

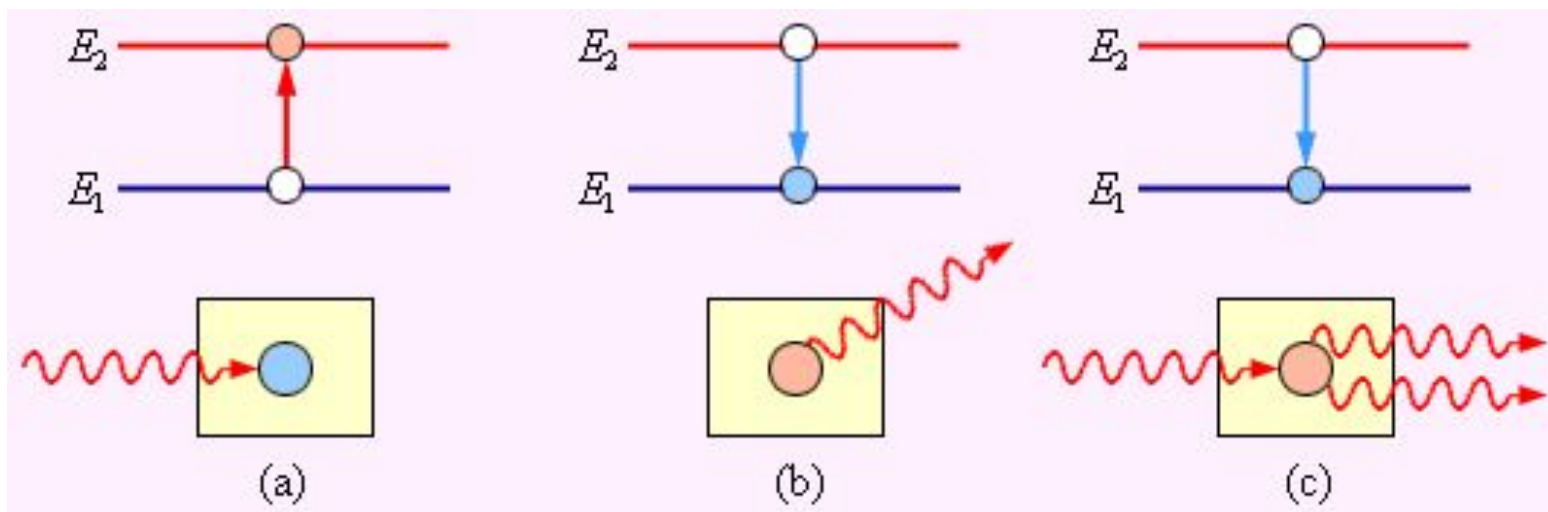
ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

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

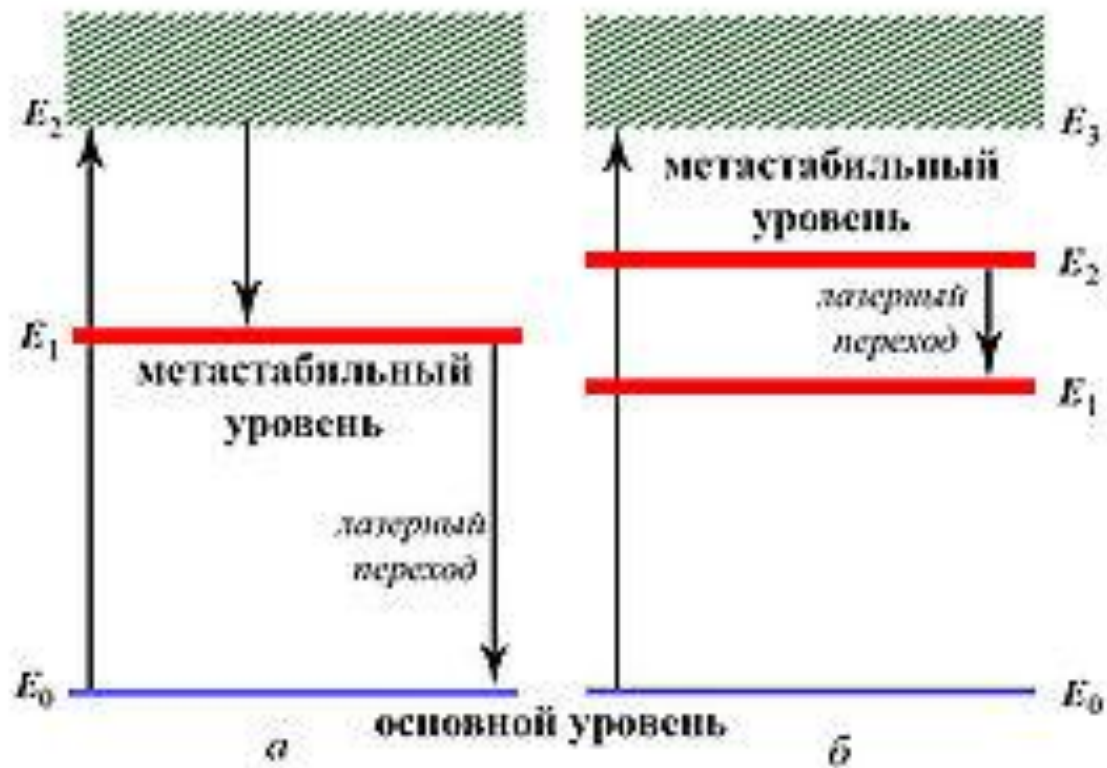
A m p l i f i c a t i o n b y

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»).



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

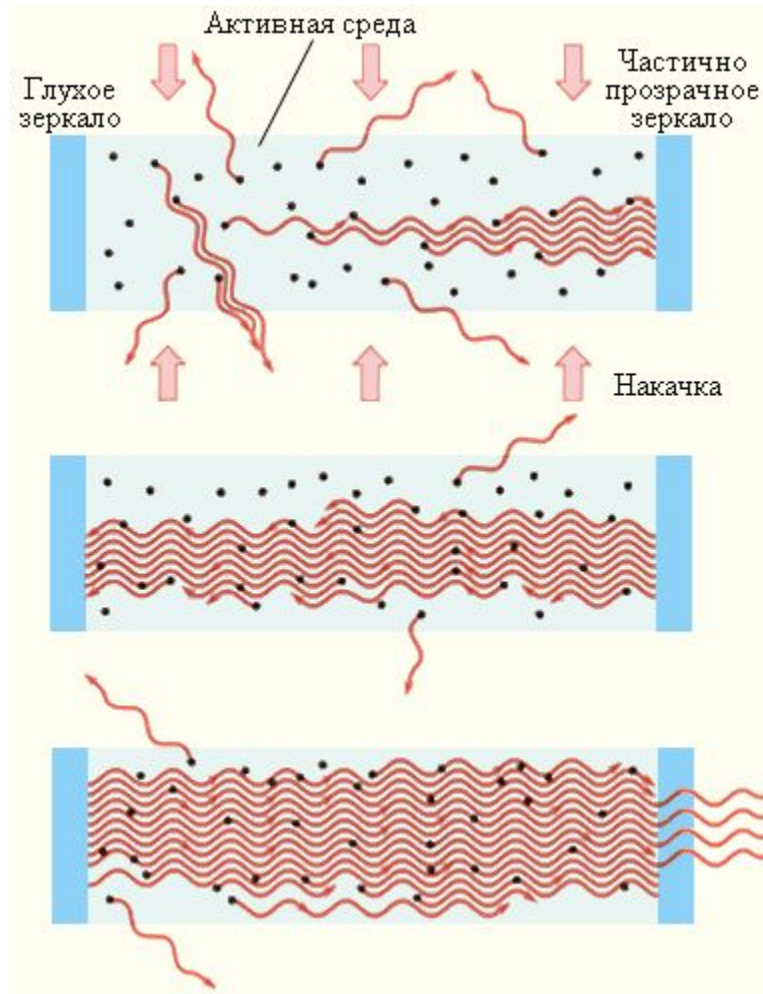
n_{ph} – концентрация фотонов

τ_c – время жизни фотона в резонаторе лазера

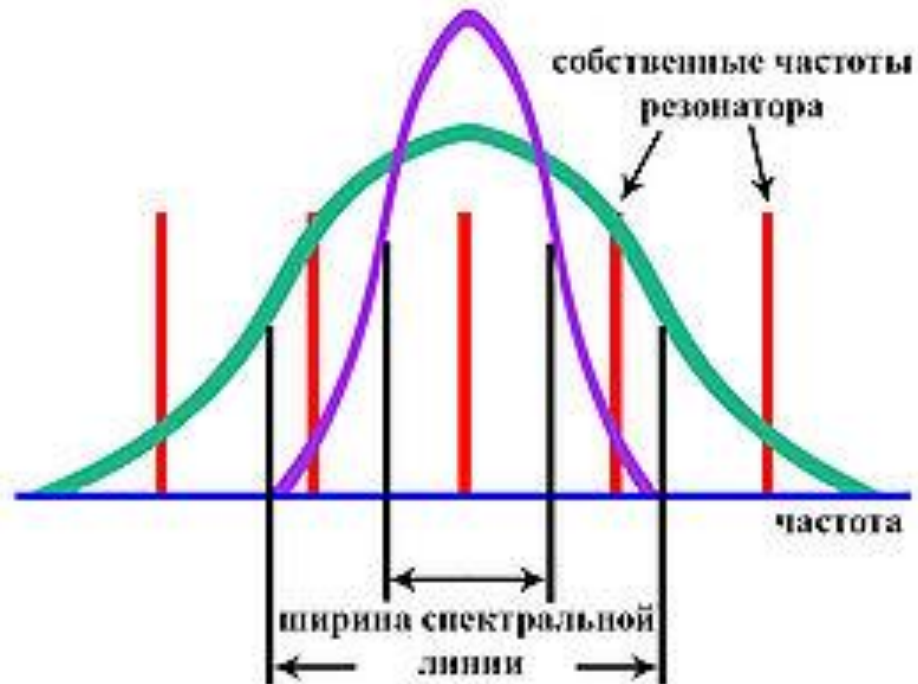
$N > N_{th}$ – необходимое условие лазерного усиления

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

Развитие процесса генерации в лазере

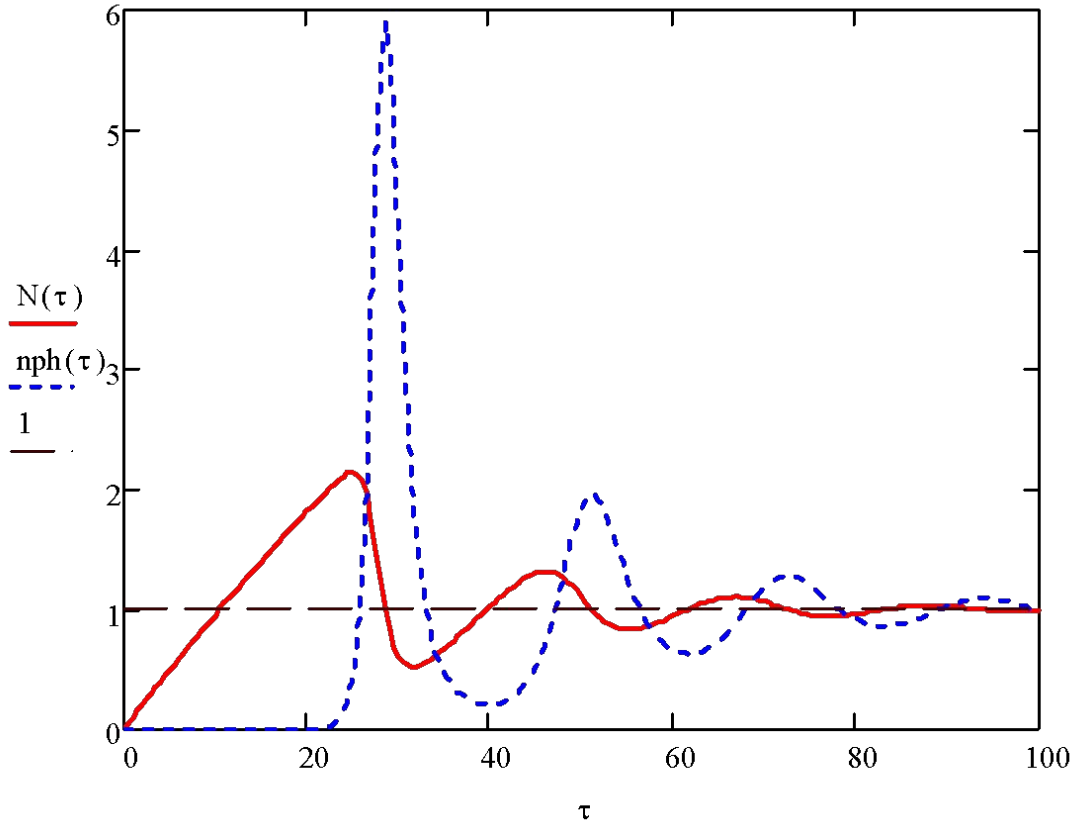


Оптический резонатор



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

Пичковый режим работы лазера



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

нормированная инверсия
населенностей

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

значение инверсии

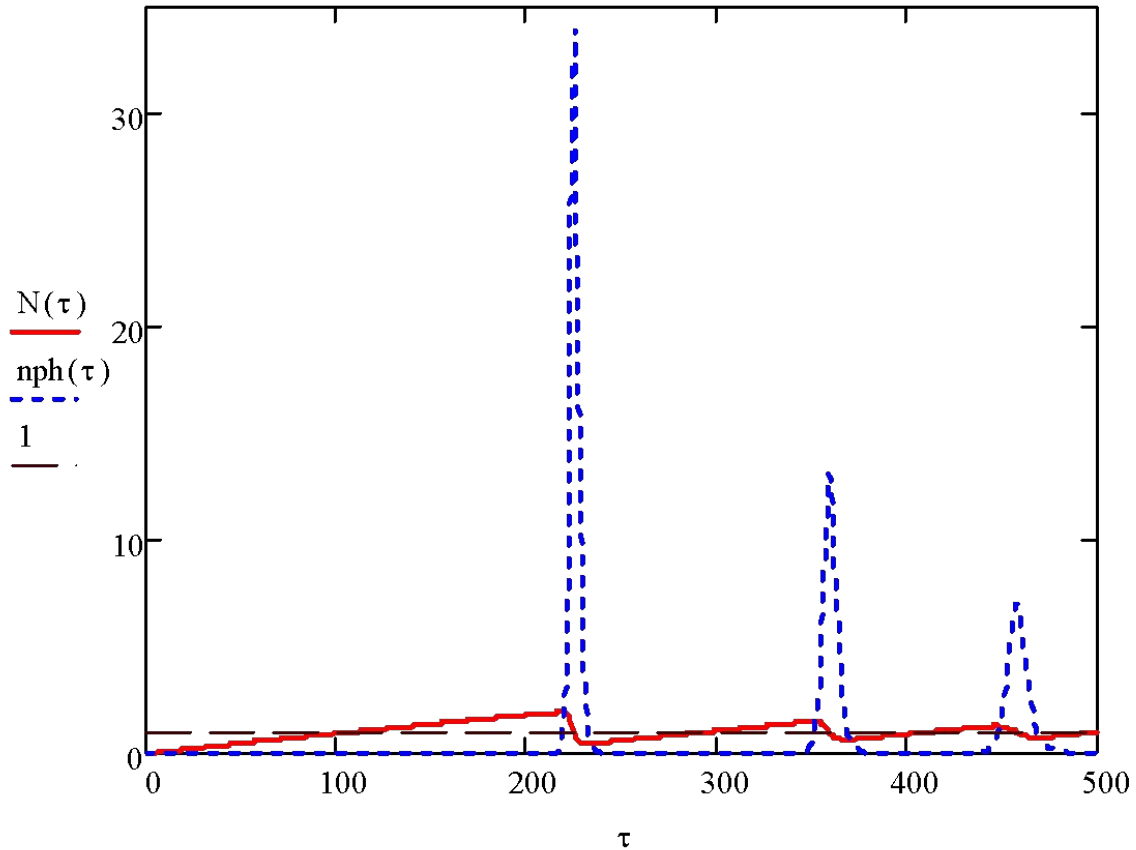
$$\tau = t/\tau_c - \text{нормированное время}$$

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

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

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;

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

$\Delta\nu$ – 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}

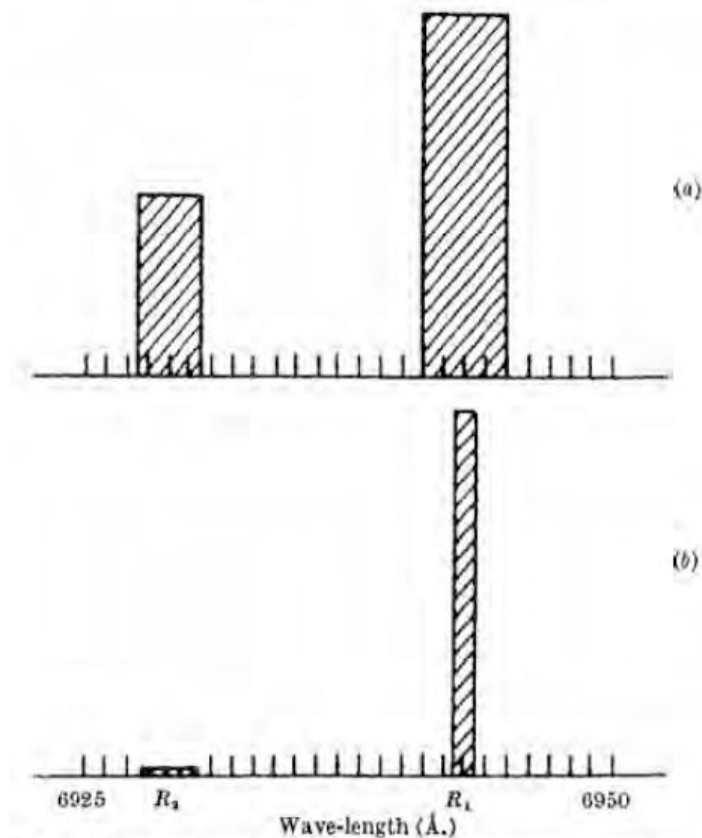
Петаваттный лазер в Техасском университете. Слева - усилитель (синие блоки)



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

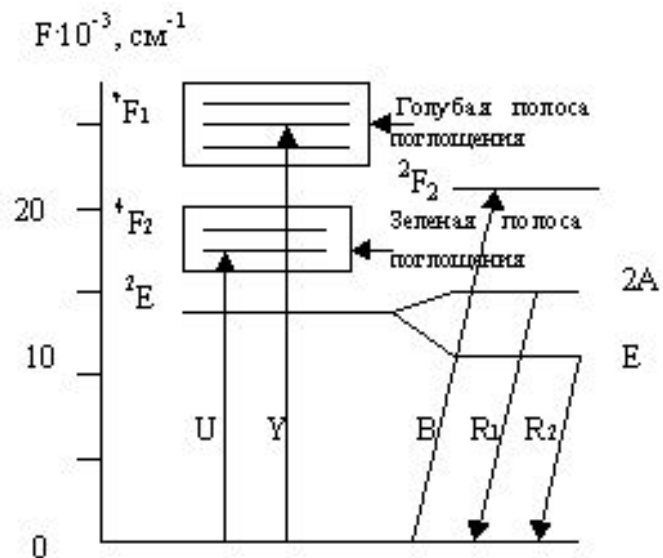
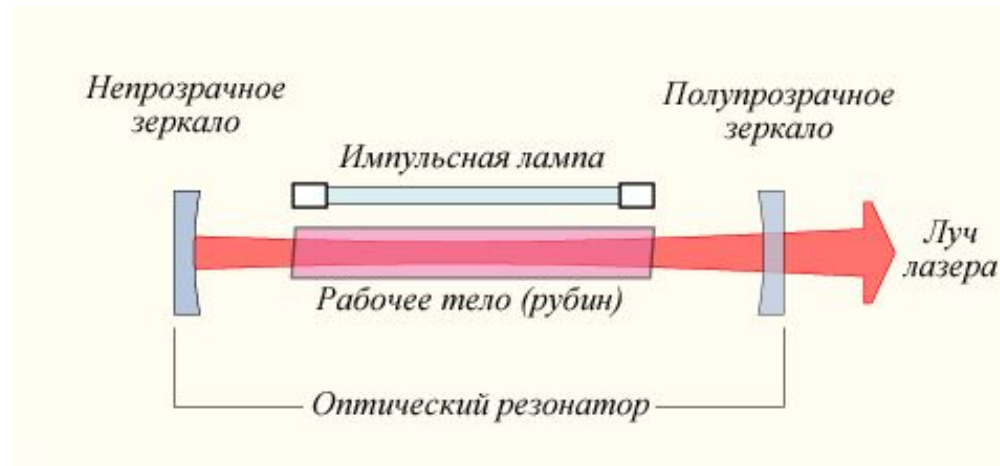


Спектры излучения рубина:

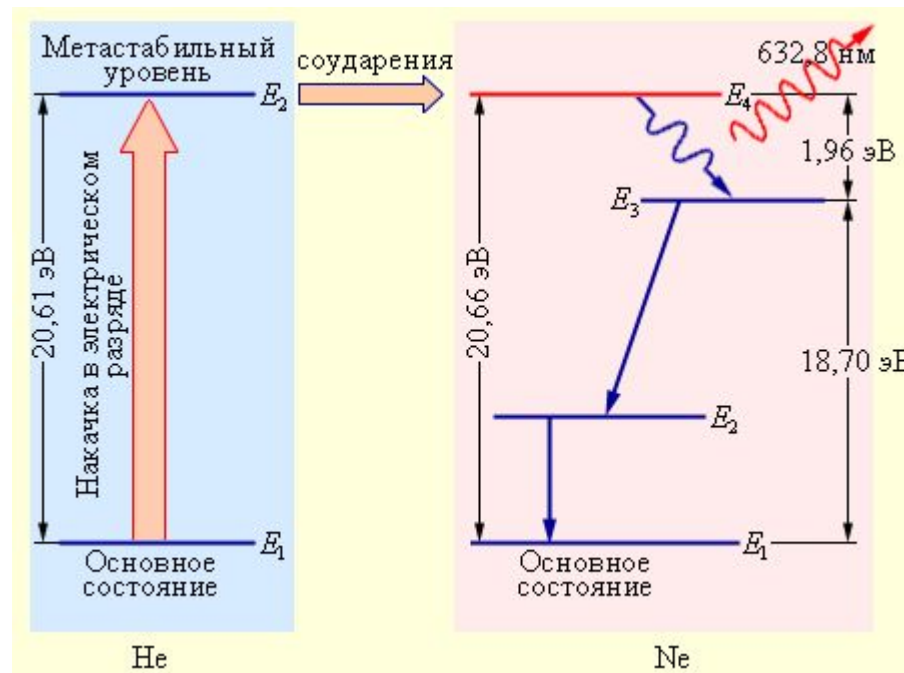
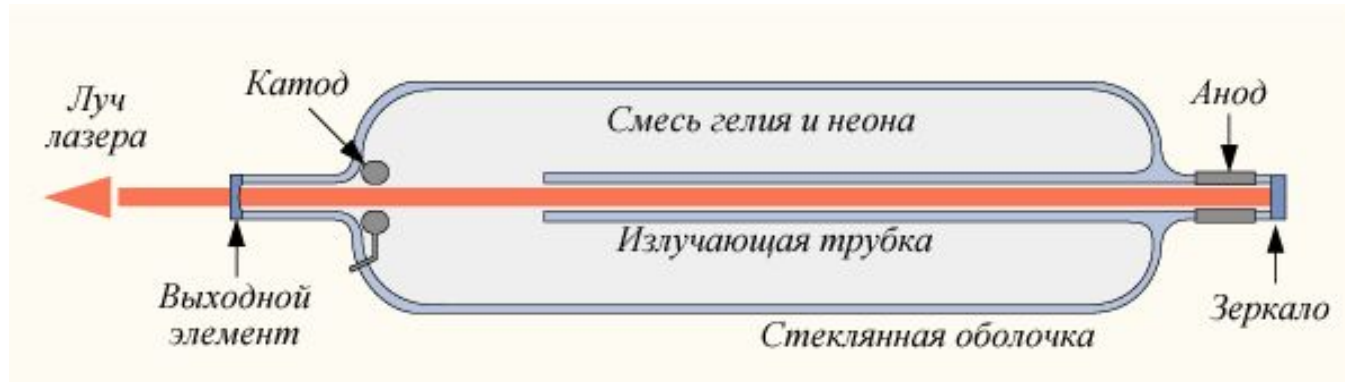
(а) спонтанное излучение при слабой накачке,
(б) стимулированное излучение при сильной накачке

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

Схема рубинового лазера



Устройство и принцип работы гелий-неонового лазера



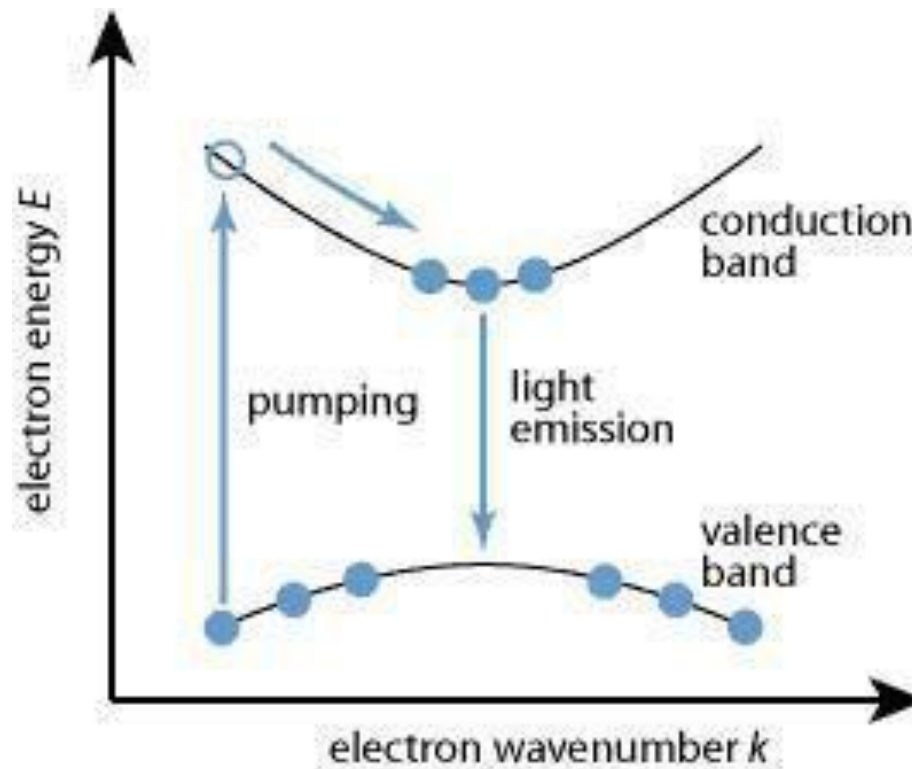
Различные виды твердотельных лазеров и их области применения

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 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

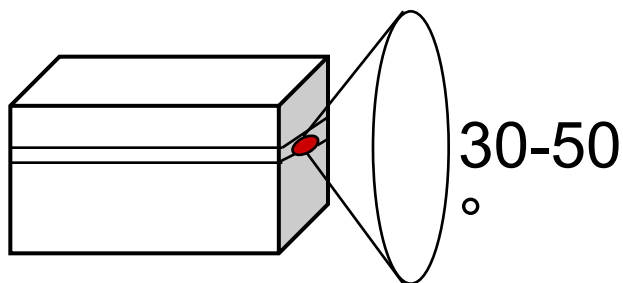
Простейшая реализация п/п лазера на прямозонном полупроводнике типа GaAs с фотонной накачкой



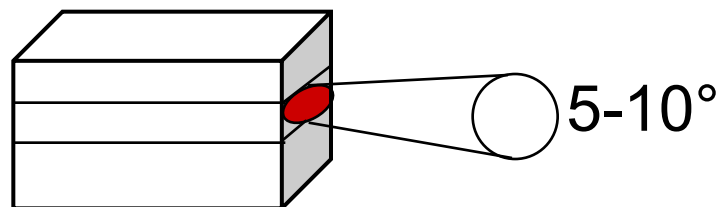
ДИОДНЫЙ ЛАЗЕР НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

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 ± 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.