

# Оптика наносистем



Тимошенко Виктор Юрьевич

---

*Московский Государственный Университет  
им. М. В. Ломоносова, Физический факультет  
Научно-Образовательный Центр по нанотехнологиям*

# Содержание курса

Лекция 1. Основные понятия оптики конденсированных фаз вещества.

Лекция 2. Взаимодействие света с металлами и диэлектриками.

Лекция 3. Поглощение света в полупроводниках.

Лекция 4. Экситонное и примесное поглощение света.

Лекция 5. Эмиссия излучения из твердых тел.

Лекция 6. Оптические явления в неоднородных твердотельных системах.

Лекция 7. Оптические свойства твердотельных нанокompозитов.

Лекция 8. Фотонные кристаллы и микрорезонаторы.

**Лекция 9. Рассеяние света в твердых телах.**

**Лекции 10,11. Влияние размеров тел на их оптические свойства.**

**Лекции 12-14. Экситоны в полупроводниковых наноструктурах.**

**Лекция 15. Оптические свойства и применения полупроводниковых наноструктур.**

**Лекция 16. Элементы спиновой оптики и спинтроники.**

**Лекция 17. Нелинейные оптические явления в твердотельных системах.**

**Лекция 18. Элементы нелинейной оптики наноструктур и нанокompозитов.**

# Лекция 9. Рассеяние света в твёрдых телах.

Динамические и статические флуктуации показателя преломления. Упругое и неупругое рассеяние. Рассеяние Рэлея, угловая и частотная зависимости. Рассеяние Ми. Рассеяние Мандельштама-Бриллюэна, стоксовы и антистоксовы компоненты рассеяния. Комбинационное (рамановское) рассеяние света и зависимость его интенсивности от температуры. Рассеяние света в поглощающих средах.

# Динамические и статические флуктуации показателя преломления

В общем случае даже в однородной среде комплексный показатель преломления является флуктуирующей величиной в пространстве :

$$\tilde{n}(\vec{r}) = \tilde{n}_0 + \delta\tilde{n}(\vec{r})$$

где  $\tilde{n}_0$  – среднее значение, а  $\delta\tilde{n}(\vec{r})$  – флуктуация ( $\langle \delta\tilde{n}(\vec{r}) \rangle = 0$ ).

Возможны флуктуации 2-х видов:

- 1) *динамические*, например, колебания решетки (фононы), поляритоны, плазмоны, экситоны и др.;
- 2) *статические*, например, неоднородности плотности, химического состава, температуры и т.п.

Наличие флуктуаций показателя преломления приводит к рассеянию света.

# Основные виды рассеяния света

Если частота (длина волны) света не изменяется при рассеянии, то такое рассеяние называется **упругим**.

Виды упругого рассеяния света:

- 1) **Рэлеевское рассеяние**
- 2) **Рассеяние Ми**

Если частота (длина волны) света изменяется при рассеянии, то такое рассеяние называется **неупругим**.

Виды неупругого рассеяния света:

- 1) **Рассеяние Мандельштама-Блиллиэна**
- 2) **Комбинационное (рамановское) рассеяние**

# Рэлеевское рассеяние

наблюдается в случае, когда размеры оптических неоднородностей  $d$  (масштабы флуктуаций) много меньше длины волны света:  $d \leq 0.1\lambda$

Данный вид рассеяния возникает как при динамических (например, флуктуации плотности жидкости или газа), так и при статических неоднородностях (например, в неоднородных твердых телах).

Аналогичное явление наблюдается для взвешенных частиц в жидкостях и газах и называется *рассеянием Тиндалля*.

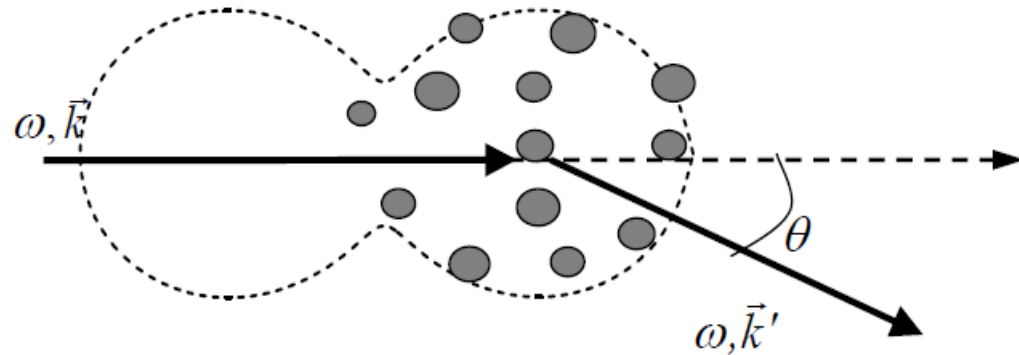
Интенсивность рассеянного света в зависимости от угла рассеяния (диаграмма направленности) имеет вид:

$$I(\theta) = A \frac{NV^2}{r^2 \lambda^4} I_0 (1 + \cos^2 \theta)$$

где  $\theta$  – угол рассеяния,  $N$  и  $V$  – концентрация рассеивающих объектов и средний объем одного объекта ( $V \approx d^3$ ),  $r$  – расстояние от рассеивающих объектов до точки наблюдения, а  $A = A(n, n_0)$  – некоторая функция отклонения показателя преломления рассеивающих объектов ( $n$ ) от среднего показателя преломления ( $n_0$ ). Очевидно, что  $A = 0$ , если  $n = n_0$ .

$$I(\theta) \sim \lambda^{-4} \sim \omega^4;$$

$$I(0) = I(\pi) = 2I(\pm\pi/2)$$



# Рассеяние Ми

Рассеяние Ми наблюдается в случае, когда размеры оптических неоднородностей  $d$  сопоставимы с длиной волны света

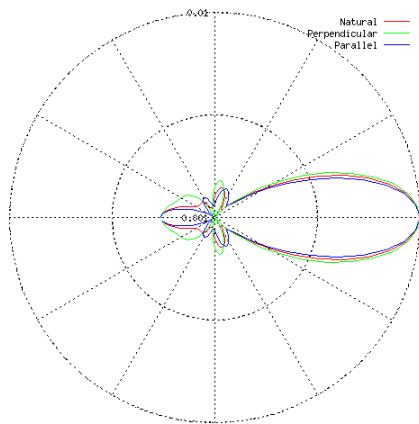
$$d \sim \lambda$$

Для рассеяния Ми характерна более слабая частотная зависимость:

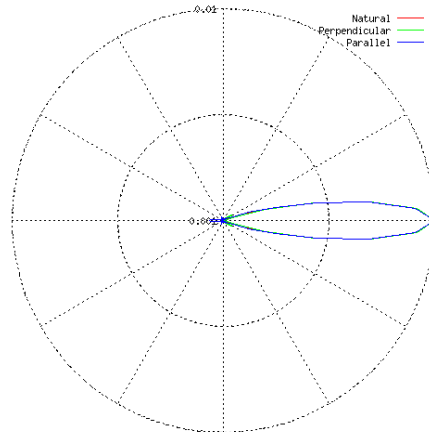
$$I(\theta) \sim \lambda^{-\beta} \sim \omega^{\beta}, \text{ где } \beta < 4$$

Диаграмма направленности имеет сложный вид и характеризуется наличием многочисленных экстремумов, интенсивность и угловое положение которых зависит от отношения  $d/\lambda$ .

С ростом  $d$  увеличивается рассеяние назад.



$$d/\lambda = 1$$



$$d/\lambda = 3$$

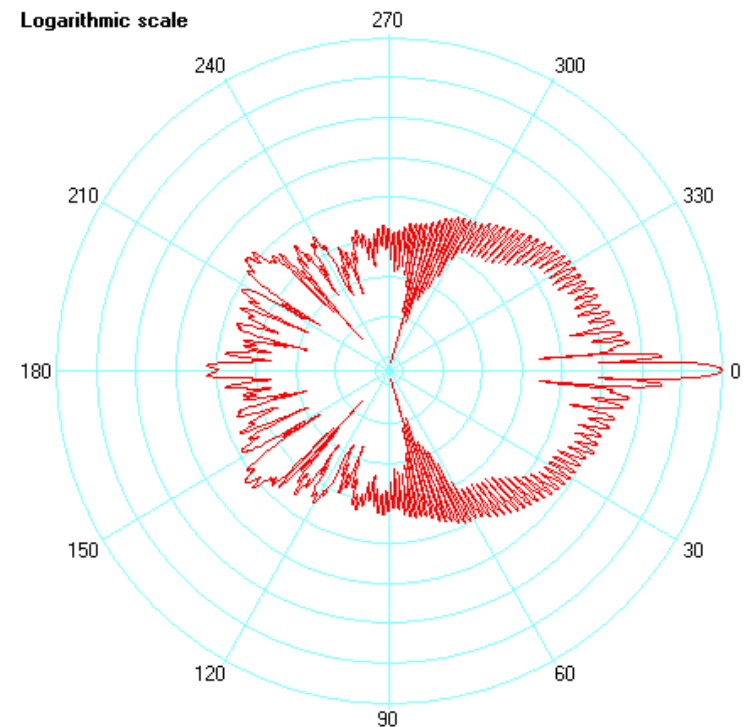
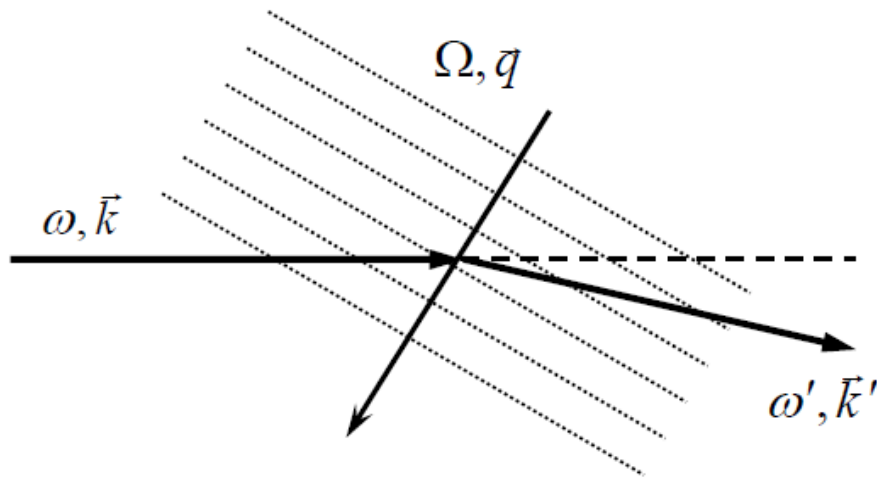


Диаграмма рассеяния красного света (0.65 мкм) на частицах воды радиусом 10 мкм.

# Рассеяние Мандельштама-Бриллюэна



Данный вид неупругого рассеяния возникает при взаимодействии света с акустическими колебаниями решетки (фононами).

При рассеянии должны выполняться законы сохранения энергии и квазиимпульса:

$$\omega' = \omega \pm \Omega$$

$$\vec{k}' = \vec{k} + \vec{q}$$

Различают *стоксову*  $\omega'_S = \omega - \Omega$

и *антистоксову*  $\omega'_A = \omega + \Omega$

компоненты рассеяния.

Поскольку частота акустических фононов много меньше оптической частоты, то выполняется соотношение

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{|\omega' - \omega|}{\omega} = \frac{\Omega}{\omega} \leq 10^{-4}$$

Рассеяние Мандельштама-Бриллюэна можно использовать для анализа акустических свойств твердых тел.

$$\Omega \ll \omega$$



# Комбинационное (рамановское) рассеяние света

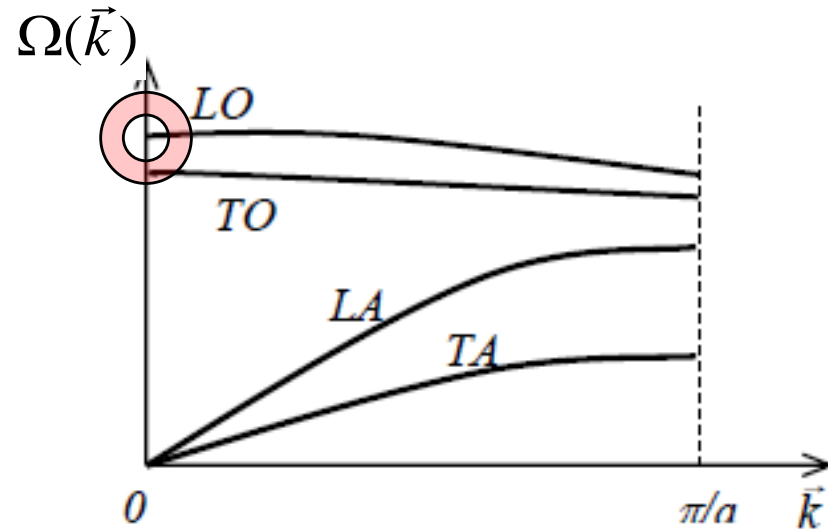
Комбинационное (рамановское) рассеяние света возникает при взаимодействии света с оптическими фононами.

Для фотонов (вплоть до УФ-диапазона):

$$k = 2\pi / \lambda \leq 10^6 \text{ см}^{-1}$$

Для фононов:

$$q_{\max} = \pi / a_0 \approx 10^8 \text{ см}^{-1}$$



рассеяние происходит на фононах в центре зоны Бриллюэна

Интенсивность процесса рассеяния пропорциональна числу взаимодействующих частиц:

$$I_A = BI_0 N_\Omega; \quad I_S = BI_0 (N_\Omega + 1),$$

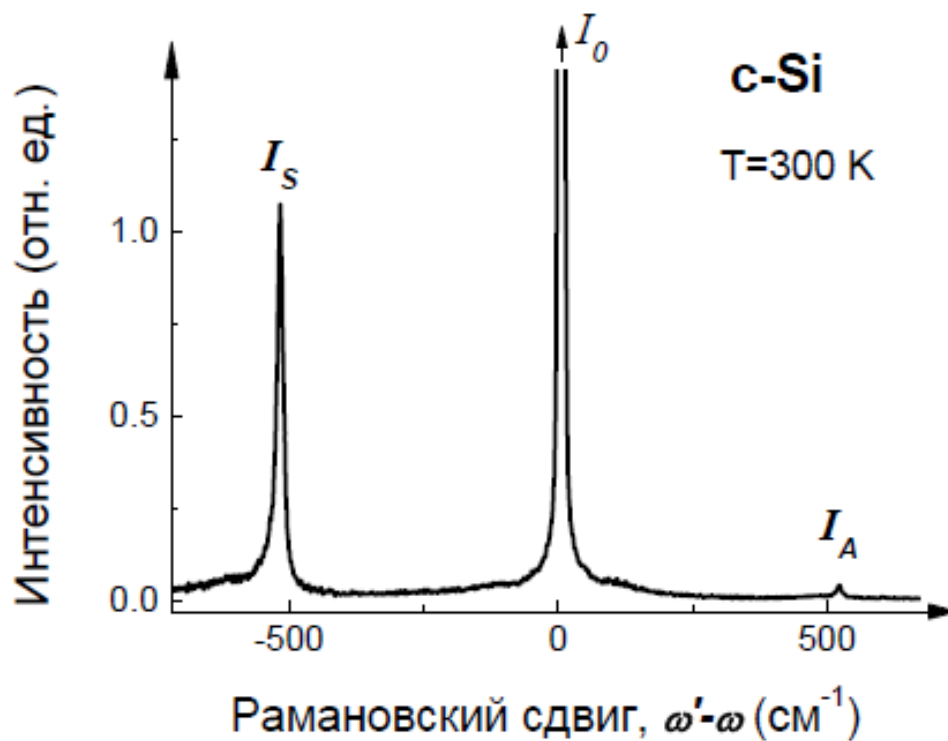
где  $I_0$  – интенсивность падающей световой волны,  $B$  – некоторая постоянная.

Фононы подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна, которая задает фактор заполнения фононных состояний:

$$N_\Omega = \left( \exp\left(\frac{\Omega}{k_B T}\right) - 1 \right)^{-1}$$

$$\frac{I_S}{I_A} = \frac{N_\Omega + 1}{N_\Omega} = N_\Omega^{-1} + 1 = \exp\left(\frac{\Omega}{k_B T}\right) > 1$$

# Пример спектра рамановского рассеяния света



$$\Omega_{LO} = \Omega_{TO} = \Omega = 64 \text{ мЭВ (} 520 \text{ см}^{-1}\text{)}.$$

$$k_B T = 26 \text{ мЭВ}$$

$$I_S / I_A \approx \exp(2.5) \approx 12$$

В большинстве случаев интенсивность линий рамановского рассеяния на много порядков меньше, чем  $I_0$ . Однако эффективность рассеяния может возрасти в условиях резонанса, когда частоты близки к частотам электронных переходов в веществе, а также вследствие эффектов локального поля в низкоразмерных структурах и неоднородных средах.

# Рассеяние света в поглощающих средах

Для всех видов рассеяния учет поглощения приводит к уменьшению интенсивности рассеянного света в направлении его падения на рассеивающую среду, что описывается экспоненциальным законом:

$$I(z) = I_0 \exp[-(h + \alpha)z]$$

где  $h$  – коэффициент экстинкции рассеяния и  $\alpha$  – коэффициент поглощения.

# Контрольные вопросы к Лекции 9:

- Является ли рассеяние Рэлея упругим рассеянием?
- Что такое рассеяние Ми?
- На каких фонах (оптических или акустических) происходит рассеяние Мандельштама-Бриллюэна и комбинационное (рамановское) рассеяние?
- Амплитуда какой компоненты (стоксовой или антистоксовой) больше при рамановском рассеянии света в непоглощающей среде?
- Как зависит соотношение между интенсивностями стоксовой и антистоксовой компонент рамановского рассеяния от температуры?