

# 大学物理

# *University Physics*

华中科技大学物理学院

王宁

ningwang@hust.edu.cn

# 第16章 半导体和激光简介

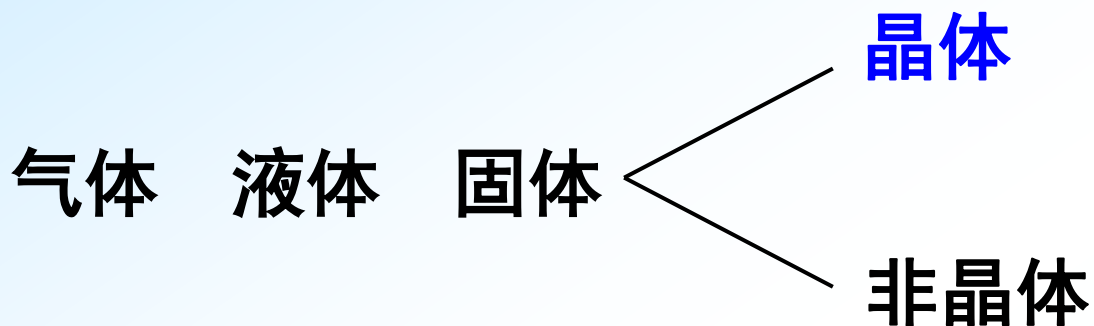
## Semiconductors and Lasers

### 第1节 半导体

### 第2节 激光

1. 了解半导体及固体能带结构。
2. 了解激光的特性、产生的机理及其应用

# 前言



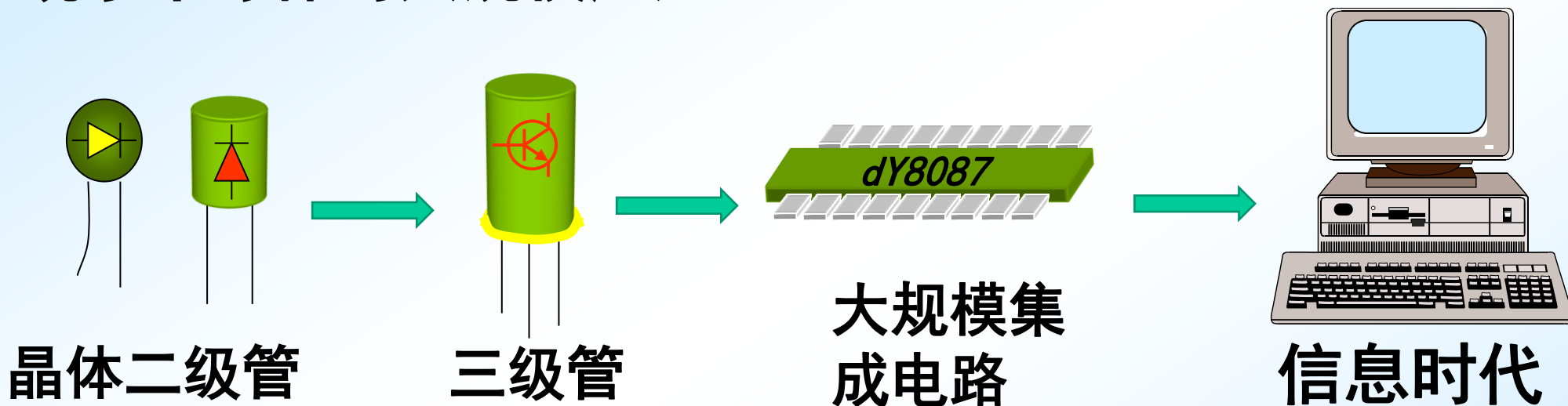
**晶体：**大量分子、原子或离子有规则排列的点阵结构  
电子受到周期性势场的作用

凝聚态物理是**量子力学**应用很普遍的领域

研究对象：固体材料、半导体、激光（固体、半导体）、超导（高温、低温）等

# 前言

量子力学应用于固体系统，产生了**能带理论**，从而实现了半导体的大规模应用。



1. 能带的概念
2. 物体导电性能的能带解释
3. 半导体

**1928-29 建立能带理论并由实验证实**

**1947 发明晶体管**

**1958 制成集成电路**

**1971 intel 4004 微处理器芯片 2300晶体管**

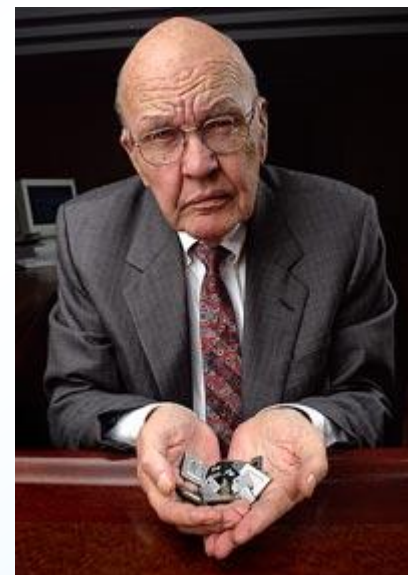
**1982 80286 13.4万**

**1989 80486 120万**

**1993 pentium 320万**

**1995 pentium MMX 550万**

**1997 pentium2 750万**

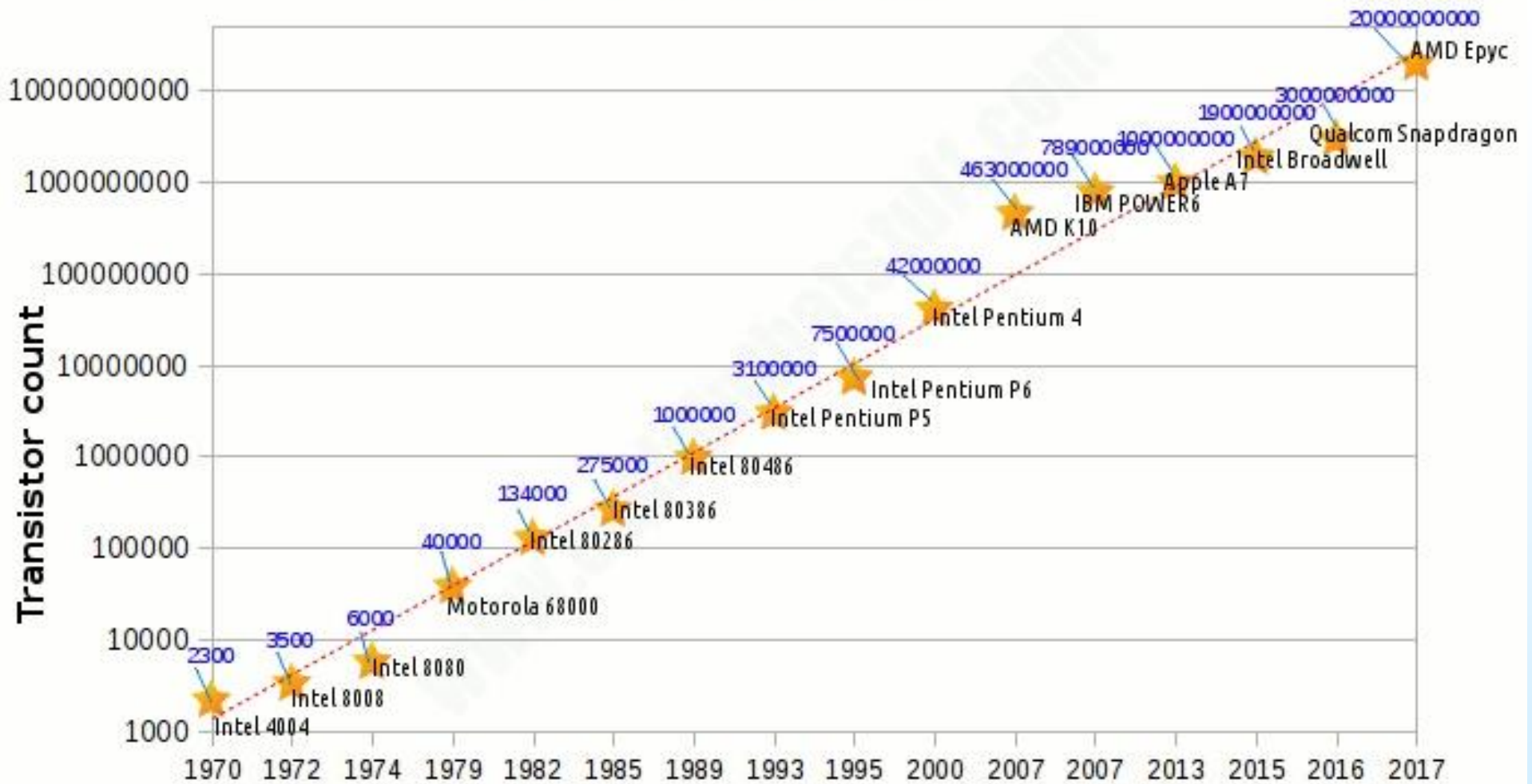


**Jack Kilby**

**1923-2005**

**2000 Nobel Prize**

## 50 Years of Moore's law

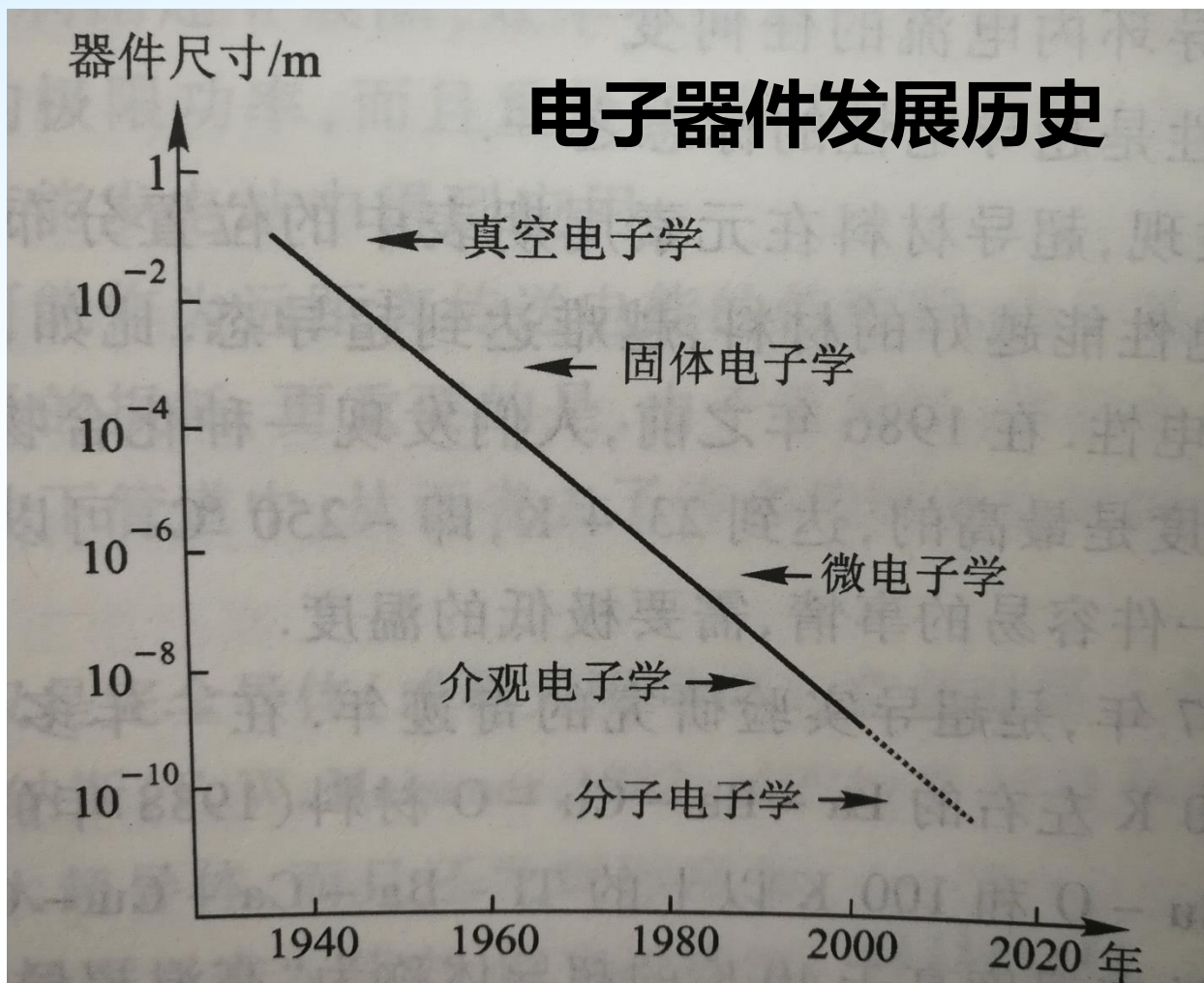


**集成度每 10 年增加 1000 倍！**



集成度的每一步提高，都和表面物理及光刻的研究分不开。

工作的物理基础要做全面根本性的修改。  
元器件的量子尺寸效应开始出现。



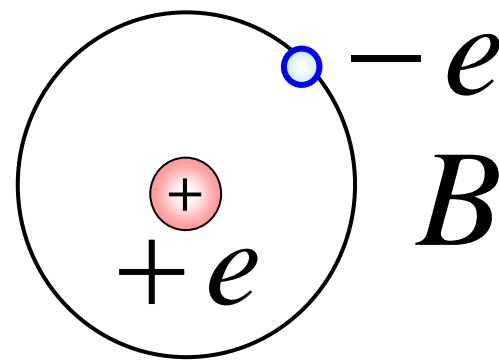
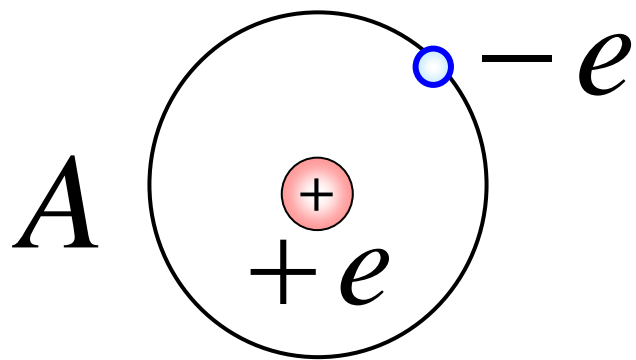
没有晶体管和超大规模集成电路，就没有计算机的普遍应用和今天的信息处理技术。

# — 固体能带理论

## 完全分离的两个氢原子能级

\_\_\_\_\_ 2p  
\_\_\_\_\_ 2s  
\_\_\_\_\_ 1s

\_\_\_\_\_ 2p  
\_\_\_\_\_ 2s  
\_\_\_\_\_ 1s

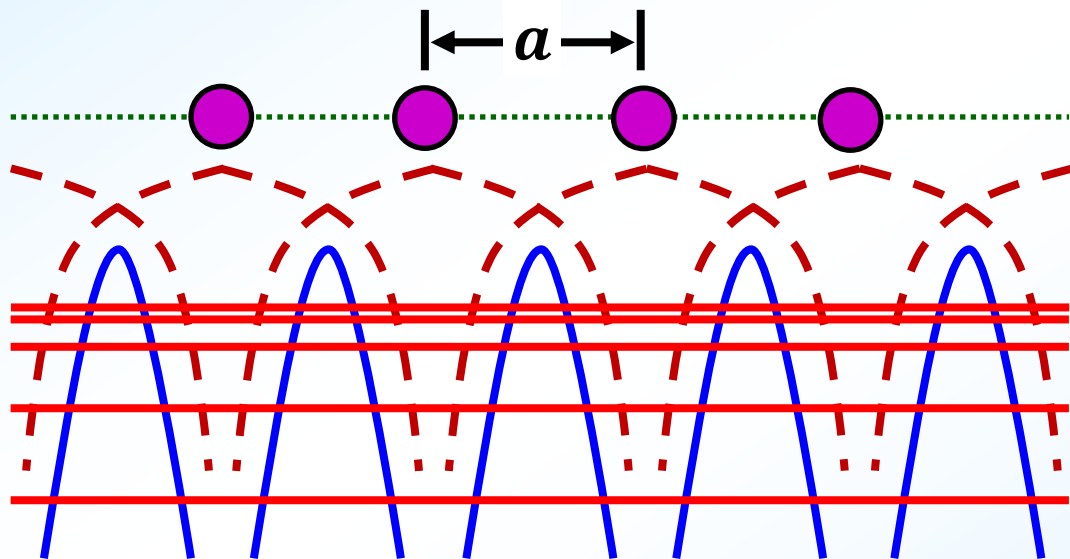




## (1) 电子共有化

**固体：**大量分子，原子有规则排列的点阵结构。

电子受到周期势场的作用。



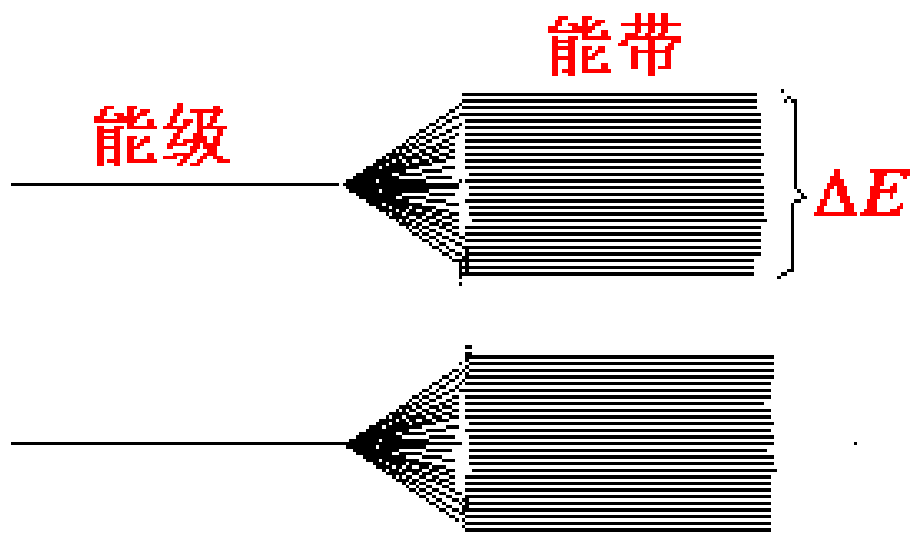
由于相邻原子靠的很近，使不同原子的电子的内外各层“轨道”在空间上有不同程度的重叠。

高能级的外层电子，不再局限于某一个原子，电子可以在整个固体中运动而称为共有化电子。

原子的内层电子与原子核结合较紧，一般不是共有化电子。

## (2) 能带

量子力学计算表明，固体中若有 $N$ 个原子，由于各原子间的相互作用，对应于原来孤立原子的每一个能级，变成了 $N$ 条靠的很近的能级，被称为**能带**。



能带的宽度记为 $\Delta E$

数量级为 $\Delta E \sim \text{eV}$

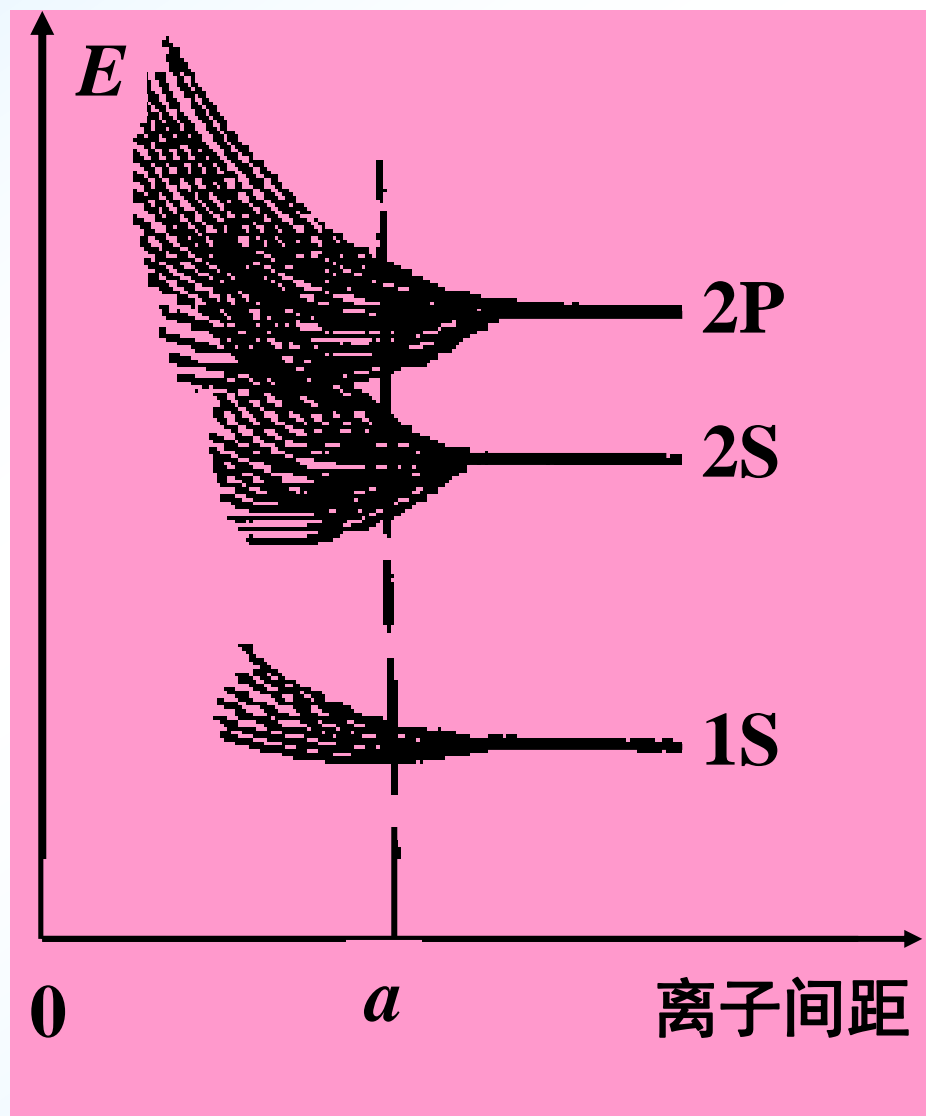
晶体中的原子数目 $N \sim 10^{23} / \text{cm}^3$

能带中两相邻能级间距约为 $10^{-23} \text{eV}$ ，非常小，可以认为能带近似连续。

能带来源于原子能级

带宽来源于原子间的  
相互作用

两个能带之间可能有  
间距，也可能有重叠



能带重叠示意图

### (3) 能带中电子的排布

一个电子只能处在某个能带中的某一能级上。

电子排布原则：

1. 服从泡利不相容原理

2. 服从能量最小原理

孤立原子的一个能级 $E_{nl}$ 最多能容纳的电子数目：

$$2(2l + 1)$$

能级 $E_{nl}$ 分裂成由 $N$ 条能级组成的能带后，能带最多能够容纳 $2(2l + 1)N$ 个电子。

各能带具有的电子数目的多少构成不同的能带。

## 1. 满带

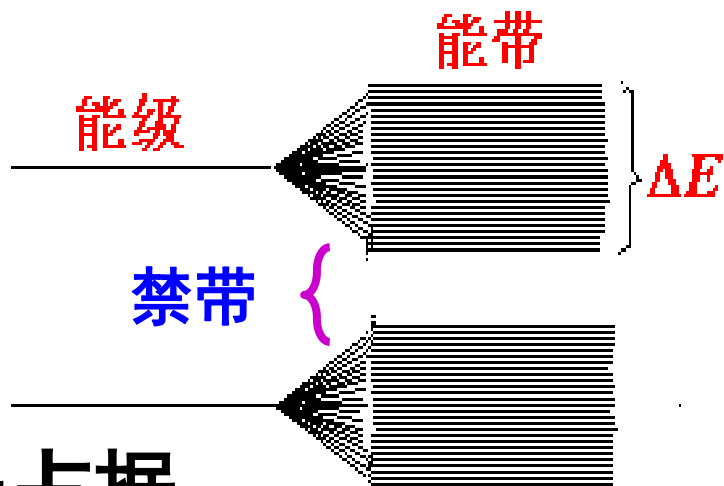
各能级完全被电子占据的能带

## 2. 导带

能带中只有一部分能级上有电子占据

## 3. 空带 没有电子占据

## 4. 禁带 不能排电子



**量子力学证明：**如果一个能带完全被电子填满，那么在外加电场时，这个能带上的电子不会产生净余电流，也就是说，**满带不导电！**



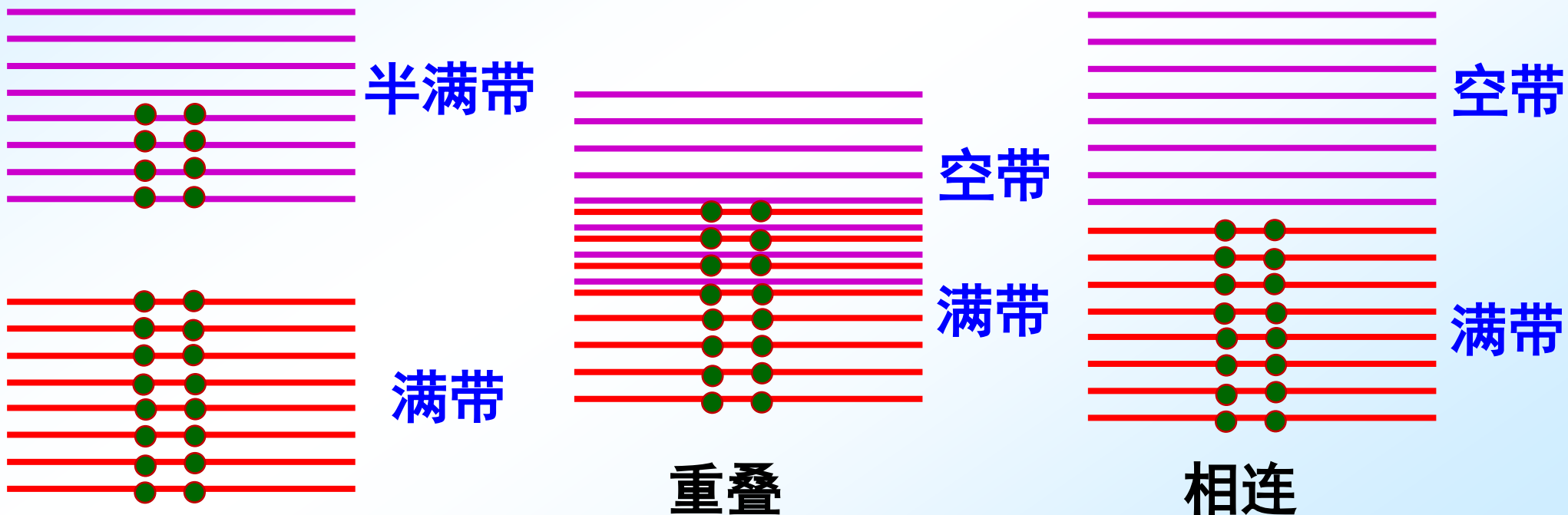
电子在满带中运动时不形成电流，  
只有当电子向更高能带跃迁后才形成电流。

金属**钠**的各能带上电子的分布

满带无导电作用，半满带可以导电，若满带中的电子被激发到上邻空带，均有导电性。

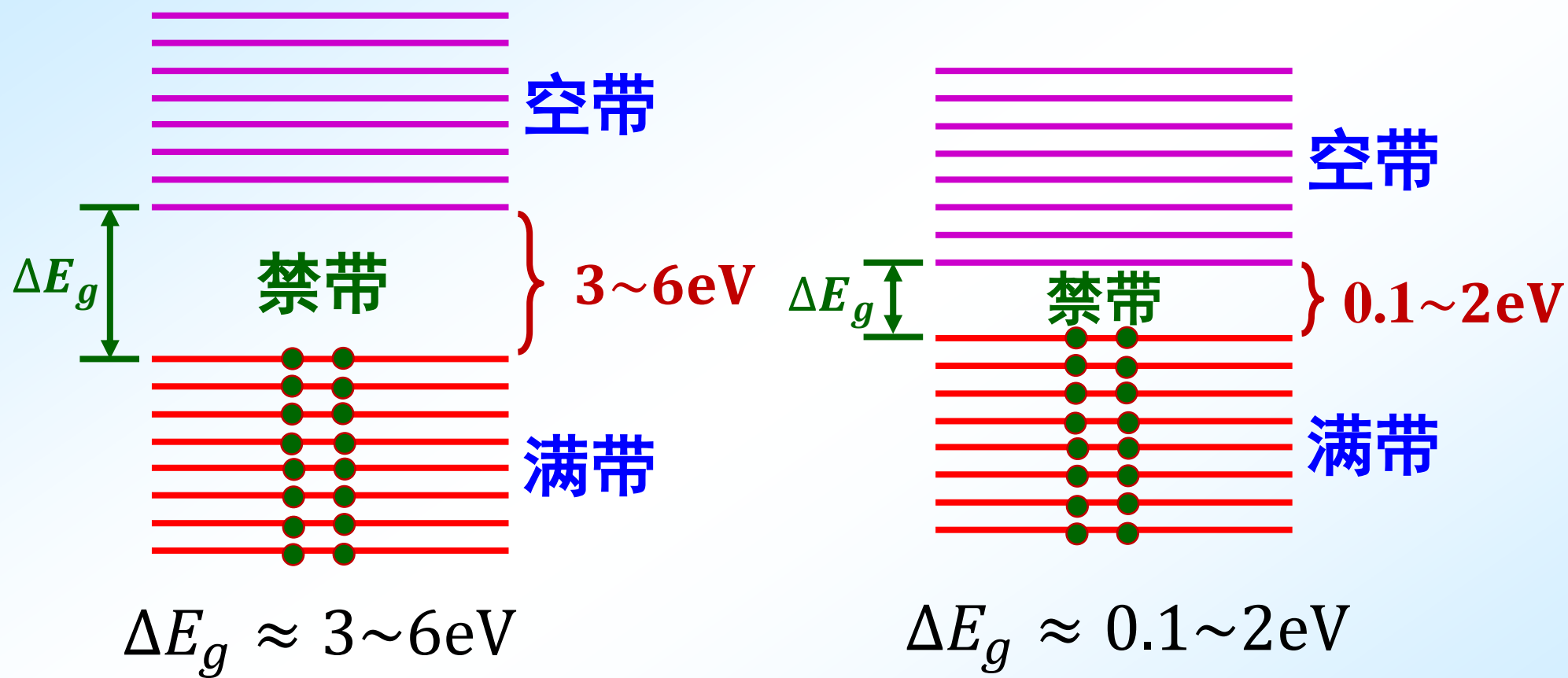
#### (4) 导体，半导体，绝缘体的能带结构

**导体：**具有半满带或上空能带与满带相连或重叠的能带。



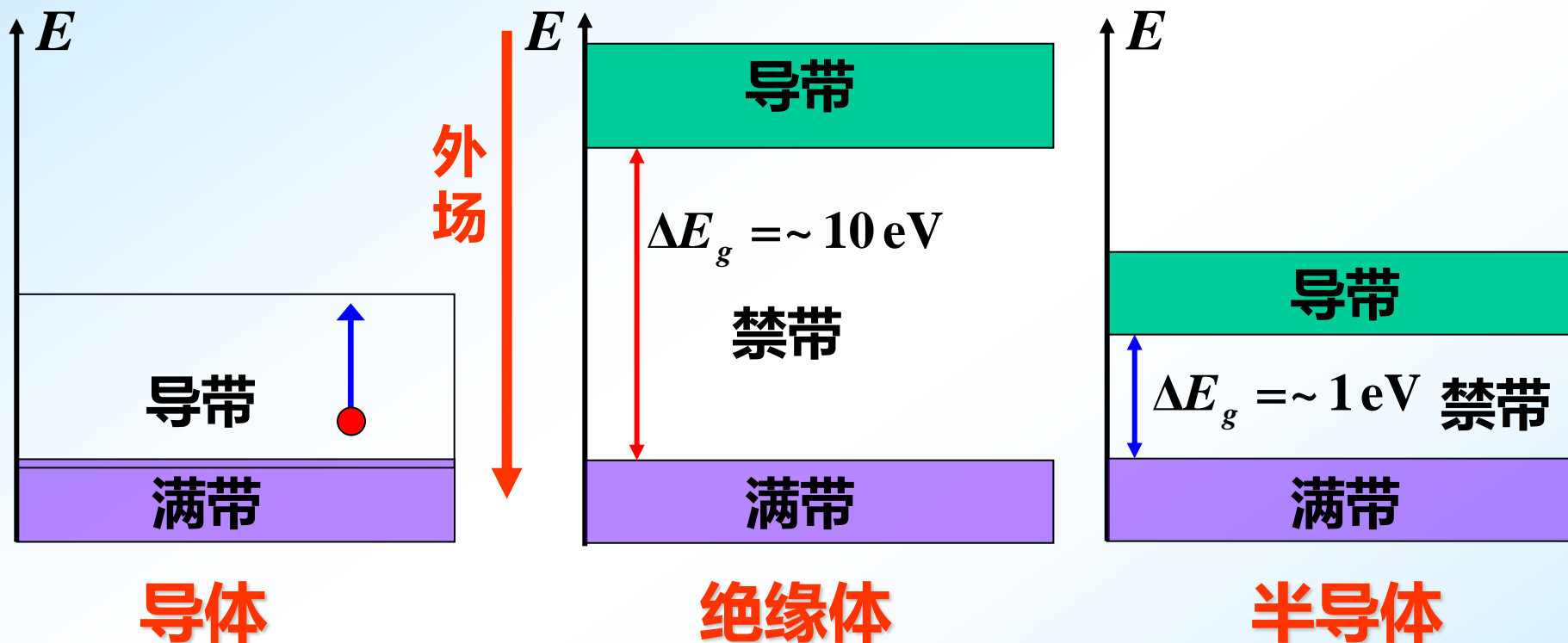


**绝缘体：** 只有满带和空带，且禁带宽度较**大**。



**半导体：** 只有满带和空带，但禁带宽度较**小**。

# 导电性能不同的原因：能带结构不同



没有禁带，可显示很强的导电性。

禁带很宽，满带中的电子很难进入导带，形不成电流，导电性很差。

禁带较窄，满带中的电子较易进入导带而导电。

## 二 半导体

半导体的性质与所含杂质有关，根据不同掺杂情况，可分为本征半导体，N型半导体和P型半导体。

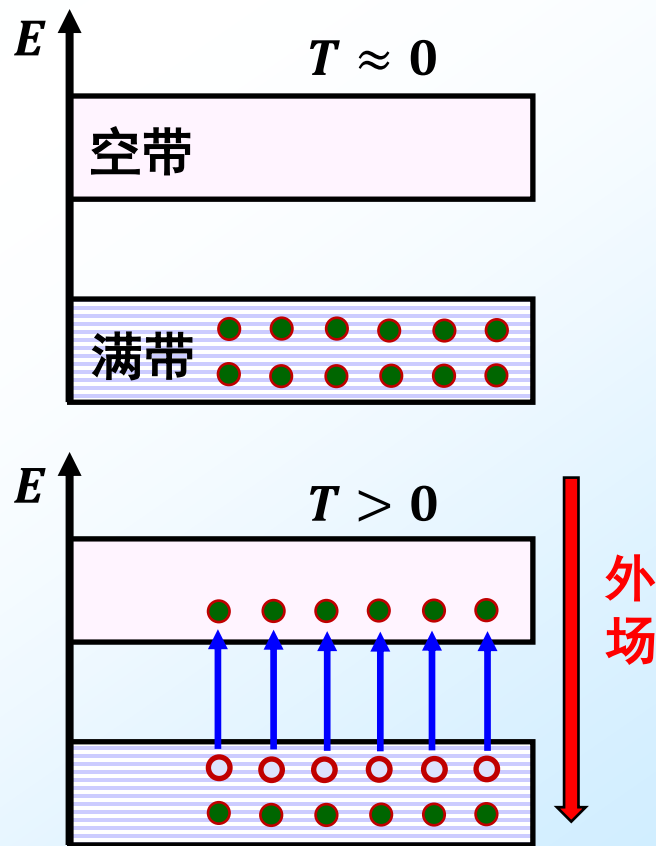
### 1. 本征半导体

纯净的半导体，如硅，锗等

半导体禁带宽度窄，在外场的作用下，导带中的**电子**，满带中的**空穴**同时参与导电。

——本征导电性

**电子，空穴** ——本征载流子

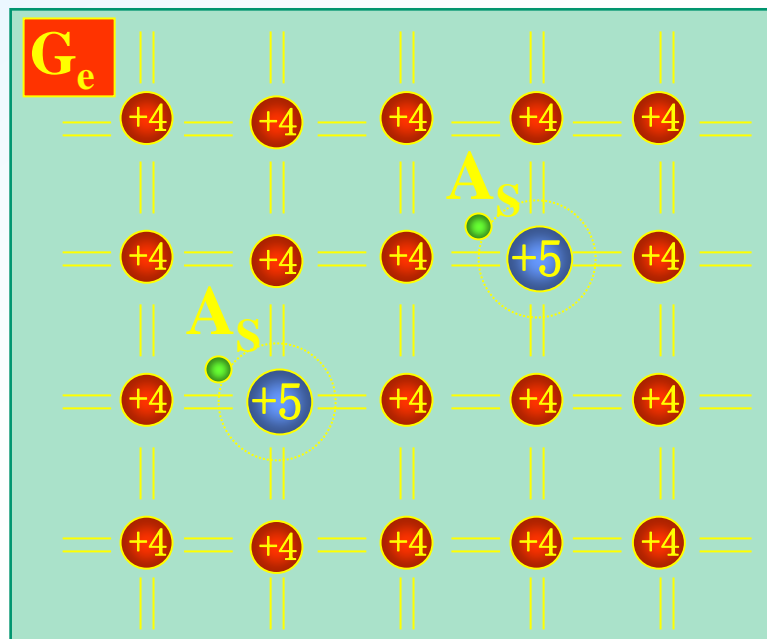


## 2. 杂质半导体 —— 含有少量杂质的半导体

### 1). N型半导体 (施主杂质半导体)

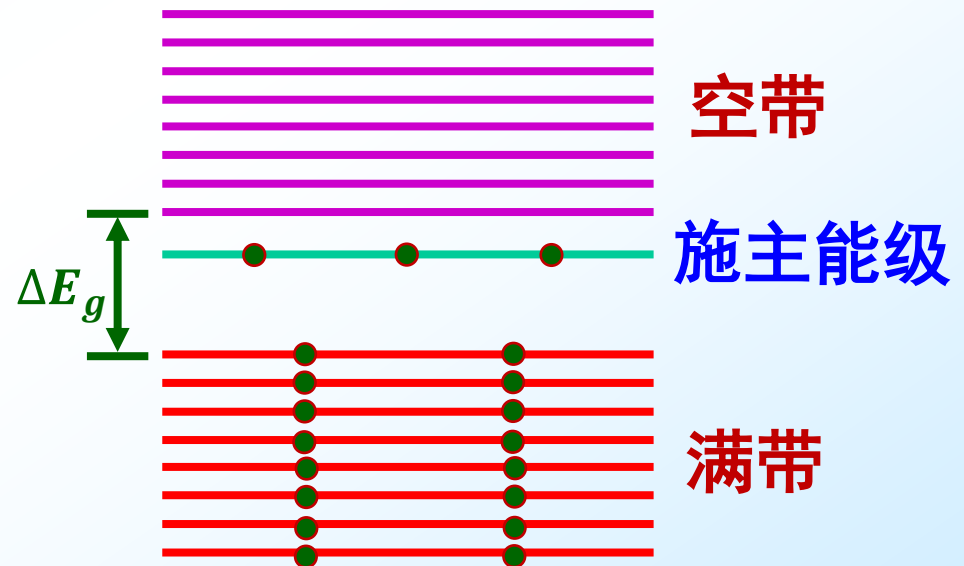
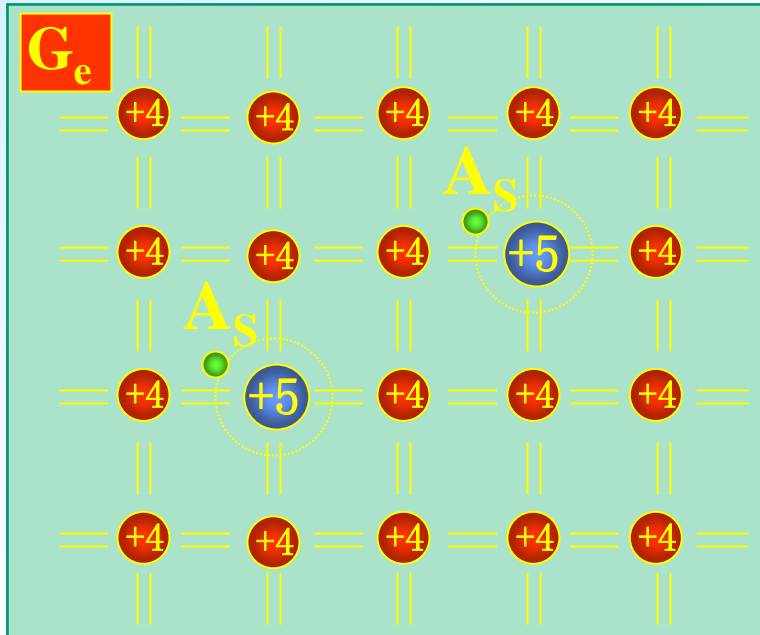
在纯净半导体中掺入少量可以提供导电**电子**的杂质所形成的半导体。

例如在四价锗 (Ge) 元素半导体中掺入五价砷 (As) 所形成的半导体。



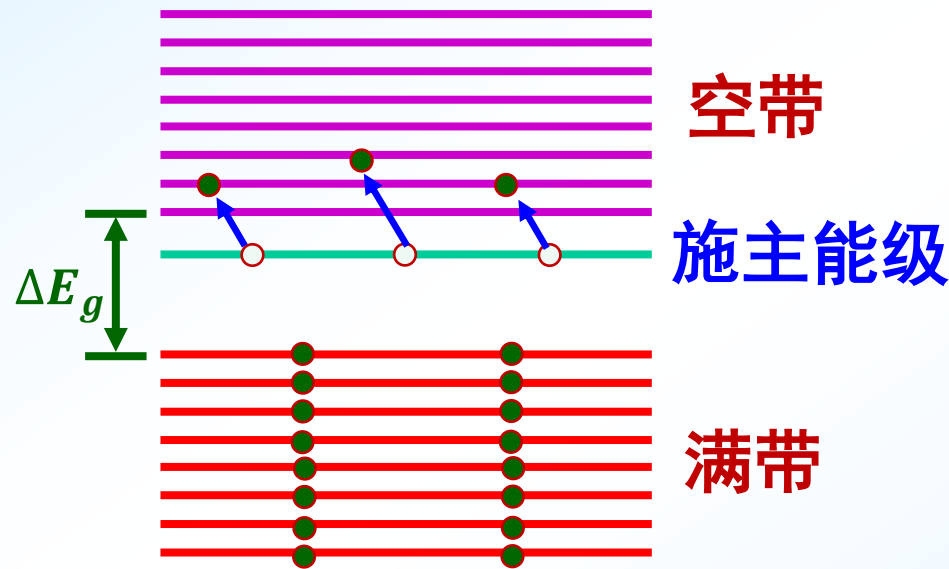
掺入As以后，五个价电子中，有四个电子与周围的Ge组成共价键晶体，还多余一个电子，此电子处于特殊的能级。

理论证明：掺入这种杂质后电子处于靠近空带下沿处的一个能级中（“**施主能级**”）



## 导电机制

这种杂质可提供  
导电电子故称为  
施主杂质



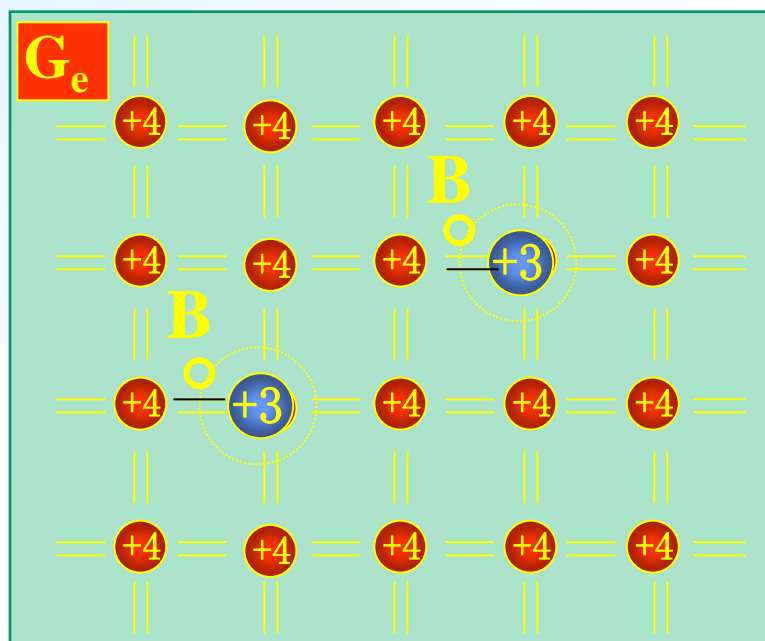
施主能级中的空穴不能移动，故在常温下，能导电的空穴数远小于电子数，导电作用主要靠跃入空带中的电子。（电子多数是载流子）

**N型半导体又称为电子型半导体。**

## 2). P型半导体(受主杂质半导体)

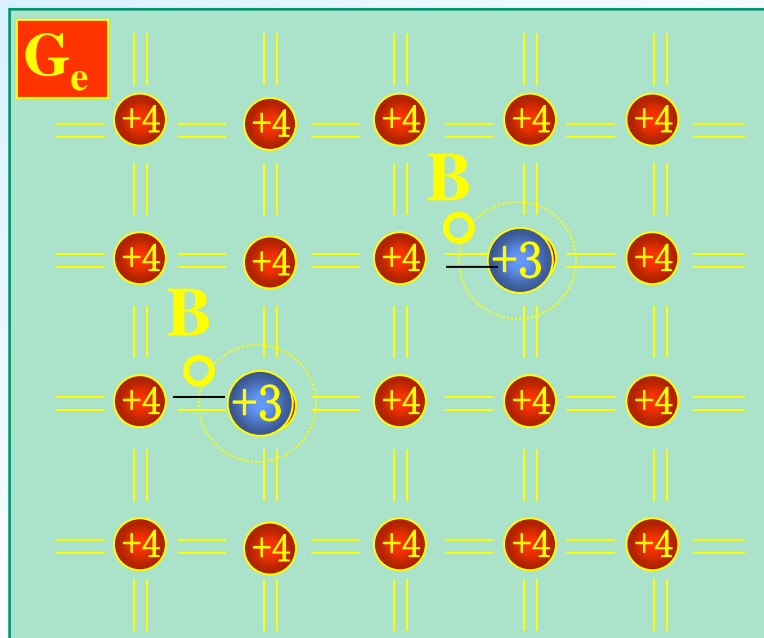
在纯净半导体中掺入少量可以提供导电**空穴**的杂质所形成的半导体。

例如在四价锗(Ge)元素半导体中掺入三价硼(B)所形成的半导体。

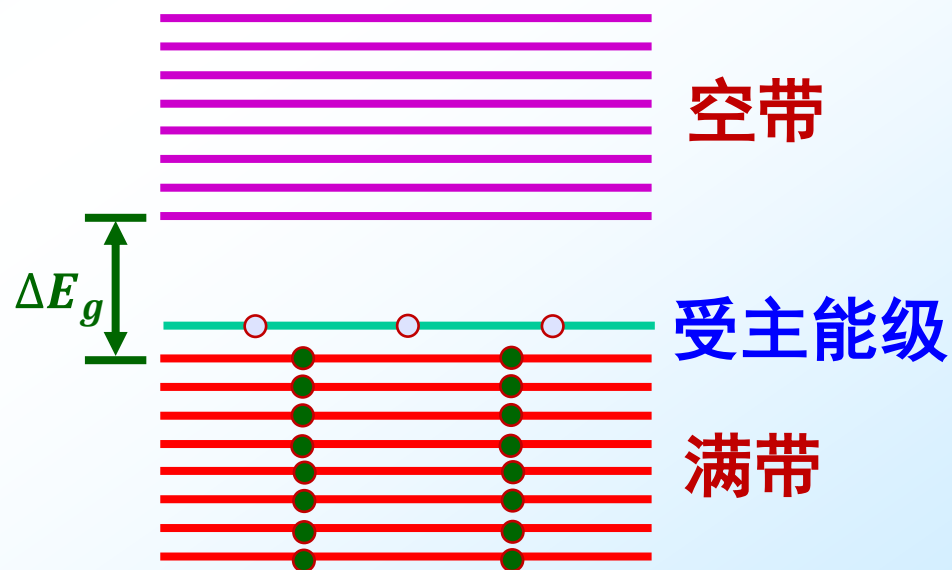


掺入B以后， B是三价，与周围的Ge组成共价键晶体，还缺少一个电子，从而形成一个空穴，此空穴处于特殊的能级。



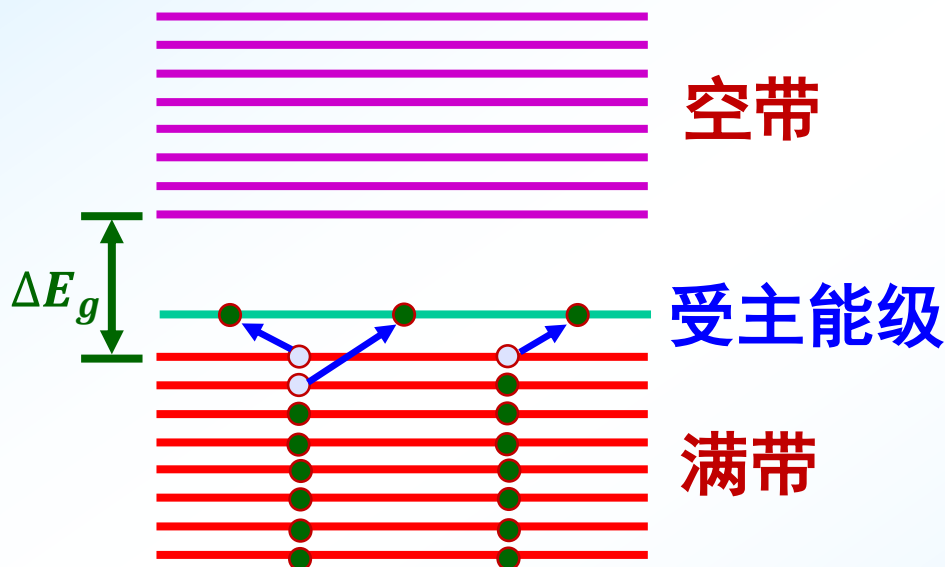


理论证明：掺入这种杂质后空穴处于靠近满带上沿处的一个能级中（“**受主能级**”）



## 导电机制

这种杂质可提供  
导电空穴故称为  
受主杂质



满带中的空穴数等于空带及受主能级中的电子数之和，由于受主能级中的电子不能移动，故在常温下，能导电的空穴数远大于电子数，导电作用主要靠满带中的空穴。（空穴是主要载流子）

**P型半导体又称为空穴型半导体。**

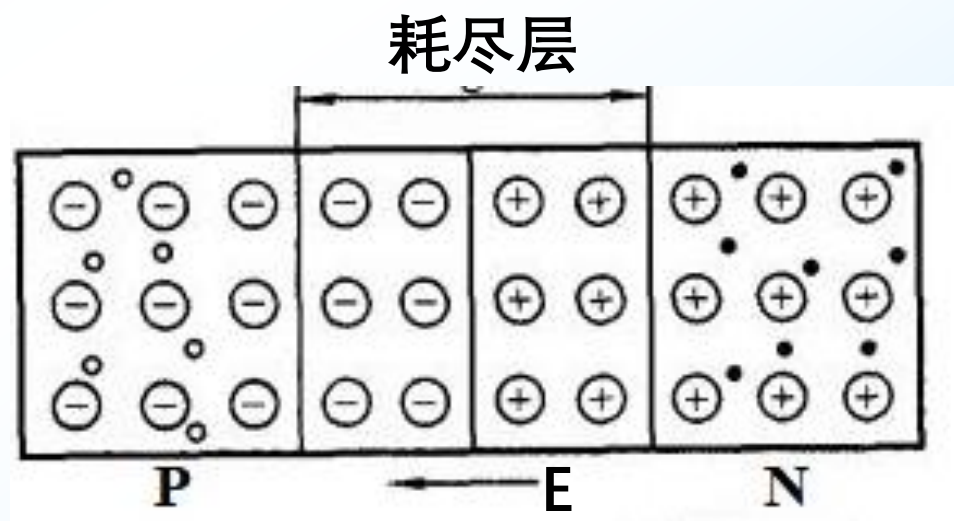
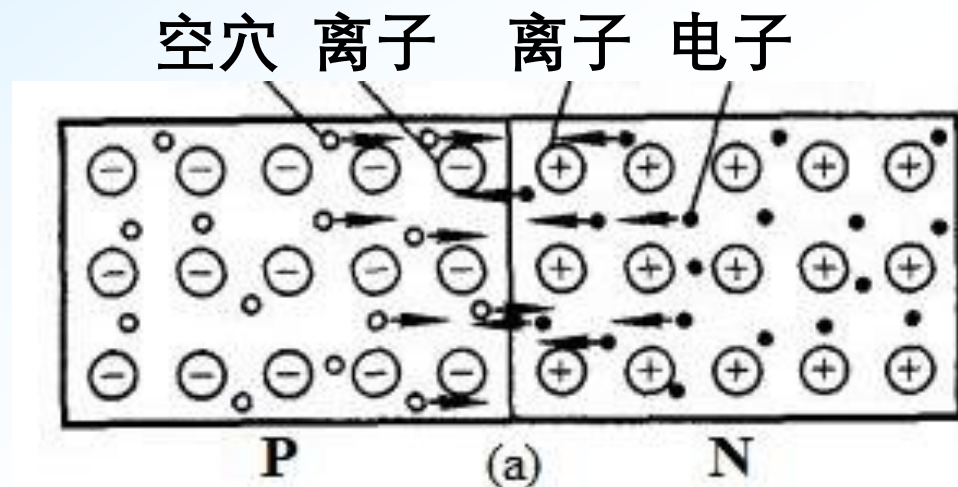
### 3). P-N结

形成：P型与N型半导体  
密切接触

P型半导体：空穴为自由正电荷，掺杂B原子捕获电子带负电（束缚电荷）

N型半导体：电子为自由负电荷，掺杂P原子电离带正电（束缚电荷）

耗尽层：电子和空穴扩散、中和，形成约100 nm厚度的耗尽层，内部无自由电荷，束缚电荷不平衡形成内建电场。电场E使得电流无法从p-n方向流动（单向导电）。

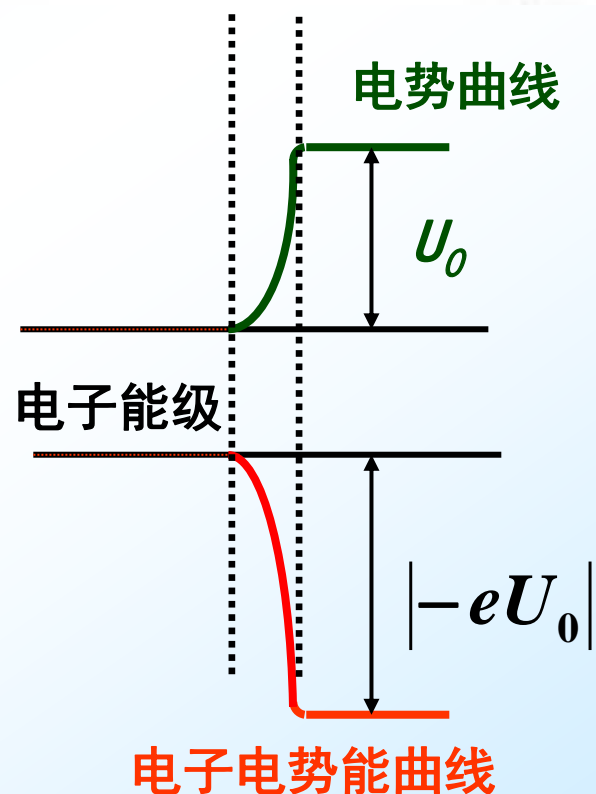
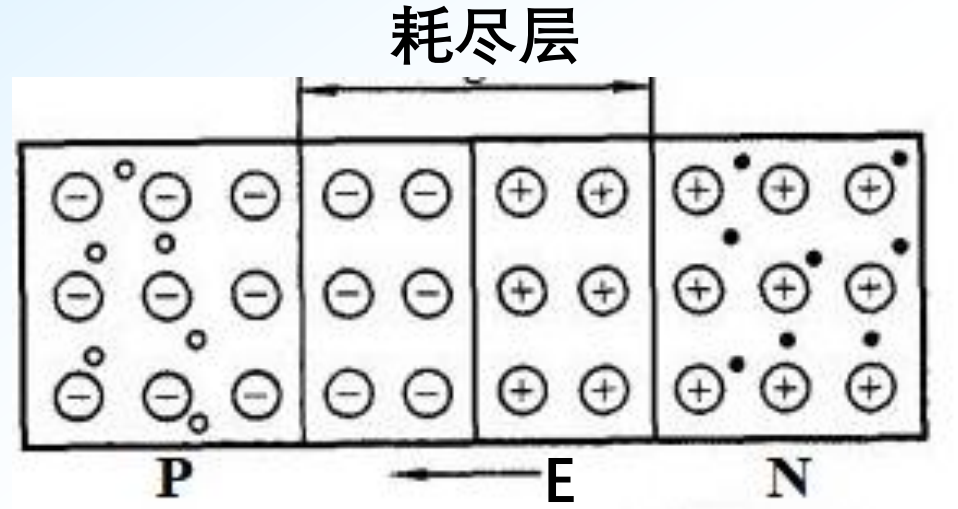


# P-N结的电势差

P-N结处存在电势差

它阻止P区带正电的空穴  
进一步往N区扩散

同时也阻止N区带负电的  
电子进一步往P区扩散

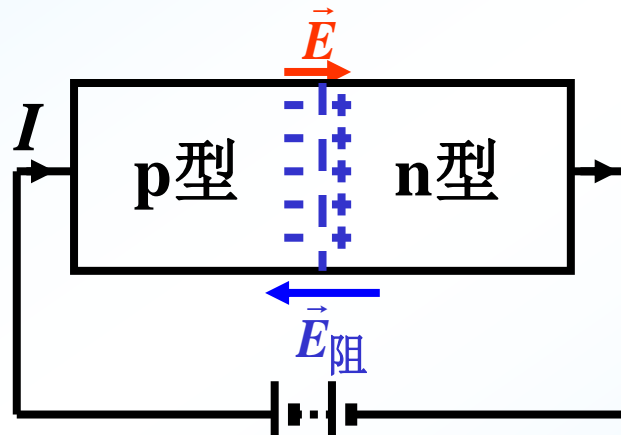


## 应用：P-N结的单向导电性

### 正向连接时：

阻挡层势垒被削弱，变窄，  
P区中的空穴和N区中的电子都易于通过P-N结。

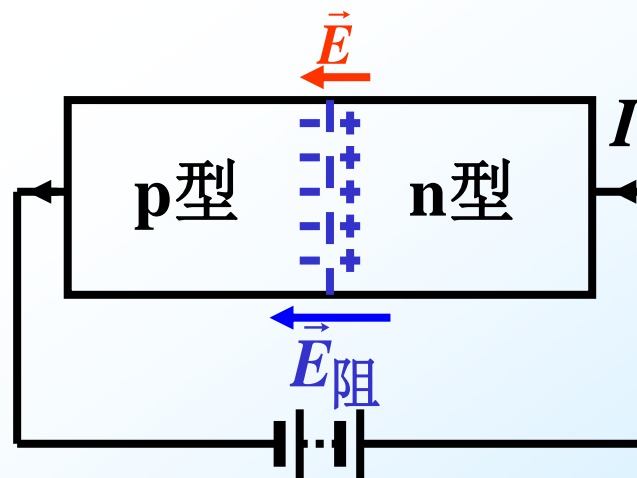
形成了 **P → N** 的正向宏观电流。



### 反向连接时：

阻挡层势垒增大，变宽，  
P区中的空穴和N区中的电子都难以通过P-N结。

没有正向宏观电流。



用途：制造二极管整流器和集成电路

## 第2节 激光 Laser

**激光 (Laser)** , 它的全名是:

**“辐射的受激发射光放大”**

**(Light amplification by stimulated emission of radiation)**

**世界上第一台激光器诞生于1960年。**

**它们的基本原理都是基于1916年爱因斯坦提出的受激辐射理论。**



**Theodore Maiman and  
the First Ruby Laser**



# The Nobel Prize in Physics 1964



**C. H. Townes**



**N. G. Basov**



**A. M. Prokhorov**

*"for fundamental work in the field of quantum electronics, which has led to the construction of oscillators and amplifiers based on the maser-laser principle".*

MASER: **M**icrowave **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation

LASER: **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation



## 按工作物质分类

固体(如红宝石 $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

液体(如某些染料)

气体(如He-Ne,  $\text{CO}_2$ )

半导体(如砷化镓GaAs)

## 按工作方式分类

连续式(功率可达 $10^4\text{W}$ )

脉冲式(瞬时功率可达 $10^{14}\text{W}$ )

## 激光的波长:

极紫外——可见光——亚毫米  
( $100\text{nm}$ ) (1.22mm)

# 一、激光的特点

## 1. 方向性强，能量集中

定位、导向、测距、精密机械加工、激光手术刀、激光武器等。

## 2. 单色性好，相干长度长

氦氖激光器：  $\Delta\lambda < 10^{-8} \text{ nm}$

$$L = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$$

普通光源： 0.1~10 cm ; 氦氖激光器： 180 公里

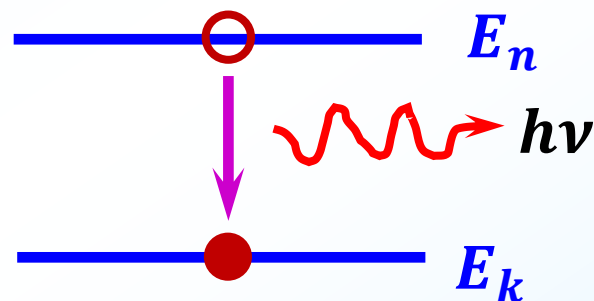
## 3. 亮度和强度极高

## 二、激光的发光原理

原子运动状态的变化与发光相关联的情况有三种：

**自发辐射**、**受激吸收**、**受激辐射**。

### (1) 自发辐射

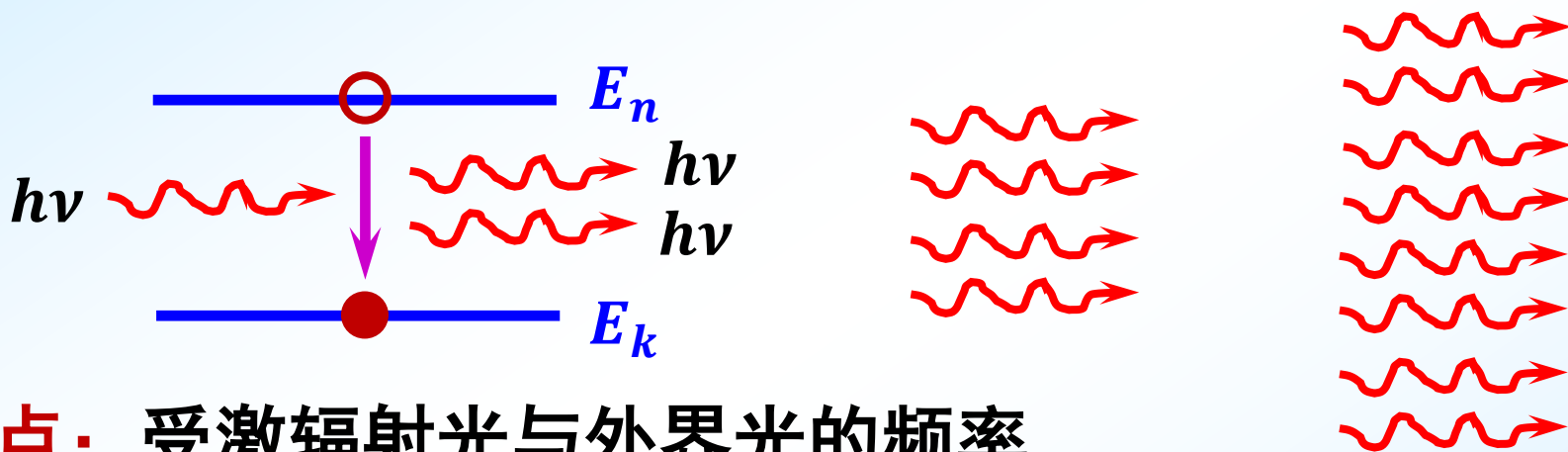


处于高能级的原子，受到扰动会跃迁至低能级，并同时放出光子。

**光子特性：**各原子所发出光子的相位，方向，偏振都是随机的。

## (2) 受激辐射

处在高能级的原子受到外界光场的刺激，从高能级跃迁至低能级并且辐射出光子的过程，被称为**受激辐射**。

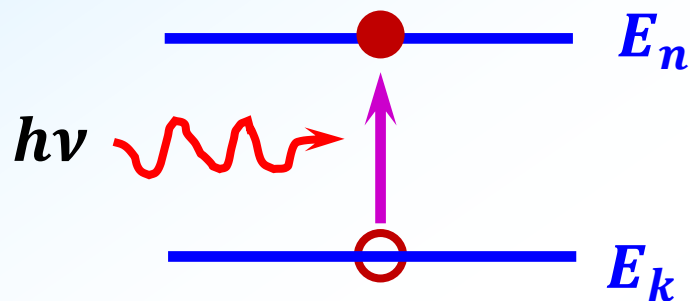


**光子特点：**受激辐射光与外界光的频率，偏振，相位及传播方向均相同。

**光放大：**入射一个光子，辐射出多于一个光子。

**链式反应：**辐射出的光子又做为新的入射光子，刺激其它的原子。

### (3) 受激吸收

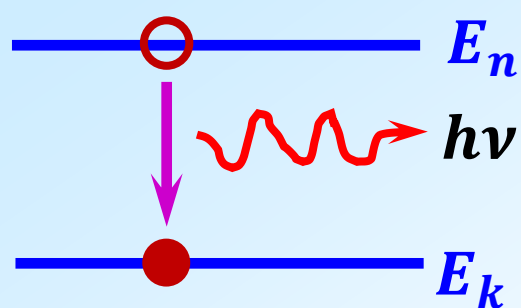


处在低能级的原子受到外界光场的刺激，吸收光子从低能级跃迁至高能级的过程，被称为**受激吸收**。

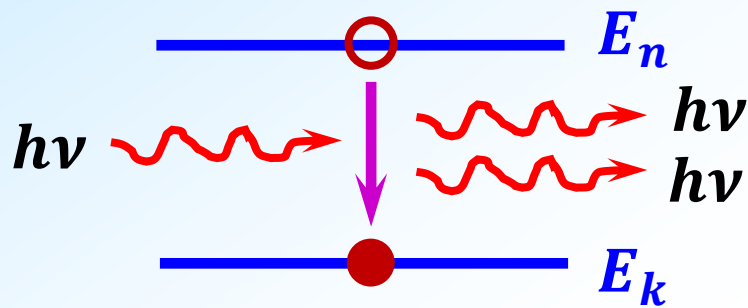
受激吸收使得光子数减少，能量转移到原子上。

激光的目的，是实现光场的**放大**，而不是衰减。还需要是的出射光不是杂散的而是**相干的**。

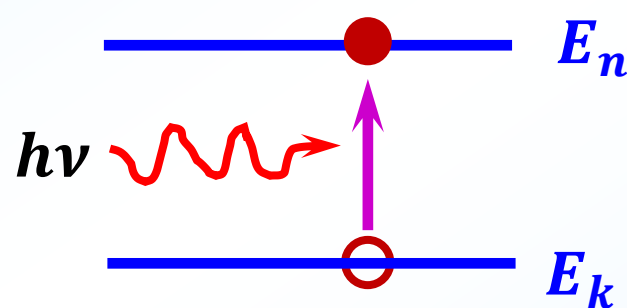
**问题：如何实现激光？**



自发辐射



受激辐射



受激吸收

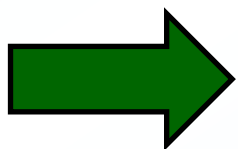
光场能量的增减：受激辐射与受激吸收的竞争。

由处在高能级或低能级的原子数决定。

$N_k$ ：处在低能级的原子数

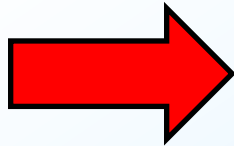
$N_n$ ：处在高能级的原子数

$$N_k > N_n$$



光被吸收

$$N_k < N_n$$



光被放大

要使受激辐射占主导地位必须使粒子数反转：

$$N_k < N_n$$

从热力学定律可知，达到热力学平衡时，处于能量为 $E$ 的能级上的粒子数：

$$N \propto e^{-\frac{E}{kT}} \quad E \uparrow \quad N \downarrow$$

例：氢原子基态 $E_1 = -13.6\text{eV}$ ，  
第一激发态 $E_2 = -3.4\text{eV}$   $E_1 < E_2$

在常温 $T = 300\text{K}$ 时，

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}} = e^{-\frac{10.2 \times 1.6 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23} \times 300}} = e^{-394} \approx 0$$

可见，处在热平衡状态时氢原子几乎都处在基态上。

而想要实现激光就必须把原子泵浦到非平衡的状态上去。



# 粒子数反转——产生激光的必要条件

为保证实现粒子数反转，必须满足：

(1) 有激励能源(泵浦) ——光，气体放电，化学，核能等。

将基态原子激发到高能态

但原子一般在激发态上停留的寿命只有 $10^{-9}$ — $10^{-8}$  s

如何使原子在激发态上停留的时间长一些？

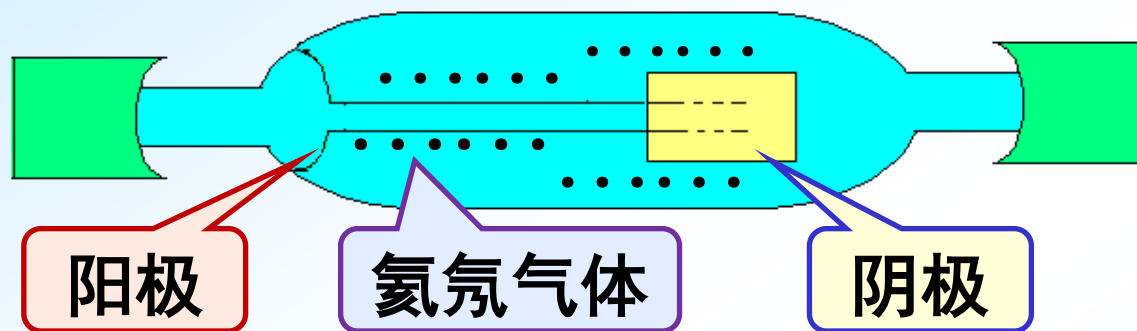
(2) 合适的工作物质 ——有合适的能级结构(亚稳态)。

一般激发态寿命： $\Delta t = 10^{-8}$  s

亚稳态寿命： $\Delta t = 10^{-3}$  s~1 s

具有亚稳态的物质叫做**激活物质**。

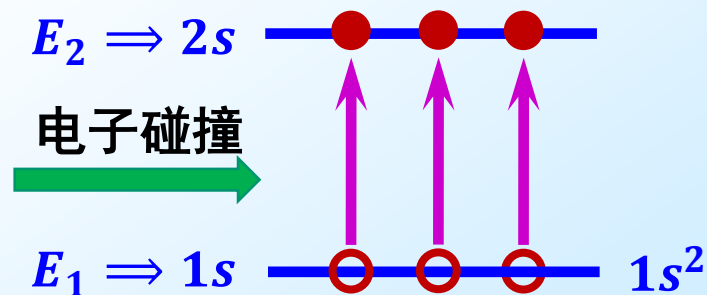
## 例：氦氖激光器



混合的氦氖气体  $\text{He:Ne} \Rightarrow 7:1$

粒子数反转：高速运动的电子可以击打氦原子和氖原子，使得两种原子都发生从低能态到高能态的跃迁。

电子击打氦原子



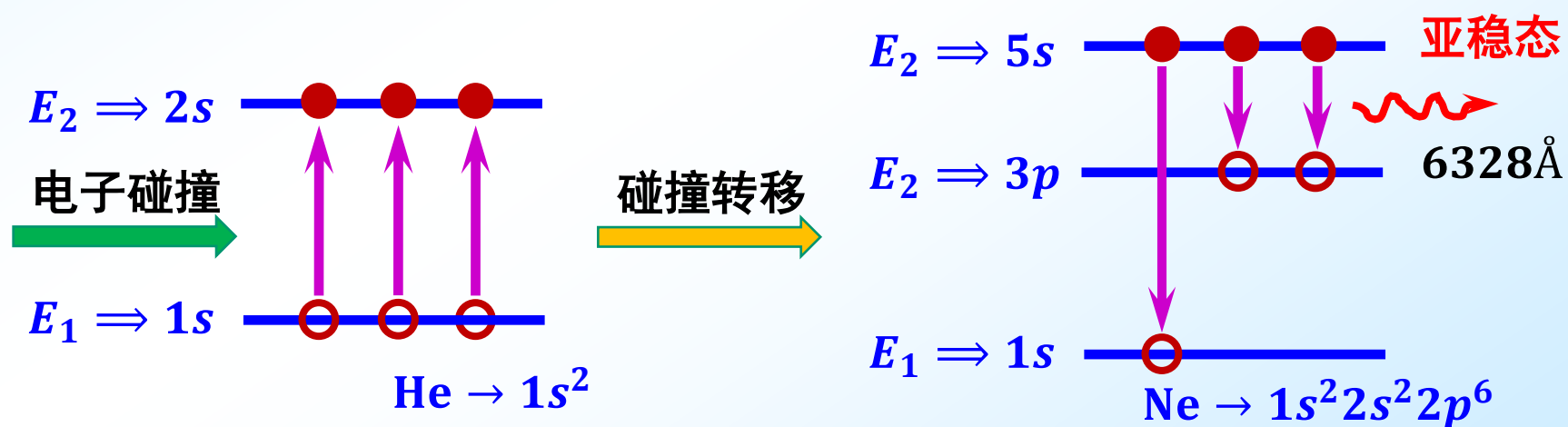
电子击打氖原子：氖原子从基态跃迁到 $3s$ ,  $3p$ ,  $4s$ ,  $4p$ ,  $5s$ 等能级上。

氦原子击打氖原子：氖原子从基态跃迁到 $5s$  (亚稳态)。

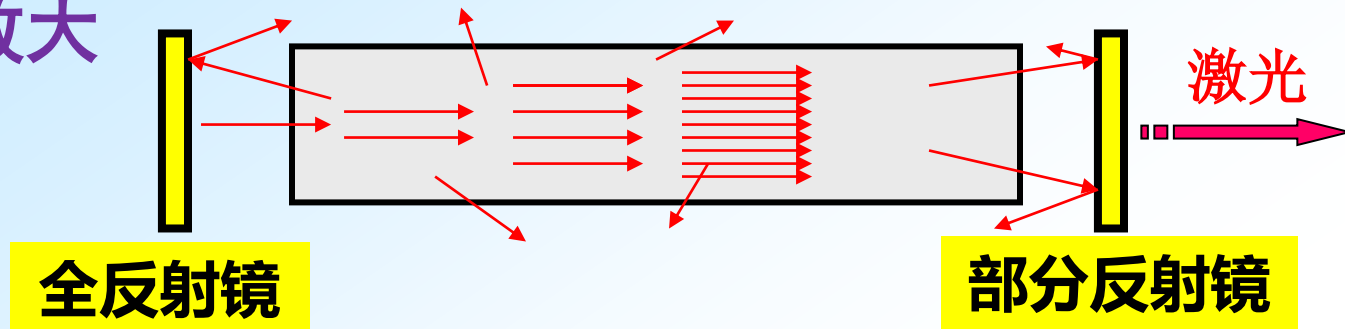
从基态到 $5s$ ：和电子碰撞，和氦原子碰撞

从基态到 $3p$ ：只能通过和电子碰撞

实现粒子数反转：氖原子在 $5s$ 上布局数占优



光放大



光学谐振腔

**传播方向：**腔内受激发的光子，沿**腔轴**来回反射，凡是传播方向偏离腔轴方向的光子逸出腔外被淘汰。

腔的长度使所需频率的光满足驻波条件，自相干涉得到**加强**。不符合频率条件的光经过多次反射，自相干涉得到**抑制**。

反射镜有多层膜，使所需波长的光反射干涉**加强**，两端装有布儒斯特窗，得到所需的**偏振态**。

## 总结：激光的产生

- (1) 工作物质粒子数反转；
- (2) 原子开始自发辐射，出射的光子又作用在别的原子上形成受激辐射；
- (3) 光学腔对这些光子进行反射，只有那些频率，传播方向，相位和偏振都符合要求的光子被保留在光腔内，其余的全部被淘汰；
- (4) 留在光腔内部的光子，又继续去刺激工作物质，受激辐射出光，而出射的光和留在腔内的那些光一样，如此光强不断增大直至达到饱和。

# 光学谐振腔的作用

(1) 产生与维持光的振荡，使光得到**加强**；

形成光振荡，从而获得很强的光。

当光的放大作用与光的损耗达到动态平衡时，就形成稳定的光振荡——输出**激光**。

(2) 使激光具有极好的方向性(沿轴线)；

管内受激发射的光子，沿管轴来回反射，凡传播方向偏离管轴方向的光将逸出管外而被淘汰。

(3) 使激光具有极好的**单色性**(选择频率)；

光在谐振腔内传播时形成以反射镜为节点的驻波，满足：

$$nL = k \frac{\lambda}{2}, \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

光学谐振腔对光放大实行**选择**，**控制**，**增强**的作用。

# 产生激光的必要条件

- (1) 激励能源 (使原子激发)
- (2) 激活物质 (有合适的亚稳态实现粒子数反转)
- (3) 光学谐振腔 (方向性, 放大性, 单色性)



# 激光的特性

**极好的相干性：**受激辐射产生的光子是全同光子，相干长度超过400千米。

**极好的单色性：**氦氖激光器所发射的激光波长范围是 $\Delta\lambda < 10^{-7}\text{\AA}$ 。

**极好的方向性：**发散角在 $10^{-4}\text{rad}$ 范围内。

**极好的亮度：**能量在极小的方向上高度集中。

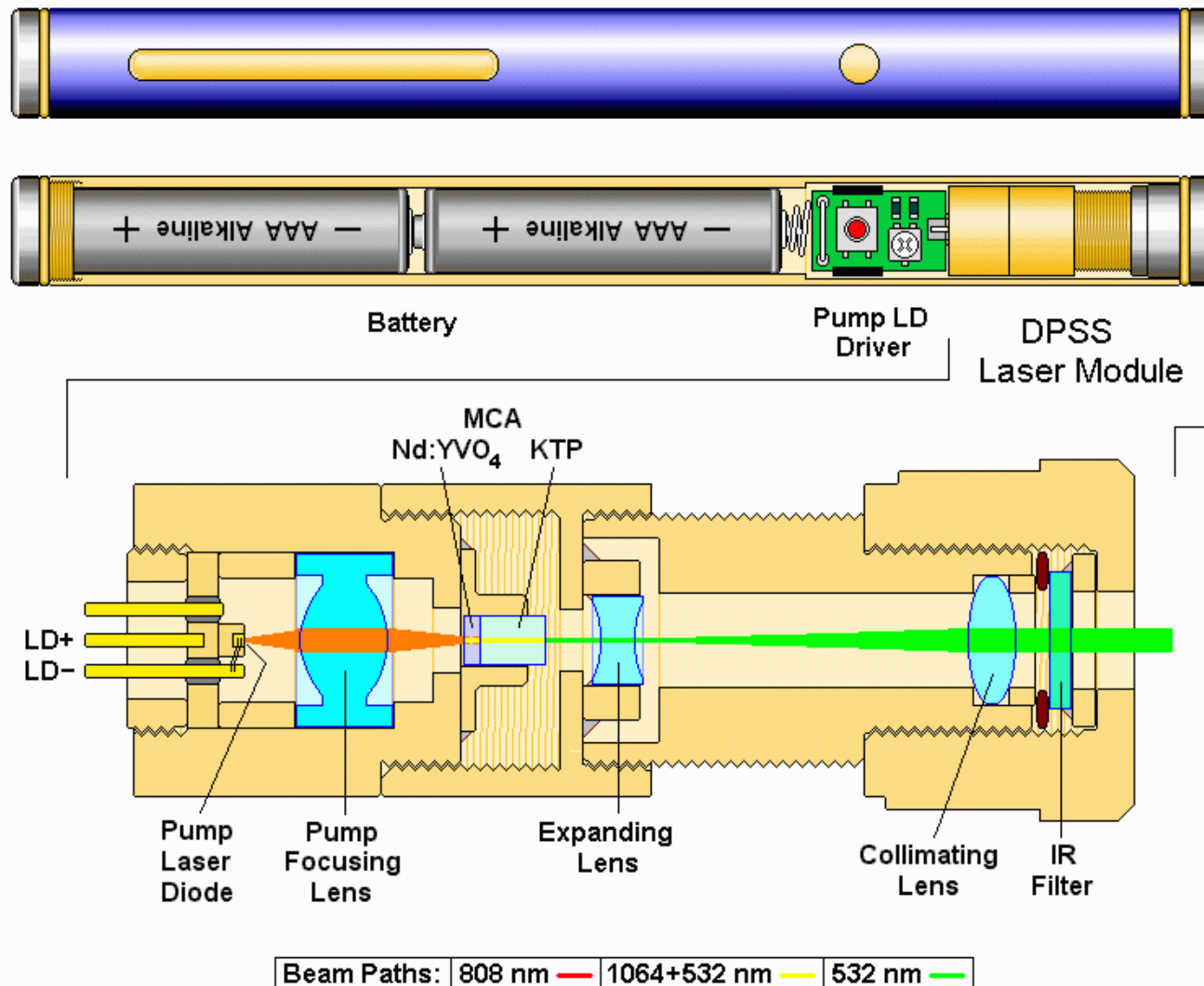
**类比：**普通光好比百万人各自为阵，一盘散沙，激光好比百万大军合众为一，步伐整齐。

# Ali Javan and the First Gas Laser



# Types of Lasers

- **Solid-state lasers** have lasing material distributed in a solid matrix (such as ruby or neodymium:yttrium-aluminum garnet "YAG"). Flash lamps are the most common power source. The Nd:YAG laser emits infrared light at 1064 nm.
- **Gas lasers** are pumped by current. Helium-Neon lasers in the visible and IR. Argon lasers in the visible and UV. CO<sub>2</sub> lasers emit light in the far-infrared (10.6 μm), and are used for cutting hard materials.
- **Excimer lasers** (from the terms *excited* and *dimers*) use reactive gases, such as chlorine and fluorine, mixed with inert gases such as argon, krypton, or xenon. When electrically stimulated, a pseudo molecule (dimer) is produced. Excimers lase in the UV.
- **Dye lasers** use complex organic dyes, such as rhodamine 6G, in liquid solution or suspension as lasing media. They are tunable over a broad range of wavelengths.
- **Semiconductor lasers**, sometimes called diode lasers, are pn junctions. Current is the pump source. Applications: laser printers or CD players.



**Green laser pointers also called DPSSFD for "diode pumped solid state frequency-doubled"**

# Laser Safety Classifications

**Class I** - These lasers are not hazardous.

**Class IA** - A special designation that applies only to lasers that are "not intended for viewing," such as a supermarket laser scanner. The upper power limit of Class IA is 4 mW.

**Class II** - Low-power visible lasers that emit above Class I levels but at a radiant power not above 1 mW. The concept is that the human aversion reaction to bright light will protect a person.

**Class IIIA** - Intermediate-power lasers (cw: 1-5 mW), which are hazardous only for intrabeam viewing. Most pen-like pointing lasers are in this class.

**Class IIIB** - Moderate-power lasers (~ tens of mW).

**Class IV** - High-power lasers (cw: 500 mW, pulsed: 10 J/cm<sup>2</sup> or the diffuse reflection limit), which are hazardous to view under any condition (directly or diffusely scattered), and are a potential fire hazard and a skin hazard. Significant controls are required of Class IV laser facilities.



## 小结：

### 一、能级跃迁方式

### 二、产生激光的必要条件

1.激励能源（使原子激发）

2.粒子数反转（有合适的亚稳态能级）

3.光学谐振腔（方向性，光放大，单色性）

### 三、光学谐振腔的作用

## 作业： Chap.16 —T1、 T2、 T3、 T4

1. 独立完成作业。
2. 图和公式要有必要的标注或文字说明。
3. 通过学习通提交作业。
4. 作业缺交三分之一及以上者按规定不能参加考试。

