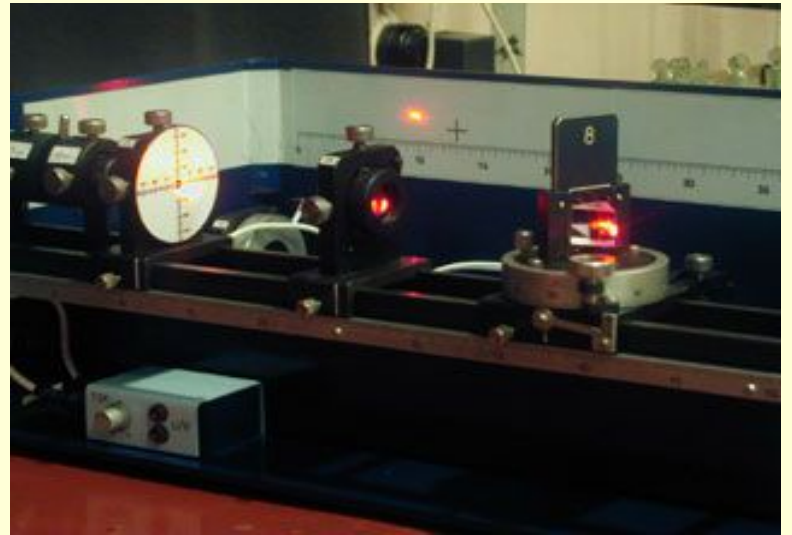


Оптика и квантовая физика

для студентов
2 курса ФТФ и ГГФ

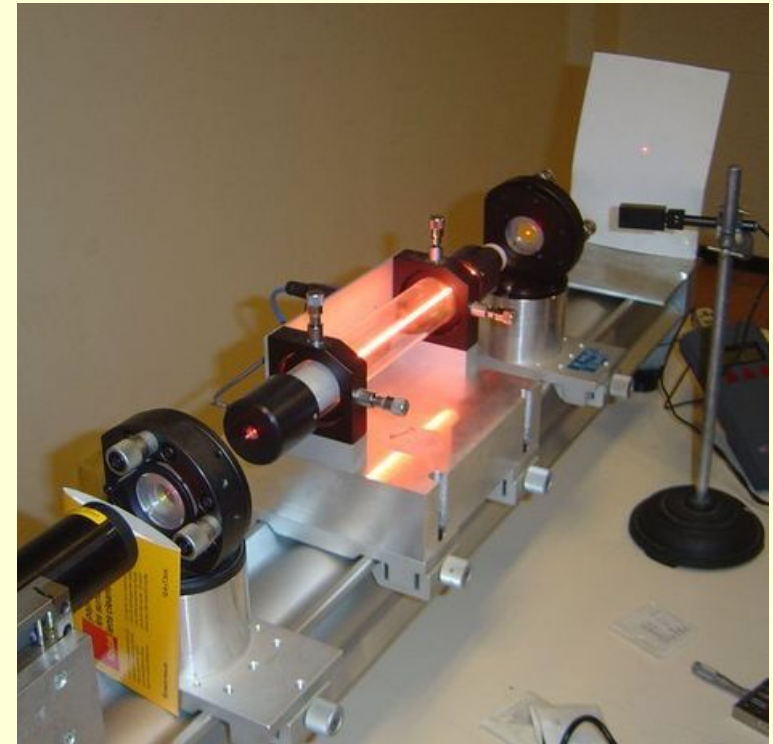


Кафедра общей физики



Оптические квантовые генераторы

- ✓ **Типы квантовых переходов.
Инверсное заселение уровней
активной среды**
- ✓ **Основные компоненты лазера.
Условие усиления и генерации
света**
- ✓ **Особенности лазерного
излучения**
- ✓ **Основные типы лазеров и их
применение**
- ✓ **Примеры нелинейных явлений
в оптике**



Излучение ансамбля атомных осцилляторов

Свойства излучения, даваемого нелазерным источником:

1. Малая мощность излучения ($I = NI_i$);
2. Очень широкая диаграмма направленности излучения (атом излучает сферическую волну);
3. Отсутствие поляризации (естественный свет);
4. Сильные временные флуктуации волнового поля;
5. Немонохроматичность излучения.



Физика лазерного излучения



Фундаментальные идеи, лежащие в основе работы оптического квантового генератора (ОКГ):

1. Использование вынужденного испускания света атомами.
2. Создание термодинамически неравновесных систем, в которых возможно усиление, а не поглощение света.
3. Использование положительной обратной связи для превращения усиливающей системы в генератор излучения.

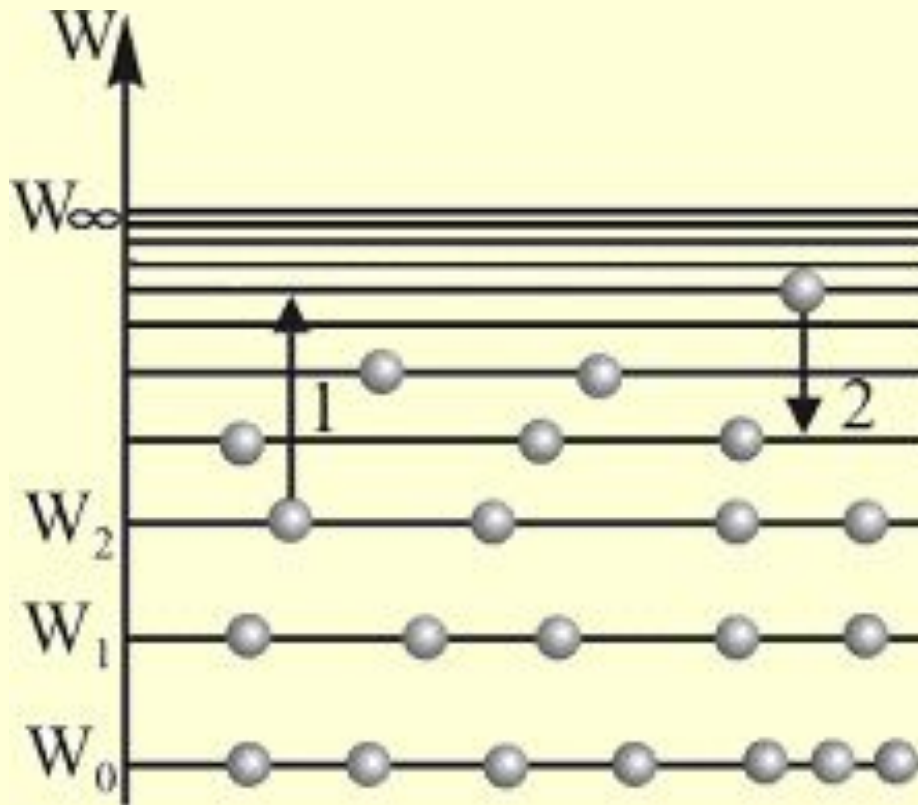
Внутренняя энергия атома
может принимать только определённые значения:

$$W_0, W_1, W_2, \dots$$

$$h\nu_{mn} = W_m - W_n$$

- порция (квант) атомной энергии





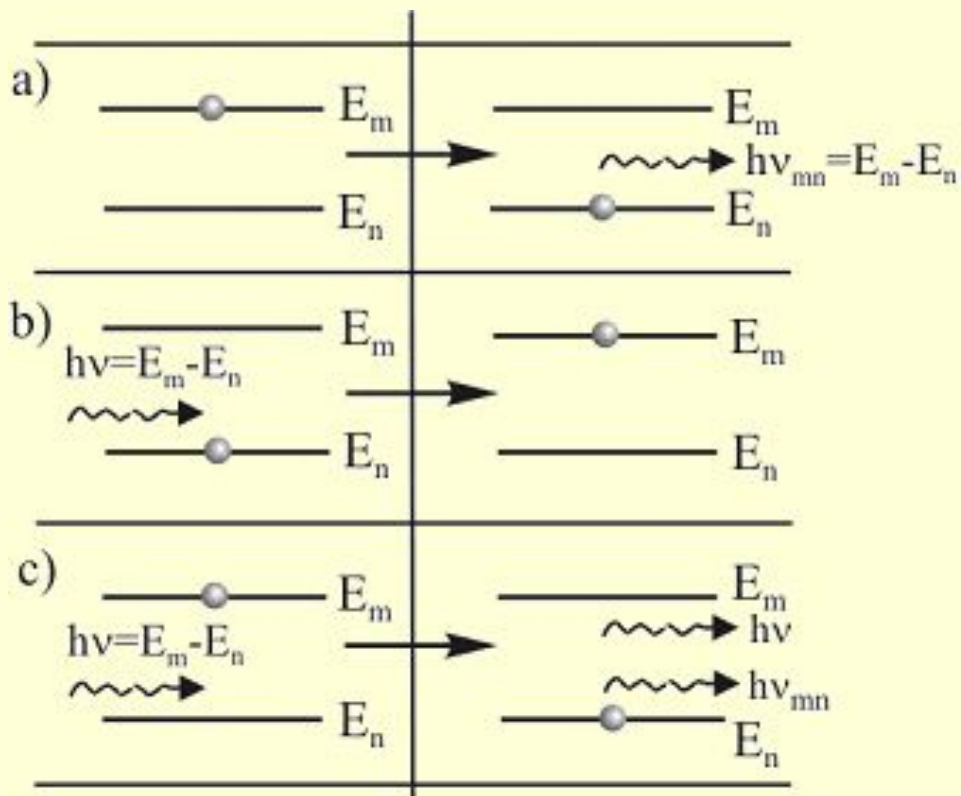
W_i - энергия атома, находящегося на произвольном энергетическом уровне; N_i - населённость i -го энергетического уровня.

В состоянии термодинамического равновесия распределение атомов по энергетическим уровням описывается **законом Больцмана**:

$$N_i = N_0 e^{-\frac{W_i}{kT}}$$



Квантовые процессы при взаимодействии излучения с веществом



- спонтанное излучение

- поглощение излучения

- вынужденное излучение

Квантовые процессы при взаимодействии излучения с веществом

а) Спонтанное излучение:

- время жизни в возбуждённом состоянии $\tau \sim 10^{-8}$ с.
- без внешнего воздействия происходит переход атома в состояние с меньшей энергией
- излучается фотон $h\nu_{mn} = E_m - E_n$

б) Поглощение излучения:

- поглощённая атомами вещества энергия ($W_{\text{пог}}$) пропорциональна населённости нижнего уровня N_n и интенсивности первичного пучка соответствующей частоты

$$W_{\text{пог}} \sim N_n I.$$

в) Вынужденное излучение:

- энергия, излучаемая при вынужденных переходах $W_{\text{изл}}$, пропорциональна квадрату населённости верхнего уровня N_m^2 и интенсивности первичного излучения:
- инверсия населённостей (превышение населённости верхнего уровня (N_m) над населённостью нижнего уровня (N_n))

$$W_{\text{изл}} \sim N_m^2 I.$$



Квантовые процессы при взаимодействии излучения с веществом



Вещество, в котором создана инверсия уровней, называется *активным*



Способы создания инверсии населённостей:

- освещение светом
- пропускание электрического тока
- химические реакции и т.д.

Процесс, приводящий к инверсии атомных уровней, называется **накачкой**

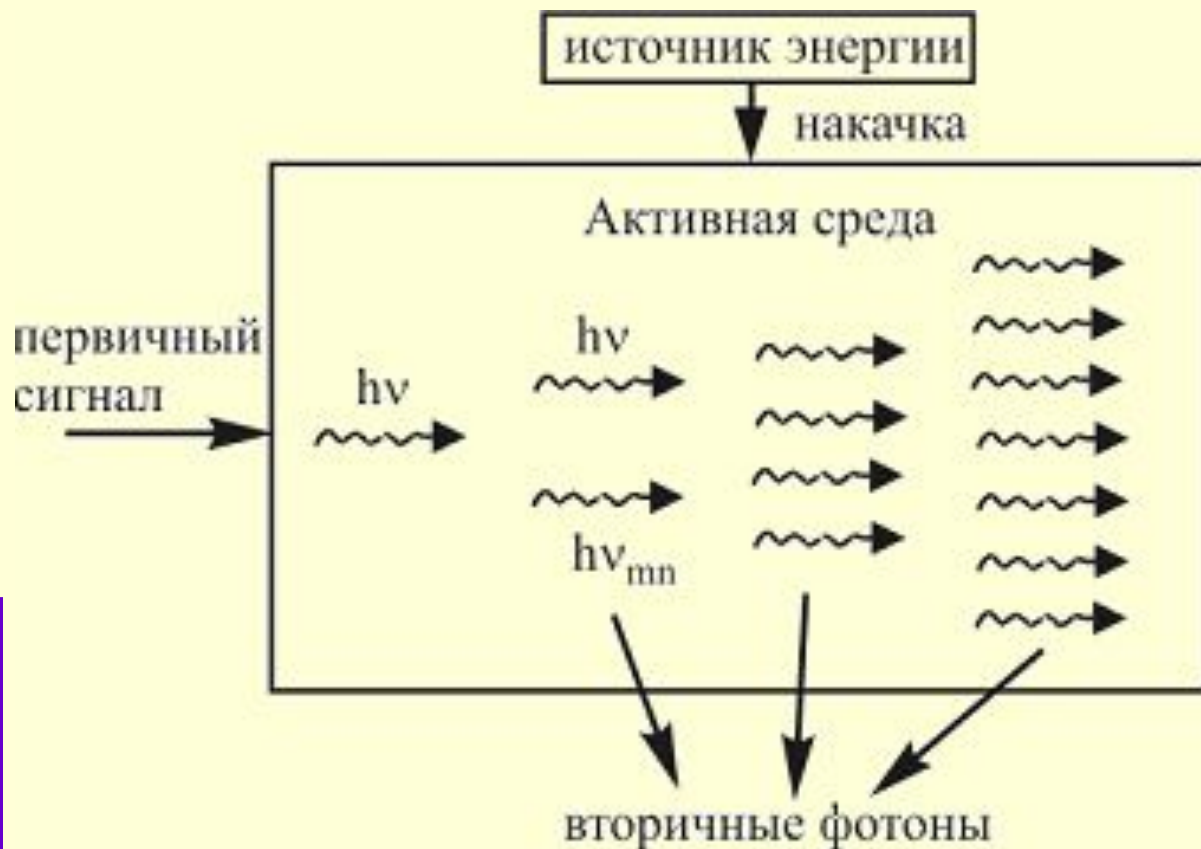


Схема ОКГ



Принцип положительной обратной связи: сигнал, пройдя активную среду, обратно возвращается в неё

Система зеркал называется **резонатором**

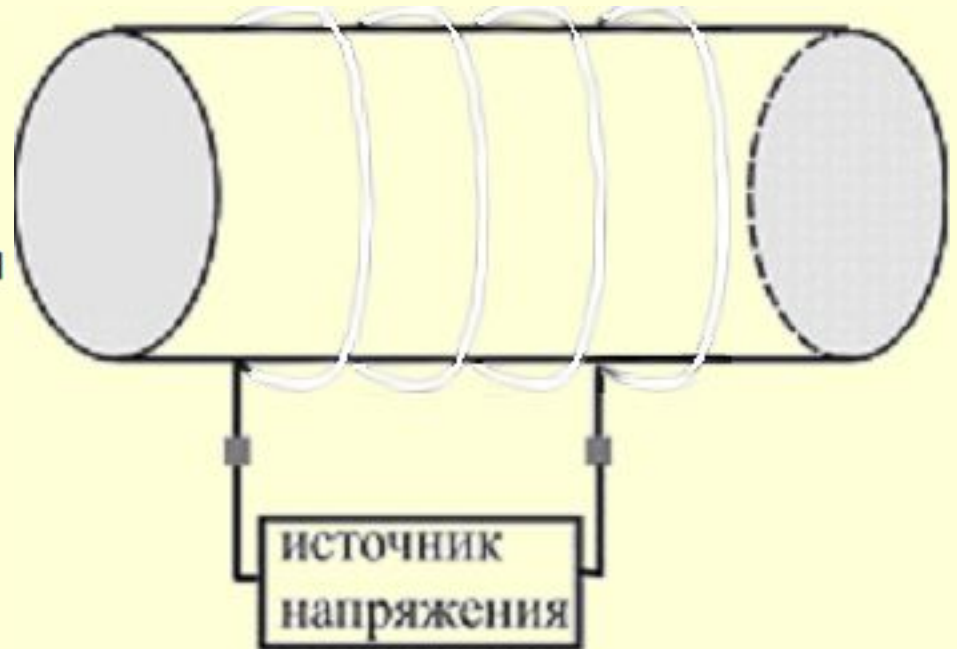
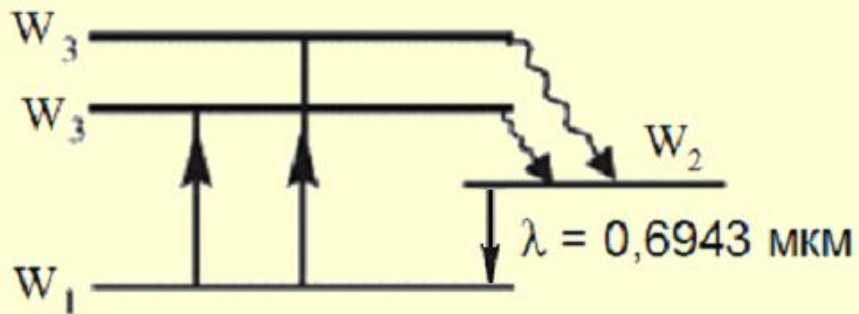


Условие баланса фаз: $2L = m\lambda$,
где L - расстояние между зеркалами, $m = 1, 2, 3, \dots$

Устройство твёрдотельного рубинового лазера



Активная среда – кристалл рубина (Al_2O_3), в некоторых узлах решётки которого алюминий замещён ионом хрома (Cr^{3+}).
Время жизни энергетических уровней W_2 ионов Cr : $\tau \sim 10^{-3}\text{с}$.
Возбуждённые уровни с большим временем жизни называются *метастабильными*. На этих уровнях создаётся *инверсия населённостей* ($N_2 > N_1$).



Мощность рубинового лазера достигает 10^7 Вт

Свойства лазерного излучения:



- ✓ Большая мощность
- ✓ Когерентность
- ✓ Направленность
- ✓ Высокая степень монохроматичности
- ✓ Поляризованность



Основные типы лазеров

Газовые

Гелий-неоновый
длина волны 633
нм



Углекислотный
длина волны 9.4 – 10.6 мкм



Аргоновый
от 351.1 до 1092.3 нм

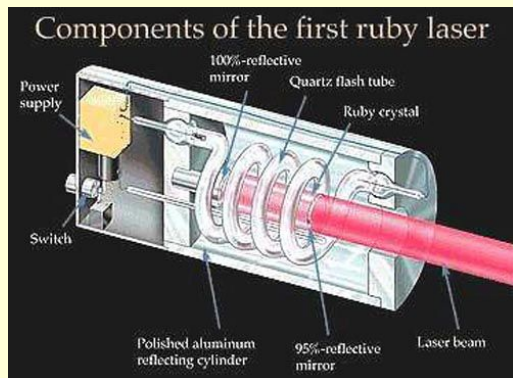


Эксимерный
длина волны 172 нм

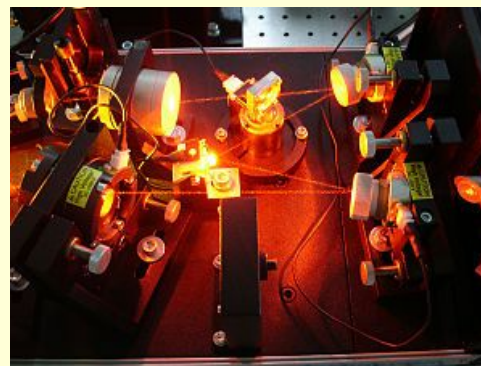


Основные типы лазеров

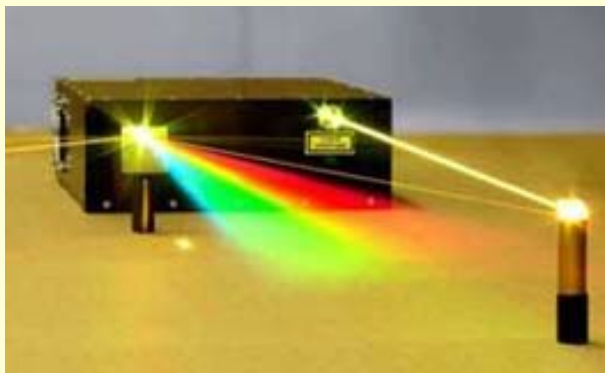
Рубиновый



Лазер на красителях



Волоконный



- лазеры на парах металлов
- на полупроводниках.

Применение лазеров

- в медицине:
 - ✓ для проведения операций и лечебных процедур
 - ✓ в офтальмологии
 - ✓ для устранения недостатков косметологического свойства.
- в промышленности:
 - ✓ для разделения, для скрепления или сварки, гравировки и теснения
 - ✓ для производства принтеров
 - ✓ для производства сканеров, в частности, для сканеров штрих-кодов в магазинах
 - ✓ производстве микроэлектронных устройств, например, полупроводников и микросхем

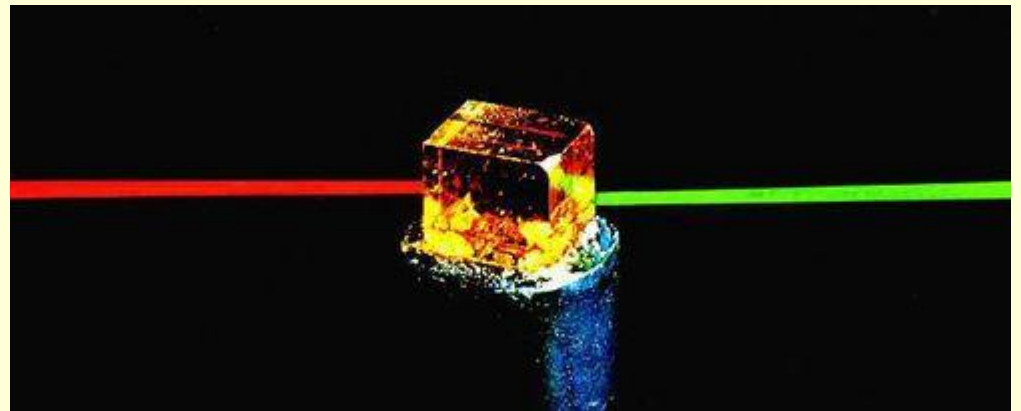


- голографии
- телекоммуникации,
- спектроскопии
- астрономии
- лазерных свето-шоу
- и т.д. и т.п.



Нелинейная оптика

- ✓ **Оптическое детектирование и генерация высших гармоник**
- ✓ **Самофокусировка пучка**
- ✓ **Многофотонное поглощение**



Напряжённость внутриатомного поля

$$E_a \cong e/a^2 \cong 10^6 - 10^9 \text{ В/см}$$

e — заряд электрона, a — атомный радиус

Линейная оптика

$$E \cong 1 - 10 \text{ В/см}$$

$$E \ll E_a$$

$$D = \varepsilon_0 \cdot E + P = \varepsilon_0 \cdot E(1 + \chi) = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E, \text{ где } \varepsilon = 1 + \chi$$

$$P = \varepsilon_0 \cdot \chi \cdot E$$

ε, n не зависят от I

Нелинейная оптика

$$E \sim 10^8 - 10^9 \text{ В/см}$$

$$(E/E_a) < 1$$



P — поляризованность,
 χ — диэлектрическая восприимчивость,
 χ_2 — нелинейная восприимчивость

$$P = \varepsilon_0(\chi E + \chi_2 E^2 + \chi_3 E^3 + \dots)$$

$\varepsilon, n \neq \text{const}$, зависят от I

Оптические явления, обусловленные нелинейной зависимостью P и D от E и возникающие при достаточно больших интенсивностях света, называются **нелинейными**

Причины нелинейных оптических эффектов

- **Нелинейный отклик атомного осциллятора на сильное световое поле (генерация высших гармоник)**
- **Изменение показателя преломления n , вызванное нагревом среды лазерным излучением**

$$\Delta n = n_0 + \frac{\partial n}{\partial T}$$

- **Эффект электрострикции (сжатие среды в световом поле E). В сильном световом поле E лазера электрострикционное давление, пропорциональное E^2 , изменяет плотность среды, что может привести к генерации звуковых волн.**

Оптическое детектирование и генерация высших гармоник

$$P = \varepsilon_0 \chi E + \varepsilon_0 \chi_2 E^2$$

В среде распространяется волна

$$E = E_0 \cdot \sin(\omega \cdot t - k_1 \cdot x) = E_0 \cdot \sin(\omega \cdot t - (\omega/v) \cdot x)$$

Уравнение волны поляризации:

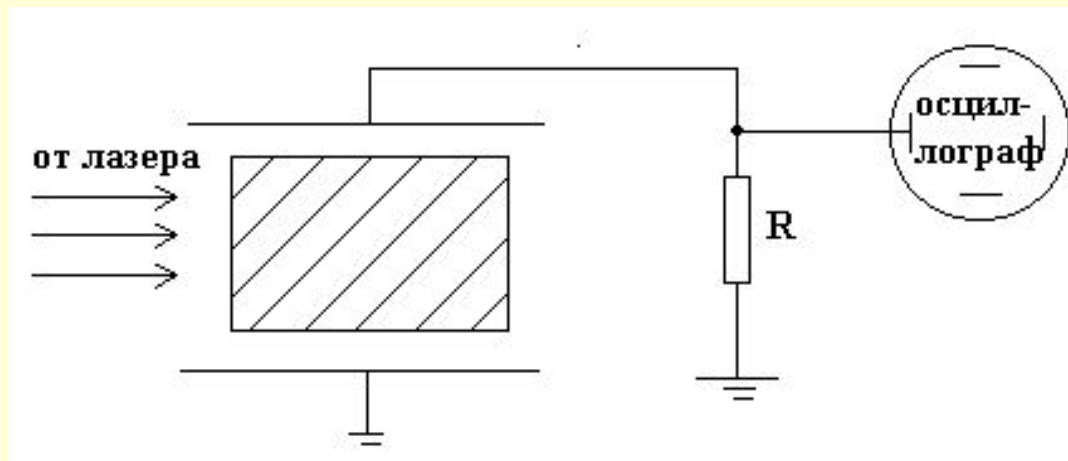
$$P = \varepsilon_0 \chi E_0 \sin(\omega \cdot t - k_1 \cdot x) + \varepsilon_0 \chi_2 E_0^2 \sin^2(\omega \cdot t - k_1 \cdot x) = \\ = \varepsilon_0 \cdot \chi \cdot E_0 \cdot \sin(\omega \cdot t - k_1 \cdot x) + 1/2 \varepsilon_0 \chi_2 E_0^2 - 1/2 E_0^2 \varepsilon_0 \chi_2 \cos(2\omega \cdot t - 2k_1 \cdot x)$$



$$P_2 = 1/2 \varepsilon_0 \chi_2 E_0^2$$

- не зависящая от t компонента поляризации среды,
создающая постоянное электрическое поле

Экспериментальное наблюдение оптического детектирования



1962 г.

Кристалл кварца расположен между обкладками электрического конденсатора. Свет от лазера вызывает импульс электрического тока в цепи конденсатора, что свидетельствует о детектировании электрического поля.

Генерация высших гармоник

$$P = \varepsilon_0 \cdot \chi \cdot E_0 \cdot \sin(\omega \cdot t - k_1 \cdot x) + 1/2 \varepsilon_0 \chi_2 E_0^2 - 1/2 E_0^2 \varepsilon_0 \chi_2 \cos(2\omega \cdot t - 2k_1 \cdot x)$$

$$P(2\omega) = 1/2 E_0^2 \varepsilon_0 \chi_2 \cos(2\omega \cdot t - 2k_1 \cdot x) = \\ = 1/2 E_0^2 \varepsilon_0 \chi_2 \cos(2\omega \cdot t - (2\omega/v) \cdot x)$$

Поляризованный диполь станет источником излучения электромагнитной волны с частотой 2ω - генерация второй гармоники:

$$E(2\omega) = E_0' \cos(2\omega \cdot t - 2(\omega/v) \cdot x)$$

Генерация 3-й гармоники, а также зависимость $n(\mathbf{I})$ описываются членом $\chi_3 E^3$ и т.д.

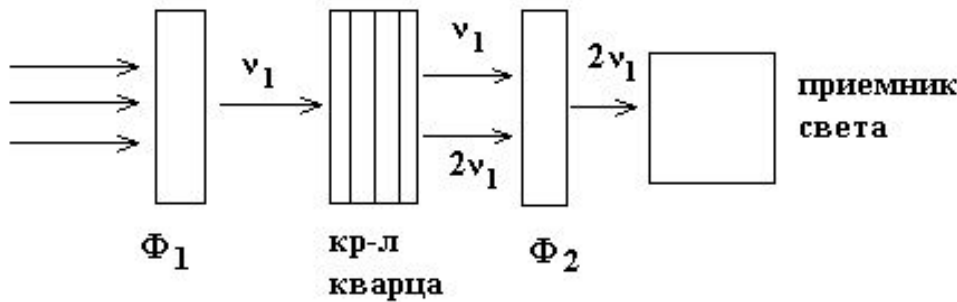
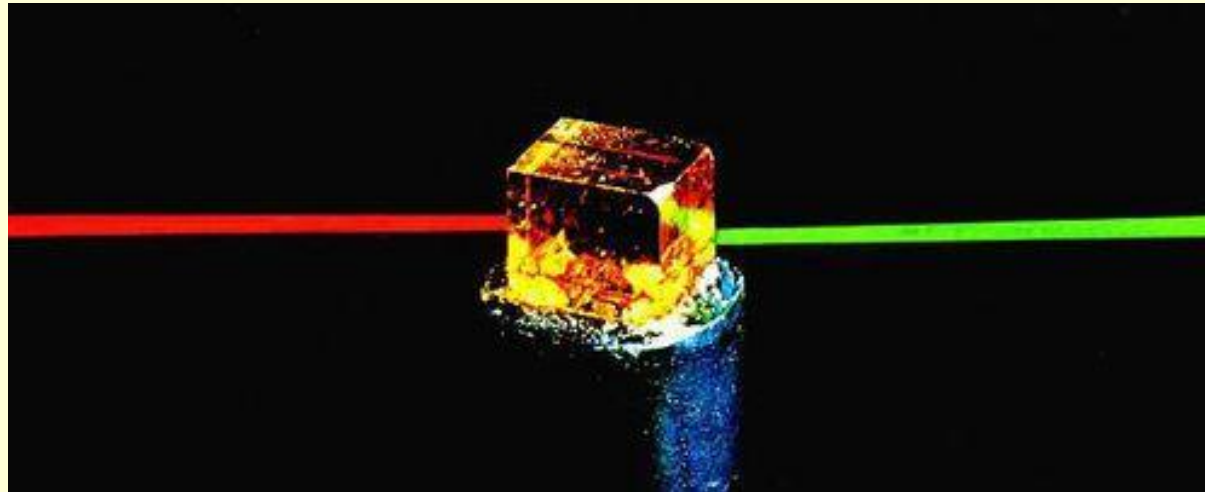


Схема наблюдения
(1961 г., Франкен)

Фильтр Φ_1 пропускает излучение ν_1 , а Φ_2 - $2\nu_1$

Генерация высших гармоник

Удвоение частоты света
в кристалле ниобата натрия $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$



Мощный луч лазера на неодимовом стекле с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм возбуждает в кристалле излучение удвоенной частоты (вторую гармонику, $\lambda = 0,53$ мкм). Зелёный цвет — натуральный цвет излучения второй гармоники; невидимое глазом инфракрасное излучение неодимового лазера регистрируется на специально сенсibilизированной цветной пленке как красное

Условие фазового синхронизма



$I(2\omega) = \max$, если волны частоты 2ω , излучаемые разными элементами поляризующей среды, будут синфазными

Волна, излучаемая элементом x_1 :

$$\tau = \frac{x_2 - x_1}{v(\omega)}$$

Волна, излучаемая элементом x_2 :

$$E_1^{(2\omega)}(t) = E_0' \sin\left(2\omega \cdot t - \frac{2\omega}{v(2\omega)} \cdot (x - x_1) - \varphi\right)$$

$$E_2^{(2\omega)}(t) = E_0' \sin\left(2\omega \cdot (t - \tau) - \frac{2\omega}{v(2\omega)} \cdot (x - x_2) - \varphi\right)$$

$$\Phi_1 = \Phi_2$$



$$-\frac{2\omega}{v(2\omega)} x_1 = \frac{2\omega(x_2 - x_1)}{v(\omega)} - \frac{2\omega x_2}{v(2\omega)}$$



$$\frac{x_2 - x_1}{v(2\omega)} = \frac{x_2 - x_1}{v(\omega)}$$



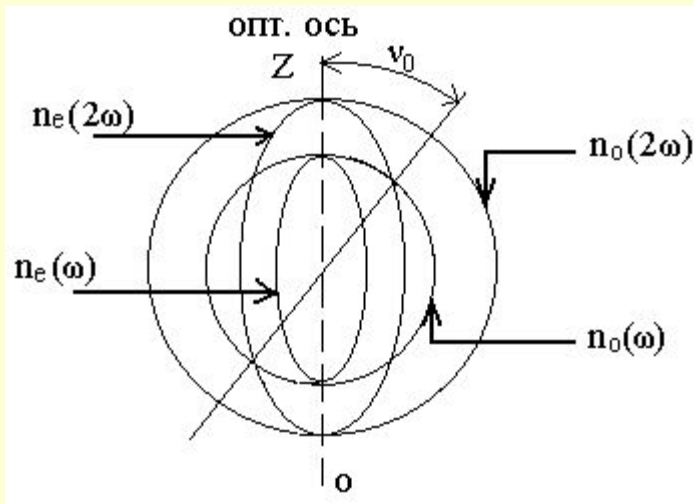
$$v(2\omega) = v(\omega)$$

Но!

В средах с нормальной дисперсией n растет с ростом $\omega \rightarrow v(2\omega) < v(\omega)$



Обеспечение условия волнового синхронизма



Сечения поверхности показателей преломления обыкновенной (o) и необыкновенной (e) волн в двупреломляющем одноосном кристалле дигидрофосфата калия KH_2PO_4 (KDP). OZ – оптическая ось кристалла.

Под углом v_0 к оптической оси $n_e(2\omega) = n_o(\omega) \longrightarrow u_e(2\omega) = v_o(\omega)$

v_0 – направление волнового синхронизма

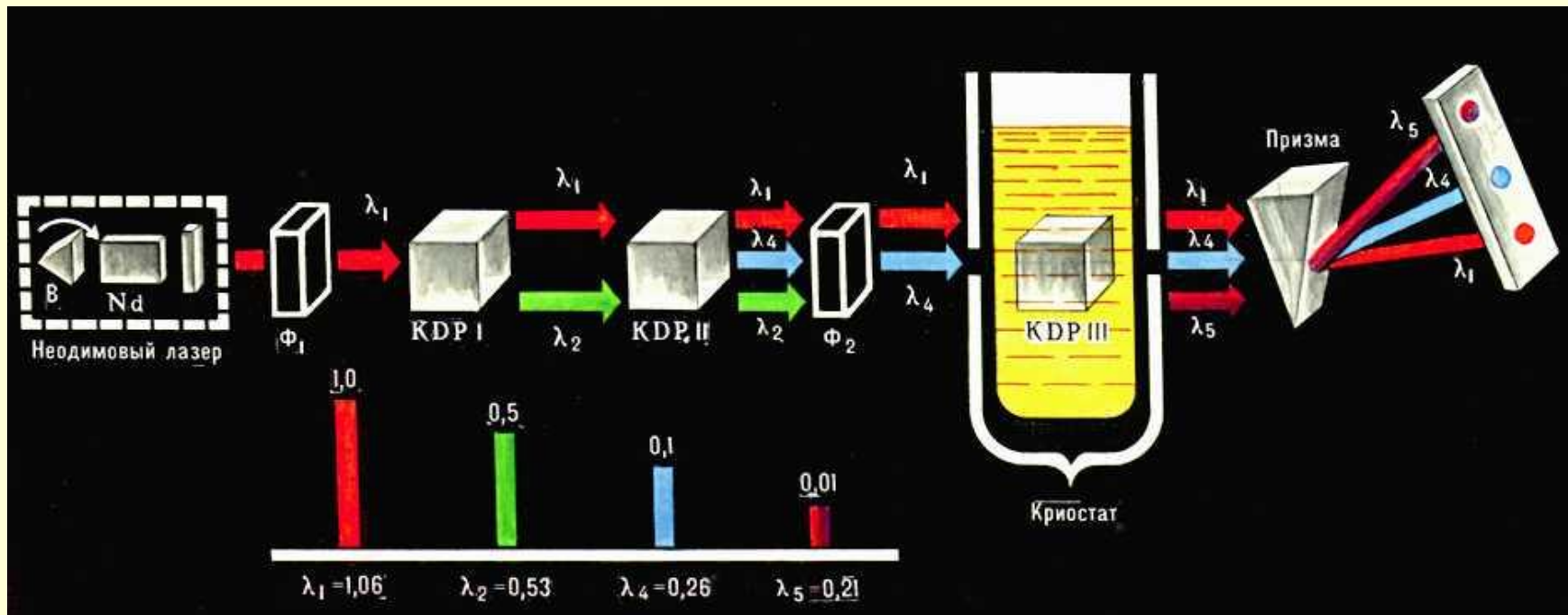
Условие синхронизма $u(\omega) = u(3\omega)$ выполняется в

$CaCO_3$

Применение:

оптические удвоители и умножители частоты
(кпд $\sim 0,8$; 1961г. — кпд $\sim 10^{-10}$ — 10^{-12})

Схема генератора пятой оптической гармоники

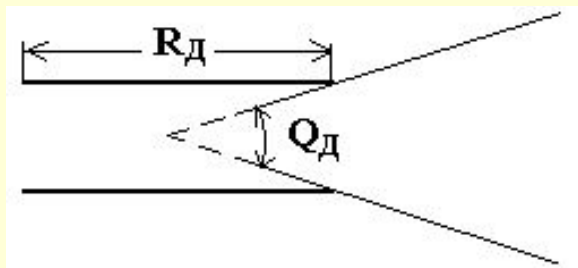


Излучение лазера на неодимовом стекле ($\lambda_1 = 1,06$ мкм), возбуждает цепочку из трёх нелинейных кристаллов KDP (дигидрофосфат калия - KH_2PO_4), в которых последовательно происходят: удвоение частоты (на выходе кристалла KDP I — излучение с $\lambda_2 = 0,53$ мкм), ещё одно удвоение частоты (на выходе KDP II — излучение с $\lambda_4 = 0,26$ мкм), сложение частот неодимового лазера и четвёртой гармоники. На выходе кристалла KDP III возникает интенсивное УФ излучение с $\lambda_5 = \lambda_1/5 = 0,21$ мкм. Цвета на рисунке условные, четвёртая и пятая гармоники лежат в ультрафиолетовой области. Φ_1 и Φ_2 — фильтры; В — вращающаяся призма.



Самофокусировка пучка

При малых I



$$Q_d = \frac{1,22\lambda}{2an_0}$$

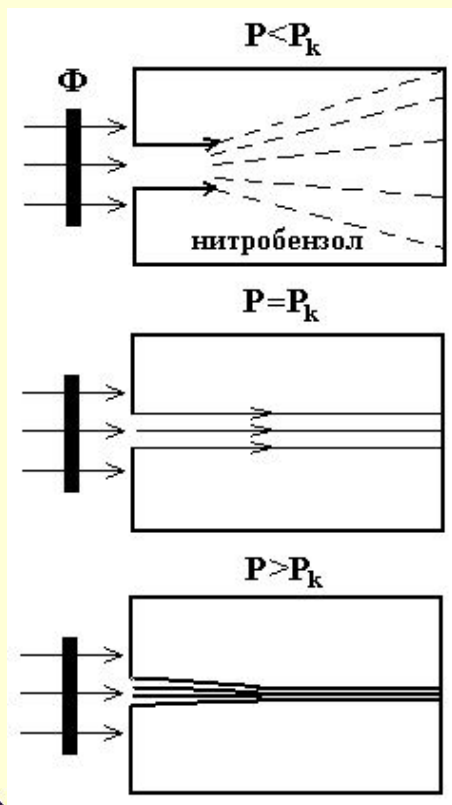
$$R_d = \frac{ka^2}{2}$$

– угловая дифракционная расходимость

n_0 – показатель преломления,
 a – радиус пучка,

– дифракционная длина, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

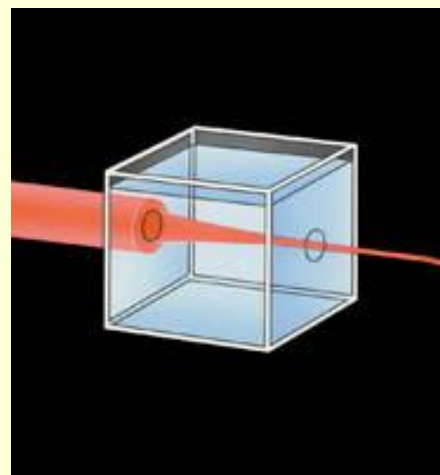
При больших I



$$Q_d < Q_{\text{теор}}$$

$Q_d = 0,$
 P_k – критическая
МОЩНОСТЬ

самофокусировка



$P_k = 10 - 50$ кВт – для ряда органических жидкостей.
 $P_k \leq 10$ Вт – в некоторых кристаллах и оптических стеклах.

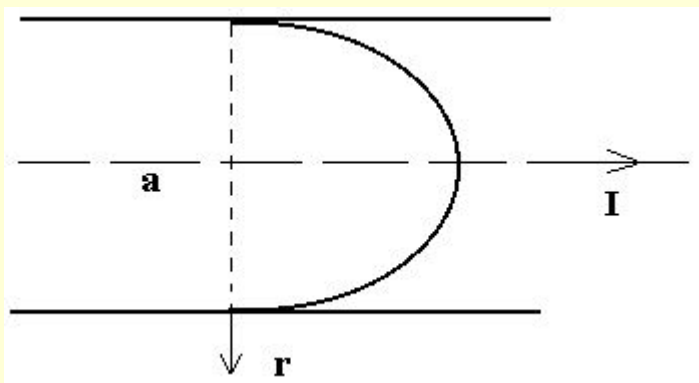


Самофокусировка пучка

Одна из причин – в нелинейной среде $n = f(I)$:

$$n = n_0 + n_2 E^2$$

$$n_2 > 0$$

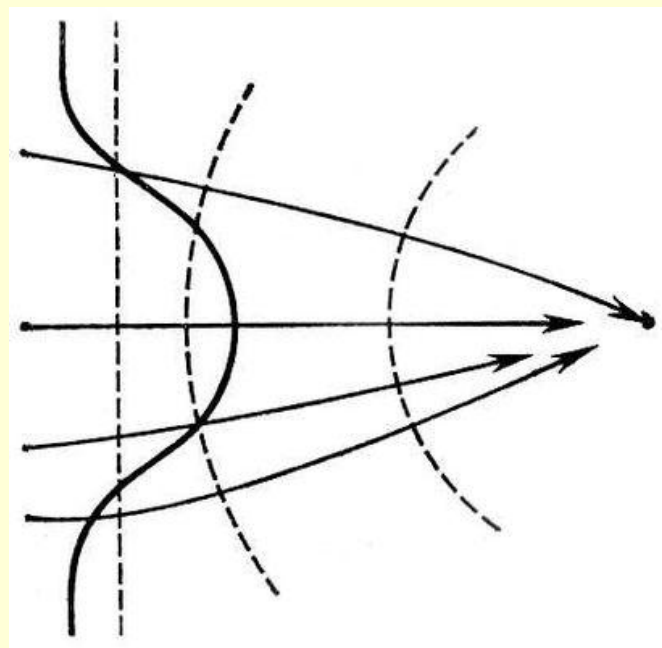


Интенсивность ограниченного светового пучка больше на оси и падает к краям. Часто – по параболическому закону

$$v_{\text{фаз}} = c/n = c/(n_0 + n_2 E^2)$$



фазовые фронты изгибаются



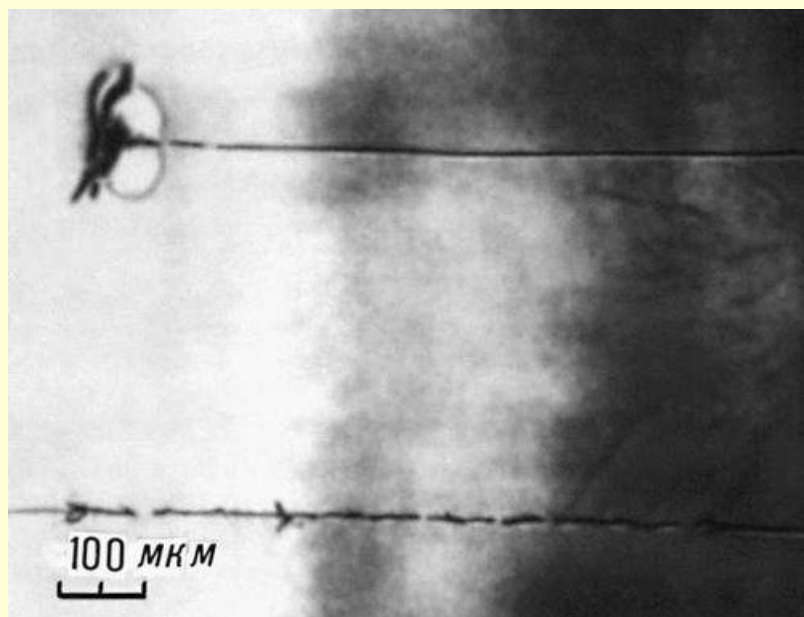
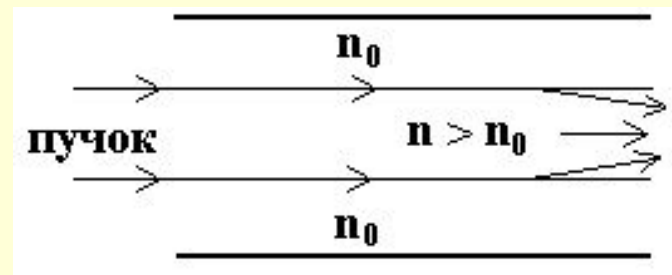
Пунктир – поверхности постоянной фазы; сплошная линия – распределение интенсивности света



Самофокусировка пучка

$n = f(I)$ \longrightarrow возникает оптическая неоднородность среды

На границе $n \neq n_0$ – явление полного внутреннего отражения



Нитевидные разрушения оптического стекла в поле мощного лазера. Тонкая нить — след самофокусированного светового пучка.

В опыте изменение показателя преломления среды происходит за счёт нагрева стекла лазерным излучением

Вывод: самофокусировка света – самопроизвольная фокусировка мощного лазерного пучка при распространении в среде из-за нелинейной зависимости коэффициента преломления среды от напряженности поля световой волны.

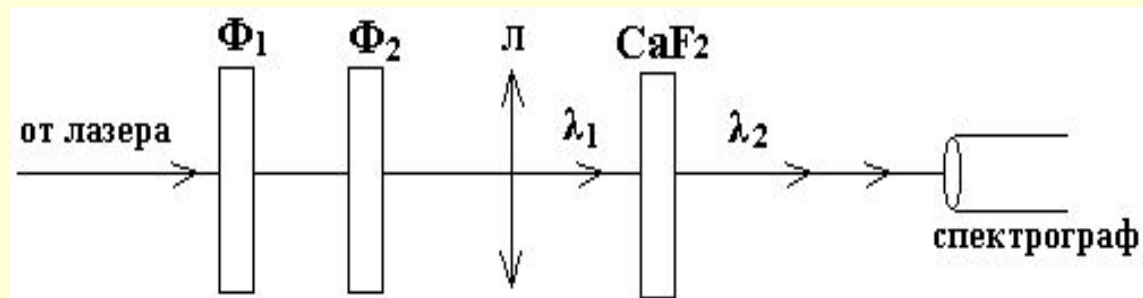
Многофотонное поглощение

$$h\nu = E_n - E_1$$

при малых I в каждом элементарном акте поглощается один фотон.

$$N h\nu = E_n - E_1$$

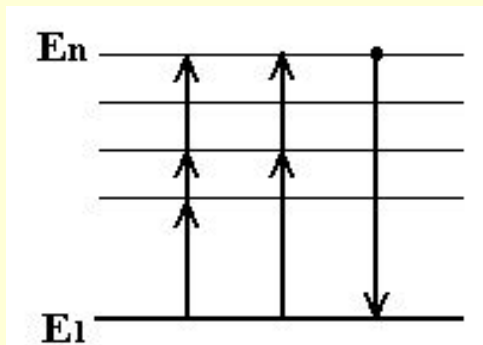
при больших I возможно многофотонное поглощение



CaF_2 – кристалл, активированный ионами европия

Eu^{++} ,

$$\lambda_1 = 6943 \text{ \AA}, \lambda_2 = 4250 \text{ \AA}.$$



Многофотонное поглощение приводит:

- к появлению добавочных линий испускания и поглощения,
- смещению красной границы фотоэффекта в сторону больших λ .

Применение нелинейных эффектов

Параметрические генераторы света – перестраиваемые, стабильные, легко управляемые источники когерентного излучения, основным элементом которых является нелинейный кристалл, в котором мощная световая волна фиксированной частоты параметрически возбуждает световые волны меньшей частоты.

Уникальные характеристики П. г. с. (когерентность излучения, узость спектральных линий, высокая мощность, плавная перестройка частоты) превращают его в один из основных приборов для спектроскопических исследований (активная спектроскопия и др.), а также позволяют использовать его для избирательного воздействия на вещество, в частности на биологические объекты.



Нелинейный кристалл, помещенный в оптический резонатор; Z_1 и Z_2 – зеркала, образующие резонатор.

Изменяя направление распространения накачки относительно оптической оси (поворачивая кристалл), можно плавно перестраивать частоту П. г. с.

Применение нелинейных эффектов

Корреляционные спектрографы и спектрографы с пространственным разложением спектра

Спектральный анализ сопровождается увеличением частоты света (выгодно при исследованиях в инфракрасной области) и усилением сигнала

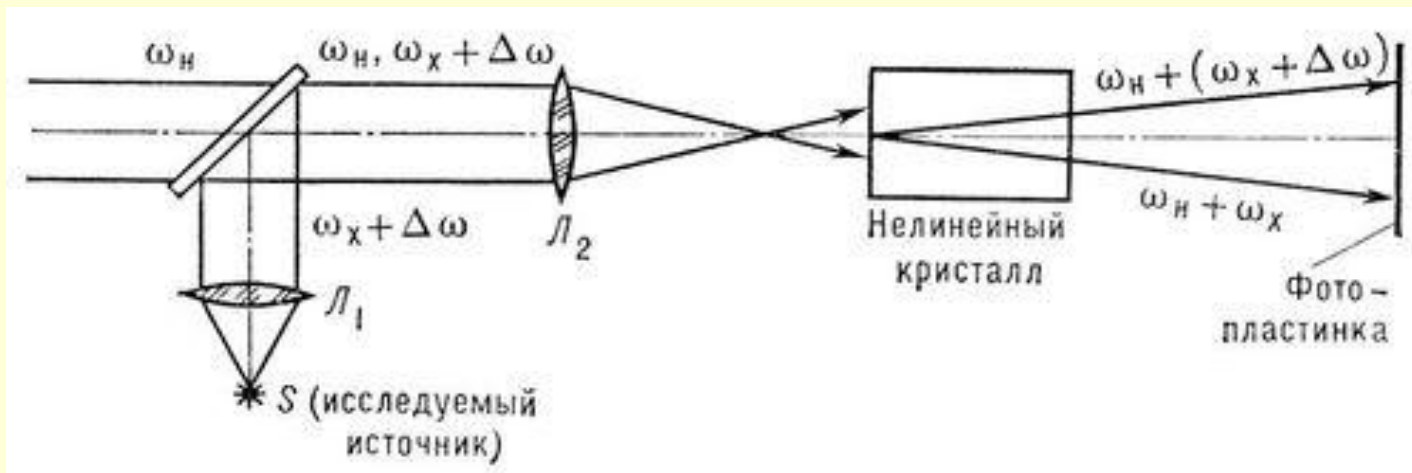


Схема нелинейного спектрографа с пространственным разложением спектра. Частоты спектральных линий исследуемого источника ω_x складываются в нелинейном кристалле с частотой вспомогательного источника (генератора «накачки») ω_H . На выходе кристалла интенсивное излучение суммарной частоты $\omega_H + \omega_x$ может наблюдаться только внутри весьма узкого угла, для которого выполняется условие волнового синхронизма.

Применение нелинейных эффектов

Преобразование сигналов и изображений

За счет эффекта сложения частот — регистрация слабых сигналов в инфракрасном диапазоне и перевод в видимый диапазон. В видимом же диапазоне регистрация сигнала производится с помощью высокочувствительного *фотоэлектронного умножителя* (ФЭУ). Система из нелинейного кристалла, в котором происходит сложение частот и ФЭУ, является чувствительным приёмником инфракрасного излучения; такие приёмники находят применение в инфракрасной астрономии.



