

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

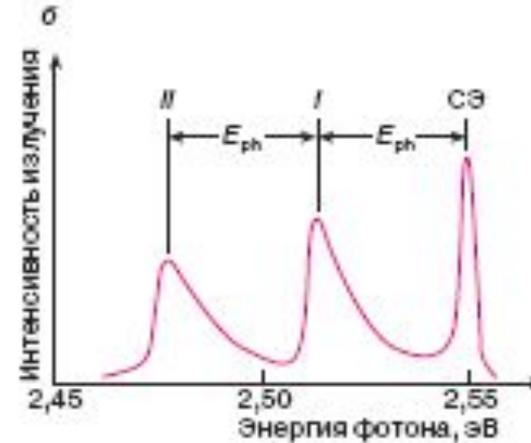
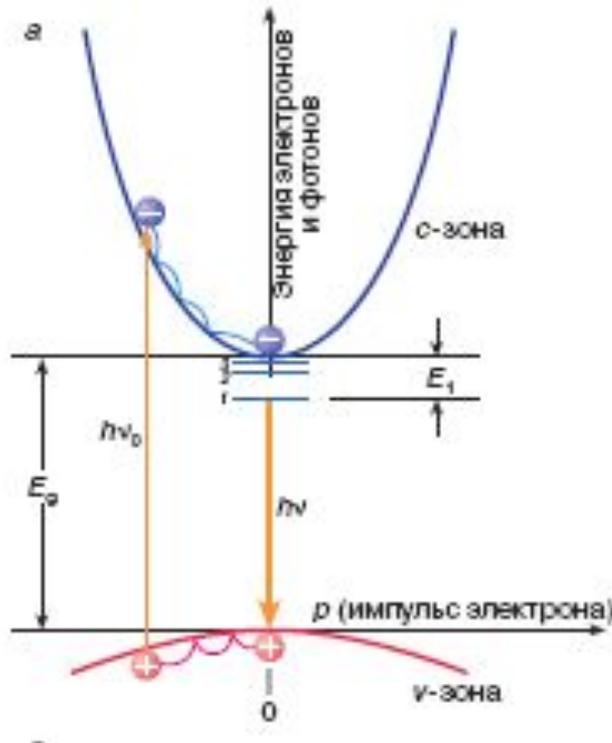


Рис. 1. Свободные экситоны в фЛ полупроводника: а – схема механизма фЛ: $h\nu_0$ – энергия возбуждающего фотона, $h\nu$ – энергия излученного фотона, волнистыми линиями показано остывание электронов и дырок; E_1 соответствует образованию свободного экситона (см. (1)); б – спектр фЛ свободных экситонов 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

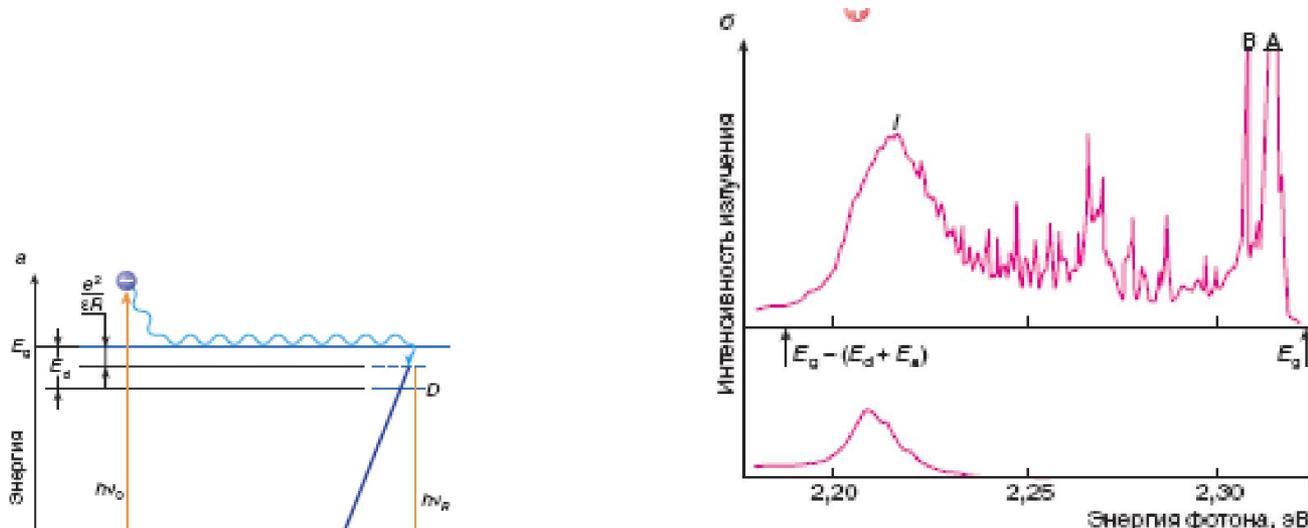


Рис. 2. Энергетические уровни доноров и акцепторов и фЛ донорно-акцепторных пар (ДАП): а – схема механизма фЛ ДАП (излучательный переход электрона с донора на акцептор); $h\nu_0$ – энергия возбуждающего фотона, волнистые линии – оствывание электрона и дырки, их движение по кристаллу и захват донором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

МЕХАНИЗМ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

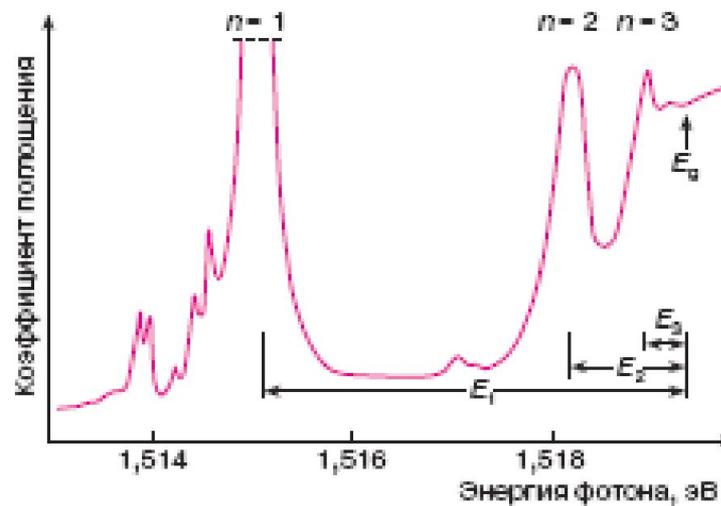


Рис. 3. Спектр поглощения кристалла GaAs при $T = 2\text{K}$. Широкие линии с $n = 1, 2$ и 3 – свободные экситоны, которым соответствуют энергии связи E_1, E_2 и E_3 в формуле (1); узкие линии слева от линии с $n = 1$ – поглощение света с образованием ЭПК на различных нейтральных примесях

Экситонно-примесные комплексы

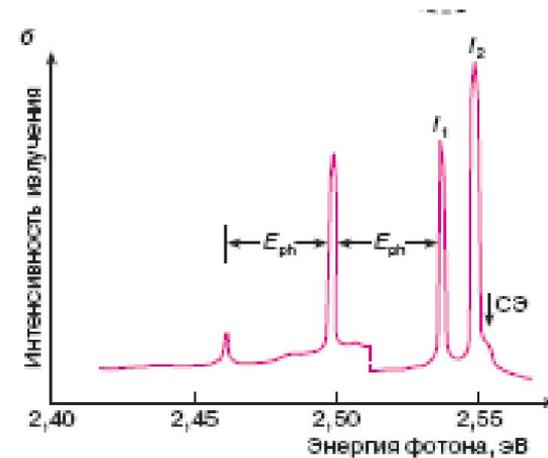
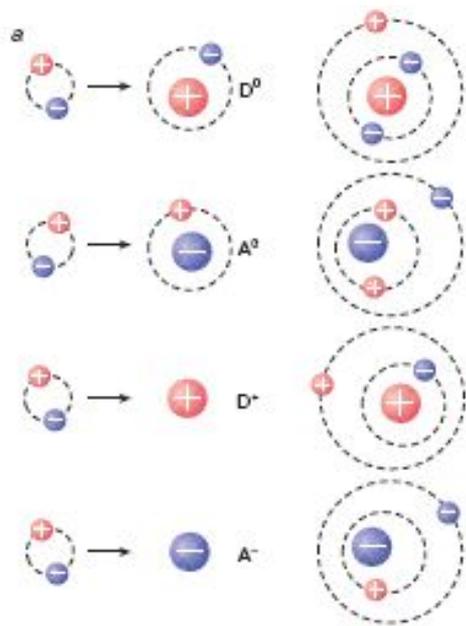
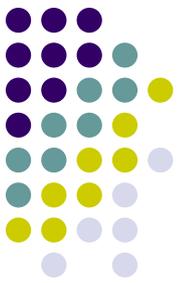


Рис. 4. Экситонно-примесные комплексы (ЭПК) в полупроводниках: а – схема образования ЭПК при захвате экситонов нейтральными и ионизированными донорами и акцепторами (соответственно D^0 , A^0 , D^+ и A^-); большие кружки – ионы атомов донора и акцептора, маленькие кружки – электроны и дырки, штриховыми 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

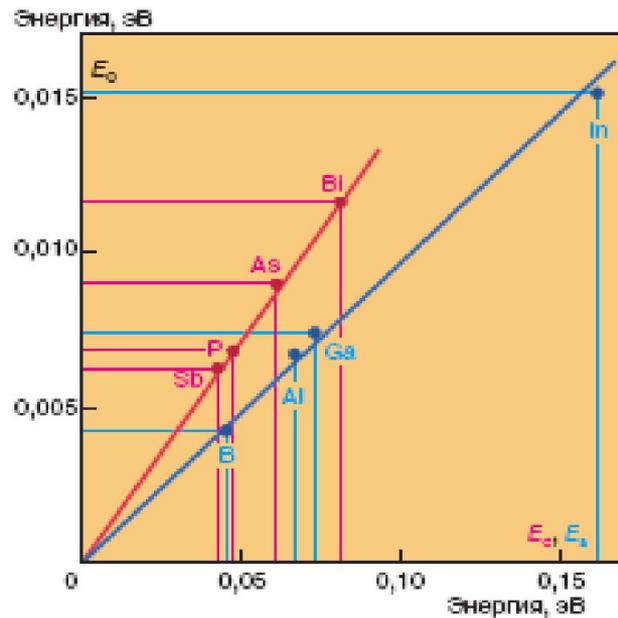
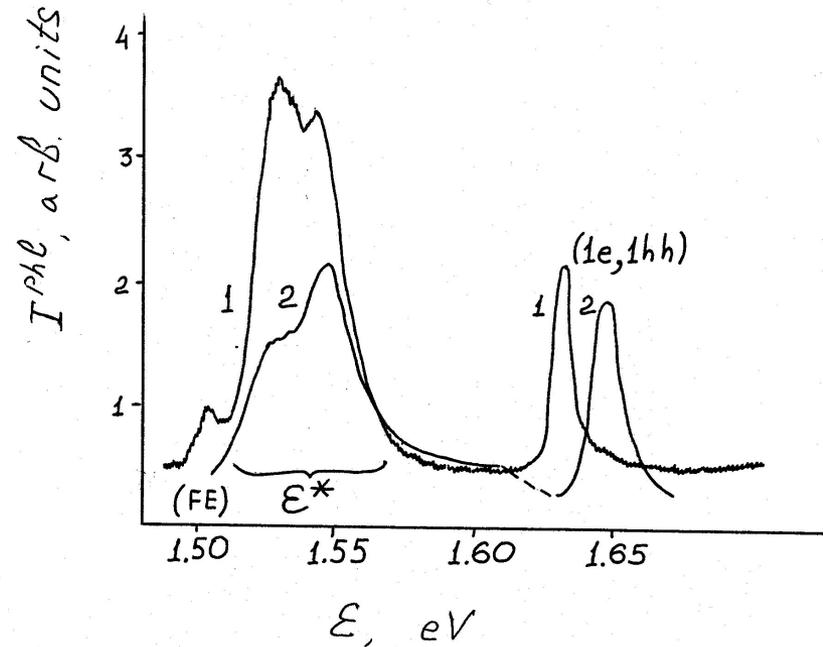
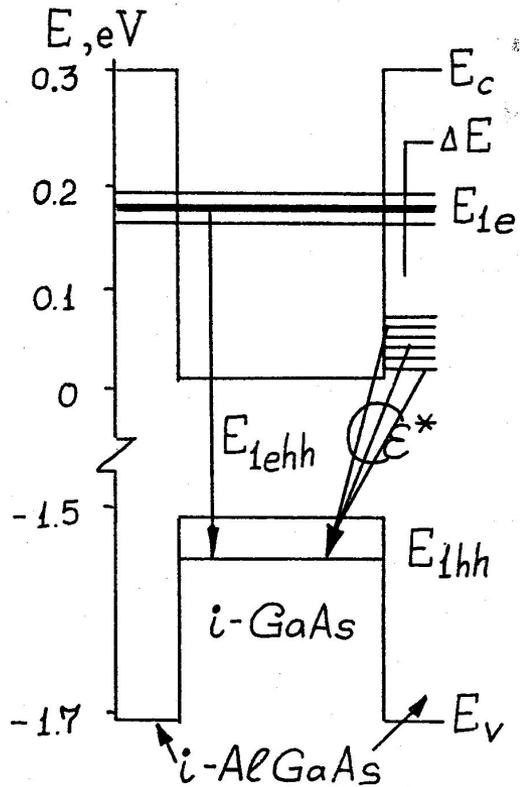
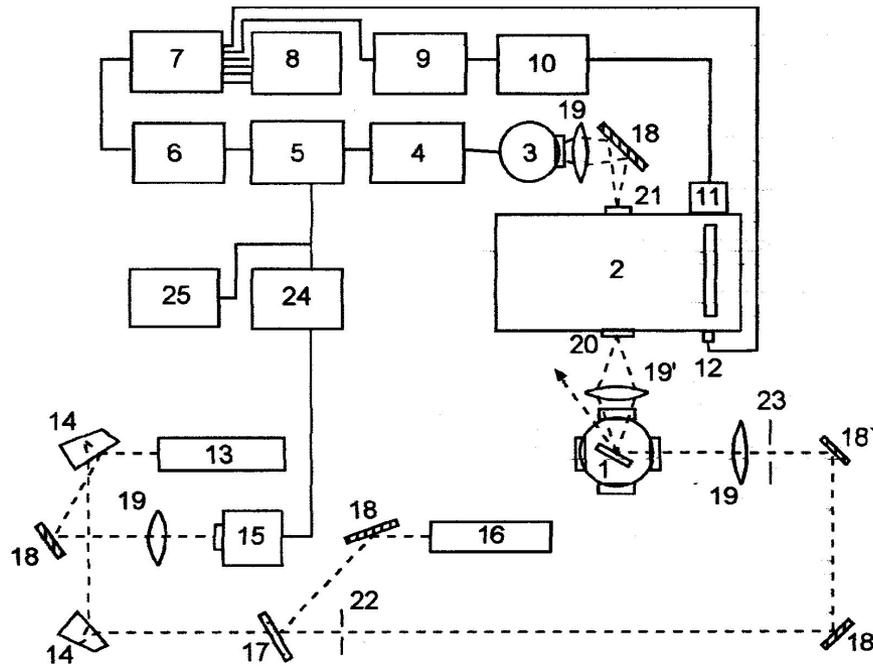


Рис. 5. Энергетические характеристики примесей и ЭПК в кремнии, легированном различными элементами III (p -тип, красный цвет) и V групп (n -тип, синий цвет). Горизонтальная ось – энергии ионизации доноров E_d и акцепторов E_a , вертикальная ось – энергии связи экситона E_0 с соответствующими нейтральными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

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР



МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ



Для оптической накачки
используют лазеры:

Алюмо-иттриевый гранат с
неодимом

Y₃Al₅O₁₂: Nd³⁺ $\lambda=1.06$ 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.