



第二十三章

激光和固体能带

基本知识



§ 23.1 激光产生的原理

激光**Laser**: 受激辐射光放大
*Light Amplification of Stimulated
Emission of Radiation*

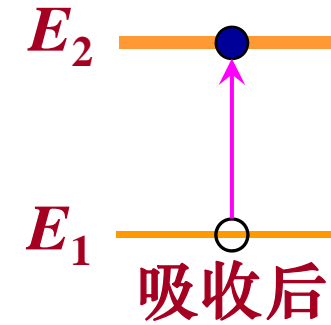
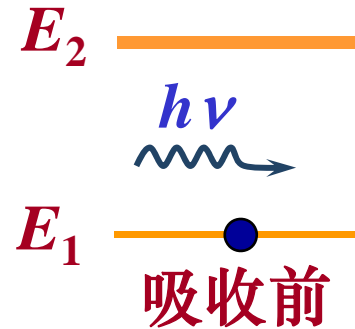
一、光和物质的相互作用

按照原子的量子理论, 光和物质的相互作用是光子与电子、原子、离子等粒子的相互作用, 可能引起原子的受激吸收、自发辐射和受激辐射三种跃迁过程.



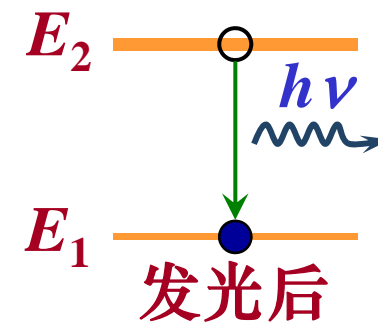
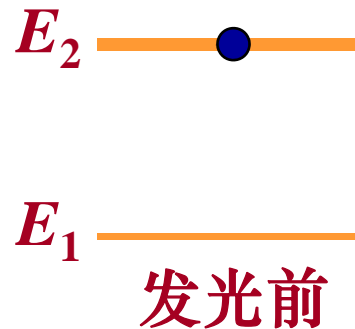
1. 受激吸收过程

受激吸收
(光激发)



2. 自发辐射过程

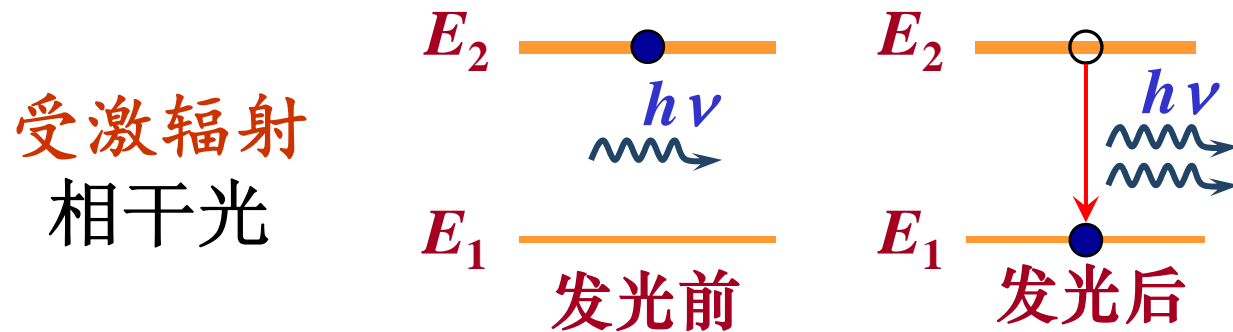
自发辐射
非相干光





3. 受激辐射过程

在自发辐射之前, 受到能量为 $h\nu = E_2 - E_1$ 的外来光子的诱发作用, 可受激发射一个与外来光子频率、相位、偏振态和传播方向都相同的光子.



受激辐射 → 激光产生的理论基础之一



二、粒子数反转和光放大

1、为什么普通光源不产生激光

原子在各能级上的分布满足玻尔兹曼分布：

$$N_i = Ce^{-\frac{E_i}{kT}}$$

处于 E_2 和 E_1 的
粒子数之比为

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}}$$

正常状态下, 高能级的原子数远小于低能级的原子数.

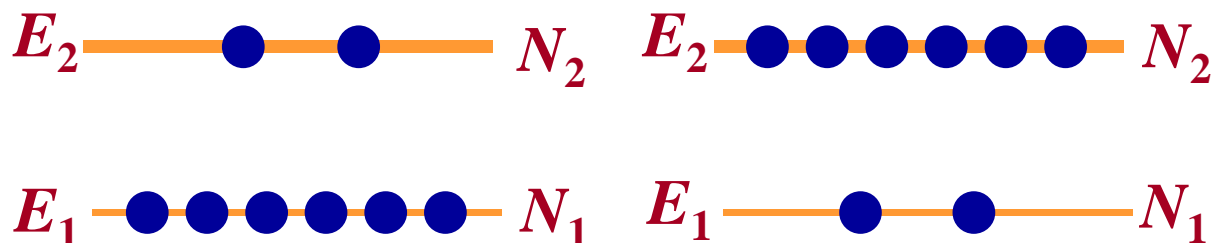
设 $T=300\text{ K}$, $E_2 - E_1 = 1\text{ eV}$ \Rightarrow $\frac{N_2}{N_1} \approx 10^{-40}$



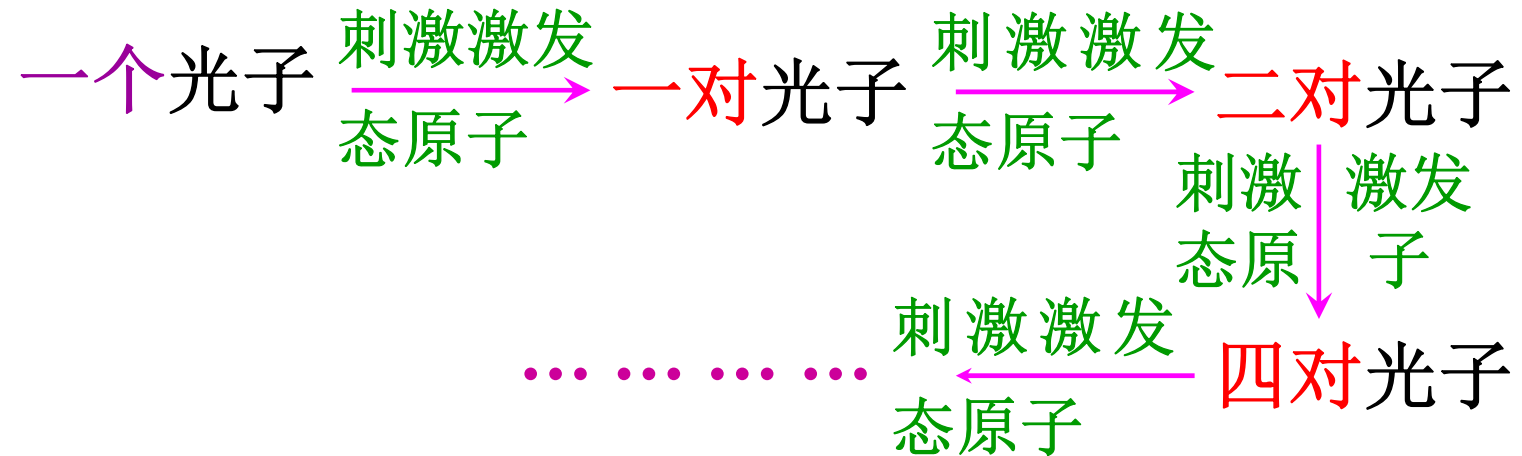
2、粒子数反转

正常态时 $N_1 \gg N_2$ ，所以处于热平衡状态下介质的吸收总是大于辐射。只有当 $N_2 > N_1$ 时，受激辐射的光子数才会多于受激吸收，这种反常的粒子分布称为**粒子数反转**。处于粒子数反转分布时的工作物质称为**激活介质**或**增益介质**。

粒子数反转 \rightarrow 激光产生的必要条件



粒子数反转图示



产生越来越多相同特征的光子→光放大

光放大→激光产生的理论基础之二

4、粒子数反转的实现



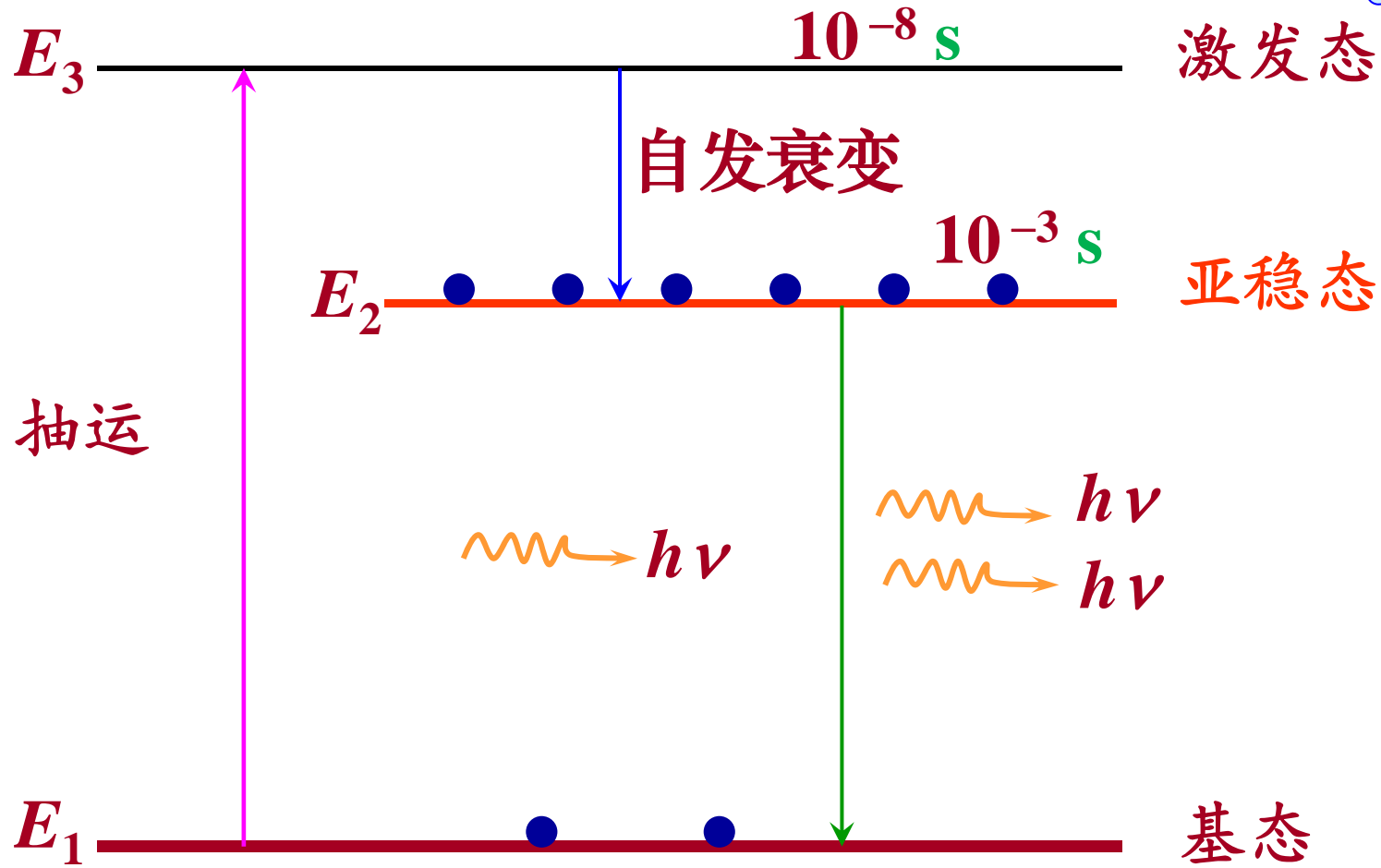
4、粒子数反转的实现 → 亚稳态能级

大学物理

实现粒子数反转的条件：选取合适的工作物质，并提供激励能源，将低能级的粒子激发到高能级上，称为**激励**或**抽运**(泵浦)。

理论上可以证明，在只有二能级的系统中，无论抽运速率多么大，都不可能实现粒子数反转，必须存在寿命较长的**亚稳态能级**，时间约为 10^{-3}s ，这样的三能级和四能级系统，才有可能实现粒子数反转分布。

红宝石是在基质 Al_2O_3 中掺入少量铬离子 Cr^{+3} 的晶体。产生激光的是铬离子，它是典型的三能级系统。



铬离子能级示意图

仅有激光产生的理论基础足够了吗？

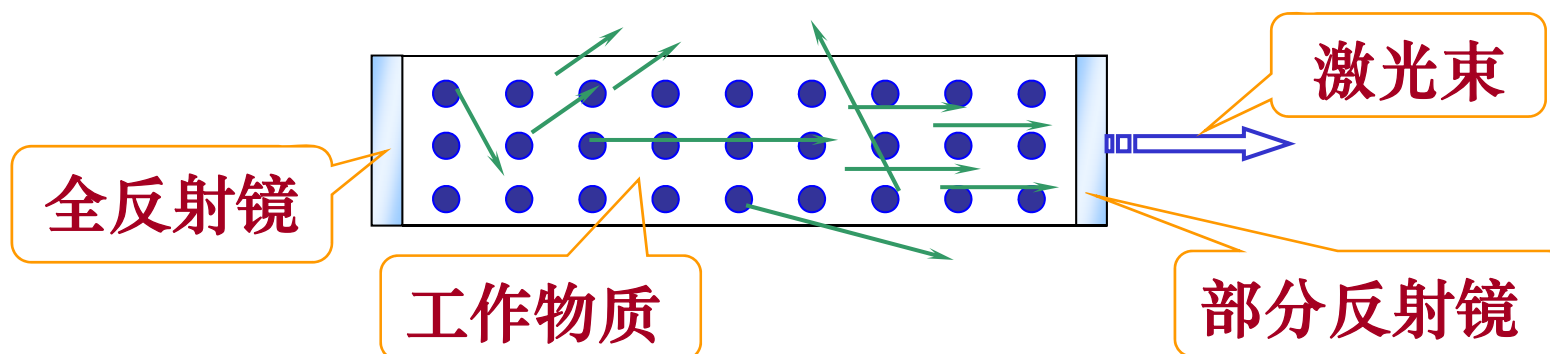


三、光学谐振腔、激光模式

光学谐振腔

实现粒子数反转状态后，利用光学谐振腔对光进行放大，形成稳定的激光束。

谐振腔由两个平行的反射镜面组成，光子在两镜面间来回反射，沿途不断引起受激辐射，形成连锁反应，产生雪崩式光放大，此过程称为**光振荡**。一反射镜反射系数为95%左右，射出激光。



驻波→稳定和选频

光学谐振腔→激光产生的**物质基础**



§ 23.2 激光器

激光器分类

按工作物质: 分为气体、固体、半导体、液体激光器。

按工作方式: 分为脉冲激光器和连续激光器。

目前最常见的激光器有**氦氖气体激光器**和**红宝石固体激光器**。



§ 23.3 激光的特性

1. 方向性好:

光学谐振腔保证了光束方向一致, 发散角在毫弧度数量级.

2. 亮度高:

在单位时间内沿传播方向单位立体角内发射的能量称为亮度, 太阳的亮度值约为:

$L_e \approx 10^3 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$, 而大功率激光器的亮度可达: $L_e \approx 10^{12} \sim 10^{17} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$

3. 单色性好:

普通光源单色性最好的氪灯 $\Delta\lambda = 0.047 \text{ nm}$, 而一台氦氖激光器的谱线宽度 $\Delta\lambda < 10^{-6} \text{ nm}$.

4. 相干性好:

一台氦氖激光器的相干长度可达 $2 \times 10^7 \text{ km}$. 氪灯的相干长度只有 38.5 cm .



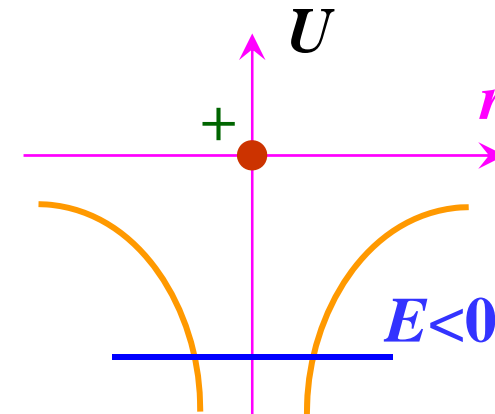
§ 23.4 固体的能带

固体分为晶体和非晶体, 晶体的分子、原子或离子呈现有规则的空间周期性排列, 称为**晶体点阵** (晶格), 晶体的宏观性质, 与这种周期性有密切关系.

一、电子的共有化

孤立原子中电子的运动

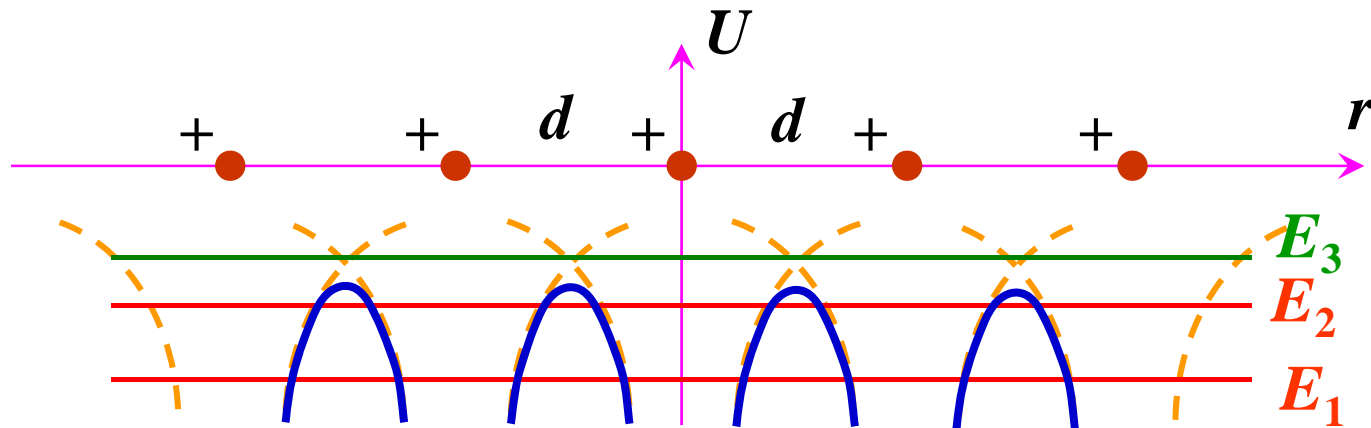
电子在核和其它电子的库仑势场中运动, 动能小于势能 ($E < 0$), 电子类似在势阱中, 能穿出势垒跑出去的概率很小.





大量原子中电子的共有化运动

晶格间距 d 很小, 电子受到其它原子的作用, 相邻原子间势垒降低. 原子内层电子能量 E_1 较低, 外壳层上的价电子能量 E_2 较高, 最外层的甚至可以超过势垒高度, 如 E_3 . 这些电子可穿越势垒在晶体中自由运动, 成为**共有电子**, 称为电子的**共有化**.

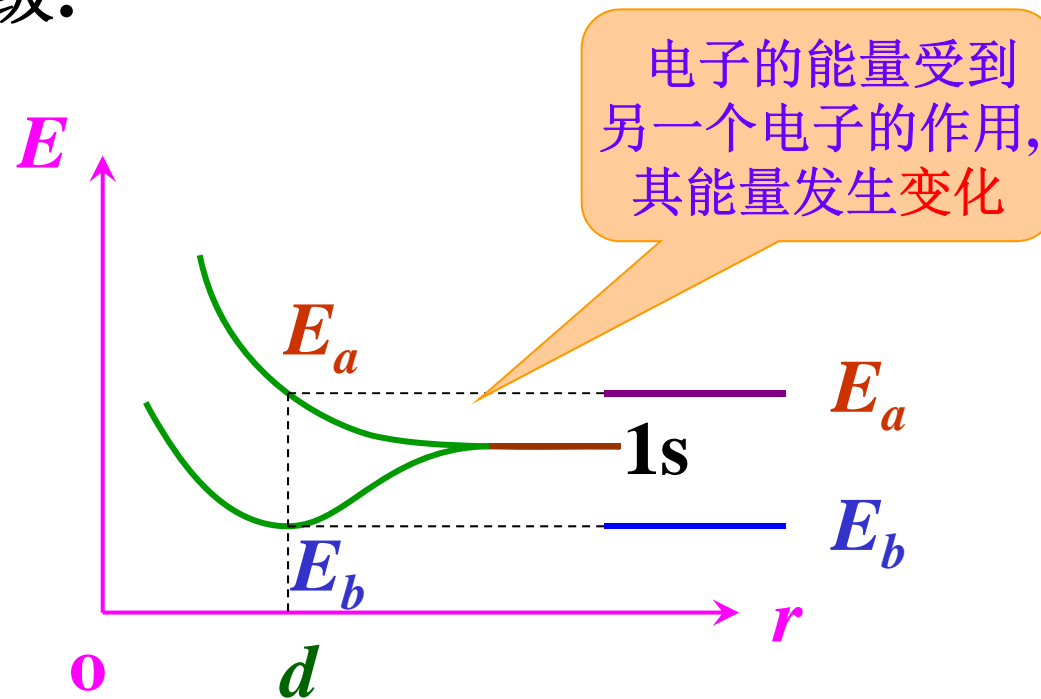




二、固体能带的形成

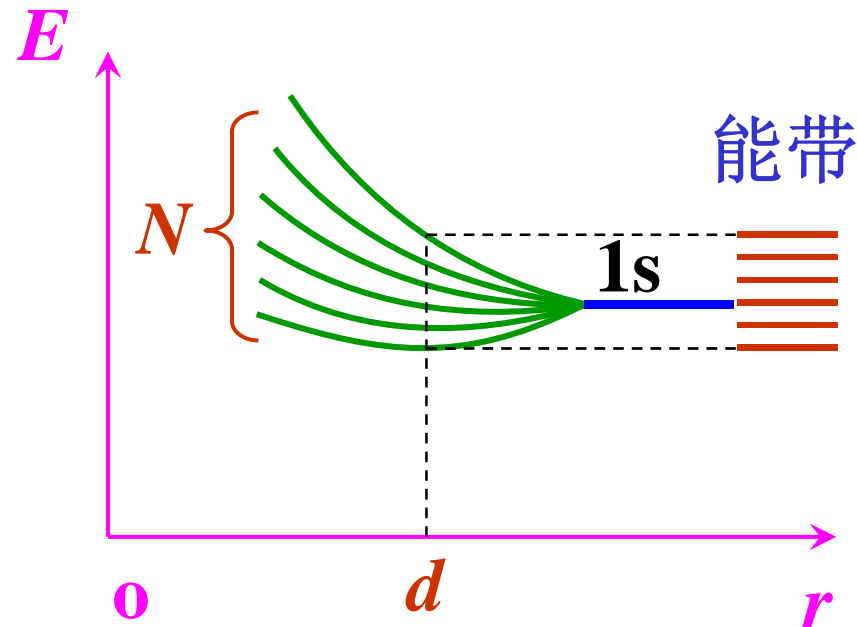
1. 能级的分裂

电子的共有化，使原来各孤立原子中能量相同的能级分裂成不同能级，如两个氢原子构成氢分子时，两个相同的基态 $1s$ 成靠得很近的 E_a 和 E_b 能级。





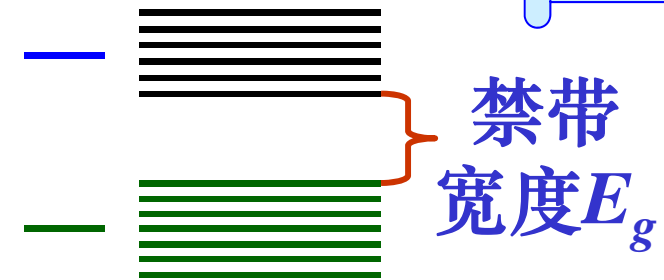
N 个原子组成晶体, 一个能级分裂成 N 个能级, 总宽度不超过 10 eV , 这些新能级间隔小于 10^{-22} eV , 连成一片, 形成带状能级, 称为**能带**.



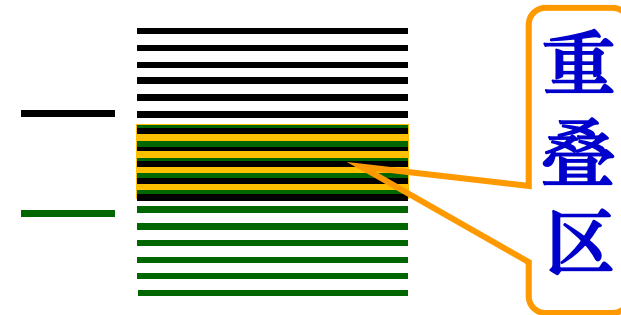


2. 关于能带的概念:

禁带: 在相邻能带之间没有或不存在的能级的能量区域.



能带重叠:
禁带宽度为0



满带: 低能级能带中填满电子后称为满带.
满带中电子不能在带中移动, 因此不起导电作用.



满带

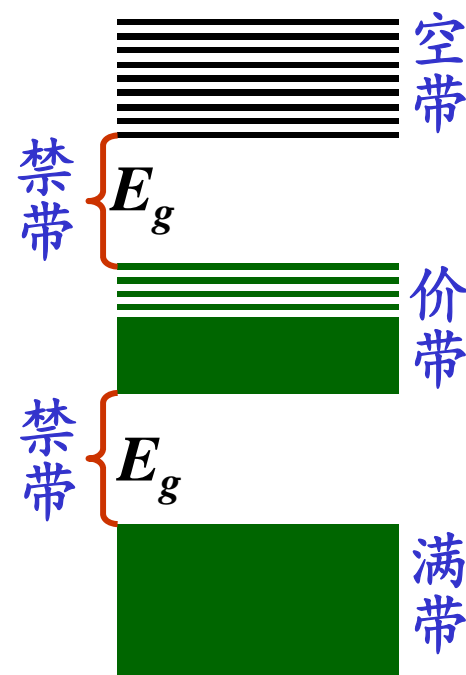


价带: 价电子所在能级的能带称为价带, **一般部分被填满**. 未被填满能带中的电子在外电场作用下, 可以跃迁到能带中较高的能级上, 形成电流, 具有导电性.

空带: 激发态上的能级分裂后, 若无电子填入, 则称为空带.

有能级存在, 但无电子填入

导带: **没有被填满的价带和空带**, 在外电场的作用下都可以有电子跃迁填入, 具有导电能力, 称为导带.





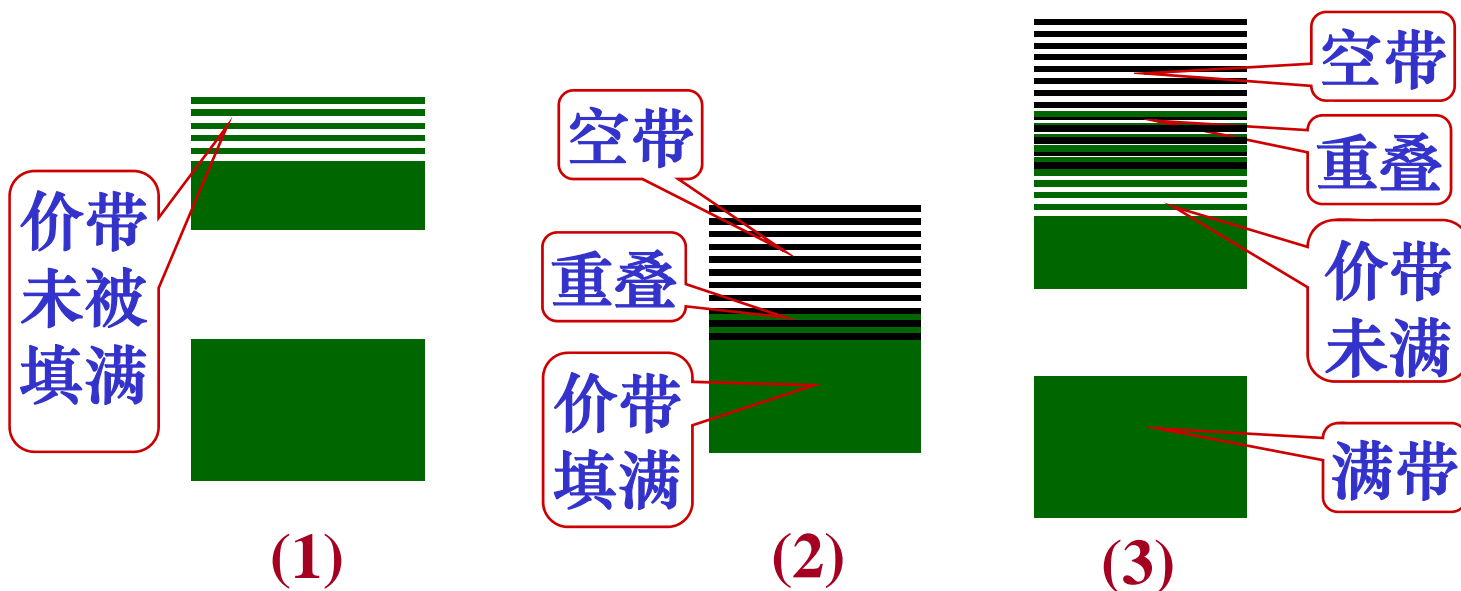
三、导体、绝缘体和半导体

1. 导体:

金属中的共有电子参与导电, 特点是

存在导带, 有三种能带结构:

- (1) 价带未被填满, 如单价的金属晶体.
- (2) 价带被填满, 但和上面的空带重叠, 形成不满能带. 如二价金属Mg、Be、Ca等.
- (3) 未满价带又与空带重叠, 如Na、K等.



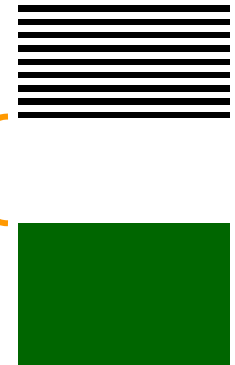


2. 绝缘体:

价带为满带, 禁带 E_g 较宽,
电子不能跃迁到空带上,
不能形成电流.

$$E_g \approx 3 \sim 6 \text{ eV}$$

绝缘体能带

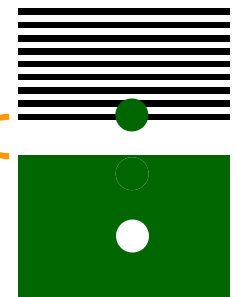


3. 半导体:

禁带 E_g 较窄, 在满带
中的上层电子有可能激发
到空带上去而导电, 称为
电子导电.

$$E_g \approx 0.1 \sim 1 \text{ eV}$$

半导体能带



此时, 满带中留下空着的能态, 称为空穴. 出现电子-空穴对. 空穴移动, 也形成电流, 称为空穴导电.





例. 硫化铅(PbS)晶体的禁带宽度为0.3eV, 要使这种晶体产生本征光电导, 求入射到晶体上的光的最长波长.

解:

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} \geq \Delta E$$

$$\lambda \leq \frac{hc}{\Delta E} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{0.3 \times 1.6 \times 10^{-19}} \\ = 41.4 \times 10^{-7} \text{ (m)}$$



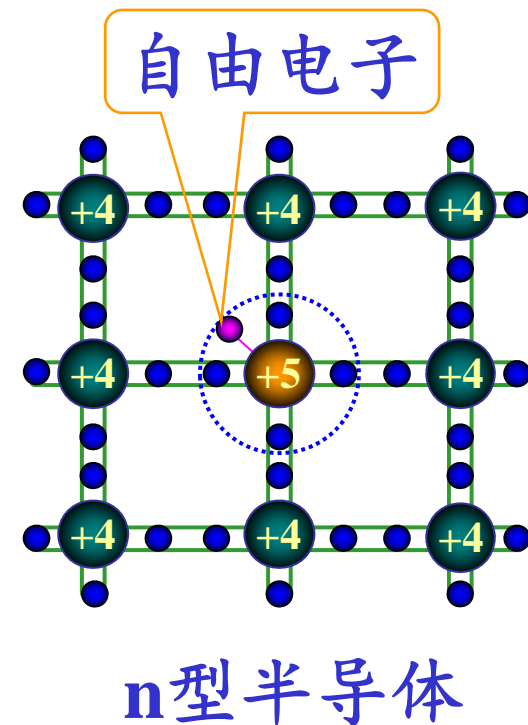


§ 23.5 n型半导体和p型半导体

本征半导体、杂质半导体：半导体分纯净和掺杂两类，纯净半导体称为**本征半导体**，参有少量杂质时为**杂质半导体**。

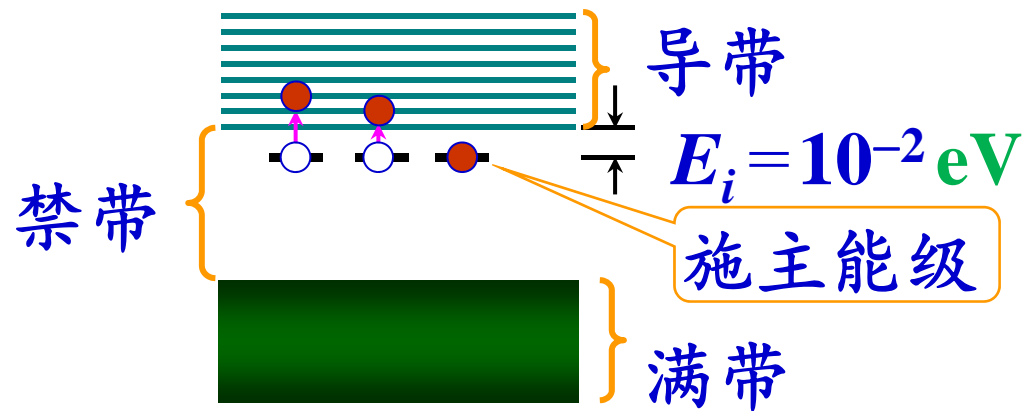
一、n型半导体

在四价元素的晶体中掺入少量**五价**元素，如**硅**或**锗**中掺入磷就形成了**电子型**半导体，或**n型**半导体。磷原子有五个价电子，其中四个参与共价键的组合，剩下的一个价电子在磷离子的电场范围内运动。





杂质能级: 理论计算表明, 这个电子的能级位于禁带中, 而且靠近**导带的边缘**, 称为**杂质能级**. 此电子在受到激发时, 很容易跃迁到导带成为自由电子, 参与导电. 五价原子称为**施主**, 相应能级称为**施主能级**.



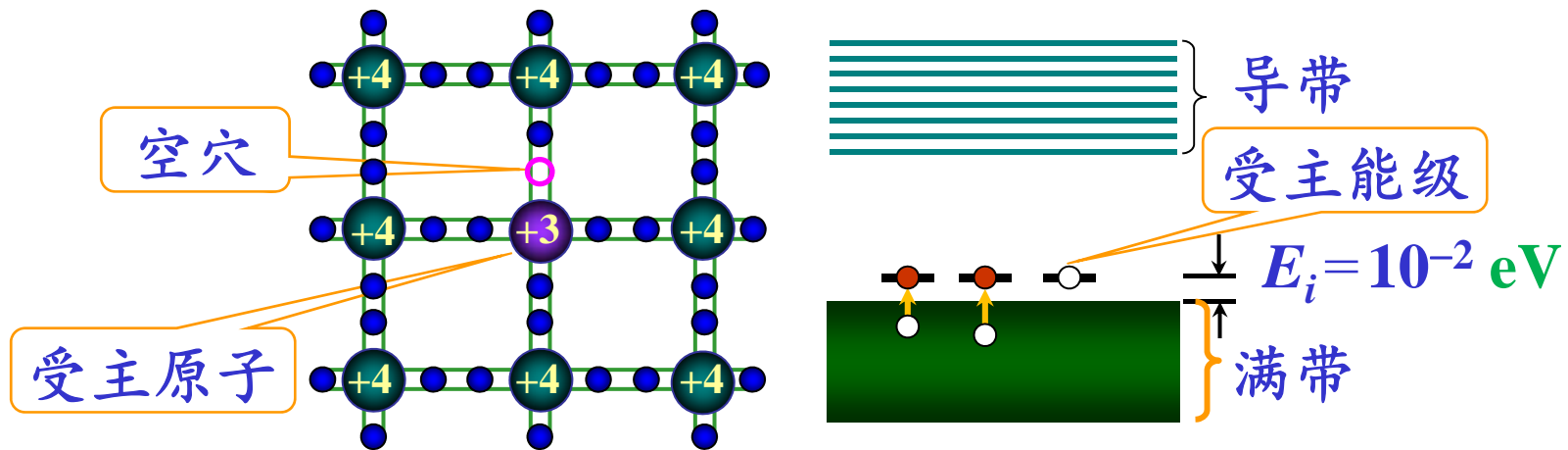
n型半导体杂质能级



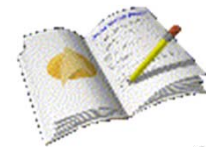
二、p型半导体

掺入少量三价元素就构成了**p型半导体**，如硼。硼原子只有三个价电子，形成共价键时缺少一个电子，即出现空穴。空穴能级也位于禁带中，且靠近**满带的顶部**。

满带中的电子很容易被激发，形成空穴导电。三价原子称为**受主**，相应能级称为**受主能级**。



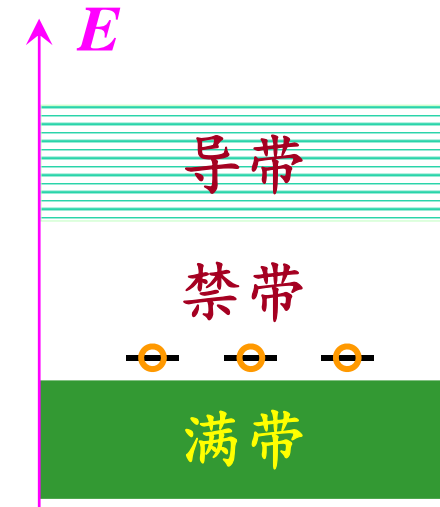
p型半导体和杂质能级





例：若锗用铟(三价元素)掺杂，则成为 p、空穴 型半导体。请在所附的能带图中定性画出施主能级或受主能级。

解：三价元素组成共价键时缺一个电子，形成空穴导电，产生受主能级。



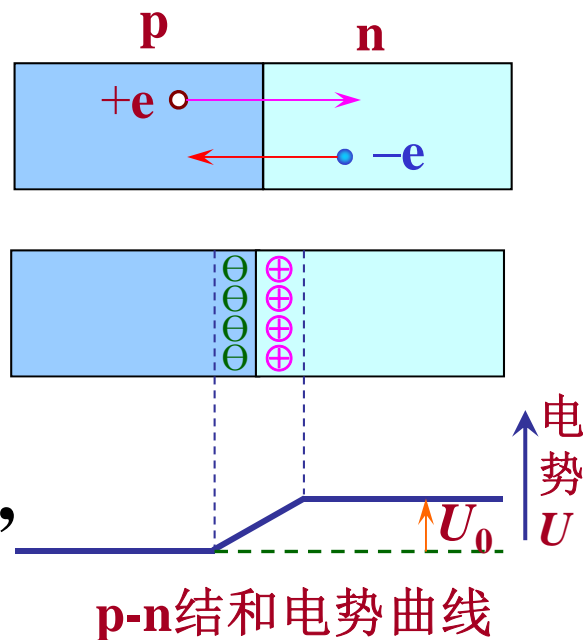
例：已知某两能带间的禁带宽度为 E_g ，用光子激发电子到高能级上，光子的频率至少为 E_g/h 。





§ 22-6 p-n结

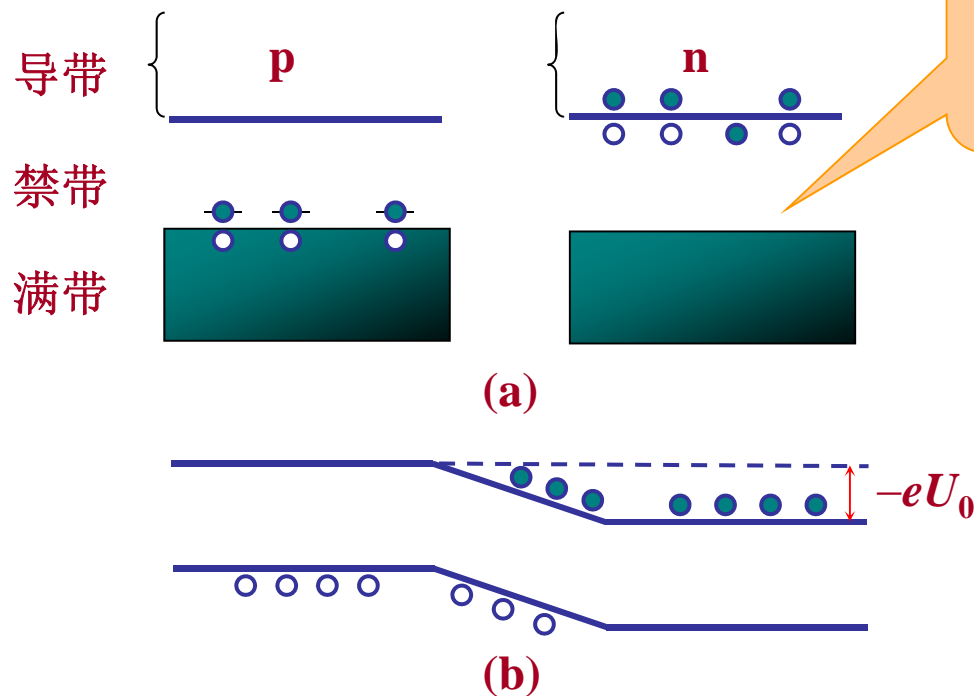
- 1. 扩散运动:** 本征半导体掺以不同的杂质, 一边成为p型, 另一边成为n型. 那么就会发生电子从n区向p区**扩散**, 而空穴从p区向n区**扩散**的现象.
- 2. 电偶极层:** 材料本身电中性, 故在p区出现过剩的负电荷, 在n区出现过剩的正电荷, 界面两侧形成电偶极层, 称**p-n结**. 其厚度约为 10^{-7}m .
- 3. 漂移运动:** 电偶极层电场作用下, 空穴从n型区向p型区**漂移**, 电子从p型区向n型区**漂移**.
- 4. 接触电势差:** 扩散与相反的**漂移**达到动态平衡后, 电偶层内电荷分布一定, 在交界面两侧形成一定的接触电势差 U .





接触电势差的存在，使电子在p-n结两侧的静电势能不等，在电势高处(n)电势能低，在电势低处(p)电势能高。因此在分析半导体的能带结构时，必须把这附加电子静电势能考虑进去。

p-n结形成前后能带示意图



同种半导体材料的能带结构一样



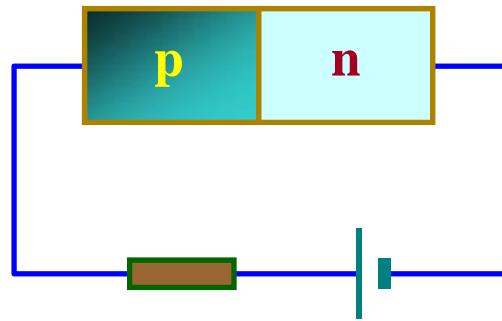
上图中

大学物理

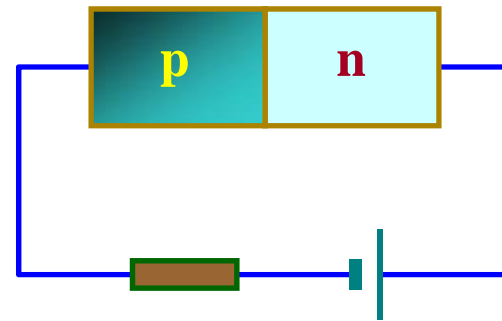
(a)是p型和n型半导体未接触时各自的能带,
(b)是形成p-n结后的能带.

在p-n结处,能带出现弯曲,能带高度有一相对平移,其差值为电子势能的变化值 eU ,形成势垒区.势垒阻止n型区中的电子进入p型区,也阻止p型区中的空穴进入n型区.

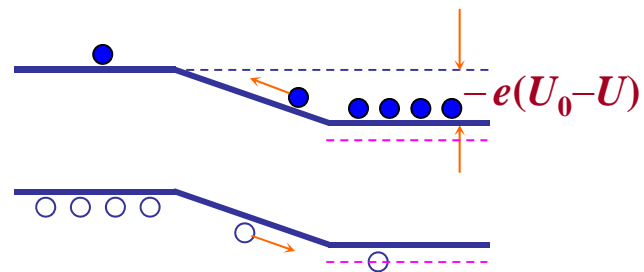
若将p-n结两端分别与电源的正、负极相接,就会改变半导体内部的电势,则有可能打破动态平衡.其结果使p-n结具有单向导电性,见下图:



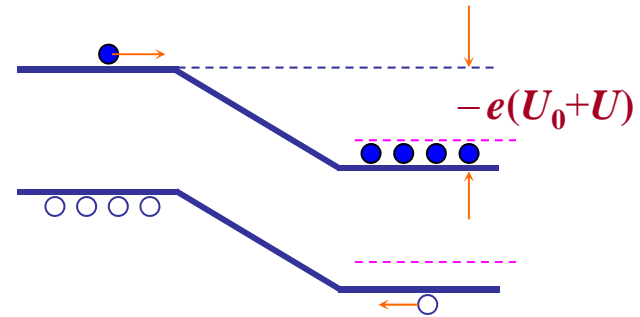
(a)



(b)



(a)



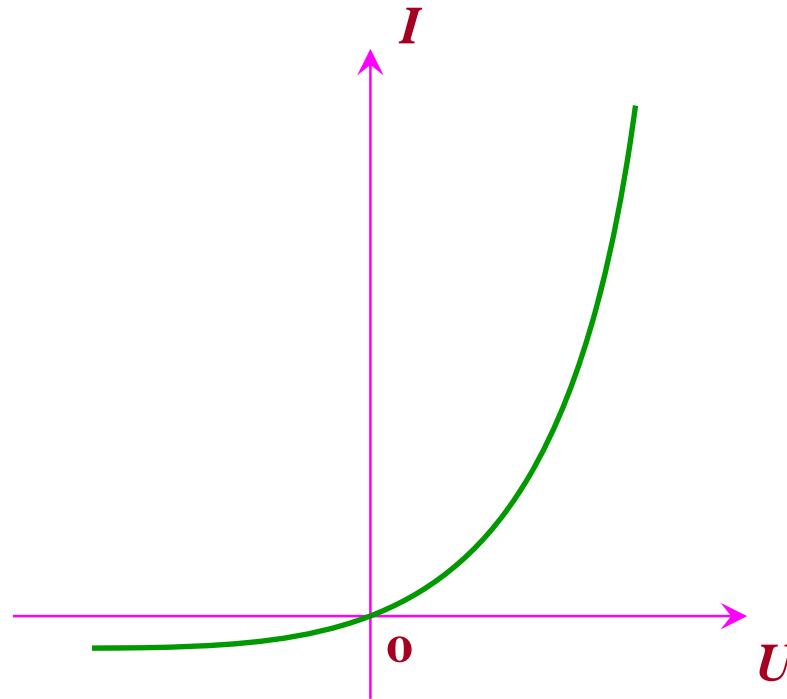
(b)

p-n结的单向导电作用



大学
物理

第二十三章



p-n结的伏安特性曲线



大学物理

结束

第二十三章
结束