

大学物理

College Physics

主讲

华中科技大学

刘超飞

● 电子自旋

每个电子的自旋角动量 L_S 是量子化的

$$L_S = \sqrt{s(s+1)}\hbar \quad s = \frac{1}{2} \text{ — 自旋量子数}$$

其在空间取向也是量子化的，
且在空间某方向的投影只能取两个值：

$$L_{SZ} = m_s \hbar \quad m_s = \pm \frac{1}{2} \text{ — 自旋磁量子数}$$

自旋是内秉角动量！

● 原子的壳层结构

主壳层： $n = 1, 2, 3, 4, 5 \dots$ （表示为 K, L, M, N, O, P, \dots ）

支壳层： $l = 0, 1, 2, 3, 4, 5, \dots$ （表示为 s, p, d, f, g, h, \dots ）

● 核外电子排布

1 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) 。

主壳层 n 上可容纳的电子数为：
$$N_n = \sum_{l=0}^{n-1} 2(2l+1) = 2n^2$$

2 能量最小原理

每个电子趋向占据未被填充的最低能级。

能级的高低由 $n + 0.7l$ 判定。

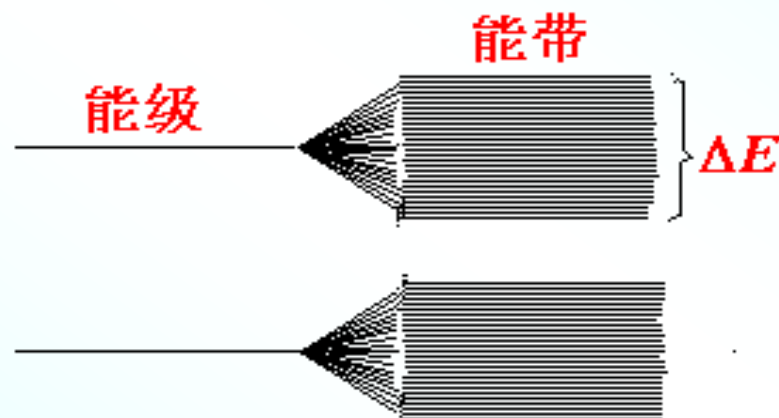
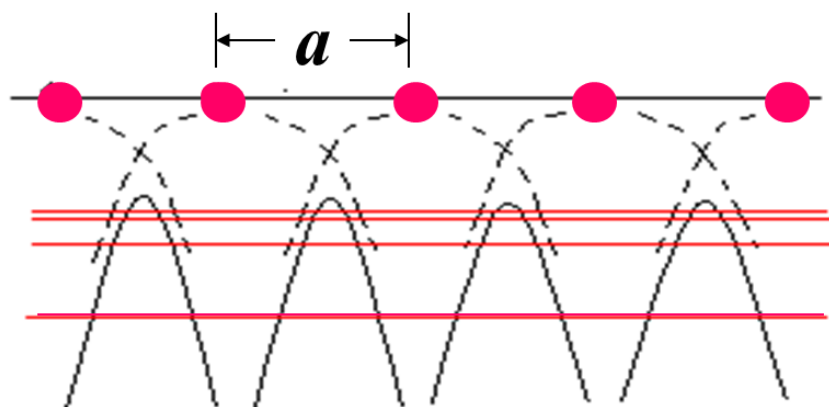
(徐光宪—经验公式)

● 固体的能带

在晶体中，电子受到周期性势场的作用。

外层电子：其势垒宽度较小，穿透概率较大，成为**共有化电子**。

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 条靠得很近的能级，称为**能带**。



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

它们的导电性能不同，是因为它们的能带结构不同。

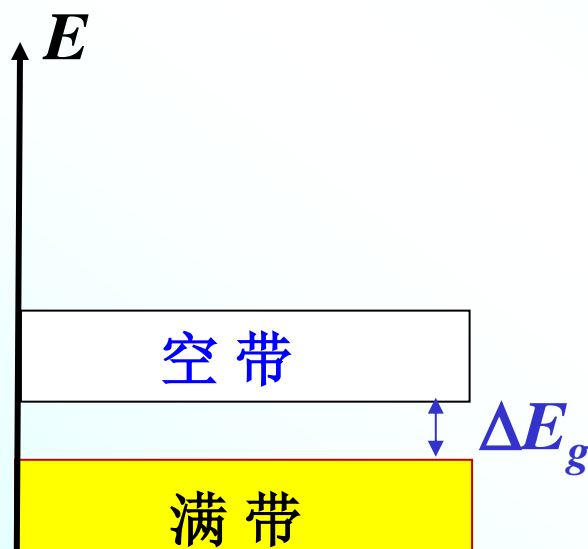
导体

$$\rho = 10^{-8} \sim 10^{-4} \Omega \cdot m$$



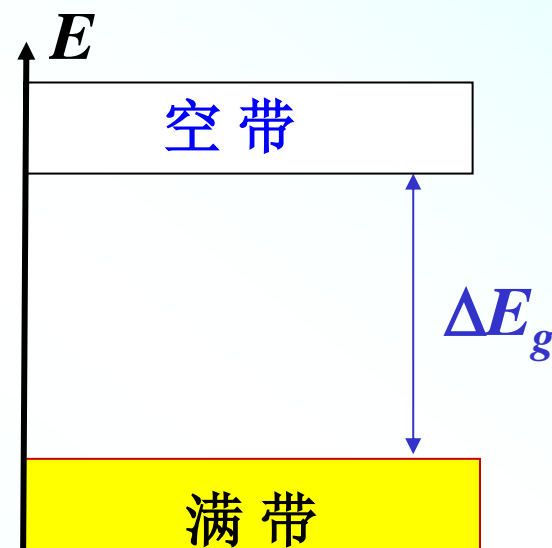
半导体

$$10^{-4} \sim 10^8 \Omega \cdot m$$



绝缘体

$$10^8 \sim 10^{20} \Omega \cdot m$$

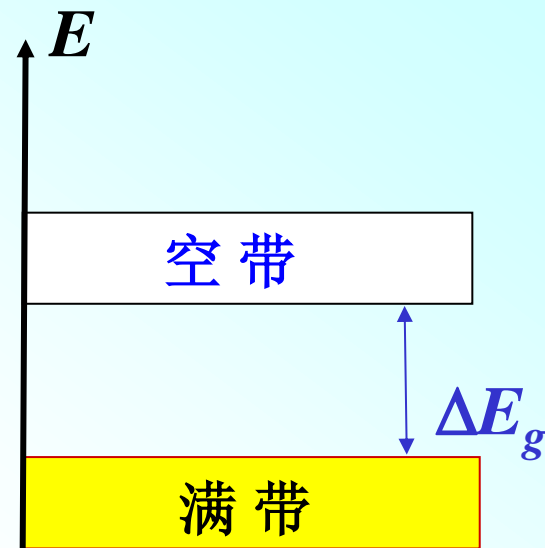
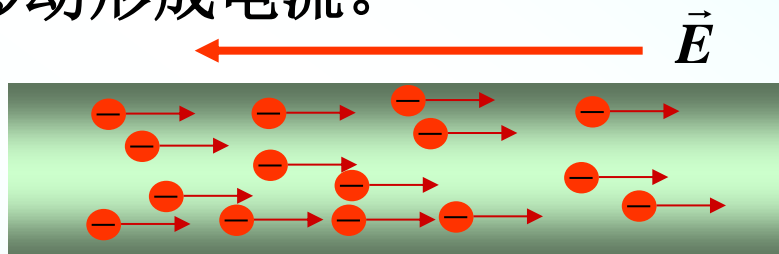


ΔE_g — 禁带宽度

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。

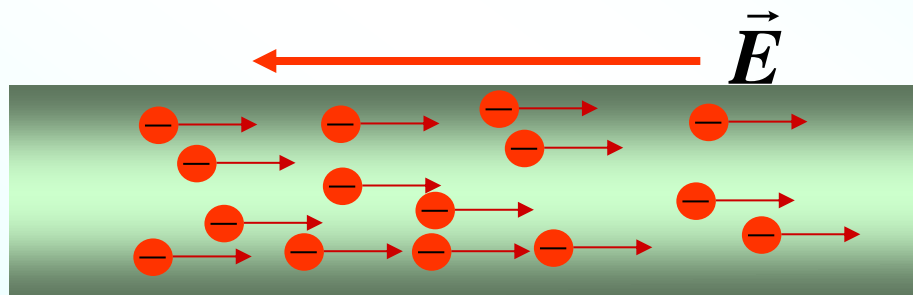
●从能带的观点来看：

导带上的电子的能量(整体上)可以增加，所以可以导电；

而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。这不能引起它们整体的能量状态的改变。
故，满带上的电子不能导电。

导体：满带与空带之间没有禁带。

在外电场的作用下，大量电子很易获得能量，集体定向流动形成电流。



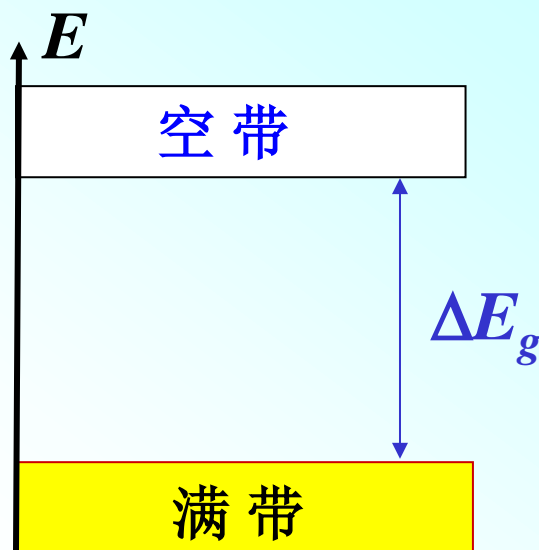
$$\Delta E_g = 0$$

从能级图上来看，是因为其共有化电子很容易从低能级跃迁到高能级上去。

绝缘体：满带与空带之间有一个**较宽的禁带**
(ΔE_g 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。

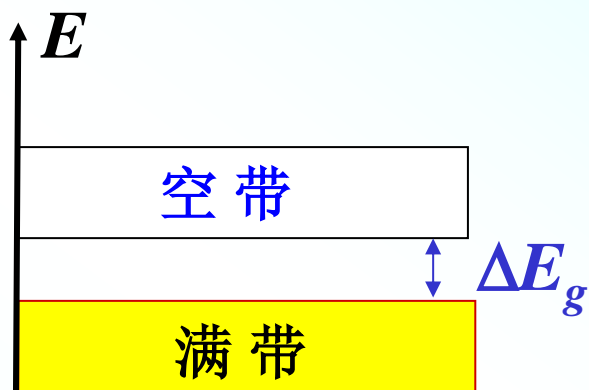
在外电场的作用下，共有化电子很难吸收外电场的能量，所以不能形成电流



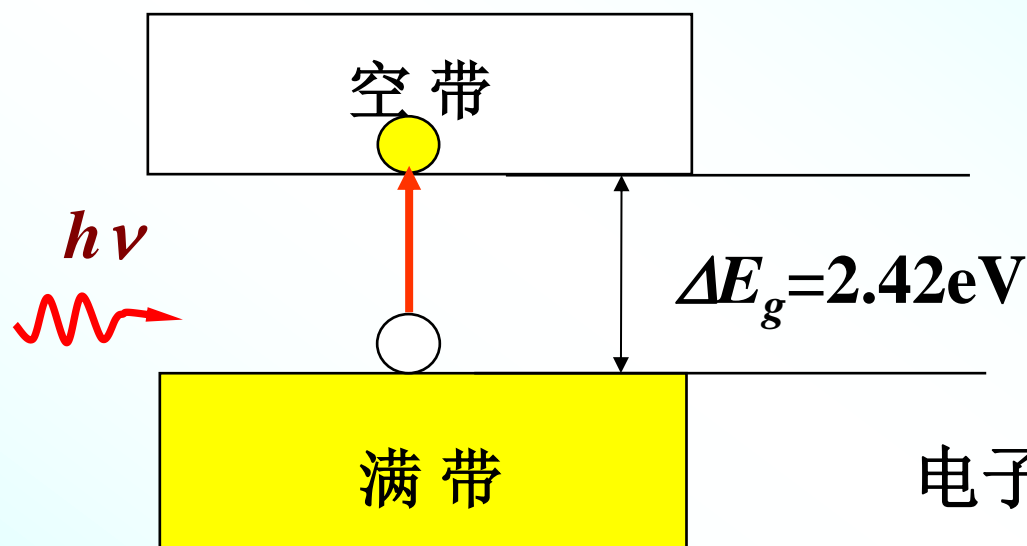
半导体：满带与空带之间是禁带。
但是**禁带很窄**
(ΔE_g 约0.1~2 eV)

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。



例：半导体 CdS（硫化镉）



这相当于满带中产生了一个带正电的粒子(称为“**空穴**”)，空带中多了一个电子。

电子和空穴总是成对出现的。

用**硫化镉 (CdS)**制成的光敏电阻，在没有受光照射时，它的暗电阻可达几十兆欧，当受光照后，其阻值则骤降到几千欧，仅为原阻值的几百分之一。不仅如此，还可以产生电动势，这是半导体的光电效应。

利用该特性可制成光敏电阻和光电池，前者在自动控制系统中得到广泛应用，后者在空间技术和人类利用太阳能方面得到应用。

3. 半导体的导电机构

a. **本征半导体** 是指纯净的半导体。

其导电性能在导体与绝缘体之间。

满带上的一个电子有可能跃迁到空带，
于是满带中出现一个空位，即产生一个空穴。

在外场的作用下，导带中的电子、满带中的
空穴都可参与导电。（本征导电性）

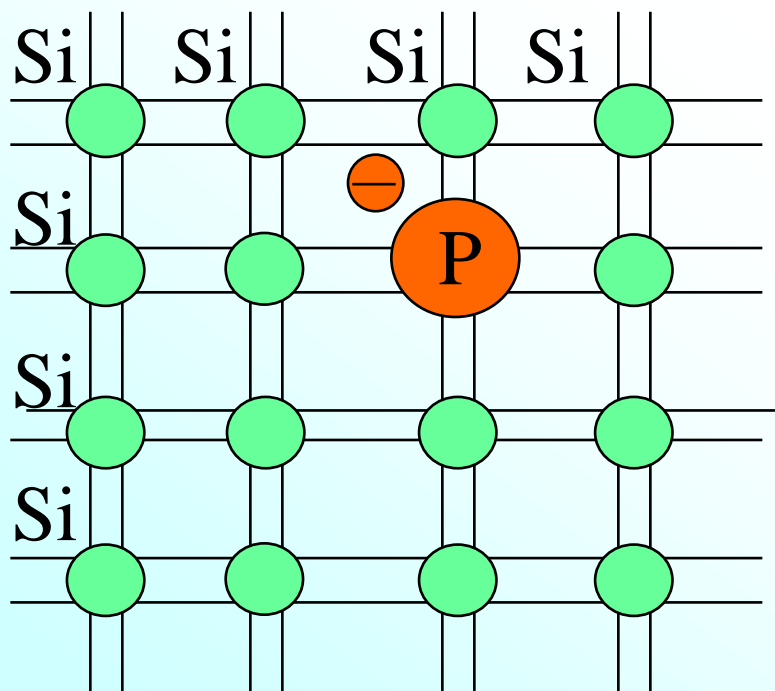
两个概念：

1. **电子导电**.....半导体的**载流子**是电子
2. **空穴导电**.....半导体的**载流子**是空穴

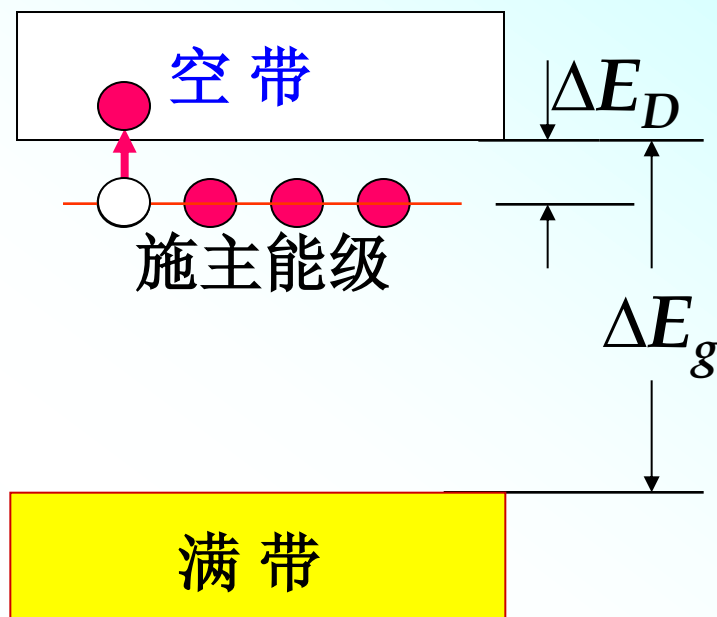
b. 杂质半导体

(1) n 型半导体

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，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。

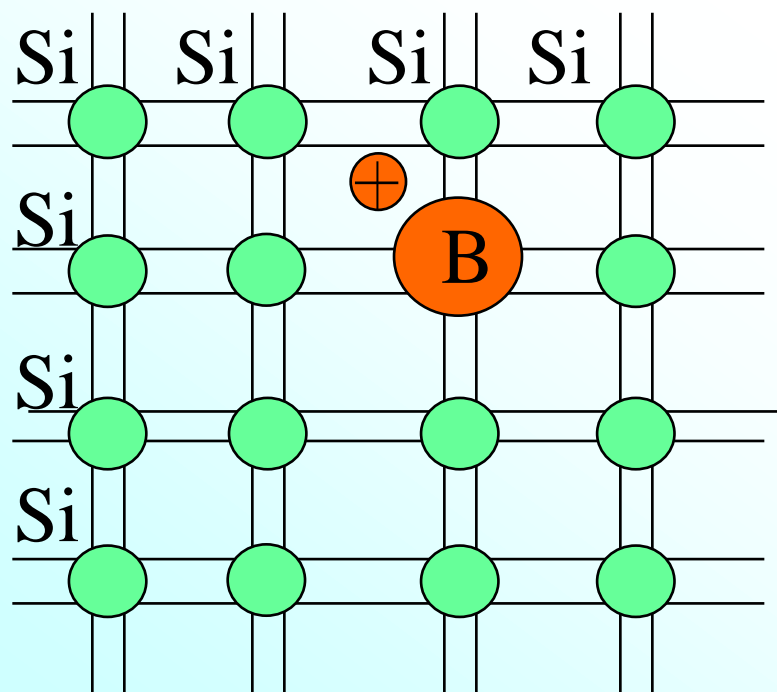


在 n 型半导体中
电子.....多数载流子
空穴.....少数载流子

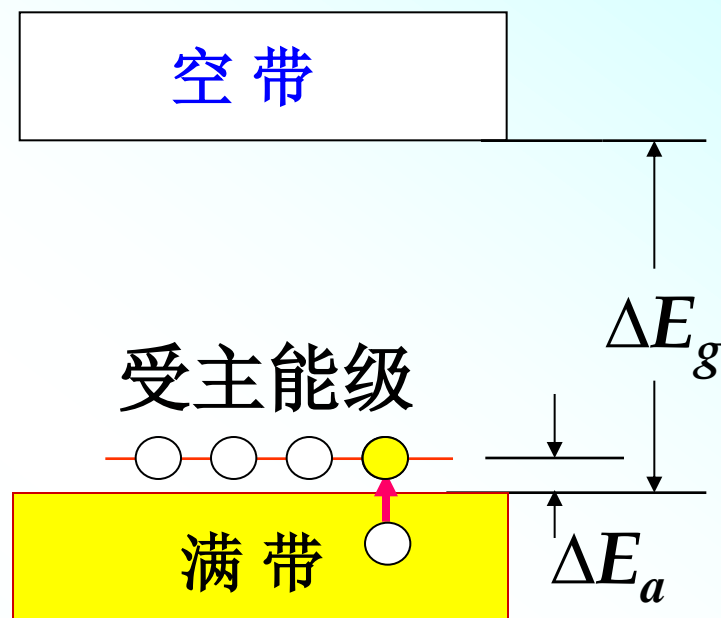
b. 杂质半导体

(2) p 型半导体

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， $\Delta E_a \sim 10^{-2} \text{eV}$ ，极易形成电子导电。



在 p 型半导体中
空穴.....多数载流子
电子.....少数载流子

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。

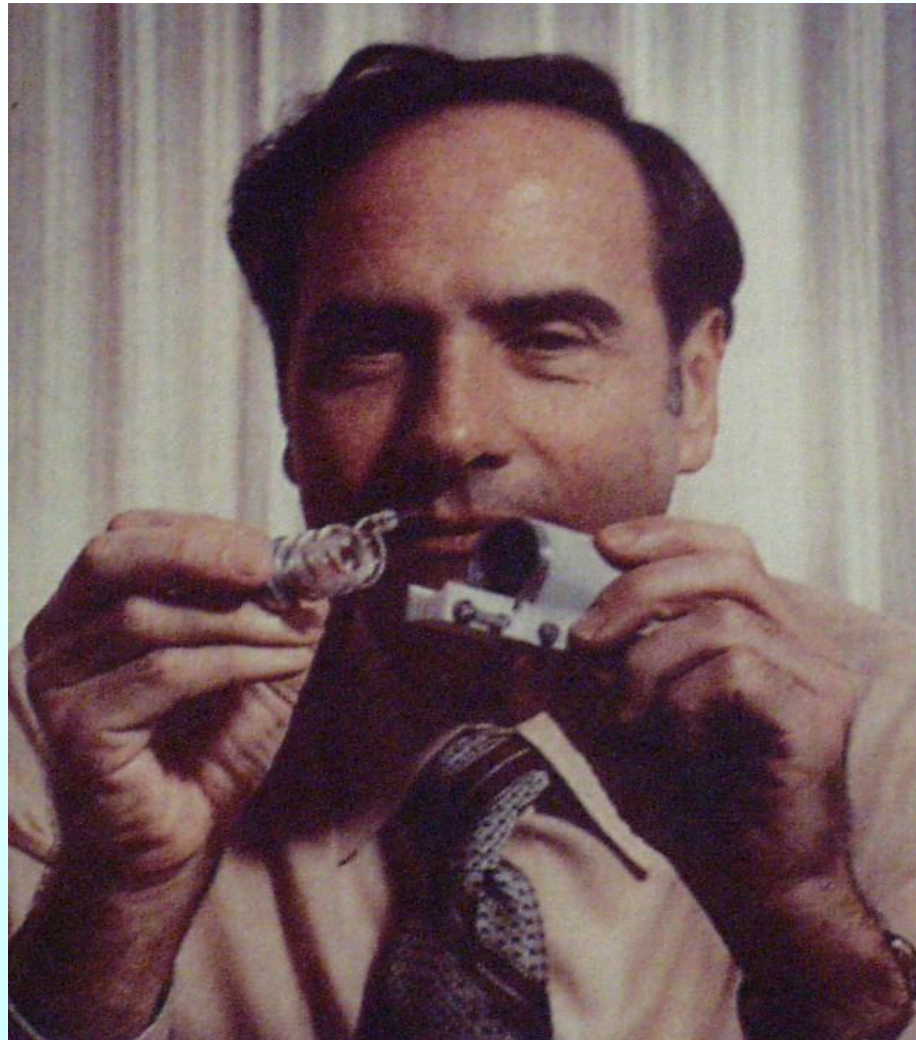
1960年美国休斯研究实验室的梅曼制成了第一台红宝石激光器。1961年9月中国科学院长春光学精密机械研究所制成了我国第一台激光器。

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)

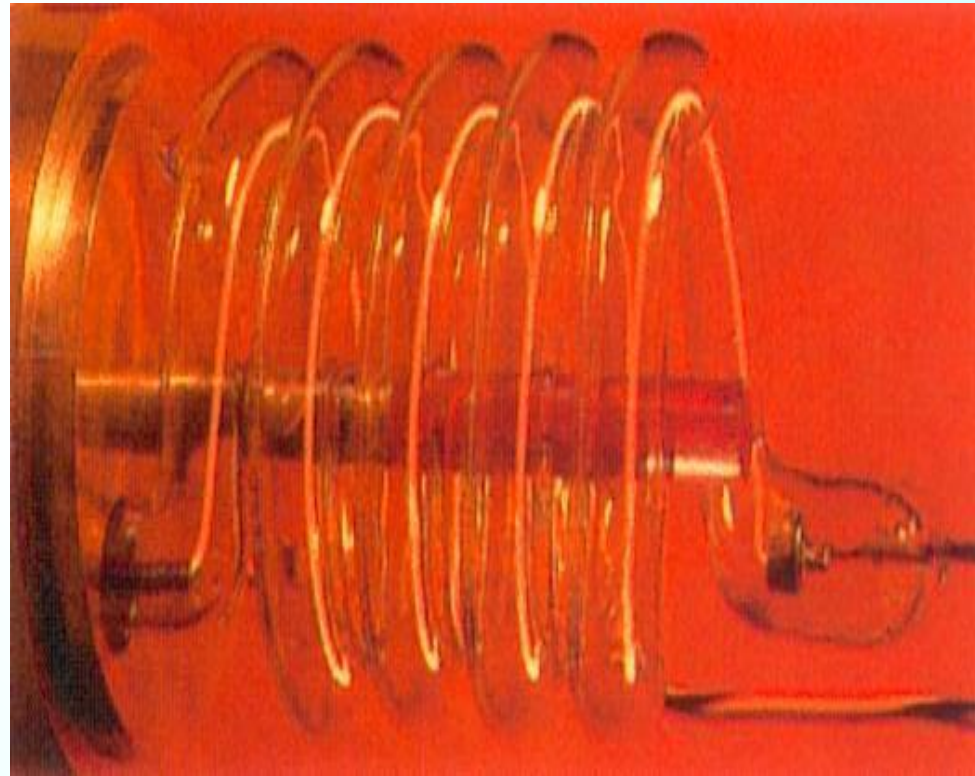
LASER

1964年10月，钱学森建议称之为激光。

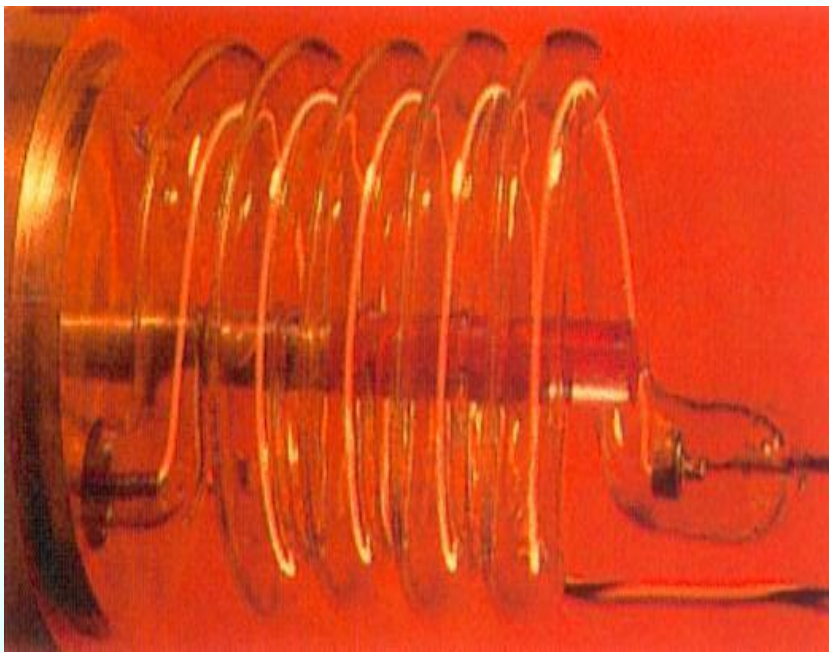
1960年梅曼(T. H. Maiman)发明了世界上第一台红宝石激光器



T. H. Maiman



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



在器件设计上，梅曼用螺旋管氙灯照射，我国科学家用光学成像的办法，只用了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 (相干长度可达几十甚至上百公里)

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)

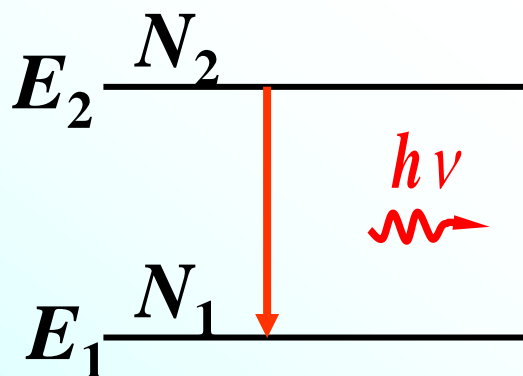
- 精密测量, 全息摄影.....
- 准直、测距、制导.....
- 切削、武器、手术刀
- 激光光纤通讯.....
- 激光惯性约束核聚变.....
- 激光推进
-



激光的原理:

1. 原子的跃迁(自发辐射、受激辐射和受激吸收)

a. 自发辐射

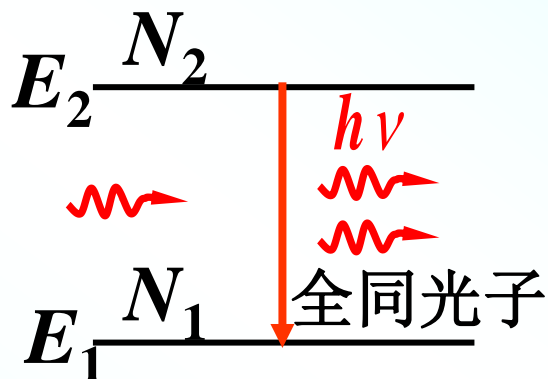


各原子自发辐射的光是相互独立的非相干光。



普通光源发光

b. 受激辐射



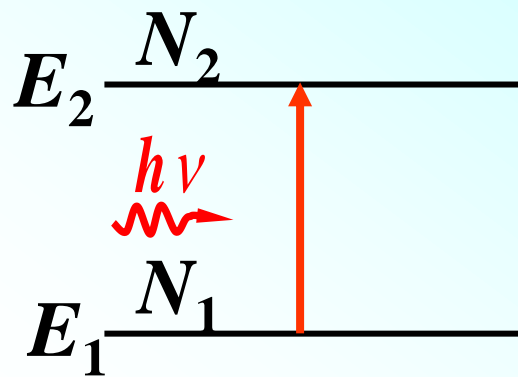
受激辐射光与外来光的频率、偏振方向、相位及传播方向均相同

-----有光的放大作用。



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。

受激辐射和受激吸收中哪个占优势取决于原子数 N_2 和 N_1 。

$N_2 < N_1$ ，吸收跃迁占优势，表现为光的吸收；

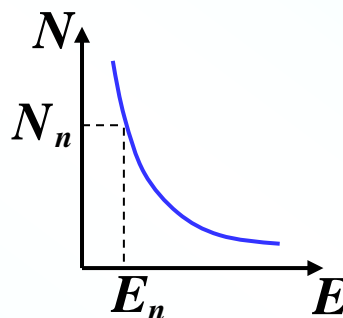
$N_2 > N_1$ ，受激辐射占优势，可获得激光。

$$E_2 \frac{N_2}{N_1}$$

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，原子数目按能级的分布服从玻耳兹曼统计分布：

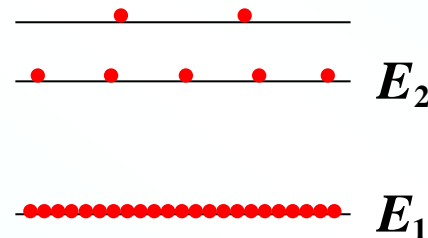
$$E_1 \frac{N_1}{N_2}$$

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



因为 $E_2 > E_1$ ，则两能级上的原子数目之比：

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}} < 1 \quad (\text{正常分布})$$



$E_2 > E_1$, 则两能级上的原子数目之比: $\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{E_2-E_1}{kT}} < 1$
(正常分布)

估计原子数目之比:

$\left\{ \begin{array}{l} \text{以氢原子为例: } E_n = \frac{-13.6\text{eV}}{n^2} \\ T \sim 300\text{K} \\ kT = 1.38 \times 10^{-23} \times 300 \approx 0.026 \text{ eV} \end{array} \right.$

$$\begin{array}{c} E_2 \frac{N_2}{\text{-----}} \\ E_1 \frac{N_1}{\text{-----}} \end{array}$$

$$\Rightarrow \frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{E_2-E_1}{kT}} = e^{-\frac{10.2}{0.026}} \approx \frac{1}{10^{171}} \ll 1$$

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

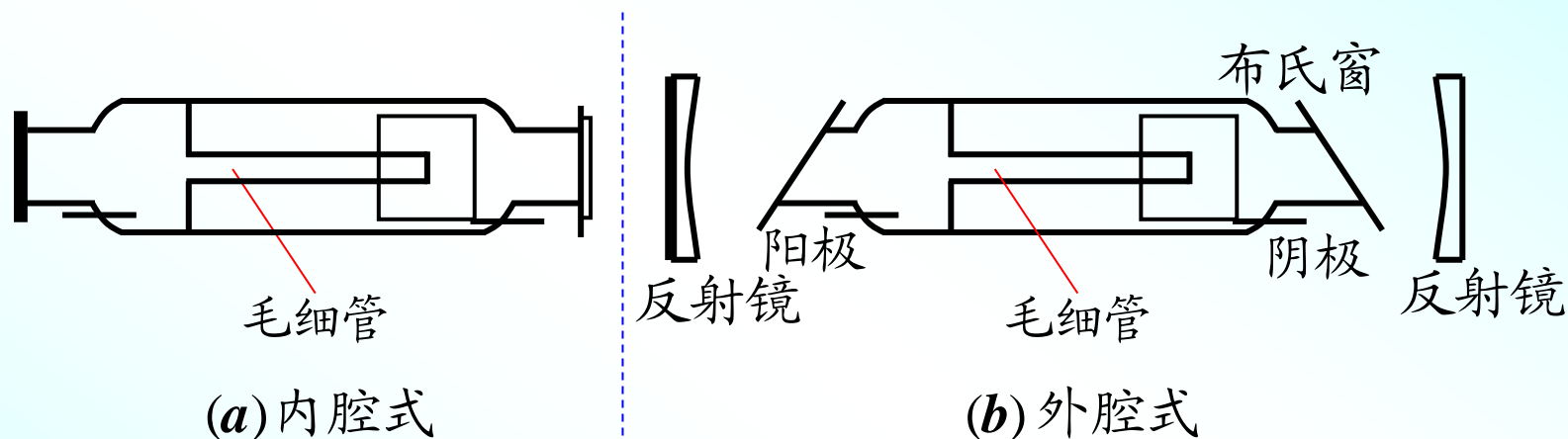
但要产生激光必须使 $N_2 \gg N_1$

这称为 **粒子数反转** (因为正常分布是 $N_2 \ll N_1$)

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。

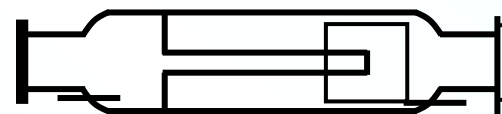
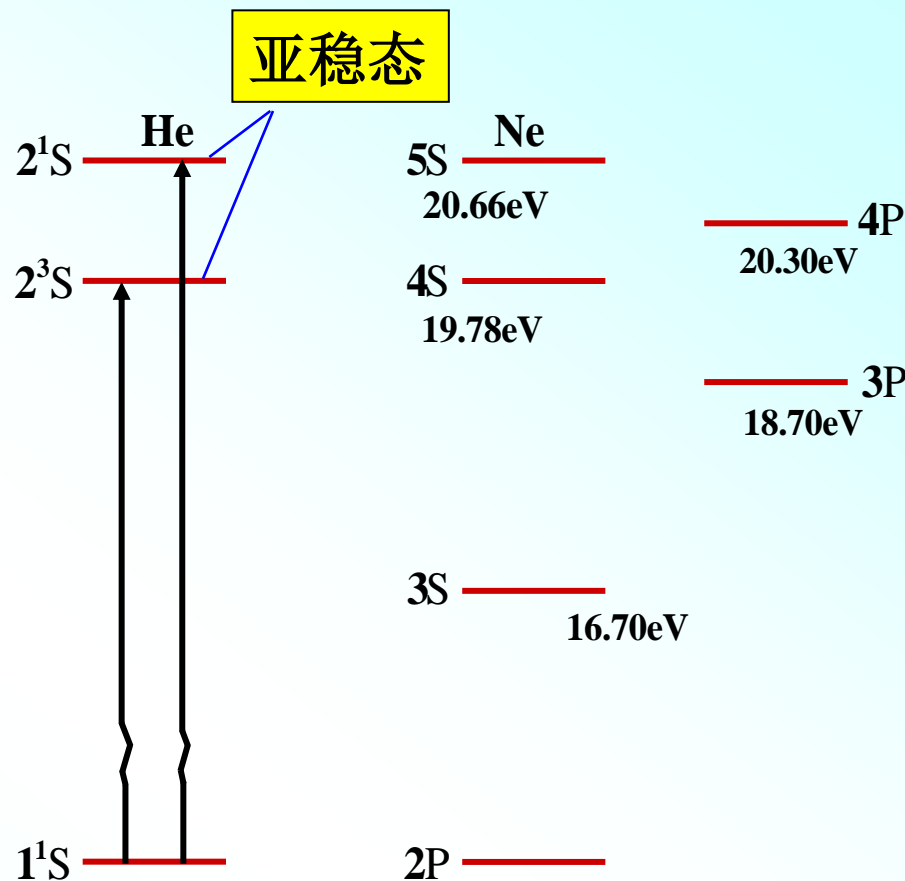
He原子和Ne原子的能级:

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。



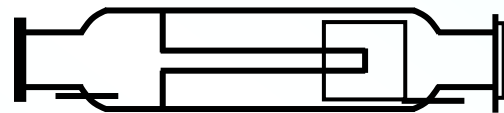
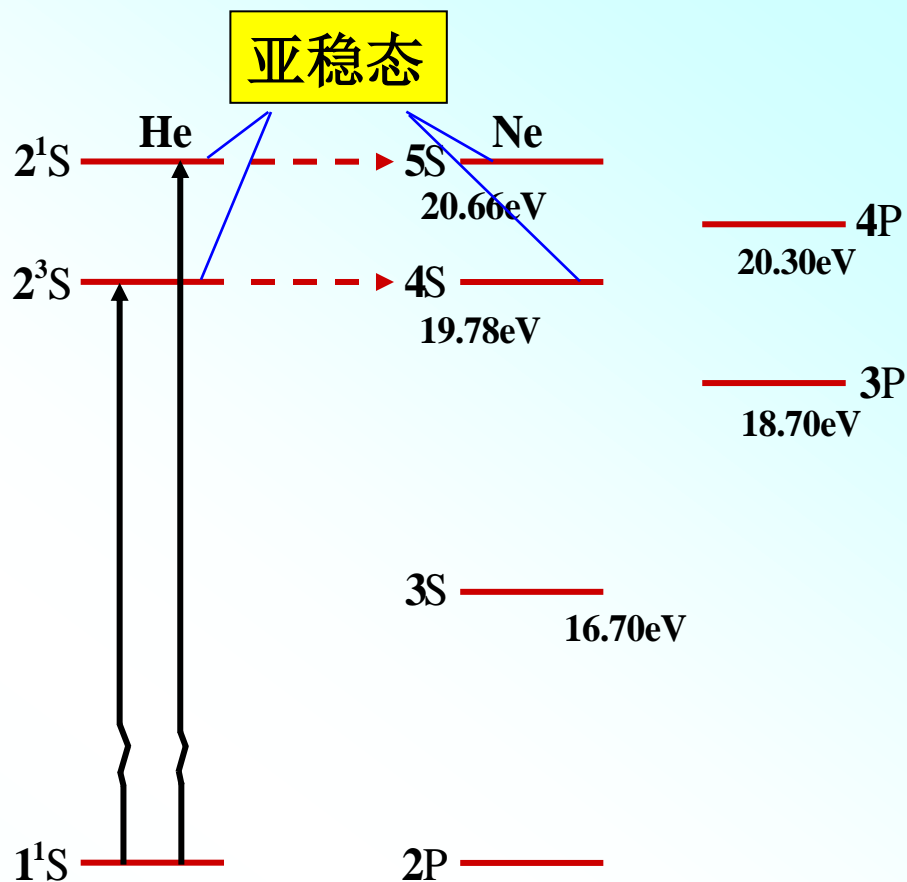
在He的两个亚稳态上集聚了较多的He原子。

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”。

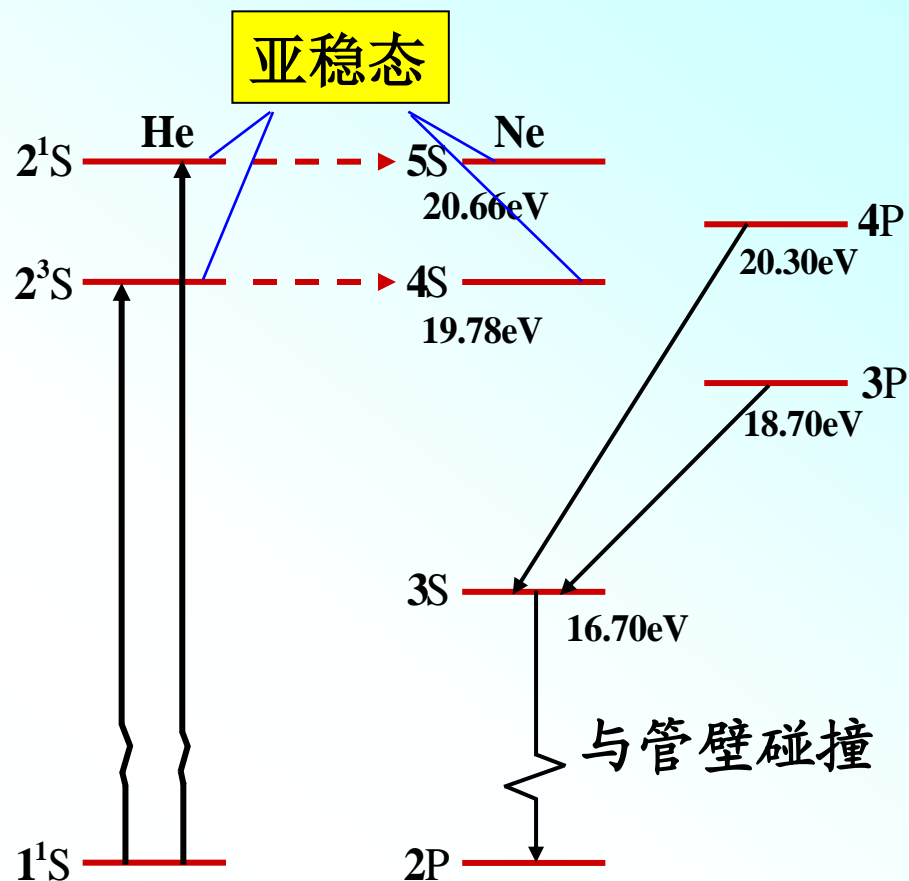
在碰撞中He原子把能量传递给Ne原子而回到基态，而Ne原子则被激发到5S 或4S；

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。

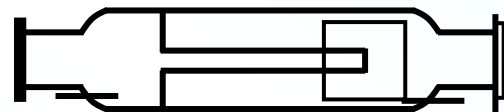


Ne的5S对4P、3P形成粒子数反转，4S对3P形成粒子数反转。

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。



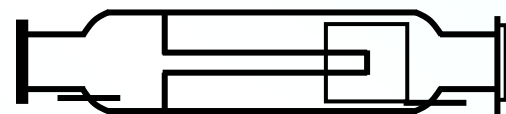
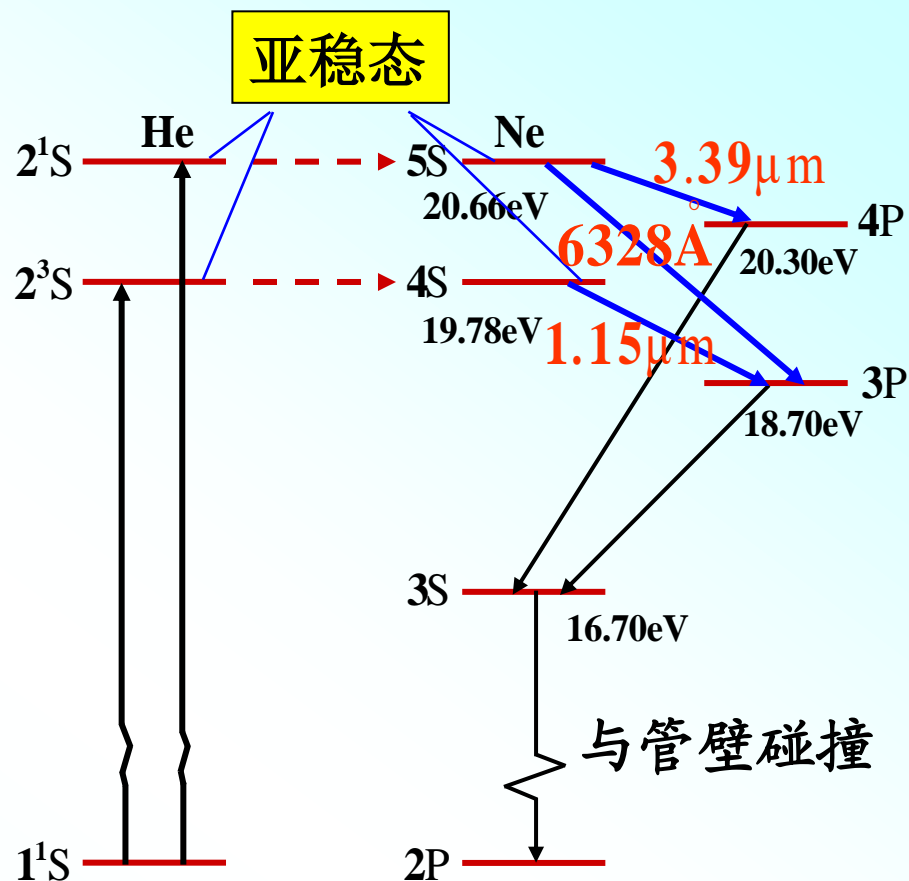
Ne的5S对4P、3P形成粒子数反转，4S对3P形成粒子数反转。

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 μm
1.15 μm
0.6328 μm

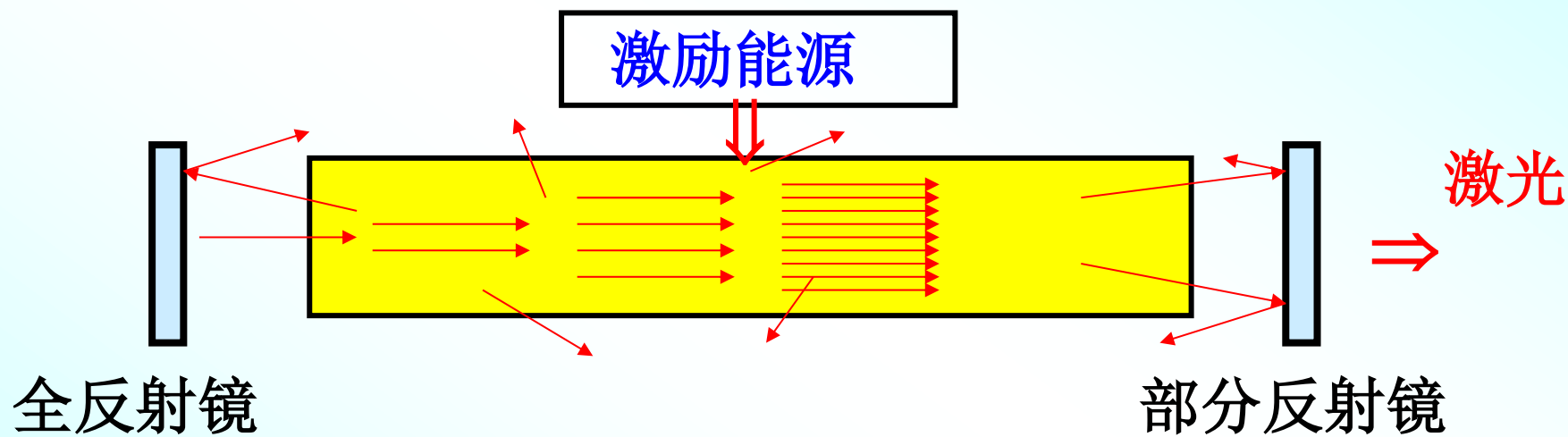
它们都是从亚稳态到非亚稳态、非基态之间发生的



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（选向）；
3. 增强光放大作用（放大）；

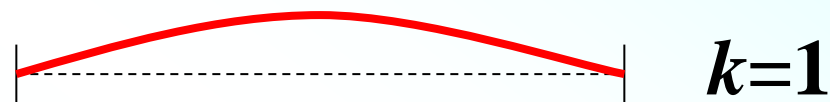
光学谐振腔两端的反射镜处必定是波节，

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

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



小结：产生激光的必要条件

1) 粒子数反转

为保证实现粒子数反转必须：

- 有激励能源（使原子激发）
- 有激活物质（有合适的能级结构）

2) 光学谐振腔（选频，选向，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. 每周二交上周的作业。迟交不改。
6. 作业缺交三分之一及以上者综合成绩按零分计。