

第17章 新技术的物理基础

目录

—CONTENTS—

1 固体的能带结构

2 激光原理

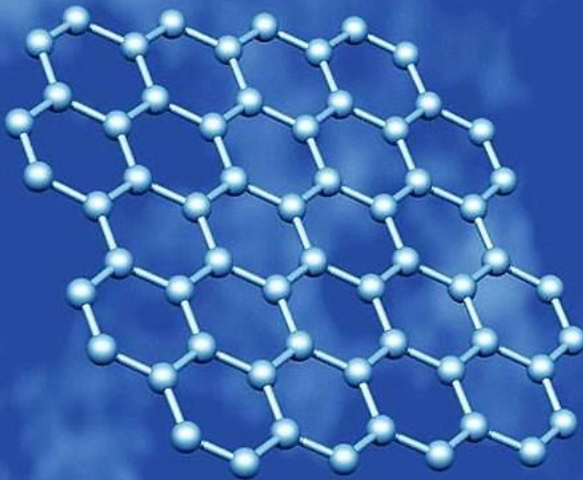
3 超导电性

4 纳米科学技术简介

5 玻色-爱因斯坦凝聚态

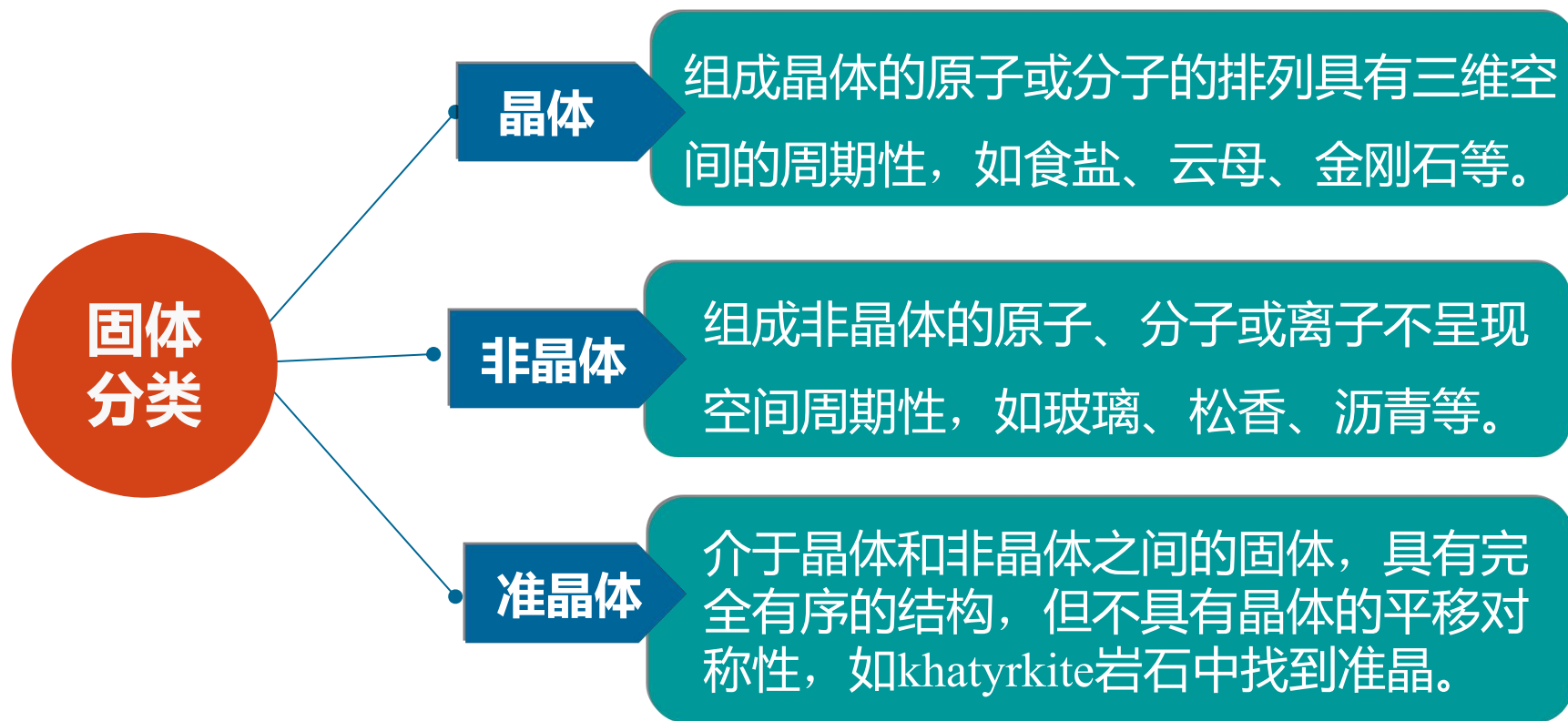
17.1

固体的能带结构



17.1 固体的能带结构

固体是指具有**确定形状**和**体积**的物体。



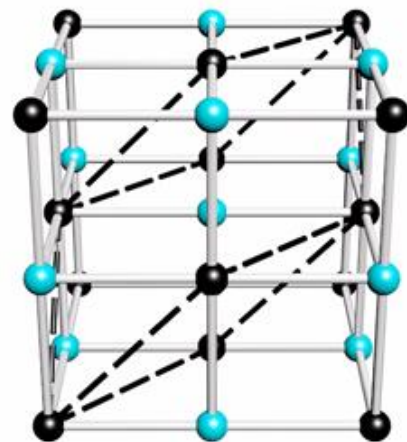
17.1.1 晶体结构和晶体分类

1. 晶体结构

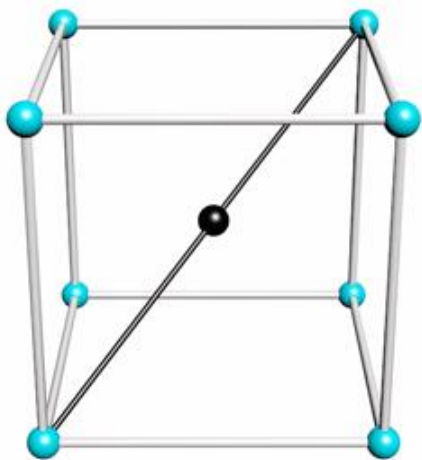
晶格：固体中分子、原子或离子在三维空间的周期性规则排列的点阵结构。

晶体的基本特征：

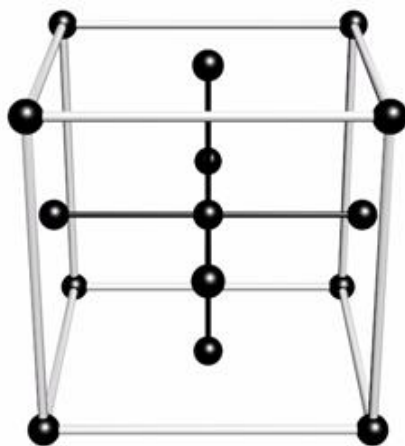
原子排列有规则；具有周期性；长程有序。



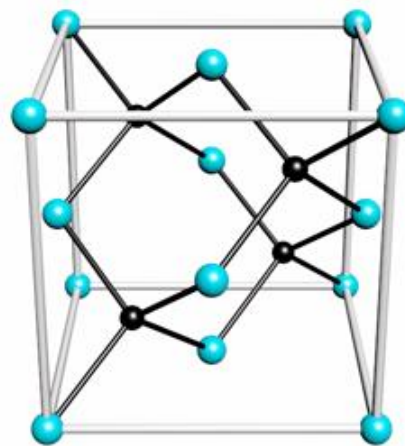
NaCl 基本晶格



CsCl 基本晶格



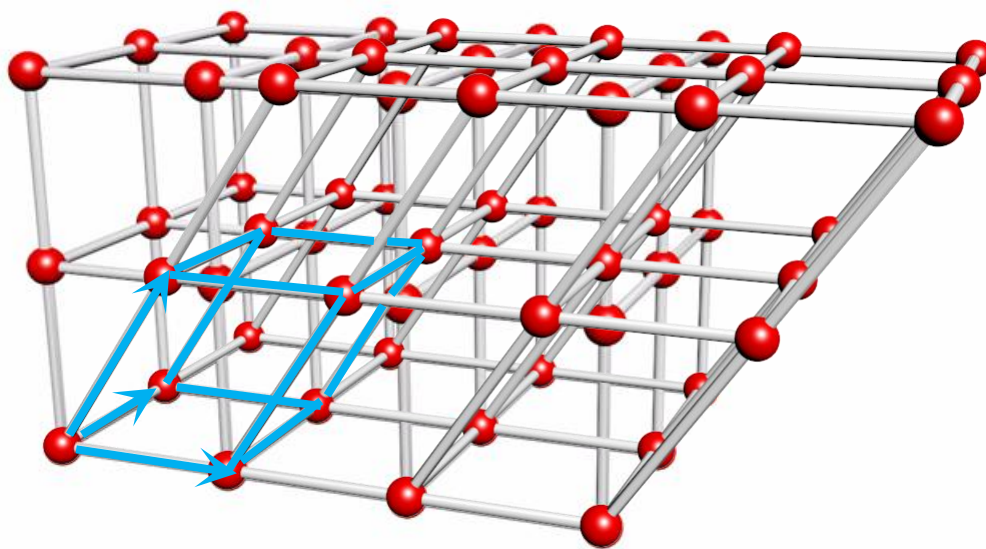
Cu 基本晶格



金刚石基本晶格

17.1.1 晶体结构和晶体分类

选取一定的单元，将它不断重复地平移，就可得到整个晶体，这样的重复单元称为**晶胞**。

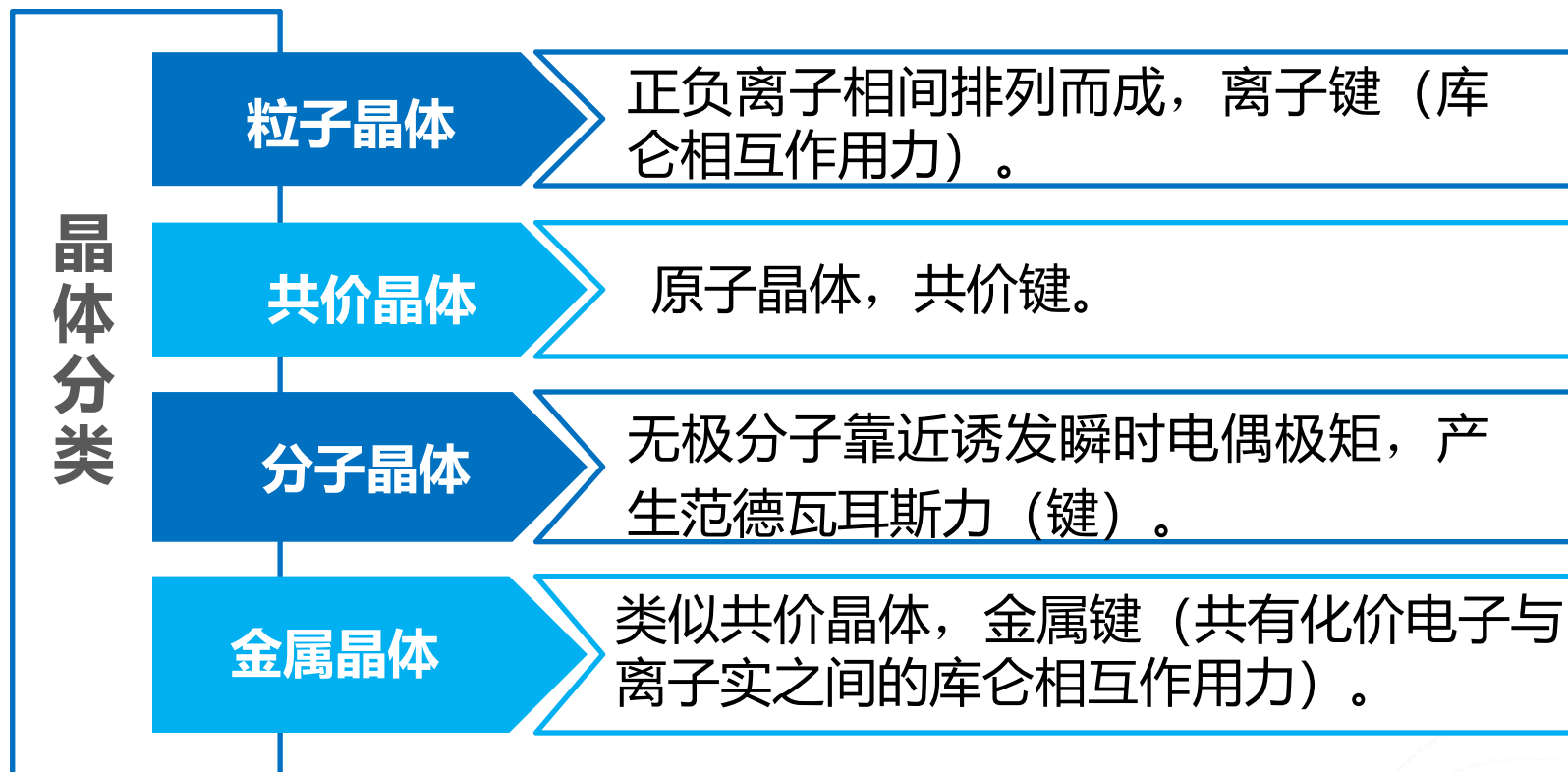


晶胞



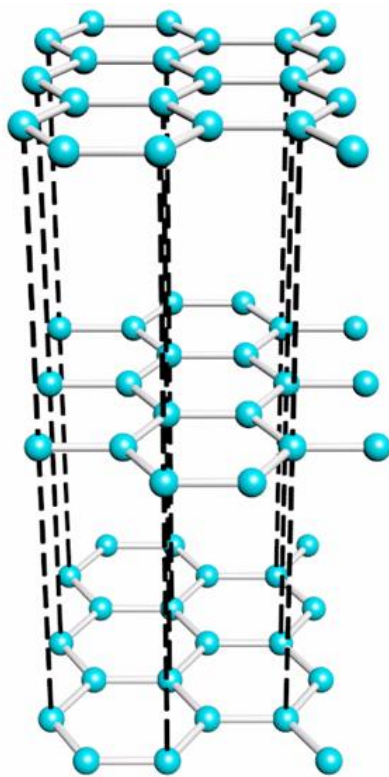
17.1.1 晶体结构和晶体分类

2. 晶体分类



17.1.1 晶体结构和晶体分类

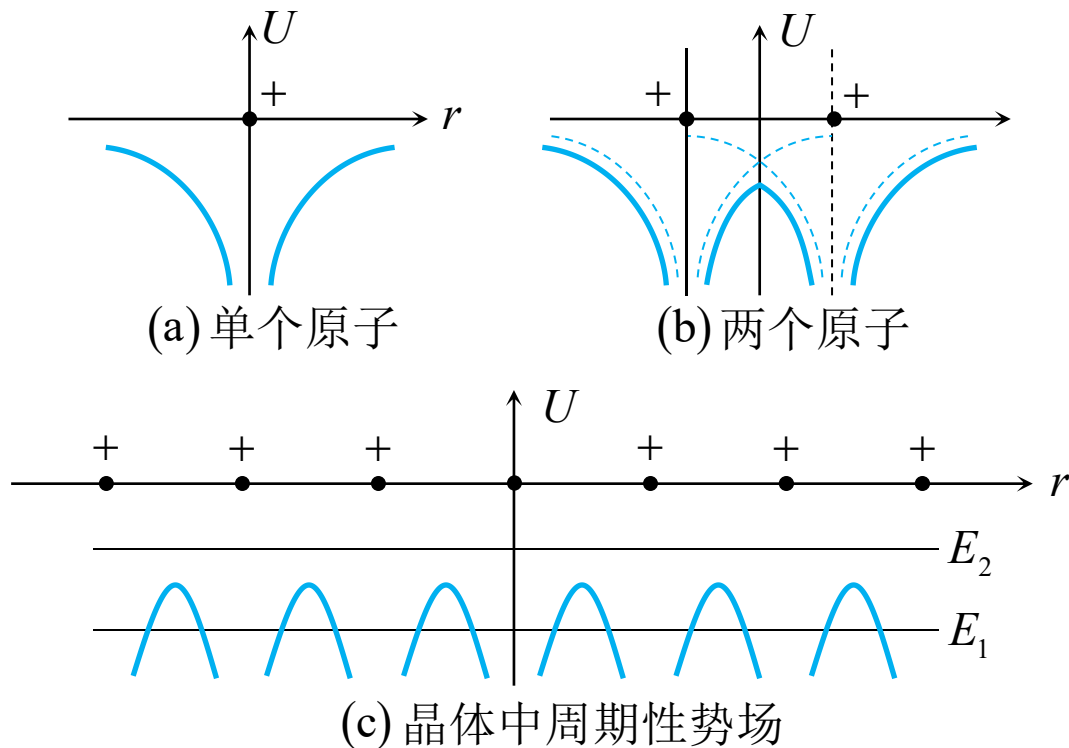
大多数晶体中粒子的结合是上述多种键的混合（混合键），例如石墨晶体，同层原子是共价键，层间原子是范德瓦耳斯键。



石墨晶体

17.1.2 固体的能带

1. 电子共有化



原子和晶体的势能曲线

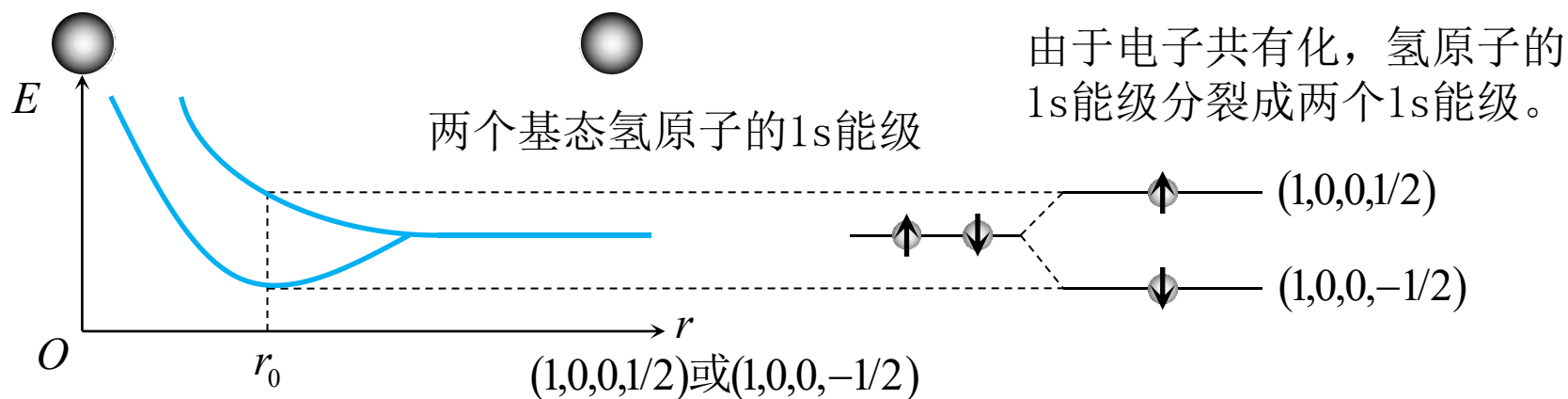
电子的共有化：由于晶体中原子的周期性排列而使价电子不再为单个原子所有的现象。

17.1.2 固体的能带

2. 能带的形成

能级分裂形成能带：量子力学证明，因电子的共有化，使得晶体中每个原子的同一能级分裂成一系列的与原能级接近的许多能级（能带）。

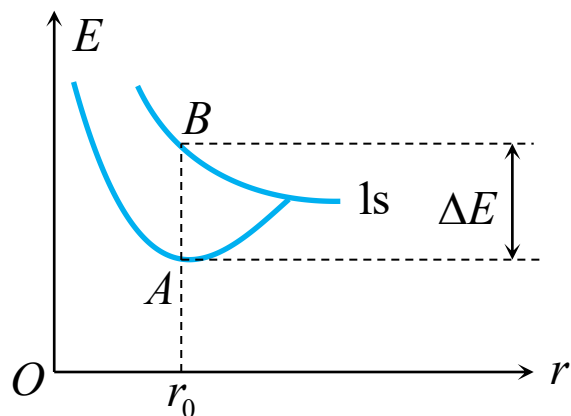
例如，两个氢原子相互靠近形成氢分子时的能级分裂过程。



由于电子共有化，两个电子可以处于同一个氢原子中，依据泡利不相容原理，两个处于基态的电子只能分别两组不同的量子数。

17.1.2 固体的能带

同理可得： N 个原子相互靠近形成晶体，使孤立原子的每一个能级分裂成 N 个接近的能级，即形成**能带**。



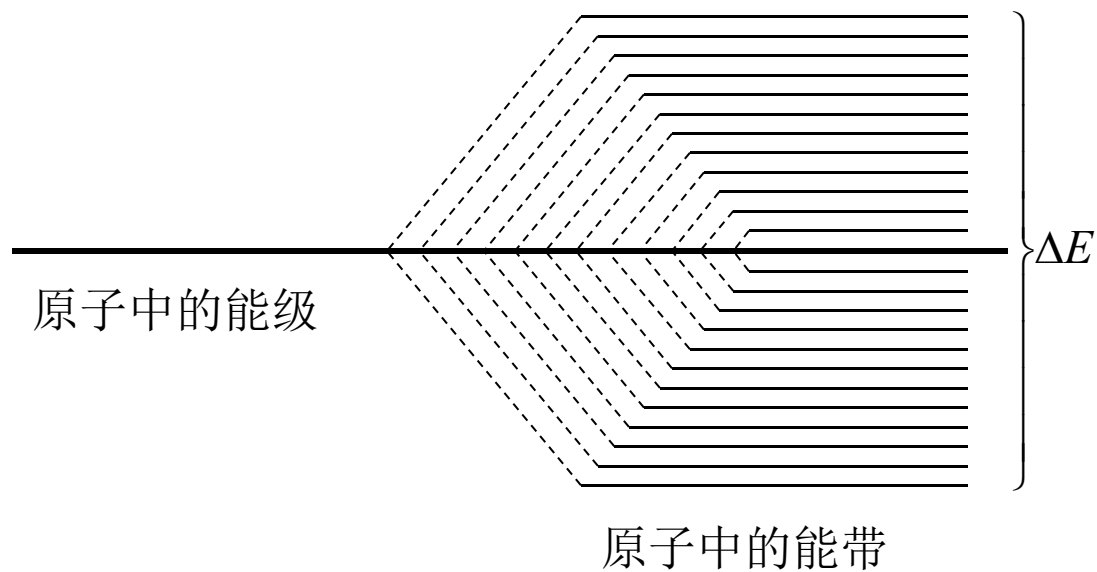
氢原子的能级分裂

能带宽度的一般规律：

- (1) 越是外层电子，能带越宽。
- (2) 点阵间距越小，能带越宽。
- (3) 两个能带有可能重叠，亦可存在间隔，间隔叫禁带。

17.1.2 固体的能带

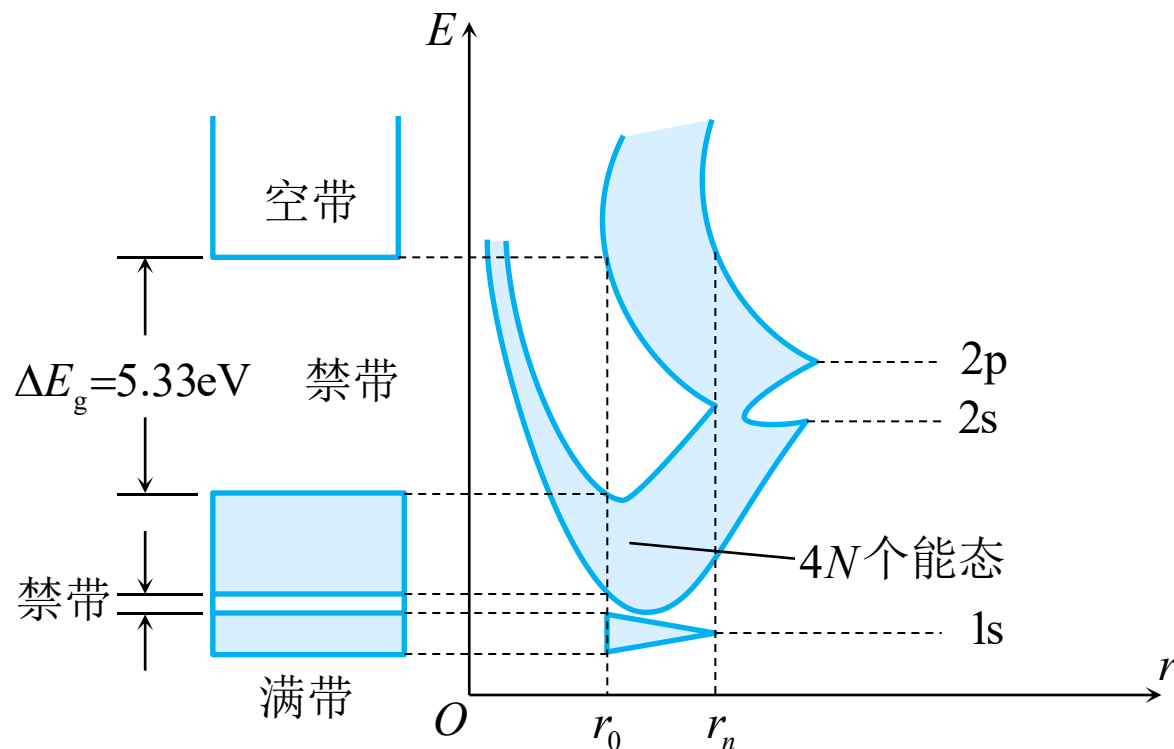
在两个相邻的能带间，可能有一个不被允许的能量间隔，这个能量间隔称为**禁带**。两个能带也可能相互重叠，这时禁带消失。



能带的形成 (r : 原子间距, r_0 : 平衡位置)

17.1.2 固体的能带

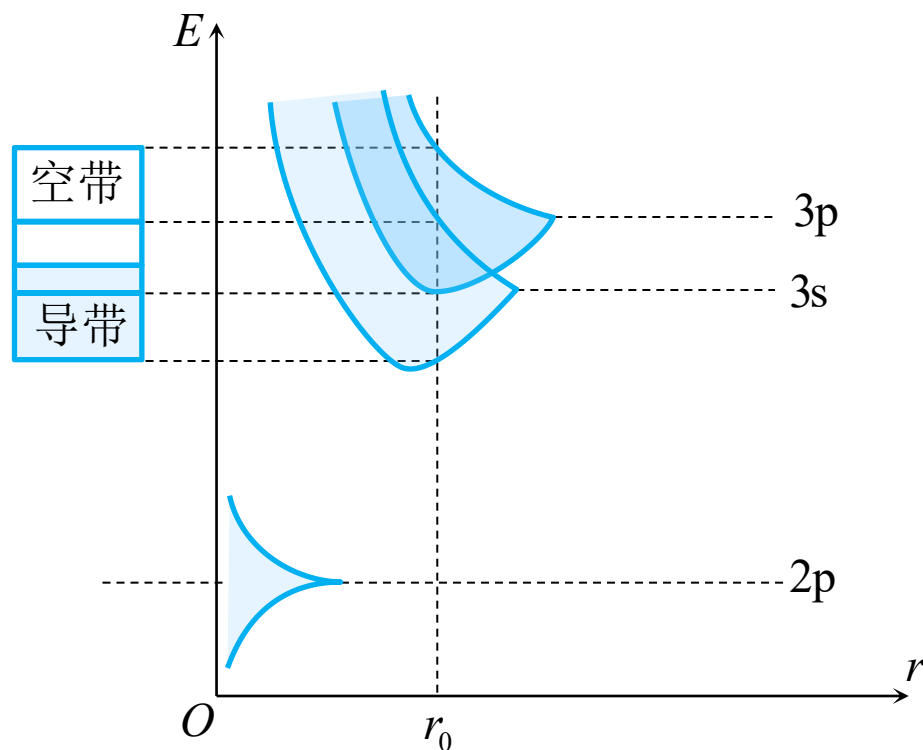
在两个相邻的能带间，可能有一个不被允许的能量间隔，这个能量间隔称为**禁带**。两个能带也可能相互重叠，这时禁带消失。



(a) 金刚石的能带

能带的形成 (r : 原子间距, r_0 : 平衡位置)

17.1.2 固体的能带



(b) 钠晶体的能带

能带的形成 (r : 原子间距, r_0 : 平衡位置)

17.1.2 固体的能带

(1) 依据泡利不相容原理，每个能级所对应的能带可填充的电子总数等于单能级原来可填充的电子数乘以晶体中原子总数 N 。

能带中电子填充的一般规律

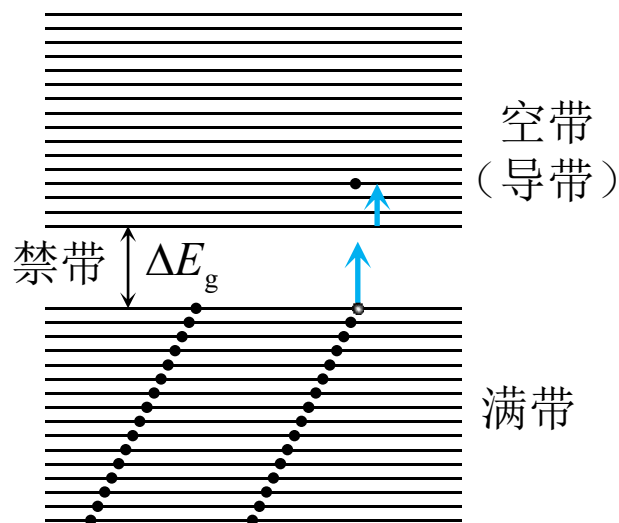
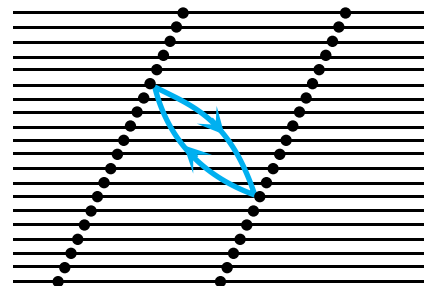
(2) 依据能量最小原理：对于不同能带，先填充能量低的能带；对于同一能带，先填充能量低的能级。

17.1.2 固体的能带

在一个能带中的各能级都被电子填满，这样的能带称为**满带**。满带中的电子不参与导电过程。

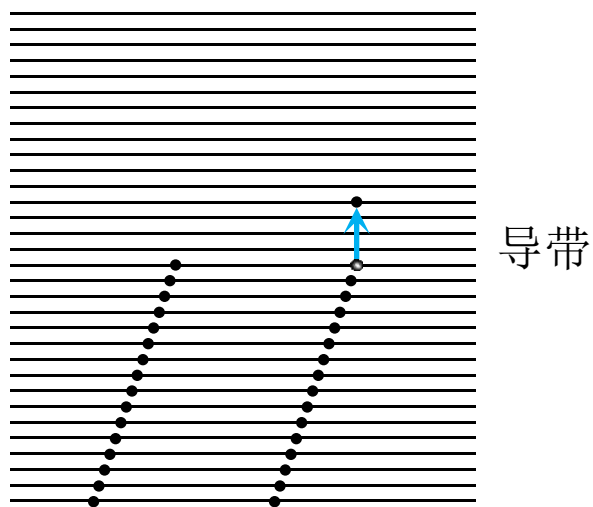
由价电子能级分裂而形成的能带称为**价带**，通常情况下价带为能量最高的能带。

如果价带刚好被填满，称为**满带**；如果能带没有电子填充，称为**空带**；能带之间为**禁带**。



17.1.2 固体的能带

如果能带有电子填充，但没有填满，称为**导带**；满带电子受到激发转移到空带，此时空带亦称导带。

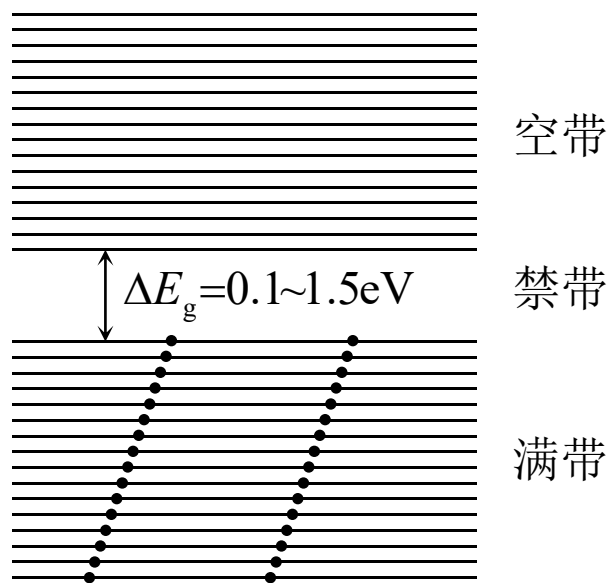


17.1.3 导体和绝缘体

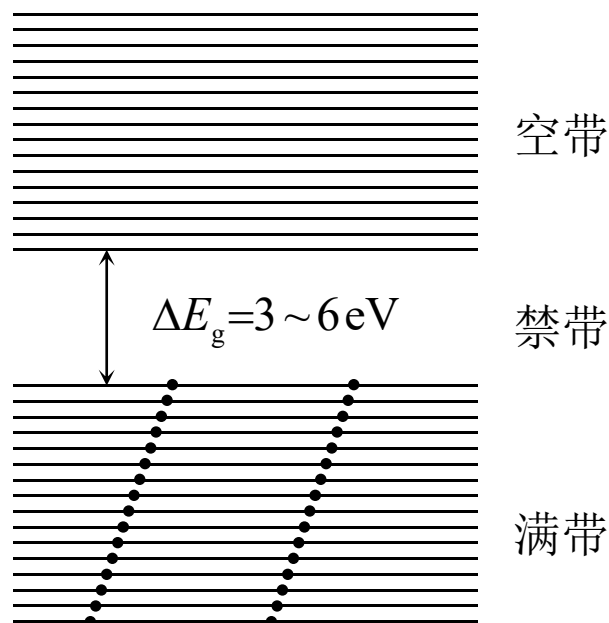
半导体与绝缘体的能带结构：存在满带与空带，且满带与空带之间存在禁带，只是禁带宽度不同。

半导体：禁带宽度较**窄**，用一般的热激发、光照或外加电场可以把满带中的电子激发到空带而参与导电。

绝缘体：禁带宽度**宽**，一般的能量激发不能使其导电。



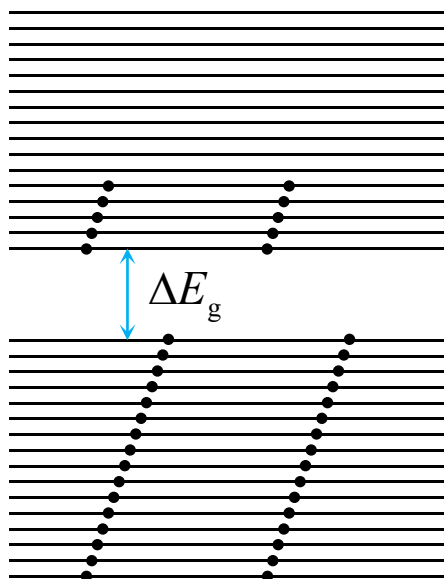
半导体的能带结构示意图



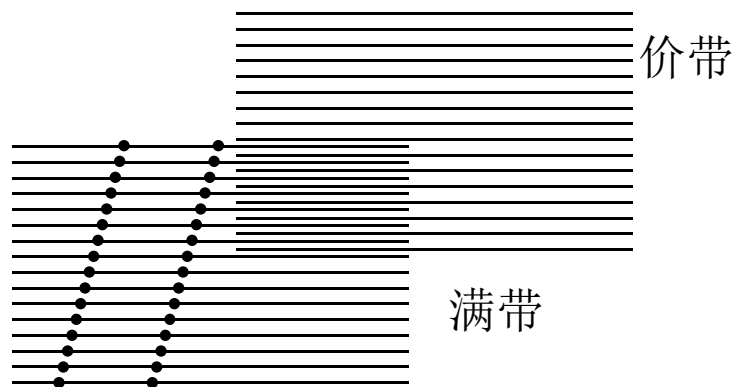
绝缘体的能带结构示意图

17.1.3 导体和绝缘体

导体的能带结构：价带只是部分填充部分电子形成导带；或者满带与空带重叠；或者导带与空带重叠。

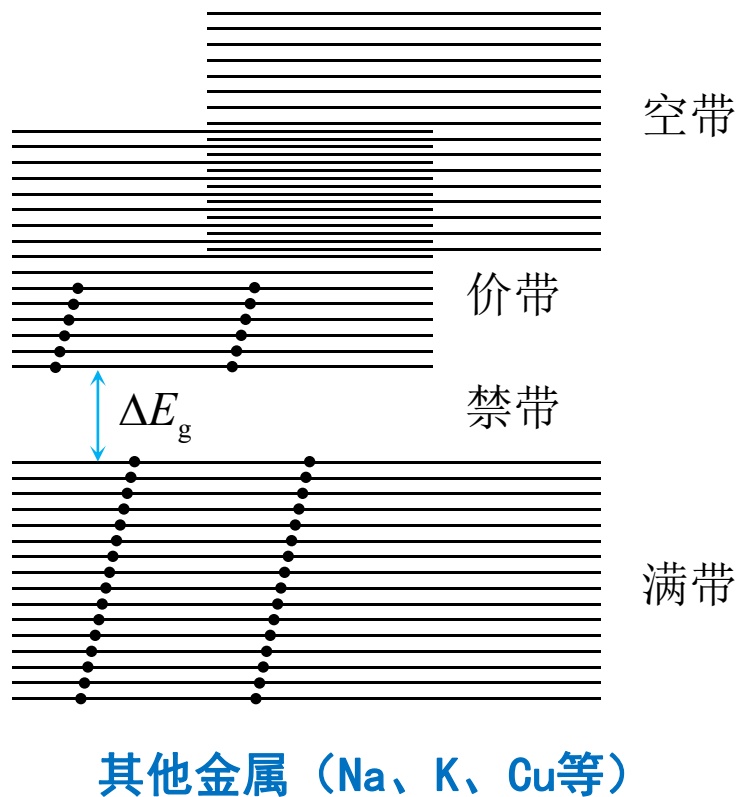


单价金属 (Li)



二价金属 (Ca、Mg、Zn等)

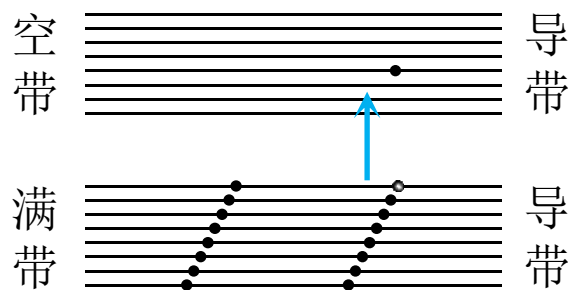
17.1.3 导体和绝缘体



一个好的金属导体：它最上面的能带或是未被电子填满，或是虽被填满但这填满的能带却与空带相重叠。

17.1.3 导体和绝缘体

半导体的满带与空带之间的禁带比较窄，热运动可使满带中的电子激发到空带，使满带与空带均变成导带，但激发电子数一般较少，导电性能比较弱。



空穴导电：满带中留下空穴，其他电子在外电场作用下移动来填充孔穴，等效于带正电的空穴定向移动形成电流。

本征导电：没有杂质与缺陷的半导体，其电子与空穴的混合导电。

本征半导体：没有杂质和缺陷的半导体。

杂质半导体：
掺有杂质的半导体

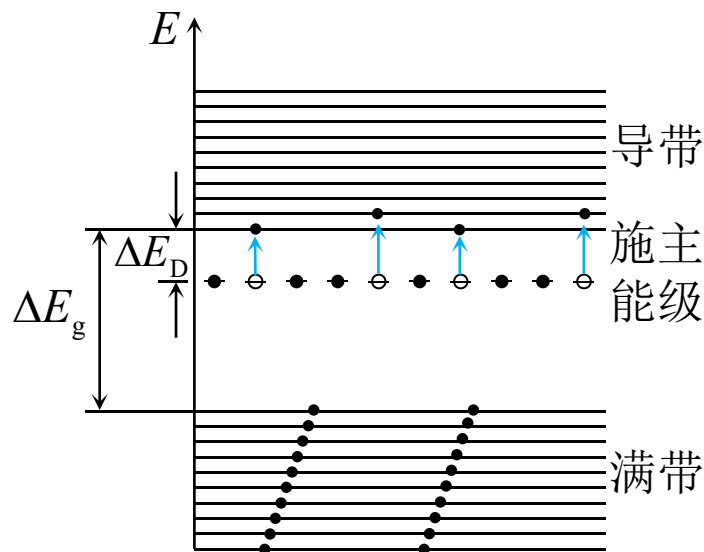
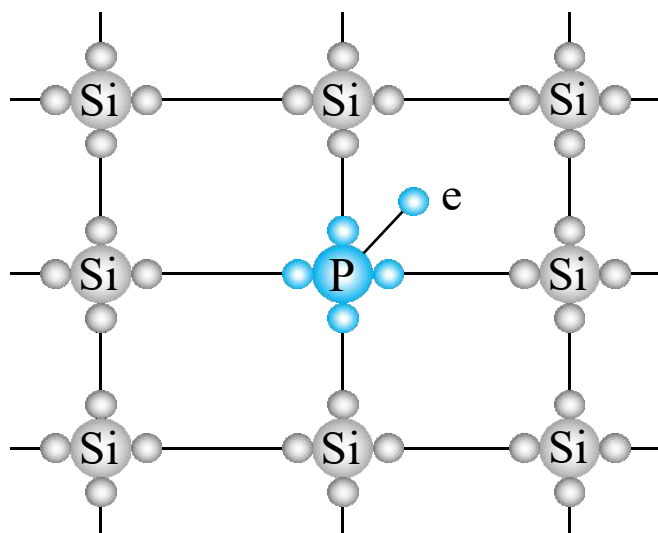
电子导电为主：N型(或电子型)半导体

空穴导电为主：P型(或空穴型)半导体

17.1.3 导体和绝缘体

1. N型半导体

半导体的满带与空带之间的禁带比较窄，热运动可使满带中的电子激发到空带，使满带与空带均变成导带，但激发电子数一般较少，导电性能比较弱。



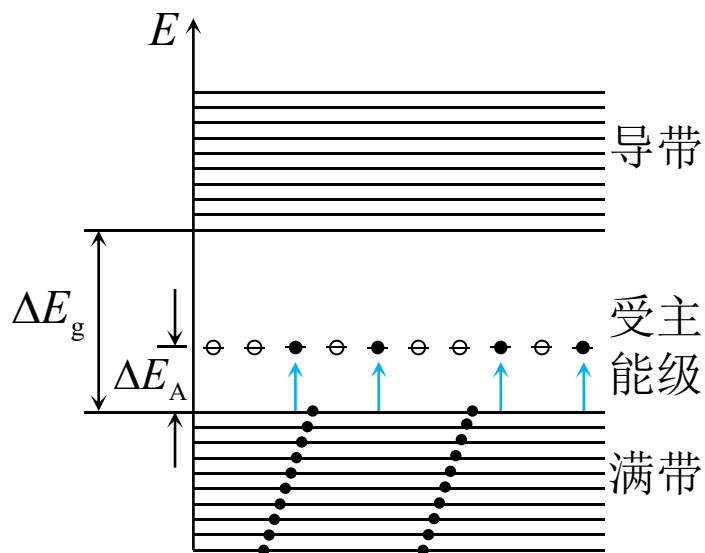
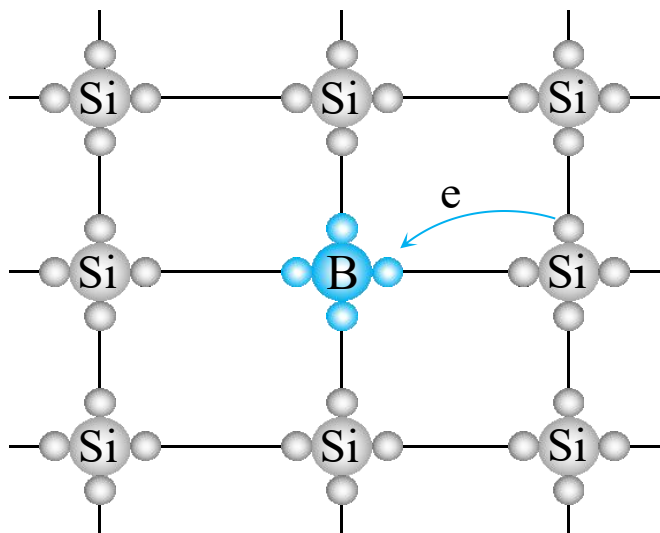
主要靠施主能级激发到导带中去的电子来导电的半导体称为**N型半导体**或**电子型半导体**。

17.1.3 导体和绝缘体

2. P型半导体

在硅或锗的纯净半导体中，掺入少量三价元素如硼、镓、铟等杂质原子，这种杂质原子与相邻的四价硅或锗原子形成共价键结构时，将缺少一个电子，这相当于一个空穴。

相应于这种空穴的杂质能级也出现在禁带中，并且靠近满带。

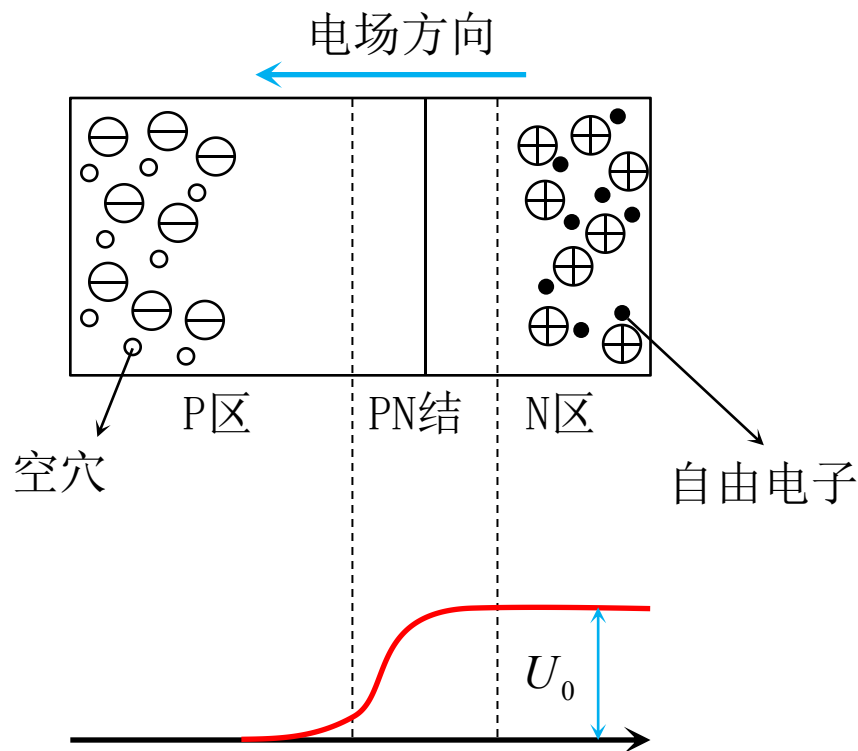


17.1.3 导体和绝缘体

3. P-N结

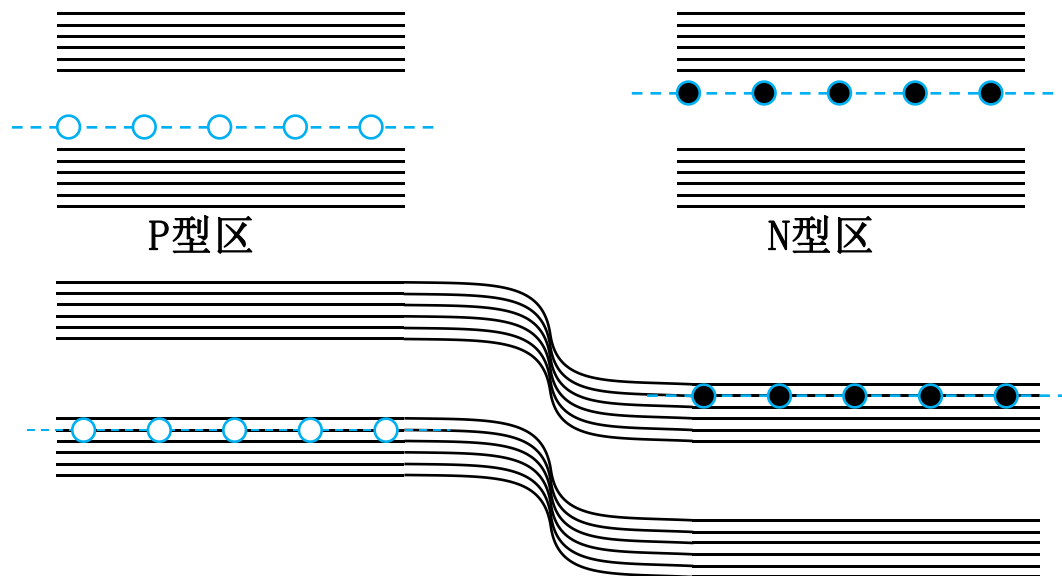
在一片本征半导体的两侧各掺以施主型（高价）和受主型（低价）杂质，就构成一个P-N结。

N型区的电子浓度高，向P型区扩散；P型区聚集电子，带负电，N型区失去电子带正电，形成电场，阻止电子进一步扩散，达到动态平衡。

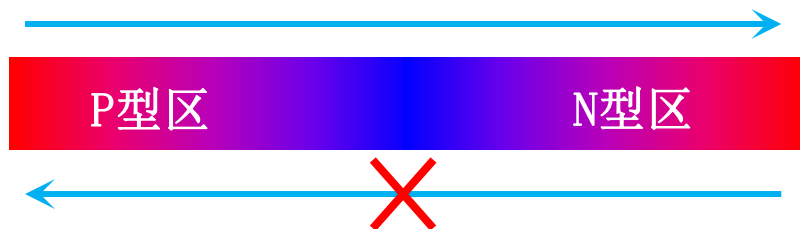


17.1.3 导体和绝缘体

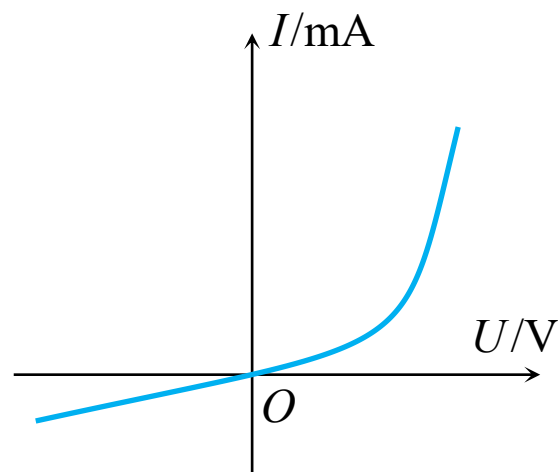
相对于N型区，P型区电势低，电子能量高，所以P型区电子能带高于N型区，P-N结处能带弯曲，构成势垒区（阻挡），阻止N区电子和P区空穴进一步向对方扩散。



正向联接时外加电场与势垒区电场相反，势垒降低，N区电子和P区空穴容易向对方扩散，易于导电，反向联接则相反。



晶体二极管：单向导电性



P-N结伏安特性曲线

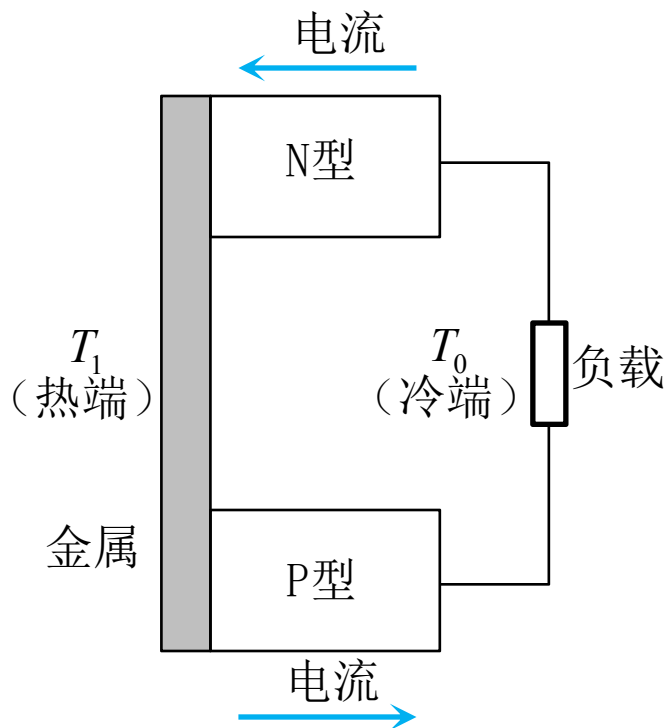
17.1.3 导体和绝缘体

4. 半导体的其他特性和应用

热敏电阻：半导体的电阻随温度的升高而指数下降。

光敏电阻：在可见光照射下，半导体的电阻值将随光强的增加而急剧地减小。

温差电偶：两种不同的金属导体组成的闭合回路，如果两个接头处于不同的温度，那么在回路中将产生温差电动势。这个回路称为温差电偶，或热电偶。



半导体热电偶示意图

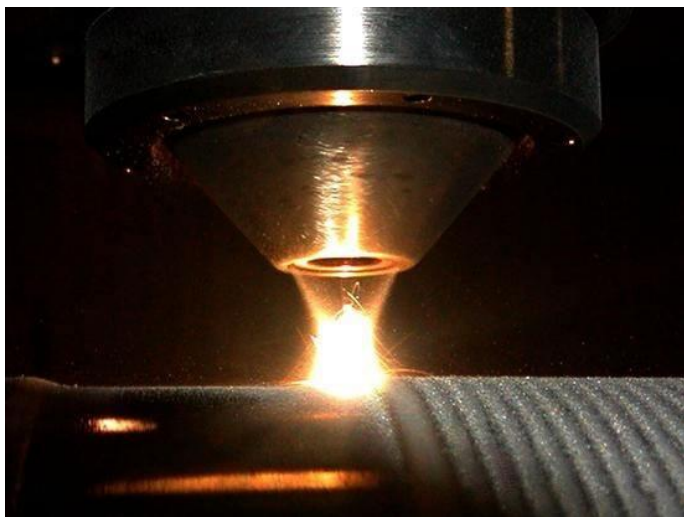
17.2

激光原理

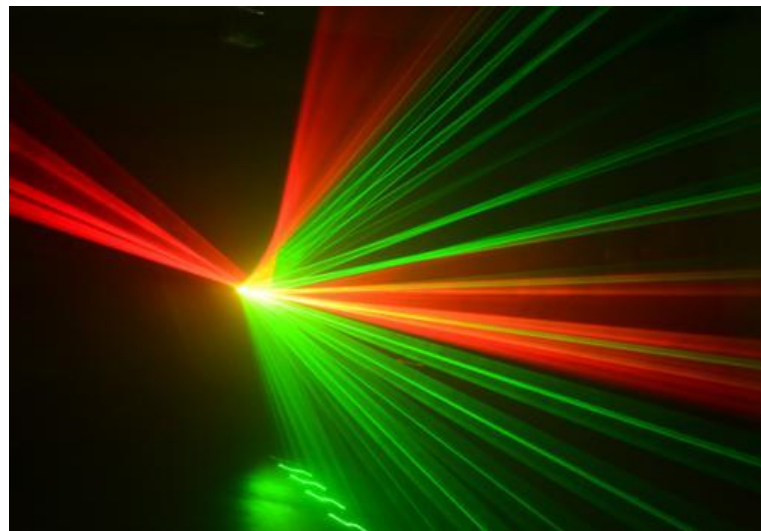


17.2 激光原理

激光是“受激辐射光放大”（light amplification by stimulated emission of radiation）的简称，是20世纪60年代以后发展起来的一门新技术。激光的**单色性**、**方向性**和**相干性**都非常好，能量密度可以很高。激光在科学技术的各个领域内得到了日益广泛的应用。



激光焊接

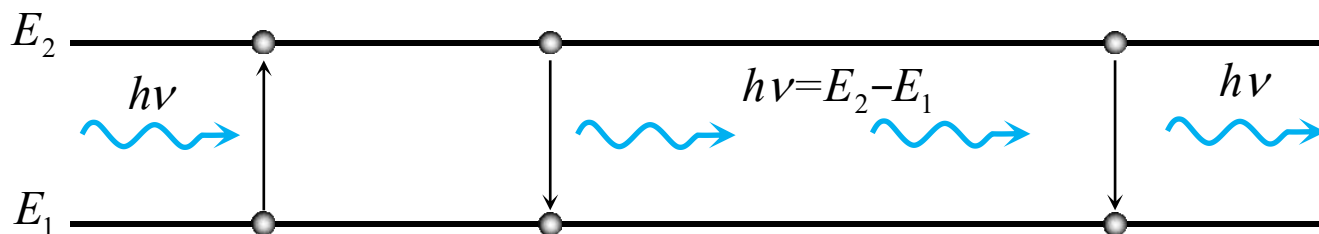


激光灯

17.2.1 激光的基本原理

1. 自发辐射与受激辐射

光与原子相互作用存在三个过程：吸收、自发辐射、受激辐射。



吸收：处于低能级的原子中电子吸收光子的能量跃迁到高能级。

自发辐射：处于高能级的原子是不稳定的，它要向低能级跃迁并发射一个的光子。

$$\left(\frac{dN_{21}}{dt} \right)_{\text{自}} = W_{21} N_2$$

受激辐射：处于高能级的原子在外来光子（激励）的激发下向低能级跃迁并发射一个的光子。

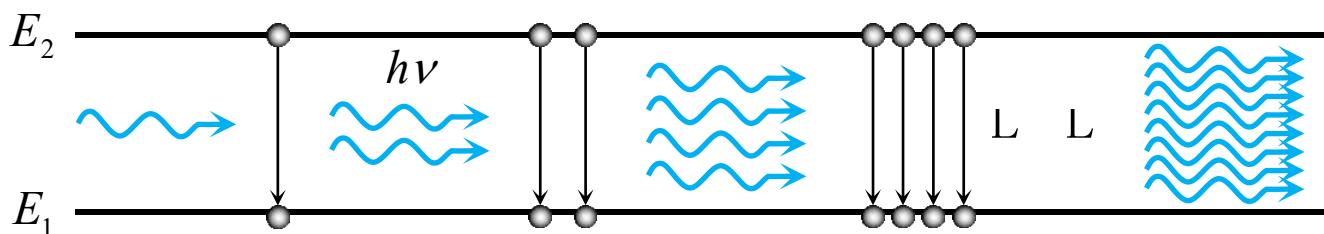
$$\left(\frac{dN_{12}}{dt} \right)_{\text{吸}} = W_{12} N_1$$

17.2.1 激光的基本原理

占据同一光子态的平均光子数目为光源的光子**简并度**。

自发辐射的光子的量子态（频率、位相、偏振与传播方向）是完全任意的，所以自发辐射光子的简并度很低，其相干性很差。

按辐射的量子理论，受激辐射光与外来光的量子态相同。在特定条件下，通过**光放大**作用，产生出大量完全相同的光子，即获得高简并度的光子束——激光。



产生激光的条件：
受激辐射

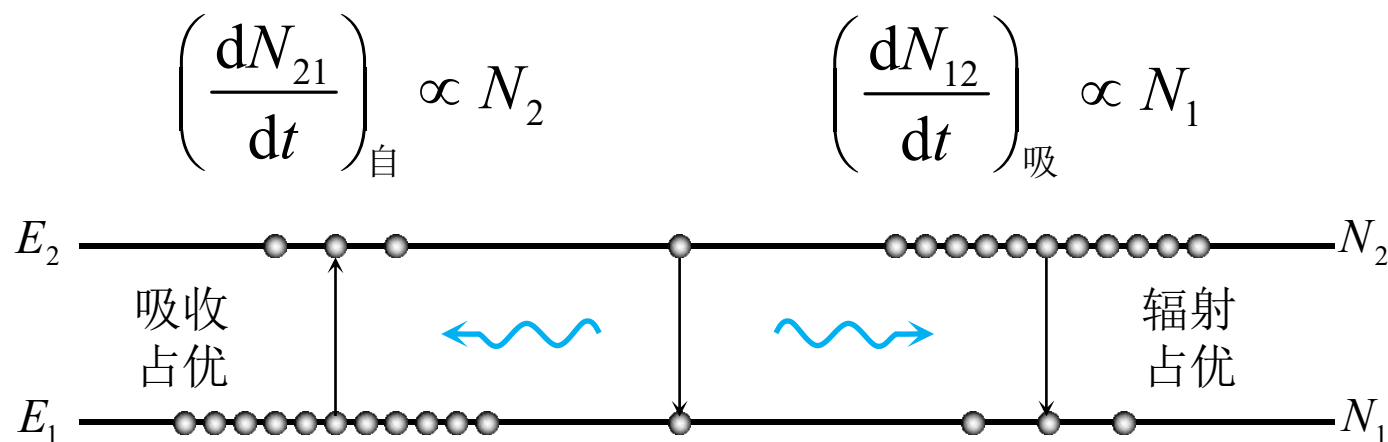
- (1) 粒子数反转：产生激光的必要条件；
- (2) 光学谐振腔：产生激光的充分条件。

17.2.1 激光的基本原理

2. 粒子数反转

为何要粒子数反转？

从 $E_2 \rightarrow E_1$ 自发辐射的光，可能引起受激辐射，也可能引起吸收，且有



要产生激光必须有受激辐射占优势，即

$$\left(\frac{dN_{21}}{dt} \right)_{\text{自}} > \left(\frac{dN_{12}}{dt} \right)_{\text{吸}} \qquad \text{即 } N_2 > N_1$$

17.2.1 激光的基本原理

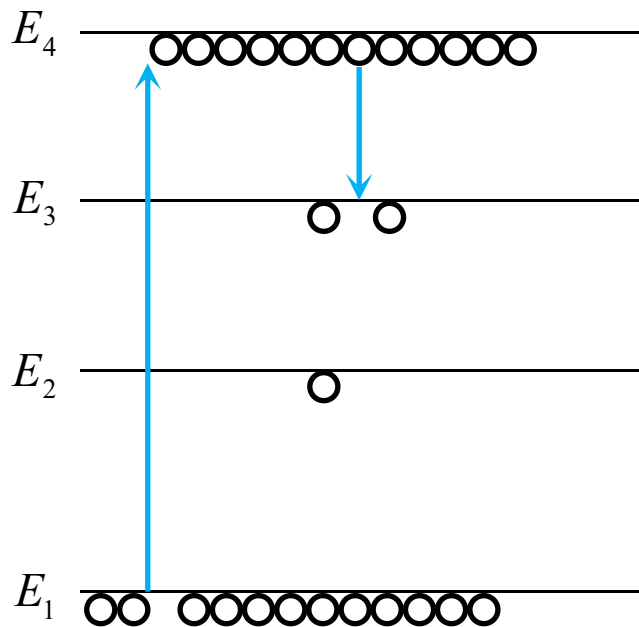
一般情况下，处于温度为 T 的平衡态下的体系，在各能级上的原子数由玻耳兹曼分布确定，即

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-(E_2 - E_1)/kT} \xrightarrow[T=300\text{K}]{\Delta E \approx 1\text{eV}} \frac{N_2}{N_1} \approx e^{-38}$$

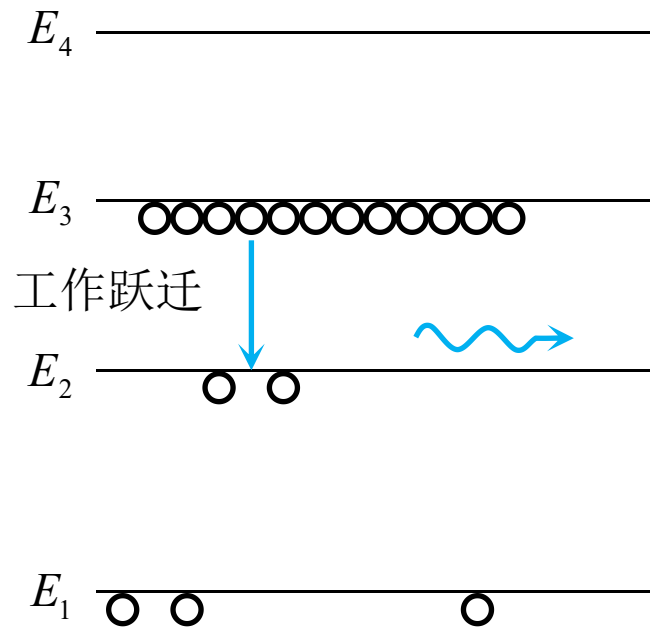
能级越高，处于该能级的原子数就越少，一般情况下，激发态的原子数 N_2 远低于 N_1 ，所以受激辐射远低于受激吸收，所以要实现光放大，就必须打破热平衡下的玻耳兹曼分布，使 $N_2 > N_1$ ，即**粒子数反转**。

- 粒子数反转分布的条件
- (1) 激活介质具有适当的能级结构；
 - (2) 有必要的能量输入系统（泵浦）。

17.2.1 激光的基本原理



(a)



(b)

粒子数反转的实现

17.2.1 激光的基本原理

3. 光学谐振腔

粒子数反转只是产生激光的必要条件，保证了受激辐射超过了受激吸收，但不能保证受激辐射超过自发辐射，由于自发辐射产生的光子在位相、偏振态、传播方向上是随机的，这时产生的光放大在相位，偏振态，传播方向上也是杂乱无章的，无实用价值。

自发辐射：辐射概率正比于处于高能级的原子数，而与外来光的能量密度无关。

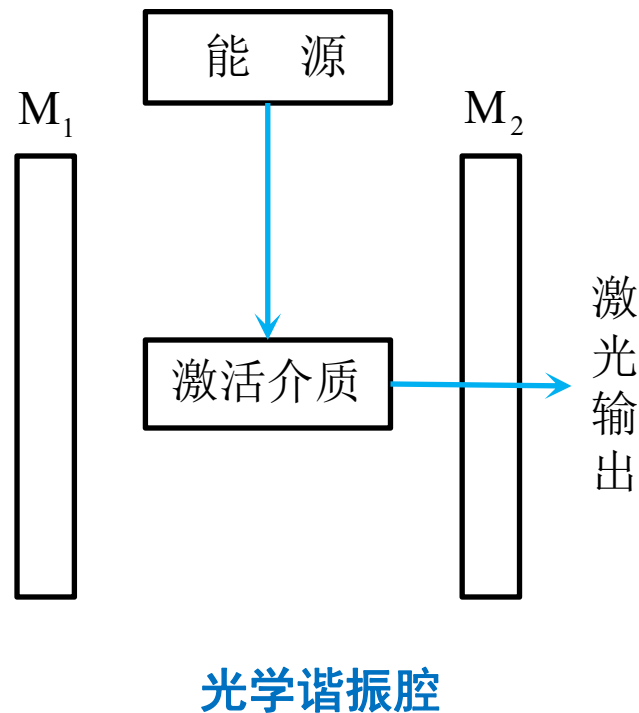
受激辐射：受激辐射正比于处于高能级的原子数（要求粒子数反转），同时正比于外来光的能量密度（要求光学谐振腔）。

17.2.1 激光的基本原理

两块平面反射镜，使光子来回反射，增加激励光的能量密度，增大受激辐射概率，使光强增大。

光在激活介质中来回传播，存在光的散射与吸收，即有损耗，而来回传播又增大受激辐射，产生光子，要使得光强增大，那么增益必须大于损耗。

$$G > G_m = \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \quad \text{阈值条件}$$



17.2.1 激光的基本原理

4. 横模与纵模

横模：在与谐振腔轴线垂直的截面上形成的光的横向驻波模式。



纵模：不同频率的光束在沿谐振腔轴线方向上形成不同的纵向驻波模式。

谐振腔的选频作用：通过缩短谐振腔长度以扩大相邻两纵模的频率间隔来**减少纵模个数**。

17.2.1 激光的基本原理

$$2nL = K_1\lambda_1 = K_2\lambda_2 = L \xrightarrow{\text{微分}} \Delta\lambda = -\frac{\lambda}{K} = -\frac{\lambda^2}{2nL}$$

频率间隔 $\Delta\nu' = -\frac{c\Delta\lambda}{\lambda^2} = \frac{c}{2nL}$

在腔长内能获得干涉加强的纵模的个数

$$N = \frac{\Delta\nu}{\Delta\nu'} = \frac{\Delta\nu}{c} 2nL \approx \frac{2nL \times 10^9}{c}$$

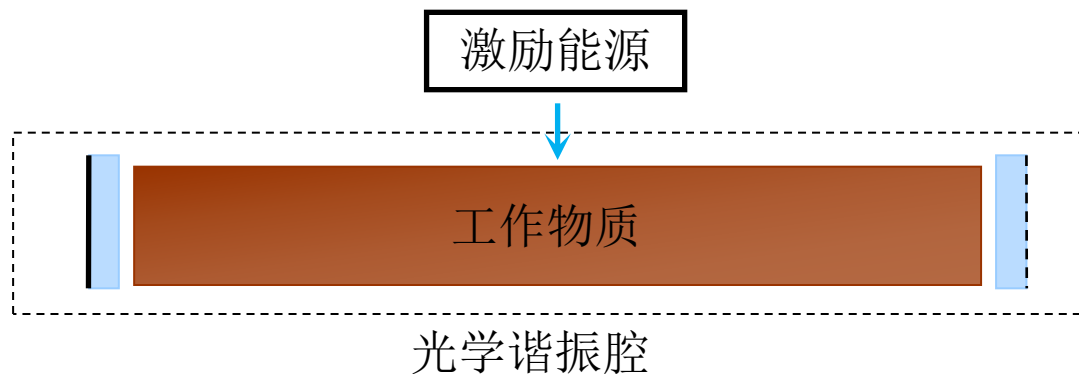
纵模数正比腔长，减小腔长 L ，可减少输出模数。

单模输出 {

- (1) 缩短激光管的长度 L ；
- (2) 在谐振腔内放置法布里-珀罗标准具。

17.2.2 激光器

激光器是产生激光的器件或装置，由三部分组成：工作物质、激励（又叫泵浦）系统和谐振腔。

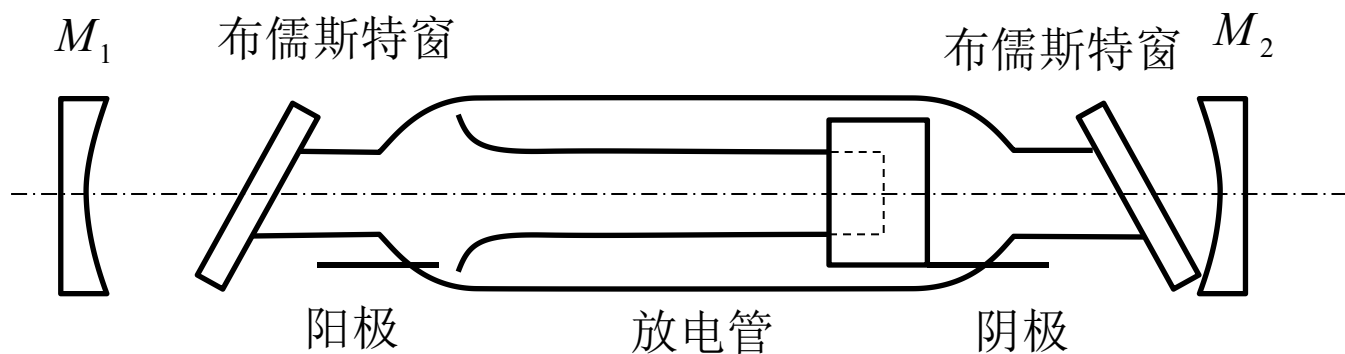


激励能源：提供外来激励光，产生受激辐射。

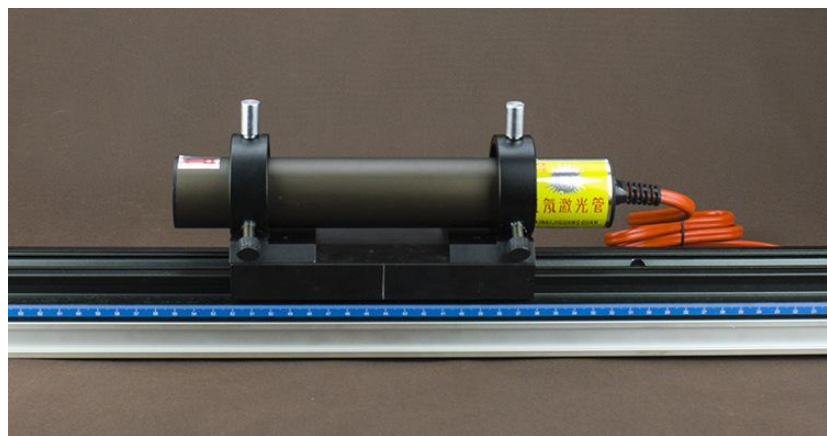
工作物质：原子具有三或四能级系统，并能实现粒子数反转。

谐振腔：使受激辐射超过自发辐射，增大光强；使光具有极好的方向性；来回反射形成驻波、保持频率稳定，使激光具有良好的单色性与相干性。

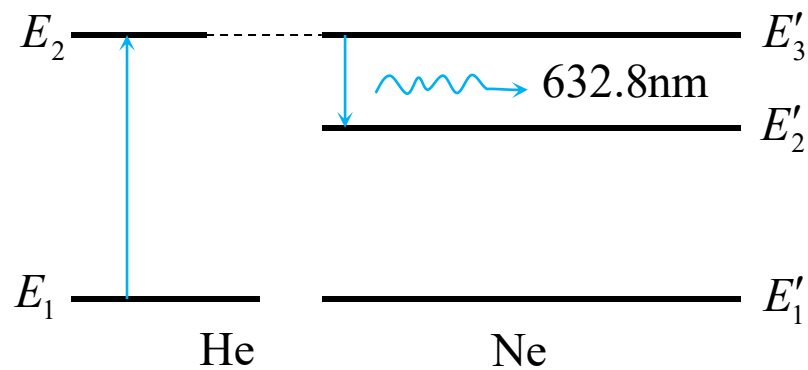
17.2.2 激光器



外腔式He-Ne激光器结构图



外腔式He-Ne激光器实物图



He-Ne原子能级示意图



17.2.3 激光的特性

- 作为长度标准进行精密测量

1.单色性好

- 定位、导向、测距等

2.方向性好

3.相干性好

- 长距离范围的精密测量

4.能量集中

- 亮度大

17.2.4 激光的应用

1. 激光测距



卫星激光测距



激光测量地月距离



激光测距仪

17.2.4 激光的应用

2. 激光加工与激光医疗



激光打孔



激光切割



激光碎石



激光清除白内障

17.2.4 激光的应用

3. 光信息处理和激光通信



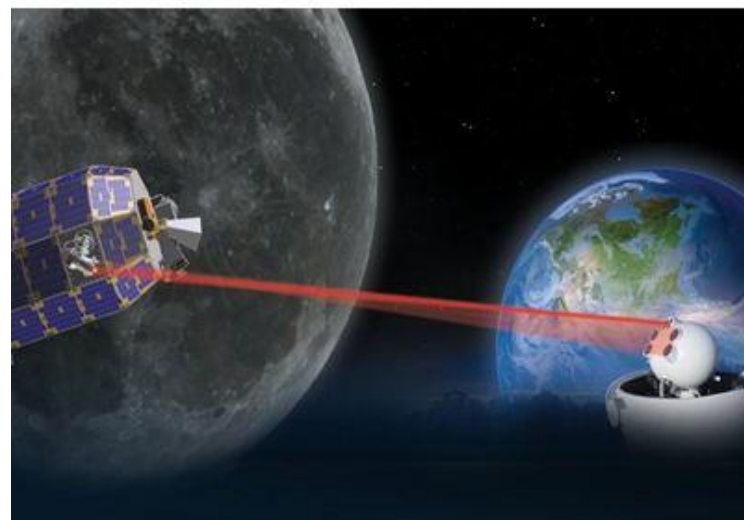
光盘



激光打印机



光纤通信



卫星激光通信

17.2.4 激光的应用

4. 激光在受控核聚变中的应用

利用极高功率的激光脉冲来加热氘和氚的混合物，使其温度达到 $0.1 \sim 2$ 亿度，便可开始发生核聚变而放出巨大的能量。由于氘氚混合物的质量及激光的能量都可被控制，所以称这过程为**受控核聚变**。

可能利用聚变中的能量作为电力的能源，尚在研究中。

5. 激光的非线性效应

激光强大的电场和物质作用时，产生**非线性效应**，为光学开辟了一个应用方向。