



# 半导体物理

张光祖

光学与电子信息学院

zhanggz@hust.edu.cn



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
电子科学与技术类专业精品教材

# 半导体物理学

(第7版)

The Physics of Semiconductors

7th Edition

©刘恩科 朱秉升 罗晋生 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>

1

半导体中的电子状态

2

半导体中载流子的统计分布

3

载流子输运与导电

4

非平衡载流子

5

p-n结

6

金属和半导体的接触

7

半导体表面与MIS结构

8

半导体异质结

9

半导体的光、热、磁效应

# 本章内容提要

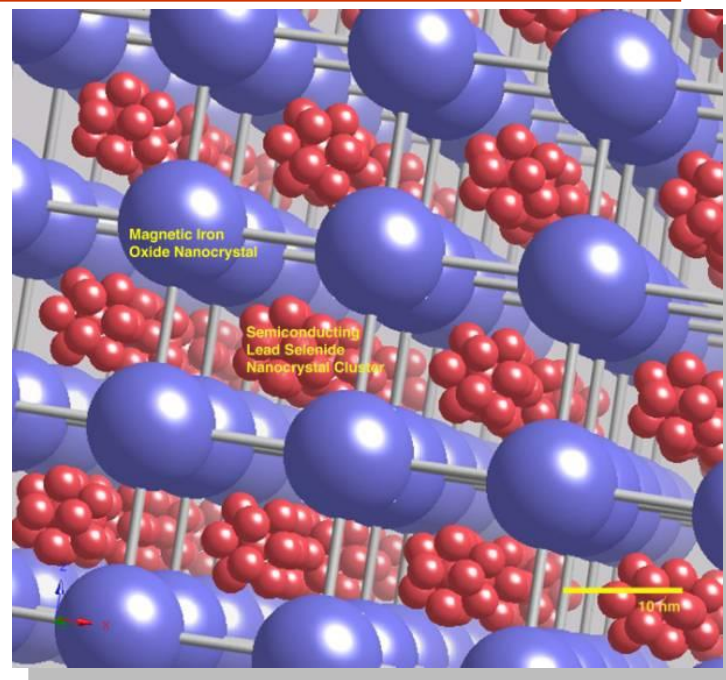
- 异质结及其能带图
- 异质结的电流输运机构
- 异质结在器件中的应用
- 半导体超晶格

异质结概念（1951）

工艺技术困难

汽相外延生长技术的发展（1960制造成功）

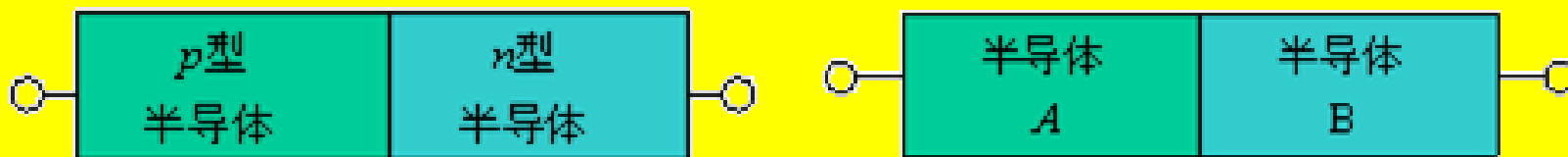
异质结莱塞二极管报告（1969），之后得到广泛应用，LED等（比同质结性能优越）



难点在哪里？

## 8.1 异质结及其能带图

同质结：由导电类型相反的同一种半导体单晶材料组成的结。  
(如第5章讨论的p-n结)

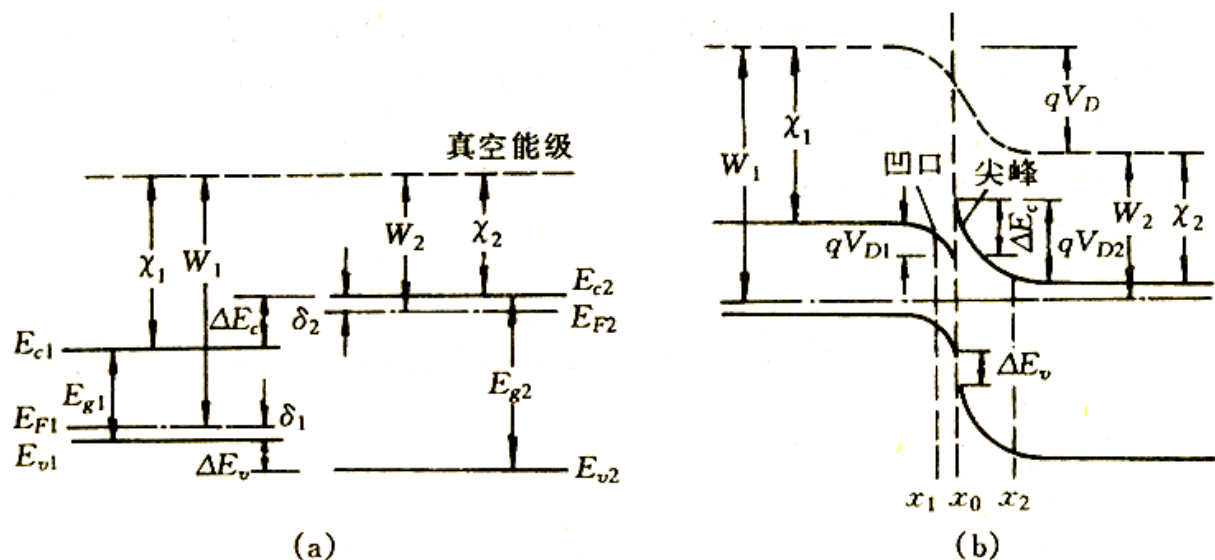


异质结：由两种不同的半导体单晶材料组成的结。

异质结 {

- 反型异质结：导电类型相反的不同两种不同的半导体单晶材料所形成（如n-pGe-GaAs）
- 同型异质结：导电类型相同的不同两种不同的半导体单晶材料所形成（如n-nGe-Si）

# 1. 突变反型异质结能带图（不考虑界面态）



导带底突变:  $\Delta E_c = \chi_1 - \chi_2$

价带顶突变:  $\Delta E_v = (E_{g2} - E_{g1}) - (\chi_1 - \chi_2)$

$\Delta E_c + \Delta E_v = E_{g2} - E_{g1}$

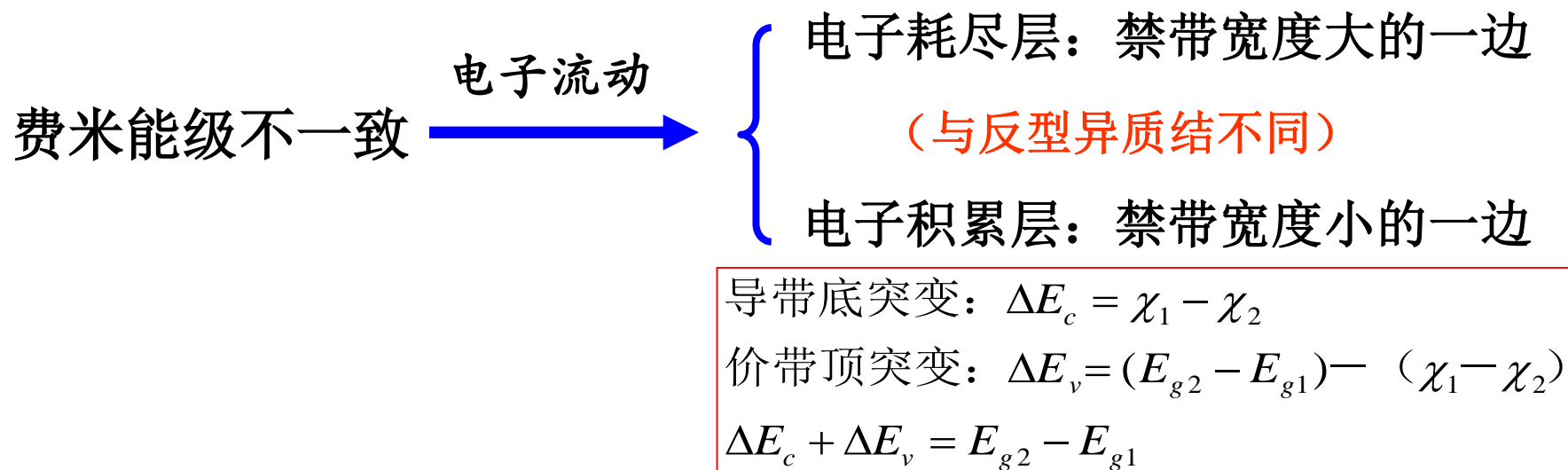
异质结  $\xrightarrow{E_F \text{ 不一致}}$  载流子相对运动  $\longrightarrow$  形成空间电荷区  $\xrightarrow{\text{介电常数不同}}$  能带弯曲, 不连续

内建电场在交界处不连续

$$qV_D = qV_{D1} + qV_{D2}$$

## 2. 突变同型异质结能带图（不考虑界面态）

不考虑两种半导体交界面处的界面态的情况下，任何异质结的能带图都取决于形成异质结的两种半导体的电子亲和能、禁带宽度以及功函数。



实际异质结中，晶格失配是不可避免的，交界面处产生了悬挂键，引入了界面态

## 8.2 异质结的电流运输机构

### 1. 突变反型异质结的电流运输结构

模型

**扩散模型：** 载流子以扩散运动方式通过势垒，与普通p-n结类似

**发射模型：** 部分热运动载流子具有足够的热运动能量克服势垒

**发射-复合模型：** 热发射的电子和空穴通过界面态进行复合

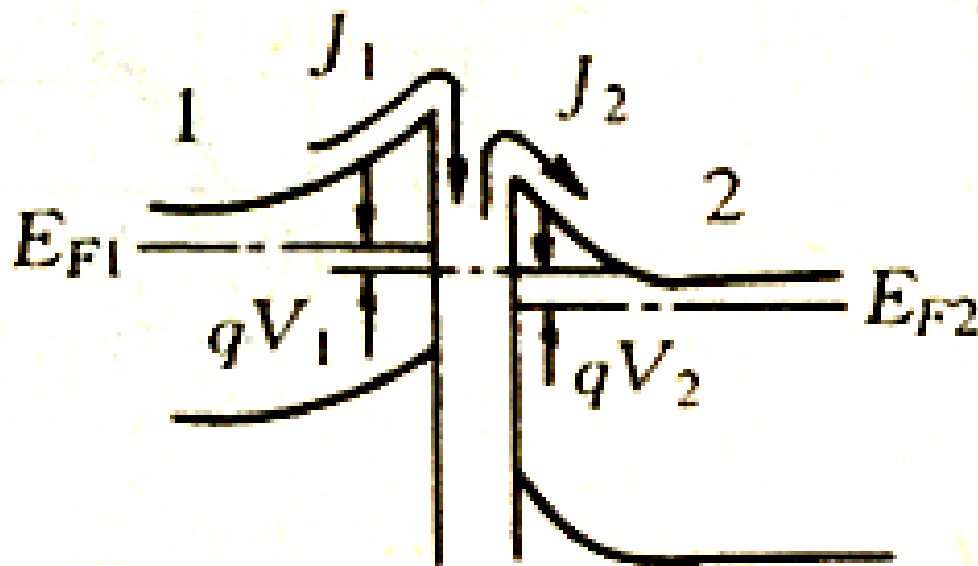
**隧道模型：** 隧道效应

**隧道-复合模型：** 考虑了复合作用



## 2. 突变同型异质结的电流输运结构

- ① 表面能级密度在 $10^{13}\text{cm}^{-2}$ 以下，有扩散模型、发射模型、隧道模型，其结果与反型异质结类似。
- ② 表面能级密度在 $10^{13}\text{cm}^{-2}$ 以上，提出双肖特基二极管模型。



双肖特基二极管模型

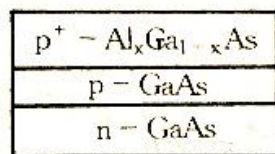


## 8.3 异质结在器件中的应用

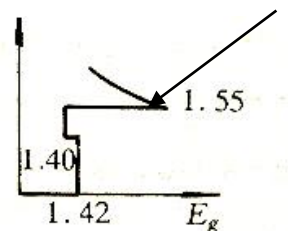
应用：激光器、发光二极管、光电探测、应变传感器

### 1. 单异质结激光器 (1969)

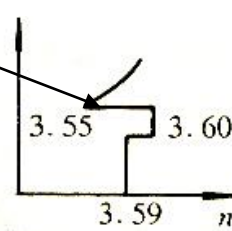
特点（宽禁带、低折射）



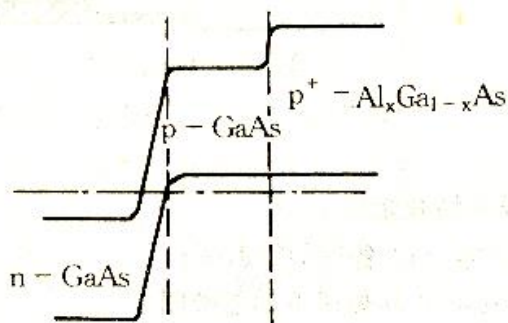
(a)



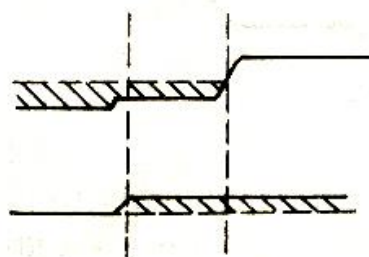
(b)



(c)



(d)



(e)

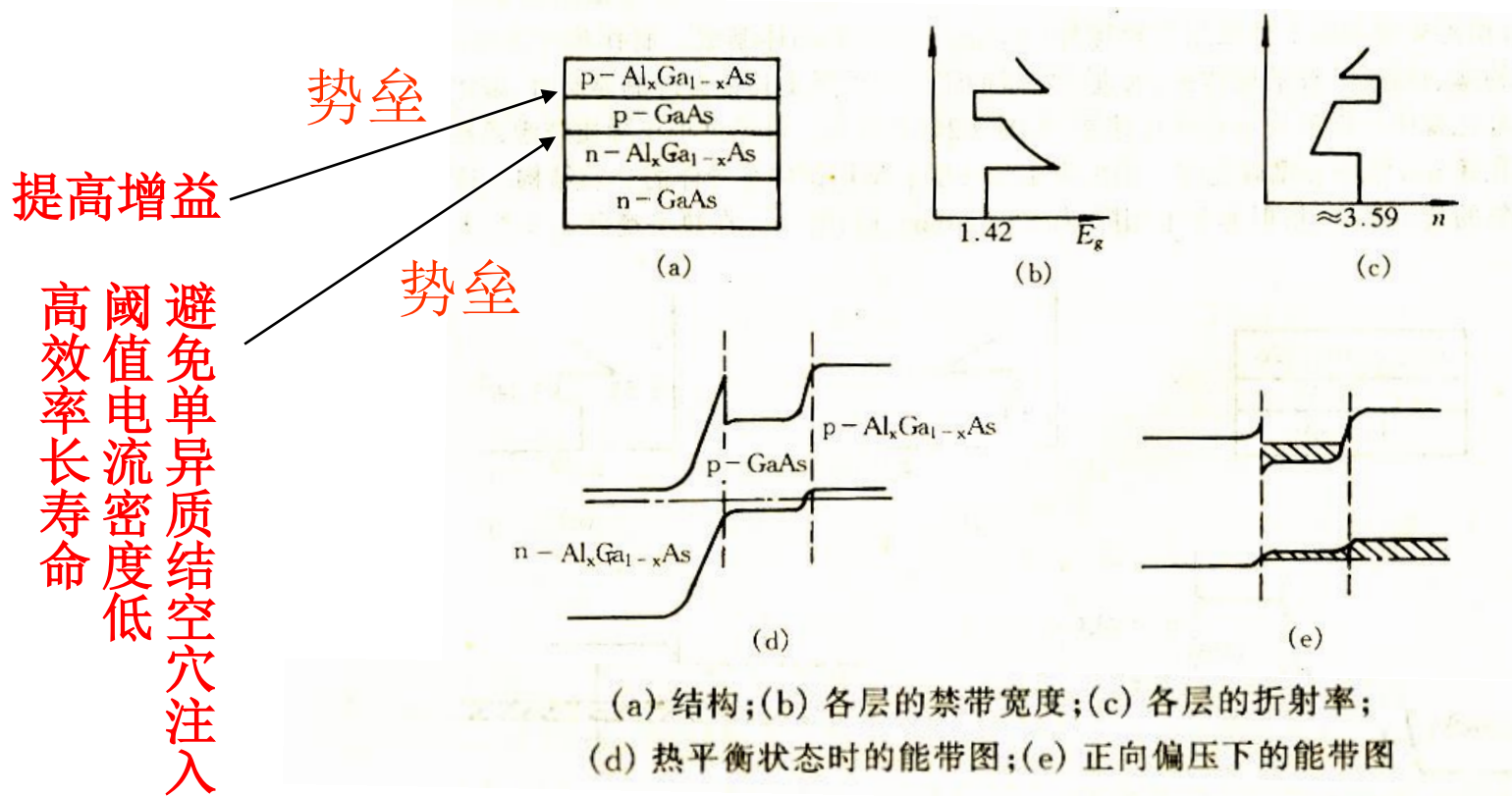
(a) 结构; (b) 各层禁带宽度; (c) 各层折射率; (d) 热平衡状态时的能带图;

(e) 正向偏压下的能带图

## 特点:

1. 铝镓砷具有较宽的禁带宽度, 形成较高的势垒, 阻止电子扩散, 增加了p-GaAs层电子浓度, 提高了增益。
2. p型铝镓砷对来自p型GaAs的发光吸收系数小, 损耗小。
3. 低的折射率, 限制了光子进入铝镓砷区, 局限在p区, 减少了周围非受激区对光的吸收。

## 2. 双异质结激光器 (1970)



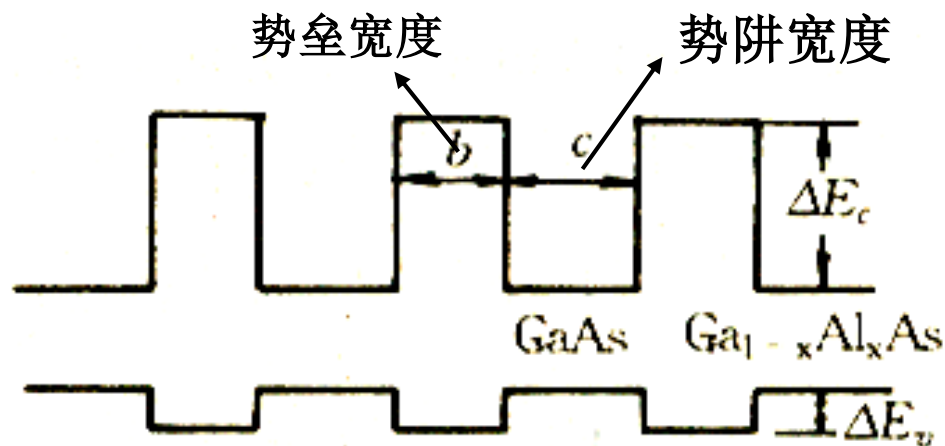
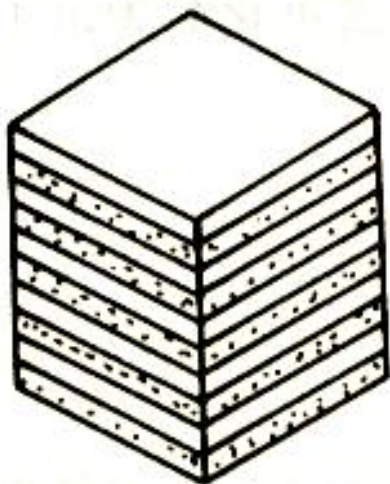
## 8.4 半导体超晶格（重要）

**定义：** 指由交替生长两种半导体材料薄层组成的一维周期性结构，而其薄层厚度的周期小于电子的平均自由程的人造材料。

**应用：** 量子阱激光器、量子阱光电探测器、光学双稳态器件、调制掺杂场效应晶体管...

**制备技术：** 分子束外延（MBE）、金属有机化合物汽相淀积（MOCVD）

理想超晶格结构



Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As/GaAs的能带图