

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.

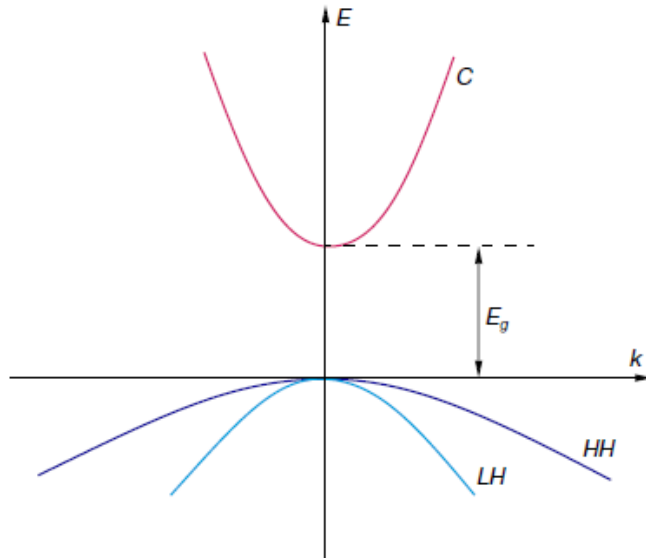
Лекция 12:

Экситоны в полупроводниковых нанокристаллах.

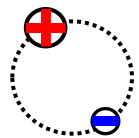
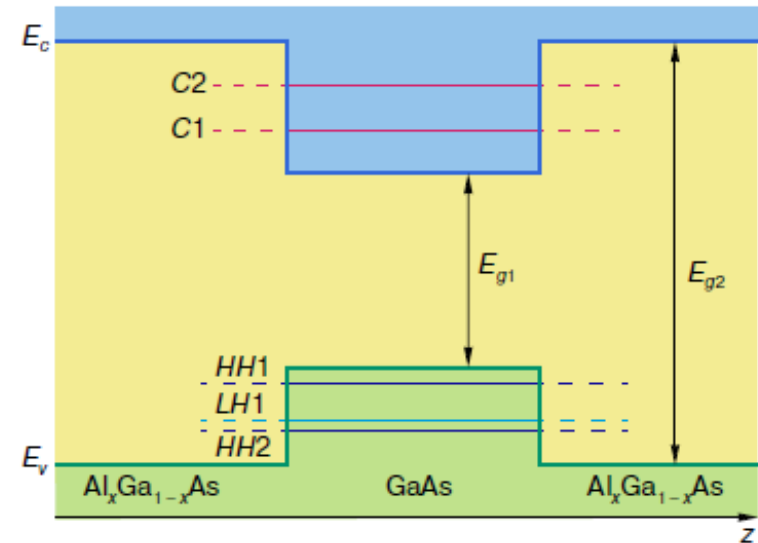
Модификация спектра экситона Ванье-Мотта в квантовой яме. Влияние размерности полупроводниковой наноструктуры и диэлектрической проницаемости ее окружения на энергию связи экситонов. Диэлектрическое усиление экситонов. Экситоны в гетероструктурах и сверхрешетках. Пространственная локализация экситонов. Возбужденные состояния экситонов. Учет спинового состояния для энергии экситона. Обменное взаимодействие для экситонов в нанокристаллах. Стоксов сдвиг. Экситон-фононное взаимодействие, фактор Хуанг-Рисса.

Экситоны в полупроводниковых квантовых ямах (2D-гетероструктурах)

3D



2D



$$U(r) = -\frac{e^2}{\epsilon r}$$

$$E_n^{(3D)} = -\frac{Ry^*}{n^2}$$

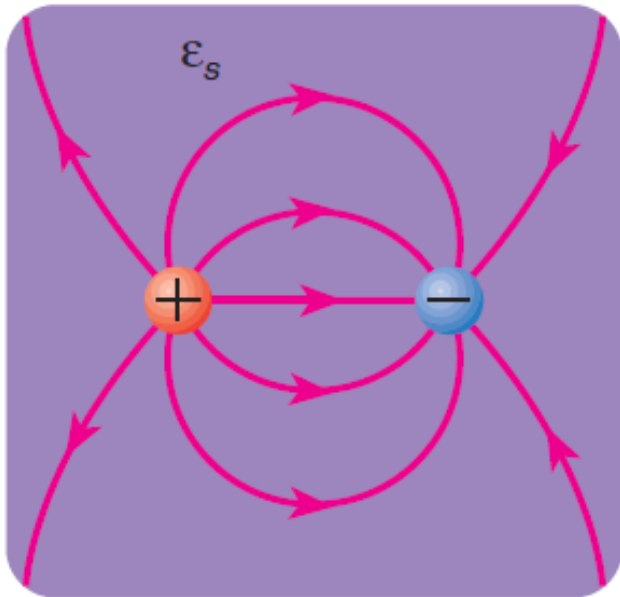
$$U_{2D}(r) = -\frac{e^2}{\epsilon r} + U_M(r)$$

$$E_n^{(2D)} = -\frac{Ry^*}{(n - 1/2)^2}$$

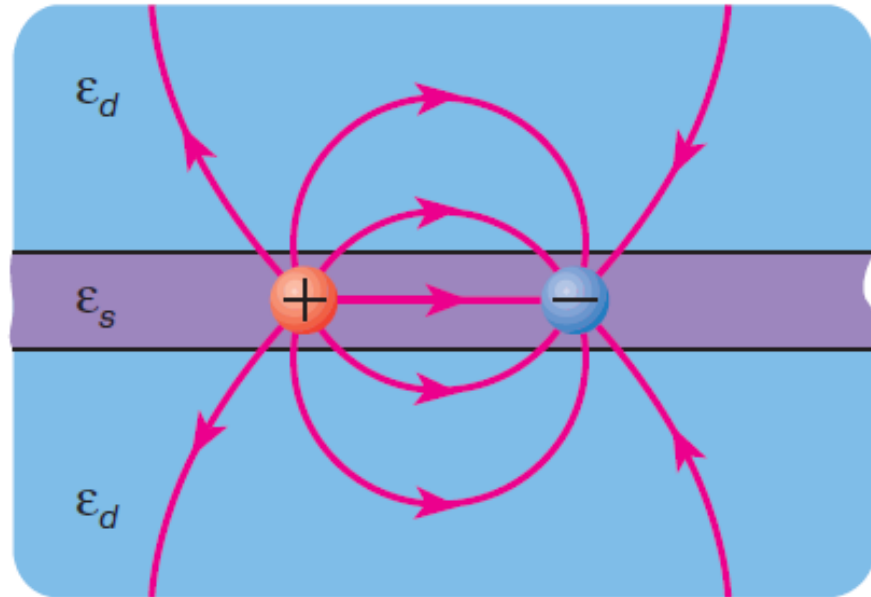
Для экситона в квантовой яме изменяется как энергия связи, так и энергетический спектр экситона.

Экситоны в полупроводниковых квантовых ямах и гетероструктурах

3D

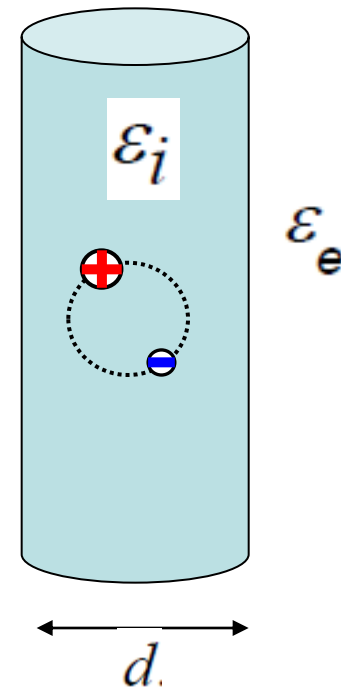
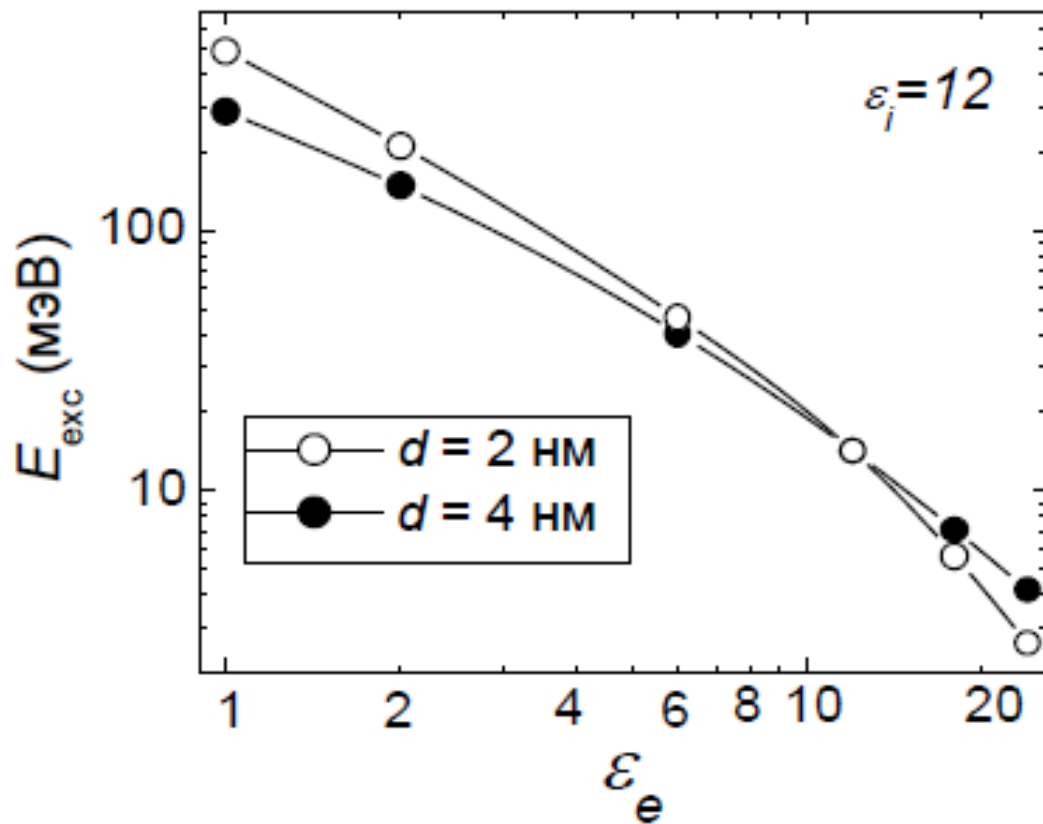


2D, 1D



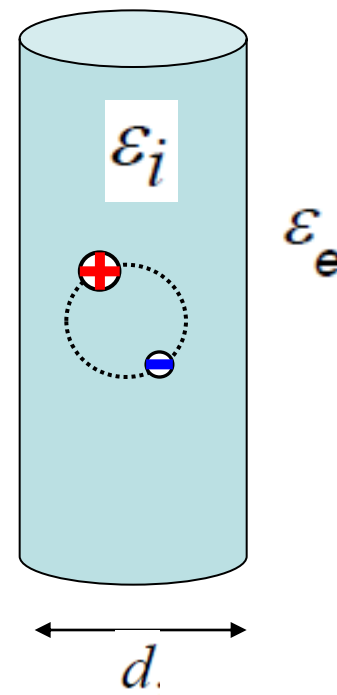
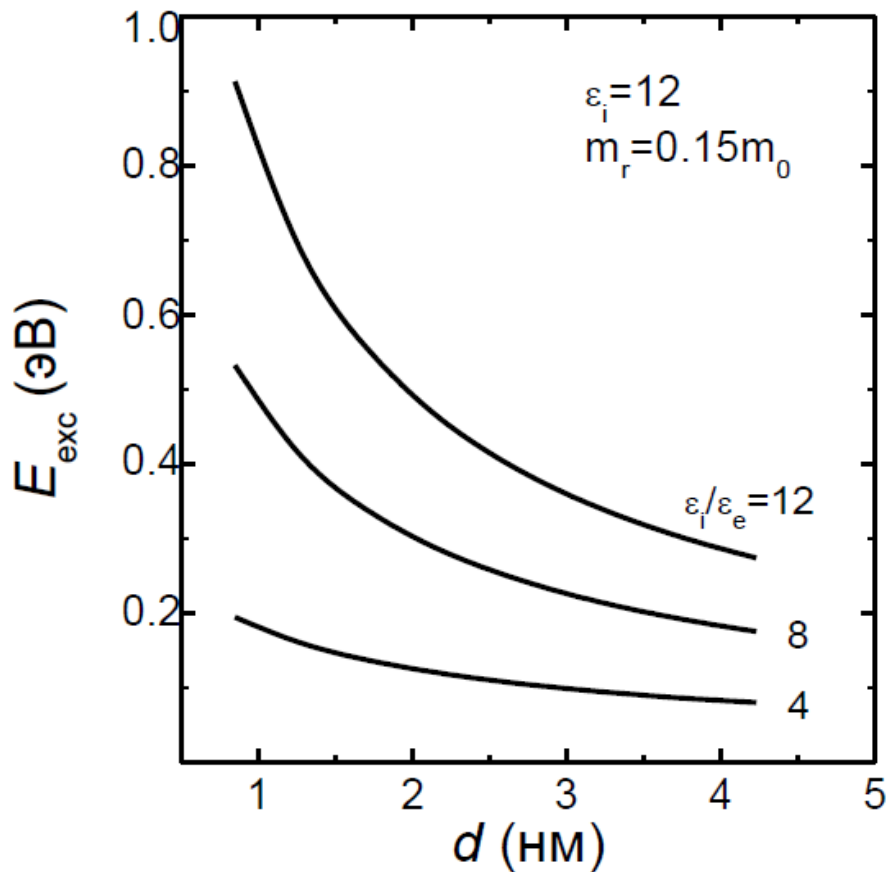
Электрическое поле экситона в квантовой яме или нити выходит за ее пределы и проникает в окружающее пространство, что меняет энергию взаимодействия, а значит энергетический спектр экситона.

Зависимость энергии связи экситонов от диэлектрической проницаемости окружающей среды (диэлектрическое усиление экситонов)



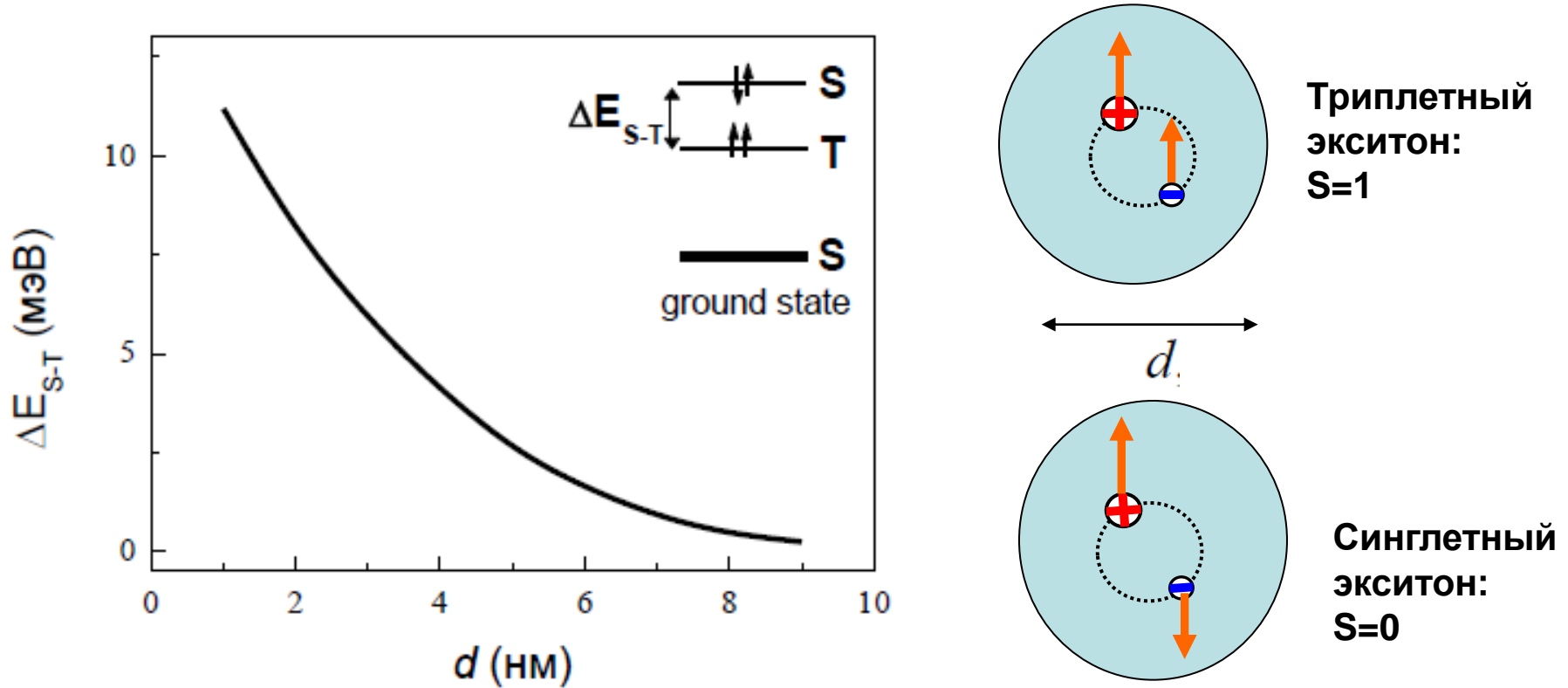
В квантовых нитях в диэлектрическом окружении может существенно увеличиться энергия связи экситонов до значений больше $k_B T = 26$ мэВ, что делает экситоны стабильными при комнатной температуре.

Зависимость энергии связи экситонов от диаметра квантовой нити



С уменьшением диаметра квантовой нити возрастает роль эффекта диэлектрического усиления экситонов.

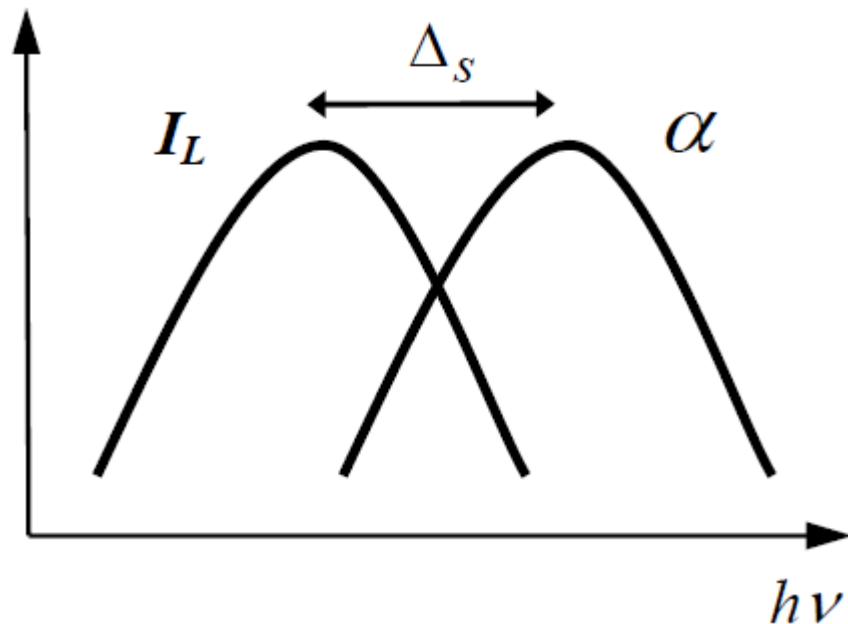
Увеличение энергии обменного взаимодействия экситонов в полупроводниковых нанокристаллах



Различие между энергиями синглетного и триплетного состояний обусловлено относительно слабым магнито-дипольным взаимодействием и поэтому весьма мало (доли мэВ) для экситонов в объемных полупроводниках. Однако в нанокристаллах обменное взаимодействие усиливается из-за сближения электрона и дырки и может достигать единиц и даже десятков мэВ.

Стоксов сдвиг в полупроводниковых нанокристаллах

В полупроводниковых нанокристаллах наблюдается заметный стоксов сдвига, определяемый как различие максимумов спектров поглощения света α и люминесценции I_L .



Для полупроводниковых нанокристаллов появление стоксова сдвига вызвано:

- 1) синглет-триплетным расщеплением экситонного уровня,
- 2) экситон-фононным взаимодействием.

Величина стоксова сдвига может быть записана в виде:

$$\Delta_S = \Delta E_{S-T} + 2f_{HR}\hbar\omega$$

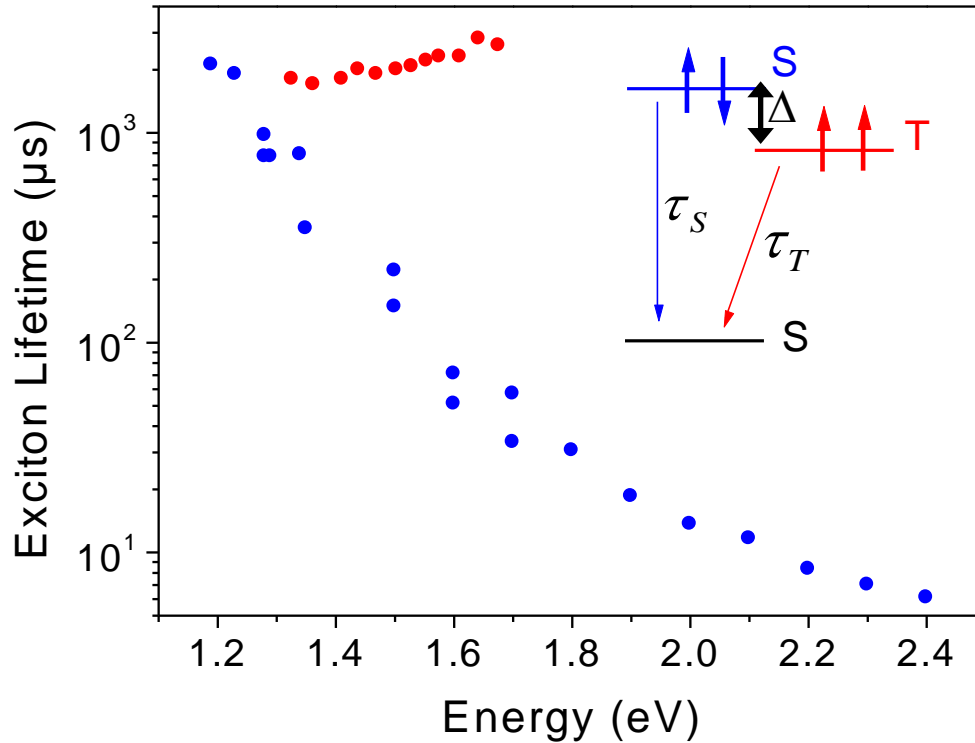
где $0 \leq f_{HR} \leq 1$ — так называемый фактор Хуанг-Риса, а $\hbar\omega \approx \hbar\omega_{LO}$.

Фактор Хуанг-Риса пропорционален числу фононов, которые могут испускаться в ходе релаксации электронного возбуждения при экситон-фононном взаимодействии.

Данный фактор возрастает в нанокоразмерных полупроводниковых структурах.

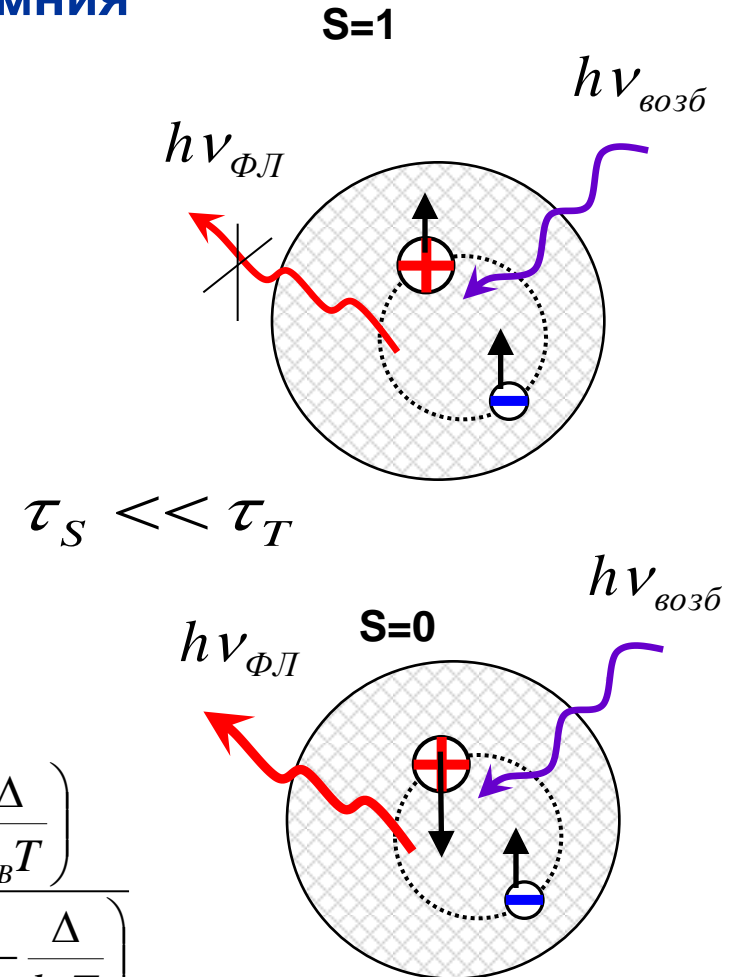
Так, например, в нанокристаллах CdSe с $d = 4$ нм: $f_{HR} \approx 0.25$, тогда как для $d = 1$ нм: $f_{HR} \approx 1$.

Пример появления спиновых свойств экситонов: Времена жизни триплетных и синглетных экситонов в нанокристаллах кремния



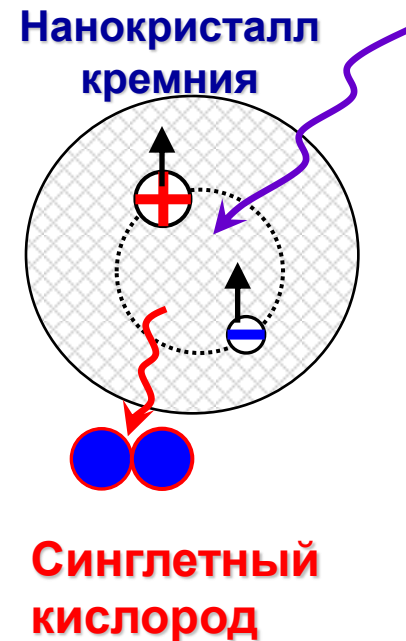
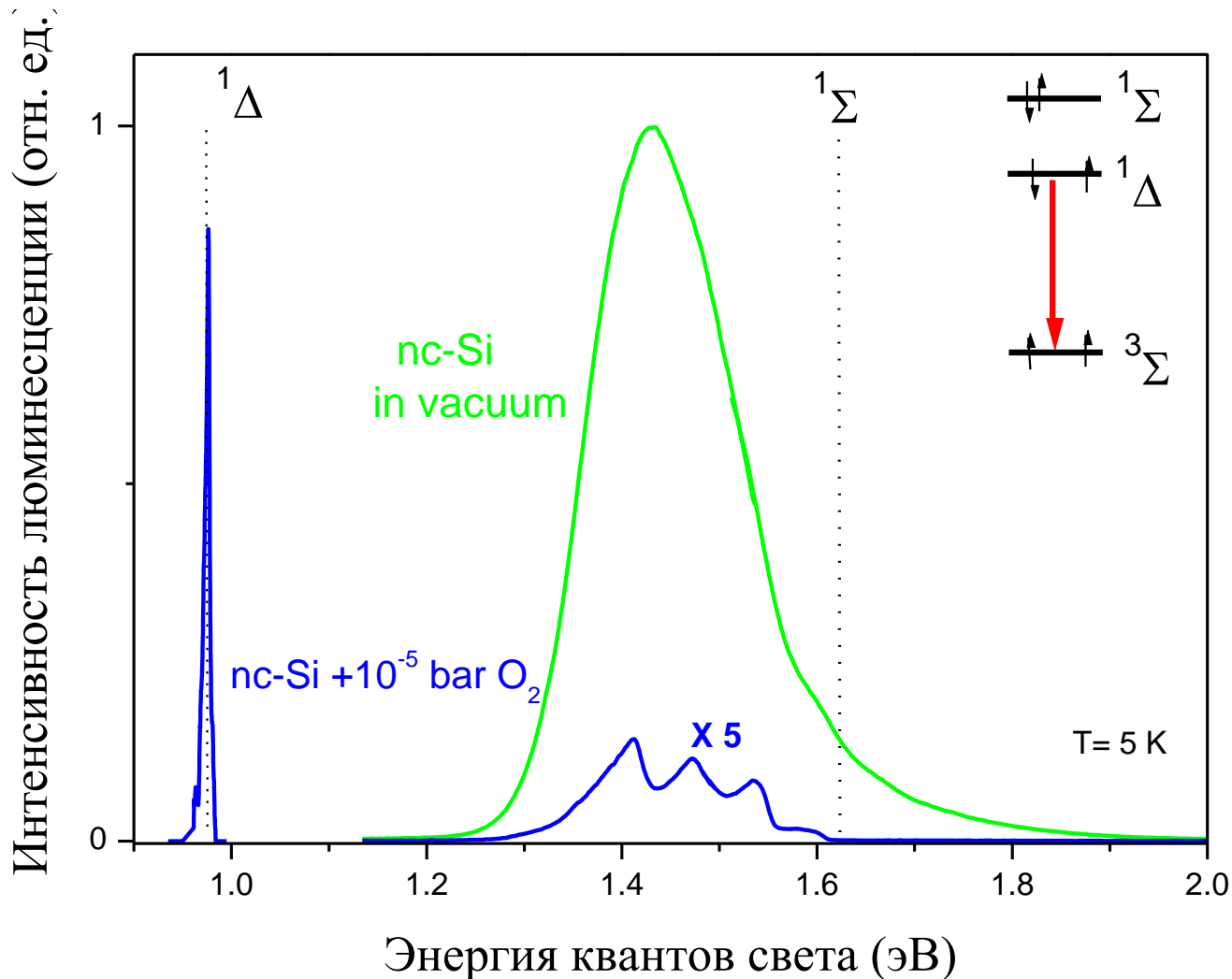
D. Kovalev et al., Phys. Stat. Sol. (1999).

$$\tau_{\Phi L} = \frac{3 + \exp\left(-\frac{\Delta}{k_B T}\right)}{3\tau_T^{-1} + \tau_S^{-1} \exp\left(-\frac{\Delta}{k_B T}\right)}$$



Времена жизни триплетных экситонов больше из-за запрета оптических переходов по спину. Полное время жизни экситона (люминесценции) зависит от синглетных и триплетных времен, энергии обменного взаимодействия и температуры.

Пример появления спиновых свойств экситонов: передача энергии от фотовозбужденных нанокристаллов кремния к молекулам O_2 с образованием синглетного кислорода



Контрольные вопросы к Лекции 12:

- В чем состоит эффект диэлектрического усиления экситонов?
- Как изменяется энергия обменного взаимодействия для экситонов в нанокристаллах по сравнению с объемными полупроводниками?
- От чего зависит величина стоксова сдвига при поглощении/испускании света в полупроводниковом нанокристалле?
- Какие экситоны (триплетные или синглетные) имеют большие времена жизни и почему ?