

# Нелинейные явления в оптике

## Тема 12 лекция 25

Причины нелинейной поляризованности среды. Квадратичная нелинейная восприимчивость более высоких порядков. Генерация оптических гармоник. Условия пространственного синхронизма для удвоения частоты.

Самовоздействие света в нелинейной среде. Основные причины возникновения нелинейности показателя преломления. Самофокусировка и самодефокусировка. Длина самофокусировки. Многофотонное поглощение света. Многофотонный фотоэффект. Параметрические эффекты.

При использовании не лазерных источников света поляризация вещества связана с напряженностью электрического поля простым соотношением

или

где  $\epsilon$  – диэлектрическая восприимчивость

диэлектрическая проницаемость

Нелинейные оптические явления наблюдаются тем отчетливее, чем больше напряженность электрического поля волны, которая в сфокусированном пучке лазера может достигать  $10^6 - 10^8$  В/см и стать сравнимой с внутренними полями в среде ( $10^8 - 10^9$  В/см).

Максимально допустимы смещения порядка размеров атома  $a$ . При гармонический закон колебаний нарушается и в возвращающей силе появляются составляющие, пропорциональные квадрату смещения и его более высоким степеням. В этом случае говорят об **ангармонизме** колебаний и о **непараболичности** закона для потенциальной энергии смещения.

Электрическое поле действует на заряд с силой  $\vec{F} = q\vec{E}$ . Под действием поля заряды (электроны и ионы) в веществе смещаются от положения равновесия на некоторое расстояние  $\vec{r}$ , тем большее, чем больше напряженность поля. Поляризованность равна :

$$(\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E})$$

Если поле не сильное, то вектор  $\vec{P}$  можно разложить по степеням составляющих вектора  $\vec{E}$ . в общем случае для анизотропной среды это разложение имеет вид:

$$(12.1.1)$$

где в соответствии с общепринятой тензорной символикой по дважды повторяющимся индексам ведется суммирование. Индексы  $i, k, e, m, \dots$  принимают последовательно значения  $x, y, z$ .

тензор обычной или линейной поляризуемости

тензоры высших порядков, называются квадратичной, кубической и т.д. поляризуемостями. Они определяют нелинейную поляризованность среды

Для качественного рассмотрения возможных нелинейных эффектов и упрощения математических расчетов выражение (12.1.1) достаточно записать в скалярном виде

- скалярные величины, зависящие от частоты излучения

$$E = E_0 \cos(kz - \omega t) \left[ \cos(\omega t) + \frac{1}{2} \cos(2\omega t) \right]$$

**Первый** член представляет собой волну поляризованности, колеблющуюся на частоте падающей волны.

**Второй** член не зависит от времени. С ним связано **оптическое детектирование**, т.е. возникновение в нелинейной среде постоянной поляризованности при прохождении через нее мощной световой волны. Это явление аналогично выпрямлению синусоидального электрического тока.

**Третий** член формулы (12.1.2) гармонически изменяется со временем и характеризует волну поляризованности с удвоенной частотой (**вторая гармоника**) и новым волновым числом, которое, вообще говоря, не равно, как это было бы в том случае, если бы фазовая скорость и волновые числа. Вследствие этого при прохождении волнами с частотами и некоторого расстояния между ними возникает разность фаз

разность фаз ( ) нарушает *волновой синхронизм*

Чтобы , необходимо , *условие волнового синхронизма*

Это соответствует максимальной интенсивности второй гармоники, генерируемой в нелинейной среде при заданной мощности исходного излучения.

Мощность второй гармоники приближенно описывается формулой:

$$P_2 = P_1 \left( \frac{L}{L_c} \right)^2 \sin^2 \left( \frac{\Delta k L}{2} \right)$$

- мощность излучения исходной волны; - длина волны второй гармоники;
- показатель преломления среды для волны с удвоенной частотой;
- показатель преломления среды для волны с частотой

Точки, в которых мощность , можно найти, приравняв кратному числу ( ) ( ) , где - целое число. Отсюда расстояние между точками и , в которых , равно ( ) *когерентная длина*

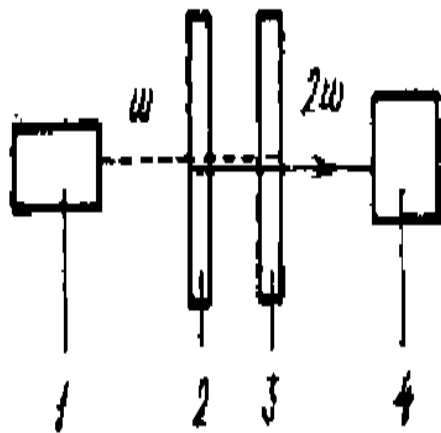


рис.12.1.1

Сфокусированное излучение рубинового лазера 1 направляется на тонкую кристаллическую пластинку 2. Из пластинки, помимо исходного красного излучения лазера ( $\lambda=0,6943$  мкм), выходит также ультрафиолетовое излучение ( $\lambda=0,3472$  мкм). Это излучение отделяется от исходного светофильтрами 3 и регистрируется приемником излучения

Для более интенсивного обмена энергией необходимо удовлетворить условию волнового синхронизма

$$k_0(\omega) = k_0(2\omega) + k_1(\omega)$$

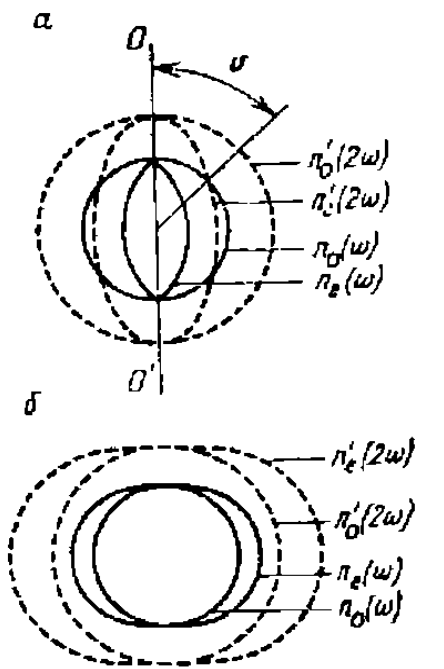


рис.12.1.2

волновой синхронизм можно осуществить между обыкновенной и необыкновенной волнами в некоторых кристаллах. Сечения поверхностей показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волн в одноосном кристалле представлены на рис.12.1.2 Сплошные кривые относятся к частоте  $\omega$ , пунктирные – к удвоенной частоте  $2\omega$ .

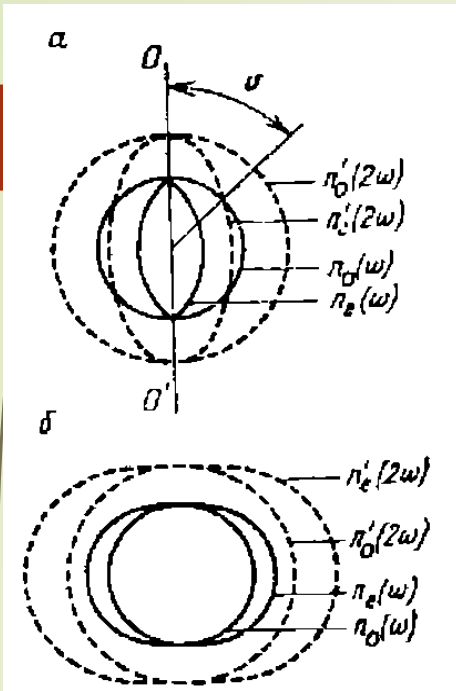


рис.12.1.2

На рис. 12.1.2, а кривые  $n_o'(2\omega)$  и  $n_e'(2\omega)$  пересекаются между собой.

Точкам их пересечения соответствуют направления, для которых между обыкновенной волной с частотой  $\omega$  и ее гармоникой с частотой  $2\omega$  выполняется условие волнового синхронизма. Эти направления называются **направлениями синхронизма**, а угол между ними и оптической осью кристалла – **углом синхронизма**.

$(n_o(\omega) \cos \theta)^2 = n_o^2(2\omega)$ ,  $(n_e(\omega) \cos \theta)^2 = n_e^2(2\omega)$ ,  
т.е. имеет место нормальная дисперсия

Если показатель преломления кристалла модулировать переменным полем с частотой  $\omega$ , то световая волна с частотой  $\omega$ , проходя через кристалл, будет модулироваться по фазе, что приведет к появлению боковых компонент на комбинационных частотах – суммарной и разностной. Таким образом, с помощью модуляции параметров кристалла можно получить излучение на различных частотах. Такие взаимодействия называют **параметрическими преобразованиями частоты**

Рассмотрим те нелинейно-оптические явления, в возникновении которых заметную роль играет кубический член в разложении поляризованности

условие волнового синхронизма для генерации гармоник не выполняется, его можно не учитывать, т.е. можно опустить. Тогда

$$(\quad) - (\quad) - (\quad)$$

Для электрической индукции

имеем

$$(\quad) (\quad)$$

- показатель преломления среды при слабых полях

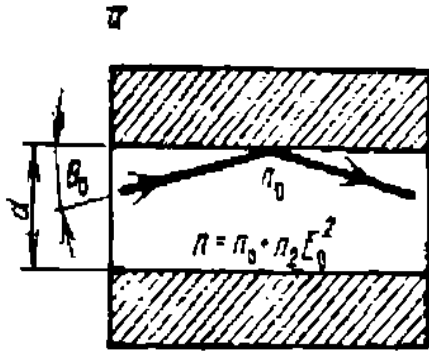
$$\sqrt{\frac{(\quad) - (\quad)}{(\quad)}}$$

Так как обычно , то, разлагая выражение под корнем в ряд и ограничиваясь двумя членами, получаем



где  $n_2$  - нелинейная поправка к показателю преломления в сильных световых полях;  $n_2$  - коэффициент при нелинейном слагаемом показателя преломления, являющийся характеристикой нелинейно-оптических свойств среды.

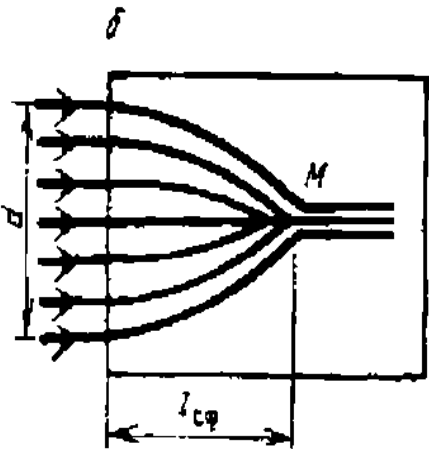
Поскольку коэффициент  $n_2$  может принимать как положительные, так и отрицательные значения, то при  $n_2 > 0$  поток света **самофокусируется**, а при  $n_2 < 0$  **дефокусируется**.



Если через однородную среду проходит интенсивный пучок света, то среда становится оптически неоднородной. Луч света в такой среде будет отклоняться в сторону большего показателя преломления.

В однородную среду с показателем преломления падает параллельный пучок лучей кругового поперечного сечения диаметром  $d$  (рис. а).

Допустим, что амплитуда напряженности электрического поля в пучке постоянна по всему сечению. Показатель преломления в пространстве, занятом пучком, равен  $n = n_0 + n_2 E_0^2$ . В результате дифракции пучок расширяется.



Пределный угол скольжения определяется соотношением

Поскольку угол мал, то разлагая в ряд, ограничиваясь двумя членами и учитывая соотношение , получаем

$$(\quad)$$

Если , часть дифрагированных лучей выходит из цилиндрического пучка света, т.е. пучок расширяется. При все дифрагированные лучи испытывают полное отражение от боковой поверхности цилиндрического пучка. Так как в реальных условиях ограниченный по фронту световой пучок всегда имеет большую интенсивность на оси, то показатель преломления согласно (36.20) также будет иметь большую величину на оси пучка и убывать к его периферии. Вследствие этого лучи в пучке будут искривляться, пучок начнет сжиматься и может превратиться в узкий световой канал, т.е. произойдет самофокусировка пучка (рис. б).

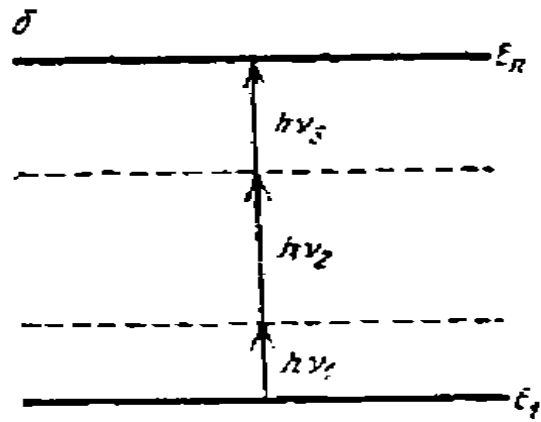
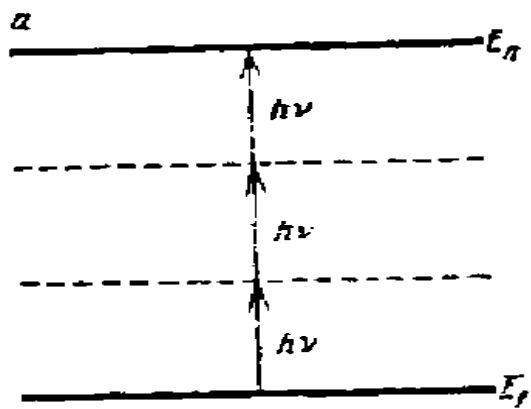
$$-\sqrt{\quad}$$

*Многофотонные процессы*, когда в одном элементарном акте одновременно поглощаются или испускаются два и более квантов света.

явление возникает тогда, когда энергия квантов света имеет величину, равную разности уровней энергии данного вещества:  $E_n - E_f = n h\nu$ , где  $E_n$  и  $E_f$  - энергии нижнего невозбужденного и верхнего возбужденного уровней соответственно. Здесь в каждом акте взаимодействия света и вещества поглощается один фотон и поэтому процесс является однофотонным.

При облучении вещества очень мощными световыми потоками от лазеров, дающих большую плотность излучения, может иметь место поглощение нескольких фотонов в одном элементарном акте таким образом, чтобы выполнить условие  $E_n - E_f = n h\nu$ . В этом

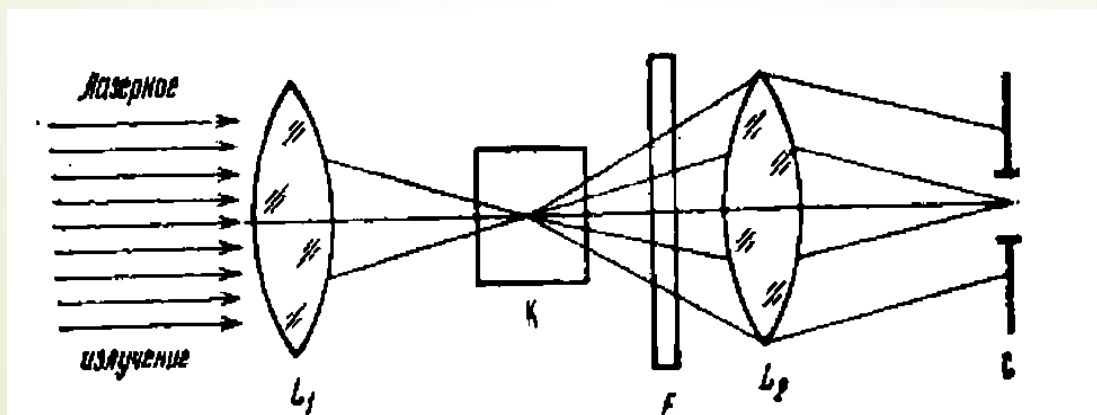
случае происходит многофотонное поглощение (рис. а). Величина энергии каждого фотона здесь в  $n$  раз меньше энергии фотона, который поглощается в однофотонном акте. Многофотонные процессы поглощения могут происходить не только при наличии фотонов одного сорта, но и в том случае, если имеются фотоны различных энергий (рис.б).



Схемы трехфотонного поглощения фотонов с одинаковой (а) и разной (б) энергией

Если  $n \cdot h\nu \geq I$ , где  $I$  - энергия ионизации, то когда энергия суммы фотонов достигнет величины, превышающей  $I$ , произойдет ионизация атома, т.е. оптический электрон оторвется от атома. Это явление носит название **многофотонной ионизации**

Если возбуждение осуществляется при интенсивностях с одинаковой (а) и разной (б) энергией порядка  $10^8 - 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>, то интенсивность рассеянного света увеличивается на много порядков. Кроме того, помимо линий первого порядка с частотами  $\omega = \omega_0 \pm \omega_L$  появляются и линии более высоких порядков с частотами  $\omega = \omega_0 \pm n\omega_L$ . Такой вид комбинационное рассеяния получил название **вынужденного комбинационного рассеяния**.



Вынужденное комбинационное рассеяние является процессом нелинейным и когерентным. Этим определяются его основные свойства.