

# 模拟与数字电路

## Analog and Digital Circuits



课程主页 扫一扫

第 十四讲： 半导体材料与器件

Lecture 14: **Semiconductor Material and Device**

主 讲： 陈 迟 晓

Instructor: Chixiao Chen

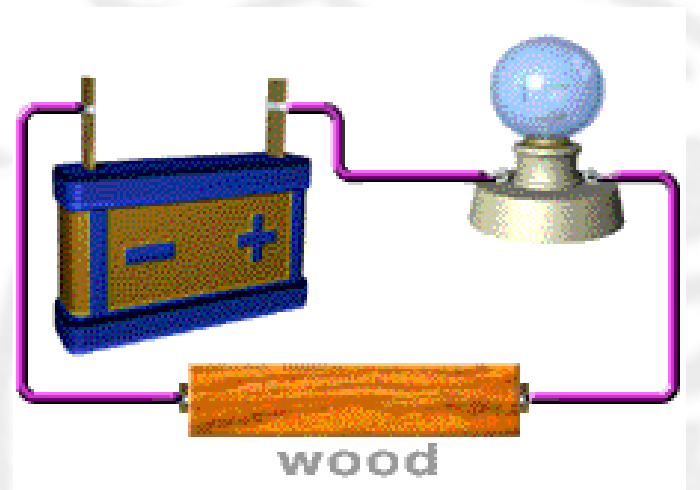
# 提纲

- 导电特性的物理本质
- 半导体材料
- PN结
- 双极性晶体管 BJT



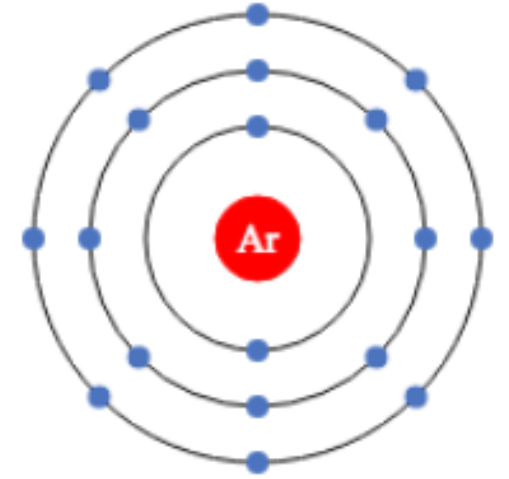
# 导体与绝缘体

- 导体：低电阻，具有在内部自由移动的电子，在电压的驱动下可形成电流
- 常见的导体：铜、铝、铁等金属，合金，溶液
- 来源：价电子（最外层电子）
- 绝缘体：高电阻，缺乏自由电子
- 常见的绝缘体：陶瓷、塑料、木头

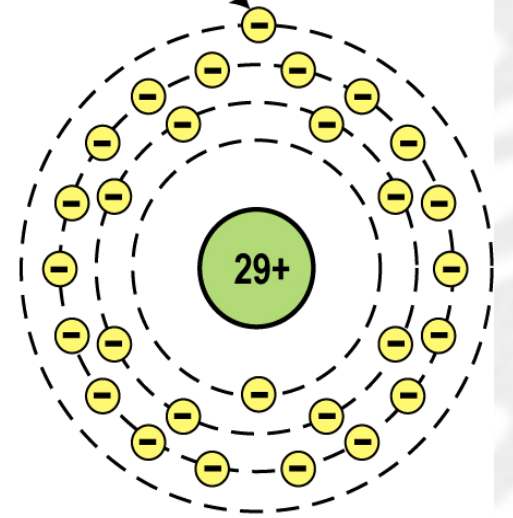


# 微观视角下的导电性

- 价电子(Valence Electron): 最外层的电子
- 最外层的最多可放的电子数一般为8
- 价电子数为8 (6、7) 时, 一般认为是绝缘体
- 价电子数为1 (2、3) 时, 一般认为是导体
- 剩下的呢?



Valence Electron  
Easily Freed for  
Current Flow



Copper  
Atom

# 元素周期表

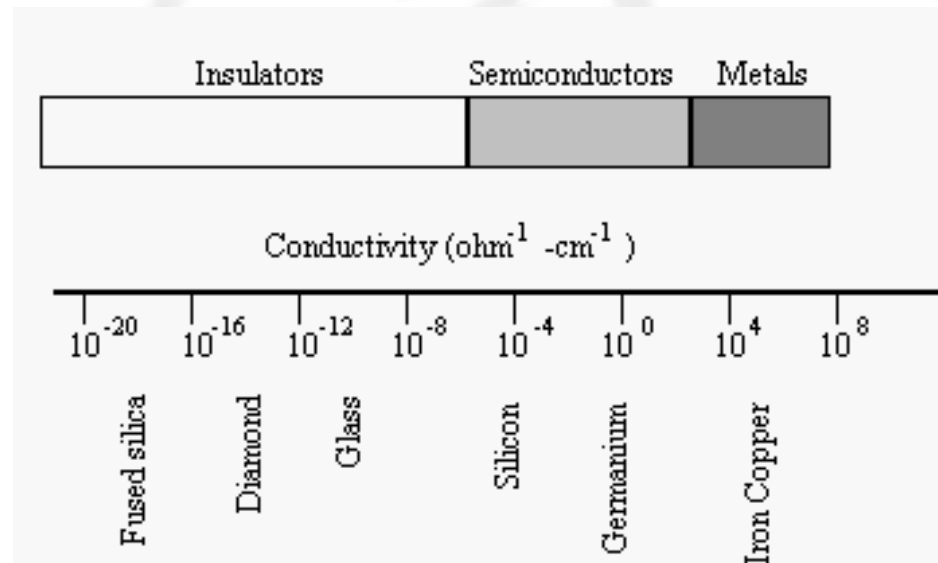
- 主族元素 → 存在4价的元素，其导电特性介于导体与绝缘体之间

I	II							III	IV	V	VI	VII	0
H													He
Li	Be							B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg							Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca									As	Se	Br	Kr
Rb	Sr									Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba									Bi	Po	At	Rn

Metal

Metalloid

Nonmetal



# 从固 (liang) 态 (zi) 物理的角度看导电

- 微观角度看：单个电子的自由移动是不确定的、能量不连续的过程，通过引入量子力学的理论来描述这一问题。
- 能带：电子所能具有的能量范围用一条水平横线表示。能量愈大，线的位置愈高，一定能量范围内的许多能级（彼此相隔很近）形成一条带，称为能带。

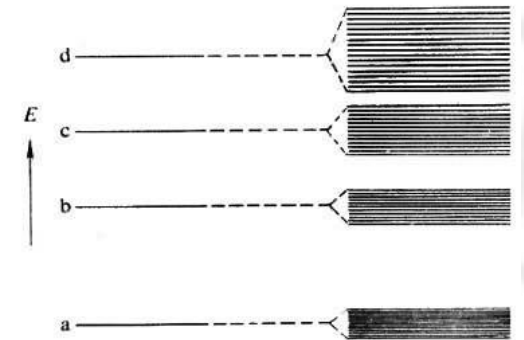
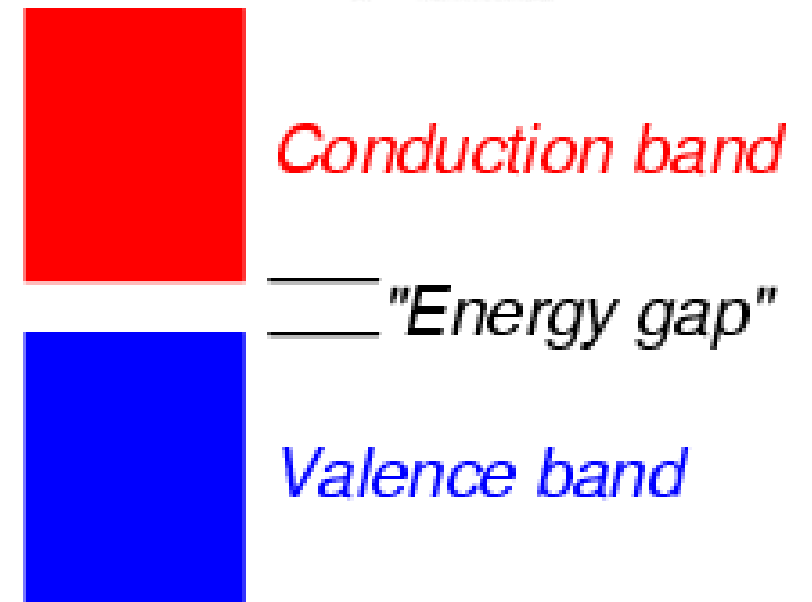


图2 原子能级和能带



# 导带 vs 价带

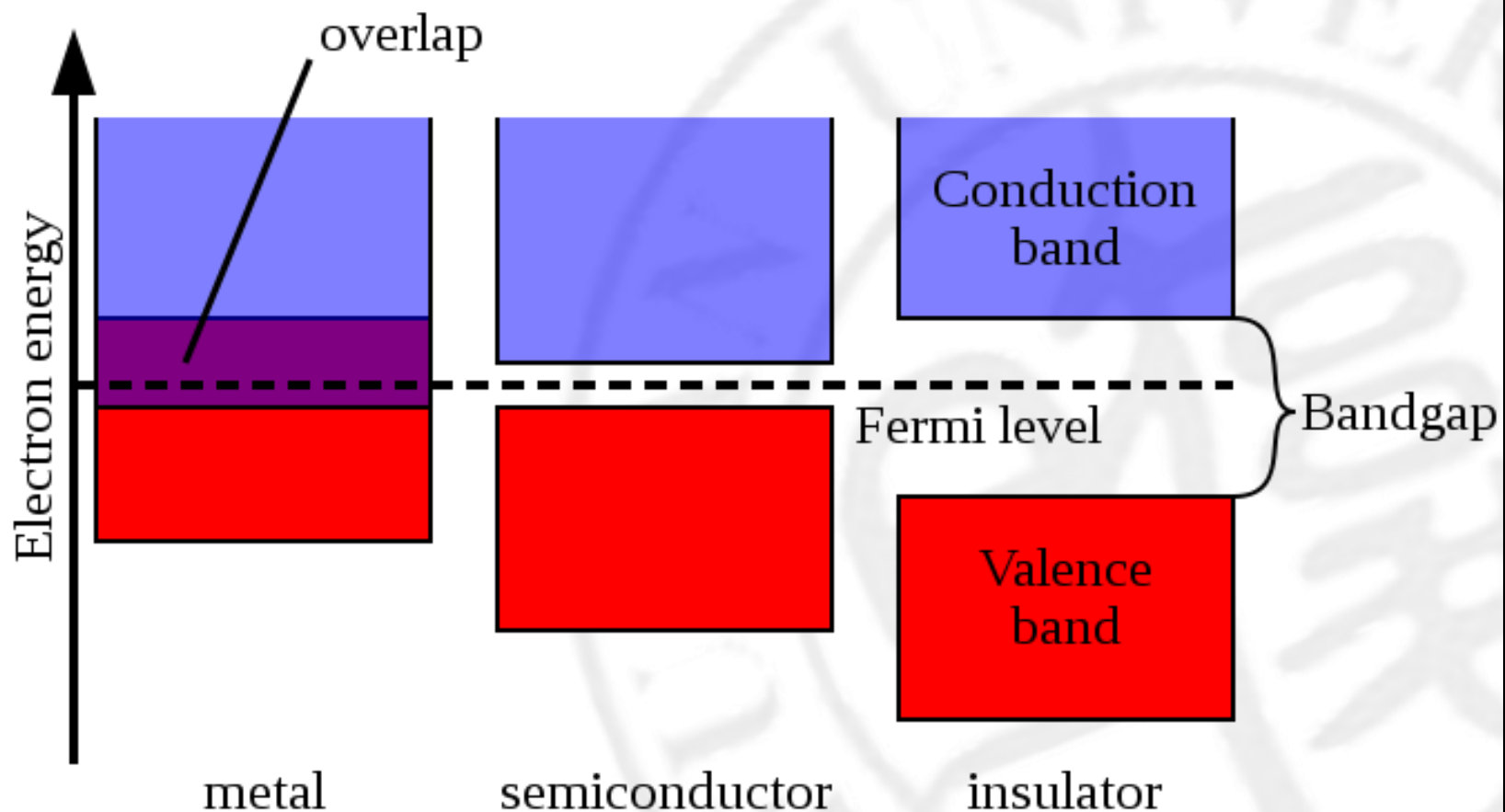
- 电子从能带中最低能级开始依次向上填充
- 电子刚好填充到某一个能带满了，下一个能带全空。这些被填满的能带称为**满带**，满带中能量最高的一条称为**价带**。**价带中的电子可以认为是不导电的。**
- 当价电子在某些外力具有一定能量时，有机会（概率）跃迁到下一个能带。由于这个能带几乎是空的，所以电子们跃迁到这个能带之后就可以自由地奔跑，这个能带就是**导带**。
- 导带和禁带之间的区域称为 **禁带**、或者 **带隙**

# 各类材料的能带图

- 可以把能带想象成高速公路



Band Gap





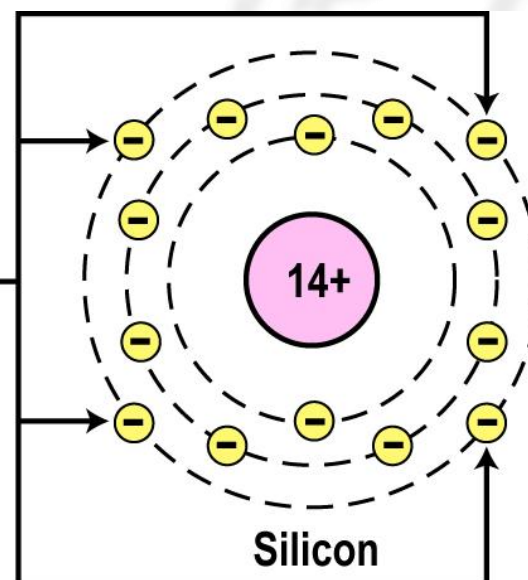
# 半导体 → 硅

- 世界上含量最多的元素

5 <b>B</b> Boron 2.34	6 <b>C</b> Carbon 2.62	7 <b>N</b> Nitrogen 1.251
13 <b>Al</b> Aluminum 2.70	14 <b>Si</b> Silicon 2.33	15 <b>P</b> Phosphorus 1.82
31 <b>Ga</b> Gallium 5.91	32 <b>Ge</b> Germanium 5.32	33 <b>As</b> Arsenic 5.72

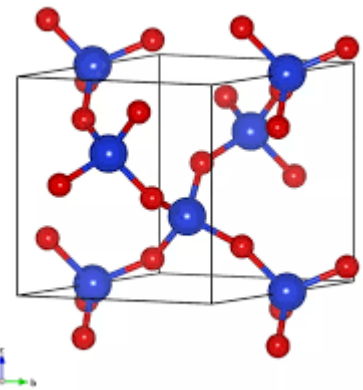


Note: 4 Valence Electrons



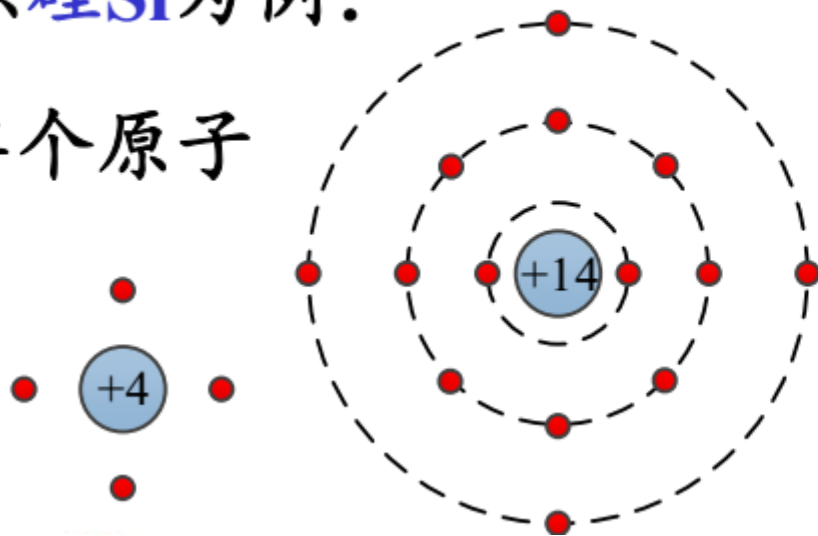
# 晶格与共价键

- 两个硅原子的价电子可共享，形成稳定的金刚石结构
- 共价键：两个或多个原子共同使用它们的外层电子，在理想情况下达到电子饱和的状态，由此组成比较稳定的化学结构→绝缘体

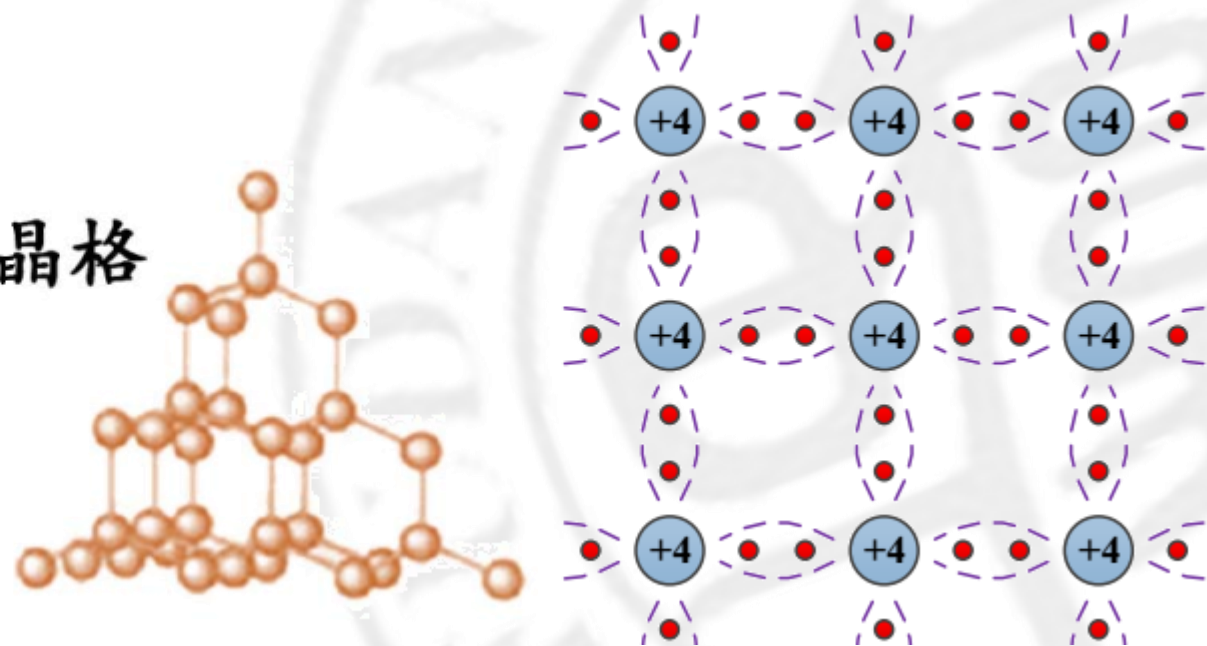


以**硅Si**为例：

单个原子

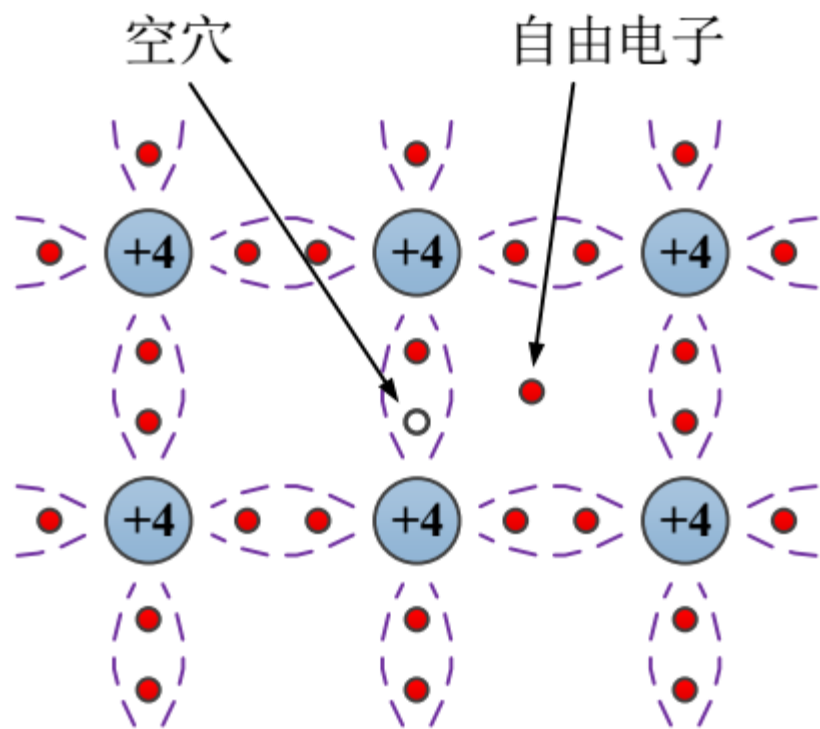


晶格



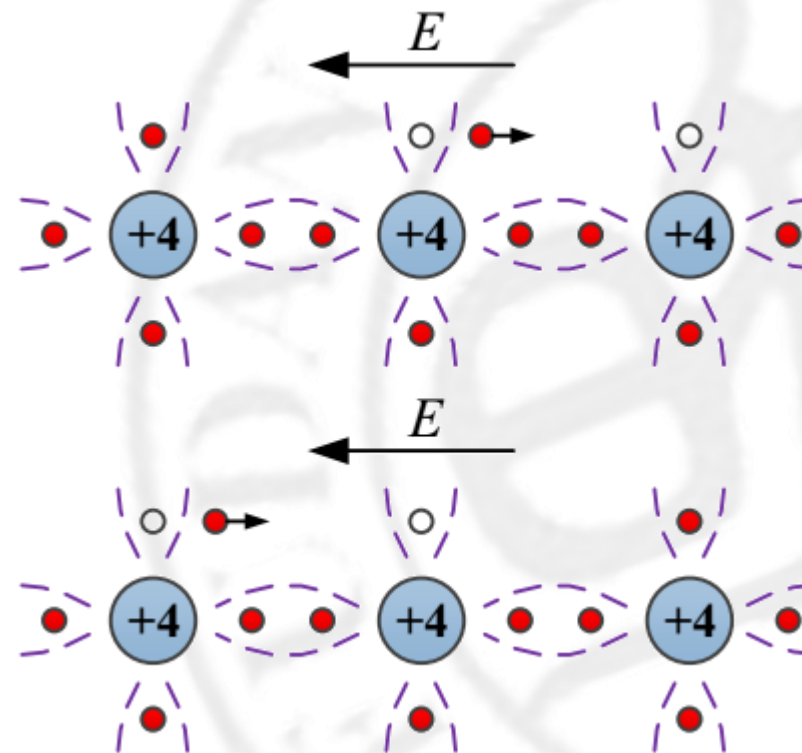
# 导电原理

- 电子、空穴



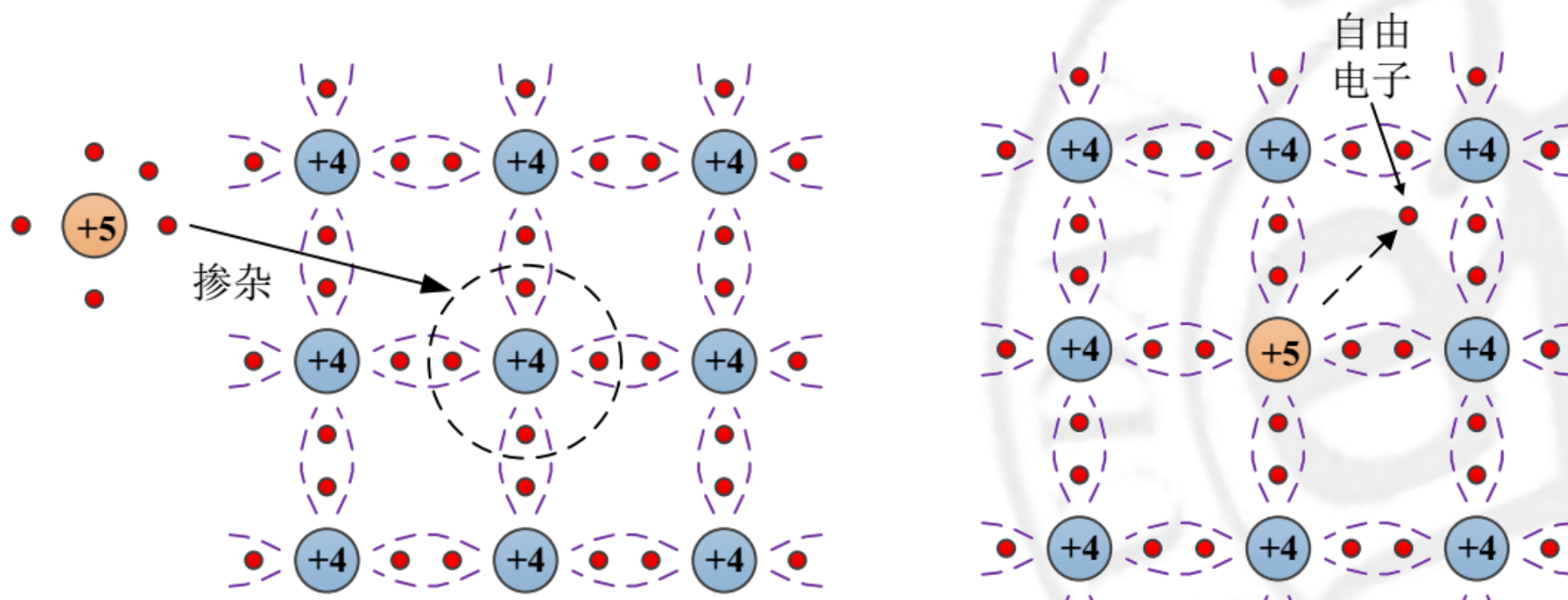
- 电流形成原理

- 外加电场下，载流子的移动  $\rightarrow$  电流
- 电子移动 等效于 空穴的反向移动

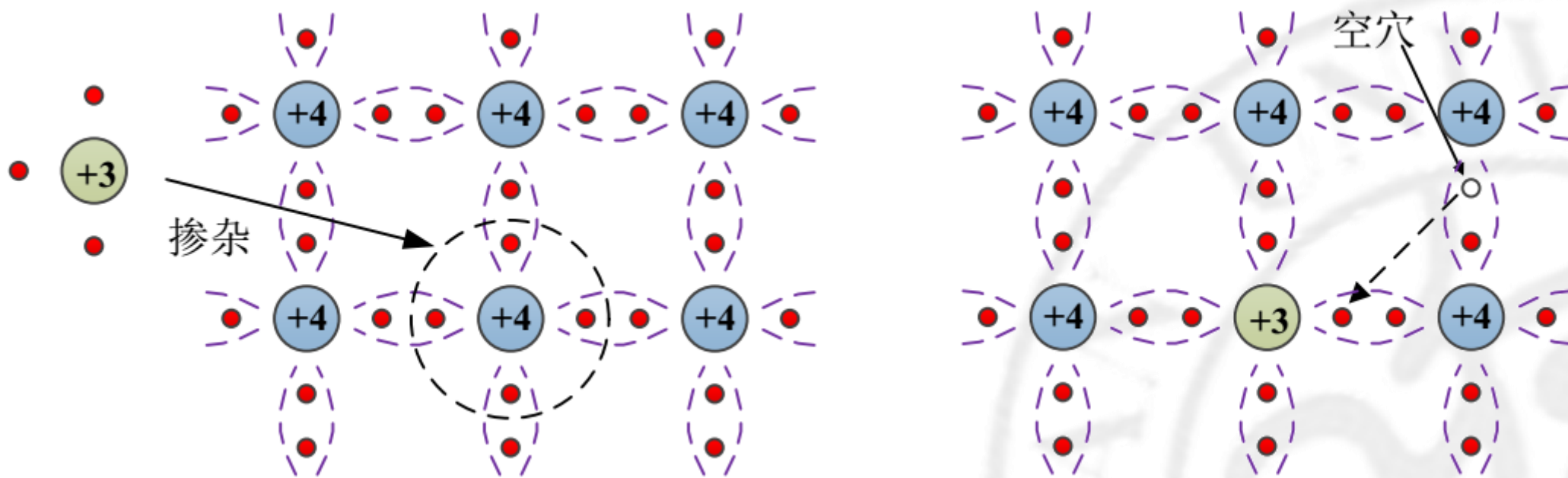


# 杂质半导体——N型半导体

- 本征纯净的Si的载流子非常少，可视为不导电。
- 通过磷参杂技术，改变Si的导电特性



# 杂质半导体——P型半导体

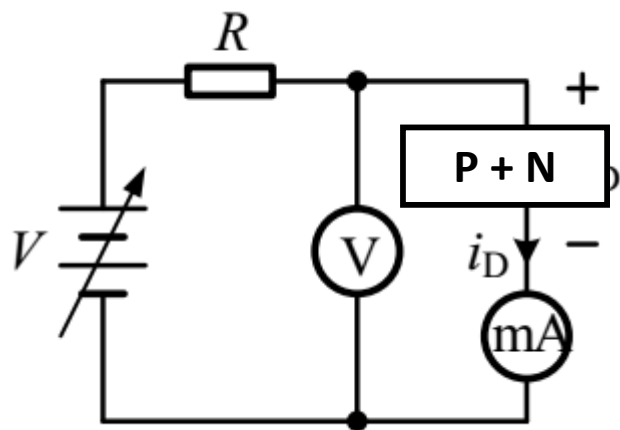


- N型半导体 典型掺杂材料：磷（P） 多子：自由电子 少子：空穴
- P型半导体 典型掺杂材料：硼（B） 多子：空穴 少子：自由电子



# PN Junction (PN结)

- 若将P型半导体与N型半导体在同一片Si上实现，会发生什么？

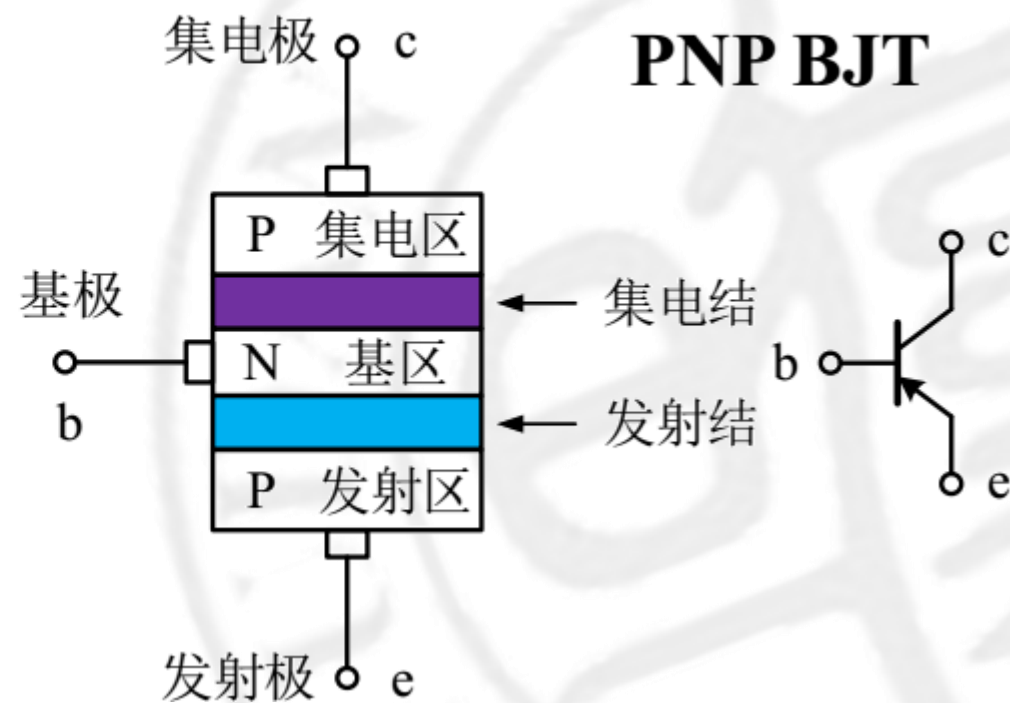
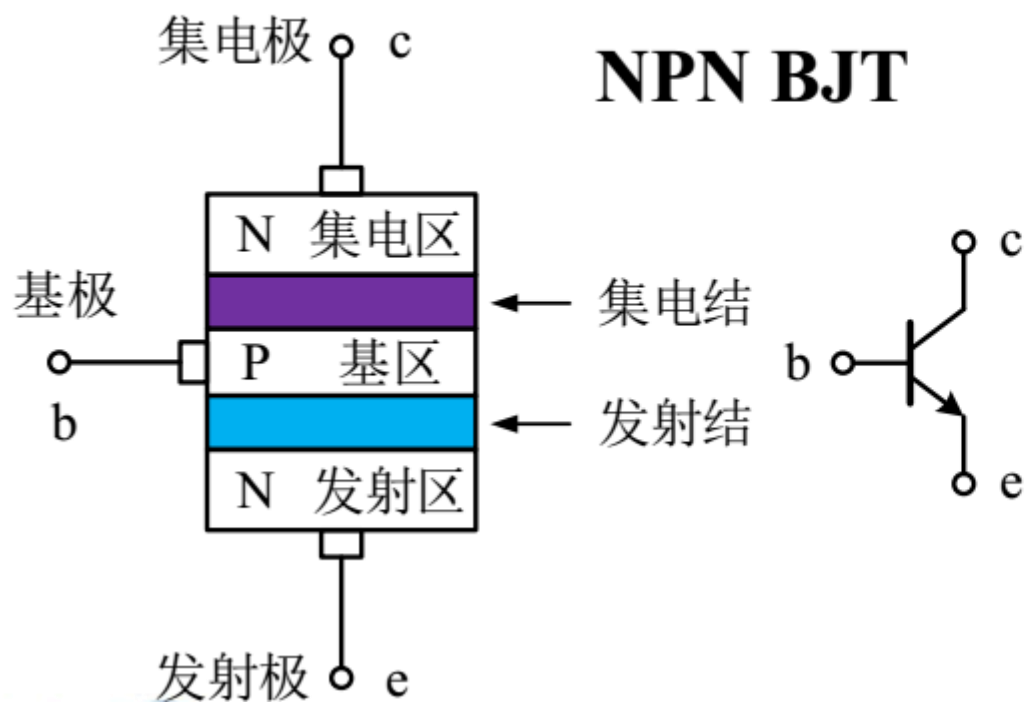


- 上述结构称为PN结

# 双极型晶体管

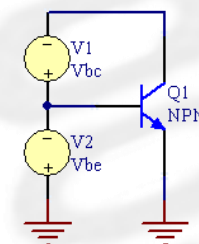
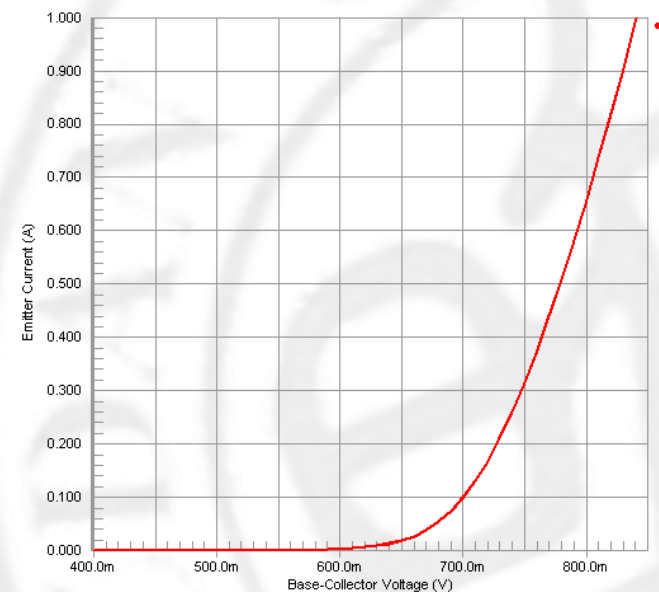
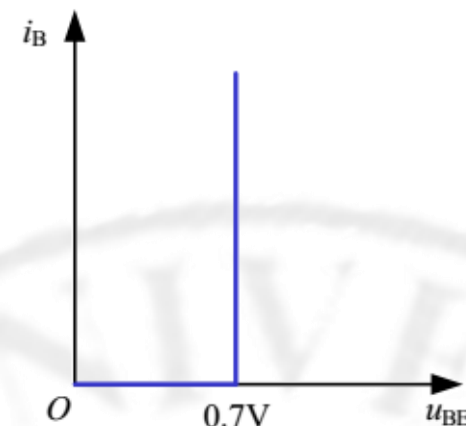
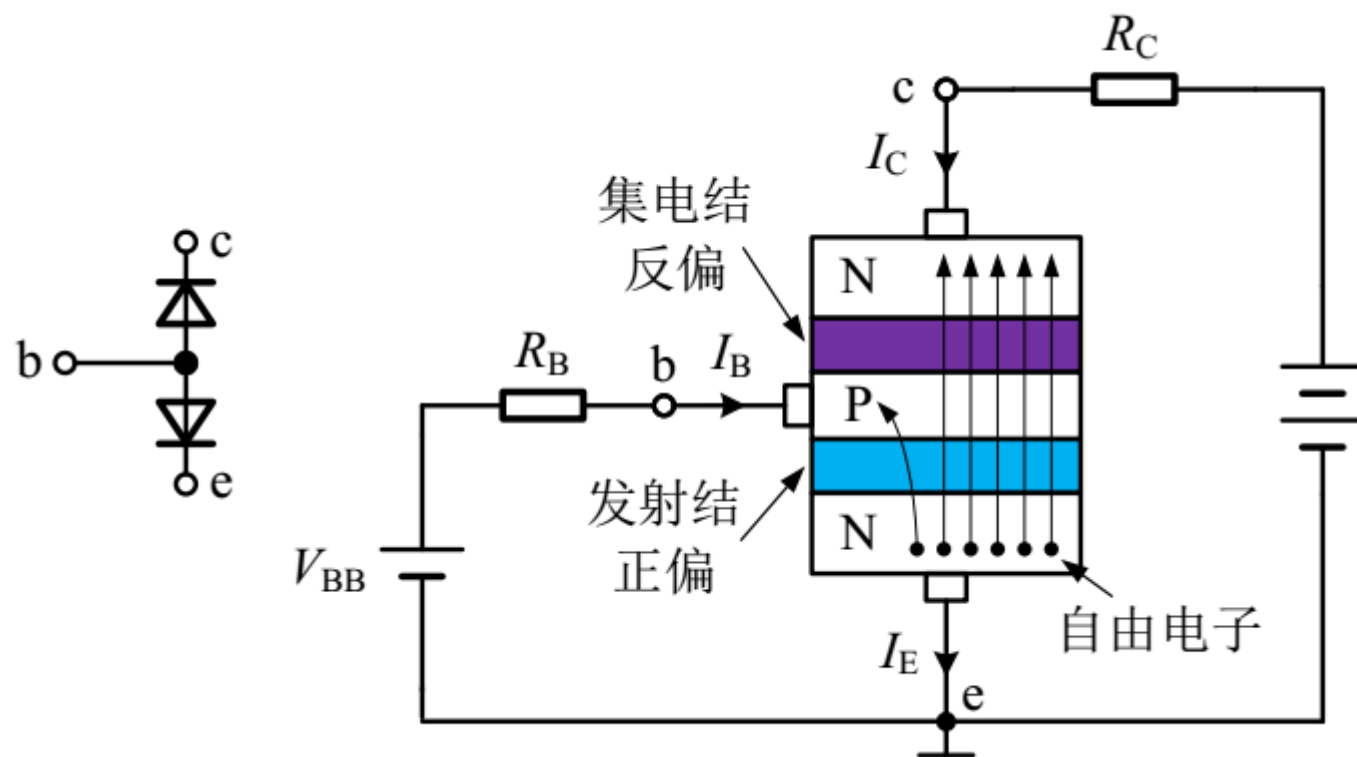
- 若将2个PN结在同一片Si上实现，会发生什么？

## 双极结型晶体管（BJT, Bipolar Junction Transistor）



# 双极性晶体管

- 测试电压-电路 特性曲线（伏安特性曲线）



输入曲线模型