

Оптика твердого тела и наноструктур



Гончар Кирилл Александрович
Тимошенко Виктор Юрьевич

Московский Государственный Университет
им. М. В. Ломоносова, Физический факультет

Лекция 9. Рассеяние света в твердых телах.

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

Динамические и статические флюктуации показателя преломления

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

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

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

Возможны флюктуации 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 флюктуаций 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 неупрого рассеяния света:

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

Рэлеевское рассеяние

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

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

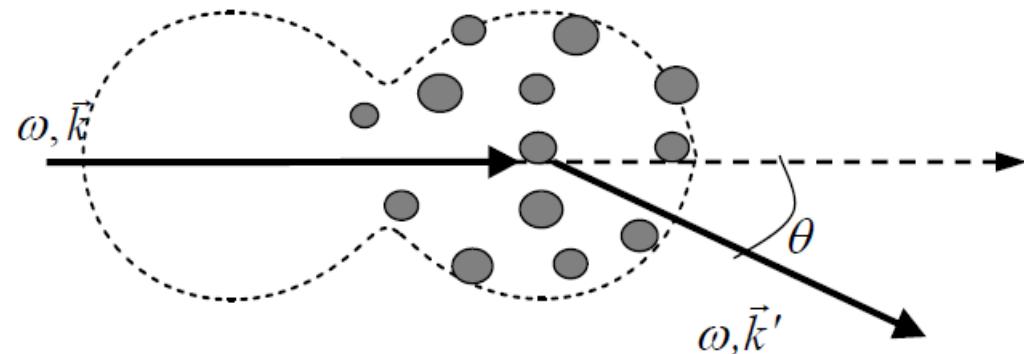
Аналогичное явление наблюдается для взвешенных частиц в жидкостях и газах и называется *рассеянием Тиндаля*.

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

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

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

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



где θ – 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 $n = n_0$.

Рассеяние Ми

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

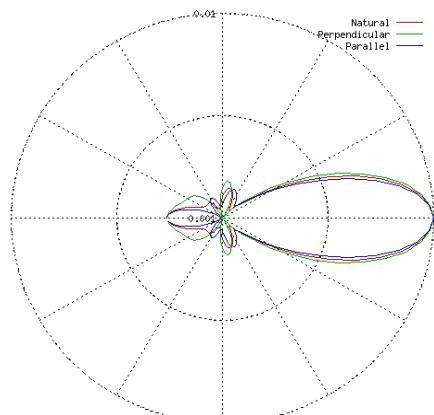
$$d \sim \lambda$$

Для рассеяния Ми характерна более слабая частотная зависимость:

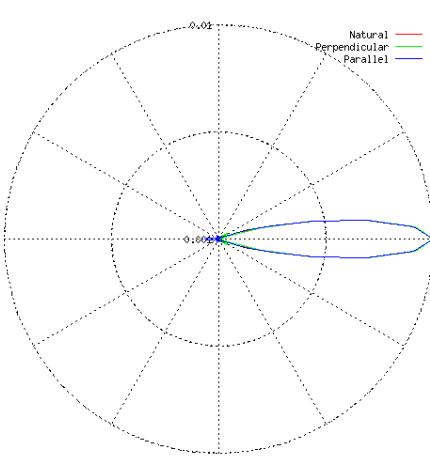
$$I(\theta) \sim \lambda^{-\beta} \sim \omega^{\beta}, \text{ где } \beta < 4$$

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

С ростом d увеличивается рассеяние назад.



$$d/\lambda = 1$$



$$d/\lambda = 3$$

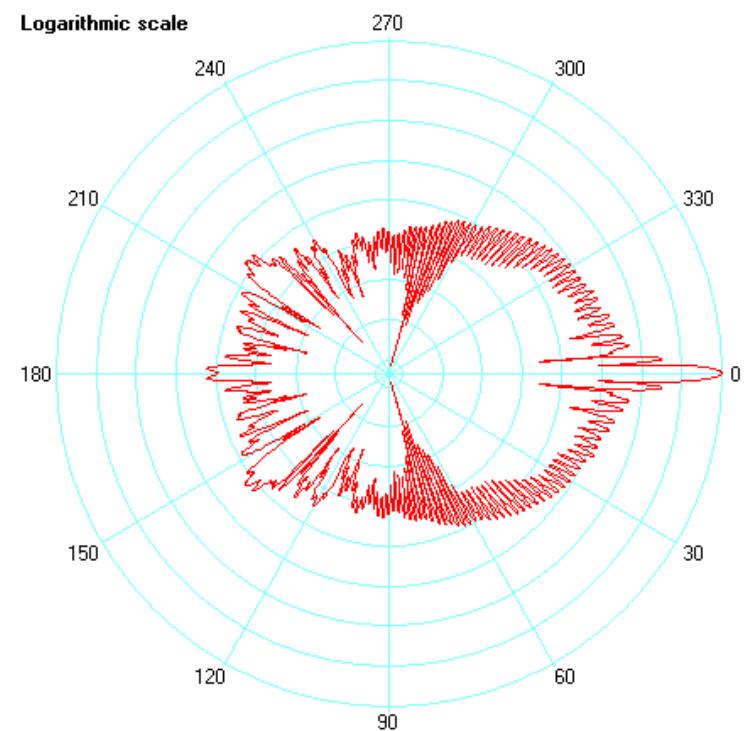
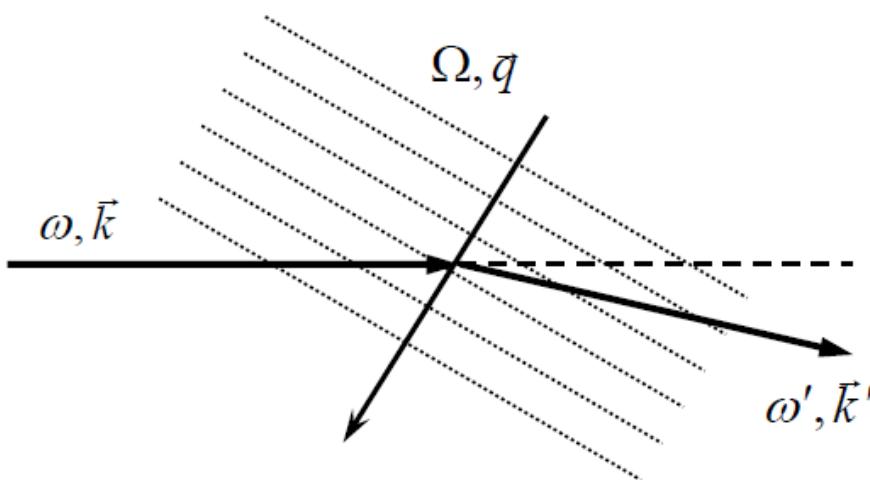


Диаграмма рассеяния красного света (0.65 мкм) на частицах воды радиусом 10 мкм.

Рассеяние Мандельштама-Бриллюэна



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

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

При рассеянии должны выполняться законы сохранения энергии и квазимпульса:

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

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

$$\Omega \ll \omega$$

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

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

Комбинационное (рамановское) рассеяние света

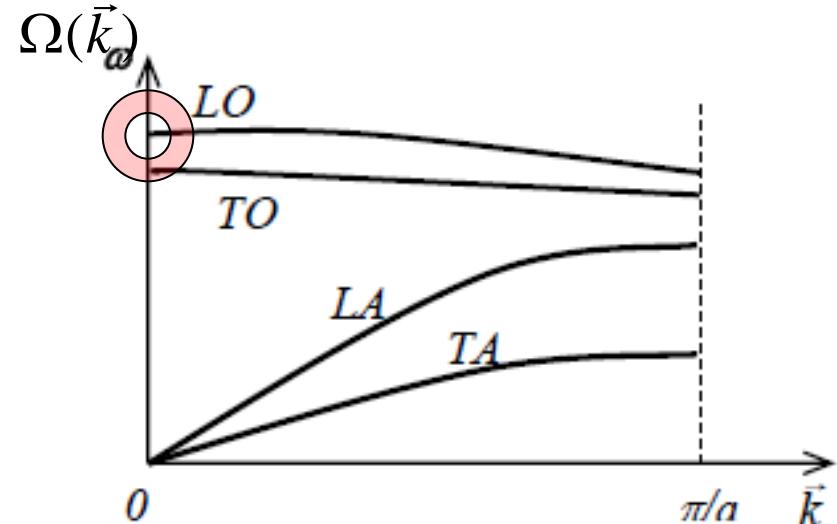
Комбинационное (рамановское) рассеяние света возникает при взаимодействии света с оптическими фононами.

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.

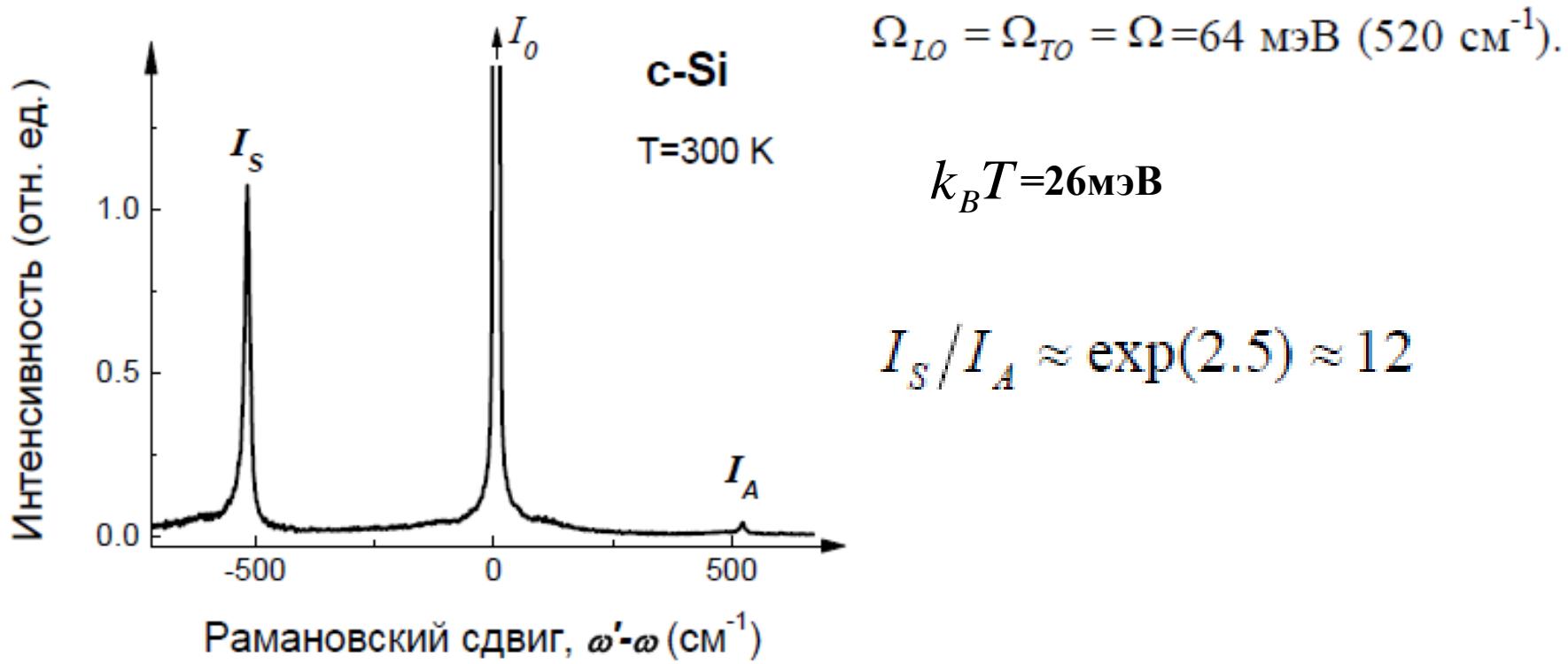
Фононы подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна, которая задает фактор заполнения фононных состояний:

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



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

Пример спектра рамановского рассеяния света

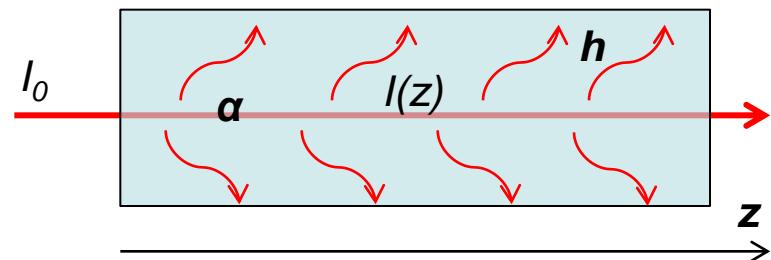


В большинстве случаев интенсивность линий рамановского рассеяния на много порядков меньше, чем I_0 . Однако эффективность рассеяния может возрастать в условиях резонанса, когда частоты близки к частотам электронных переходов в веществе, а также вследствие эффектов локального поля в низкоразмерных структурах 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 α – коэффициент поглощения.

Итоги Лекции 9:

- Упругое рассеяние света: рассеяние Рэлея и рассеяние Ми.
- Непрологе рассеяние света: Мандельштама-Бриллюэна и комбинационное (рамановское) рассеяние.
- Стоксовы и антистоксовые компоненты рассеяния.
- Соотношение между интенсивностями стоксовой и антистоксовой компонент рамановского рассеяния от температуры.