

第七章 异质结、量子阱、超晶格和量子Hall效应

§ 1 异质结

§ 2 量子阱

§ 3 超晶格

§ 4 量子Hall效应

§ 5 碳纳米管

§ 1 异质结

- 两种不同质的材料构成的接触称为异质结。
- 制作方法：气相外延，液相外延，真空蒸发法，阴极溅射，分子束外延等
- 按组分转变情况分突变异质结和缓变异质结。
- 按构成异质结的材料分为同型异质结和异型异质结。
- 异质结的禁带宽度可能相同，也可能不同，我们主要讨论禁带宽度不同的情形。
- 二十世纪五十年代开始提出异质结的设想，异质结的形成通常是通过异质外延的方法制备的。经常形成超晶格结构，在半导体激光器和高迁移率晶体管（HEMT）领域有应用。目前已经制成高效率的异质结光电池和发光管，双异质结的半导体激光器，超晶格结构等。

禁带宽度不同的两种单晶材料一起构成的晶体界面成为异质结，例如 GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $\text{InP}/ \text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{P}_y$ 异质结。

若异质结两边材料的导电类型相同，则成为同型异质结，如 n- GaAs/ N- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, p-GaAs/ p- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 。

若两种材料的导电类型不同，则为异型异质结，如 n- GaAs/ P- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 。

在这些表达中，我们通常以小写的 n, p 表示窄带隙材料，以大写的 N, P 表示宽带隙材料。

■ 半导体异质结的能带结构

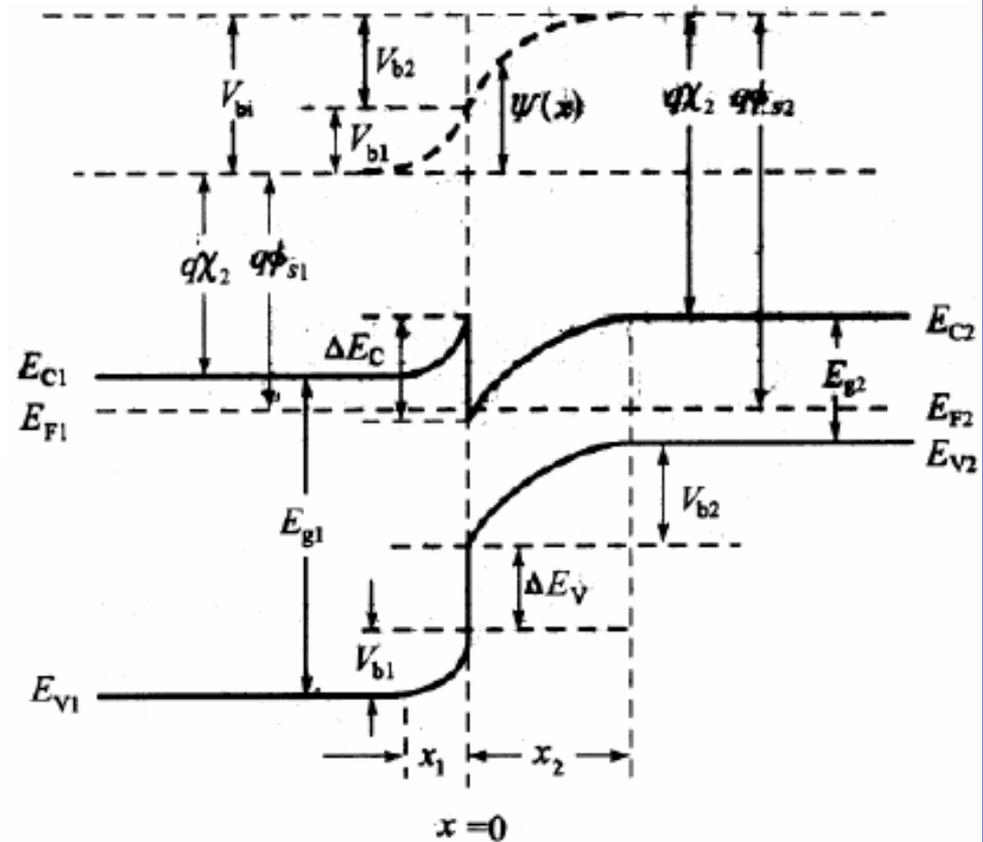
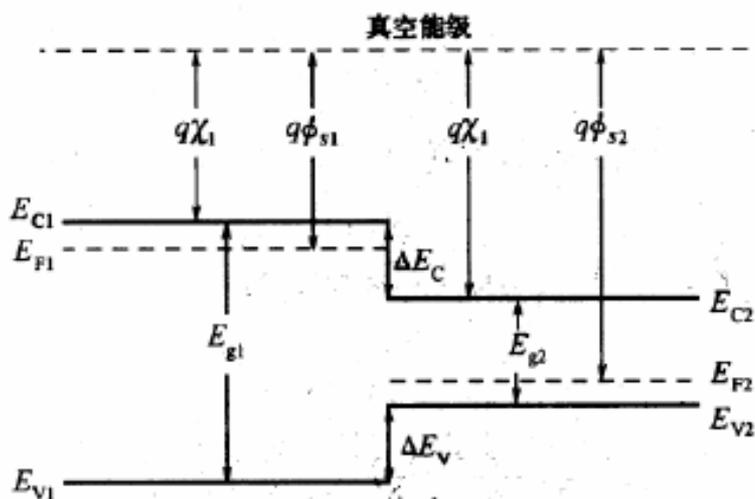
异质结的能带结构与构成异质结材料的禁带宽度、禁带失调有关。设构成异质结材料的禁带宽度分别为 $E_{g1} > E_{g2}$ 。

■ 禁带的失调可能有三种情形：

- 1) E_{g2} 包含在 E_{g1} 之间，如 $Ga_{1-x}Al_xAs$ 与 $GaAs$ ；
- 2) E_{g1} 与 E_{g2} 禁带相互错开，如 $Ga_{1-x}In_xAs$ （下）和 $GaAs_{1-x}Sb_x$ （上）；
- 3) 二者没有共能量，如 $InAs$ （下）与 $GaSb$ （上）

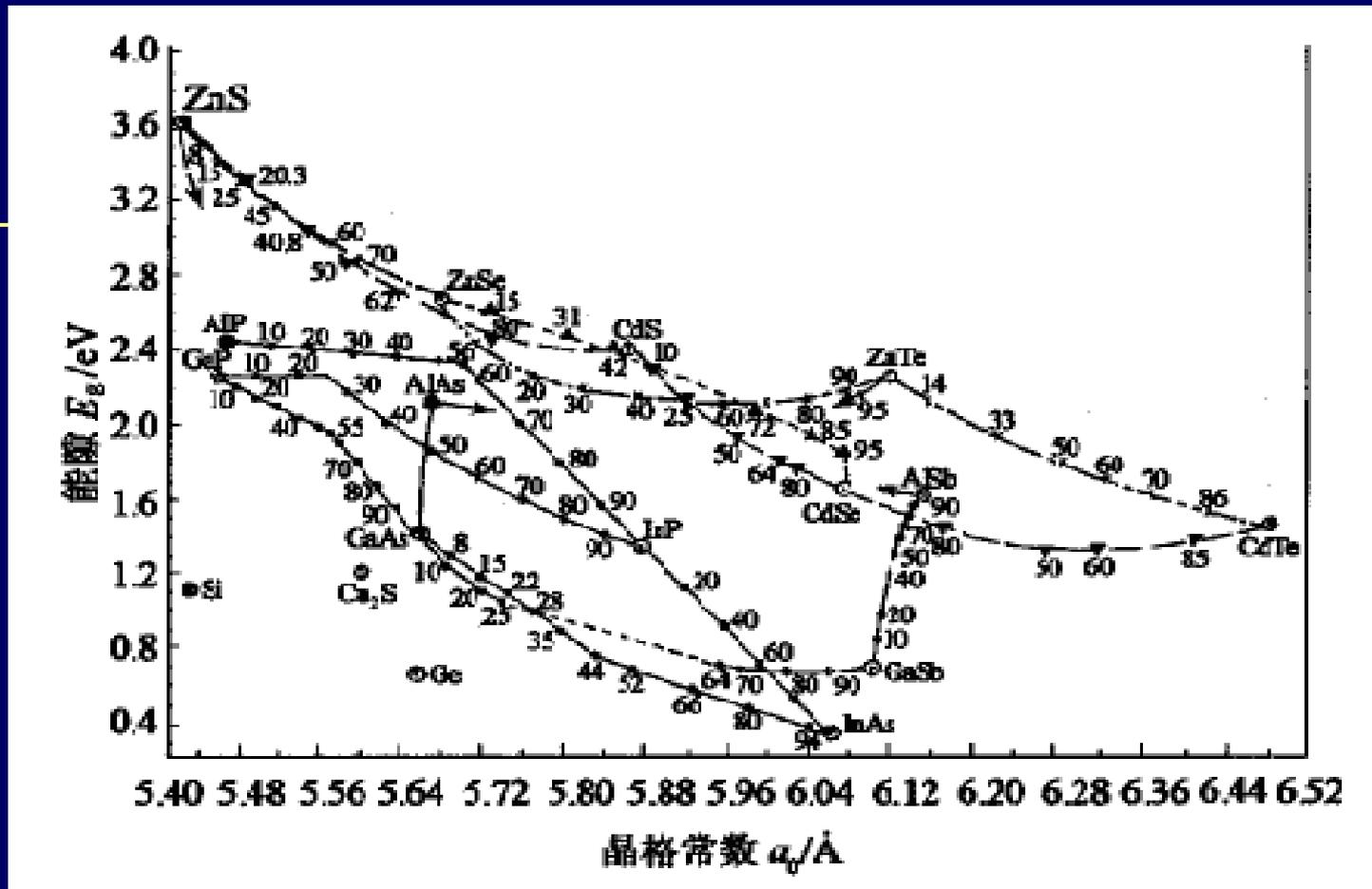
正确画出异质结的能带结构，需要给出禁带宽度差、导带或价带带差，才能获得。这些值的取得，需要利用能带计算和实验的对比，才能获得。

可以假定：导带的失调由材料的亲和势或功函数的差决定，由此，在获得禁带宽度差的条件下，即可获得正确的能带结构。



为了解释N—P Ge—GaAs异质结的实验现象，Anderson在1962年提出一个异质结的理论模型。

- 安德森模型假定两种材料具有完全相同的晶体结构、晶格常数和热膨胀系数，这样就可以把由这些差别而产生的悬键和界面态的影响忽略不计，凡晶格失配小于1%的异质结都成立。



$$\text{晶格失配} = \frac{\Delta a}{a} = \frac{2|a_1 - a_2|}{a_1 + a_2}$$

$$\varepsilon_1 E_1 = \varepsilon_2 E_2$$

$$x_1 = \left[\frac{2N_{A2}\varepsilon_1\varepsilon_2(V_{bi} - V)}{qN_{D1}(\varepsilon_1N_{D1} + \varepsilon_2N_{A2})} \right]^{1/2}$$

$$x_2 = \left[\frac{2N_{D1}\varepsilon_1\varepsilon_2(V_{bi} - V)}{qN_{A2}(\varepsilon_1N_{D1} + \varepsilon_2N_{A2})} \right]^{1/2}$$

$$C = \left[\frac{qN_{D1}N_{A2}\varepsilon_1\varepsilon_2}{2(\varepsilon_1N_{D1} + \varepsilon_2N_{A2})(V_{bi} - V)} \right]^{1/2}$$

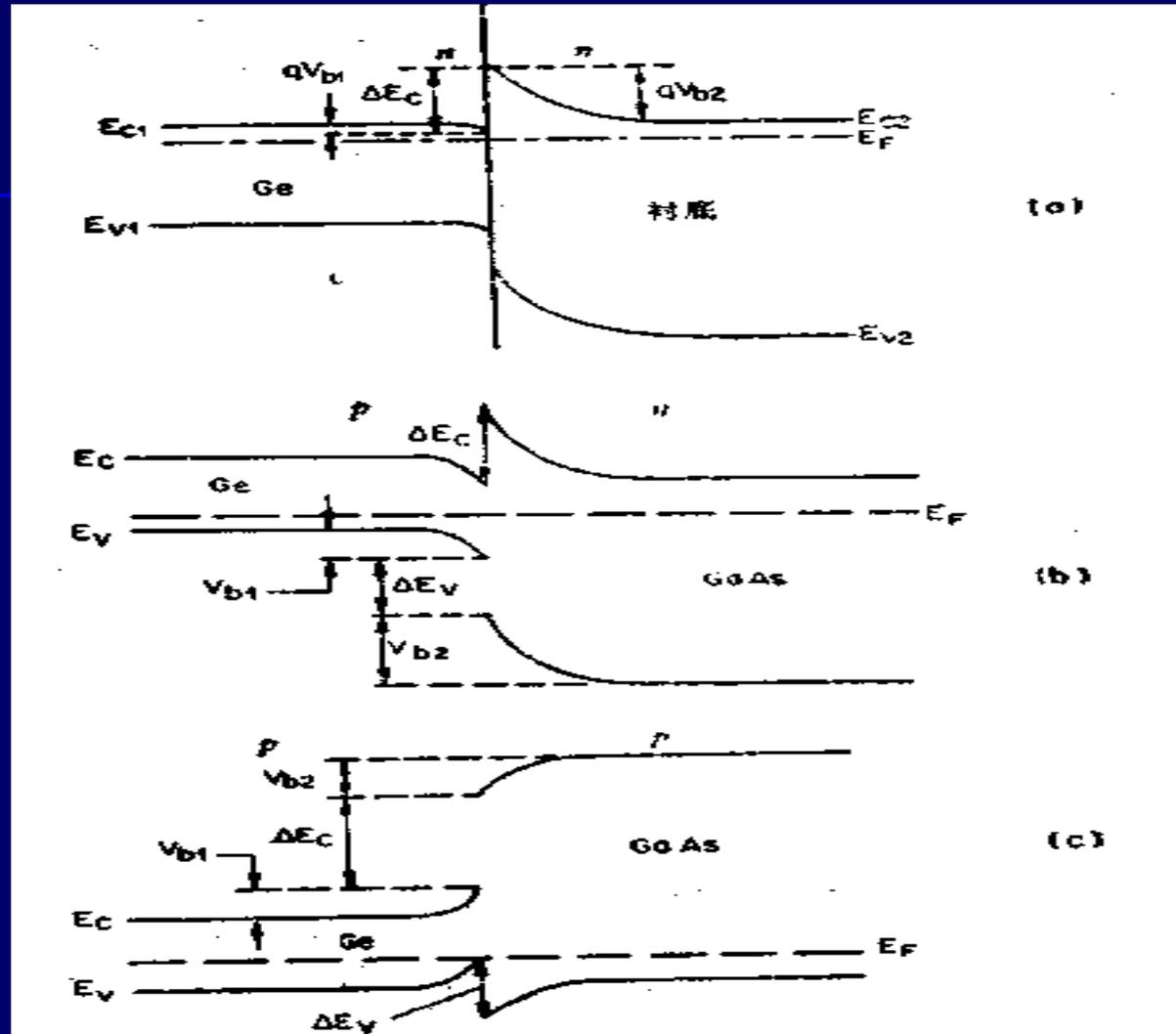
$$x_m = x_2 + x_1 = \left[\frac{2\varepsilon_1\varepsilon_2V_D(N_{A2} + N_{D1})^2}{qN_{D1}N_{A2}(\varepsilon_1N_{D1} + \varepsilon_2N_{A2})} \right]^{1/2}$$

异质结的运输电流

$$I = A e^{-\frac{qV_{D2}}{kT}} \left[e^{\frac{qV_2}{kT}} - e^{-\frac{qV_1}{kT}} \right]$$

$$J = J_0 \left(1 - \frac{V}{V_{bi}} \right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right]$$

$$J_0 \equiv \frac{qA^*TV_{bi}}{k} \exp\left(-\frac{qV_{bi}}{kT} \right)$$



■ 异质结的较为重要的电流模型分为五种：

- ① 安德森模型 即热发射电流模型。
- ② 简单隧道模型 Rediker于1964年提出，在考虑热发射电流机构的同时，计入了尖峰势垒的隧道效应
- ③ 隧道电流模型 伴随有界面复合作用在内的隧道复合过程。
- ④ 界面态复合模型 Van Ruyven 1965年提出，考虑两种材料在界面态进行复合。
- ⑤ 复合—隧道模型 隧道电流和热发射电流，且二者在界面态上汇合的复合隧道模型。

■ 实际上，异质结往往同时存在多种电流机构，哪种机构为主将取决于界面上的能带不连续性和界面态参数情况。

■ 主要用途：高效率的光电池、发光管和激光器等。

异质结的应用

- 异质结的主要应用之一是形成量子阱。它由两个异质结背对背相接形成的。
- 异质结的主要应用之二是形成超晶格。它由异质结交替周期生长形成。超晶格是**Esaki**和**Tsu**在**1969**年提出的。
- **Esaki**等提出的超晶格有两类：**1**) 同质调制掺杂；**2**) 异质材料交替生长。
- 超晶格或多量子阱间的共振隧穿效应

§ 2 量子阱

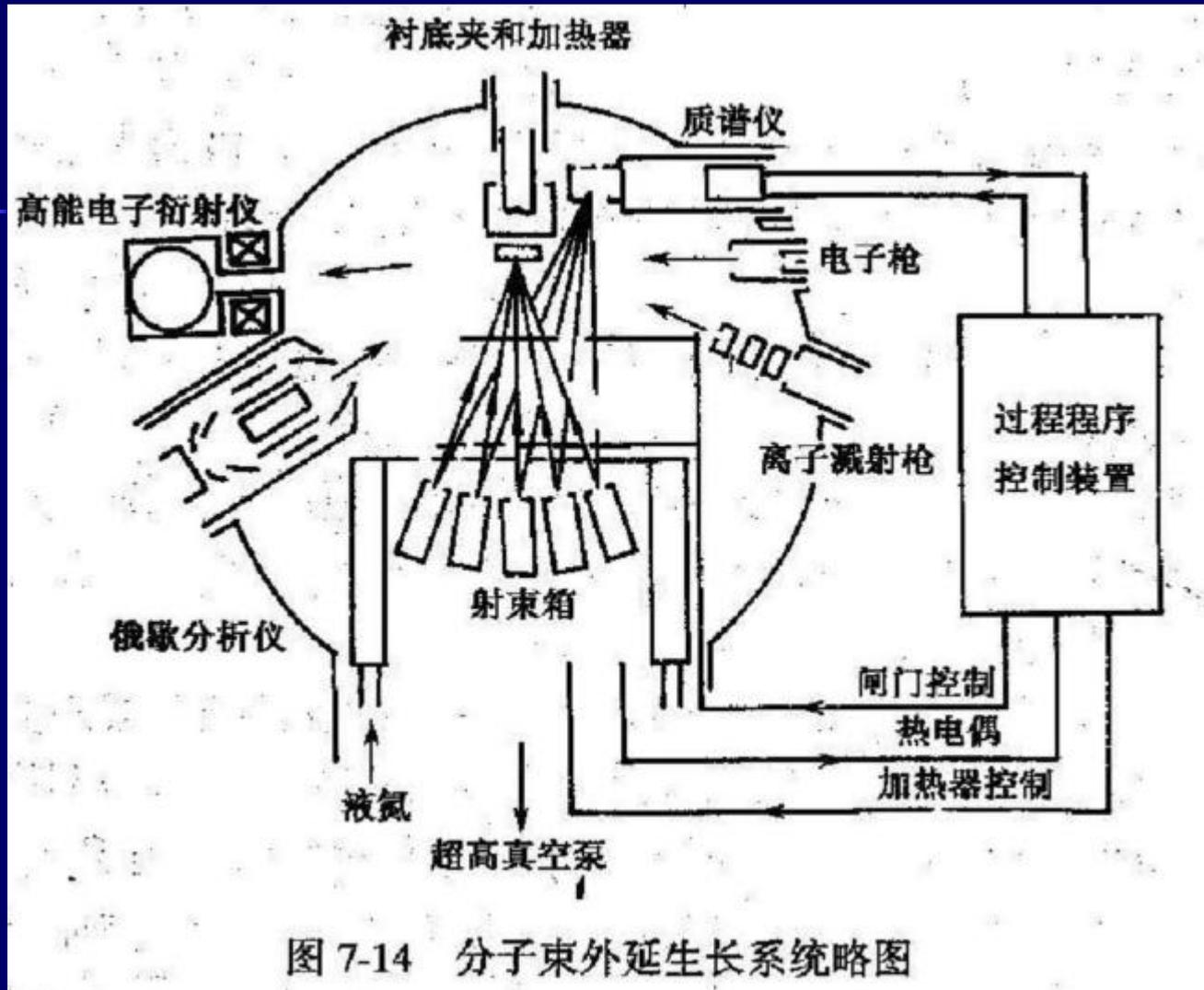
- 尺寸量子化
- 量子阱
- 微结构
- 外延生长法

量子阱

- 无限方形势阱
- 有限方形势阱
- 三角势阱
- 抛物型势阱
- 二维电子气
- 低维电子气（量子线、量子点）

微结构的生长和形成

- 分子束外延法
- 化学气相淀积法



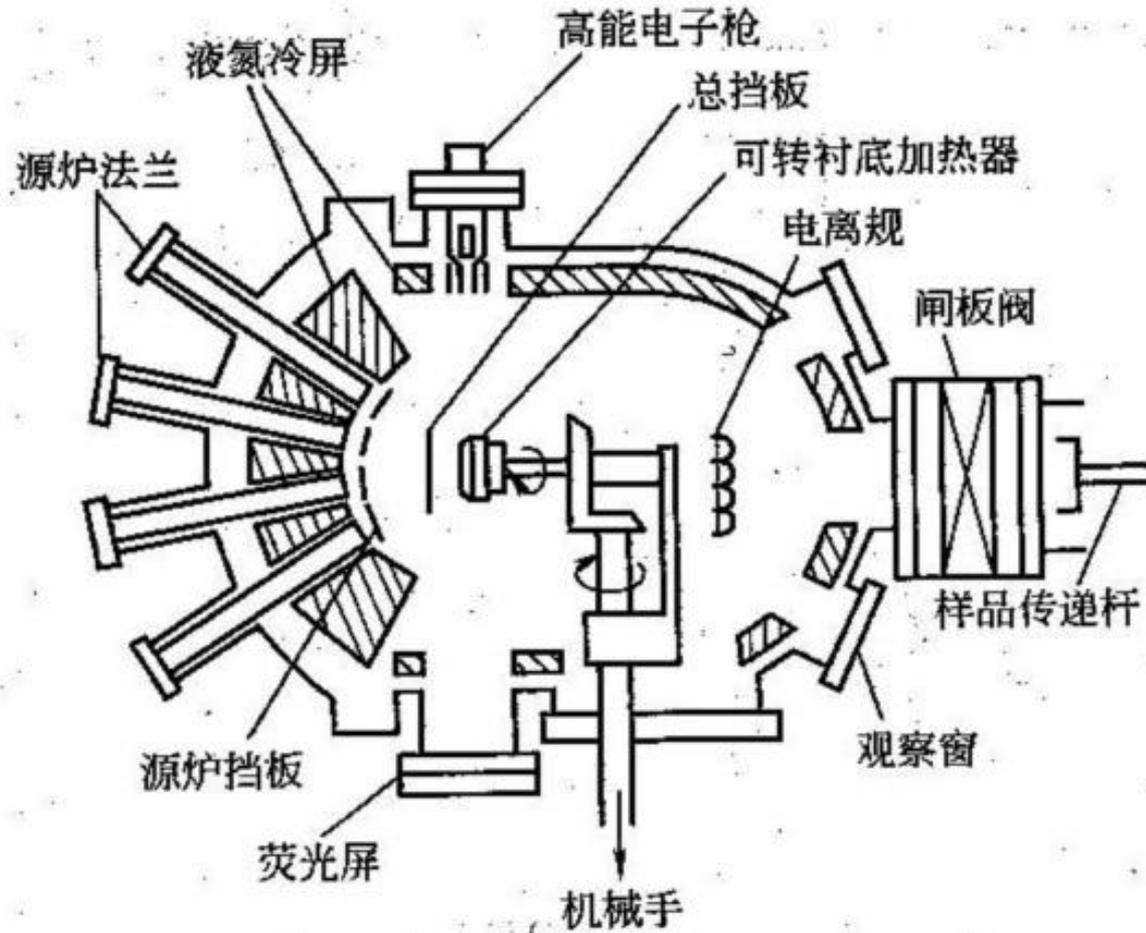


图 11-29 MBE 生长室结构示意图

§ 3 超晶格

超晶格的概念

- 组分超晶格
- 掺杂超晶格
- 量子线超晶格
- 量子点超晶格

超晶格的能带

- $E \sim k$ 关系
- 态密度

§ 4 量子Hall效应

- 量子Hall效应基本物理图像
- 出现Hall平台的可能的物理机制
- 整数量子Hall效应和分数量子Hall效应

§ 5 碳纳米管

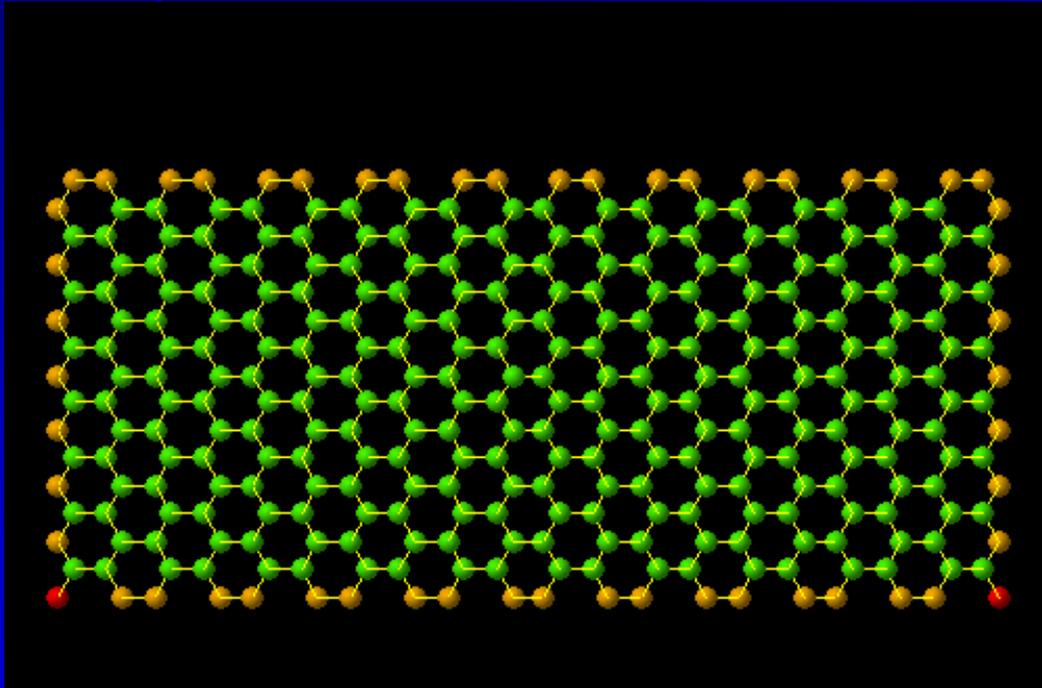
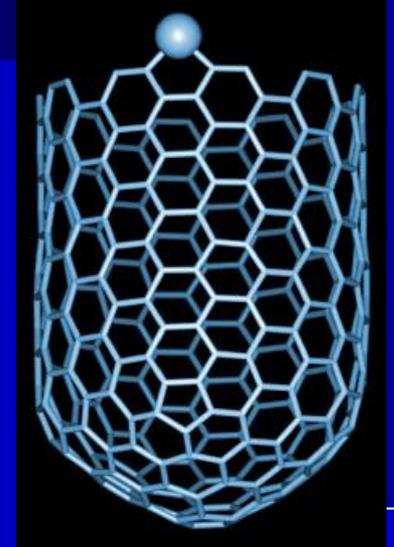
- 能带结构
- 碳纳米管的特性
- 碳纳米管的应用

Carbon Nanotube

CNT is a tubular form of carbon with diameter as small as 1 nm.

Length: few nm to cm.

CNT is configurationally equivalent to a two dimensional graphene sheet rolled into a tube.

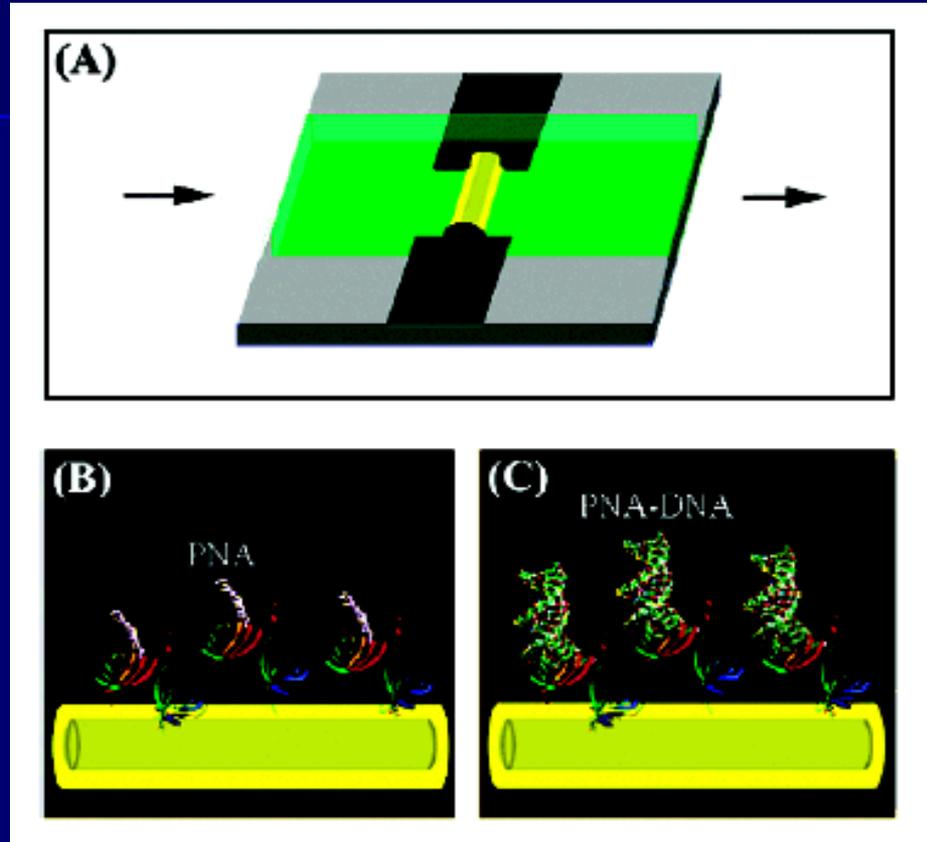


CNT exhibits:

1. Carrier mobility $\sim 100,000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
2. Young's modulus over 1 Tera Pascal, as stiff as diamond;
3. Tensile strength $\sim 200 \text{ GPa}$.

CNT can be metallic or semiconducting, depending on chirality.

Si Nanowires as DNA sensors



Microfluidic
process

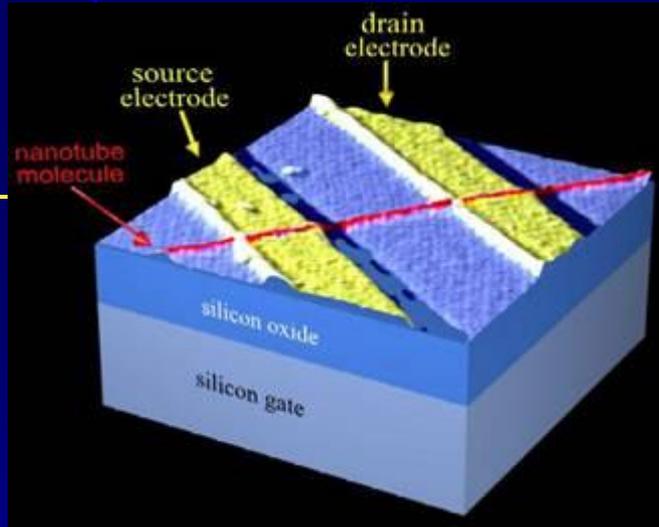
PNA
receptor

PNA-DNA
duplex

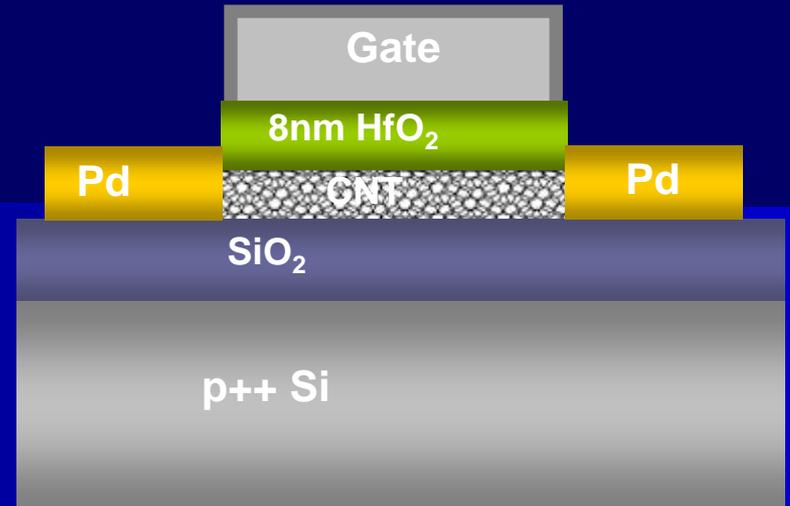
Avidin-modified NW was linked with biotinylated PNA probes, and followed by DNA hybridization.

Lieber, 4, 51, 2004

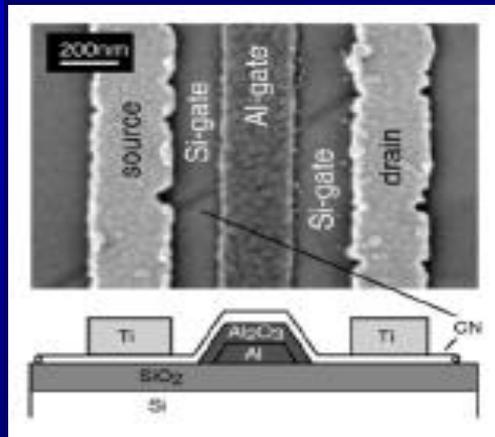
CNT FETs



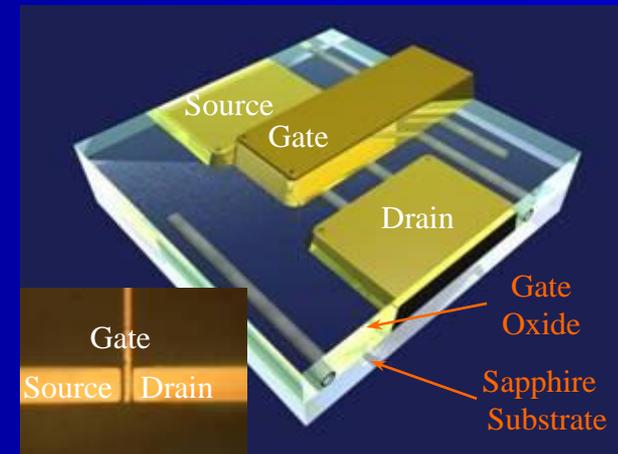
Delft : Tans, et al., *Nature*, **393**, 49, 1998



Javey, et al., *Nano Letters*, **4**, 1319, 2004

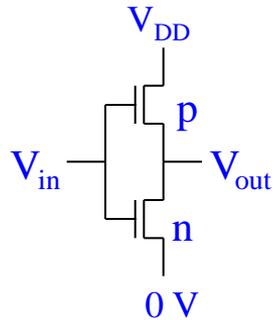
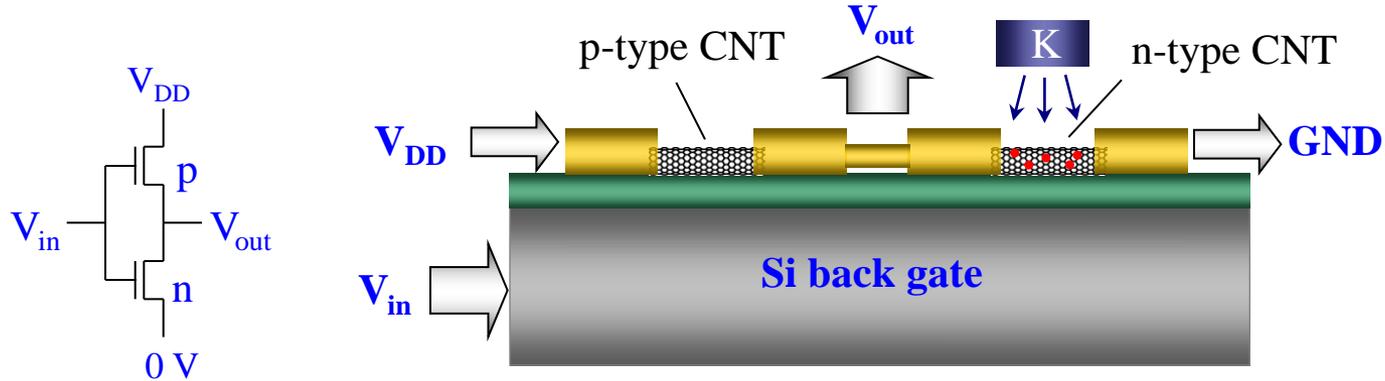


Appenzeller, et al., *PRL*, **93**, 19, 2005

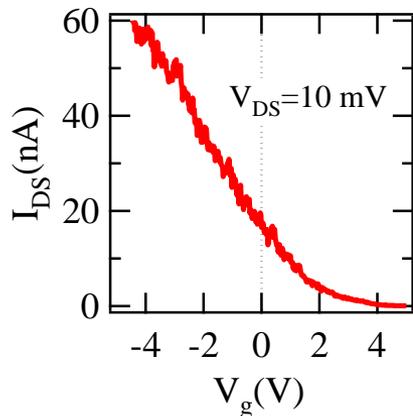


Liu, et al., *Nano Letters*, **6**, 34, 2006

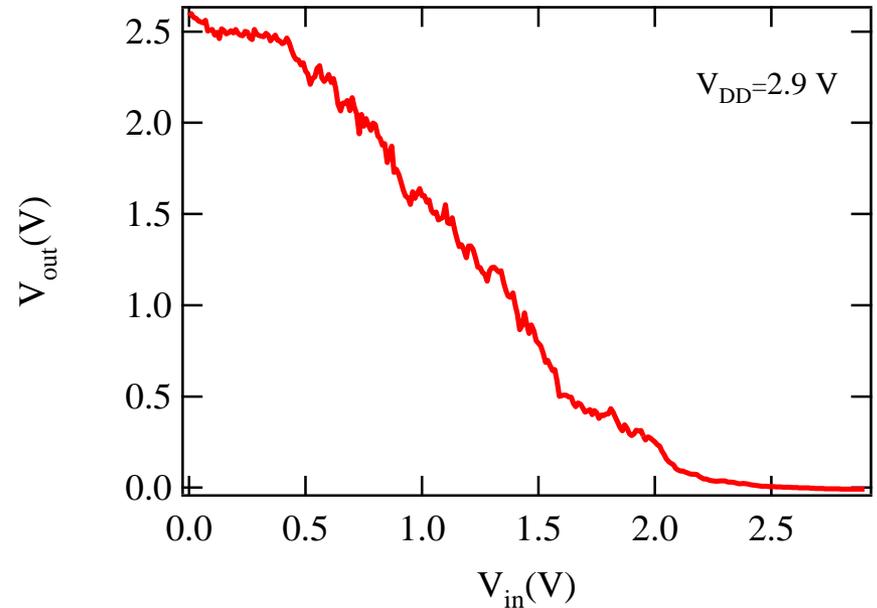
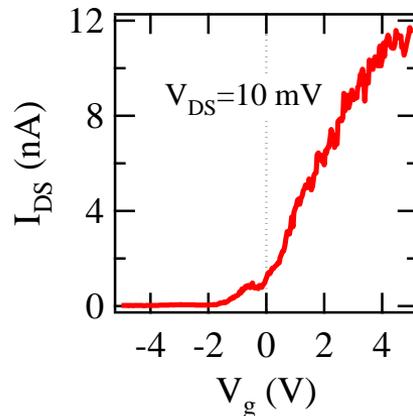
Integrated Nanotube Systems: Complementary Carbon Nanotube Inverter



P type MOSFET:



N type MOSFET:



One of the first integrated systems made of carbon nanotubes.

本章-

- 《半导体物理学》上册 叶良修编著 书上第八章的部分内容