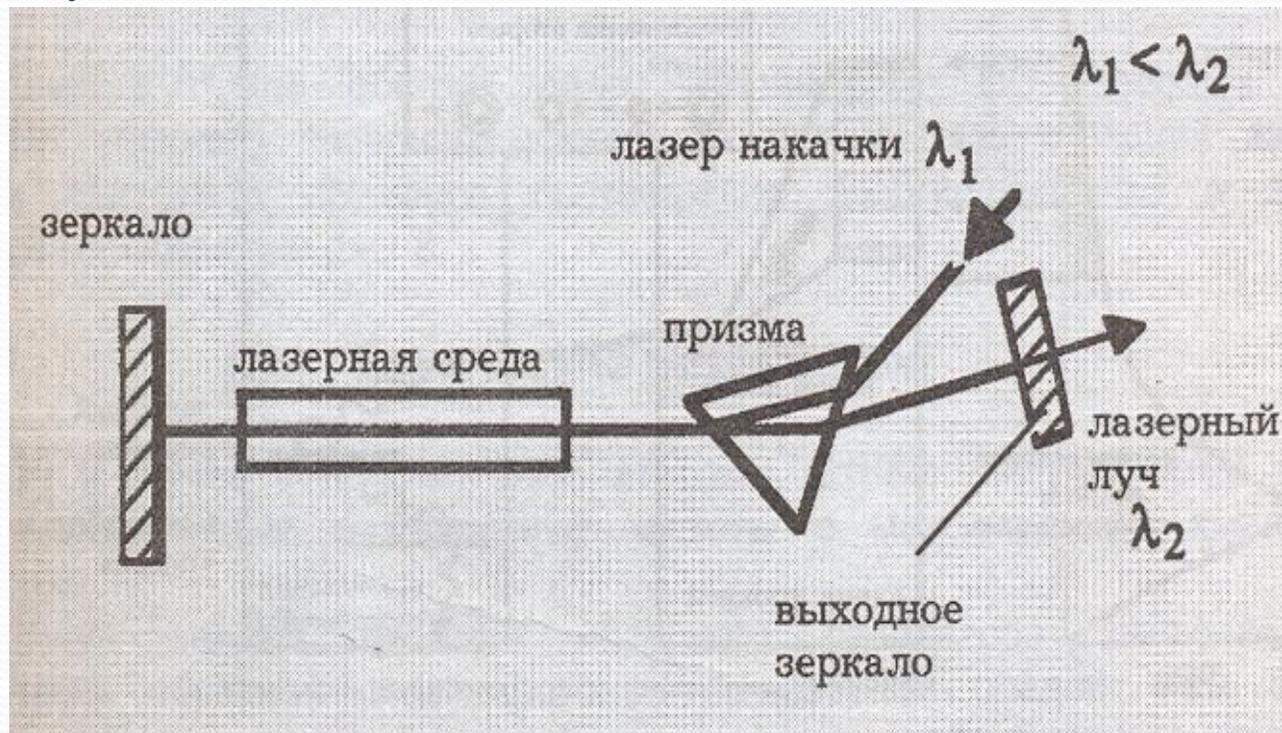
- Если систему с тремя уровнями расширить на еще один уровень 2' между уровнем 1 и уровнем 2, то можно избежать проблем трехуровневого лазера в отношении короткой по времени инверсии населенности, при условии, что уровень 2' является очень короткоживущим. Если лазерный переход осуществляется с уровня 2 на уровень 2', то уровень 2' при работе лазера



кого существования
 сновной уровень. В этой
 незначительной мощности
 постоянно сохранять инверсию насе-
 ровнями 2 и 2'. Лазеры с 4-мя
 отать в непрерывном
 wave).

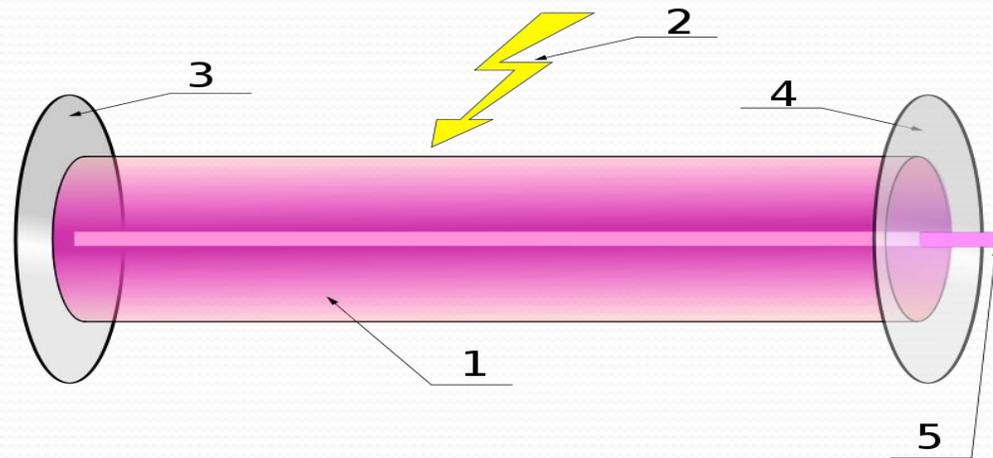
Оптическая накачка

- Если активную среду облучают интенсивным светом, то **благодаря поглощению могут быть населены более высокие энергетические уровни**. Этот процесс называют «**оптической накачкой**». В качестве источников света применяются очень интенсивные лампы-вспышки, непрерывно излучающие лампы высокого давления, а также другие лазеры. Так как для стимуляции лазерного перехода используется только часть энергии возбуждения, то длина генерируемой лазерной волны всегда больше, чем длина волны возбуждения.



УСТРОЙСТВО ЛАЗЕРА

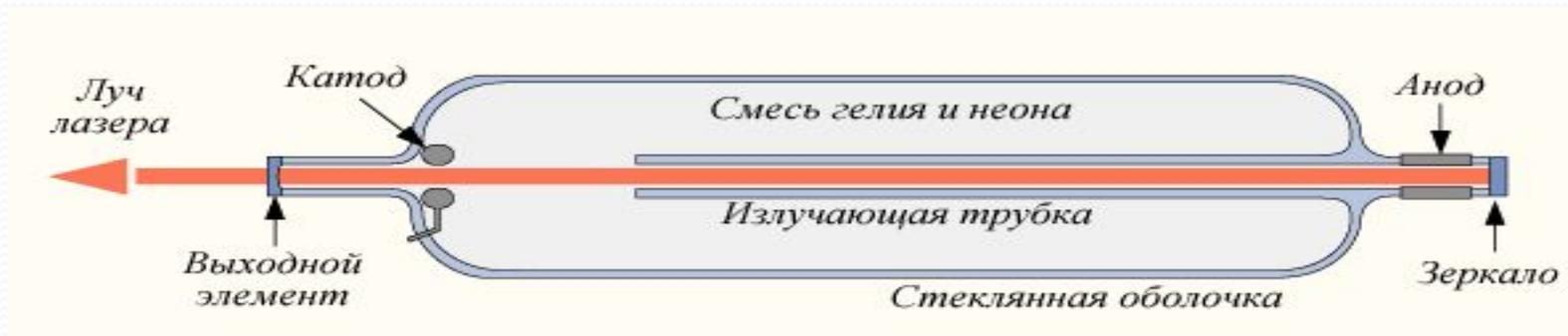
- активная среда (1)
- элементы накачки (2)
- система зеркал для усиления излучения (3, 4)
- средства доставки излучения (5)



Принципиальная схема устройства лазера.

АКТИВНАЯ СРЕДА

- кристалл, раствор, газ или полупроводник обеспечивает конкретную длину волны в зависимости от своего химического состава. Строго определенная длина волны излучения связана с одинаковой разницей в энергетических уровнях электронов в молекулах вещества.



- В качестве активной лазерной среды могут применяться все материалы, у которых можно обеспечить инверсию населенности. Это возможно у следующих материалов:
- а) свободные атомы, ионы, молекулы, ионы молекул в газах или парах;
- б) молекулы красителей, растворенные в жидкостях;
- в) атомы, ионы, встроенные в твердое тело;
- г) полупроводники;
- д) свободные электроны.
- По виду лазерной активной среды различают газовые, жидкостные, полупроводниковые и твердотельные лазеры.

ТВЁРДОТЕЛЬНОЕ ЛАЗЕРЫ

К твердотельным относятся:

- рубиновый (694 нм),
- гранатовый с неодимом (1064 нм),
- александритовый (700-820 нм),
- гольмиевый (2100 нм),
- эрбиевый (2940 нм).



Источник накачки: импульсная лампа, лазерный диод.

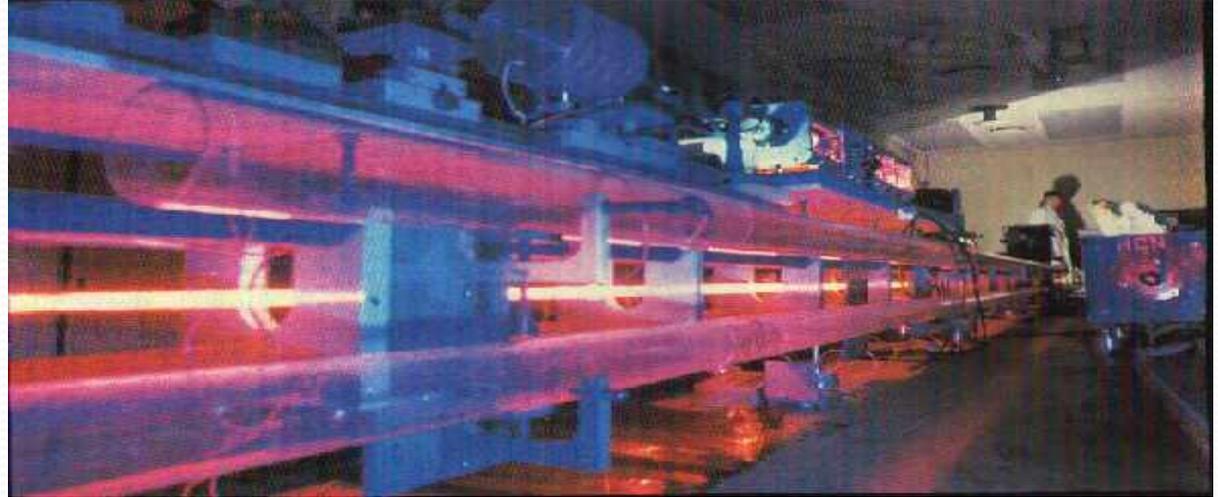
Особенности: параметры излучения зависят от оптических качеств используемого кристалла. Неоднородности кристаллической структуры могут серьезно ограничивать когерентность лазера. Кристаллы постоянно подвержены разрушениям; концентрация активирующих ионов задается в процессе изготовления лазера и является определенной величиной для данного кристалла.

Применение: хирургия

ГАЗОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

К газовым относятся:

- аргоновый (351 - 529 нм)
- эксимерный (193 - 353 нм)
- на парах меди (510 - 578 нм)
- гелий-неоновый (633 нм)



Источник накачки: электрический разряд, химическая реакция горения.

Особенности:

имеют заметно меньшую концентрацию активного вещества из-за низкой концентрации атомов в газе

Применение:

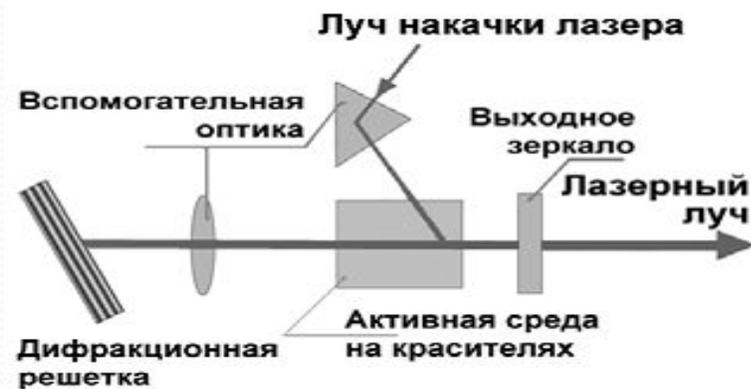
Диагностика, терапия, лазерная хирургия, лечение сетчатки глаза, коррекция зрения, дерматология.

ЖИДКОСТНЫЕ ЛАЗЕРЫ

К жидкостным относятся лазеры, работающие на растворах органических и неорганических красителей.

390—435 нм 460—515
нм 570—640 нм

Источник накачки: другой лазер, импульсная лампа.



Особенности:

высокую концентрацию активных атомов, которую легко можно изменять;
активная среда является дешевой и относительно мало подверженной повреждению;
не столь громоздки, как газовые системы, и проще в эксплуатации

Применение:

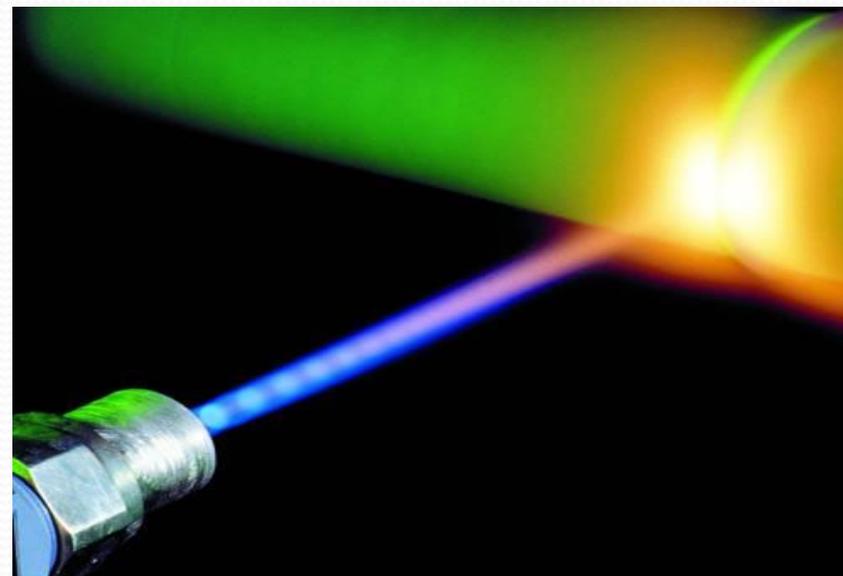
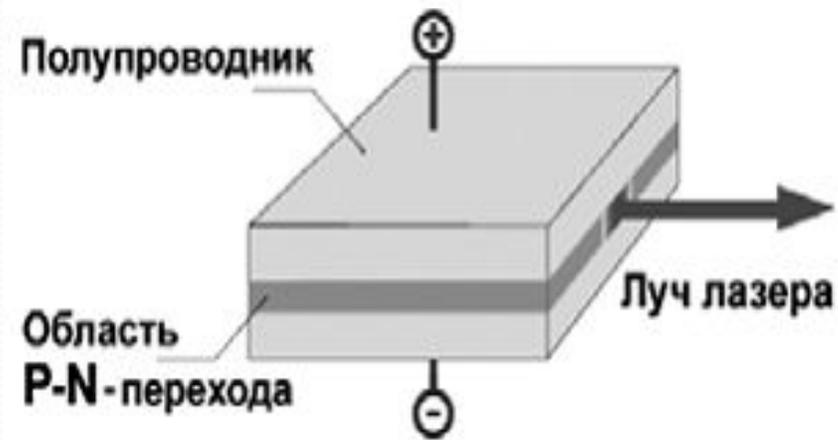
научные исследования,
спектроскопия,
косметическая хирургия.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

Появление полупроводниковых лазеров совершило революцию по причине их экономичности за счет высокого коэффициента полезного действия (до 60 - 80% в отличие от 10-30% при традиционных), малогабаритности, надежности.

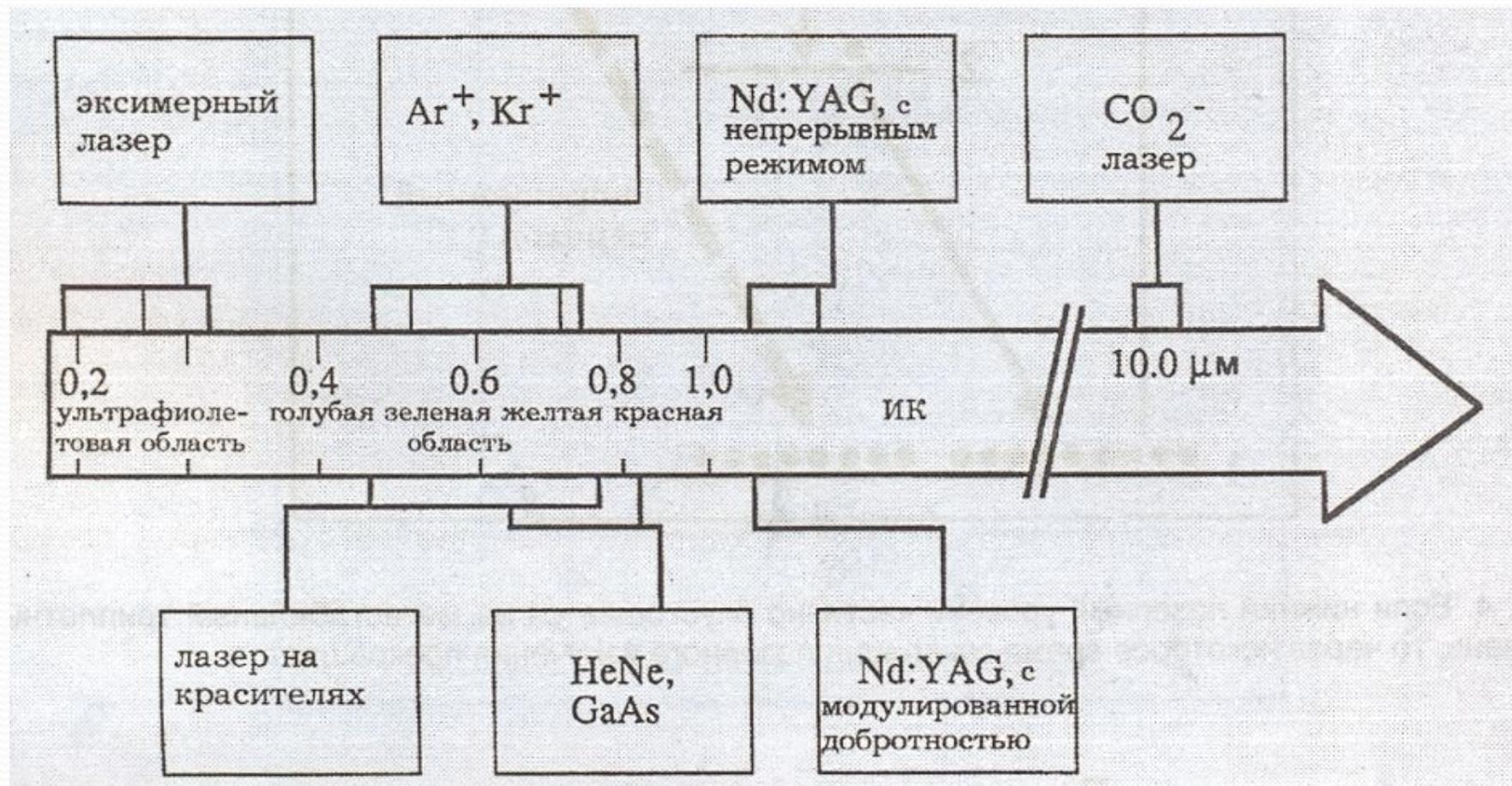
Рабочее тело – полупроводниковый лазерный диод. Электрическая и оптическая накачка.

Большой вклад в создание данного типа лазеров внесли работы Ж.И. Алферова. Он удостоен Нобелевской премии по физике (премия 2000 года за разработку полупроводниковых гетероструктур и создание быстрых опто- и микроэлектронных компонентов).



- Известны линии лазерной генерации от ультрафиолетовой области спектра (100 нм) до миллиметровых длин волн, в дальнем ИК-диапазоне лазеры плавно переходят в мазеры.
- Интенсивно ведутся исследования в области лазеров в диапазоне рентгеновских волн. Но практическое значение приобрели только два-три десятка типов лазера.
- **Наиболее широкое биомедицинское применение получили: CO_2 -лазер, лазер на ионах аргона и криптона, Nd:YAG-лазеры непрерывного и импульсного режима, лазеры на красителях непрерывного и импульсного режима, He-Ne-лазер, эксимерные лазеры, Nd:YAG-лазеры с удвоение частоты (КТП), Er:YAG-лазеры и лазеры на парах металлов** также все шире применяются в медицине.

Типы лазеров, наиболее часто применяемые в медицине



Основные типы лазеров, используемые в медицине

Тип лазера	Длина волны		Примечания
	Основная	Другие возможные	
Nd:YAG	1,06 мкм	0,53 мкм 0,355 мкм 0,266 мкм	
CO ₂	10,6 мкм	9,6 мкм	
He-Ne	633 нм	3,391 мкм – ИК 543 нм – зеленый 594 нм – желтый 604 нм - оранжевый 612 нм – оранжевый	$P_{\max} : 100$ мВт
Ar	488 нм – голубой 515 нм – зеленый	Ряд дискретных линий в диапазоне 350 – 530 нм (УФ – зеленый)	$P_{\max} : 30$ Вт
Kr	530 нм – зеленый 568 нм – желто-зеленый 676 нм - красный	Ряд дискретных линий в диапазоне 350 – 800 нм (УФ – ИК)	$P_{\max} : 10$ Вт
На красителе	400 – 900 нм перестраиваемая в диапазоне шириной 500 – 100 нм для каждого лазера		

Почему лазерное излучение нашло такое широкое применение в медицине? Основными особенностями лазерного излучения в применении к лазерной медицине являются:

- направленность, монохроматичность, когерентность, определяющие возможность локализации энергии,

- широкий спектральный диапазон существующих лазеров (это особенно важно в том случае, когда поглощение носит резонансный характер),

- возможность в широких пределах управлять длительностью воздействия (существующие лазеры обеспечивают длительность воздействия от фемтосекундного диапазона до непрерывного воздействия),

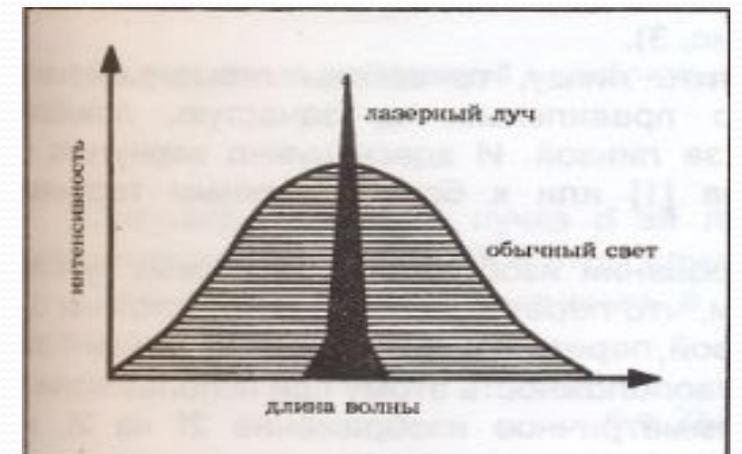
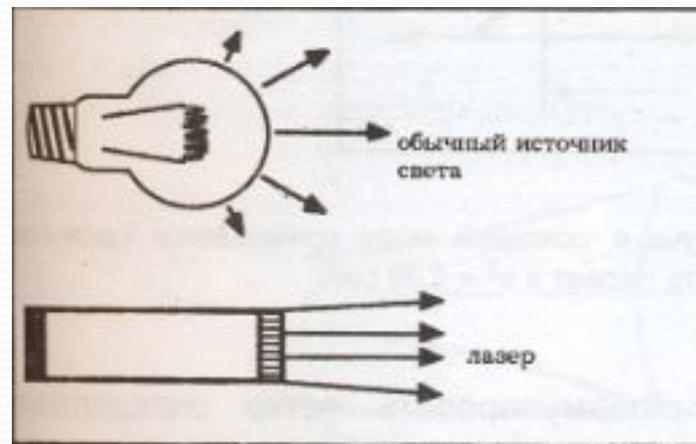
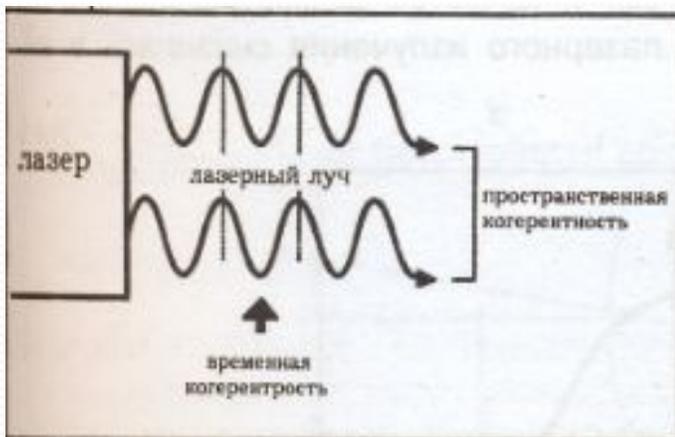
- возможность плавного изменения в широких пределах интенсивности воздействия,

- возможность изменения частотных характеристик воздействия,
- широкие возможности оптического управления процессами, в том числе, возможность организации обратной связи,
- широкий спектр механизмов воздействия: тепловой, фотохимический, сугубо биофизический, химический,
- простота доставки излучения,
- возможность бесконтактного воздействия, что обеспечивает стерильность,
- возможность проведения бескровных операций, связанная с тепловым и, следовательно, коагуляционным действием излучения.

Таким образом, лазер представляется исключительно точным, универсальным и удобным в использовании инструментом и имеет большой потенциал для медицинских применений в будущем.

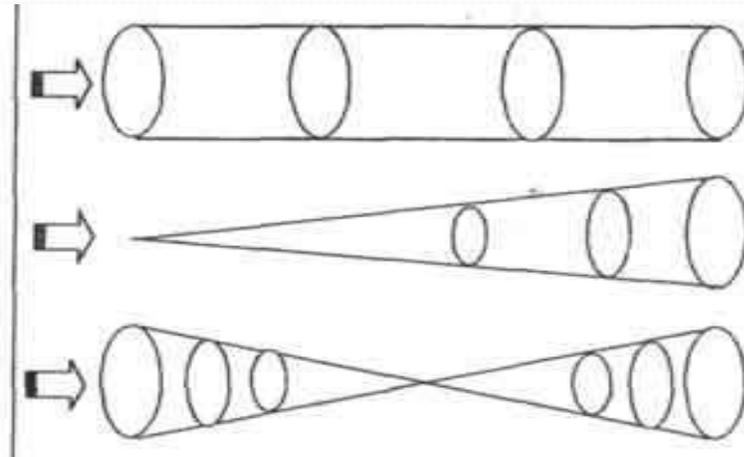
- Лазерное излучение характеризуется тремя важными признаками.
- Излучение является когерентным, т.е. все цуги волн являются синфазными, как во времени, так и в пространстве.
- Излучение является сильно коллимированным, т.е. все лучи в пучке почти параллельны друг другу. На большом расстоянии лазерный пучок лишь незначительно увеличивается в диаметре.
- Лазерное излучение является монохроматическим, т.е. все цуги волн имеют одинаковую длину волны, частоту и энергию.

● **а. когерентность** **б. коллимированность** **в. монохроматичность**



ПЛОТНОСТЬ ЭНЕРГИИ И МОЩНОСТИ

На конечный результат лазерного воздействия влияют не абсолютные величины энергии и мощности, а их плотность, т.е. распределение по площади пятна. В коллимированном пучке излучения плотность мощности практически одинакова по всей его длине, в расходящемся пучке она убывает пропорционально углу расходимости, а в сходящемся она максимальна в точке фокуса.



В настоящее время доступны лазерные установки с очень широким диапазоном длительности воздействия – от часов и минут до фемтосек (10^{-15} с). Особенности временных характеристик излучения отражаются в спецификации установок – это режимы длительных воздействий: непрерывной генерации (мин, с), свободной генерации (мс, мкс), различной длительности импульсов, а также коротких и ультракоротких экспозиций: модулированной добротности (нс), синхронизации мод (пс - 10-12 с) и другие.

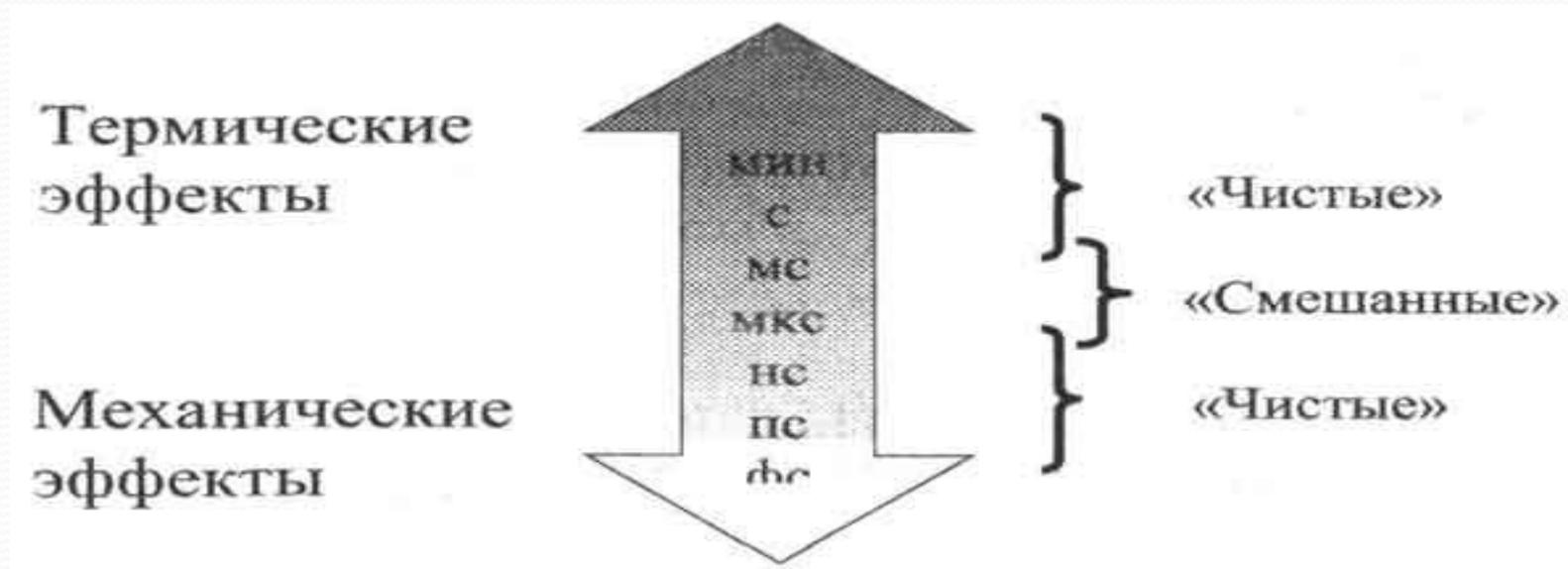
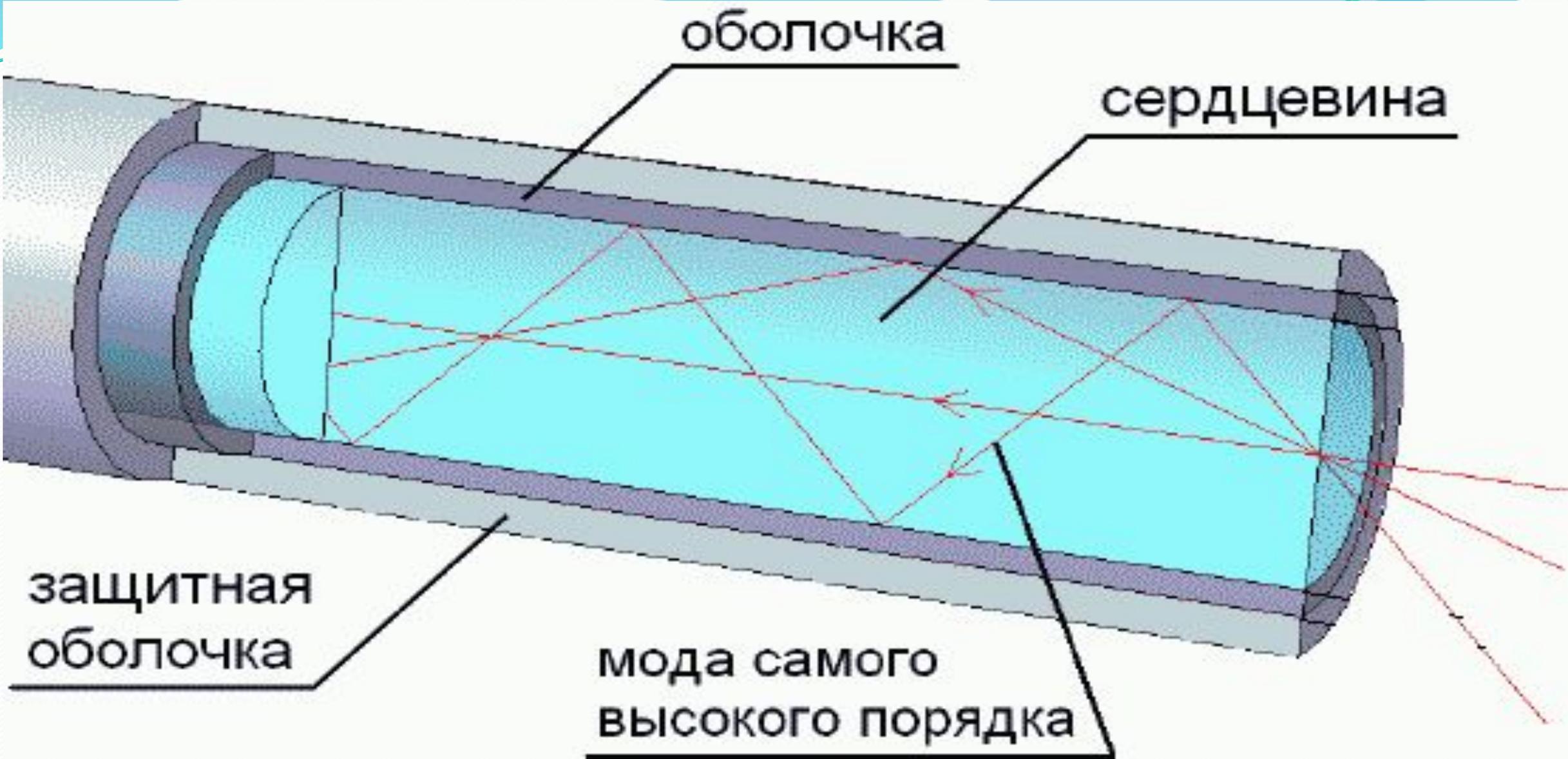


Схема проявления биоэффектов в зависимости от длительности лазерного воздействия.

Световод или оптическое волокно («доставка света»)

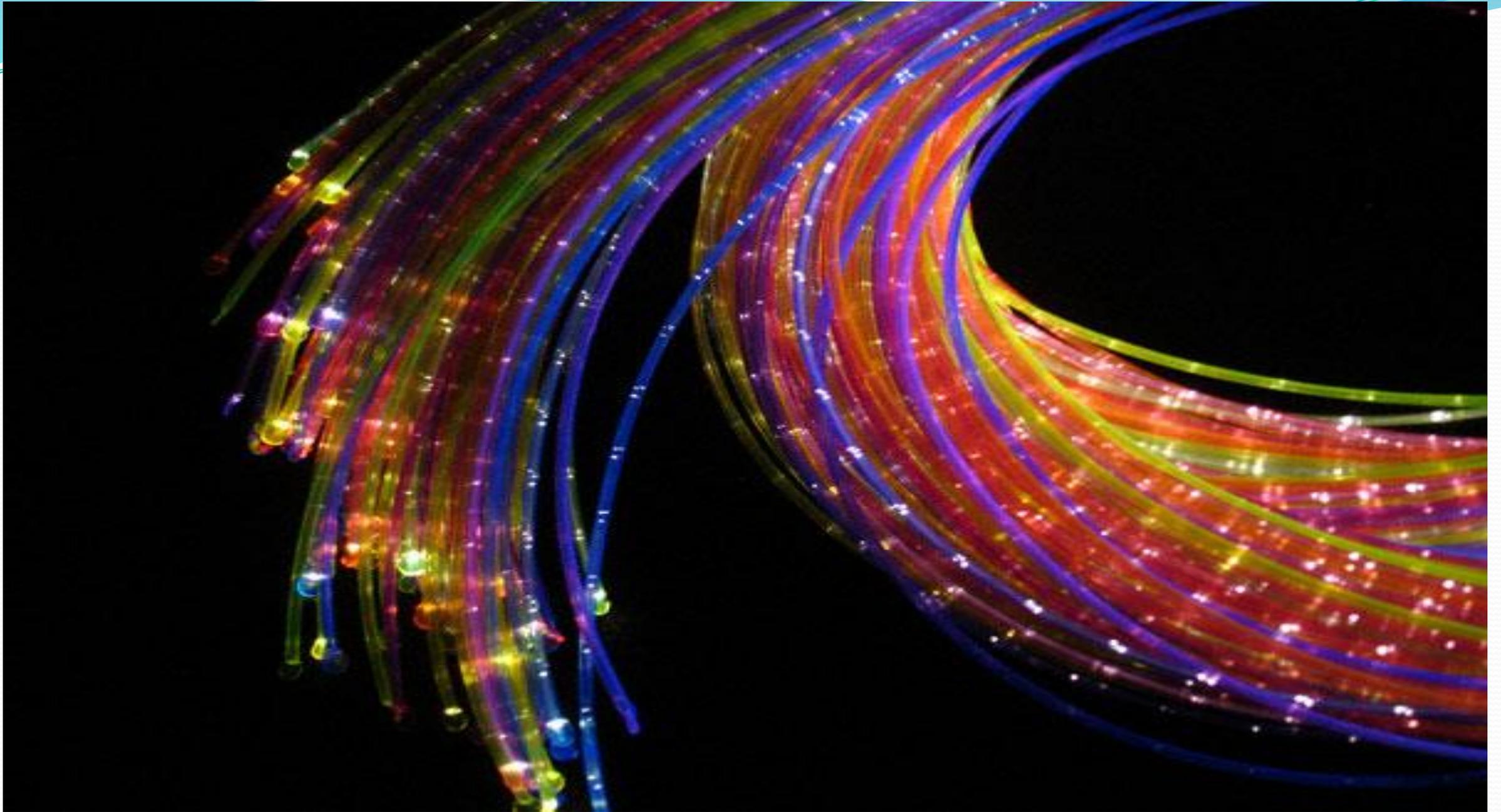


- **Оптическое** волокно состоит из **сердцевины и оболочки**, выполненных из оптического стекла или пластмассы (полистирол, полиметилметакрилат, политетрафторэтилен) и имеющих разные показатели преломления. Основное требование: **показатель преломления оболочки по своей величине меньше, чем показатель преломления сердцевины**; что позволяет свету при прохождении по оптическому волокну претерпеть ряд последовательных полных внутренних отражений на границе раздела оболочки и сердцевины и лишает луч возможности выхода за пределы отдельного волокна.



- Оптические волноводы, светопроводы, получают, объединяя одиночные оптические волокна в пучки путем скрепления только на концах (гибкие конструкции) или сплавляя вместе до слияния оболочек (жесткие конструкции). Световоды могут передавать на большие расстояния без значительных потерь энергии свет различного диапазона (средний и ближний ИК, видимый, УФ до 200 нм) и лазерное излучение.
- В медицине с диагностическими целями световоды используют при фиброгастроскопии, бронхоскопии и др.







Взаимодействие лазерного излучения с биообъектами

- Известные процессы могут быть подразделены на **фотохимическое** взаимодействие, **термическое** взаимодействие и **нелинейные** процессы. При этом доминируют при:
 - - низкой плотности мощности и продолжительном времени экспозиции – **фотохимические процессы**,
 - - более высокой плотности мощности и более коротком времени воздействия – **термические процессы**,
 - - воздействию плотности мощности более 10 Вт/см^2 с ультракоротким временем облучения (нс и короче) – **нелинейные эффекты**. Степень того или иного воздействия зависит:
 - а) **от свойств лазерного излучения** (длина волны, плотность энергии, длительность облучения и частота повторения);
 - б) **от свойств биологического материала** (коэффициент поглощения, коэффициент рассеяния, плотность и т.д.).

Использование различных видов воздействия лазеров на биообъекты в медицине

Невозмущающее действие и разрушающее действие (подготовка проб для диагностики) - диагностика:

- Рассеяние, поглощение, переизлучение

- Фотоионизация

Фотобиохимические действия (терапия):

- Однофотонное поглощение

- Многофотонное поглощение

Разрушающее действие (хирургия):

- Фотоионизация

- Тепловое воздействие

- Гидроудар

- Фотохимическое

По мощности лазерное (непрерывный режим излучения) воздействие делится на:

Низкоэнергетическое (0,5-3,0 мВт)

- Диагностика
- Воздействие на акупунктурные точки
- Внутривенное лазерное облучение крови

Среднеэнергетическое (200-2000 мВт)

- Фотодинамическая терапия
- Гипертермия (лазерная сварка)
- Физиотерапия (воздействие на очаг)
- Эндоскопическая диагностика (оптоволокну)

Высокоэнергетическое (20-100 Вт)

- Хирургия (лазерный скальпель), в том числе
- онкология
- косметология
- **В импульсе** может быть сосредоточена достаточно большая энергия.

НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ

Действие лазерного излучения на биологический материал обусловлено взаимодействием фотонов с молекулами и соединениями молекул ткани, последующими молекулярными процессами и биологическими реакциями.

Характер и интенсивность воздействия излучения на биоткань зависят:

– от свойств лазерного излучения (длина волны λ , плотность мощности излучения q , длительность облучения τ , частота повторения воздействия f),

– от свойств биологической ткани. При этом принципиально важными являются два комплекса свойств ткани: оптические свойства и теплофизические свойства.

- При взаимодействии с биологической тканью луч лазера ведёт себя штатно, т.е. в соответствии с законами физической оптики. Не только ткани, но и сама клетка, её внешние и внутренние структуры оптически неоднородны. Биологическая среда – активно преобразует световую энергию, например, во вторичное излучение, колебательные процессы, электронное возбуждение и т.д
- Биополимеры способны выступать в роли преобразователей-осцилляторов, возникает переизлучение с формированием колебательных гармоник, работающих как аккумуляторы.
- При этом создаются сгустки волновых процессов – уединённые электромагнитные волны **СОЛИТОНЫ**.
- **Соли́тон** — структурно устойчивая уединённая волна, распространяющаяся в нелинейной среде.

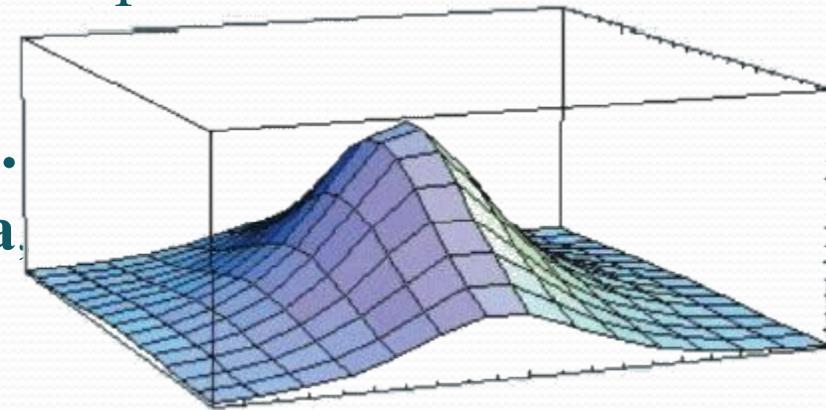
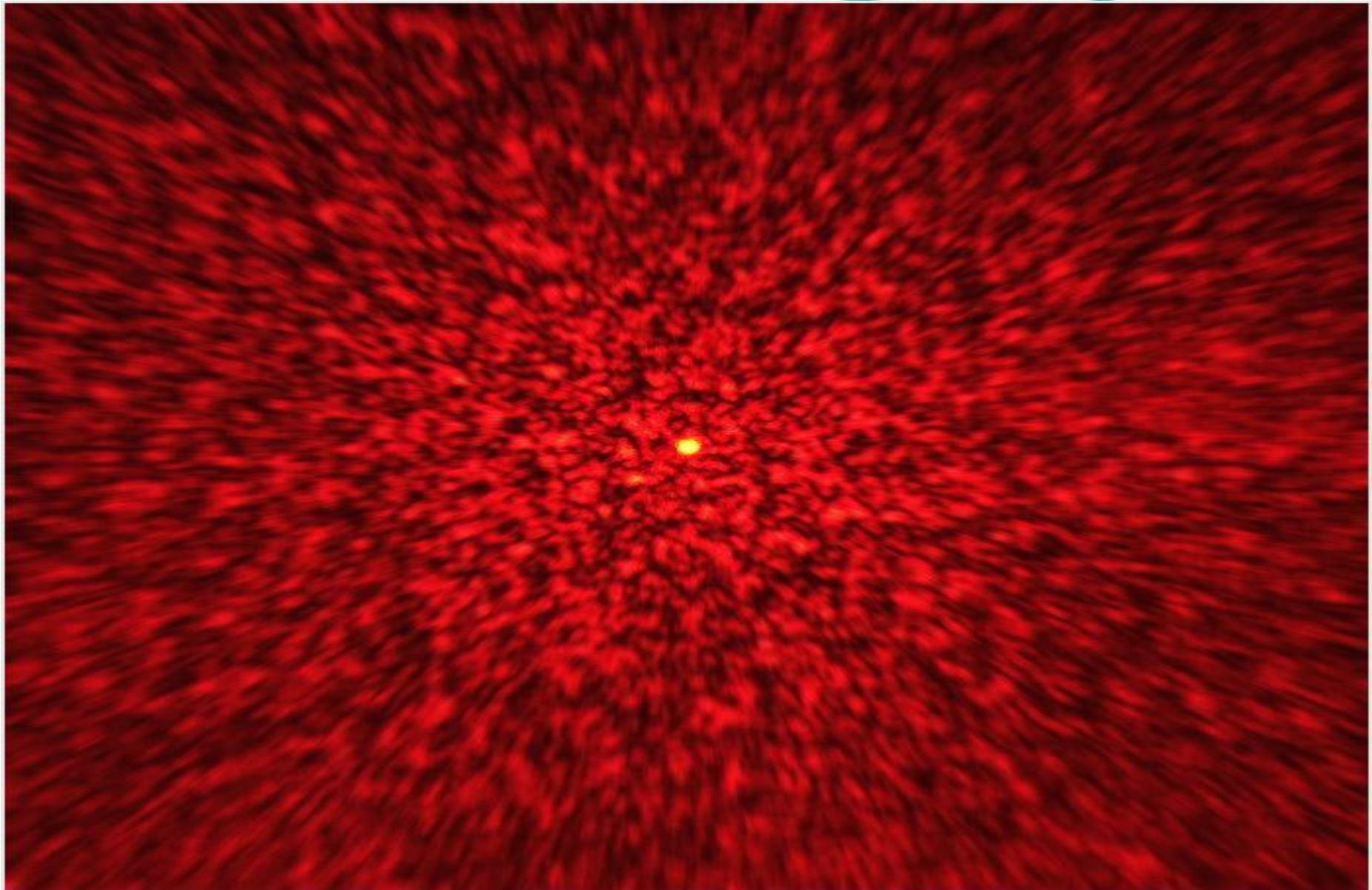


Рис. 1. Решение уравнения Кортевега–де Вриза (солитон Рассела).

Спекл, **спекл-структура** (англ. *speckle* — крапинка, пятнышко) — это **случайная интерференционная картина**, которая образуется при взаимной интерференции когерентных волн, имеющих случайные сдвиги фаз и/или случайный набор интенсивностей. На такой картине, как правило, можно отчётливо наблюдать **светлые пятна, крапинки** (их и называют **спеклами**), которые разделены тёмными участками изображения.

Спекл-картина образуется, например, при когерентном освещении случайно-неоднородных объектов, таких, как **шероховатая поверхность**, или при пропускании когерентного излучения через прозрачную среду с флуктуирующим в пространстве показателем преломления. Когерентное излучение может быть реализовано, прежде всего, лазерами.

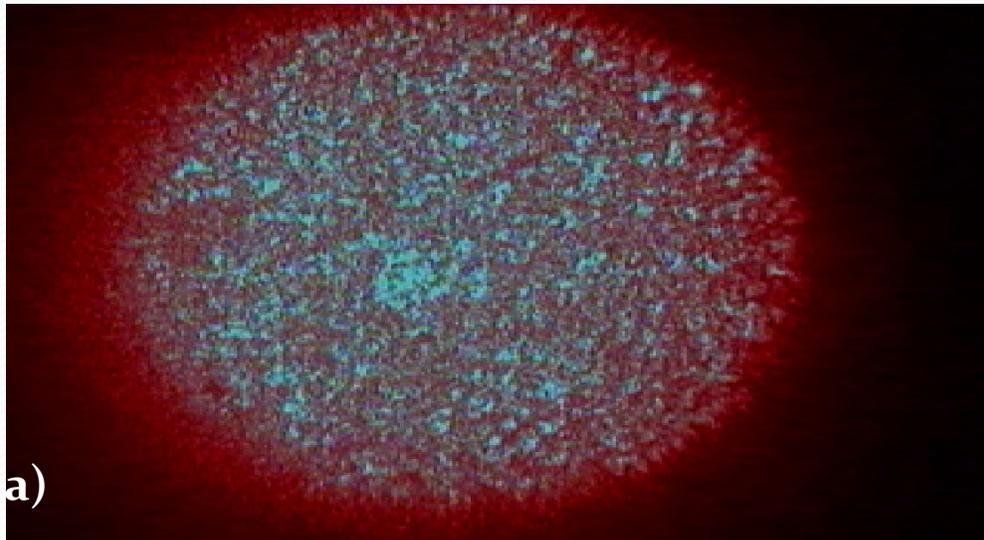


Спекл-поле

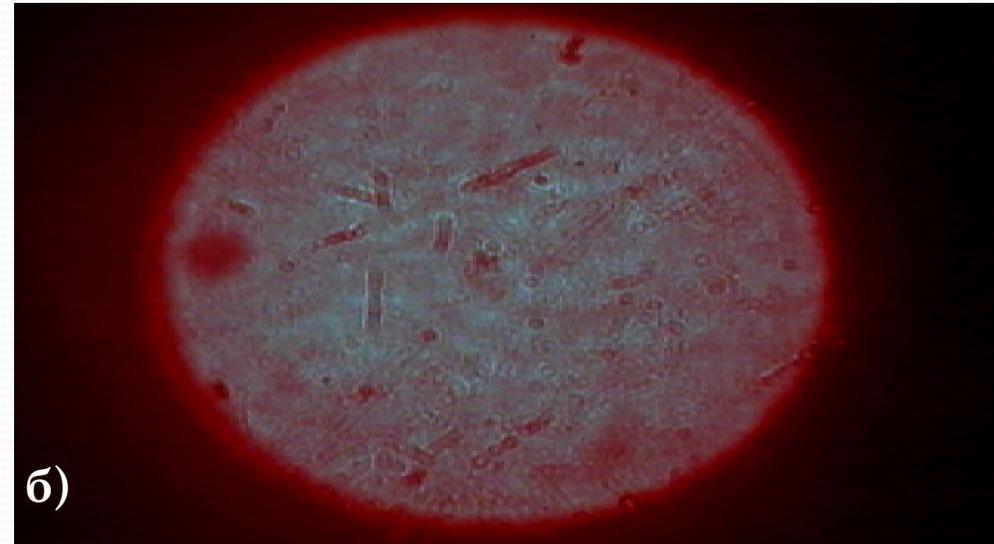
Рассеяние когерентного излучения на шероховатых поверхностях, в том числе на биологических тканях, приводит к формированию в отраженном световом потоке спекл-поля.

Спеклы - это световые пятна, хаотически расположенные в плоскости наблюдения.

Спекл-поле матового стекла:



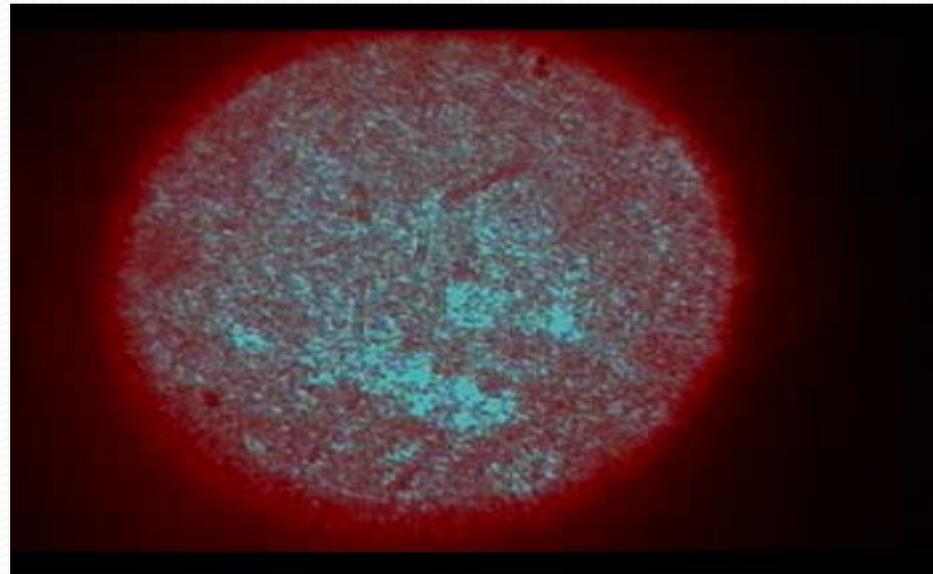
а) неподвижная мишень



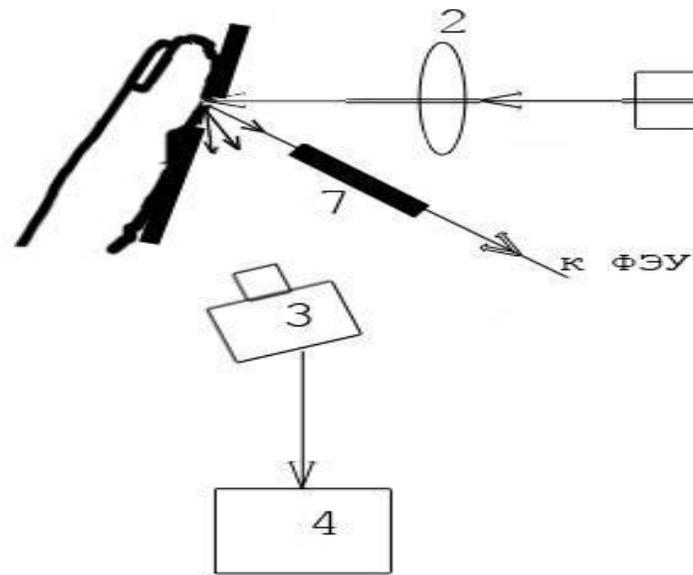
б) вибрирующая мишень (100 Гц)

Спекл-поле

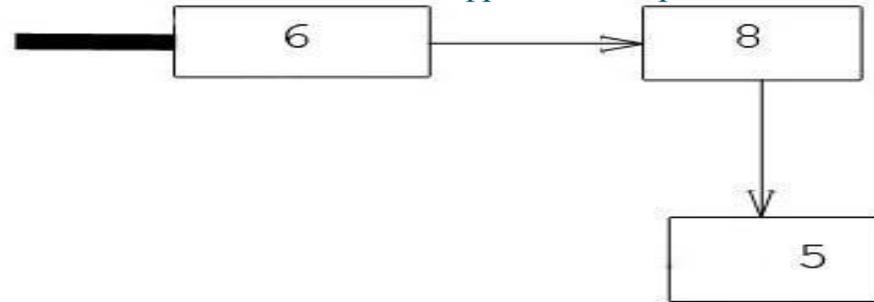
Экспериментальное исследование пульсовых волн



Датчик скорости капиллярного кровотока

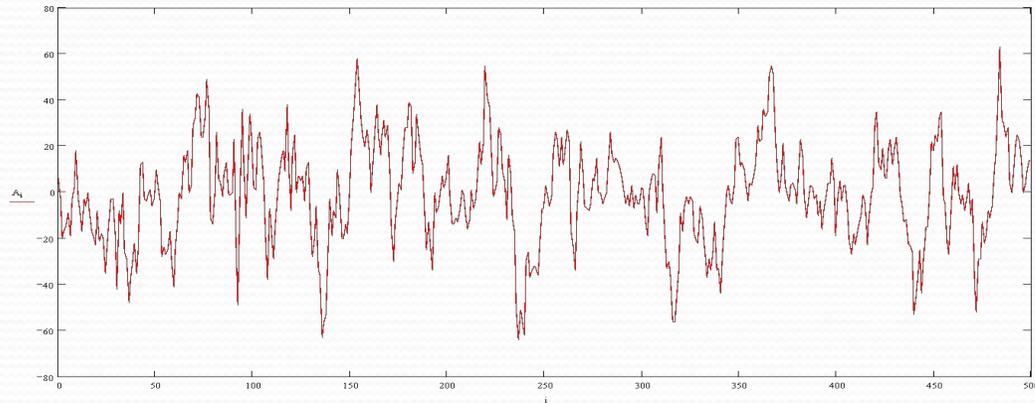


- 1 – полупроводниковый лазерный модуль марки HLDPM12-655-25, Ризл=20 мВт, $\lambda=0,6$ мкм;
- 2 – фокусирующая линза $f=50$ мм;
- 3 – ПЗС-камерой;
- 4 – монитор;
- 5 – персональный компьютер;
- 6 – ФЭУ-69Б;
- 7 – одномодовое оптическое волокно.;
- 8 – цифровой измерительный осциллограф GDS-206z.

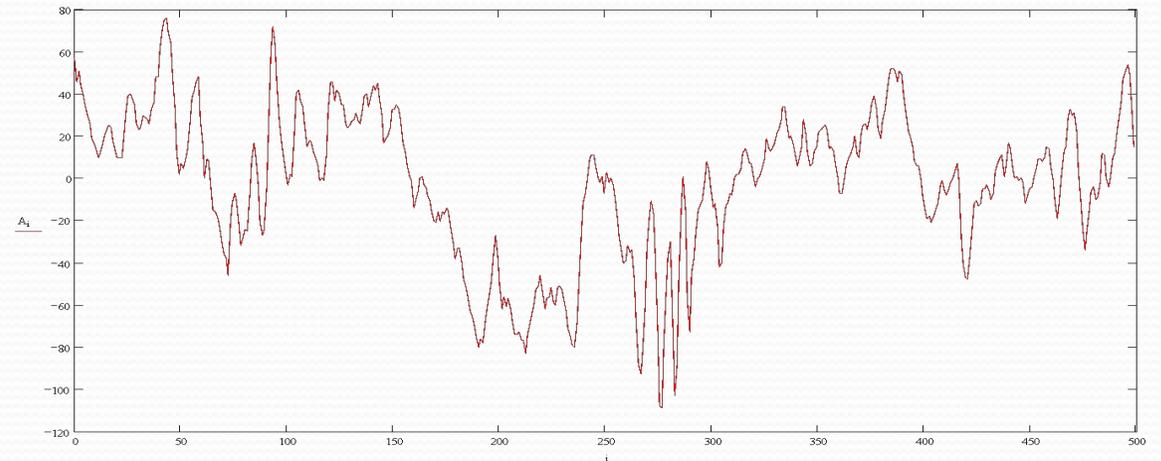


Структурная схема модели датчика скорости капиллярного кровотока

Датчик скорости капиллярного кровотока



а) без сжатия руки

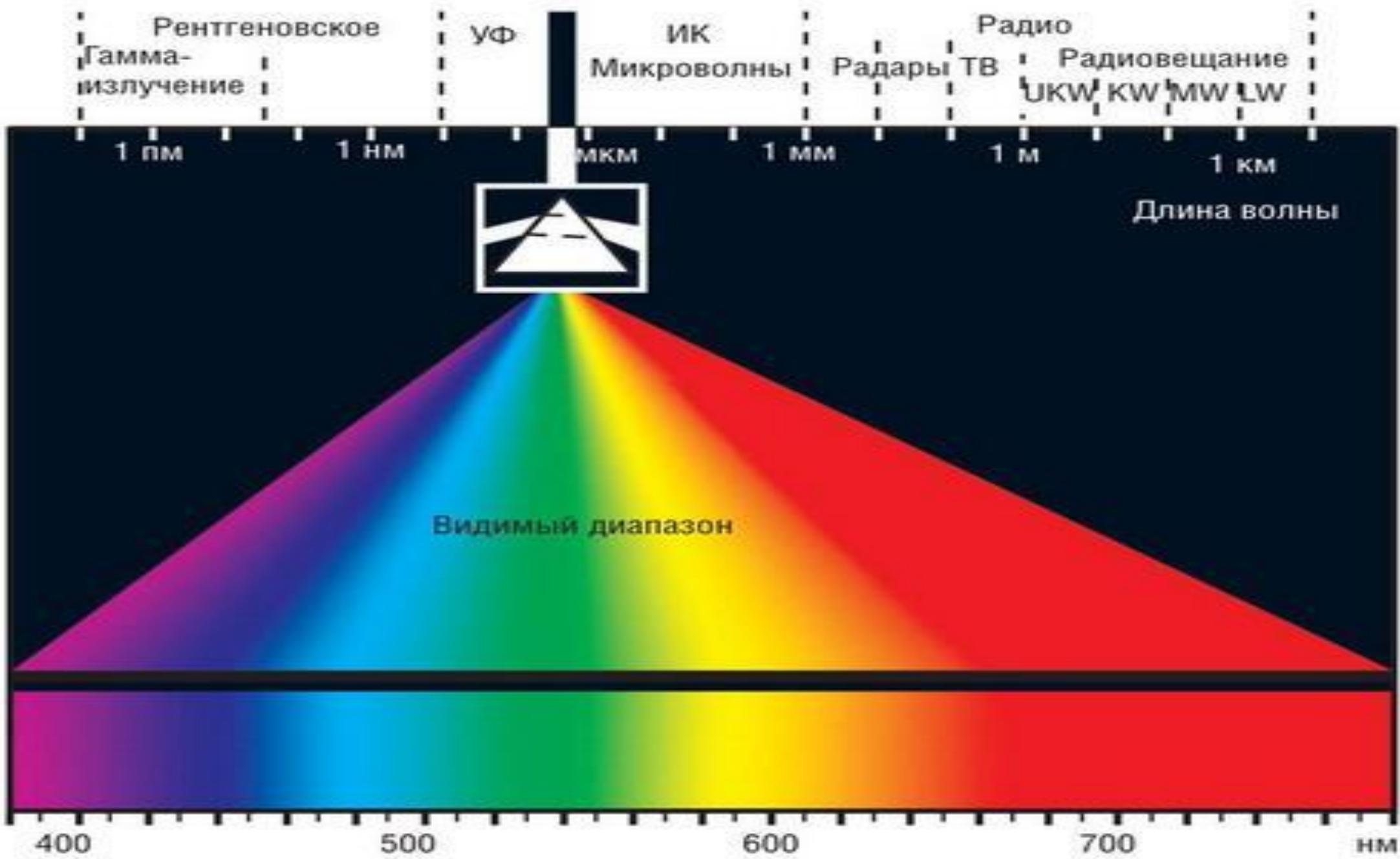


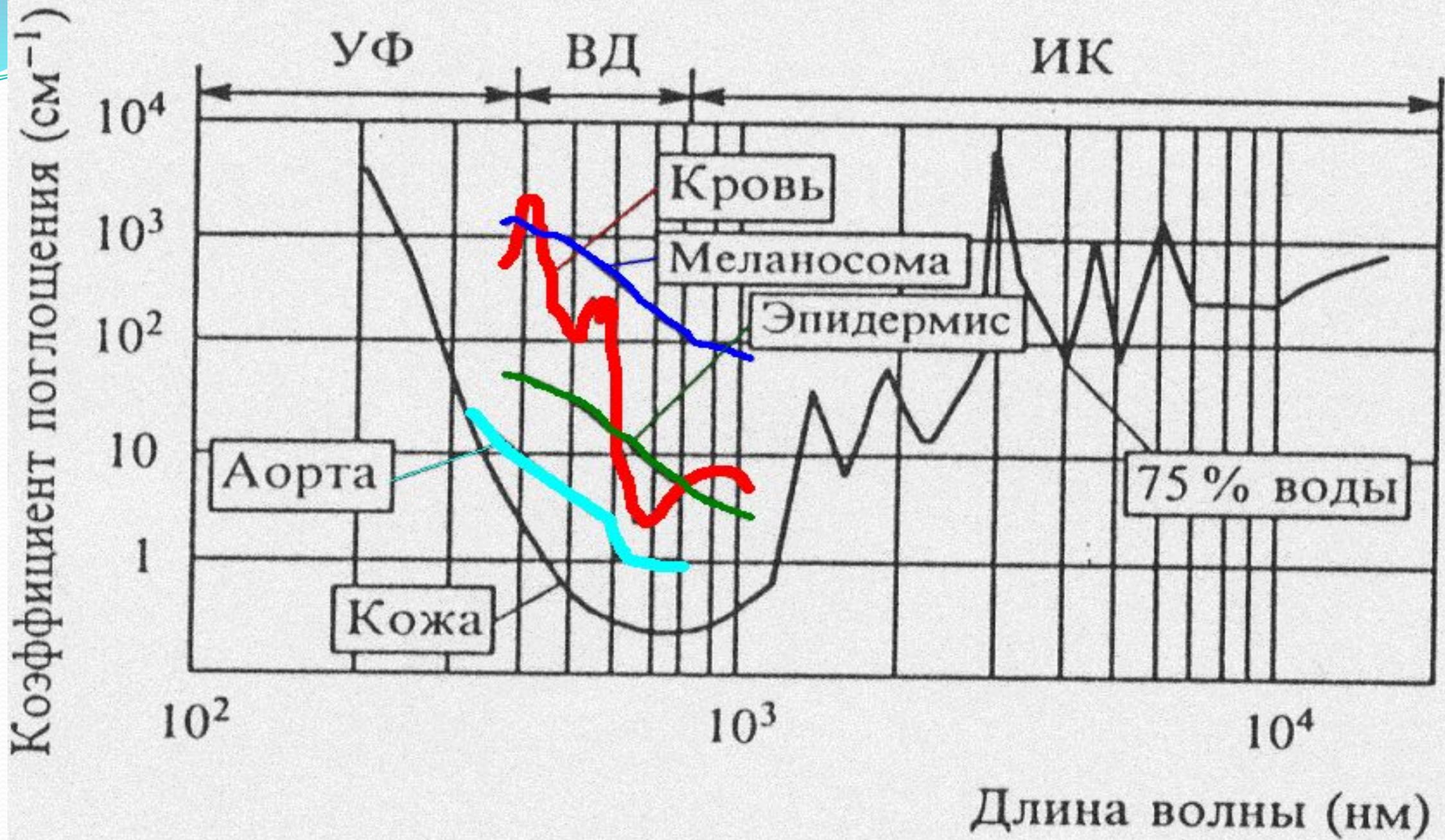
б) при сжатии 230 мм рт.ст.

Характерные зависимости флуктуаций интенсивности регистрируемого спекл-поля: без сжатия руки (а) и при сжатии 230 мм рт.ст.(б).

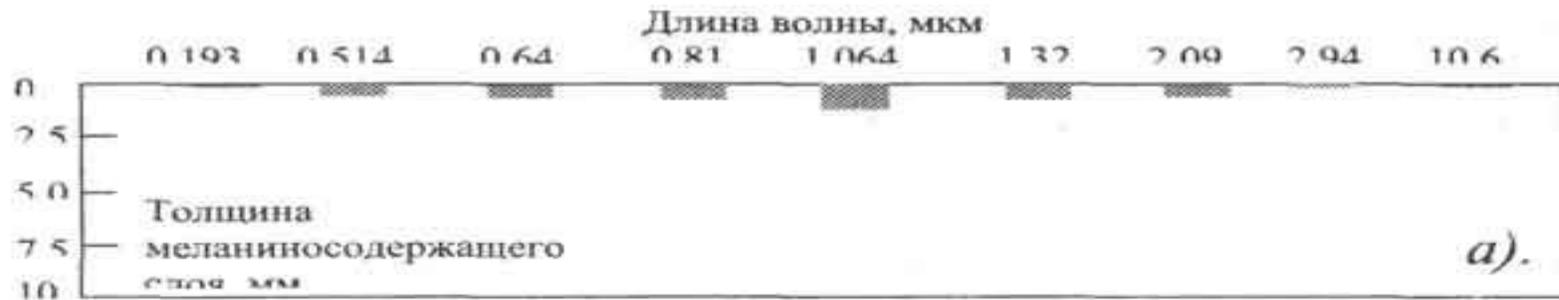
Оптические свойства биотканей

- Для многих типов биологических тканей в ультрафиолетовой и инфракрасной области спектра преобладает поглощение, обусловленное наличием в их составе неокрашенных белков, нуклеиновых кислот и воды. В видимой области поглощают окрашенные биологические объекты, например, гемоглобин. Вклад рассеяния оказывается существенным в видимой и ближней инфракрасной областях. Для длин волн 0,45–0,59 мкм поглощение и рассеяние дают примерно равные вклады в коэффициент пропускания ткани, а для длин волн 0,59–1,5 мкм рассеяние превалирует над поглощением.





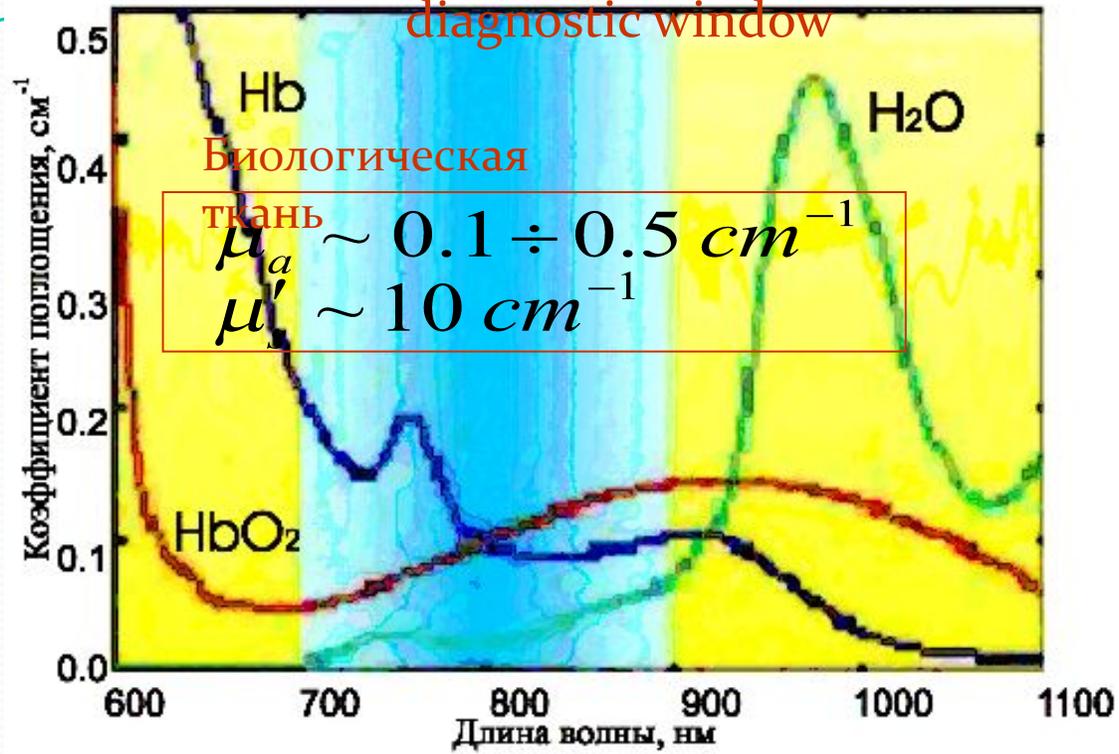
Глубина пропускания излучения некоторых длин волн различными тканями



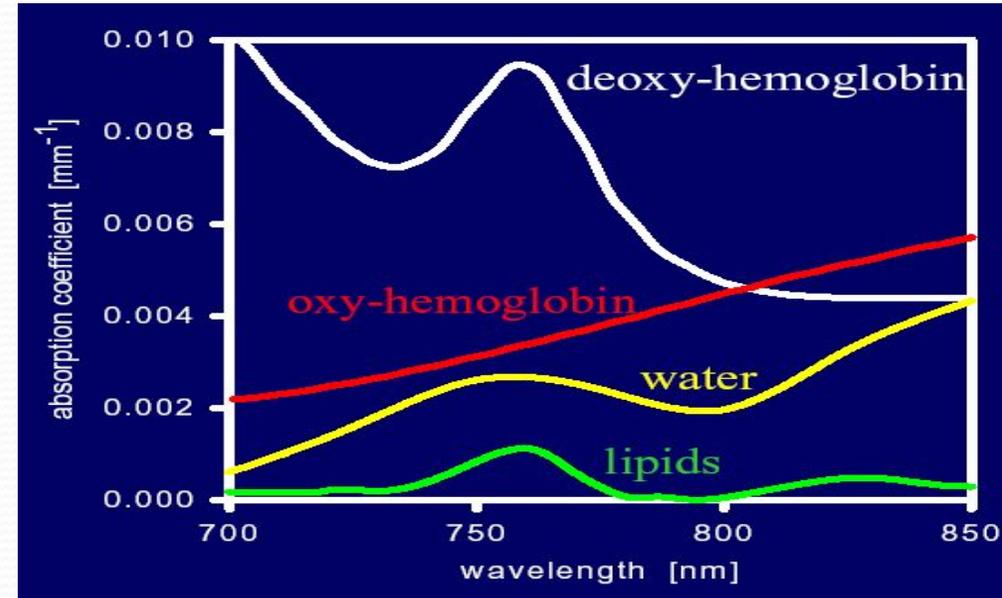
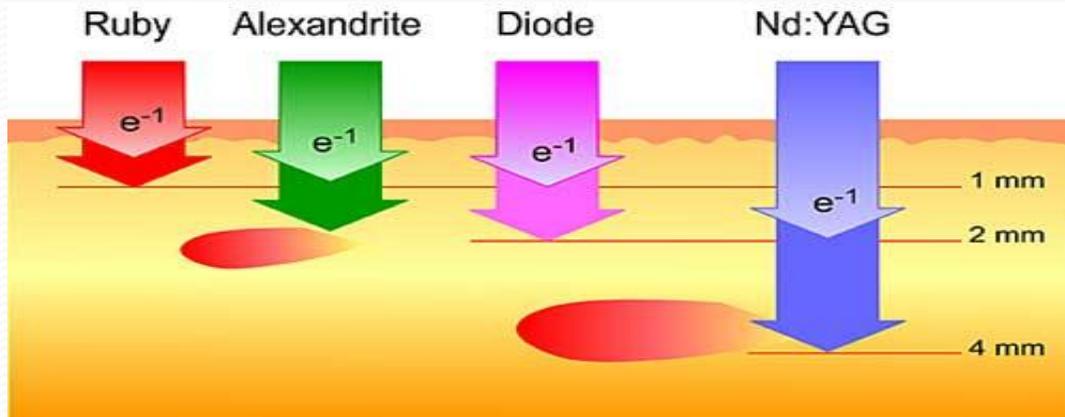
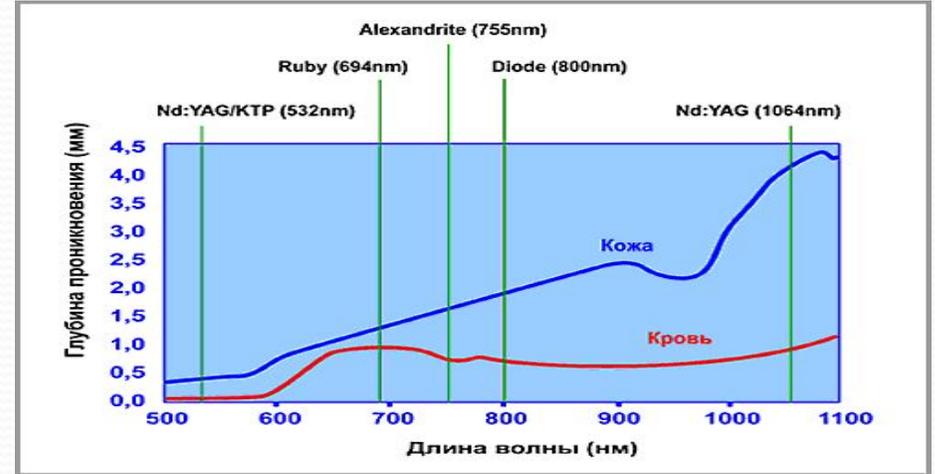
Терапевтическое

ОКНО

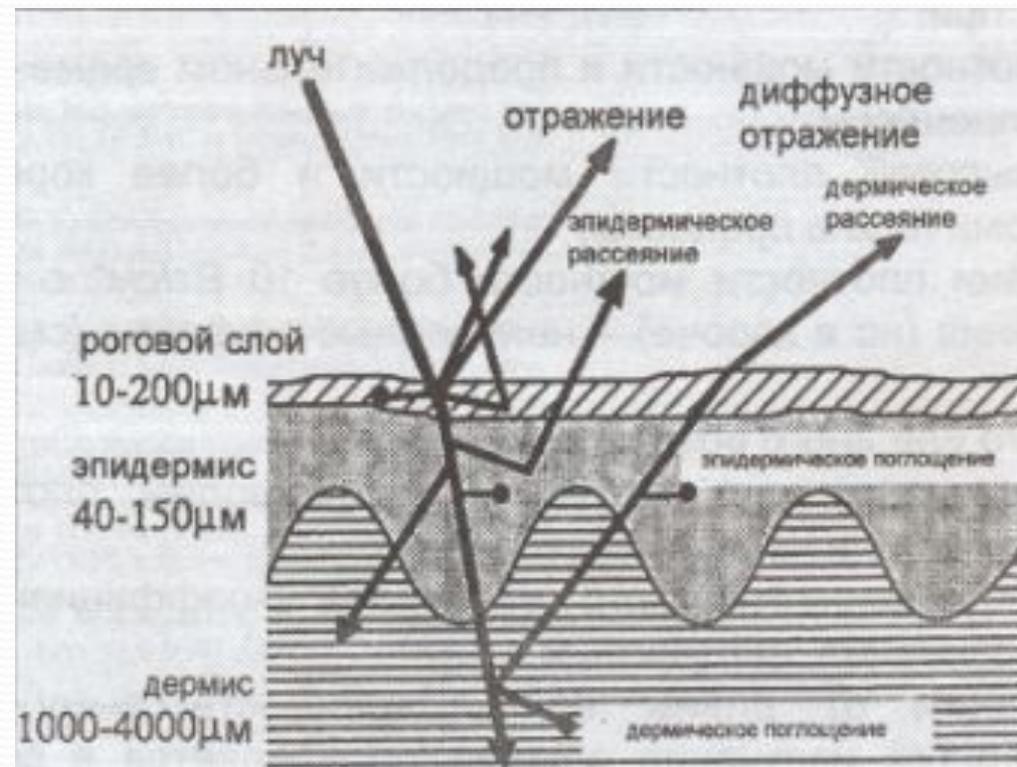
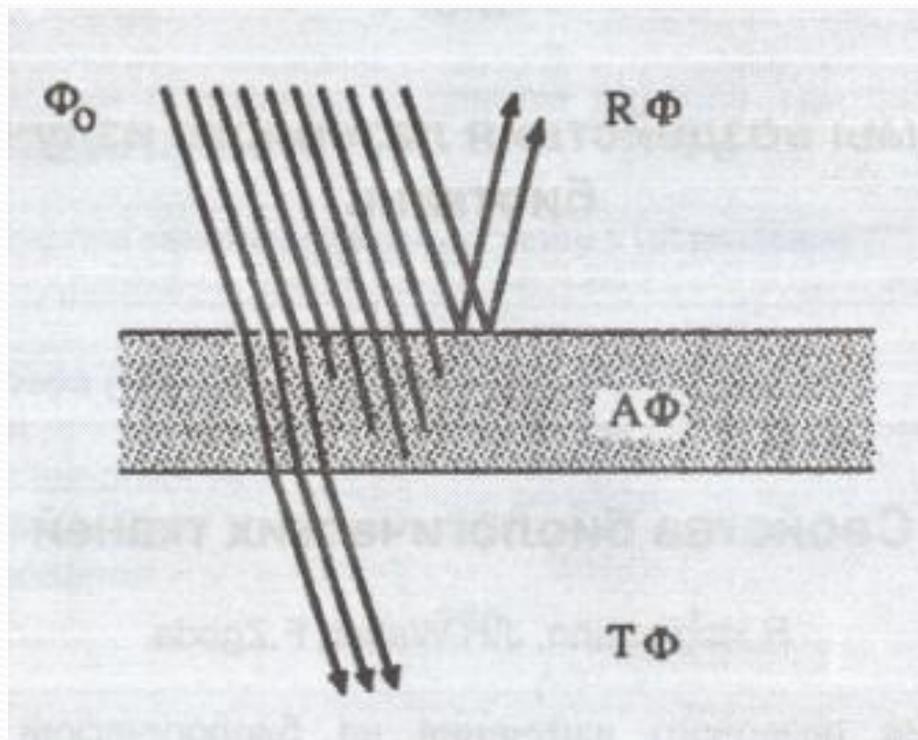
diagnostic window



$$\mu_{tr} = \mu_a + \mu_s(1 - g) = \mu_a + \mu'_s$$



При попадании лазерного луча на ткань могут наблюдаться три процесса: **отражение, поглощение и/или пропускание** — только незначительный процент излучения отражается непосредственно от поверхности. Проникающие в ткань лучи частично поглощаются, частично рассеиваются и частично пропускаются.



- В зависимости от длины волны падающего излучения **отражается до 60% излучения**. Рассеяние зависит от негетерогенных структур ткани и определяется **разными показателями преломления** у разных ячеек и разницей между ячейками и окружающей их средой. Волны с длиной намного большей, чем диаметр ячейки (≥ 10 мкм), рассеиваются ячеистыми структурами лишь в незначительной степени. Но так как электромагнитный спектр широко используемых лазеров простирается от ИК (1мм - 0,78 мкм) до УФ (0,38 – 0,10 мкм) диапазона длин волн, мы **практически всегда имеем дело с рассеянием**.

- Рассеяние в биологической ткани зависит от длины волны лазерного луча. Излучение **эксимерного** лазера УФ диапазона (193, 248, 308 и 351 мкм), а также ИК-излучение 2,9 мкм **Er:YAG**-лазера и 10,6 мкм **CO₂**-лазера имеют глубину проникновения от **1 до 20 мкм**. Здесь рассеяние играет подчиненную роль. Для света с длиной волны 450-590 нм, что соответствует **линиям аргона**, глубина проникновения составляет в среднем **0,5-2,5 мм**. Как поглощение, так и рассеяние играют здесь значительную роль. Лазерный луч этой длины волны хотя и остается в ткани **коллимированным в центре**, но он окружен зоной с высоким рассеянием. От **15 до 40%** падающего пучка света **рассеивается**. В области спектра между **590 и 1500 нм**, в которую входят линии **Nd:YAG**-лазера 1,06 и 1,32 мкм, доминирует рассеяние. Глубина проникновения составляет от **2,0 до 8,0 мм**.

Сенсибилизирование биотканей

- **Характер** отражения, поглощения, рассеяния и флуоресценции биологических объектов **МОЖЕТ существенно меняться**, например, **при их окрашивании**. Такие биообъекты называют **сенсибилизированными**, поскольку их чувствительность к свету изменяется. **Сенсибилизацию** биоматериала **используют** для изучения механизмов взаимодействия света с отдельными компонентами этого материала, а также **в практической диагностике и медицине**, например, в ходе проведения сеансов флуоресцентной диагностики и фотодинамической терапии.

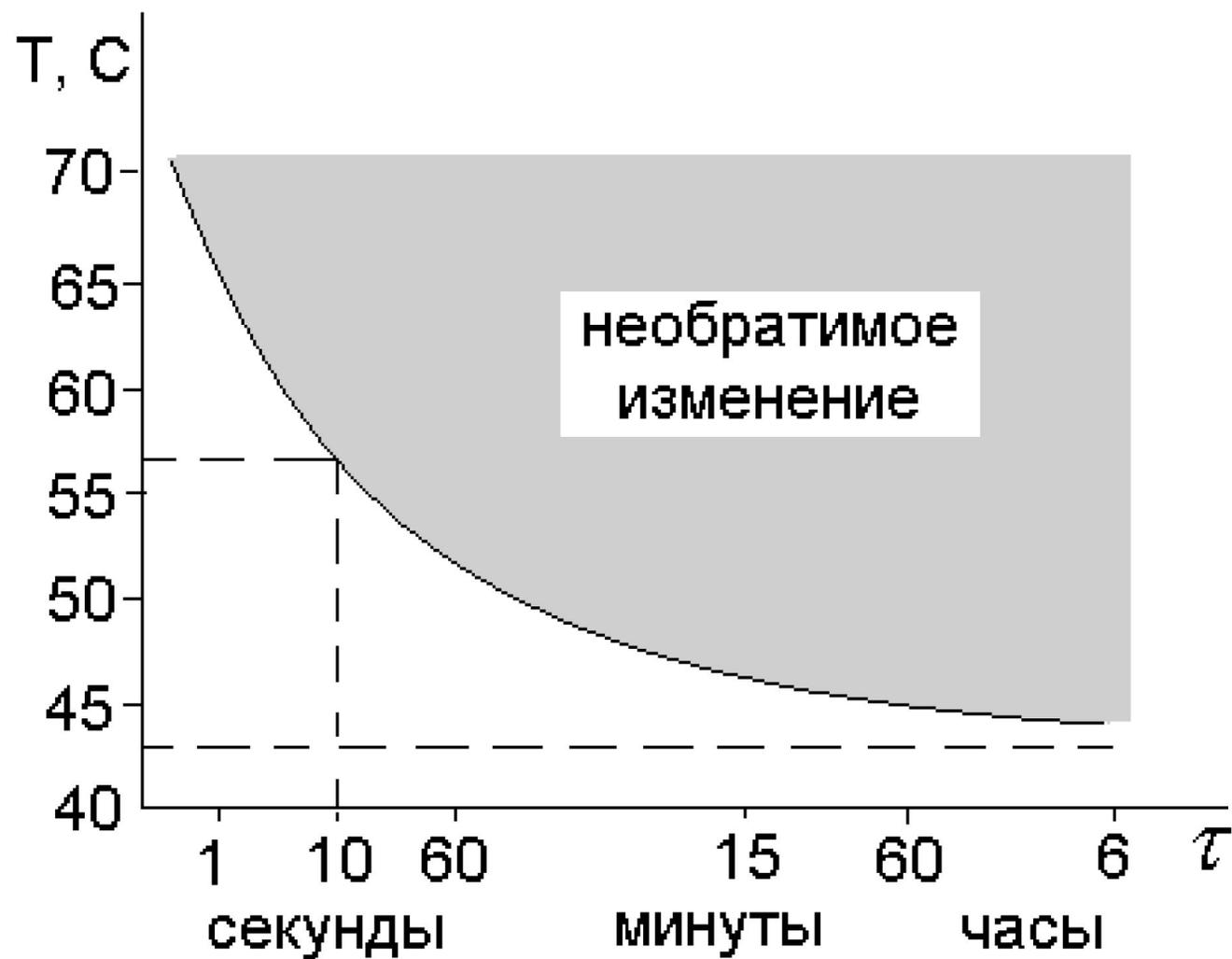
Термические свойства тканей

- Действие лазера в хирургии, будь то в качестве режущего инструмента или коагулятора, **базируется на превращении электромагнитной энергии лазерного луча в тепловую энергию.** Это преобразование энергии излучения в тепло может произойти только в том случае, если лазерное излучение **поглощается** специфическими хромофорами ткани.
- Так как часть энергии из-за теплопроводности и других процессов транспортируется в соседние области, то нагревается не только облученный объем, но и окружающие его участки. Также и локальным кровотоком *in vivo* тепло отводится от облученной ткани.
- Термические свойства живой ткани определяются в основном **тремя процессами:**
 - 1. теплопроводность
 - 2. накопление тепла
 - 3. отвод тепла сосудистой системой.

Реакции биоткани, зависимые от температуры

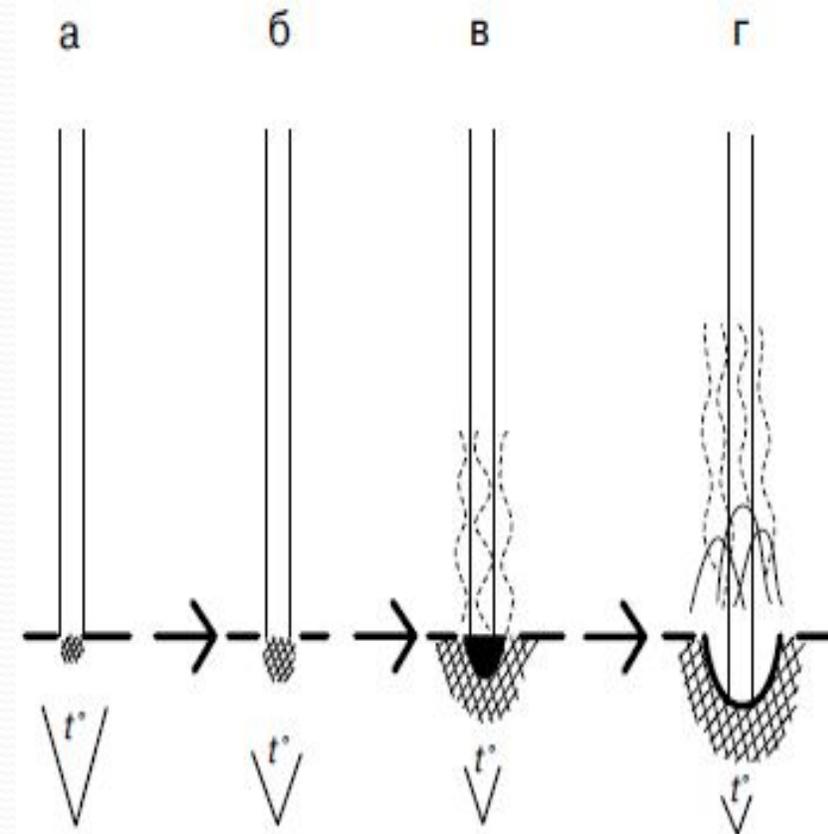
$T, \text{ }^{\circ}\text{C}$	Эффект на биоткани
37	не имеется
40 - 45	активизация ферментов, образование отеков, изменение мембран, возможная смерть клеток (в зависимости от τ)
60	денатурация протеина, начало коагуляции и некроза
80	денатурация коллагена. дефекты мембран
100	обезвоживание
свыше 150	обугливание
300	абляция и газообразование

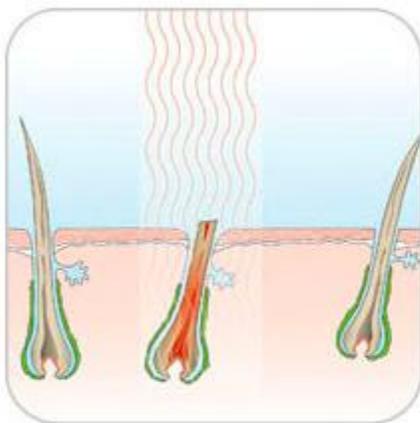
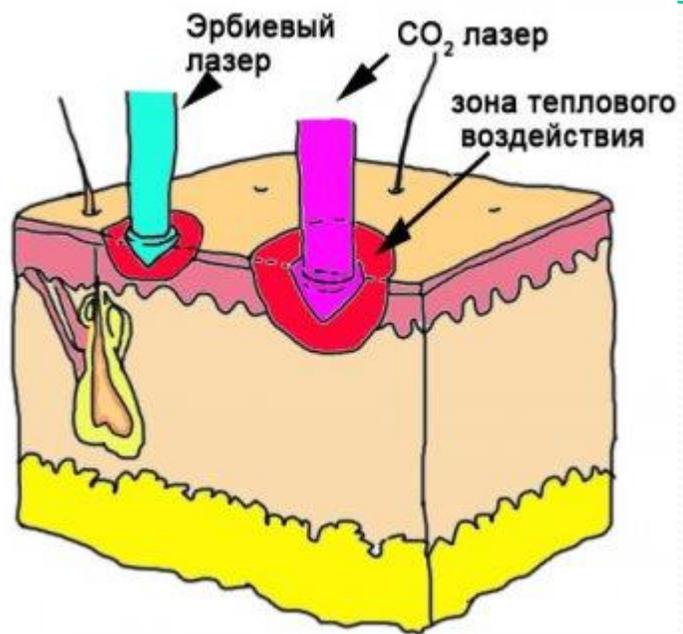
Влияние температуры и времени воздействия на необратимое изменение ткани



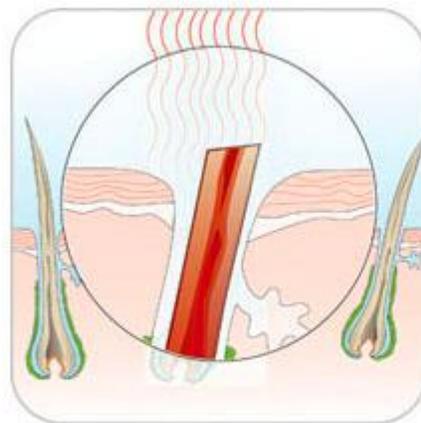
Изменение свойств биоткани во время лазерного облучения

Температура, °С	37 – 60	60-65	90–100	>100	Несколько сотен
Процесс	нагревание	денатурация белка	обезвоживание	обугливание	абляция, сжигание
Оптические изменения	нет	серая окраска, увеличение рассеяния	постоянное рассеяние	черная окраска, повышенное поглощение	дымо- и газообразование
Механические изменения	нет	разрыхление	сморщивание, выход жидкости	сильное механическое повреждение	удаление ткани

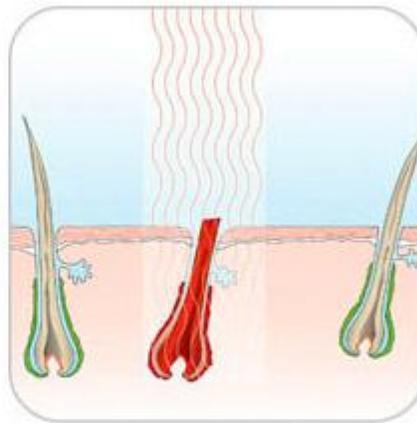




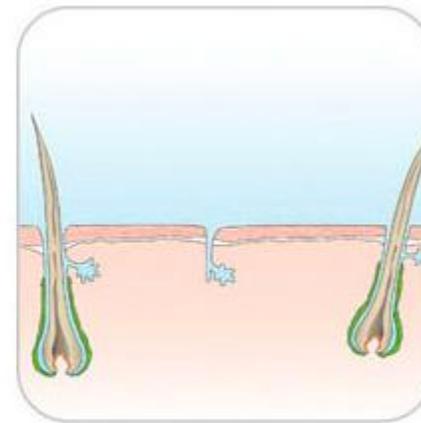
1. Действие импульса света на обрабатываемую зону



2. Меланин поглощает свет и преобразует его в тепло



3. Температура около 70 С достигает волосяного фолликула и разрушает его



4. Волосяной фолликул погибает, и волос больше не растет

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

