

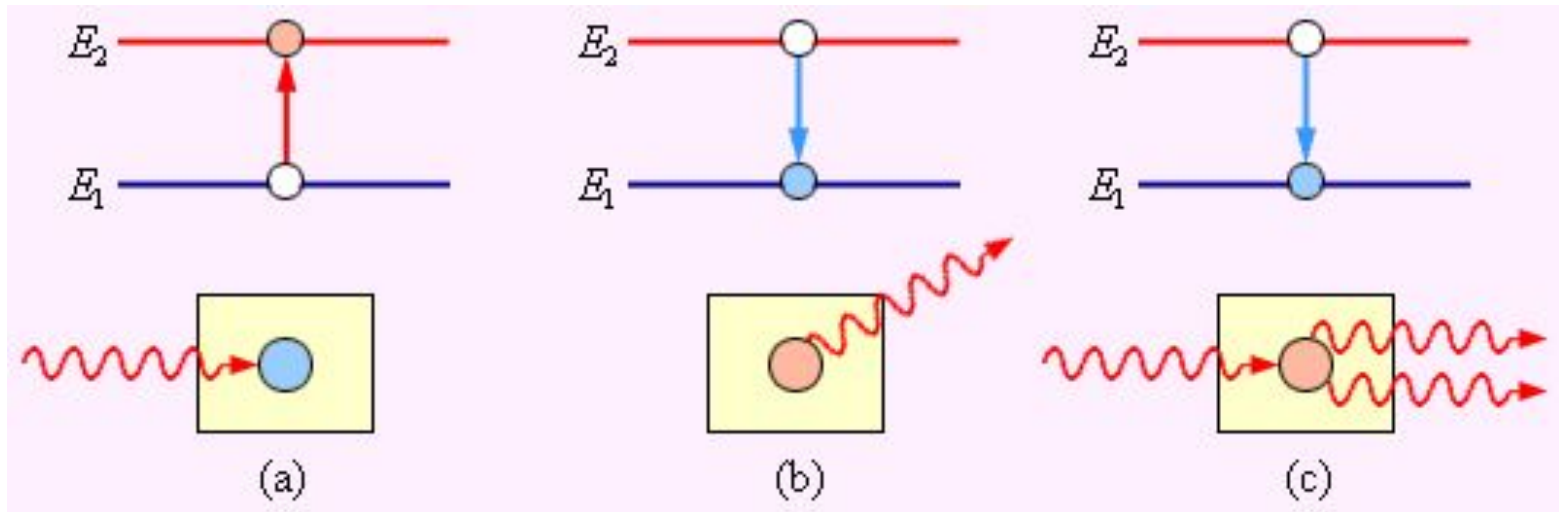
ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

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

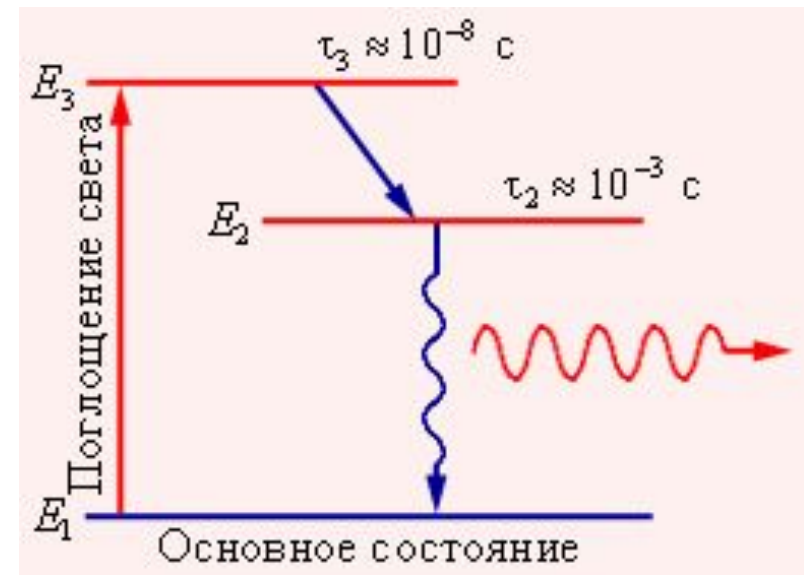
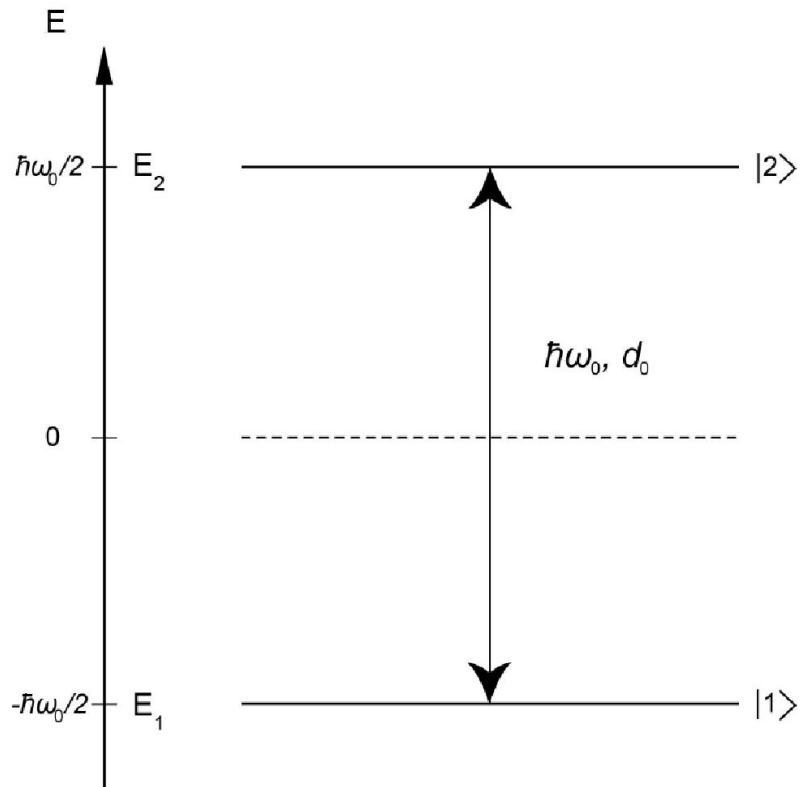
S t i m u l a t e d

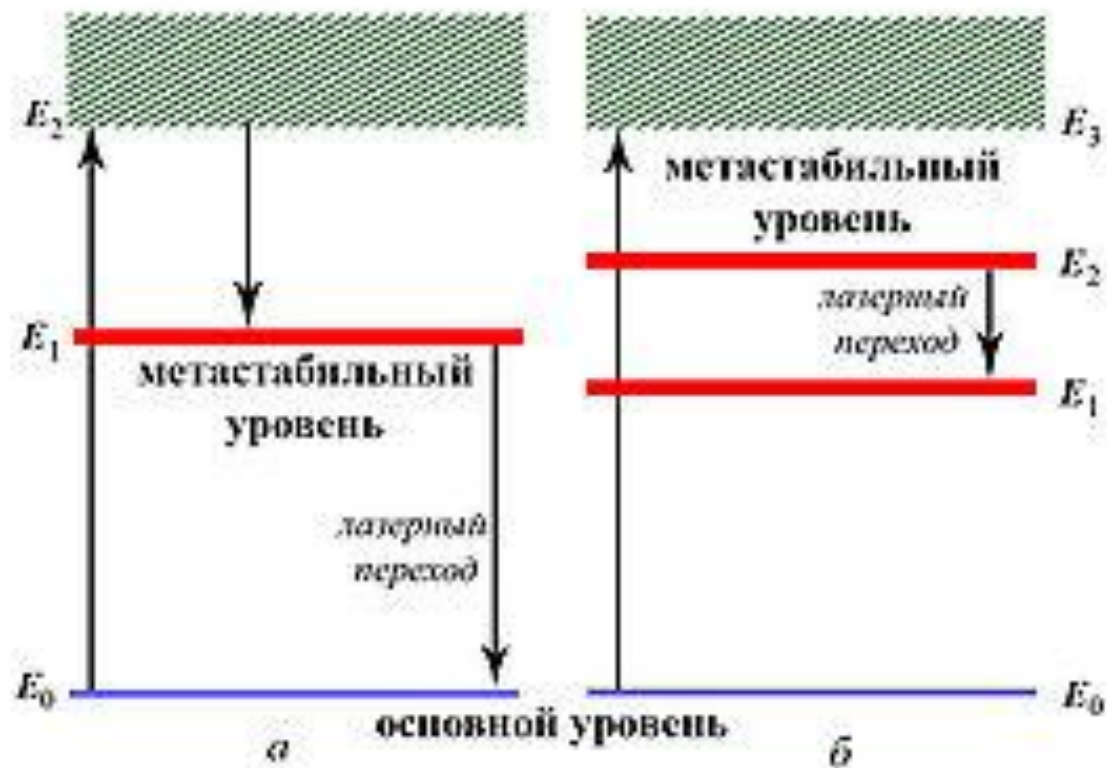
E m i s s i o n o f

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

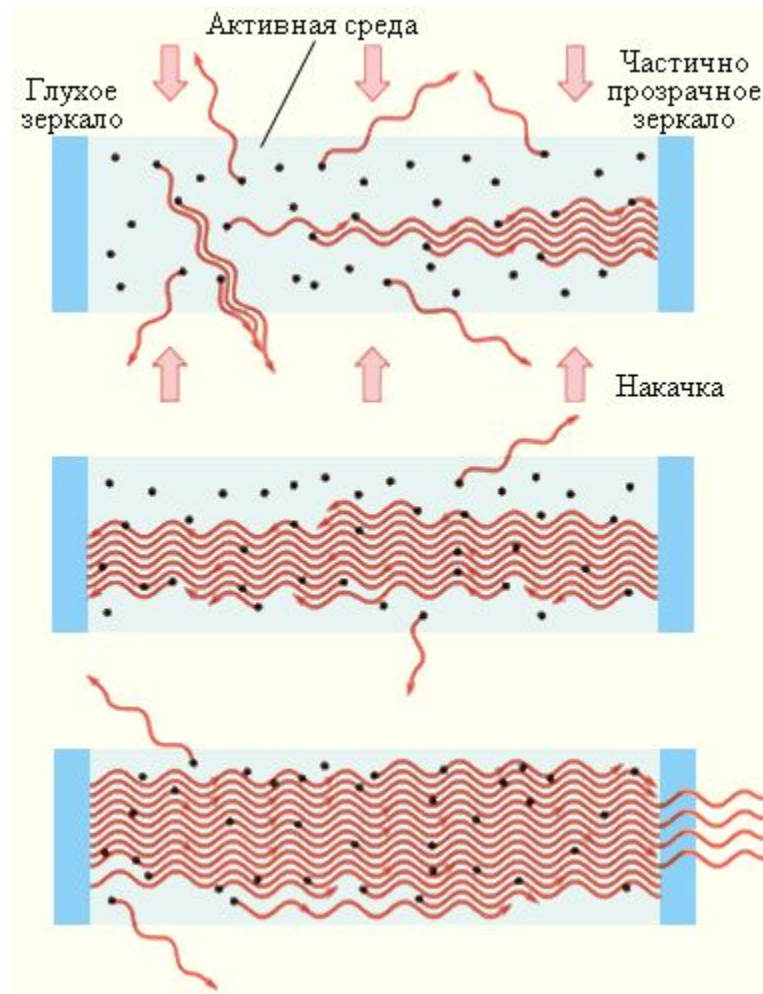
n_{ph} – концентрация фотонов

τ_c – время жизни фотона в резонаторе лазера

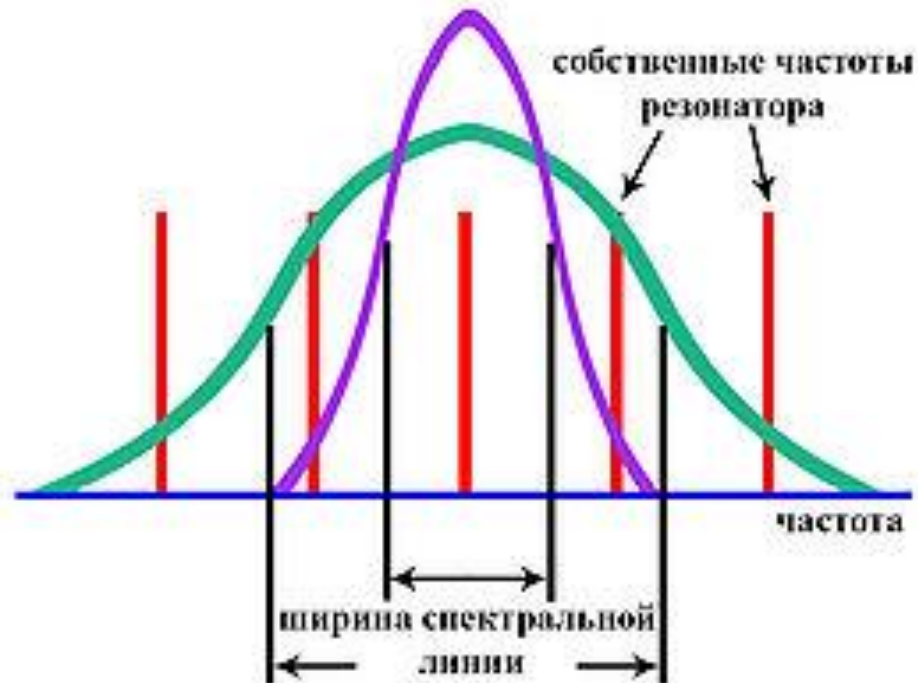
$N > 0$ – необходимое условие лазерного усиления

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

Развитие процесса генерации в лазере

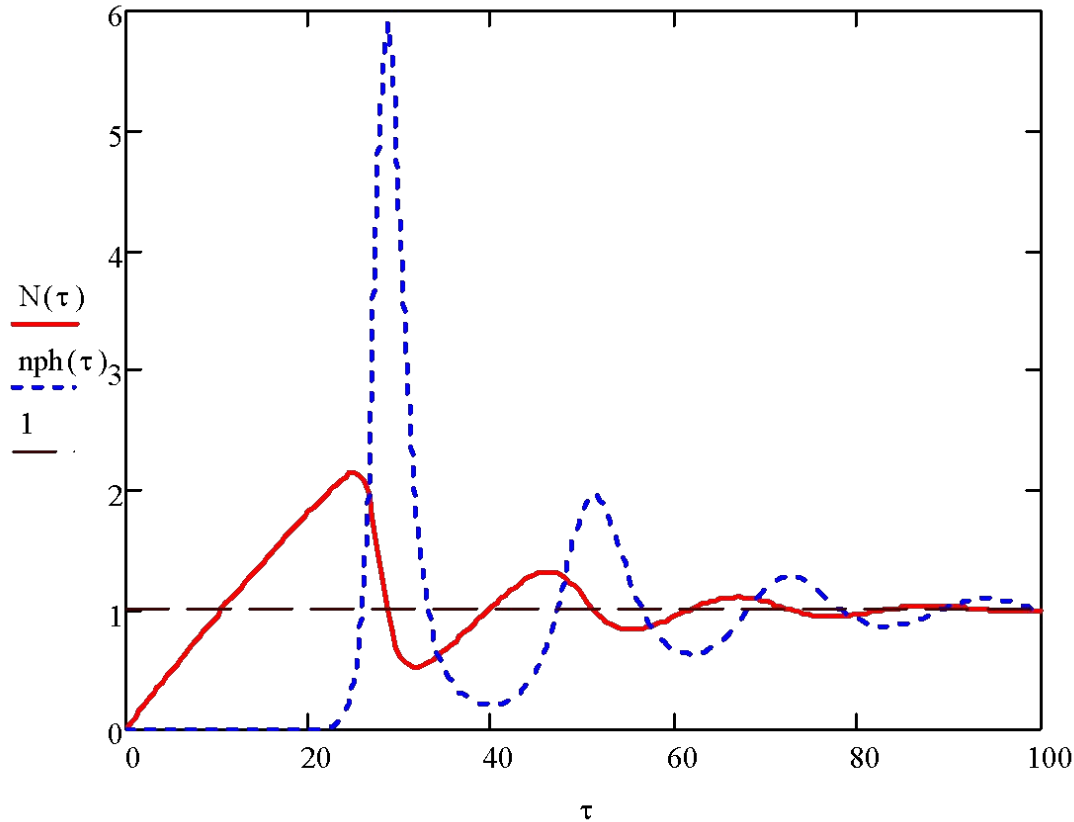


Оптический резонатор



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

Пиковый режим работы лазера



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

нормированная инверсия
населенностей

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

значение инверсии

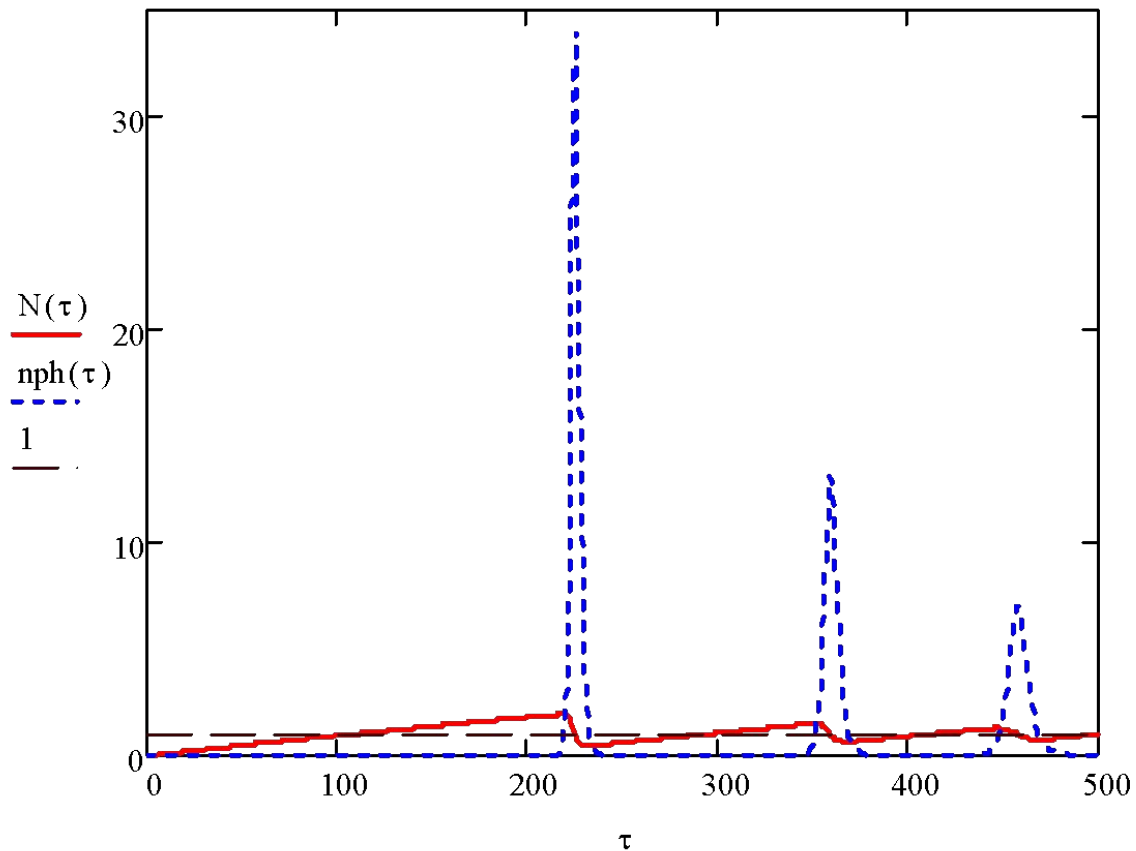
$$\tau = t/\tau_c - \text{нормированное время}$$

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

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

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;

τ_{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	λ , мкм	τ , фс	P , 10^{12} Вт	I , Вт/см ²
1	Lawrence Livermore Nat. Lab. (USA)	1.06	500	1000	$>10^{20}$
2	California Univ. (USA)	0.78	30	50	5×10^{19}
3	Michigan Univ. (USA)	0.78	30	40	2×10^{19}
4	Texas Univ. (USA)	0.78	35	20	2×10^{17}
5	Rutherford Lab. (Great Britain)	1.06	500	1000	$>10^{20}$
6	Astra (Great Britain)	0.8	40	40	3×10^{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	5×10^{18}
11	LULI (France)	0.78	30	100	5×10^{19}
12	LOA (France)	0.78	30	100	5×10^{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	2×10^{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.

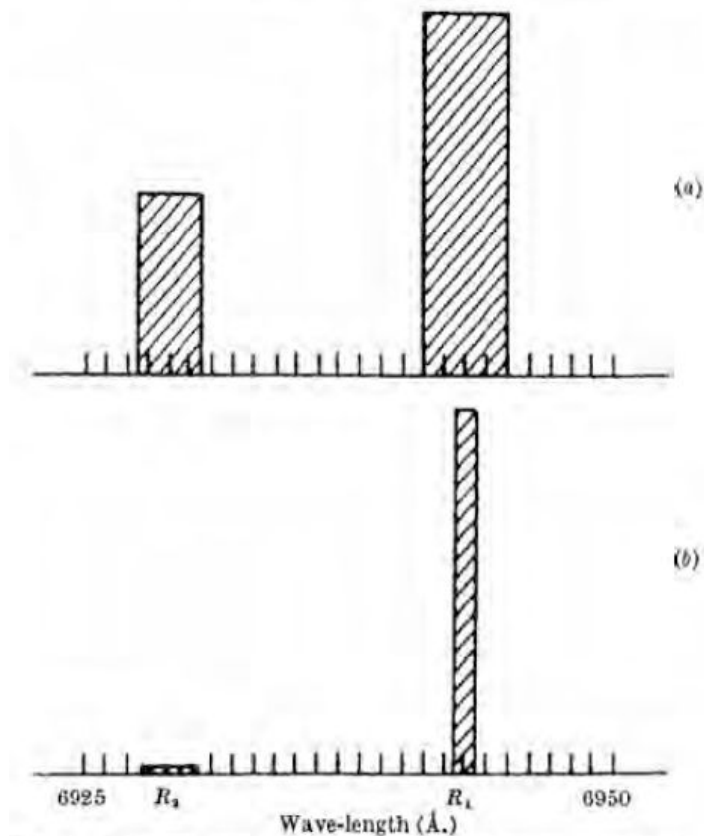
Слева - усилитель (синие блоки)



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



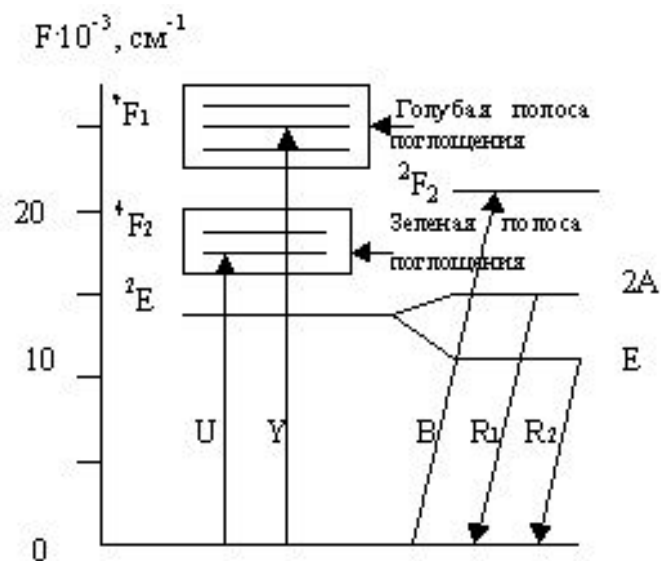
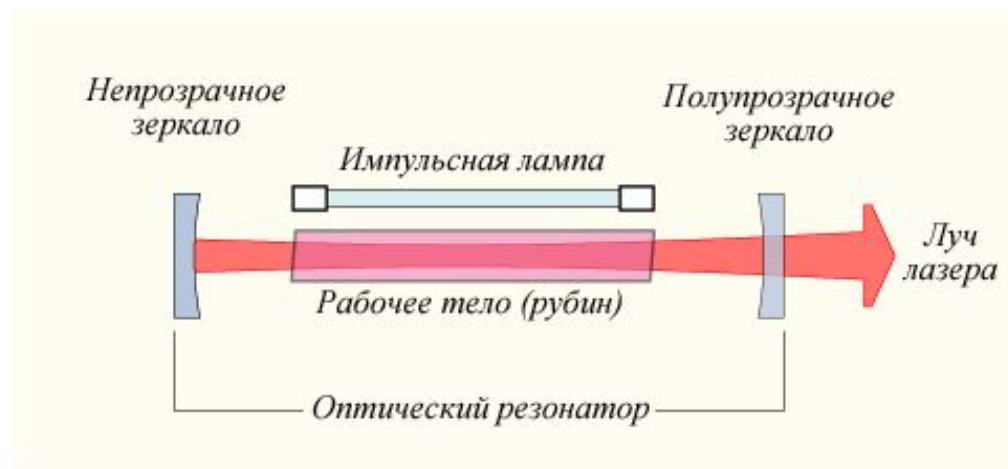
Спектры излучения рубина:

(а) спонтанное излучение при слабой накачке,

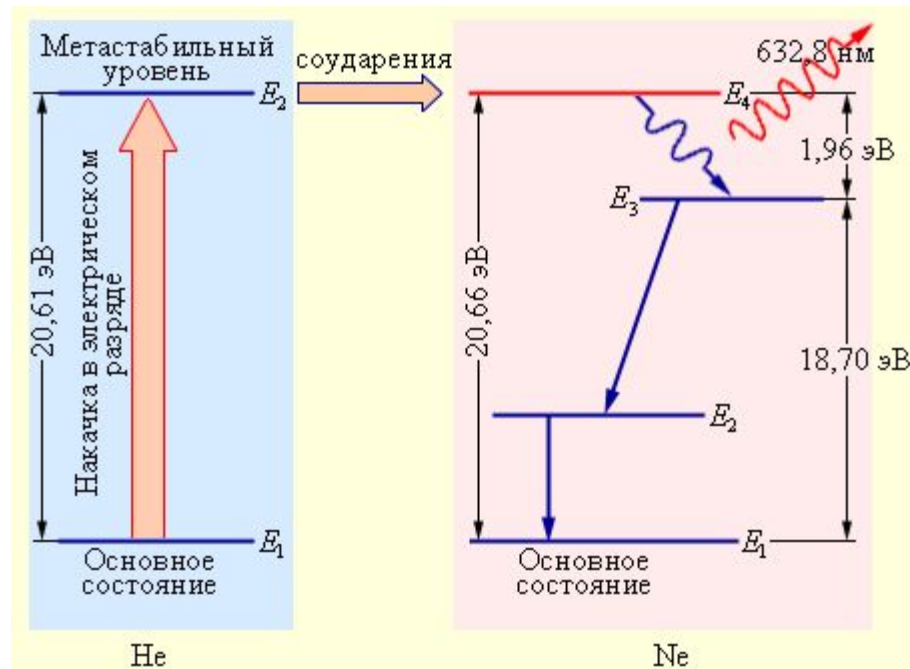
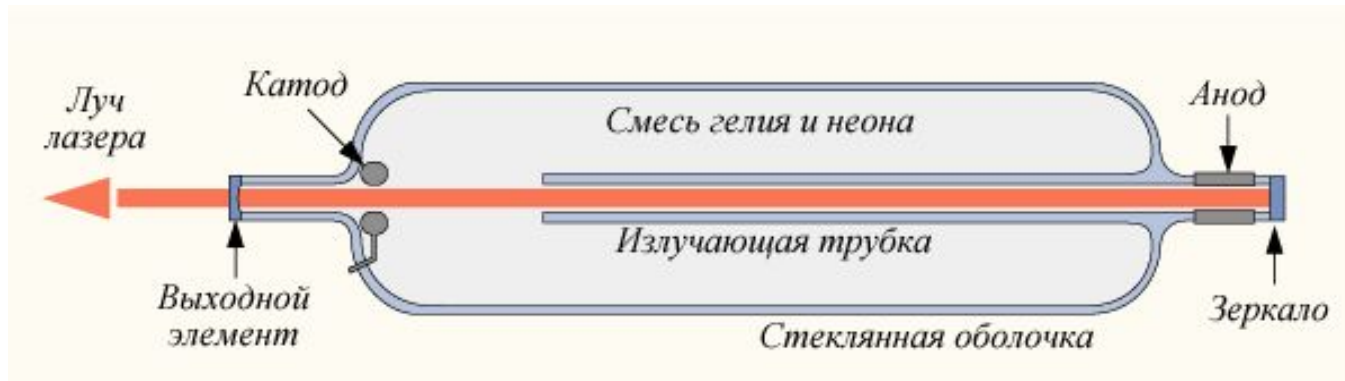
(б) стимулированное излучение при сильной накачке

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

Схема рубинового лазера



Устройство и принцип работы гелий-неонового лазера



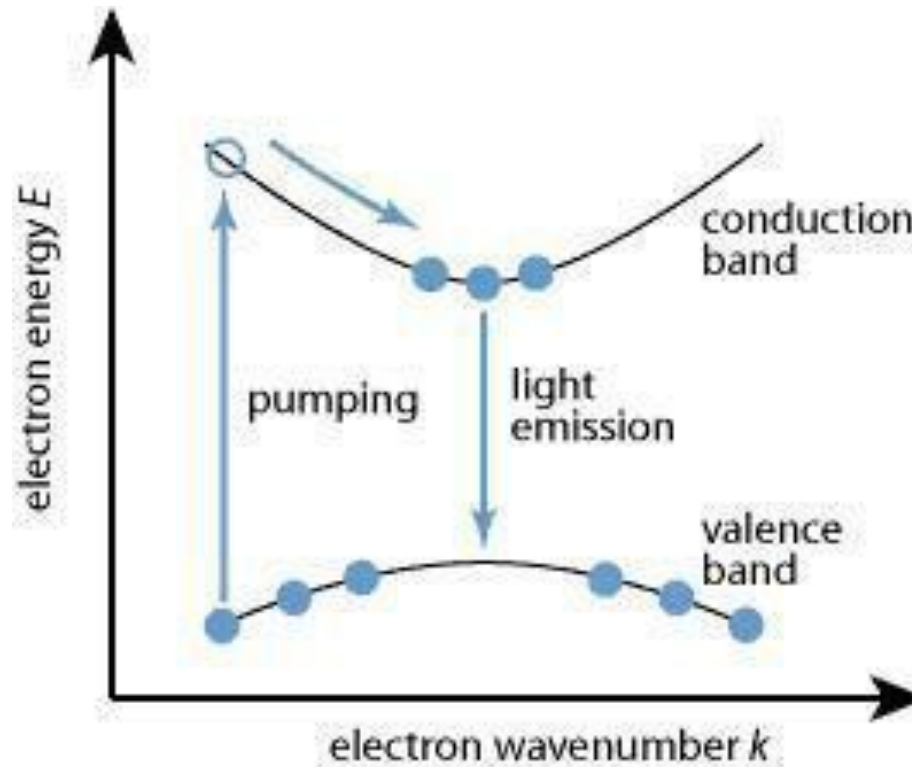
Различные виды твердотельных лазеров и их области применения

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 дальномеры, 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 дальномеры, 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 дальномеры

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
НITC-P(4)	875	840—940	647—672	0.74

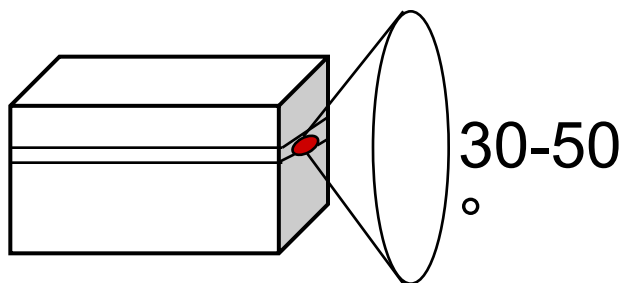
Простейшая реализация п/п лазера на прямозонном полупроводнике типа GaAs с фотонной накачкой



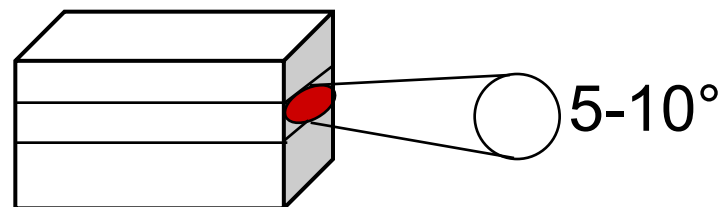
ДИОДНЫЙ ЛАЗЕР НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Создана принципиально новая конструкция диодных лазеров

Стандартный ДЛ

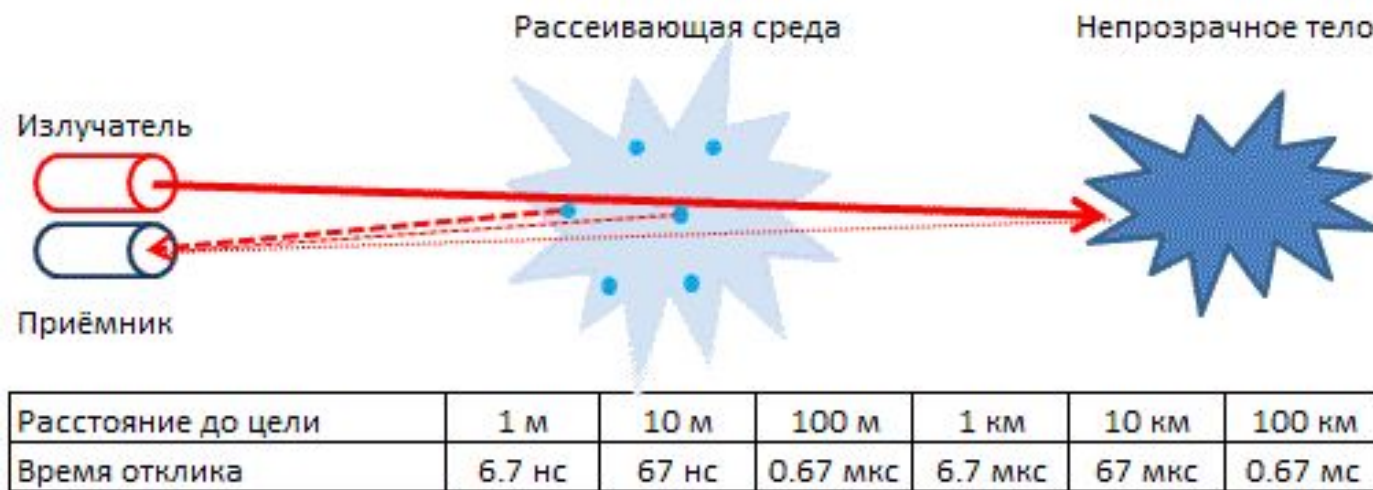


ДЛ нового типа



- 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 ± 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 быстро движущихся 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.