

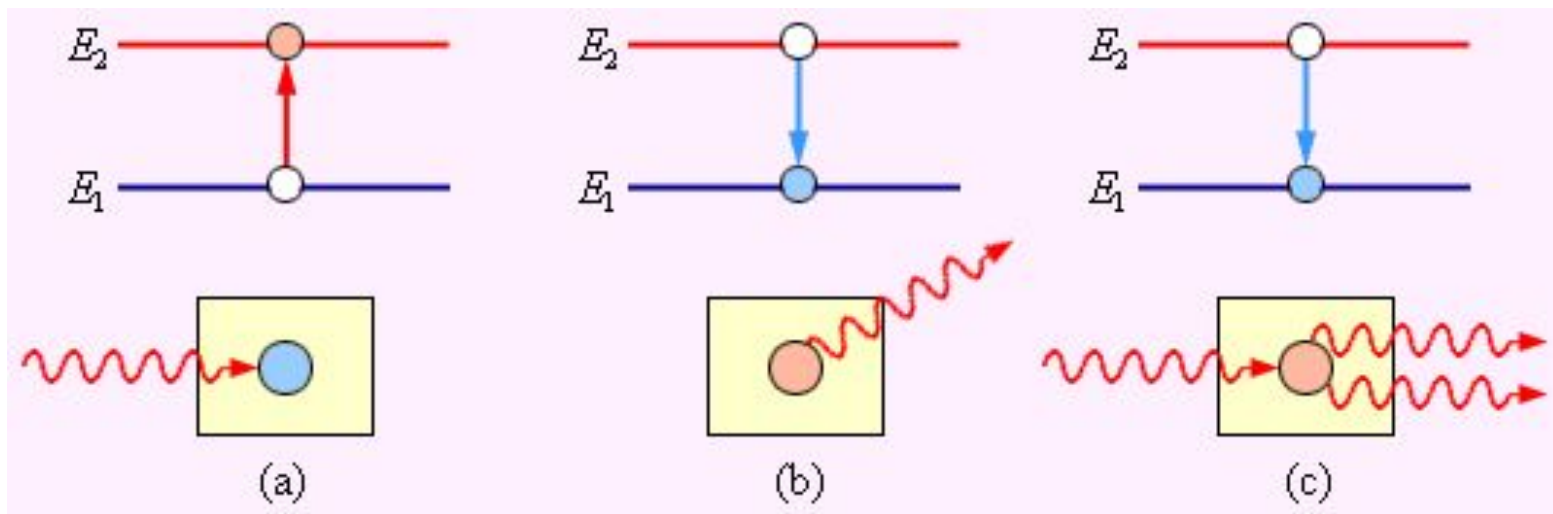
# ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

## ЛЕКЦИЯ №4

Принцип работы лазера и основные  
свойства лазерного излучения.  
Лидары.

Астапенко В.А., д.ф.-м.н.

# Основные резонансные фотопроцессы в дискретном энергетическом спектре



Фотопоглощение (a), спонтанное излучение (b) и вынужденное излучение (c)

# Свойства вынужденного излучения

- Наиболее характерная черта вынужденного излучения заключается в том, что возникший поток фотонов распространяется в том же направлении, что и первоначальный возбуждающий фотонный поток.
- Частоты и поляризация вынужденного и первоначального излучений также равны.
- Вынужденный поток фотонов когерентен возбуждающему, т.е. имеет те же фазовые характеристики

# Принцип работы лазера

L i g h t

A m p l i f i c a t i o n   b y

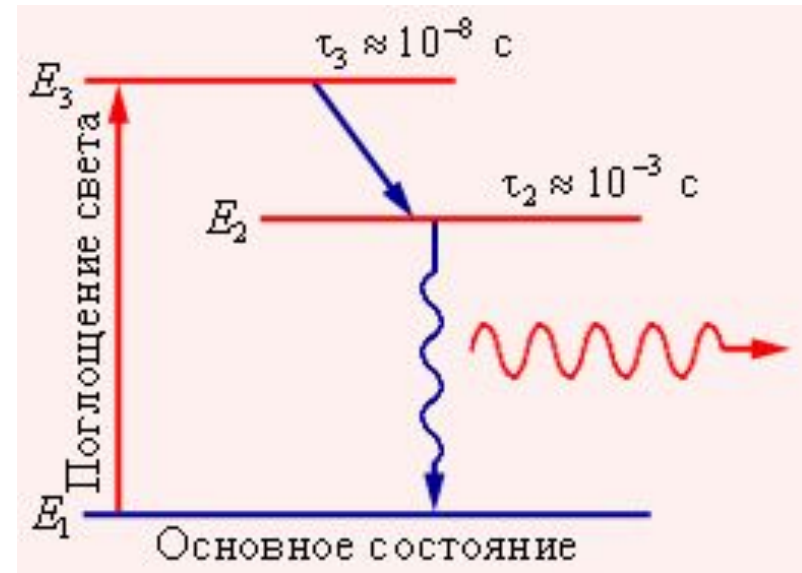
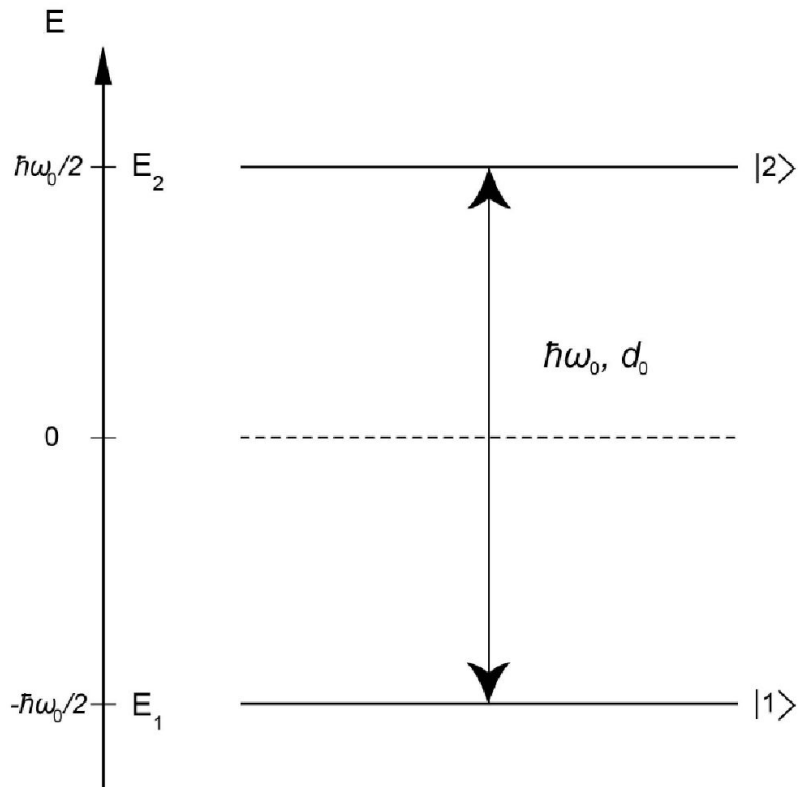
S t i m u l a t e d

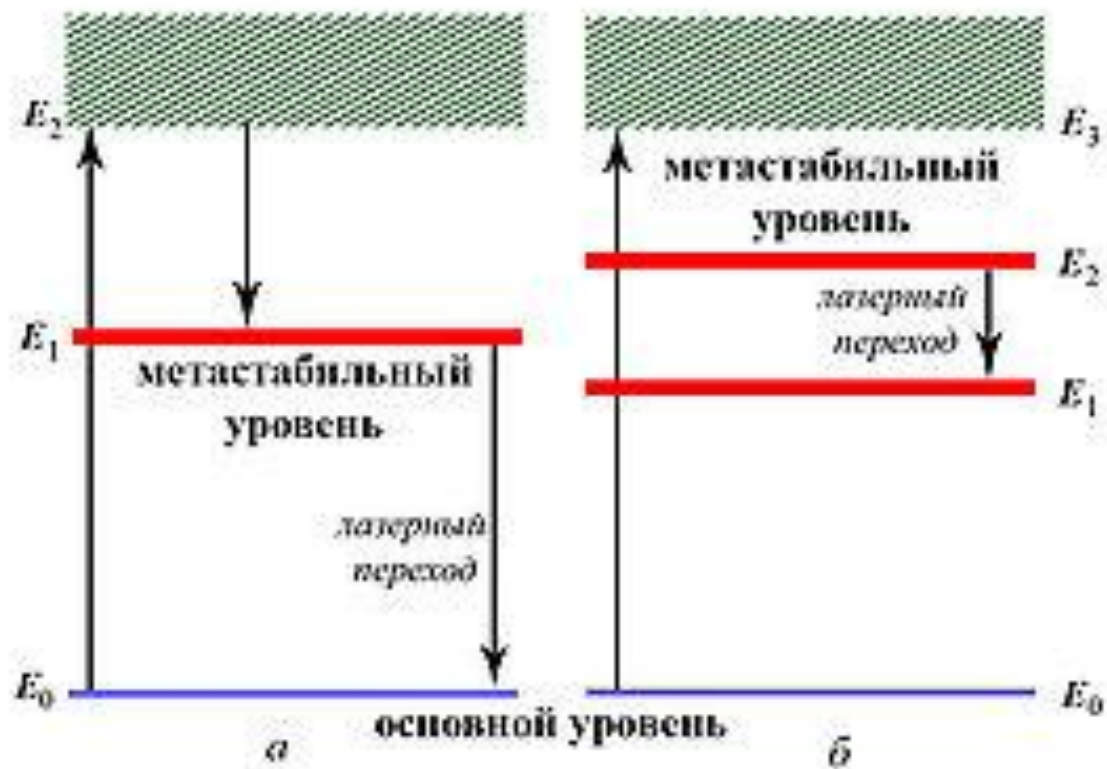
E m i s s i o n   o f

R a d i a t i o n

Физической основой работы лазера служит явление *вынужденного (индуцированного) излучения*. Суть явления состоит в том, что возбуждённый атом способен излучить фотон под действием другого фотона без его поглощения, если энергия последнего равняется разности энергий уровней атома до и после излучения. При этом излучённый фотон когерентен фотону, вызвавшему излучение (является его «точной копией»).

# Рабочий переход в лазерной активной среде





а - трёхуровневая и б - четырёхуровневая схемы накачки активной среды лазера

# Условие лазерного усиления

$w = \sigma(\omega) c n_{ph}$  – скорость радиационного перехода

$\dot{N} + \frac{N - N_e}{T_1} = -\sigma c n_{ph} N$  – балансное уравнение на инверсию населенностей

$\dot{n}_{ph} + \frac{n_{ph}}{\tau_c} = \sigma c n_{ph} N$  – балансное уравнение на концентрацию фотонов

$N = N_2 - N_1$  – инверсия населенности

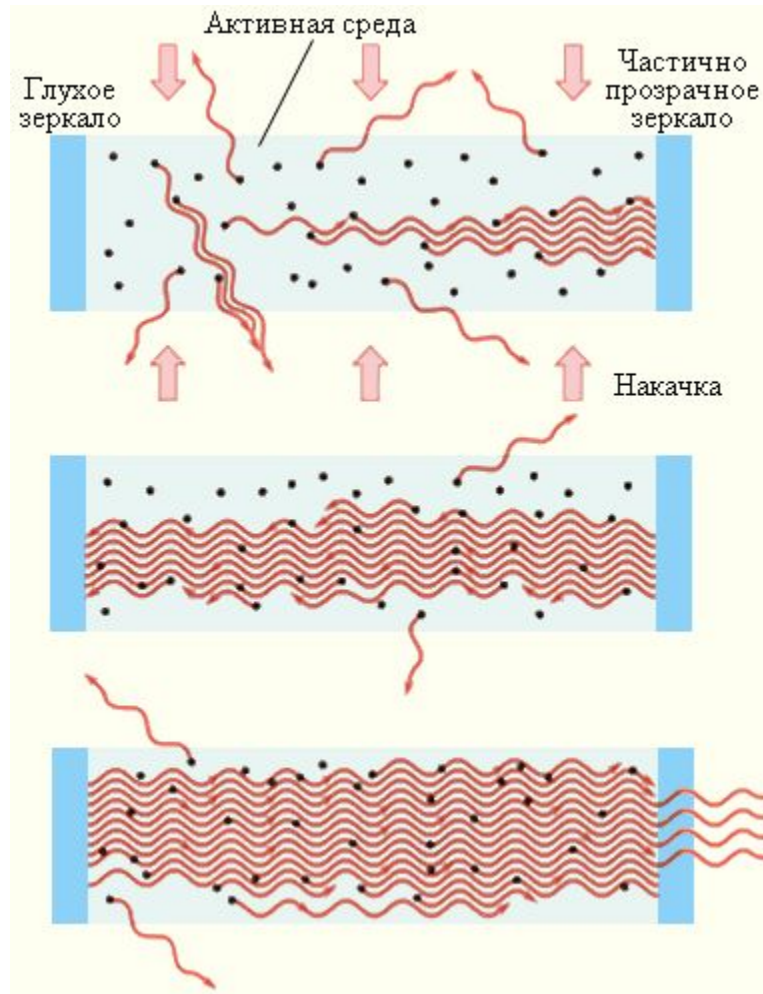
$n_{ph}$  – концентрация фотонов

$\tau_c$  – время жизни фотона в резонаторе лазера

$N > 0$  – необходимое условие лазерного усиления

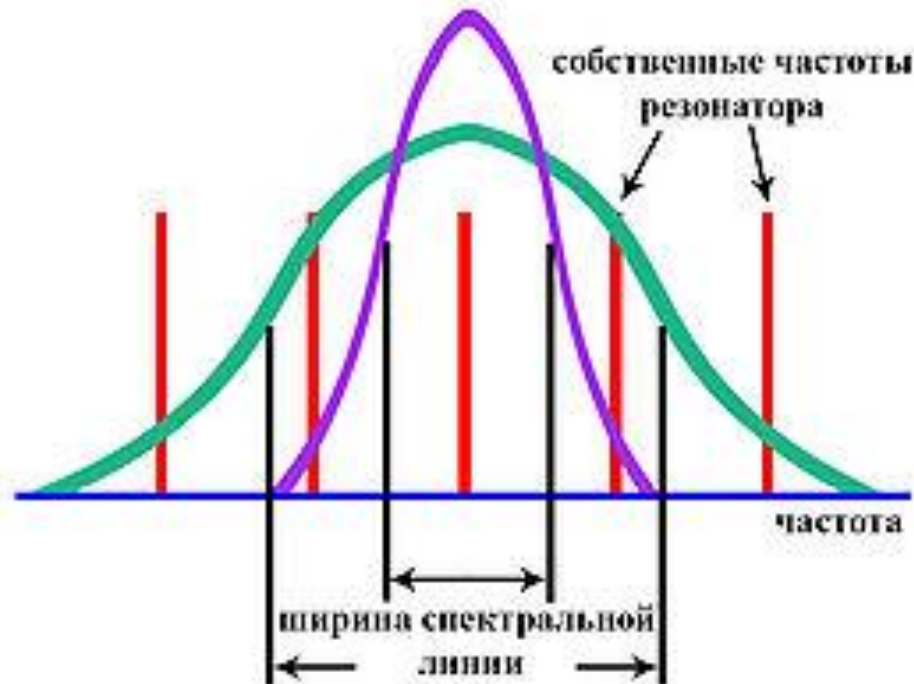
$\frac{N_2}{g_2} - \frac{N_1}{g_1} > 0$  – учет вырожденности рабочих уровней энергии

# Развитие процесса генерации в лазере



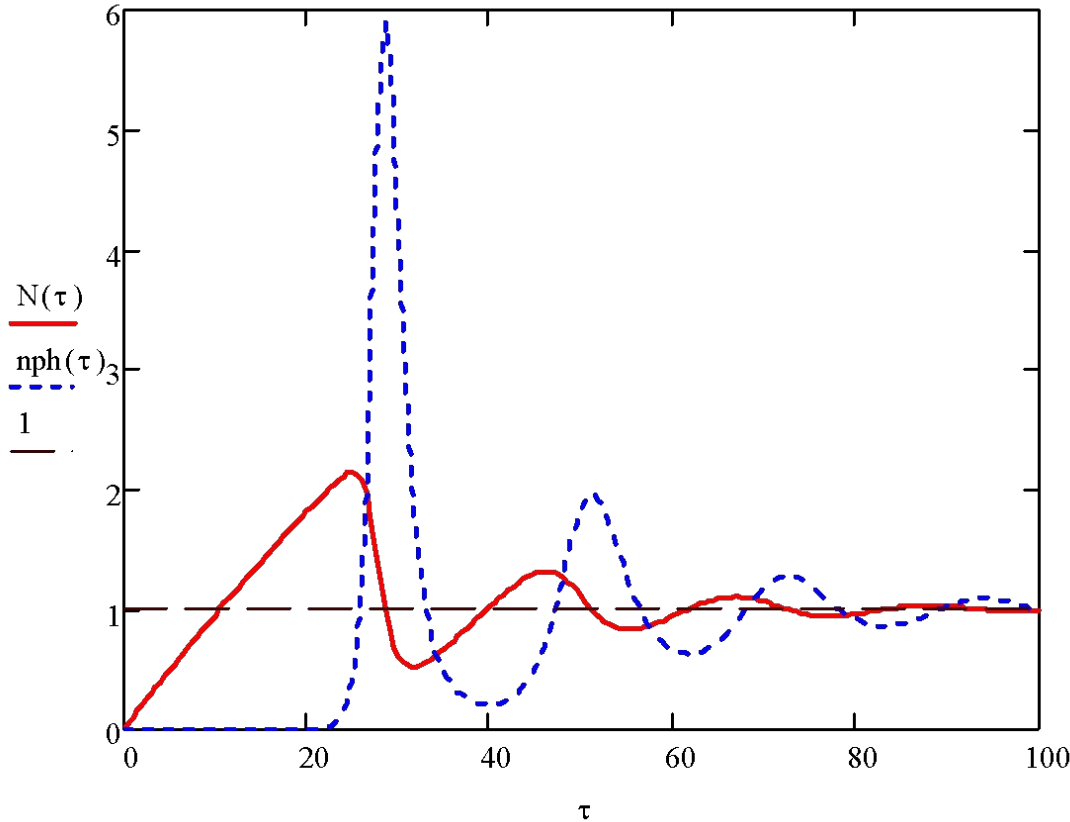


# Оптический резонатор



$$2L = n\lambda, \quad \nu_n = \frac{c}{2L}n, \quad \Delta \nu_r = \frac{c}{2L}.$$

# Пичковый режим работы лазера



$$\tilde{N} = N/N_{th}$$

нормированная инверсия  
населенностей

$$N_{th} = \frac{1}{\sigma c \tau_c} - \text{пороговое}$$

значение инверсии

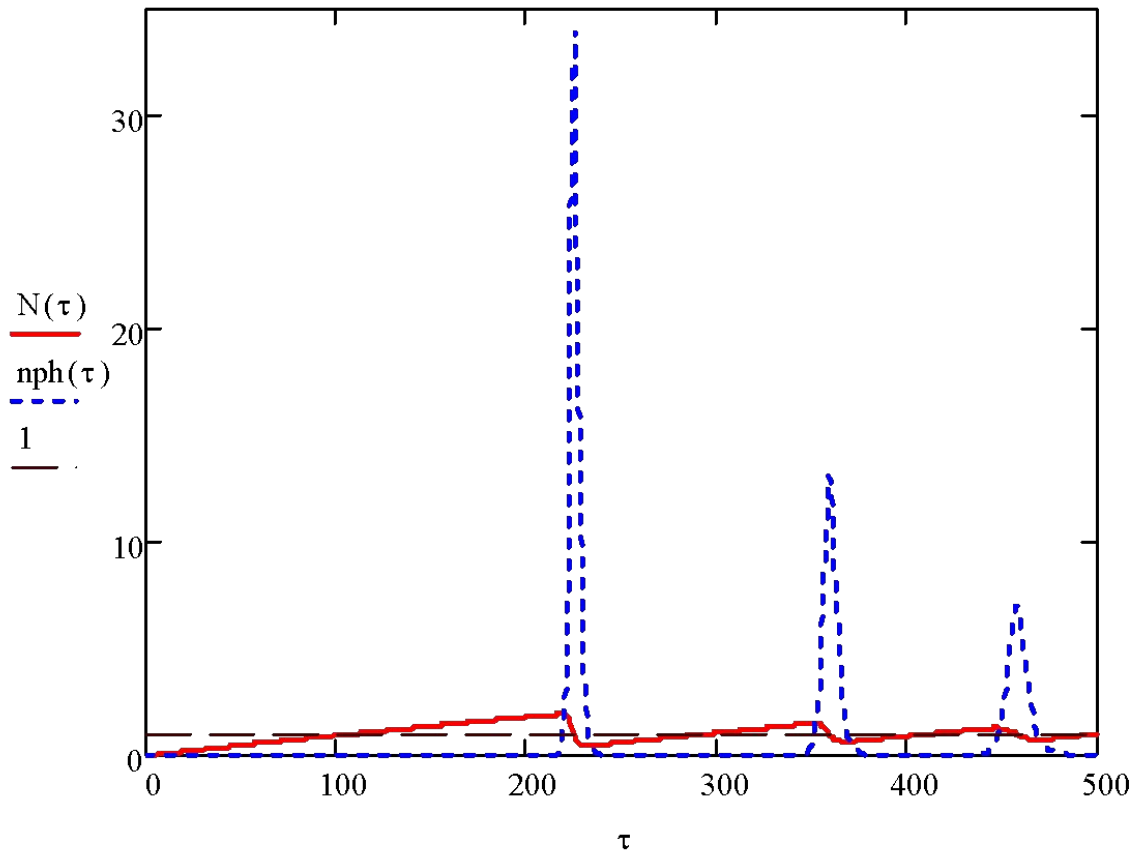
$$\tau = t/\tau_c - \text{нормированное время}$$

$$\tilde{n}_{ph} = n_{ph}/(n_{ph})_{st}$$

$$(n_{ph})_{st} = \frac{\tau_c}{2T_1}(N_e - N_{th})$$

Временные зависимости нормированной инверсии населенностей (сплошная кривая) и нормированной концентрации фотонов (пунктир), являющиеся решением системы балансных уравнений,

$$T_1 = 100 \tau_c, N_e = 10 N_{th}$$



- Временные зависимости нормированной инверсии населенностей (сплошная кривая) и нормированной концентрации фотонов (пунктир), являющиеся решением системы балансных уравнений,
- $T_1 = 10^3 \tau_c$ ,  $N_e = 10 N_{th}$

# Основные свойства лазерного излучения

1. Высокая спектральная яркость
2. Монохроматичность
3. Временная когерентность
4. Узкая угловая направленность
5. Возможность генерации ультракоротких импульсов

$\langle E(t)E(t+\tau) \rangle_t \propto G(\tau)$  – автокорреляционная функция напряженности электрического поля;

$\tau_{coh}$  – время когерентности,  $l_{coh} = c\tau_{coh}$  – длина когерентности,  $\tau_c \approx \frac{1}{\Delta\nu}$ ,

$\Delta\nu$  – ширина спектра излучения;  $\Delta\nu_{He-Ne} \approx 5 \cdot 10^{-1}$  Гц;  $\tau_{coh} \approx 2$  с;  $l_{coh} \approx 6 \cdot 10^8$

# Параметры мощных лазерных установок со сверхкороткой длительностью импульса

№ п/п	Фирма, страна	$\lambda$ , мкм	$\tau$ , фс	$P$ , $10^{12}$ Вт	$I$ , Вт/см <sup>2</sup>
1	Lawrence Livermore Nat. Lab. (USA)	1.06	500	1000	$>10^{20}$
2	California Univ. (USA)	0.78	30	50	$5 \times 10^{19}$
3	Michigan Univ. (USA)	0.78	30	40	$2 \times 10^{19}$
4	Texas Univ. (USA)	0.78	35	20	$2 \times 10^{17}$
5	Rutherford Lab. (Great Britain)	1.06	500	1000	$>10^{20}$
6	Astra (Great Britain)	0.8	40	40	$3 \times 10^{18}$
7	Institute of Laser Engineering. (Japan)	1.06	500	1000	$10^{20}$
8	Jap. Atomic Energy Agency (Japan)	0.78	30	500	$10^{20}$
9	MBI (Berlin, Germany)	0.78	30	100	$10^{19}$
10	ATLAS (Germany)	0.78	100	30	$5 \times 10^{18}$
11	LULI (France)	0.78	30	100	$5 \times 10^{19}$
12	LOA (France)	0.78	30	100	$5 \times 10^{19}$
13	Lund (Sweden)	0.78	30	30	$10^{19}$
14	Changhai Inst. Opt. (China)	1.06	500	1000	$10^{20}$
15	ИПФ (г. Нижний Новгород, Россия)	0.78	40	560	$10^{20}$
16	НИКИ ОЭП (г. Сосновый Бор, Россия)	1.06	1000	40	$10^{19}$
17	ЦНИИмаш (г. Королев, Россия)	1.06	1500	10	$2 \times 10^{18}$
18	ГОИ (г. Санкт-Петербург, Россия)	1.06	1500	5	$10^{18}$
19	ИОФАН (г. Москва, Россия)	0.78	40	0.5	$10^{18}$
20	МГУ (г. Москва, Россия)	0.78	55	0.4	$10^{18}$
21	ВНИИТФ (г. Челябинск, Россия)	1.06	1500	5	$10^{18}$

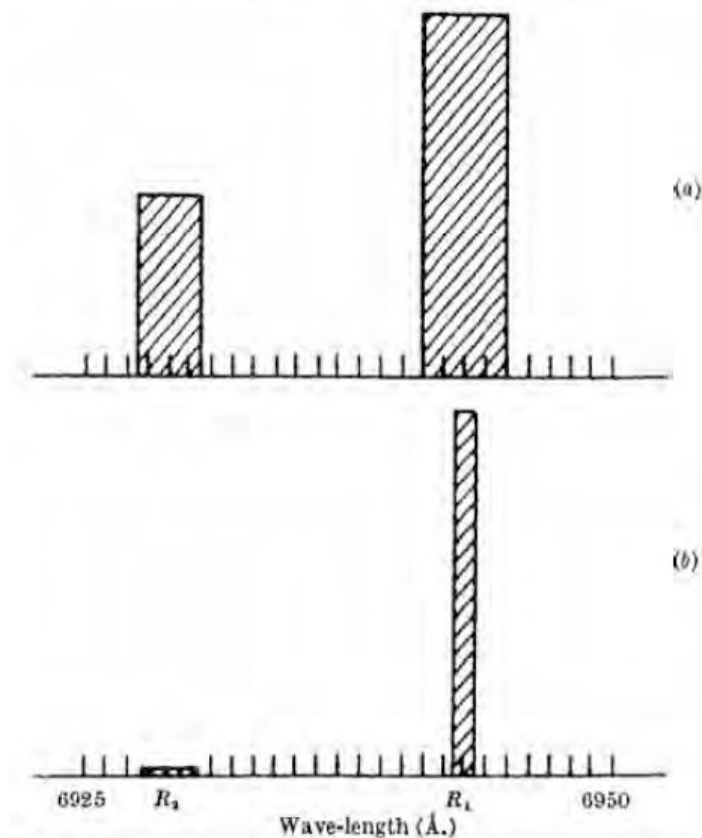
# Петаваттный лазер в Техасском университете. Слева - усилитель (синие блоки)



# Типы лазеров

1. Газовые
2. Твердотельные
3. Полупроводниковые
4. Жидкостные (на красителях)
5. Эксимерные (Eximer – excited dimer)
6. Лазеры на парах металлов
7. Лазеры на свободных электронах

# Первый лазер на рубине



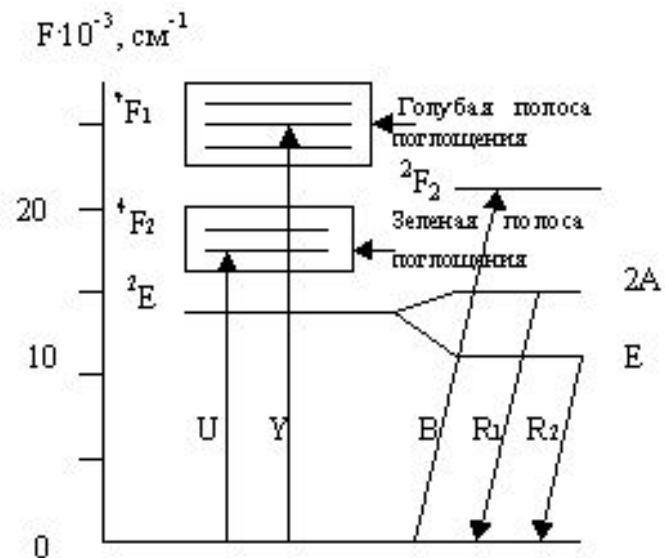
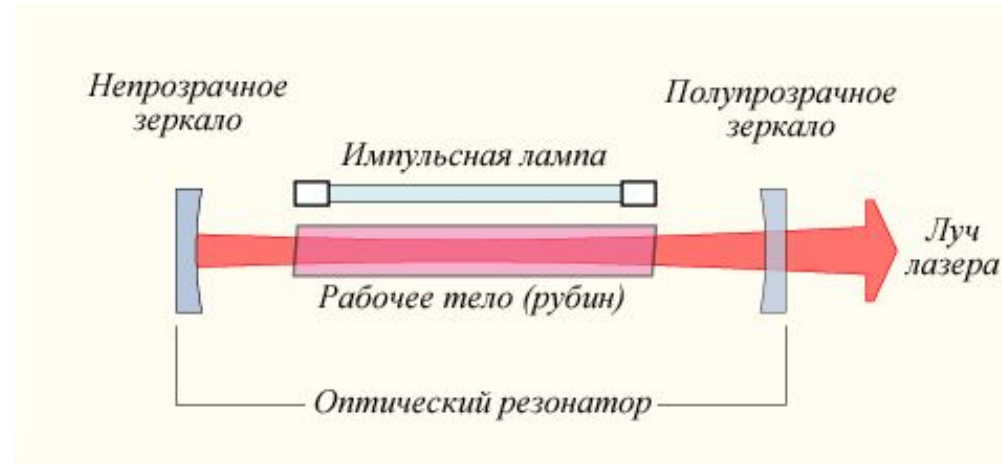
Спектры излучения рубина:

(а) спонтанное излучение при слабой накачке,  
(б) стимулированное излучение при сильной накачке

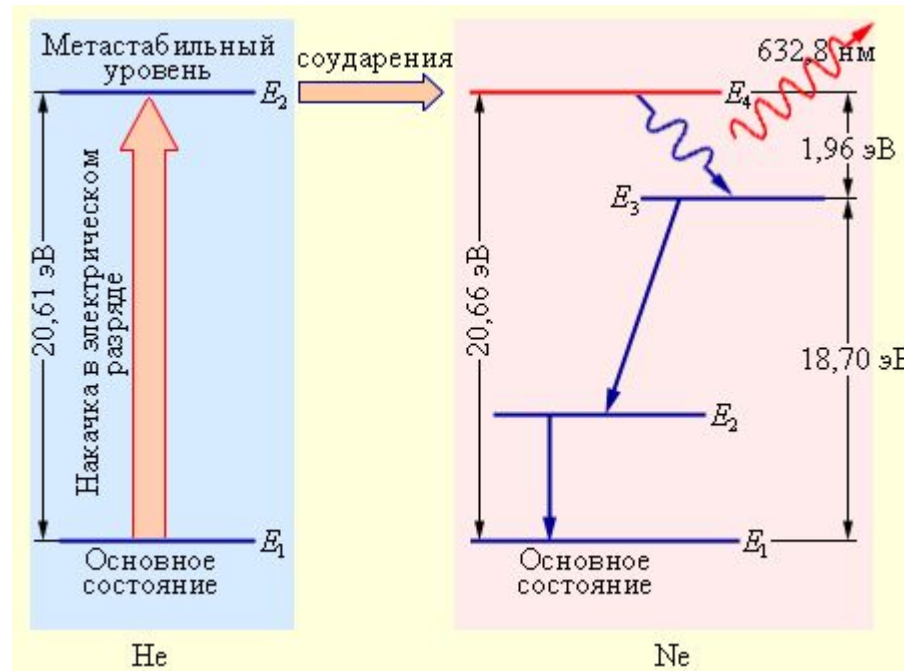
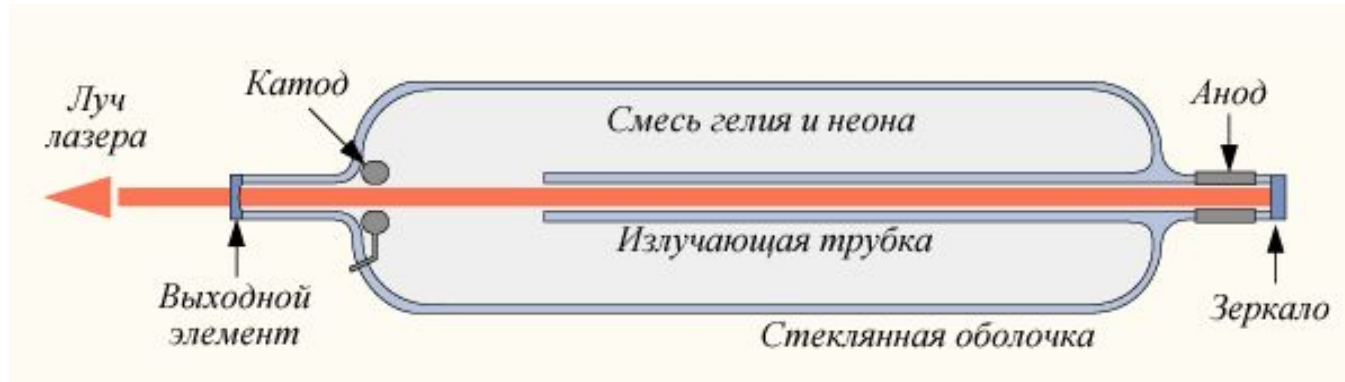
(из оригинальной статьи Т. Меймана, *Nature*, v.187, p.494, 1960)



# Схема рубинового лазера



# Устройство и принцип работы гелий-неонового лазера



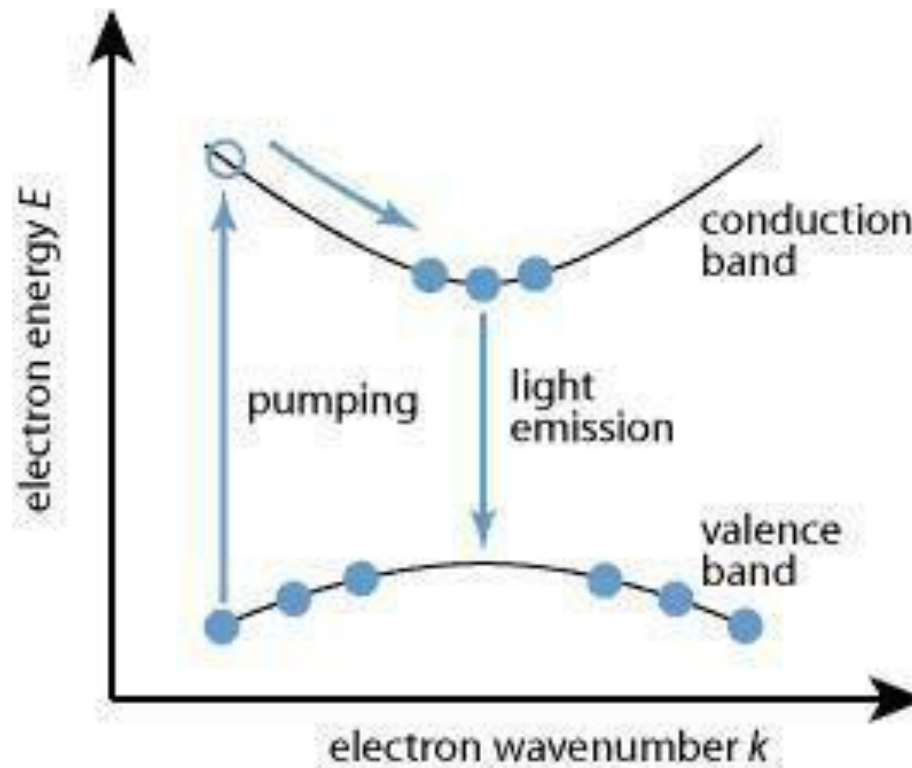
# Различные виды твердотельных лазеров и их области применения

Рабочее тело	Длина волны	Источник накачки	Применение
Рубиновый лазер	694.3 нм	Импульсная лампа	Голография, удаление татуировок. Первый представленный тип лазера
Алюмо-иттриевые лазеры с легированием неодимом (Nd:YAG)	1.064 мкм, (1.32 мкм)	Импульсная лампа, лазерный диод	Обработка материалов, лазерные дальнометры, лазерные целеуказатели, хирургия, научные исследования, накачка других лазеров.
Лазер на ванадате иттрия ( $YVO_4$ ) с легированием неодимом (Nd:YVO)	1.064 мкм	Лазерный диод	Наиболее часто используются для накачки титан-сапфировых лазеров, используя эффект удвоения частоты в нелинейной оптике.
Лазер на неодимовом стекле (Nd:Glass)	~1.062 мкм (силикатные стекла), ~1.054 мкм (фосфатные стекла)	Импульсная лампа, лазерный диод	Лазеры сверхвысокой мощности (тераватты) и энергии (мегаджоули).
Титан-сапфировый лазер	650 – 1100 нм	Другой лазер	Спектроскопия, лазерные дальнометры, научные исследования.
Алюмо-иттриевые лазеры, легированные тулием (Tm:YAG)	2.0 мкм	Лазерные диоды	Лазерные радары
Алюмо-иттриевые лазеры с легированием иттербием (Yb:YAG)	1.03 мкм	Импульсная лампа, лазерный диод	Обработка материалов, исследование сверхкоротких импульсов, мультифотонная спектроскопия, лазерные дальнометры

# Лазеры на красителях

Краситель	Центр линии люминесценции, нм	Рабочая область лазера, нм	Область накачки, нм	Приемлемая концентрация, $10^{-3}$ моль/л
Карбостирил 165	445	419—485	350—365	2,5
Кумарин 2	450	435—485	340—365	3
Кумарин 1	470	450—495	350—365	3
Кумарин 102	495	470—515	400—420	1
Кумарин 30	515	495—545	400—420	1
Кумарин 7	535	505—565	400—420	5
Кумарин 6	538	521—551	458—514	12,5
Флуоресцин	552	538—573	458—514	2,7
Родамин 110 (R110)	570	540—600	458—514	12,5
Родамин 6Ж (R6G)	590	570—650	458—514	2
Родамин Б (RB)	630	601—675	458—514	2
R101/R6G	645	620—690	458—514	1,5 R101 1,5 R6G
Крезил-виолет/R6G	695	675—708	458—514	2,4
Нильский голубой	750	710—790	647—?	1
Оксазин 1(4)	750	695—801	647—672	0,6
DEOTC-P(4)	795	765—875	647—672	0.6
НІТС-P(4)	875	840—940	647—672	0.74

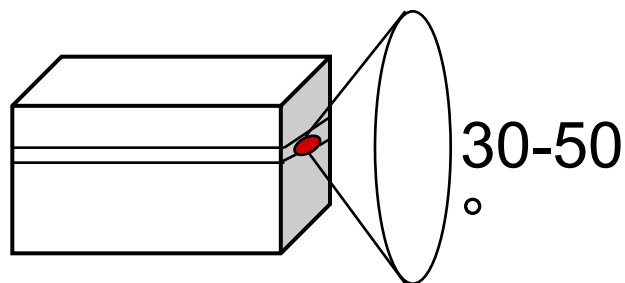
# Простейшая реализация п/п лазера на прямозонном полупроводнике типа GaAs с фотонной накачкой



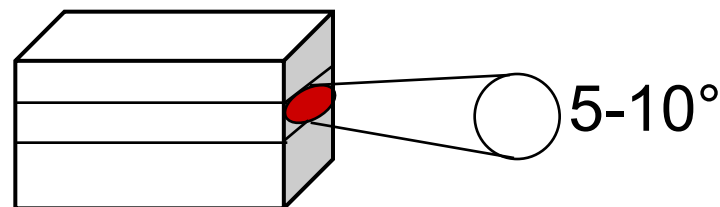
# ДИОДНЫЙ ЛАЗЕР НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Создана принципиально новая конструкция диодных лазеров

Стандартный ДЛ



ДЛ нового типа



- Многократное увеличение области излучения (в 10 раз)
- Снижение порога катастрофического разрушения (в 10 раз)
- Уменьшение угловой расходимости излучения (в 3-5 раз)
- Увеличение выходной мощности (в 5-10 раз)
- Обеспечение надежности работы при больших мощностях

# Принцип действия импульсного лазерного дальномера



Лазерные дальномеры различаются по принципу действия на импульсные и фазовые. Импульсный лазерный дальномер это устройство, состоящее из импульсного лазера и детектора излучения. Измеряя время, которое затрачивает луч на путь до отражателя и обратно и зная значение скорости света, можно рассчитать расстояние между лазером и отражающим объектом.

# Лидар

**Определение:** лидар транслитерация с английского выражения  
**Light Detection and Ranging**

**Назначение:** прибор, реализующий технологию получения и обработки информации об удалённых объектах с помощью активных оптических систем, использующих явления отражения излучения и его рассеяния в прозрачных и полупрозрачных средах.

**Лазерный дальномер – одна из реализаций лидара.**

В отличие от радиоволн, эффективно отражающихся только от достаточно крупных металлических целей, световые волны подвержены рассеиванию в любых средах, в том числе в воздухе, поэтому возможно не только определять расстояние до непрозрачных (отражающих свет) дискретных целей, но и фиксировать интенсивность рассеивания света в прозрачных средах. Возвращающийся отражённый сигнал проходит через ту же рассеивающую среду, что и луч от источника, подвергается вторичному рассеиванию, поэтому восстановление действительных параметров распределённой оптической среды — достаточно сложная задача, решаемая как аналитическими, так и эвристическими методами.



# Применение лидаров

Исследования атмосферы:

Измерение скорости и направления воздушных потоков;

Измерение температуры атмосферы.

Исследования Земли:

Космическая геодезия;

Авиационная геодезия.

Строительство и горное дело.

Морские технологии:

Измерение глубины моря;

Поиск рыбы.

Транспортные применения:

Определение скорости транспортных средств;

Системы активной безопасности.

Промышленные и сервисные роботы.

# ЛАЗЕРНЫЙ ДАЛЬНОМЕР ИМПУЛЬСНЫЙ ЛДИ-3-1М



## Технические характеристики:

- диапазон измерения дальности  
60 ... 15000 м;
- среднее квадратическое  
отклонение определения  
дальности  
не более 3,5 м;
- увеличение визирного канала  
7,5 крат;
- длина волны лазерного излучения  
1079 нм;
- масса прибора 1,3 кг.

Малогабаритный переносной лазерный дальномер-бинокль предназначен:

- ✓ для измерения расстояния до различных морских, наземных и воздушных целей, как при хорошей видимости, так и в сложных метеоусловиях (дождь, туман, снегопад);
- ✓ для ведения наблюдений за окружающей обстановкой.

# ЛАЗЕРНЫЙ ПРИЦЕЛ-ДАЛЬНОМЕР ЛПД



## Технические характеристики:

- диапазон измерения дальности до 20 км;
- средняя квадратическая погрешность измерения дальности  $\pm 5$  м;
- частота измерений 5 Гц;
- увеличение визирного канала 2,5 и 12 крат;
- длина волны лазерного излучения 1064 нм;
- масса прибора 5 кг.

Лазерный прицел-дальномер предназначен для работы в составе унифицированного прибора-наводчика объектов бронетанковой техники. Позволяет вести визуальное наблюдение с переменной кратностью и определять дальность до быстродвижущихся целей.

# ЛАЗЕРНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ТАХЕОМЕТР КТД-3



## Технические характеристики:

- диапазон измерения дальности 100 ... 10000 м;
- средняя квадратическая погрешность измерения:
  - дальности не более 0,2 м;
  - горизонтальных углов 2";
  - вертикальных углов 3";
  - увеличение визирного канала 25 крат;
  - длина волны лазерного излучения 1079 нм;
  - масса прибора 8 кг.

Лазерный электронный тахеометр предназначен для измерения расстояния до естественных объекта и его угловых координат с высокой точностью при топографической съемке местности.