

# СОВРЕМЕННЫЕ ЛАЗЕРЫ: новые грани света

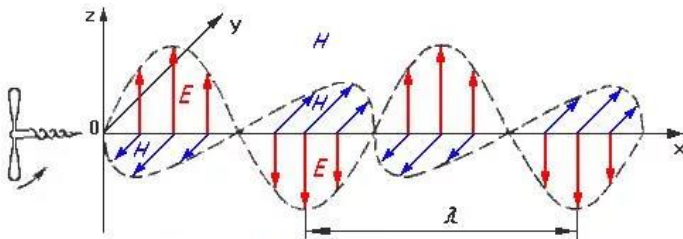
## Лекция 3

### ИЗЛУЧЕНИЕ. ВЕЩЕСТВО. КВАНТЫ

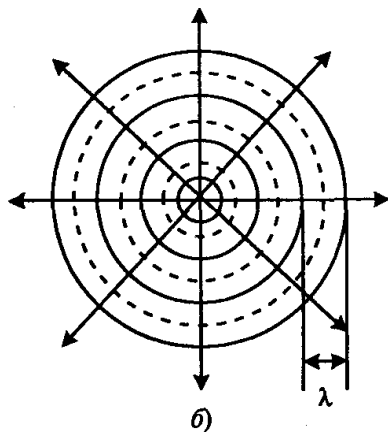
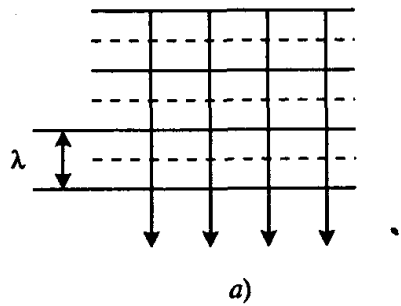
Исследования и открытия, предшествующие созданию лазера. Взаимодействие излучения со средой. Квантовая природа света. Спонтанные и вынужденные переходы. Возможность усиления света. Усиление микроволнового излучения. Мазер.

## Выводы к Лекции 2:

1. Уравнения Максвелла являются обобщением комплекса опытных данных, накопленных к середине XIX в., по электричеству, магнетизму, взаимодействию и взаимовлиянию электрических и магнитных явлений (Кулон, Био, Савар, Ампер, Фарадей и др.)
2. Волновые уравнения для электрического и магнитного полей получаются в результате стандартного преобразования уравнений Максвелла для непроводящей однородной среды
3. Решение волновых уравнений представляет поперечную волну, распространяющуюся со скоростью света в среде

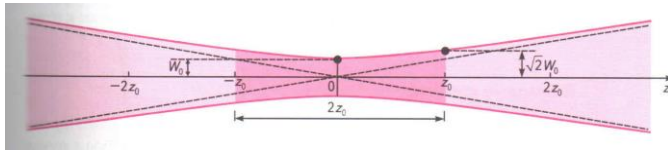


4. Самыми простыми решениями волнового уравнения являются плоская и сферическая волны

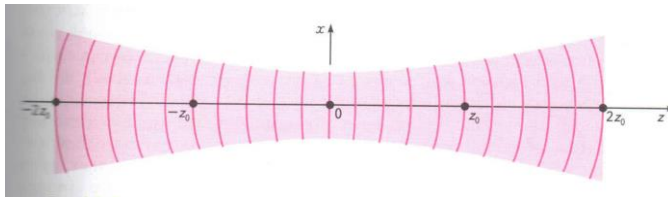


5. Существуют решения волнового уравнения и в виде пучков.  
Наиболее известен Гауссов пучок.

$$I(r) = I_0 \exp \left[ - \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \right]$$



$$\frac{z_0}{w_0} = \frac{\pi w_0}{\lambda}$$



Конфокальный параметр

$$2z_0 = \frac{2\pi w_0^2}{\lambda}$$

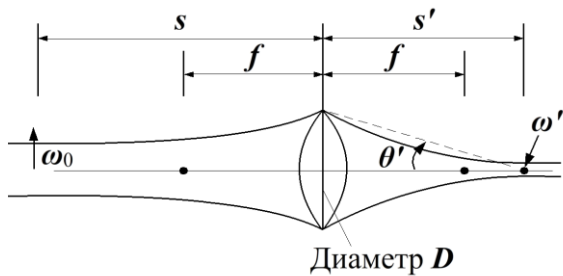
Расходимость

$$\theta_0 = \frac{w_0}{z_0} = \frac{\lambda}{\pi w_0}$$

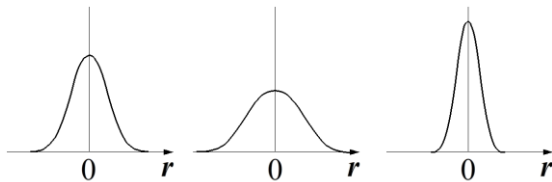
Волновой фронт  
гауссова пучка:  
Плоский - в центре пучка  
Сферический – при  
 $z > z_0$

## Фокусировка гауссова пучка:

$$d_f = \frac{4\lambda F}{\pi D}$$



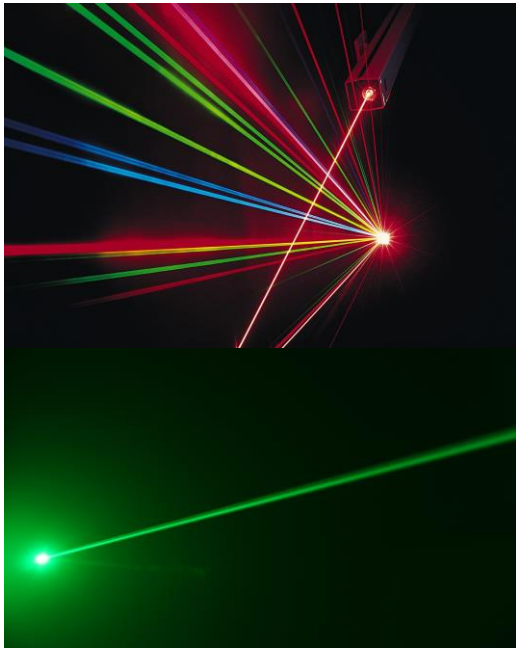
Интенсивность



**Вопрос:** Как создать источник направленного когерентного монохроматического поляризованного света высокой интенсивности?



Свет прожектора



Пучок лазерного излучения

# **Исследования и открытия, предшествующие созданию лазера**

# Формула М.Планка для теплового излучения

Парадокс классической термодинамики конца XIX в.: «Ультрафиолетовая катастрофа».

$\rho_\nu$  - спектральная плотность мощности излучения абсолютно черного тела

$c \cdot \rho_\nu$  - излучательная способность

$$\rho_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \kappa T$$

- формула Дж.У.Рэлея - Дж.Х.Джинса

Идея **М.Планка** (1900г.): Излучательный обмен между АЧТ и полем происходит дискретными порциями, кратными  $h\nu$ . Тогда

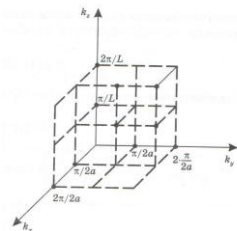
$$\rho_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{\exp(h\nu/\kappa T) - 1}$$

- формула **М.Планка**

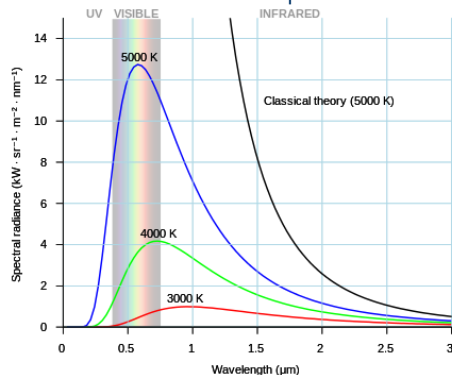
$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$



Наглядная модель абсолютно черного тела – полость с идеально отражающими стенками при температуре  $T$



Можно подсчитать число резонансных мод. Каждая имеет энергию  $\kappa T$

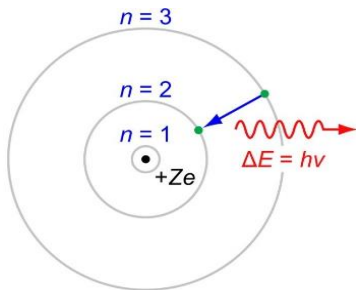




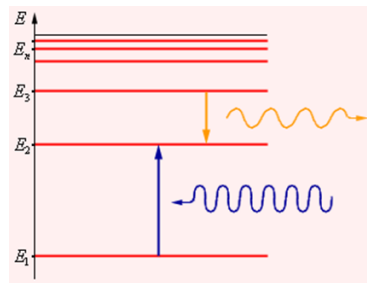
# Постулаты Бора (1913 г.)

1. Атом и атомные системы могут длительно пребывать только в особенных стационарных или квантовых состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия. В стационарном состоянии атом не излучает электромагнитных волн.

2. Излучение света происходит при переходе электрона из стационарного состояния с большей энергией в стационарное состояние с меньшей энергией. Энергия излученного фотона равна разности энергий стационарных состояний.



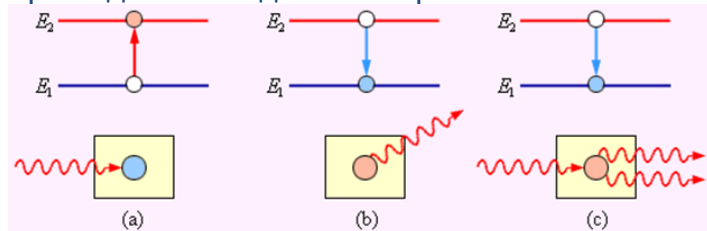
$$\nu_{mk} h = E_m - E_k$$



# Спонтанные и вынужденные переходы

**А.Эйнштейн.** «Излучение и поглощение света в соответствии с квантовой теорией» (1916), «К квантовой теории излучения» (1917)

Три вида взаимодействия фотонов с атомами:



a: поглощение  
b: спонтанное излучение  
c: вынужденное излучение

$$\nu_{21} = E_2 - E_1$$

Поглощение:  $dn_1/dt = B_{12} \rho_\nu \cdot n_1$

Излучение:  $dn_2/dt = (A_{21} + B_{21} \rho_\nu) \cdot n_2$

Индукированный фотон имеет те же частоту, фазу, поляризацию, направление движения, что и падающий.

При ТД равновесии:

$$dn_1/dt = dn_2/dt$$

Согласно распределению **Больцмана**:

$$n_1/n_2 = (g_1/g_2) \exp[-(E_1 - E_2)/kT]$$

Связь коэффициентов Эйнштейна:

$$B_{12} = B_{21}; \quad B_{21} = (c^3/4h\nu^3) A_{21}$$

# Возможность усиления света

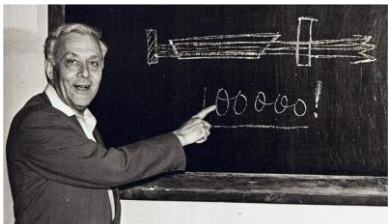
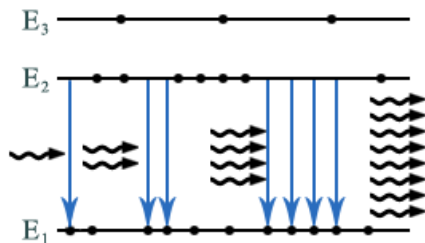
При достаточно большом потоке падающих фотонов:  $A_{21} \ll B_{21}\rho_\nu$

Условие усиления (преобладания вынужденного излучения над поглощением:  $dn_2/dt > dn_1/dt$  .

Это выполняется только при условии:

$n_2 > n_1$  - инверсная населенность.

Поток фотонов будет нарастать!

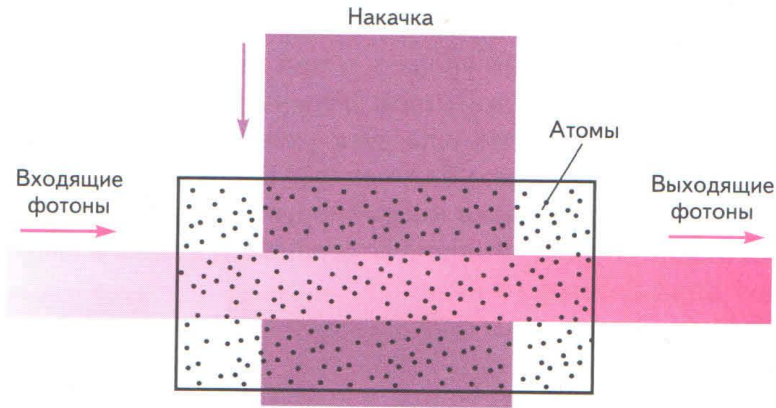


В.А.Фабрикант объясняет новый способ усиления электромагнитного излучения

В.А.Фабрикант. Специалист по оптическим характеристикам газовых разрядов. Указывал на возможность создания инверсной населенности в газовом разряде еще в 1938 году. Однако, тогда завершения эта работа не получила.

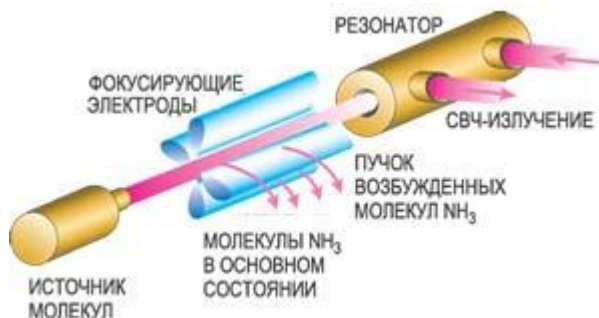
1951 год: Заявка на изобретение «Способ усиления электромагнитного излучения (ультрафиолетового, видимого, инфракрасного и радиодиапазонов волн), основанный на использовании явления индуцированного испускания». Свидетельство выдано было в 1959 г.

# Основные признаки лазерного усиления

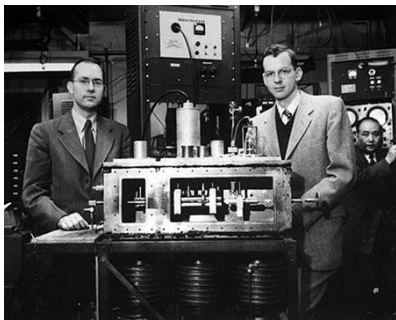
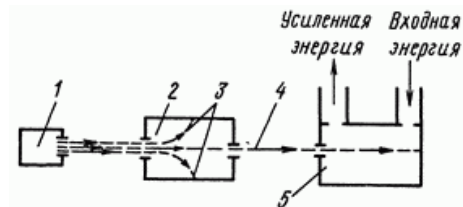


- Накачка (возбуждение) активной среды
- Создание инверсной заселенности
- Взаимодействие падающих фотонов с атомами (ионами)
- Вынужденное излучение и нарастание потока фотонов
- Частоты и фазы вынужденного и падающего излучения совпадают
- Когерентное усиление при преобладании вынужденного излучения над поглощением

# Усиление микроволнового излучения. Мазер.

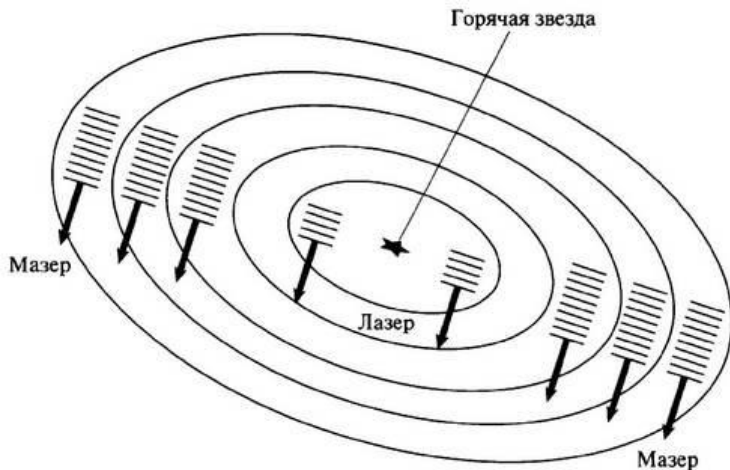


“Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation” – Ч.Таунс в 1954



# Космические мазеры

Когерентное микроволновое излучение в космосе образуется в результате естественных процессов «накачки», которые действуют в атмосферах и оболочках некоторых звезд, в межзвездных газовых облаках, в атмосферах комет.



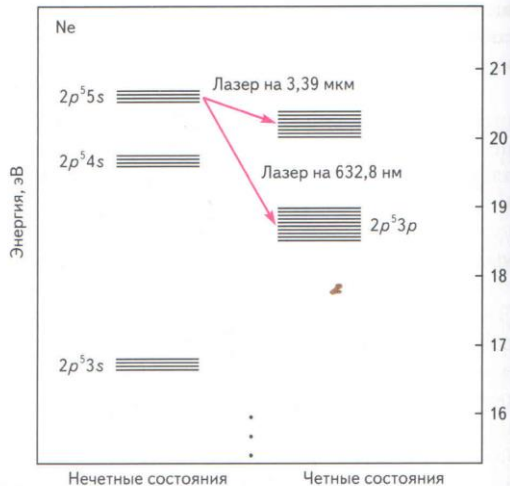
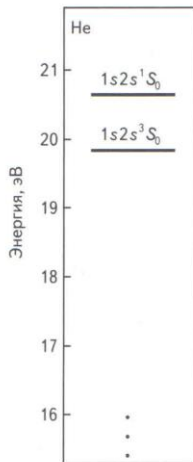
«Накачку» осуществляют либо воздействующее на молекулы  $\text{OH}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}$  и некоторых других излучение звезды (чаще всего — в инфракрасном диапазоне), либо сталкивающиеся с ними частицы окружающего газа, если этот газ достаточно горяч и плотен.

Наиболее мощные из космических мазеров излучают в узкой радиолинии такое же количество энергии, какое Солнце излучает во всем спектре электромагнитных волн!

# Энергетические уровни атомов, молекул и кристаллов

Газовые среды

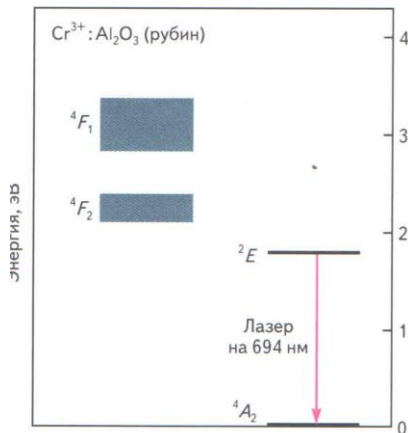
He-Ne-лазер



# Энергетические уровни атомов, молекул и кристаллов

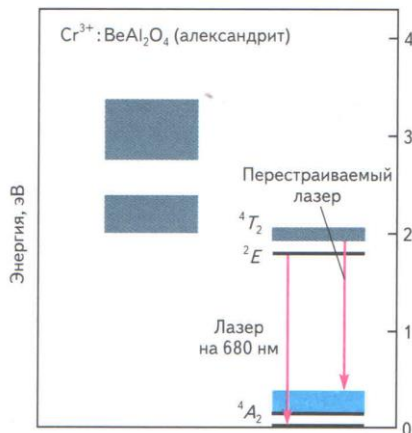
## Твердотельные среды

Легированные диэлектрические кристаллические материалы:



**Рубин** –  $\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$   
 $\text{Al}_2\text{O}_3$  – сапфир (корунд)

**Первый лазер Т.Мейнмана**



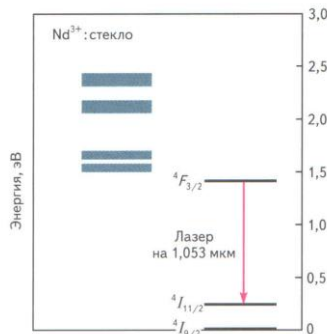
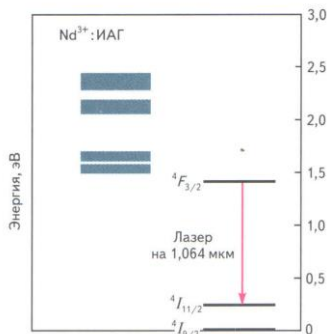
**Александрит** –  $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$   
 $\text{BeAl}_2\text{O}_4$  – хризоберилл  
Можно использовать для  
перестройки длины волны



# Энергетические уровни атомов, молекул и кристаллов

## Твердотельные среды

Кристаллы, легированные лантанидами ( $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$ ,  $\text{Tm}^{3+}$ ,  $\text{Ho}^{3+}$  и другие)



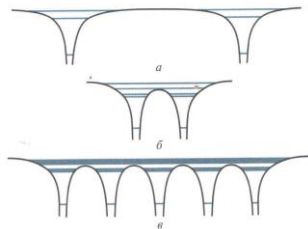
$\text{Nd}^{3+}$  в иттрий-алюминиевом гранате (YAG)

$\text{Nd}^{3+}$  в фосфатном стекле

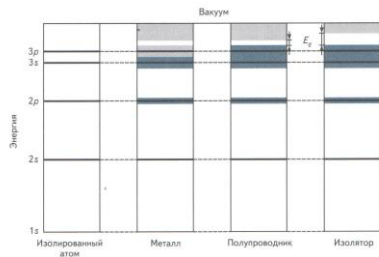
Благодаря использованию переходов на внутренних экранированных электронных оболочках, полосы усиления достаточно узки

# Энергетические уровни атомов, молекул и кристаллов

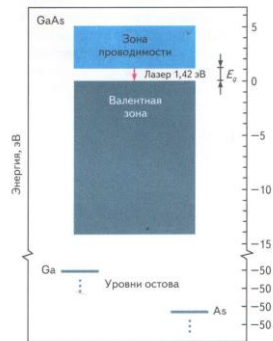
## Полупроводниковые среды.



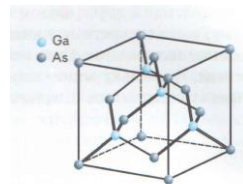
## Механизм образования энергетических зон в полупроводниках



## Энергетические зоны в металлах, полупроводниках и диэлектриках

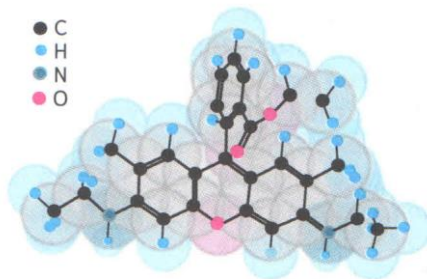
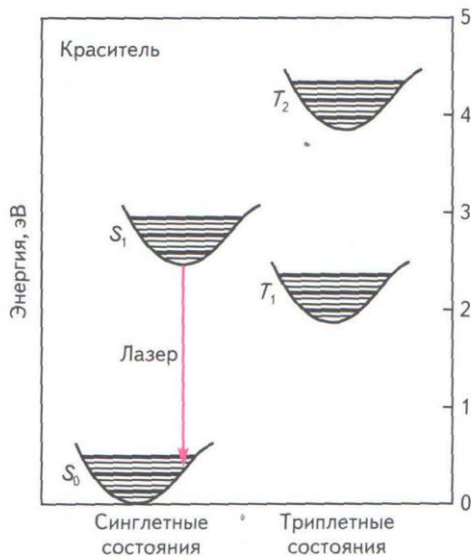


## Энергетические зоны и кристаллическая Решетка GaAs



# Энергетические уровни атомов, молекул и кристаллов

## Растворы органических красителей



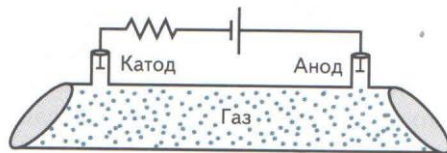
Структура иона родамина 6G,  
химическая формула



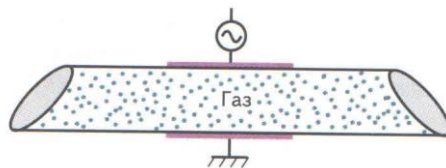
# Основные типы накачки

## Электрическая накачка

**Разряд в газе** (*продольный либо поперечный*) при постоянном токе

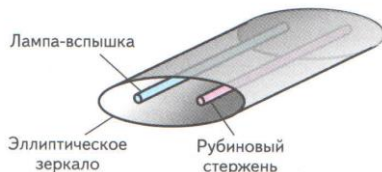
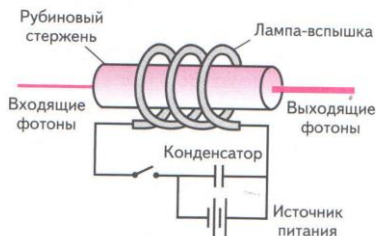
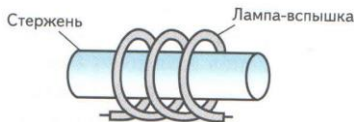


**РЧ-разряд в газе**



# Основные типы накачки

## Оптическая накачка

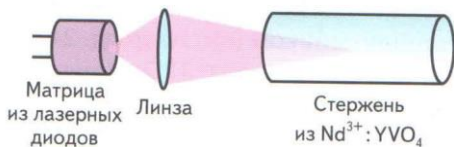


**Криптоновые лампы-вспышки** (*импульсные*)  
**Ксеноновые дуговые лампы** (*непрерывные*)

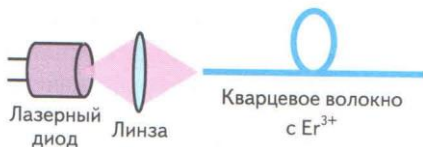
Геометрия накачки первого лазерного генератора на рубине

Геометрия накачки в современных лазерных **квантронах** с использованием прямолинейной лампы-вспышки и эллиптического отражателя

# Основные типы накачки



Оптическая [продольная] накачка твердотельного лазера с помощью *лазерных диодов* (диодная накачка, end-pump geometry, DPSS-lasers...)



Накачка усилителя из кварцевого волокна с  $\text{Er}^{3+}$