

# ЛЕКЦИЯ 9

Оптические методы исследования  
наноструктур.  
Основы фотолюминесценции  
Фотолюминесценция  
квантово-размерных структур.



# Фотолюминесценция - понятия



- При взаимодействии электромагнитного излучения с веществом возникает излучение, отличающееся по направлению распространения и по спектральному составу от первоначального. Это излучение называют «вторичным излучением» и оно может быть обусловлено разными процессами: отражением и рассеянием в веществе первоначального излучения, люминесценцией или тепловым испусканием вещества.
- В современном изложении люминесценцией обычно называют избыток излучения над тепловым излучением тела, соответствующим его температуре. Т.о. люминесценция относится к свечению макроскопического тела, находящегося в состоянии, близком к тепловому равновесию, т.е. имеющему определенную температуру. Однако, такое определение не отличает люминесценцию от отраженного и рассеянного света.
- С.И. Вавилов предложил дополнить понятие люминесценции критерием длительности. Согласно Вавилову люминесценцией следует называть избыток излучения в том случае, если после выключения возбуждения свечение продолжается в течении некоторого времени. Это время маленькое:  $\approx 10^{-10}$  сек. Как элементарный процесс люминесценцией будем называть спонтанное испускание света, происходящее уже после того, как ВСЕ процессы релаксации, кроме электронных перехода, закончились, и установилось тепловое квазиравновесие в возбужденном электронном состоянии.

# Фотолюминесценция - понятия



## Классификация явлений

Люминесценция классифицируется

### по длительности:

- короткое свечение – флуоресценция;
- длительное свечение – фосфоресценция.

### По способу возбуждения:

- возбуждение светом – фотолюминесценция;
- возбуждение электрическим полем – электролюминесценция;
- возбуждение рентгеновскими лучами – радиолюминесценция;
- возбуждение химическими реакциями – хемилюминесценция;
- свечение некоторых веществ в пламени – кандалюминесценция.

# МЕХАНИЗМ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

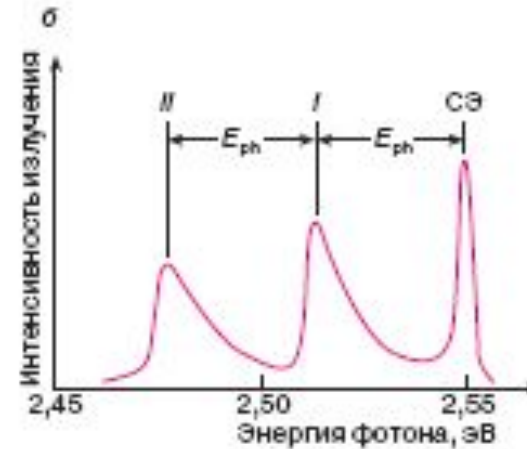
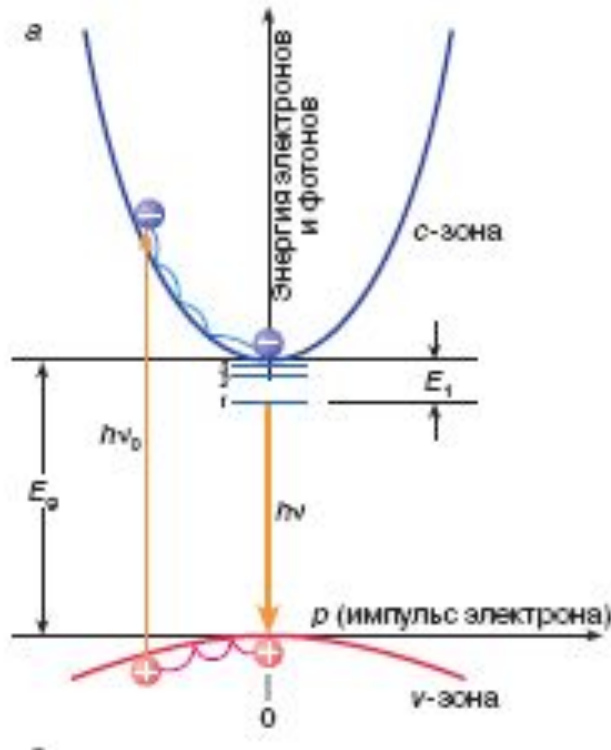


Рис. 1. Свободные экситоны в фЛ полупроводника: а – схема механизма фЛ:  $h\nu_0$  – энергия возбуждающего фотона,  $h\nu$  – энергия излученного фотона, волнистыми линиями показано остывание электронов и дырок;  $E_1$  соответствует образованию свободного экситона (см. (1)); б – спектр фЛ свободных экситонов в кристалле CdS при  $T = 60$  K: СЭ – излучательная рекомбинация свободного экситона без участия фононов; I и II – излучение свободного экситона с рождением одного и двух фононов с энергией  $E_{ph}$  [1]

выполняются законы сохранения энергии и импульса  

$$pe + ph = pph \approx 0$$

# МЕХАНИЗМ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

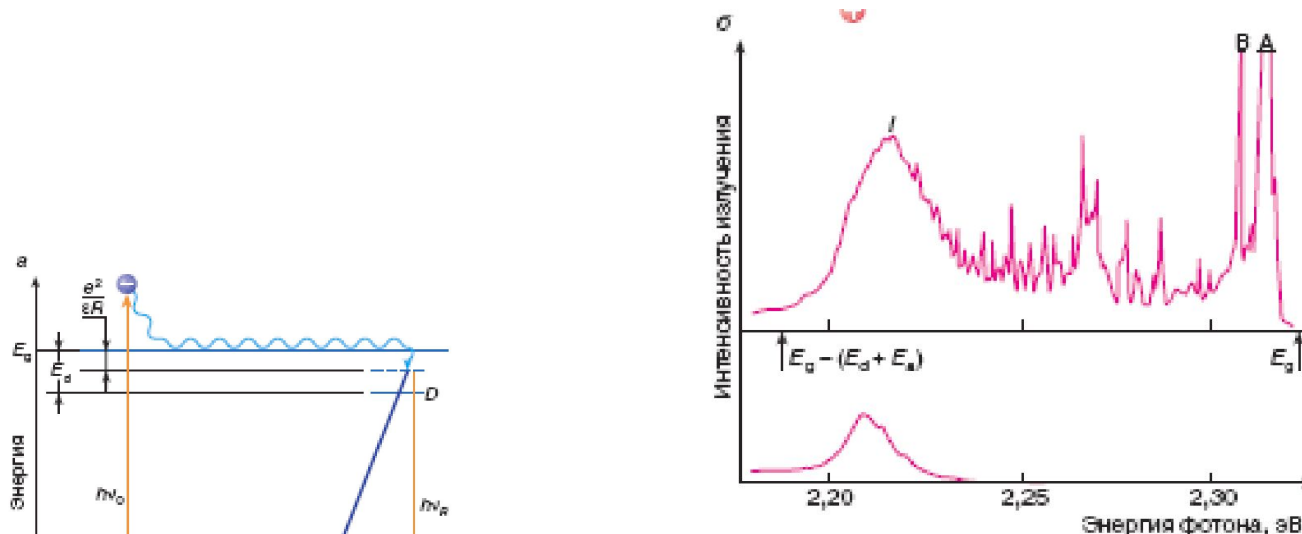


Рис. 2. Энергетические уровни доноров и акцепторов и фЛ донорно-акцепторных пар (ДАП): а – схема механизма фЛ ДАП (излучательный переход электрона с донора на акцептор);  $h\nu_0$  – энергия возбуждающего фотона, волнистые линии – оствывание электрона и дырки, их движение по кристаллу и захват донором и акцептором, находящимися на расстоянии  $R$  друг от друга; жирная стрелка – переход электрона с донора на акцептор с излучением фотона с энергией  $h\nu_R = E_d - E_a - E_s + e^2/(eR)$ ; ось  $x$  – координата в кристаллической решетке; б – спектры фЛ ДАП в кристалле GaP, легированном Si и Se до уровня  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  ( $E_d + E_s = 0,14 \text{ эВ}$ ), зарегистрированные через  $10^{-4} \text{ с}$  (верхний) и  $10^{-2} \text{ с}$  (нижний) после окончания возбуждающего импульса; узкие линии соответствуют ДАП с малыми  $R$ , полоса/образована тесно расположенными линиями излучения ДАП с большими  $R$ ; сильные линии А и В – излучение ЭПК.  $T = 1,6 \text{ К}$ .

# МЕХАНИЗМ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

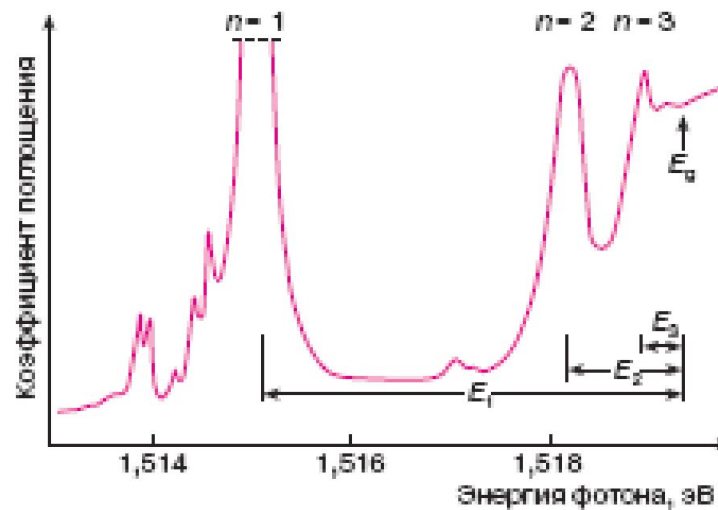


Рис. 3. Спектр поглощения кристалла GaAs при  $T = 2\text{K}$ . Широкие линии с  $n = 1, 2$  и  $3$  – свободные экситоны, которым соответствуют энергии связи  $E_1$ ,  $E_2$  и  $E_3$  в формуле (1); узкие линии слева от линии с  $n = 1$  – поглощение света с образованием ЭПК на различных нейтральных примесях

# Экситонно-примесные комплексы

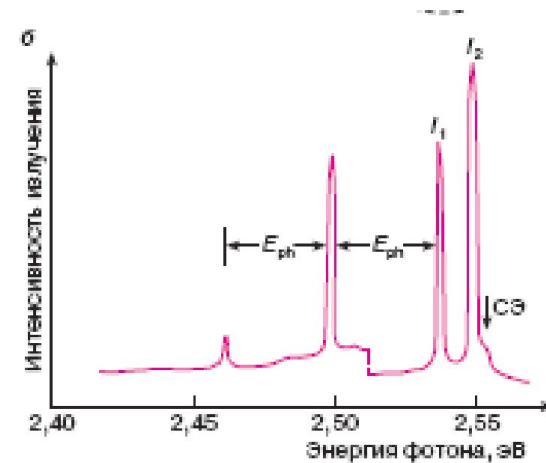
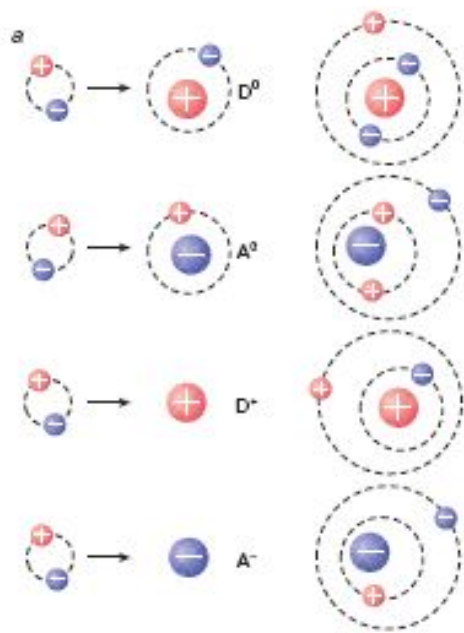


Рис. 4. Экситонно-примесные комплексы (ЭПК) в полупроводниках: а – схема образования ЭПК при захвате экситонов нейтральными и ионизированными донорами и акцепторами (соответственно  $D^0$ ,  $A^0$ ,  $D^+$  и  $A^-$ ); большие кружки – ионы атомов донора и акцептора, маленькие кружки – электроны и дырки, штриховыми линиями условно показаны их орбиты; б – спектр ФЛ кристалла CdS при  $T = 2$  К: сЭ – свободный экситон,  $I_1$  и  $I_2$  – экситоны, связанные на нейтральном доноре  $D^0$  и нейтральном акцепторе  $A^0$  (ЭПК) [2]; в левой части спектра, увеличенной в 10 раз, видны линии излучения комплекса  $I_1$  с одновременным рождением одного и двух фононов с энергией  $E_{ph}$

# Экситонно-примесные комплексы

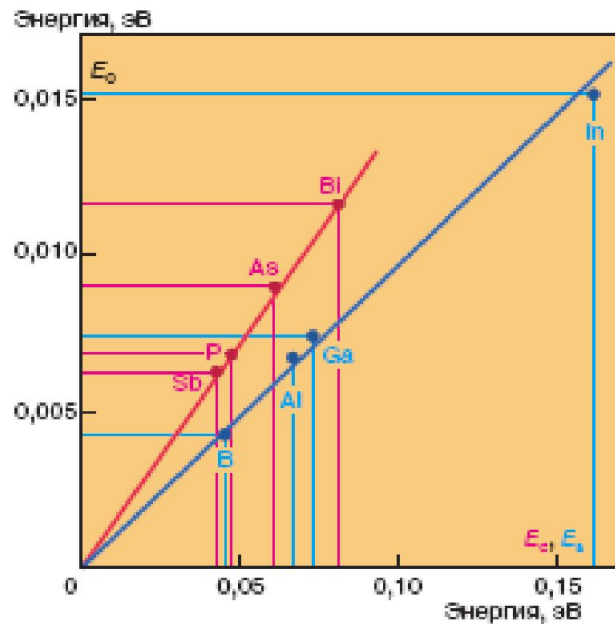
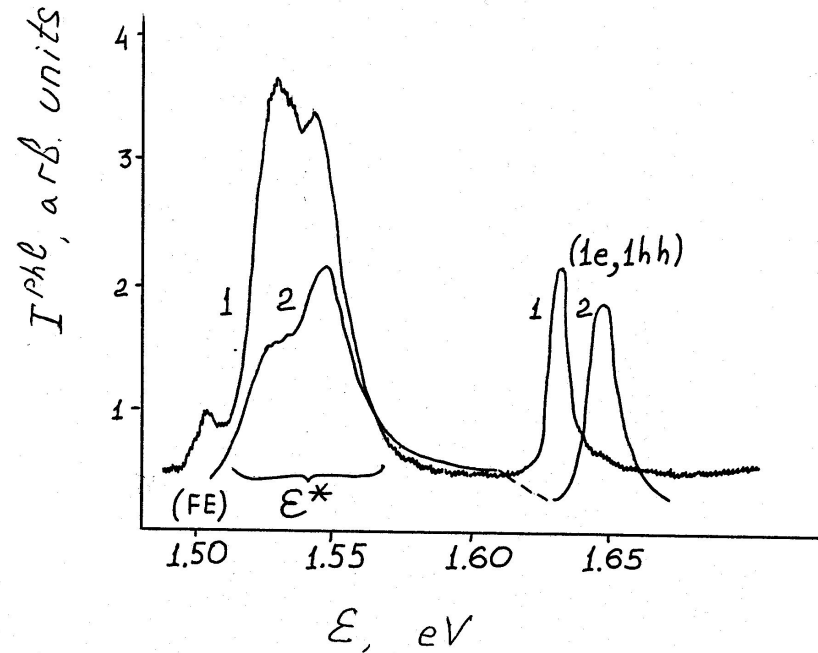
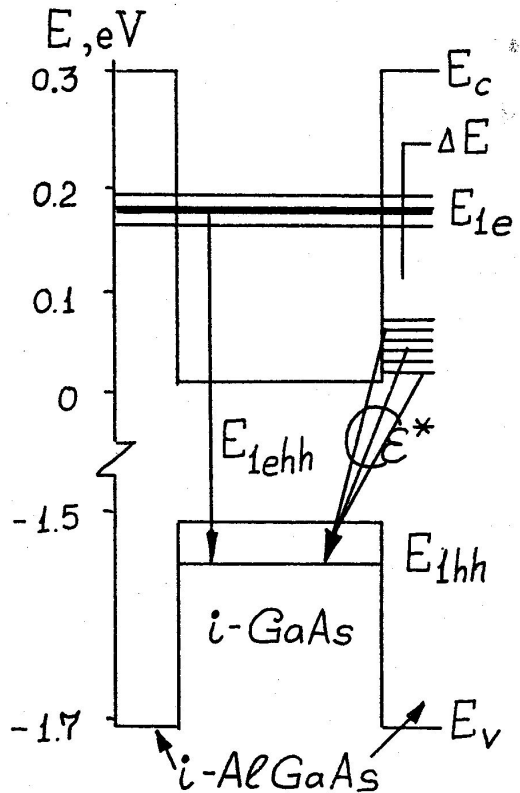


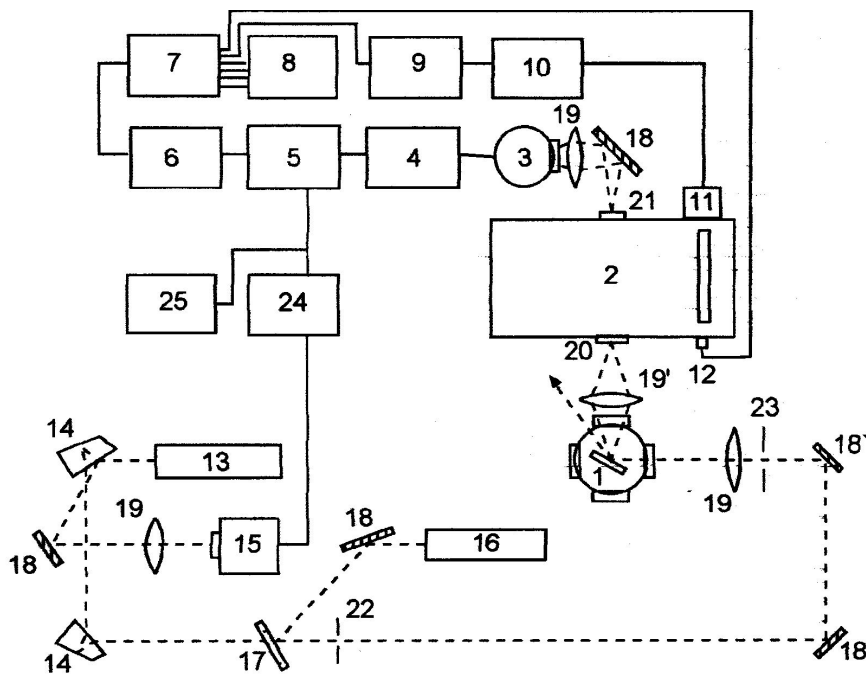
Рис. 5. Энергетические характеристики примесей и ЭПК в кремнии, легированном различными элементами III ( $p$ -тип, красный цвет) и V групп ( $n$ -тип, синий цвет). Горизонтальная ось – энергии ионизации доноров  $E_d$  и акцепторов  $E_a$ , вертикальная ось – энергии связи экситона  $E_0$  с соответствующими нейтральными донорами и акцепторами



# ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР



# МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ



Для оптической накачки  
используют лазеры:

Алюмо-иттриевый гранат с  
неодимом

Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>: Nd<sup>3+</sup>  $\lambda=1.06$  мкм

$E=1170$  мэВ  $P=1$  Вт

Полупроводниковые лазеры

$\lambda=0.662$  мкм  $E=1880$  мэВ

$P=70$  мВт

$\lambda=0.8$  мкм  $E=1550$  мэВ

$P=300$  мВт.

Рис. Блок-схема экспериментальной установки для измерений фотолюминесценции:  
1 - исследуемый образец, 2 - монохроматор, 3 - охлаждаемый фотодетектор ИКизлучения,  
4 - источник питания фотодетектора, 5 - усилитель с синхродетектором, 6 - АЦП, 7 - устройство сопряжения с ЭВМ, 8 - ЭВМ, 9 - блок управления шаговым двигателем, 10 - усилитель мощности, 11 - шаговый двигатель, 12 - датчик начального положения барабана монохроматора, 13 - возбуждающий лазер, 14 - призмы, 15 - фотодетектор-монитор, 16 - юстировочный лазер, 17 - полупрозрачное зеркало, 18 - зеркала, 19 - линзы, 20, 21 - оптические фильтры, 22, 23 - диафрагмы, 24 - усилитель опорного сигнала, 25 - осциллограф.