



大学物理课程

邓维天

● 原子中电子的状态应由四个量子数来决定

| | | |
|---------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| n —主量子数 | $n = 1, 2, \dots$ | $E_n = -\frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2}$ |
| l —角量子数 | $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$ | $L = \sqrt{l(l+1)}\hbar$ |
| m_l —轨道磁量子数 | $m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$ | $L_z = m_l \hbar$ |
| m_s —自旋磁量子数 | $m_s = \pm 1/2$ | $L_{sz} = m_s \hbar$ |

无论是单电子原子，还是多电子原子，每一组量子数 (n, l, m_l, m_s) 将决定电子的一个状态。

● 泡利不相容原理

原子中的任何两个电子不可能有完全相同的一组量子数 (n, l, m_l, m_s) 。

每一壳层上容纳的电子数：

主壳层 n 上可容纳的电子数为： $N_n = 2n^2$

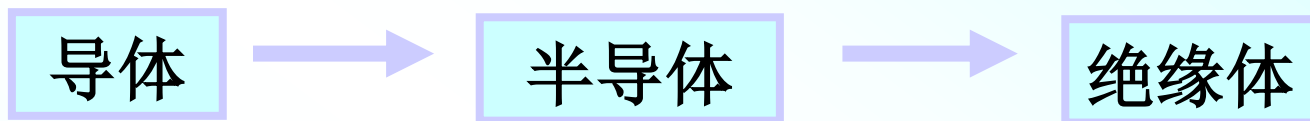
支壳层 l 上可容纳的电子数： $N_l = 2(2l+1) = 4l+2$

| $l =$ | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | N_n |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| | | s | p | d | f | g | h | i | |
| 1 | K | 2 | | | | | | | 2 |
| 2 | L | 2 | 6 | | | | | | 8 |
| 3 | M | 2 | 6 | 10 | | | | | 18 |
| 4 | N | 2 | 6 | 10 | 14 | | | | 32 |
| 5 | O | 2 | 6 | 10 | 14 | 18 | | | 50 |
| 6 | P | 2 | 6 | 10 | 14 | 18 | 22 | | 72 |
| 7 | Q | 2 | 6 | 10 | 14 | 18 | 22 | 26 | 98 |

半导体与激光简介

一、半导体的基本概念

固体按导电性能的高低可以分为



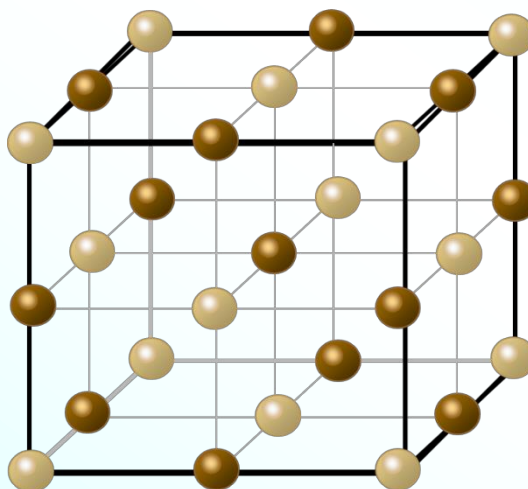
半导体的电阻率介于
导体和绝缘体之间。

它们的电学性能可用**固体能带理论**解释。

1. 固体的能带

固体的晶格结构

固体(晶体)是具有大量
分子、原子或离子的
规则排列的点阵结构。



氯化钠晶体

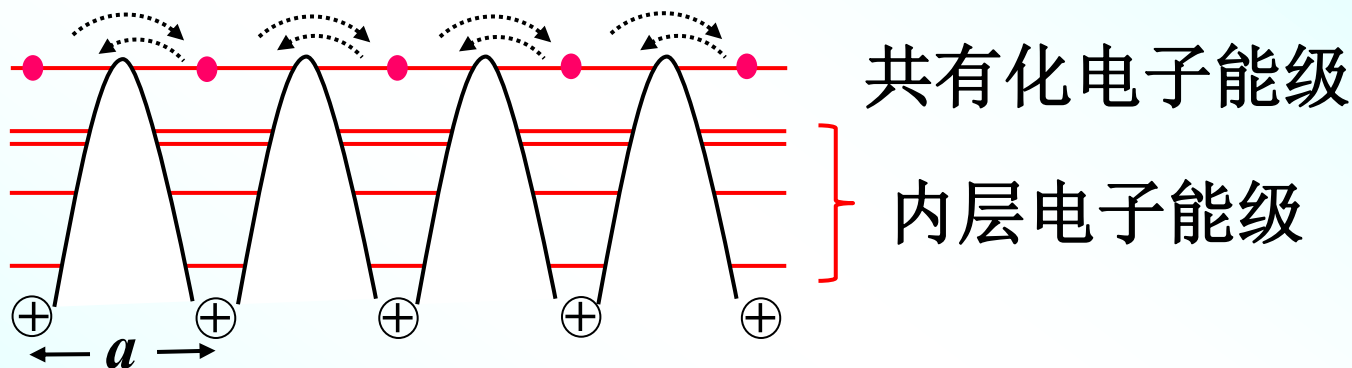
● 氯离子
 Cl^+

● 钠离子
 Na^-

a、电子共有化

大量的规则排列的点阵结构

晶体中原子相互影响，形成周期性势垒：



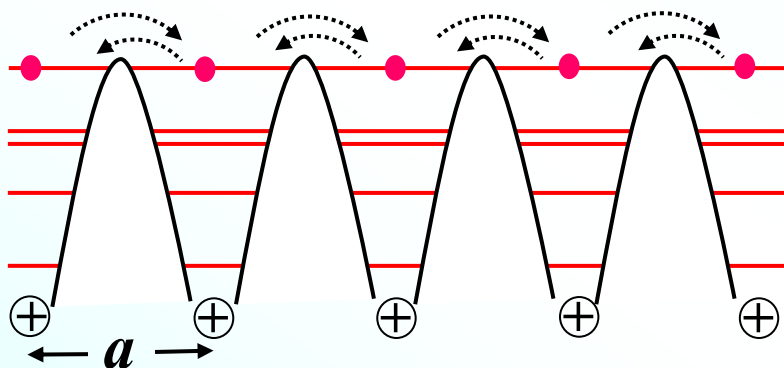
- 内层电子面对的势垒较宽，不容易跃迁到其他原子
- 对于原子的外层电子（高能级电子、价电子），其势垒宽度较小，穿透概率较大。

这些电子不再局限于一个原子，可以在整个固体中运动，称为共有化电子。

b. 能带

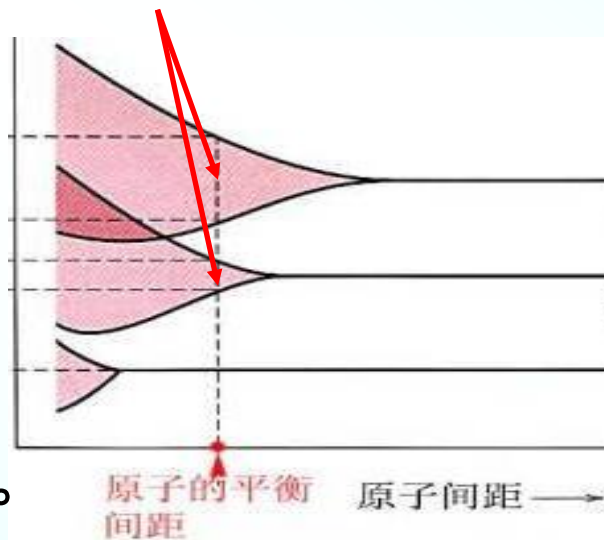
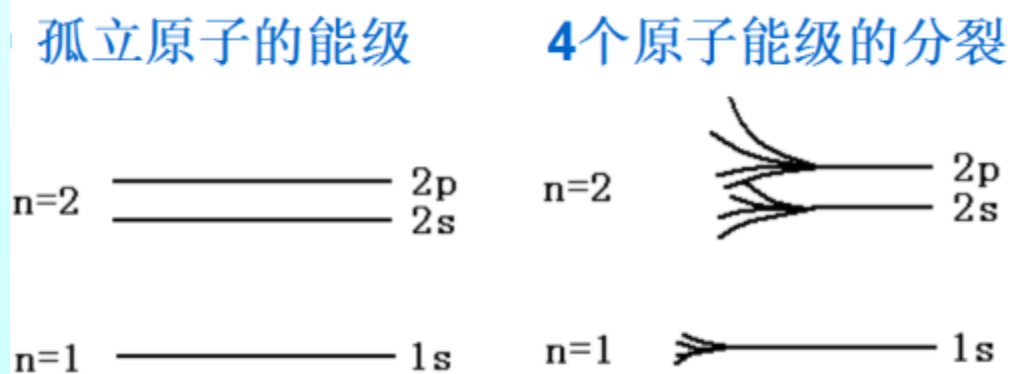
定态薛定谔方程:
$$\nabla^2 \psi(\vec{r}) + \frac{2m}{\hbar^2} (E - V) \psi(\vec{r}) = 0$$

共有化电子受到周期性势场的作用 $V(x) = V(x + a)$



求解得到:

对应于原来孤立原子的每一个能级, 变成了 N 条靠得很近的能级, 称为能带。

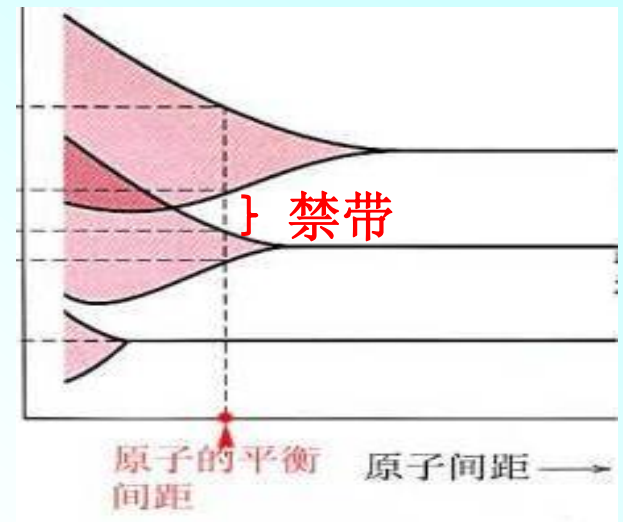


能带的宽度记作 ΔE , 量级为 $\Delta E \sim \text{eV}$ 。

c. 能带中电子的排布

固体中的一个电子只能处在某个能带中的某一条能级上。

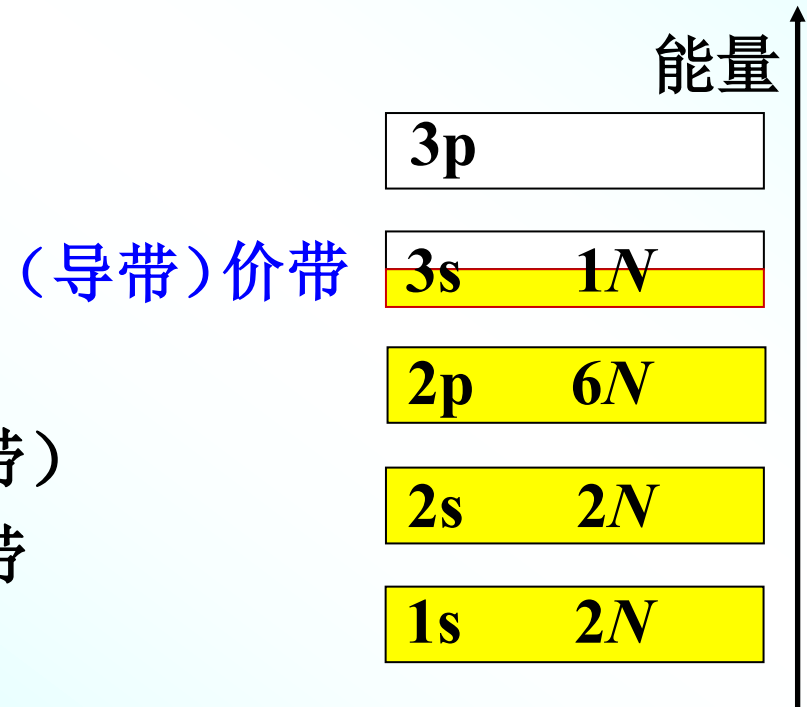
- 泡里不相容原理
- 能量最小原理



能带被占据情况

1. 禁带 (不能排电子)
2. 空带 (未排电子)
3. 满带 (排满电子)
4. 导带 (部分被排满)
5. 价带 (价电子所占据的能带)
可以是满带，也可以是导带

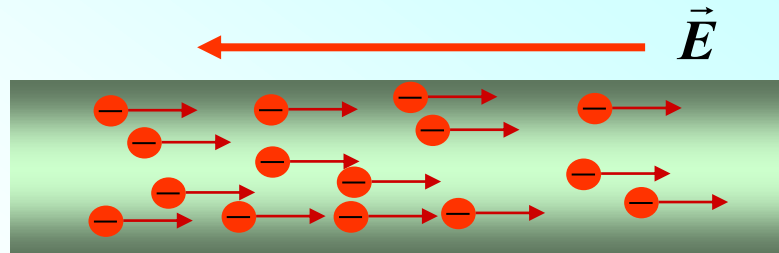
钠原子金属的能带示意图



何为导电？

●从现象来看：

在外电场的作用下，大量电子集体定向移动形成电流。



●从能量的观点来看：

与加外电场前相比，这些定向移动的电子的动能增加了。
也就是说，这些电子的(总)能量增加了。

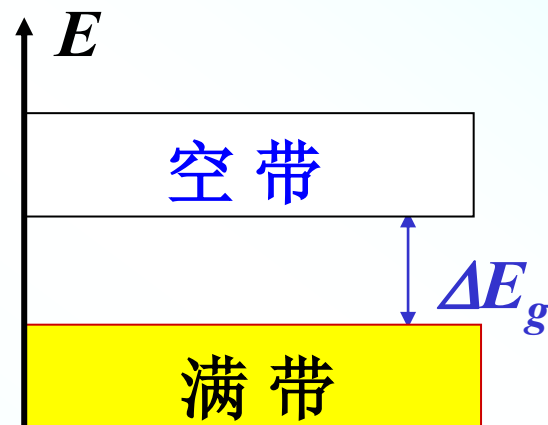
能量要增加，电子必须从低能级跃迁到高能级上去。

●从能带的观点来看：

由于泡利不相容原理的限制，满带上的电子在满带中只能交换位置。

这不能增加它们的总能量。

故满带上的电子不能导电



导带(部分排满的能带)上的电子可以在导带内往上跃迁，
从而增加(总)能量。所以导带可以导电

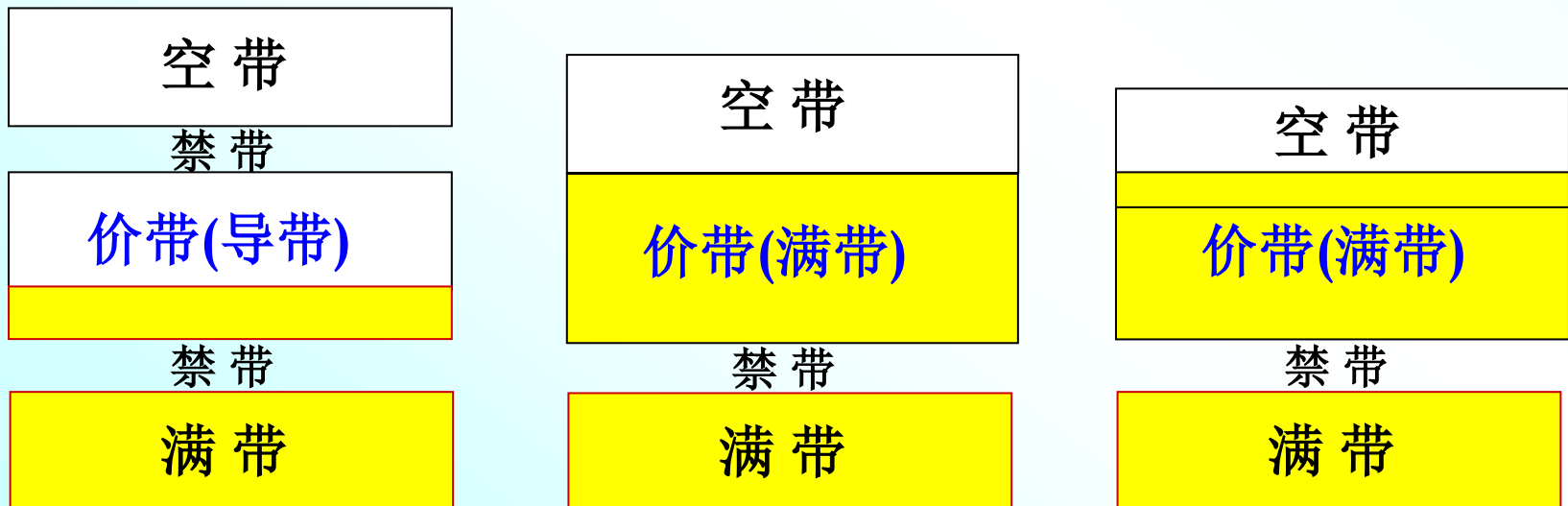
2. 导体、半导体和绝缘体的能级结构

按**导电性能**的高低
固体可以分为三类：

| | |
|-----|----------------------------------------------|
| 导体 | $\rho = 10^{-8} \sim 10^{-4} \Omega \cdot m$ |
| 半导体 | $10^{-4} \sim 10^8 \Omega \cdot m$ |
| 绝缘体 | $10^8 \sim 10^{20} \Omega \cdot m$ |

它们的导电性能不同，是因为它们的**能带结构**不同。

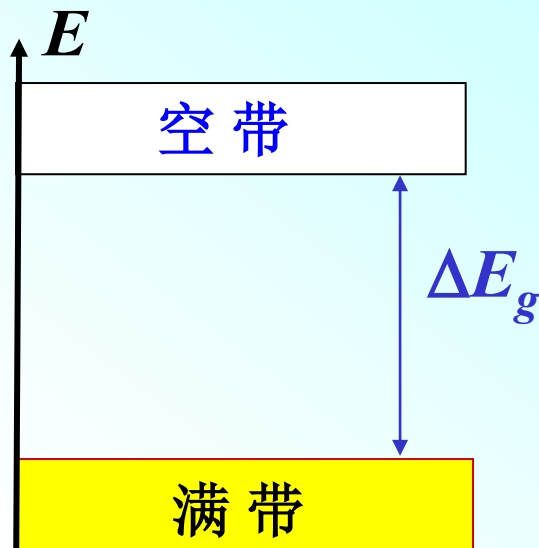
导体：其共有化电子**很容易**从（价带内部的）低能级跃迁到高能级



绝缘体：满带与空带之间有一个**较宽的禁带**（约3~6 eV）

共有化电子**很难**从低能级（满带）**跃迁**到高能级导带（空带或价带）上去。

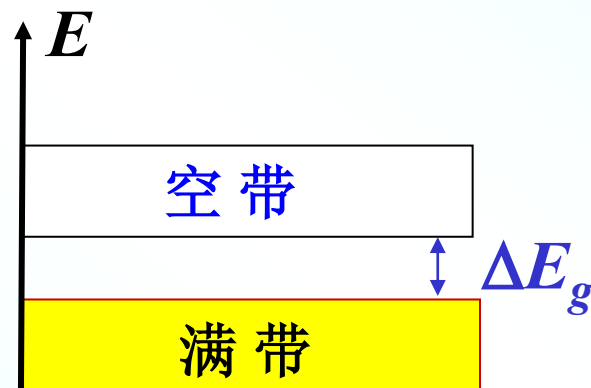
在外电场的作用下，共有化电子很难吸收外电场的能量，**不能形成电流**。



半导体：满带与空带之间是禁带。
但是**禁带很窄**（约0.1~2 eV）

满带中的电子**较易**进入导带。

导带中的电子在外场作用下可向稍高能级转移，参与导电。



半导体中的载流子：

在外电场（不太大）作用下，
满带中的电子可以跃迁到空带中去

因此，在满带留下空位

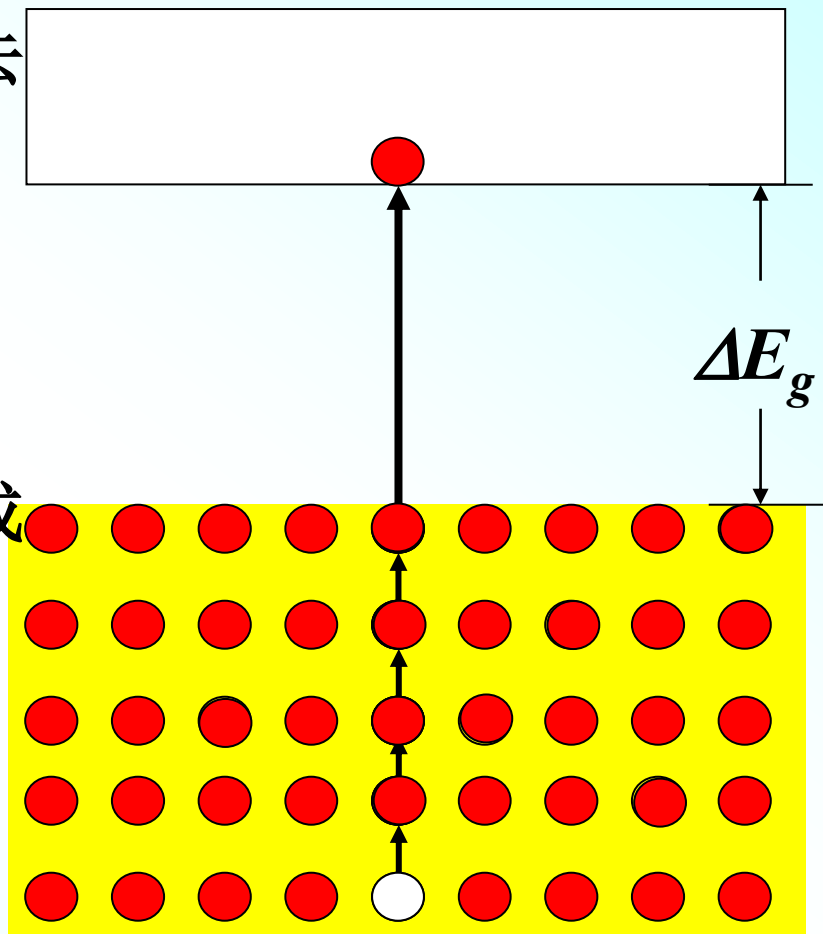
满带中的空位向下移动（相当于
电子向上移动）可形成电流。

等效地看：满带中的空位可以看成
带正电 $+e$ 的粒子，称为空穴

电子、空穴统称为载流子

载流子的密度决定了半导体的
导电性能。

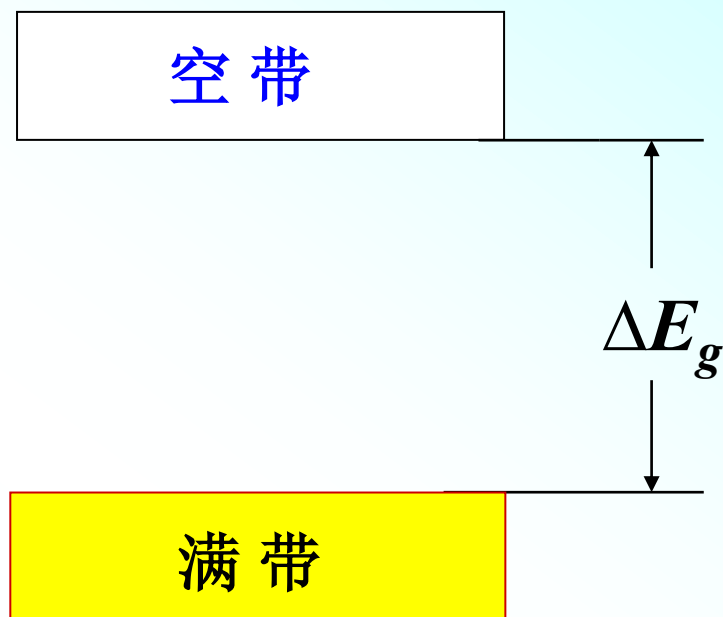
半导体： ΔE_g 较小



3. 半导体

a. 本征半导体 —— 纯净的半导体（不含杂质）。

本征半导体中，载流子数目有限，其导电性能弱，是不良导体。

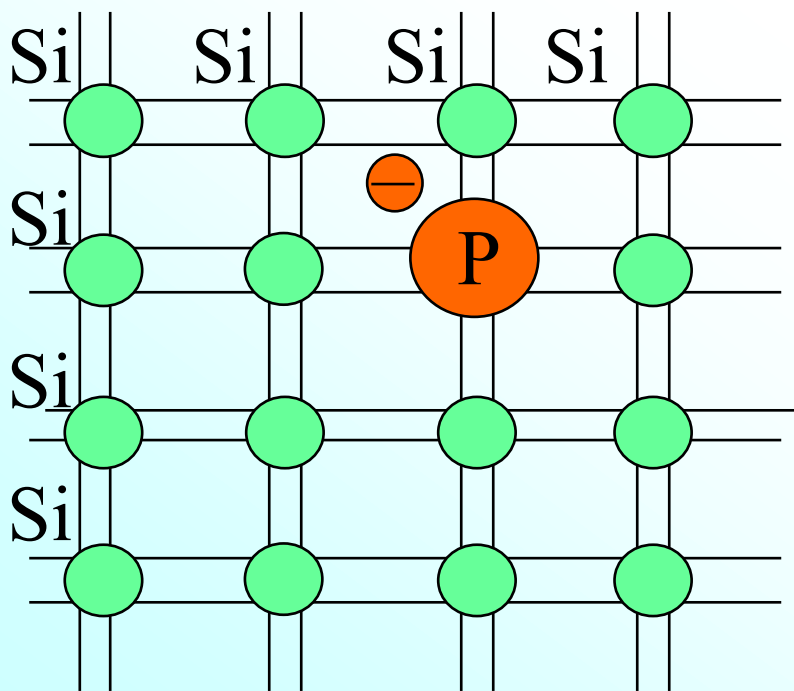


实际应用中，在本征半导体中加入少量其他元素，形成杂质半导体。

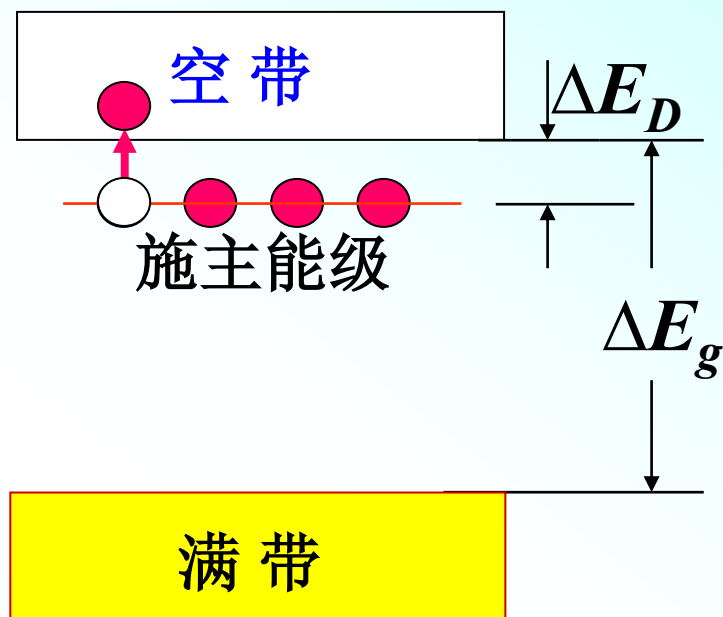
b. 杂质半导体

(1) n 型半导体 (negative)

四价的本征半导体 Si、Ge 等，掺入少量五价的杂质元素（如 P、As 等）形成电子型半导体，又称 n 型半导体。



量子力学指出，这种掺杂后多余的电子其能级在禁带中紧靠空带处， $\Delta E_D \sim 10^{-2} \text{eV}$ ，极易形成电子导电。



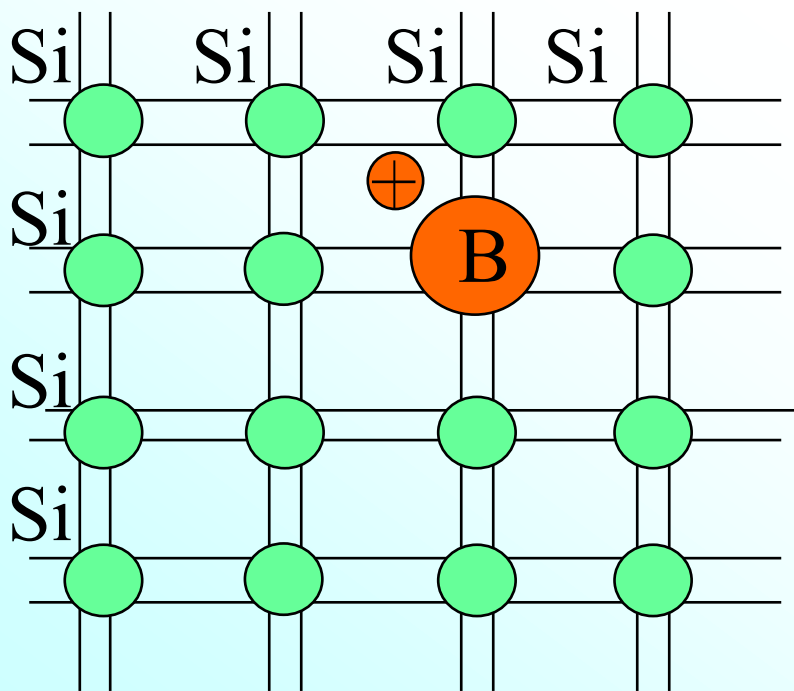
在 n 型半导体中：

参与导电的载流子主要是空带中的电子。

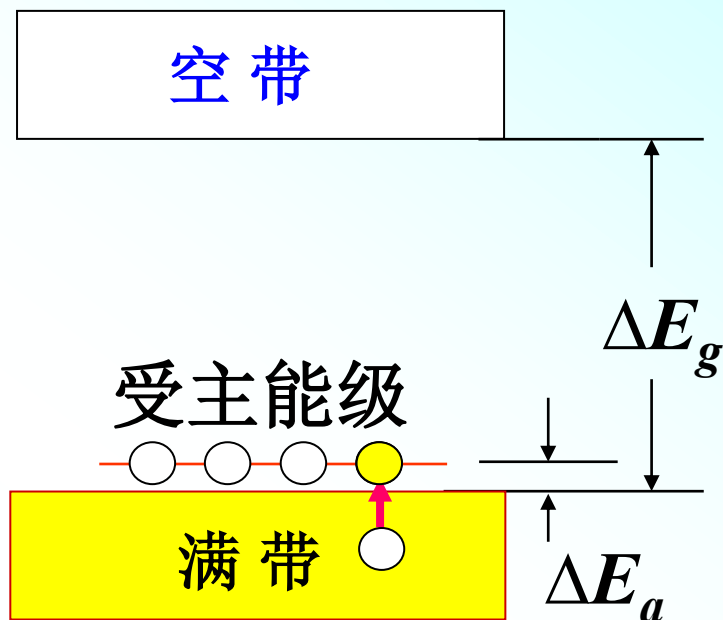
b. 杂质半导体

(2) p 型半导体 (positive)

四价的本征半导体 Si、Ge 等，掺入少量三价的杂质元素（如 B、Ga、In 等）形成空穴型半导体，称 p 型半导体。



量子力学指出，这种掺杂后多余的空穴其能级在禁带中紧靠满带处， $\Delta E_a \sim 10^{-2} \text{eV}$ ，极易形成空穴导电。



在 p 型半导体中：

参与导电的载流子主要是满带中的空穴。

二. 激光

激光是二十世纪六十年代出现的一种新型光源
(激光器)发出的光。

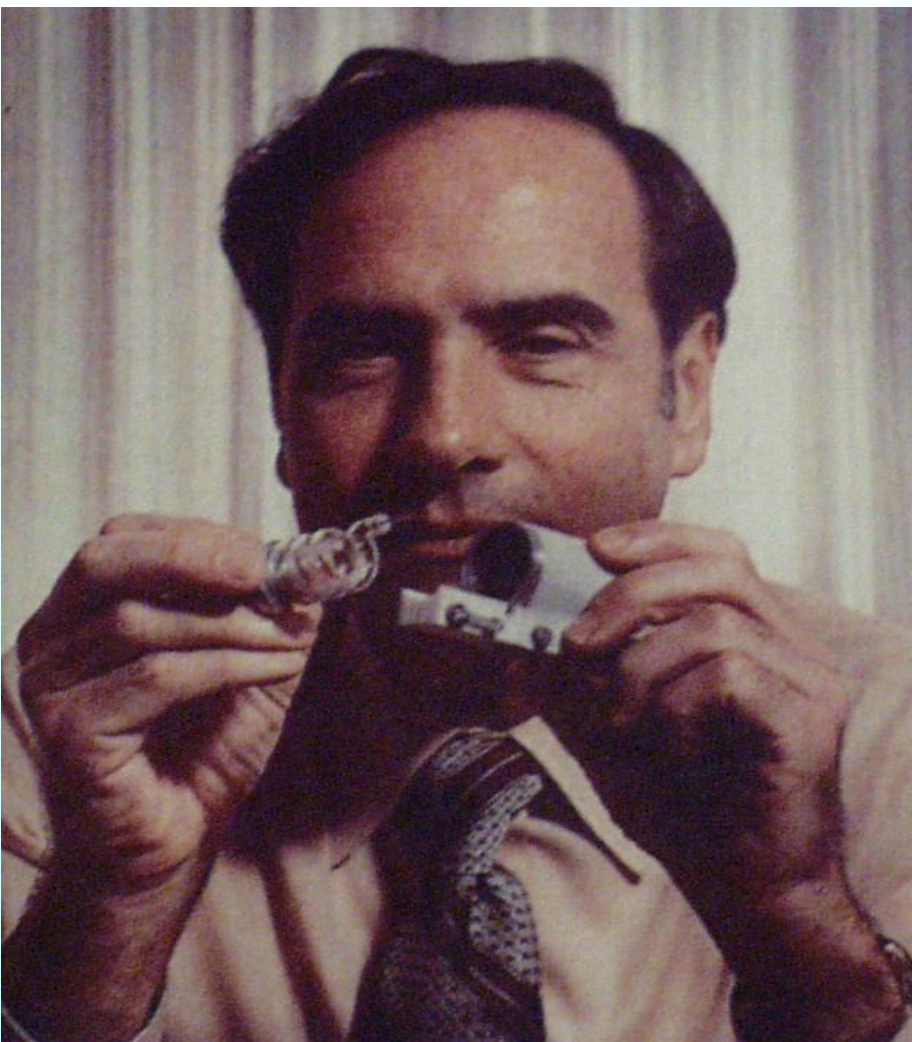
激光 (Laser)全名是

“辐射的受激发射所致的光放大”

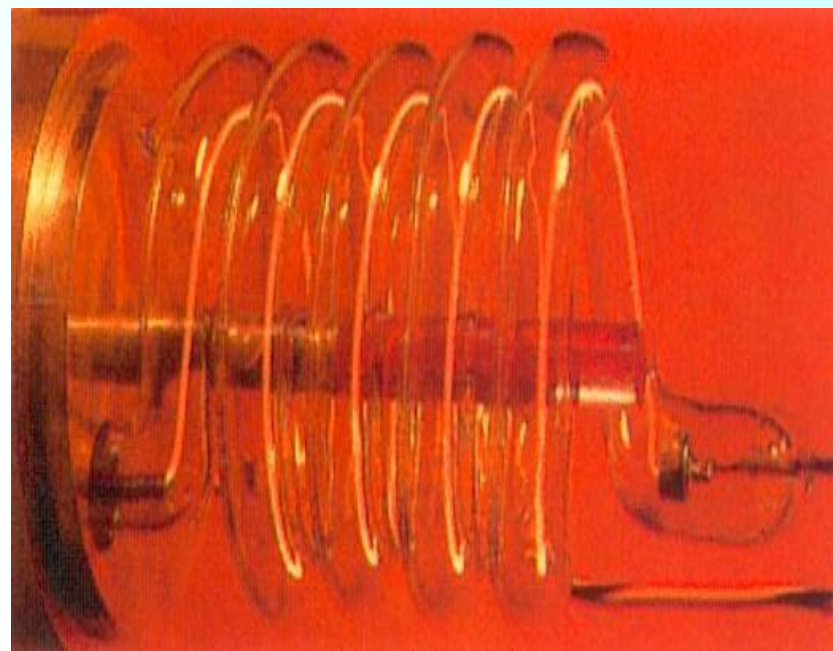
Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LASER

1964年10月，钱学森建议称之为激光。

世界第一台激光器



T. H. Maiman

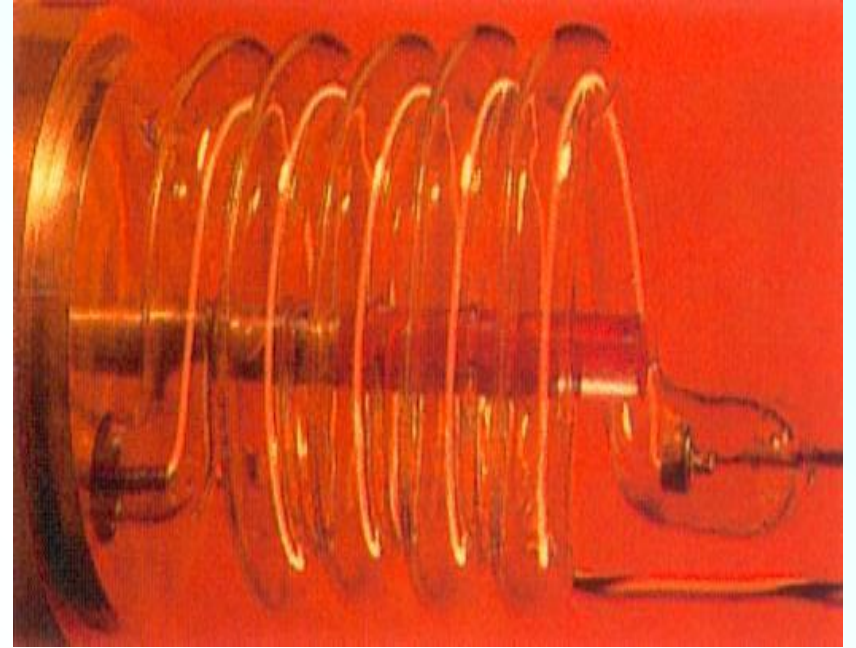


世界上第一台红宝石激光器

1960年梅曼 (T. H. Maiman) 发明了世界上第一台红宝石激光器

在器件设计上，梅曼用螺旋管
氙灯照射

我国第一台红宝石激光器（1961.9）



世界上第一台红宝石激光器

我国科学家用光学成像的办法，只用一支较小的直管氙灯。其尺寸同红宝石棒的大小差不多，用高反射的球形聚光器聚光，使红宝石棒好象泡在光源（氙灯）的像中，所以效率很高，用很小的能量就可获得激光。

激光的种类：

- 按工作物质分
 - 固体激光器（如红宝石 Al_2O_3 ）
 - 气体激光器（如He-Ne, CO_2 ）
 - 有机染料激光器
 - 半导体激光器（如砷化镓 GaAs）
 - 光纤激光器
 - 自由电子激光器
- 按工作波段分
 - 远红外、红外激光器
 - 可见光激光器
 - 紫外、真空紫外激光器
 - X光激光器
- 按工作方式分
 - 连续激光器
 - 脉冲激光器
 - 超短脉冲激光器



激光的特点：

相干性极好（相干长度可达几十上百甚至上万公里）

方向性极好（发散角 $\sim 10^{-4}$ 弧度）

脉冲瞬时功率大（可达 $\sim 10^{15}$ 瓦以上）

亮度极高（巨型脉冲固体激光器的亮度可比太阳亮度高100亿倍）

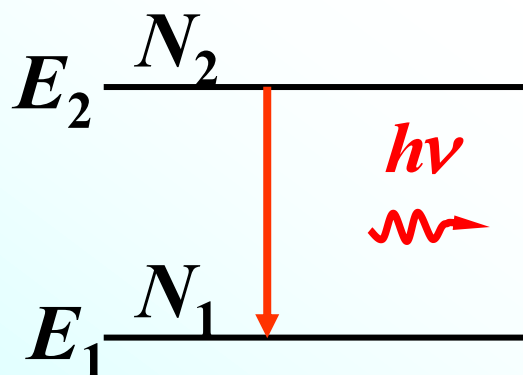
- 精密测量，全息摄影……
- 准直、测距、制导……
- 切削、武器、手术刀……
- 激光光纤通讯……
- 激光惯性约束核聚变……
- 激光推进
- ……



激光的原理:

1. 原子的跃迁:

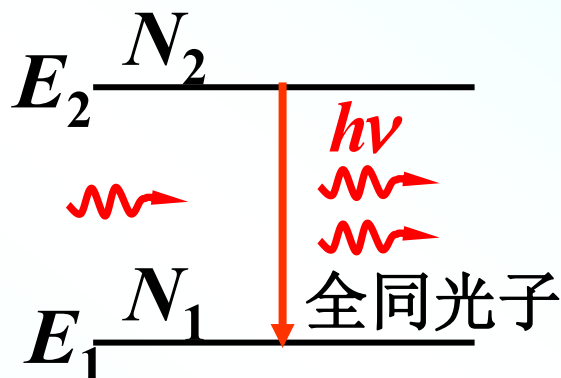
a. 自发辐射



各原子自发辐射的光是相互独立的非相干光。

↓
普通光源发光

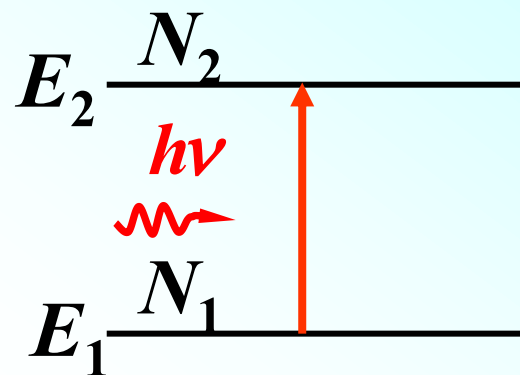
b. 受激辐射



受激辐射光与外来光的频率、偏振方向、相位及传播方向均相同——光的放大作用

↓
获得激光的途径

c. 受激吸收



上述外来光也有可能被吸收,使原子从 $E_1 \rightarrow E_2$

在光与物质的相互作用中，三种跃迁同时存在。

受激辐射和受激吸收是等几率的。

它们中哪个占优势取决于原子数 N_2 和 N_1 。

$E_2 \frac{N_2}{N_1}$ $N_2 < N_1$, 吸收跃迁占优势, 表现为光的吸收

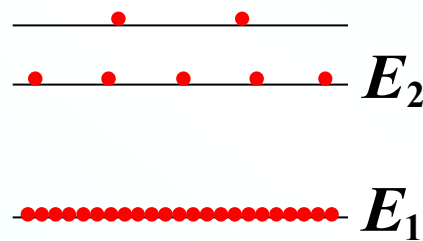
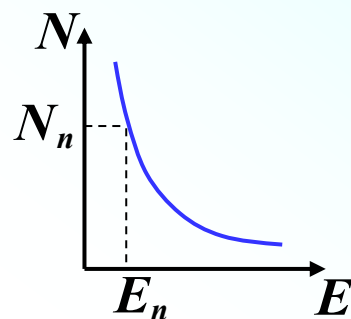
$E_1 \frac{N_1}{N_2}$ $N_2 > N_1$, 受激辐射占优势, 可获得激光。

正常情况下，由大量原子组成的系统，在温度不太低的平衡态，原子数量按能级的分布服从玻耳兹曼统计分布：

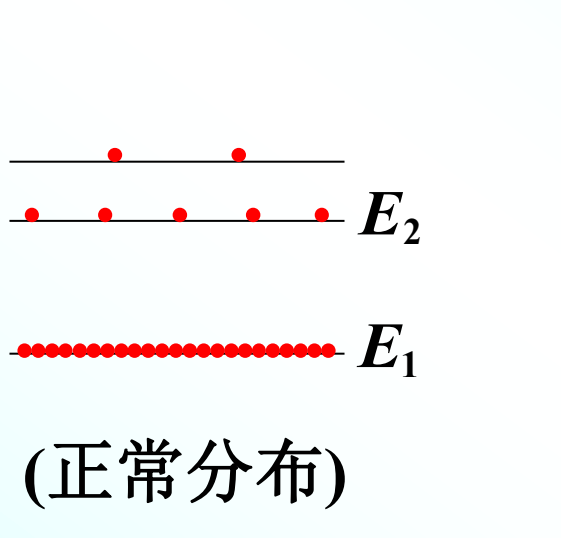
$$N_n \propto e^{-\frac{E_n}{kT}}$$

则两能级上的原子数目之比： $\frac{N_2}{N_1} = \text{Exp}(-\frac{E_2 - E_1}{kT})$

因为 $E_2 > E_1$, $\Rightarrow \frac{N_2}{N_1} < 1$ (正常分布)



$E_2 > E_1$, 则两能级上的原子数目之比:



(正常分布)

$$\frac{N_2}{N_1} = \text{Exp}\left(-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right) \quad (\text{正常分布})$$
$$T \sim 300 K$$
$$\Rightarrow kT = 1.38 \times 10^{-23} \times 300 \approx 0.026 \text{ eV}$$

以氢原子为例 $E_n = \frac{-13.6 \text{ eV}}{n^2}$

$$\Rightarrow \frac{N_2}{N_1} = \text{Exp}\left(-\frac{10.2}{0.026}\right) \approx \frac{1}{10^{171}} \ll 1$$

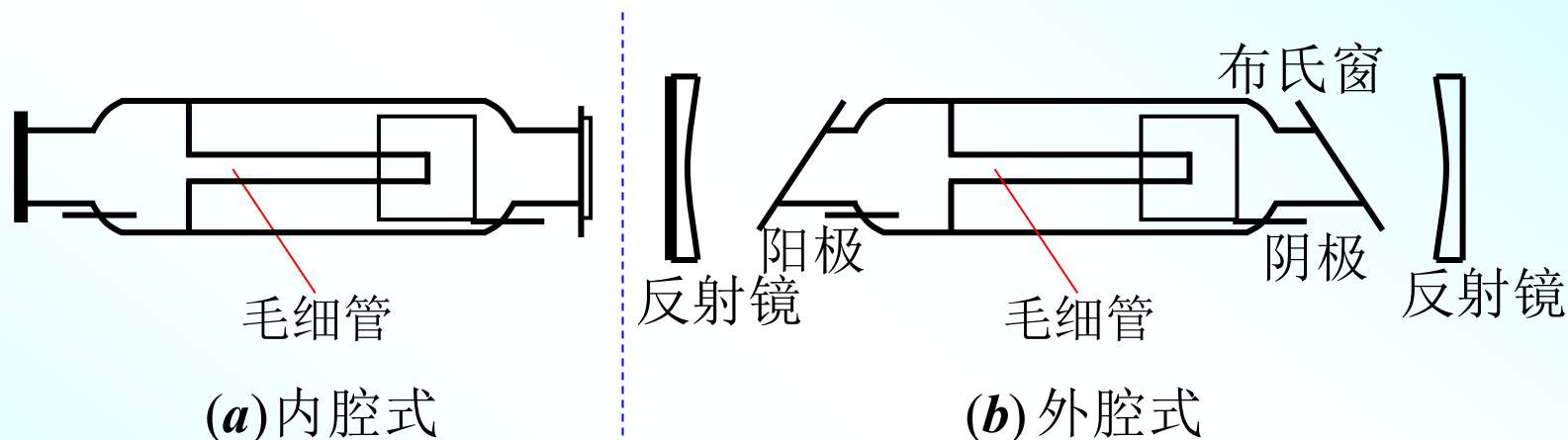
$$\frac{N_3}{N_2} \approx \frac{1}{10^{32}} \ll 1$$

但要产生激光必须使 $N_2 \gg N_1$, 这称为粒子数反转

如何实现粒子数反转?

2. He-Ne激光器的工作原理

(1962年在美国贝尔实验室研制成功)



在He -Ne 激光器中，

He是辅助物质，**Ne**是激活物质，

He与 Ne之比为5：1 ~ 10：1。

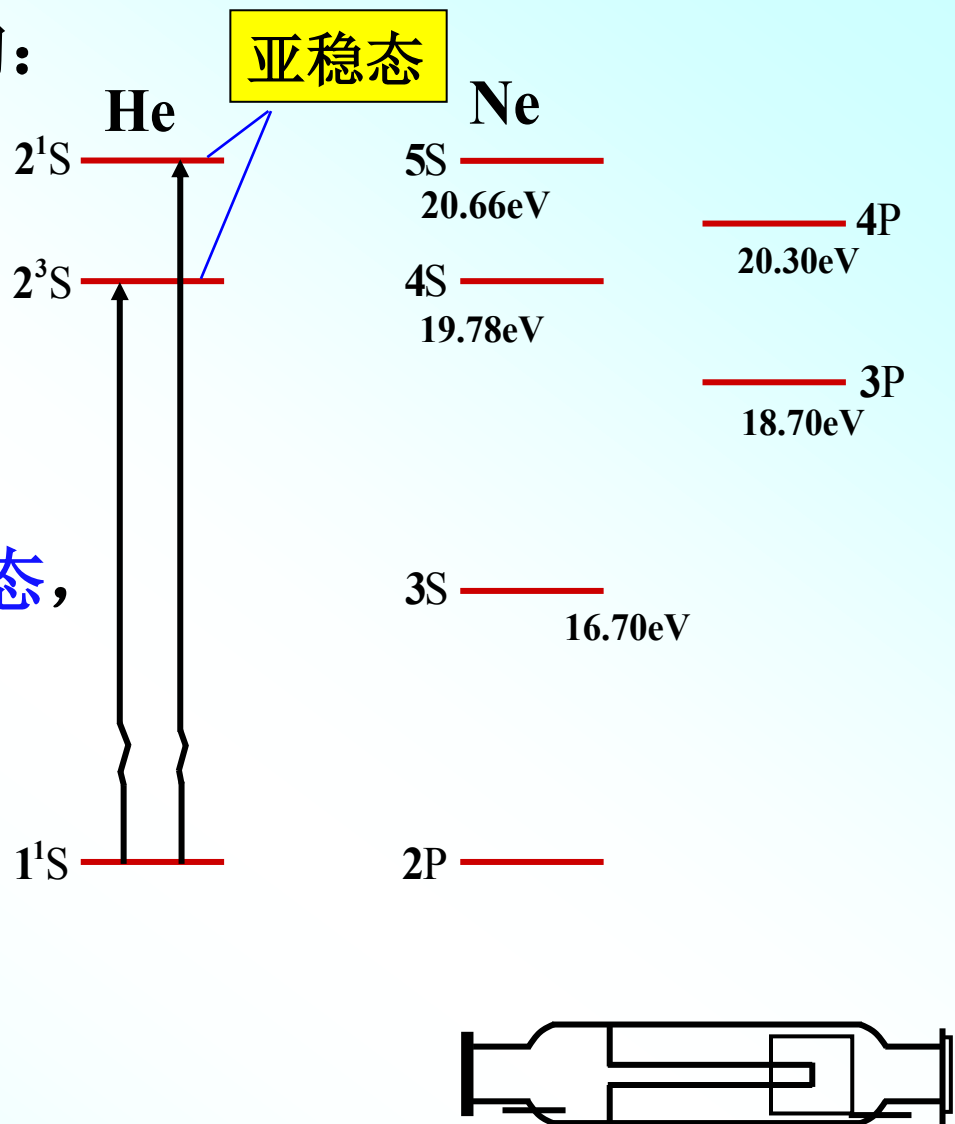
He原子和Ne原子的能级结构:

由于**电子的碰撞**，He原子被激发到 2^3S 和 2^1S 能级的概率比Ne原子被激发到高能级的概率大。

He的 2^3S 和 2^1S 能级都是**亚稳态**，很难回到基态。

原子在**亚稳态**上的寿命($10^{-3}s \sim 1s$)比在一般高能级上($10^{-8}s$)长得多。

因此，在He的这两个亚稳态上集聚了较多的He原子。

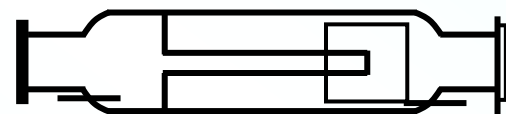
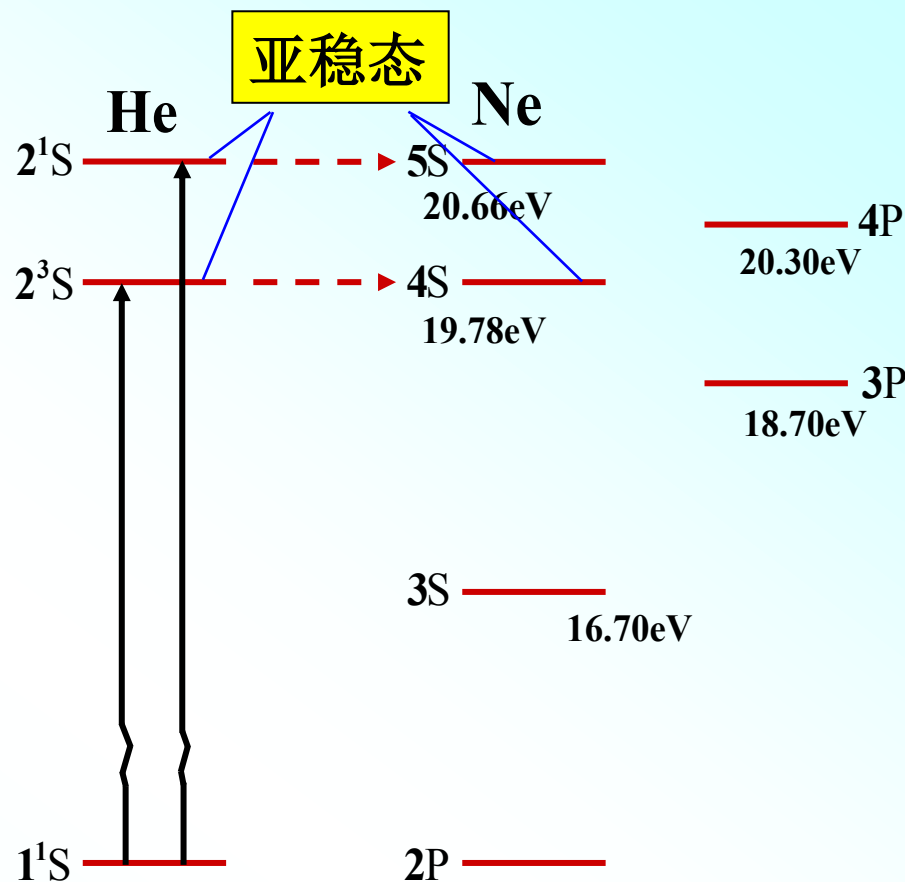


He的两个亚稳态上集聚了较多的He原子。

Ne的5S 和4S与He的 2^1S 和 2^3S 的能量几乎相等，
当两种原子相碰时非常容易
产生能量的“共振转移”。

在碰撞中He原子把能量传递给Ne原子而回到基态，而Ne原子则被激发到5S 或4S；

而Ne的5S、4S也是亚稳态，下能级4P、3P的寿命比上能级5S、4S要短得多，这样就可以实现粒子数反转。



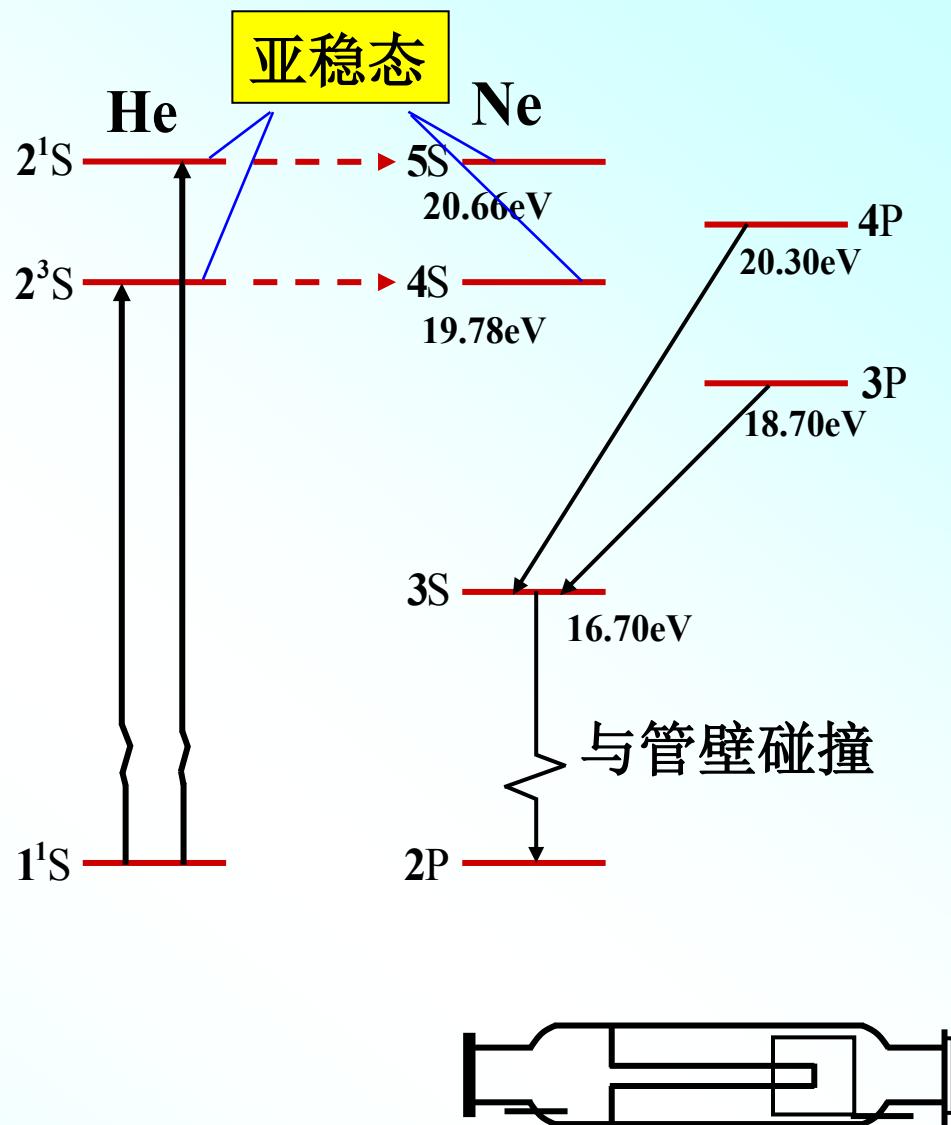
Ne的5S、4S聚集了较多原子

要产生激光，除了**增加上能级的粒子数**外，还要设法**减少下能级的粒子数**。

比如，减少Ne的3P和4P上的粒子数。

放电管做得较细，可使原子与管壁频繁碰撞。借助这种碰撞，3S态的Ne原子可以将能量交给管壁发生“**无辐射跃迁**”而回到基态。

及时减少3S态的Ne原子数，有利于激光**下能级4P与3P态的抽空**。



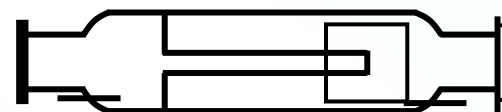
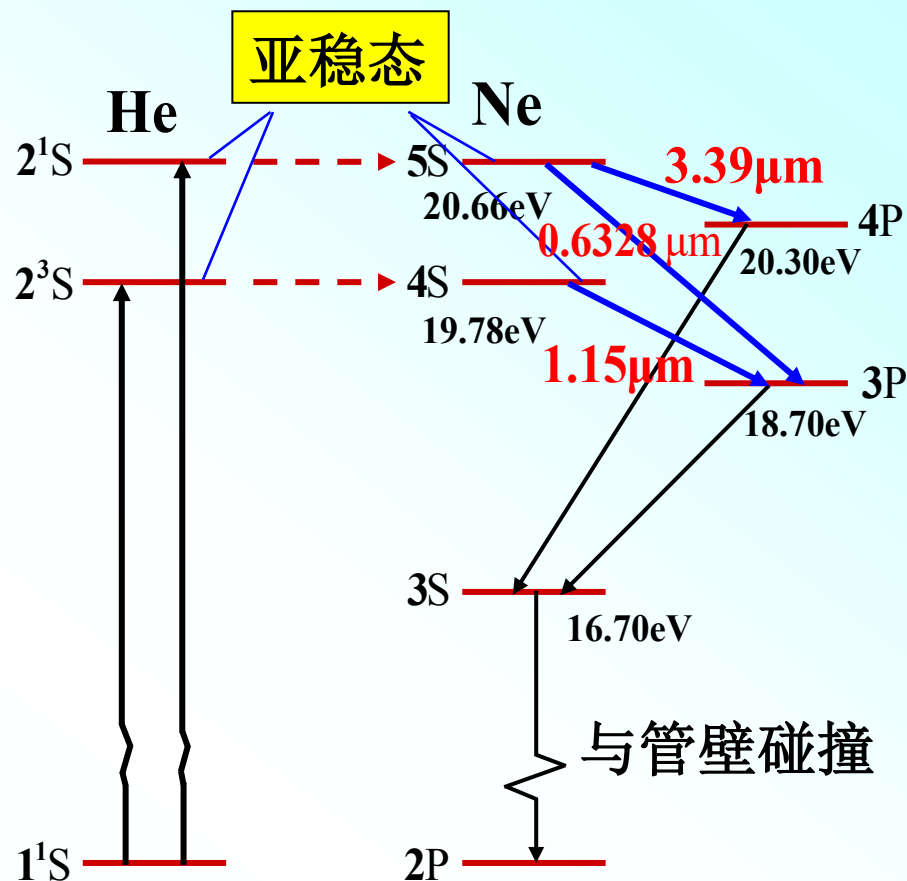
Ne的5S对4P、3P形成粒子数反转，
4S对3P形成粒子数反转。

Ne原子可产生多个波长的
激光谱线。
最强的三条的波长是

$3.39\ \mu\text{m}$
 $1.15\ \mu\text{m}$
 $0.6328\ \mu\text{m}$

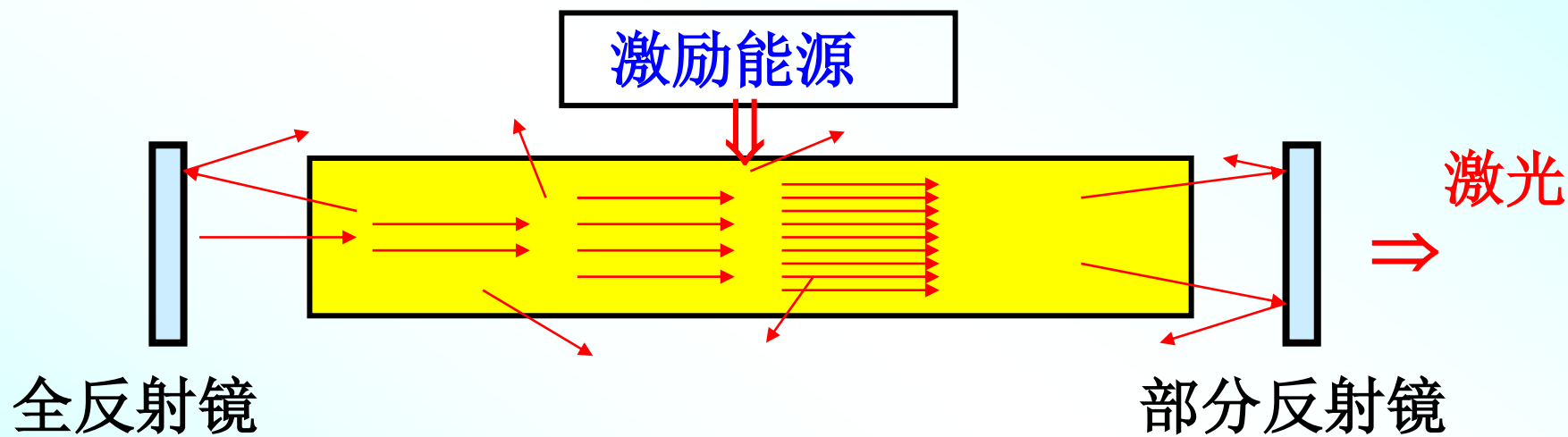
它们都是从亚稳态到非亚稳态、非基态
之间发生的

如何选择需要的波长(频率)?



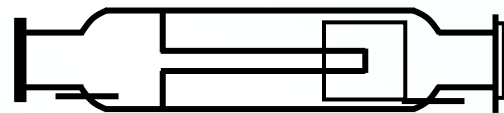
3. 光学谐振腔

激光器有两个反射镜，它们构成一个**光学谐振腔**。



光学谐振腔的作用：

1. 使激光具有极好的**单色性**（选频）。
2. 使激光具有极好的**方向性**（沿轴向）；
3. 增强**光放大**作用（放大）；



光学谐振腔两端的反射镜处必定是波节，

所以光程满足驻波条件：

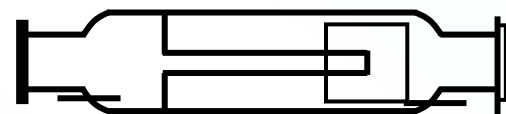
$$nL = k \frac{\lambda_k}{2}$$

($k=1, 2, 3, \dots$)

n — 谐振腔内媒质的折射率

λ_k — 真空中的波长

$$\Rightarrow \lambda_k = \frac{2nL}{k}$$



小结：产生激光的必要条件

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

作业： 16 — T1-T4

作业要求

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. 作业纸上每次都要写姓名以及学号(或学号末两位)。
4. 课代表收作业后按学号排序，并装入透明文件袋。
5. 每周一交上周的作业。迟交不改，早交也不改。
6. 作业缺交三分之一及以上者综合成绩按零分计。