

Квантови ями, жички и точки в полупроводници  
Методи за получаване  
Някои приложения

Станислав Хаджийски, Фак № 60205

Физически Факултет

СУ „Св. Климент Охридски“

Feb 13, 2014

# Въведение

- 1 Въведение
  - „Закон“ на Мур
  - Квантовомеханични резултати
  - Квантови ями в полупроводници
  - Квантови точки – „изкуствени атоми“
- 2 Методи за получаване
- 3 Приложения



## Пречки за тенденцията

- Предвижда се 2013-2018 тенденцията да се забави
- фундаментално ограничение – размерът на атома
- проблемите започват при порядък по-големи размери – квантови ефекти:
  - $\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$  – нужда от охлаждане
  - „тунелиране“ на електроните
- преминаване към квантова електроника

## Вълнова функция $\psi$

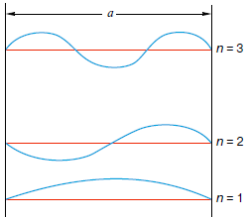
Състоянието на частиците в квантовата механика се описва посредством функция на състоянието  $\psi$  (вълнова функция).  $|\psi(x)|^2$  има смисъл на вероятностна плътност.

## Условие за наблюдение на КМ явления

За да можем да наблюдаваме квантовомеханични явления, необходимо е разстоянието между съседни енергетични (дискретни) нива да е по-голямо от енергията на топлинно движение

$$E_n - E_{n-1} \gg kT$$

# Безкрайна едномерна потенциална яма



- Вълновата функция е ограничена в ямата

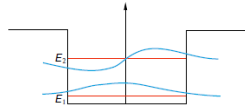
- $$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right)$$

- $$E_n = \frac{p_n^2}{2m} = \frac{\hbar^2 k_n^2}{2m} = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2ma^2} n^2$$

нивата  $E_n$  са свързани с ширината на потенциалната яма

# Крайна едномерна потенциална яма

- оказва се, че дори при  $E_{\text{пълна}} < E_{\text{пот}}$  е възможно преминаването през бариера
- в този случай  $\psi(x)$  затихва експоненциално с разстоянието



## Тунелен преход

Възможността вълновата функция  $\psi(x)$  да преодолее потенциален бариер дори при по-малка от него пълна енергия на разглежданата частица

# Квантови ями, жички, точки

- Ямата ограничава енергетичните нива в дадено направление до дискретен спектър
- двумерна яма наричаме „квантова жичка“
- тримерна – „квантова точка“



# Квантови ями в полупроводници

нанасяне на тънък филм от полупроводник с малка забранена зона между слоеве полупроводник с по-широка

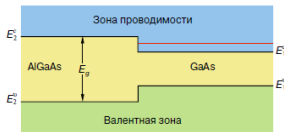
- електроните с енергия

$E_1^c < E < E_2^c$  виждат бариера на прехода

- добавянето на втория слой полупроводник с широка

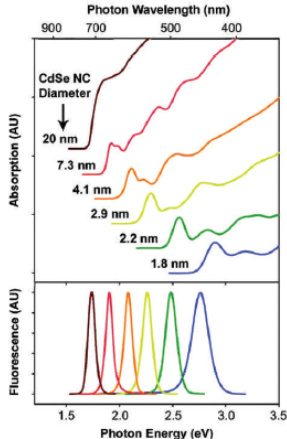
забранена зона затваря ямата

Заради дискретния спектър на състоянията в ямата, електронният газ можем да считаме за ограничен до двумерен



- квантовата точка е тримерна потенциална яма
- електронният газ е ограничен изцяло до дискретни енергии
- разглеждане като изкуствени атоми в зависимост от броя свободни електрони в КТ
- луминесценция
  - поглъщане на светлина води до създаване на квазичастица екситон
  - рекомбинацията на електрона и дупката води до излъчване

# Луминесценция на квантови точки



- $\lambda$  зависи от  $E_n$  в КТ, те зависят от размерите  $\dot{y}$
- широк спектър на поглъщане
- възможно е да се постигне Стоксово отместване  $\geq 100$  nm
- $FWHM \approx 25 - 35$  nm
- големи времена на живот на възбуденото състояние ( $> 10$  ns)

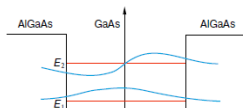
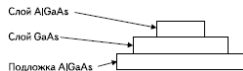
## Луминесценция на квантови точки

Квантовите точки могат да бъдат използвани като цветни маркери. Излъчваният „цвет“ може да бъде избран чрез контрол размерите им, възможно е активирането на луминесценцията посредством един и същи източник за различни маркери. Това ги прави подходящи за безоперативно изследване на тъкани и кръвоносни съдове.

# Методи за получаване

- 1 Въведение
- 2 Методи за получаване
  - Молекулярно-лъчева епитаксия
  - Мосхидридна газофазна епитаксия
  - Колоиден синтез
- 3 Приложения

## Молекулярно-лъчева епитаксия



- Подложка от полупроводник с широка забранена зона
- Чрез нагряване се осигурява поток от атоми на полупроводник с тясна зона
- Работи се при висок вакуум
- Подходящ материал е  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 
  - решетката има сравнително постоянна константа - избягване на дислокации
  - с  $x$  расте ширината на забранената зона
  - за външните слоеве  $x \approx 0,15 - 0,35$
- Също се използват CdSe, ZnSe, CdS, ZnS, InAs, InP, Si и т.н.

## Предимства на МЛЕ

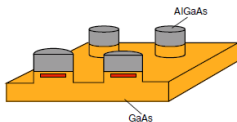
- добре отработен метод
- контрол над дебелината на отложения слой до няколко константи на решетката
- чрез комбинация на този метод, маскиране и ецване се получава ями, жички и точки
- при подбор на полупроводници с различна константа на решетката възникват еластични сили, събиращи отложените атоми в „капки“ и „острови“ – за получаване на квантови точки

## Неудобства при МЛЕ

- наличието на подложка
- нуждата от скъпо вакуумно оборудване



## МЛЕ за квантови точки



- Подложка от полупроводник с тясна забранена зона
- Нанасяне на слой от този с широка, обогатен с донорни елементи
- Електрони от донорите преминават в долния слой
  - енергетично по-изгодно
  - не могат да се отдалечат – фиксирани за донорния атом
  - образуване на двумерен електронен газ
- маскиране и ецване – образуваните цилиндри са квантови точки

## Мосхидридна газофазна епитаксия

- Израстване на квантовите точки в газова фаза, при атмосферно налягане
- Работна температура между 430-650°C
- Отделно подаване в реактора на пари на As и Ga(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub> или In(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>
- Най-силен интензитет на луминесценция – при легиране с CCl<sub>4</sub> и температура ~580°C

## Колоиден синтез

- Израстване на квантови точки в течна фаза
- Предпочитан материал – CdSe
- $\text{Cd}(\text{CH}_3)_2$  и Se се разтварят в триалкилфосфин
- Впръскване на сместа в предварително загрят ( $\sim 350^\circ\text{C}$ ) триоктилфосфин
- Отгряване. Кристалните зародиши се появяват при  $\sim 300^\circ\text{C}$

# Предимства и недостатъци на колоидния синтез

## Предимства:

- сравнително евтин метод – може да се използва за промишлено производство
- чрез контрол над параметрите може да се избират формата и диаметъра на получените квантови точки

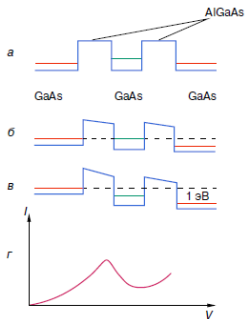
## Недостатъци:

- методът е сравнително нов и неотработен
- обикновено е нужно емпирично определяне на желаните концентрации и скорост на отгряване за постигане на желания резултат

# Приложения

- 1 Въведение
- 2 Методи за получаване
- 3 Приложения**
  - Електроника
  - Биология и медицина

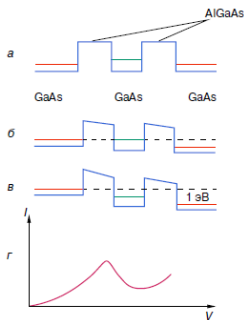
# Резонансен тунелен диод



- попадане в ямата чрез тунелен преход
- само дискретни енергии в ямата
- интерференцията гаси сигнала – не може да се върне
- вероятността за преминаване през втория бариер резонансно нараства при енергии на електроните  $\equiv E_n$

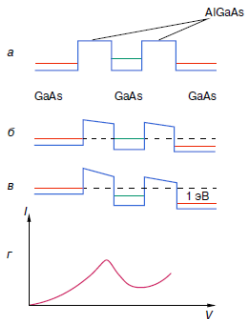
# Резонансен тунелен диод

## Действие на прибора:



- малко напрежение  $\Rightarrow$  малка енергия  $\Rightarrow$  малък ток
- токът расте с напрежението до достигане на  $E_n$  за електроните
- допълнително нарастване на напрежението води до повишение на отражението
- брой максимуми = брой енергетични нива

# Резонансен тунелен диод

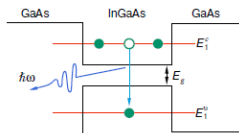


## Приложения:

- За схеми с комплексна логика
- Чрез добавяне на извод, контролиращ енергетичните нива  $E_n$  може да бъде конструиран транзистор



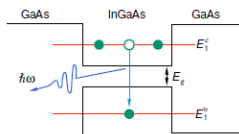
# Квантовоточков лазер



- подобни на полупроводниковите лазери – преход между основните нива в зоната на проводимост и валентната зона на квантовата яма
- $\hbar\omega = E_1^v + E_1^c + E_g$
- InGaAs играе роля на активна среда
- инверсна заселеност се постига дори по-лесно (отново чрез напрежение)
- за резонатор служи легирания слой – с по-голям коефициент на пречупване  $\Rightarrow$  като оптично влакно

# Квантовоточков лазер

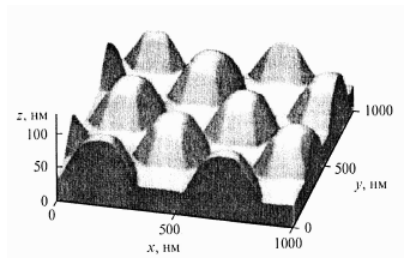
## Предимства:



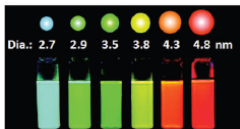
- лесно пренастройване на честотата – контролираме  $E_1^c$ ,  $E_1^v$  чрез ширината на ямата
- много голяма ефективност – до 60% от електрическата мощност се преобразува в лъчение

## Други електронни приложения

- Светодиоди
- покрития за съществуващи светлинни източници
- близки квантови точки на подложка с по един свободен електрон биха могли да бъдат използвани в квантовата информатика – поради близостта възниква спиново взаимодействие, можем да повлияем на цялата система, променяйки само един от спиновете



## Флуоресцентни маркери

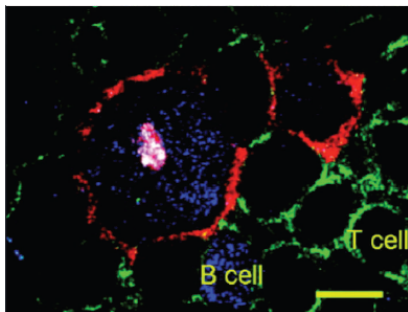


- приложението е основано на радиационното рекомбиниране на двойките електрон-дупка
- подобно на лазера, възможно е да пренастройваме честотата посредством размера на частиците
- широк спектър на поглъщане – възможно е да активираме с един източник повече от един маркер
- пиковете на излъчване са тесни – лесно може да се отделят от лъчението на тялото както и да се постигне минимално застъпване в излъчвателните спектри
- диагностика на кръвоносни съдове и аневризми
- токсичност? Търсене на най-подходящите материали

## Комплекс КТ-антитяло

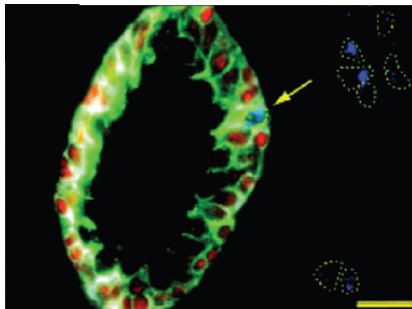
Комплекс от квантова точка и антитяло може да бъде използван за локализиране и визуализиране на положението на отделни клетки (например ракови)

## Комплекс КТ-антитяло



*Детекция на HRS туморна клетка. Дължината на скалното деление е 10  $\mu\text{m}$ . 4 маркера: червен – мембрана; бял – апарат на Голджи; син – ядро; зелен – мембрана на Т клетки*

## Комплекс КТ-антитяло



*Почти незасегната от ракови клетки тъкан. Единствената злокачествена клетка (в синьо) е отбелязана със стрелка*

## Комплекс КТ-антитяло

При добавяне на магнитна наночастица в комплекса е възможно

- След прикачане към подвижни туморни клетки комплекса може да бъде насочен към сборен пункт с външно поле – отстраняване от кръвния поток чрез апарат за диализа
- възможно е (безоперационно) обезвреждане и унищожаване на туморните клетки чрез локално нагряване
  - променливо магнитно поле
  - стремеж да се подбере температурата на Кюри така, че да няма опасност от коагулация на белтъците



## Lab On a Chip (LOC)

- чип, специализиран в извършване на няколко лабораторни дейности
- например за диагностика на кръвен серум за HIV-позитивност
- възможно е върху чипа да бъдат разположени голям брой отделни клетки с различни комплекси, съдържащи квантови точки (КТ-антитяло за бактериални/вирусни заболявания; КТ-РНК за геномни изследвания)
  - светване/изгасване на точката
  - просто отместване на излъчвателния спектър
  - цялостна промяна на спектъра на излъчване/поглъщане
- анализиране на данните чрез микроскоп, или автоматизирано, чрез колориметрична система

## Използвана литература I

- [1] В.Я. Демиховский. Квантовые ямы, нити, точки. Что это такое. *Соросовский образовательный журнал*, (5):80–86, 1997.
- [2] Виталий Грибачев. Методы получения и применения квантовых точек. *Компоненты и Технологии*, (9):127–130, 2009.
- [3] С.И. Борисенко. *Физика полупроводниковых наноструктур*. Издательство Томского политехнического университета, 2010.
- [4] Eleonora Petryayeva, W. Russ Algar, and Igor L. Medintz. Quantum dots in bioanalysis: A review of applications across various platforms for fluorescence spectroscopy and imaging. *focal point review*, 67(3):215–252, 2013.