

Лекция 10 **НЕЛИНЕЙНОЕ РАССЕЯНИЕ
СВЕТА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ**

Вопросы:

- 1. Вынужденное комбинационное
рассеяние.**
- 2. Вынужденное рассеяние
Мандельштама-Бриллюэна.**

Комбинационное рассеяние (эффект Рамана)

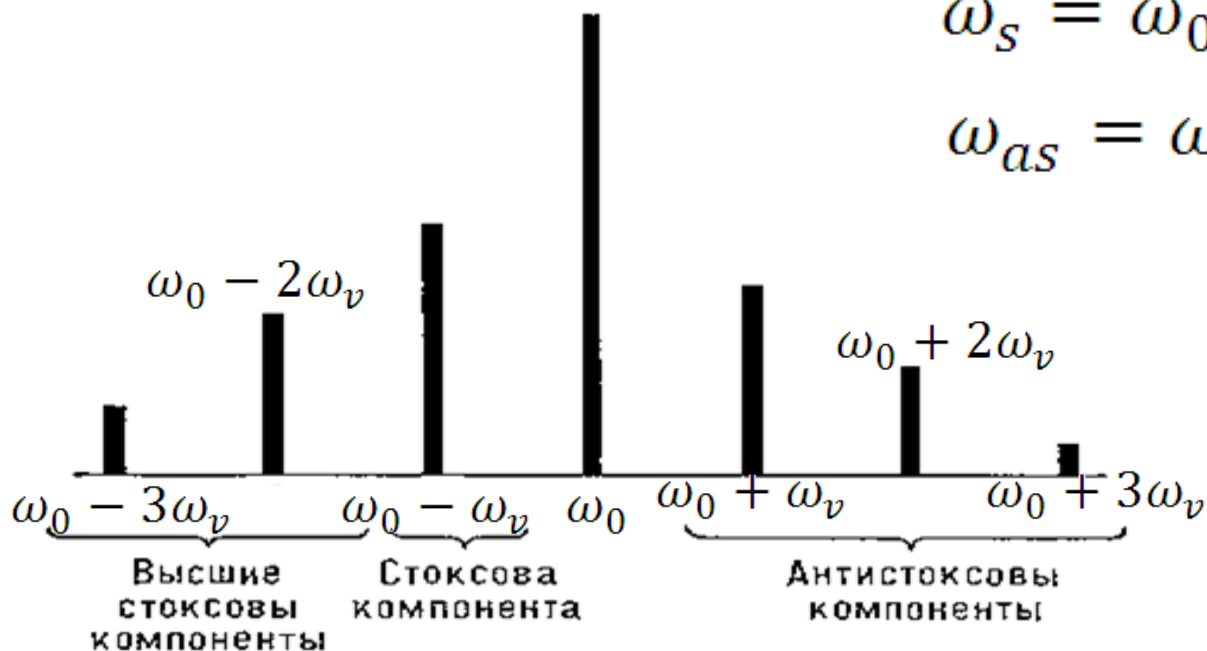


**Ч.В.Раман
(1888–1970)**

Комбинационное рассеяние – это неупругое рассеяние света, при котором в спектральном составе помимо частоты падающей волны ω_0 присутствуют линии, отличающиеся от нее на величину, равную или кратную частоте внутримолекулярных колебаний:

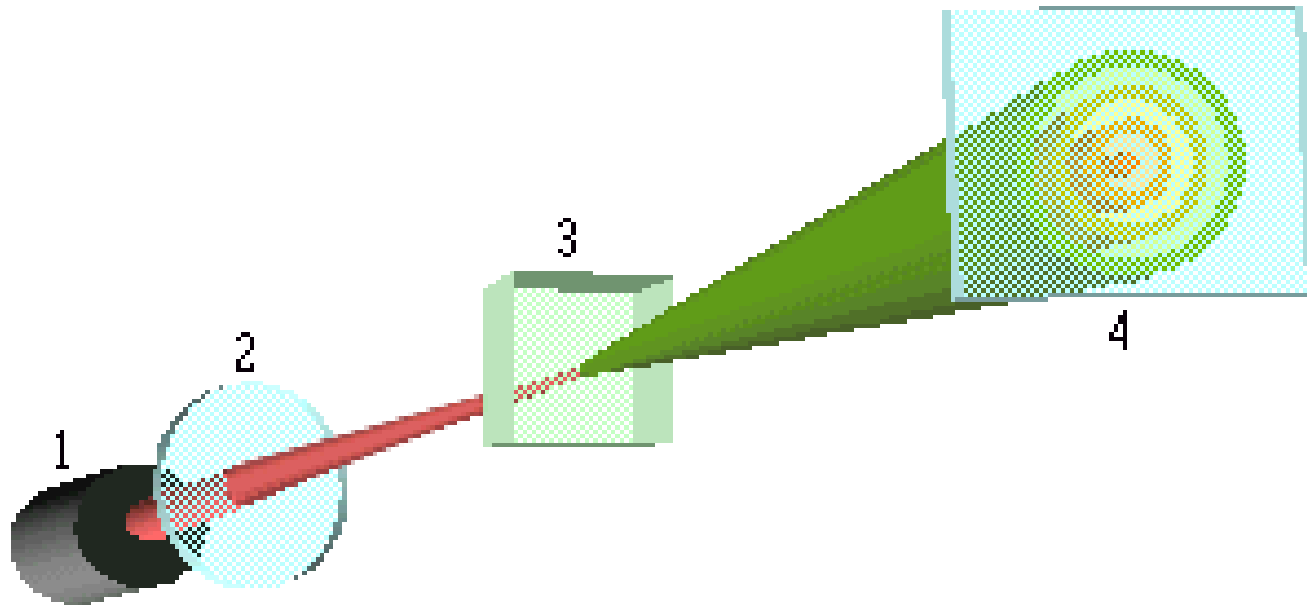
$$\omega_s = \omega_0 - m\omega_v, m = 1, 2, \dots$$

$$\omega_{as} = \omega_0 + m\omega_v, m = 1, 2, \dots$$



Число и расположение линий определяется молекулярным строением вещества.

Схема эксперимента по изучению комбинационного рассеяния



1 - рубиновый лазер; 2 - линза;
3 – нелинейный образец; 4 – экран.

Цвета показаны условно.

Элементарная теория эффекта Рамана

В классической модели электрическое поле световой волны индуцирует переменный дипольный момент молекулы, которая дает соответствующий частотный спектр во всех направлениях.

$$p(t) = \varepsilon_0 \alpha E, \text{ где } \alpha = \alpha_0 + \alpha_\omega \cdot \cos \omega t$$

– поляризуемость молекулы.

$$E(t) = A \cdot \cos \omega_0 t \Rightarrow$$

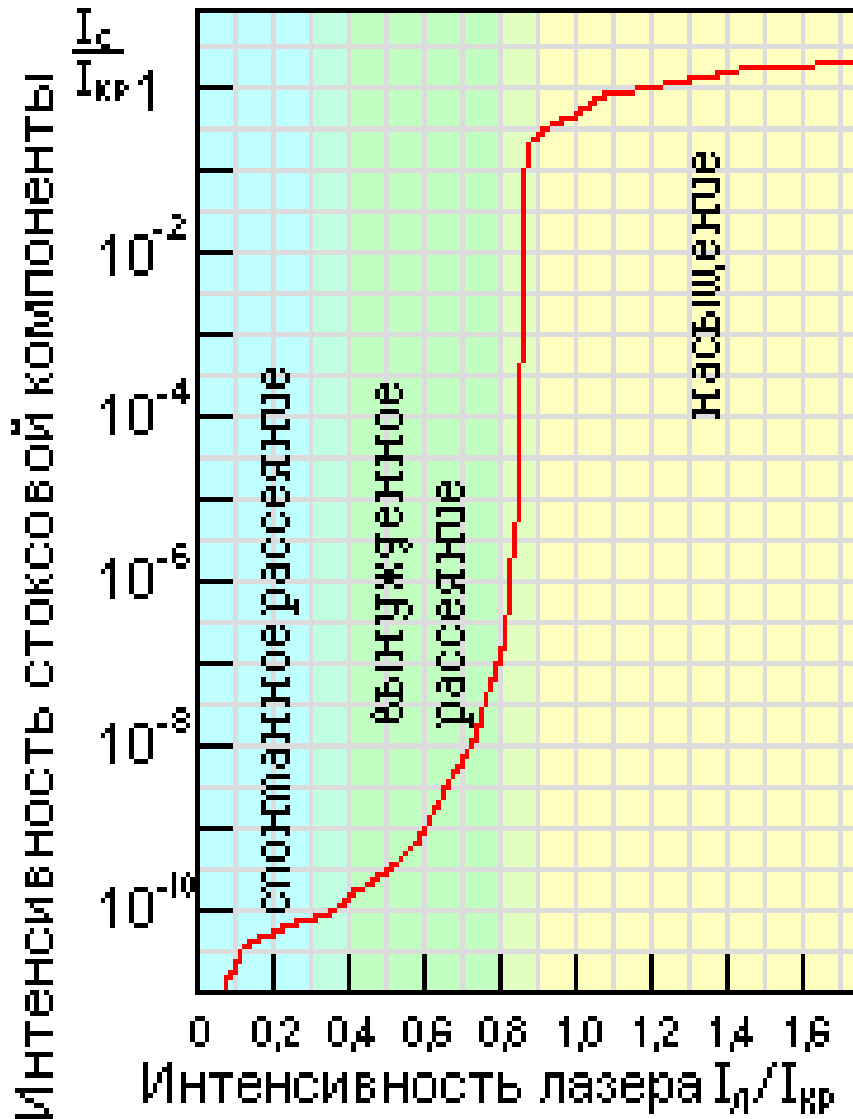
$$p(t) = \varepsilon_0 A \cdot \left(\alpha_0 \cos \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha_\omega \cos(\omega_0 - \omega) t + \frac{1}{2} \alpha_\omega \cos(\omega_0 + \omega) t \right)$$

**Излучение
на частоте
падающей
волны**

**Стоксова
компонента**

**Антистоксова
компонента**

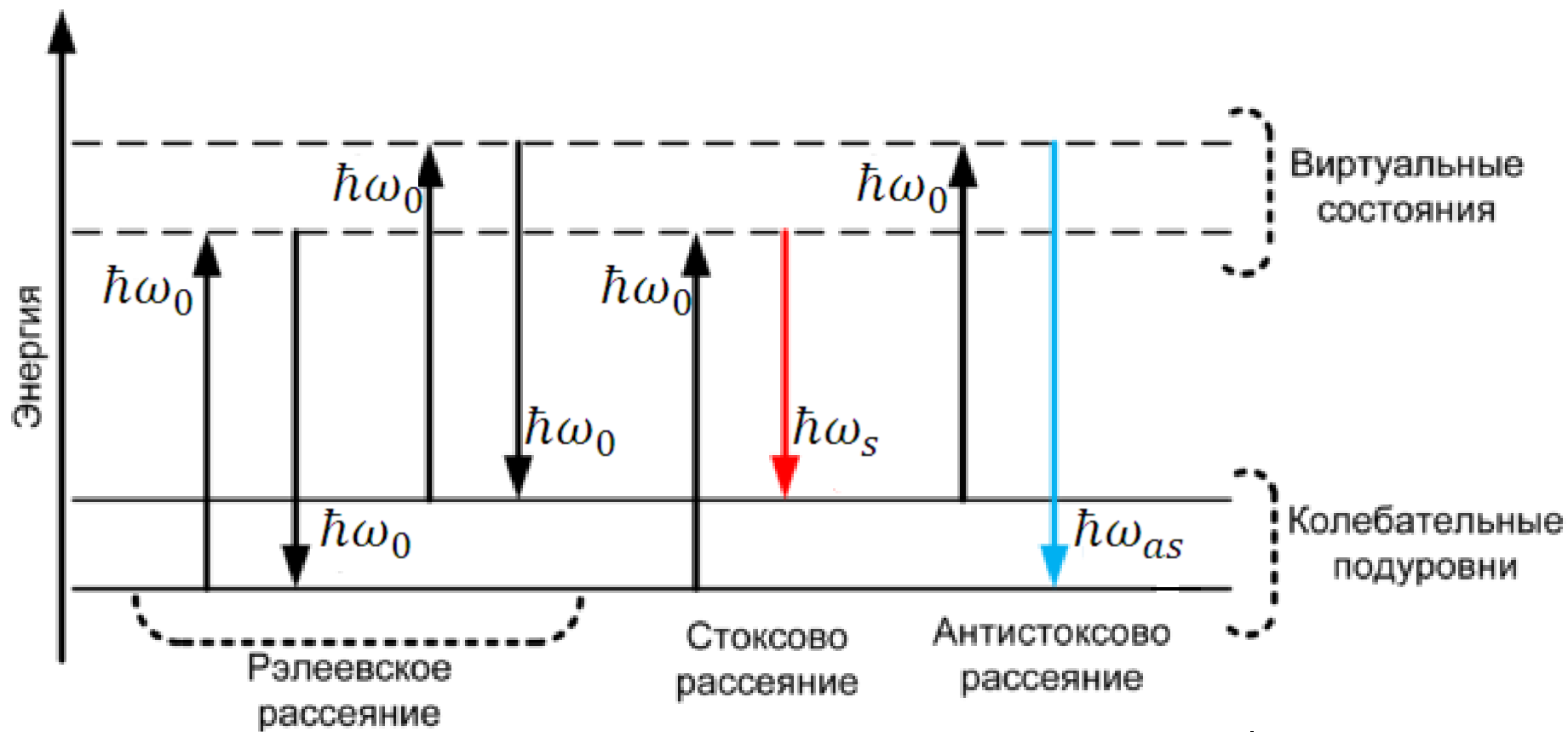
Спонтанное и вынужденное комбинационное рассеяние



При небольших интенсивностях света рассеивающая молекула переходит из одного колебательного состояния в другое с самопроизвольным испусканием стоксова или антистоксова фотона (**линейный процесс**).

При высоких интенсивностях света вероятность рассеяния пропорциональна интенсивности и падающего, и рассеянного излучений, что приводит к экспоненциальному усилению (**нелинейный пр.**)

Квантовая трактовка комбинационного рассеяния



С квантовой точки зрения происходит уничтожение фотона с энергией $\hbar\omega_0$ и испускание фотона с другой энергией за счет колебательного кванта молекулы.

Модель вынужденного комбинационного рассеяния

$$U = \frac{1}{2} f_1 x^2 + \frac{1}{2} f_2 y^2 + \alpha x y^2$$

$$\ddot{x} + \gamma_1 \dot{x} + \Omega^2 x = -\frac{\alpha}{M} y^2$$

$$\ddot{y} + \gamma_2 \dot{y} + \omega_0^2 y = eE - \frac{2\alpha}{m} x y$$

$$\chi^{(3)} \sim \left(\frac{\partial \alpha}{\partial x} \right)^2$$

Описывается с помощью модели *нелинейно связанных осцилляторов*.

x – смещение атомов в молекуле.

y – смещение внешних электронов.

$$\alpha = \alpha_0 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial x} \right) \cdot x$$

– поляризуемость молекулы.

$$\Omega = \omega_0 - \omega_S = \omega_V$$

– частота колебательного кванта.

На хаотическое внутримолекулярное движение накладываются вынужденные колебания, синфазные с компонентами светового поля (происходит фазирование молекулярных колебаний во всем объеме, занятом полем).

ВКР-усиление

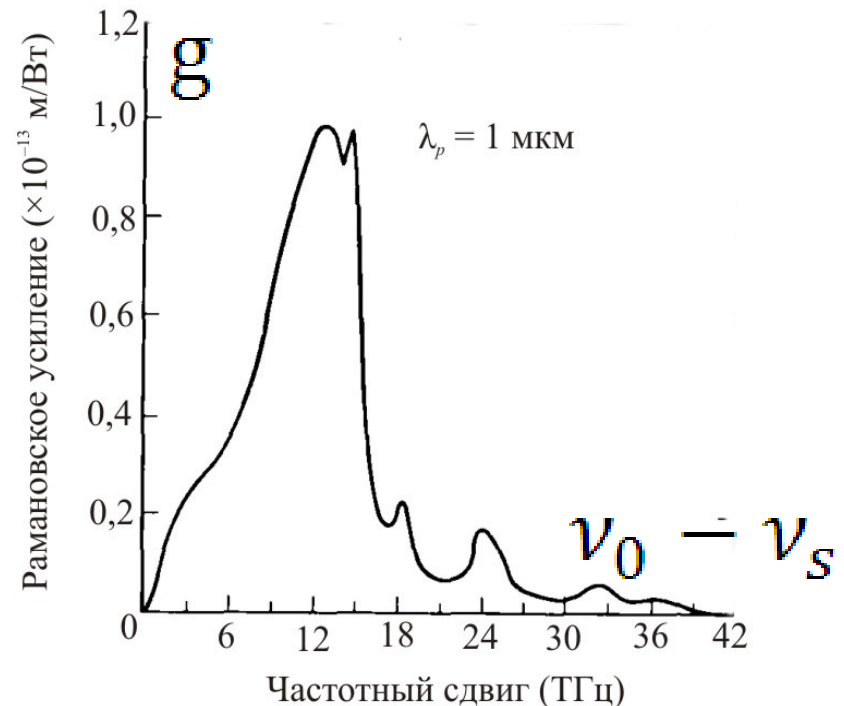
Система уравнений, описывающая взаимодействие между волной накачки и стоксовой волной в отсутствие потерь:

$$\begin{cases} \frac{dI_s}{dz} = gI_s I \\ \frac{dI}{dz} = -\frac{\omega_0}{\omega_s} \cdot gI_s I \end{cases}$$

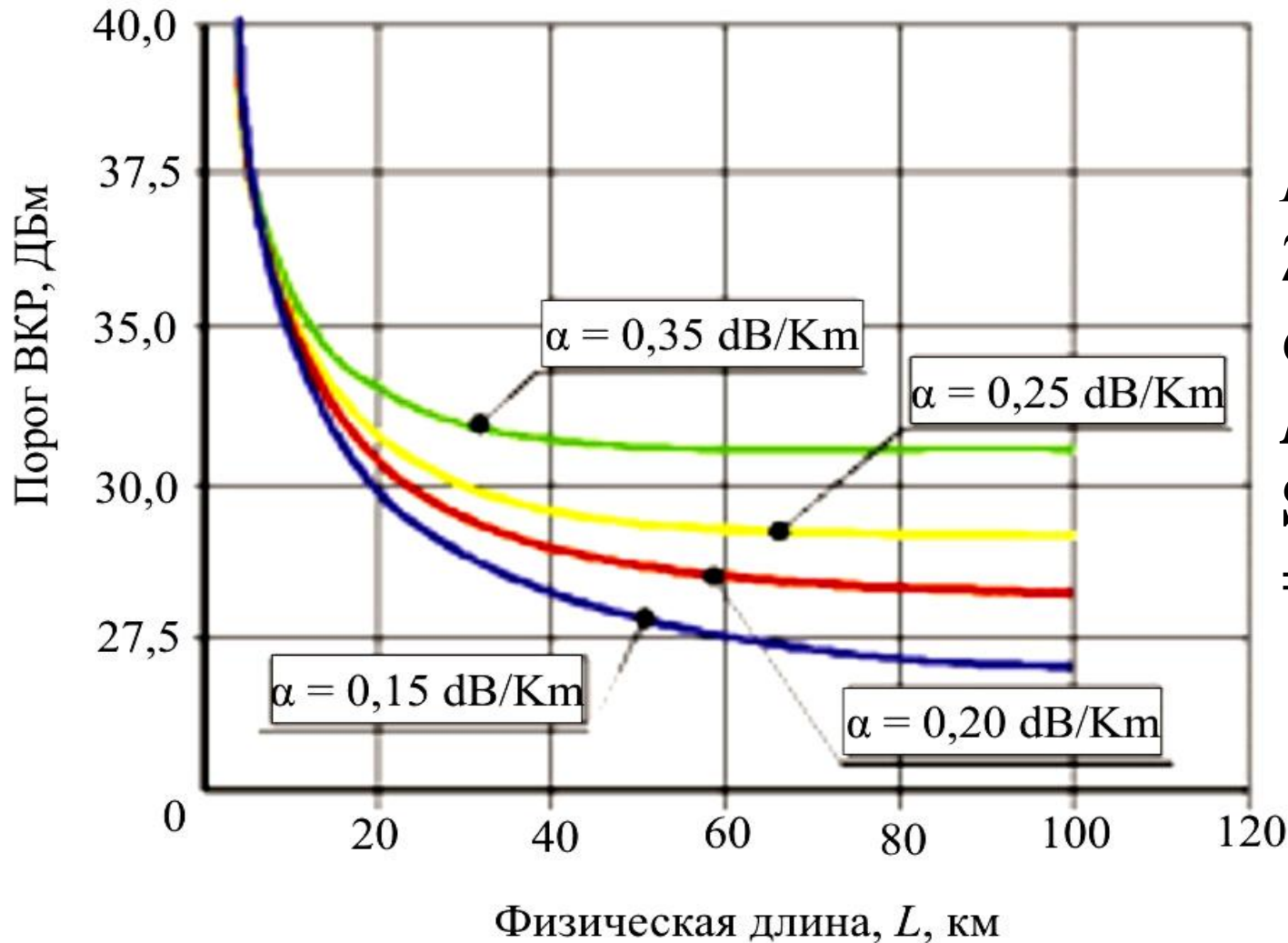
Решение:

$$I_s(z) = I_s(0) \cdot \exp [I(0)gz]$$

Энергия волны накачки передается стоксовой волне и при достаточной интенсивности накачки рассеяние нарастает экспоненциально (имеет место ВКР-усиление).



Пороговый характер вынужденного комбинационного рассеяния



Пример:
 $\lambda = 1,55 \text{ мкм},$
 $\alpha_{\text{дБ}} = 0,2 \text{ дБ/км},$
 $L = 50 \text{ км},$
 $S_{\text{эфф}} =$
 $= 5 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2.$

Находим:
 $P_{\text{пор}} = 0,6 \text{ Вт}.$

$$\text{ДБм} = 10 \cdot \log_{10} (\text{mW})$$

Волоконные ВКР-усилители

ВКР-усилители (рамановские усилители) используются для усиления оптических сигналов, распространяющихся вместе с интенсивной волной накачки и имеющих длину волны в полосе комбинационного усиления.

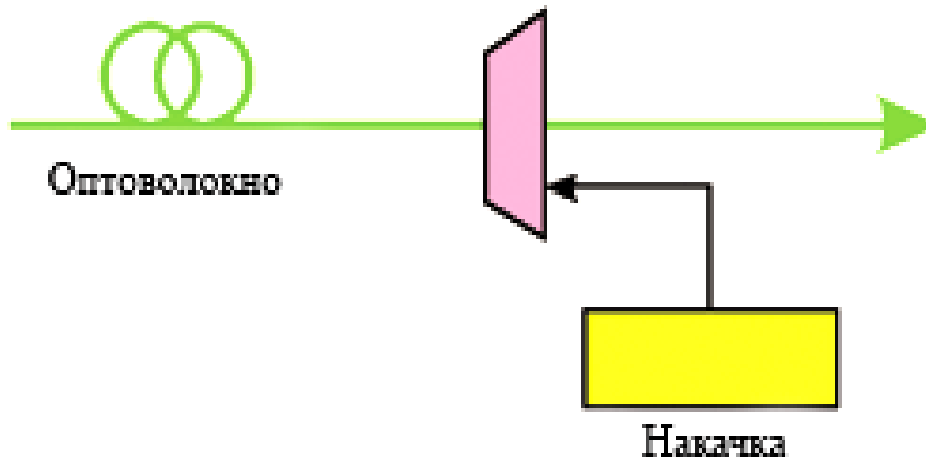


Схема ВКР- усилителя.



Блок накачки ВКР- усилителя.

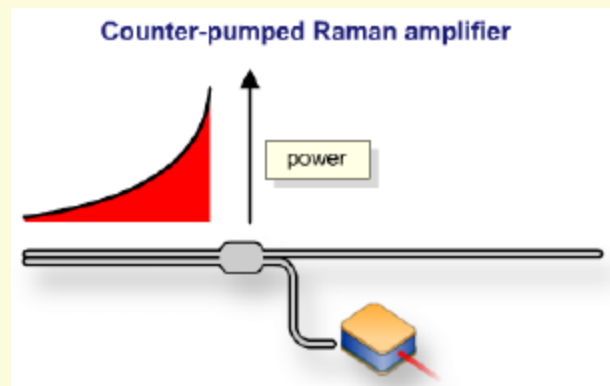
Преимущества:

- широкополосность усиления (5...10 ТГц);
- позволяет увеличить скорость передачи сигналов существующих линий с 2.5 Гбит/с до 40 Гбит/с;
- применяется в схемах с DWDM и для сверхкоротких имп-сов.

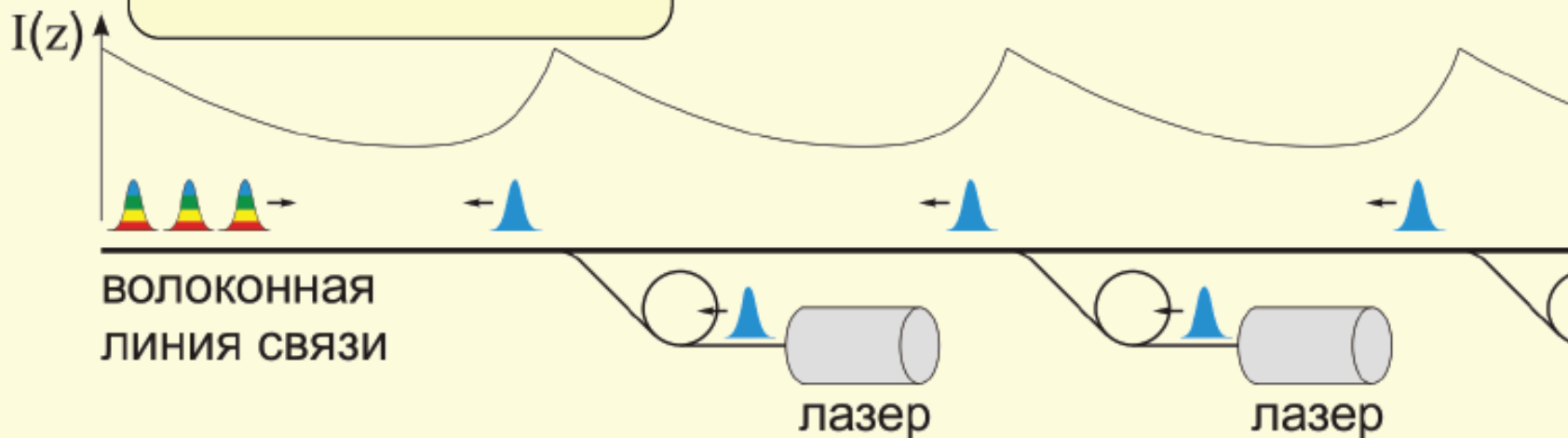


Лаборатория
лазерных систем
НГУ

ВКР-усилители



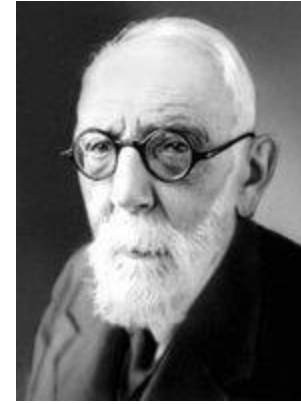
- Заданный профиль
спектральной мощности



Вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ)



**Л.И.Мандельштам
(1879–1944)**



**Л.Бриллюэн
(1889–1969)**

ВРМБ – процесс неупругого рассеяния света на акустических фонах, генерируемых за счет взаимодействия падающей и стоксовой волн, при этом рассеянное излучение играет активную роль и лавинообразно нарастает.

Явление ВРМБ аналогично ВКР, только в качестве молекулярных колебаний при этом выступает волна избыточного давления среды (акустическая волна).

Физический механизм ВРМБ

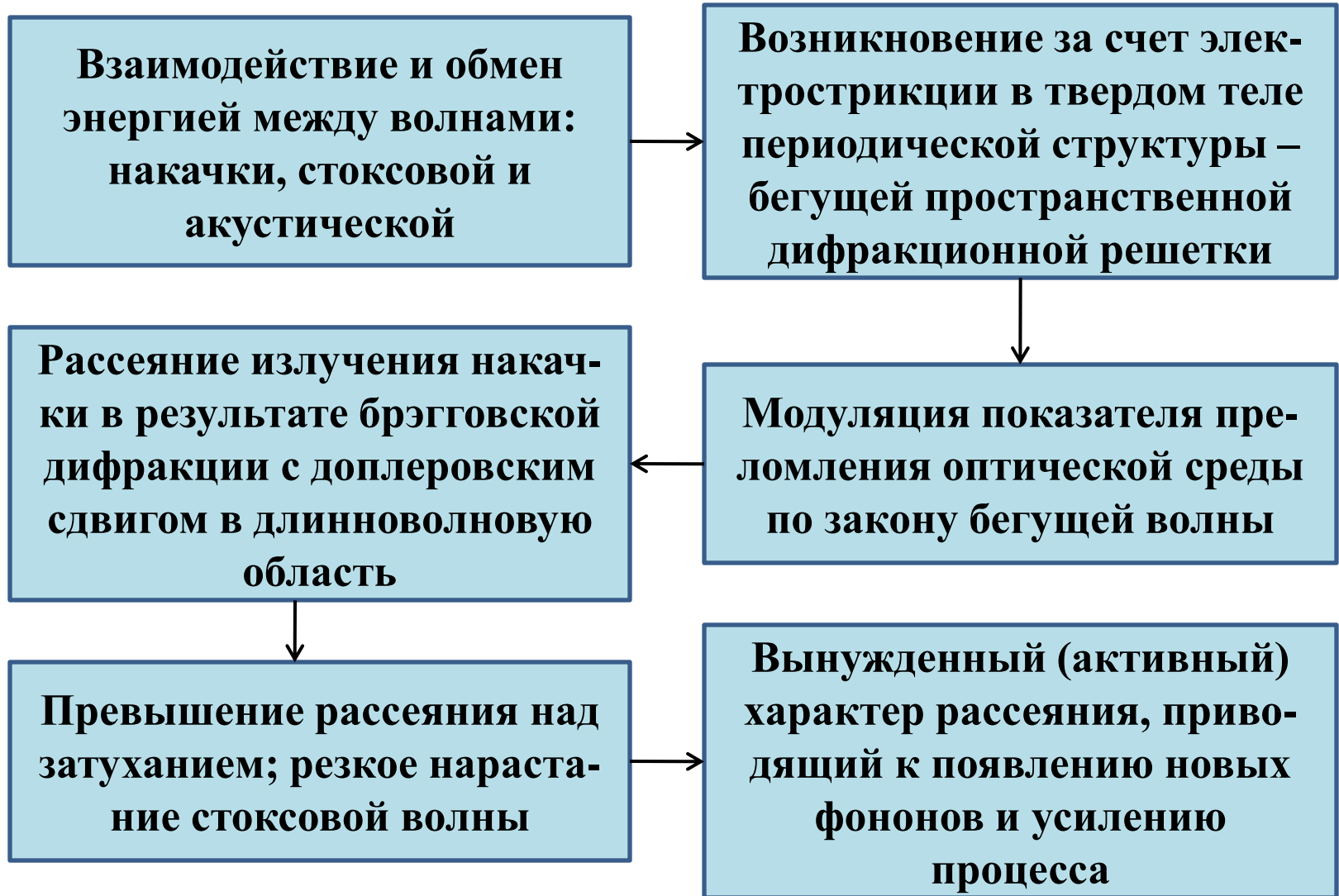
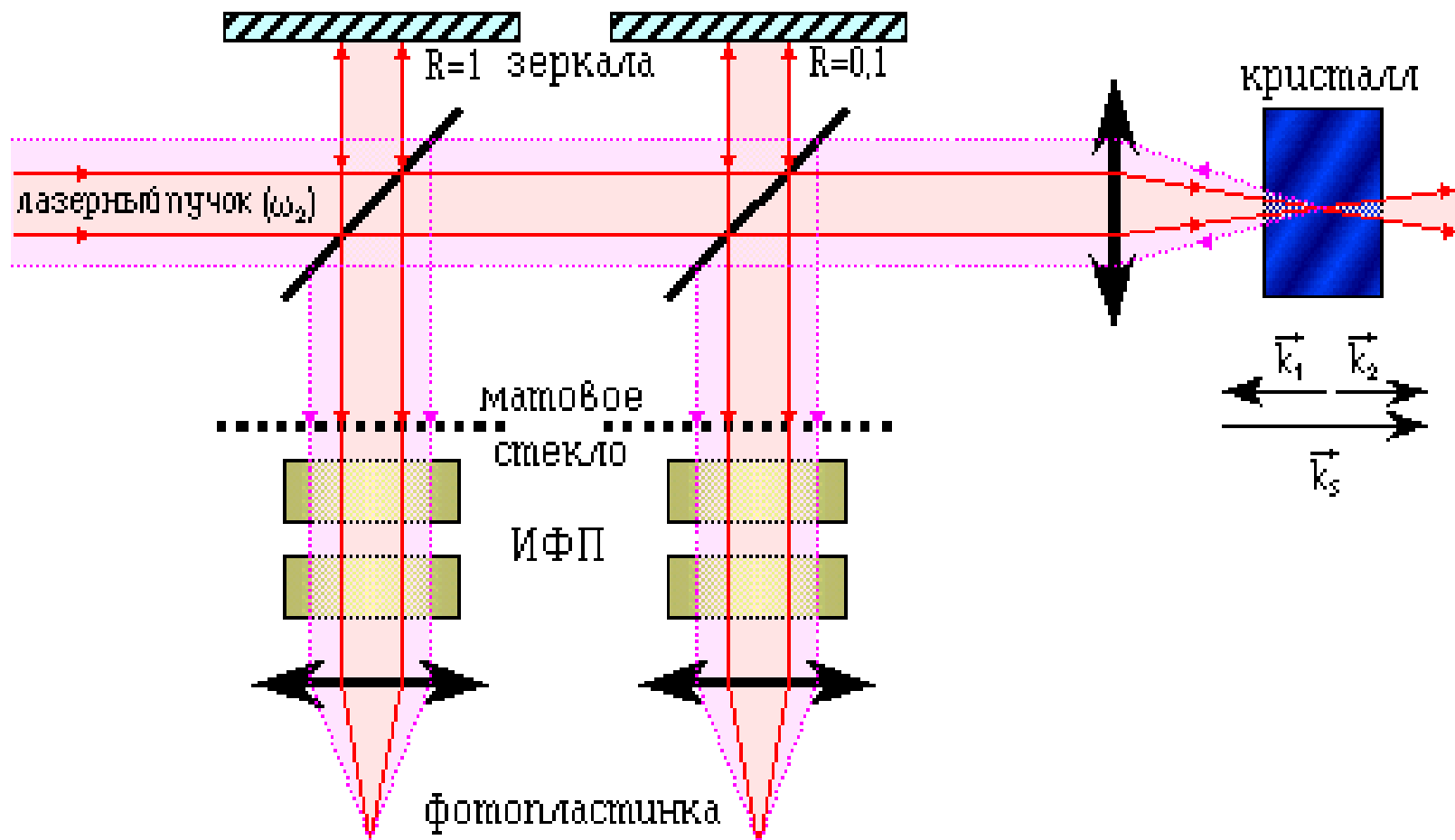


Схема эксперимента по наблюдению ВРМБ

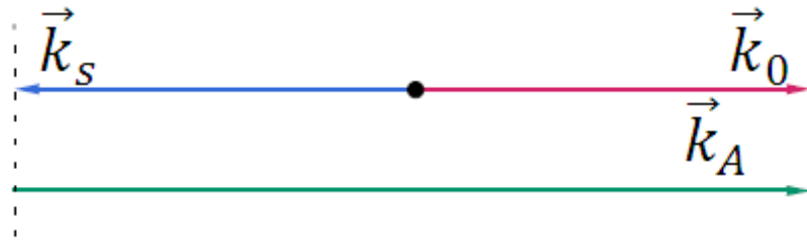
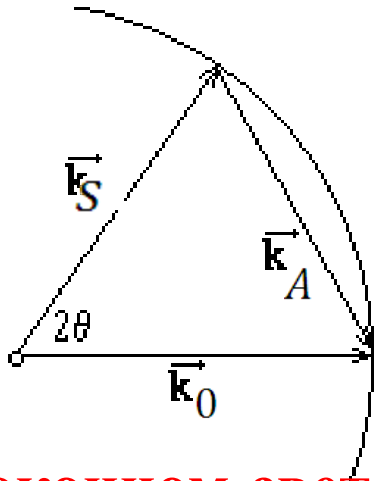


Законы сохранения

С точки зрения квантовой механики ВРМБ представляет собой процесс уничтожения фотона накачки с одновременным появлением стоксова фотона и акустического фонона.

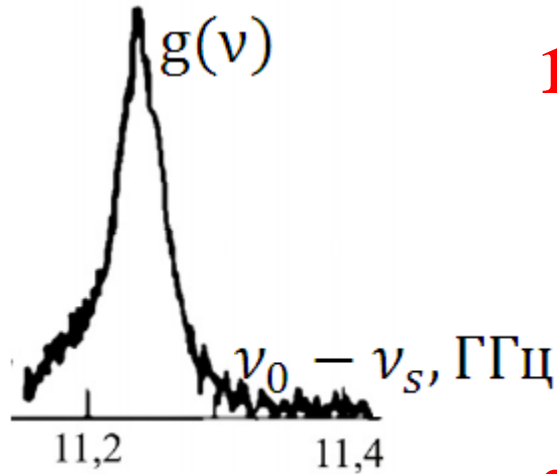
$$\begin{cases} \hbar\omega_0 = \hbar\omega_s + \hbar\omega_A \\ \vec{k}_0 = \vec{k}_s + \vec{k}_A \end{cases} \Rightarrow \omega_0 - \omega_s = 2v_A k_0 \sin\theta$$

$(\omega_A = v_A k_A)$



В волоконном световоде смещение частоты стоксовой волны максимально для обратного направления и исчезает для прямого направления.

ВРМБ-усиление



Спектр ВРМБ-усиления
для световода с сердцевиной
из кварцевого стекла

1. Для кварцевого волокна $g_{\max} = 5 \cdot 10^{-11} \frac{\text{М}}{\text{Вт}}$, что более чем на два порядка превышает соответствующий коэффициент ВКР-усиления.
2. Ширина полосы ВРМБ-усиления очень мала (менее 100 МГц против 5...10 ТГц для ВКР-усиления).

Пороговая мощность ВРМБ

$$P_{\text{пор}} \approx \frac{21S_{\text{эфф}}}{g_{\max}L}$$

При $S_{\text{эфф}} = 5 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$, $L = 2 \text{ км}$
имеем: $P_{\text{пор}} = 0,01 \text{ Вт}$.

Порог мощности при ВРМБ примерно на 2 порядка ниже, чем при ВКР.

Зависимость максимального ВРМБ-усиления от скорости передачи информации по ВОЛС



Позитивная и негативная роль ВРМБ в волоконной оптике

1. Используется для усиления сигналов в оптическом волокне, однако, ВРМБ-усилители непригодны для широкополосных сигналов и в схемах с DWDM.
2. Находит техническое применение в ВРМБ-лазерах с регулируемой пороговой мощностью для различных типов ВОЛС, для повышения добротности лазерных резонаторов за счет применения так называемых ВРМБ-зеркал.
3. Технических проблем с ВРМБ не возникает в линиях с длиной оптического волокна до 10 км.

1. Поскольку ВРМБ из всех нелинейных эффектов имеет самый низкий порог возникновения, то в ряде случаев оно ухудшает эффективность передачи основного сигнала в ВОЛС (ограничивает мощность полезного распространяющегося сигнала, снижает его качество).
2. Негативное влияние ВРМБ усиливается с уменьшением диаметра сердцевины волокна и спектральной ширины передаваемых сигналов.