

# 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

# 第16章 半导体与激光简介

## 第1节 半导体 Semiconductor

固体物理既是一门综合性的理论学科又和实际应用紧密结合（材料、激光、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

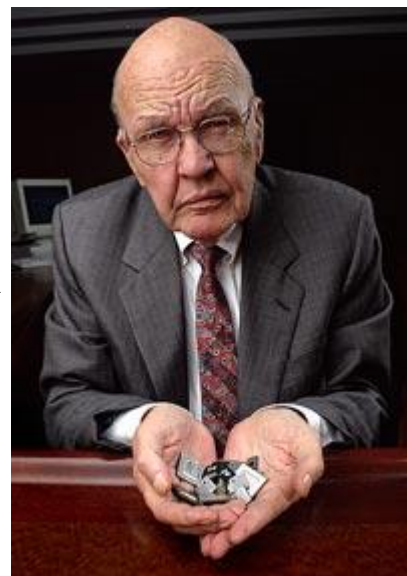
1982 80286 13.4万

1989 80486 120万

1993 pentium 320万

1995 pentium MMX 550万

1997 pentium2 750万



Jack Kilby

1923-2005

2000 Nobel Prize

# Moore's Law - 2005

Transistors  
Per Die



Source: Intel

集成度每 10 年增加 1000 倍 !

现在面积比邮票还小的芯片上可以集成一个系统( $10^9$ 个元件), 沟道长度只有**0.12微米**。

**集成度的每一步提高, 都和表面物理及光刻的研究分不开。**

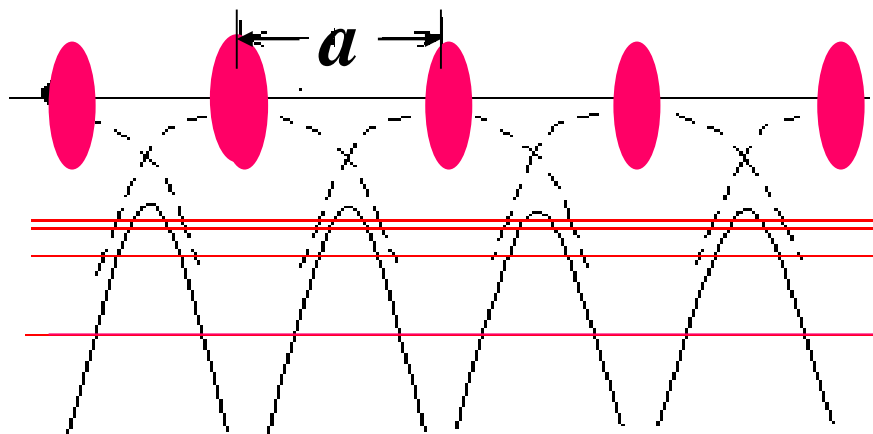
**没有晶体管和超大规模集成电路, 就没有计算机的普遍应用和今天的信息处理技术。**

## **一、固体的能带**

### **1.能带的形成**

固体是具有大量分子、原子或离子有规则排列的点阵结构。

在晶体中，电子受到周期性势场的作用。

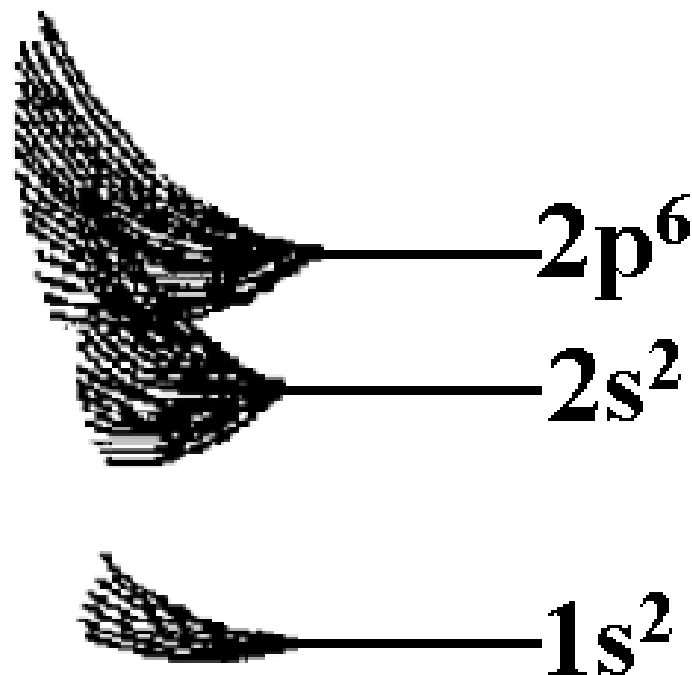
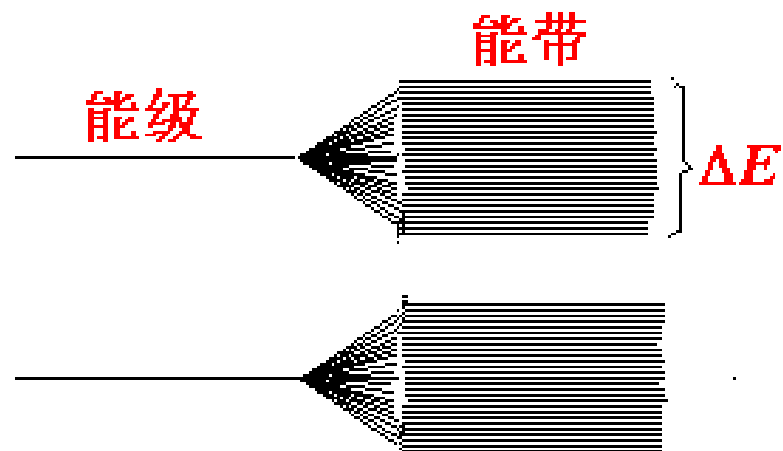


解定态薛定谔方程，可以得出两个重要结论：

1. 电子的能量是量子化的；
2. 电子的运动有隧道效应。

原子的外层电子(高能级)，势垒穿透概率较大，电子可以在整个固体中运动，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。

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 $N$ 条靠得很近的能级，称为**能带**。



1) 越是外层电子，能带越宽， $\Delta E$ 越大。

2) 点阵间距越小，能带越宽， $\Delta E$ 越大。

3) 两个能带有可能重叠。

## 2. 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能级上。

排布原则： $\left\{ \begin{array}{l} \text{服从泡利不相容原理} \\ \text{服从能量最小原理} \end{array} \right.$

有关能带被占据情况：

1) **满带**（内层能级分裂）：能带排满电子——**不导电**

2) **价带**（外层能级分裂）：

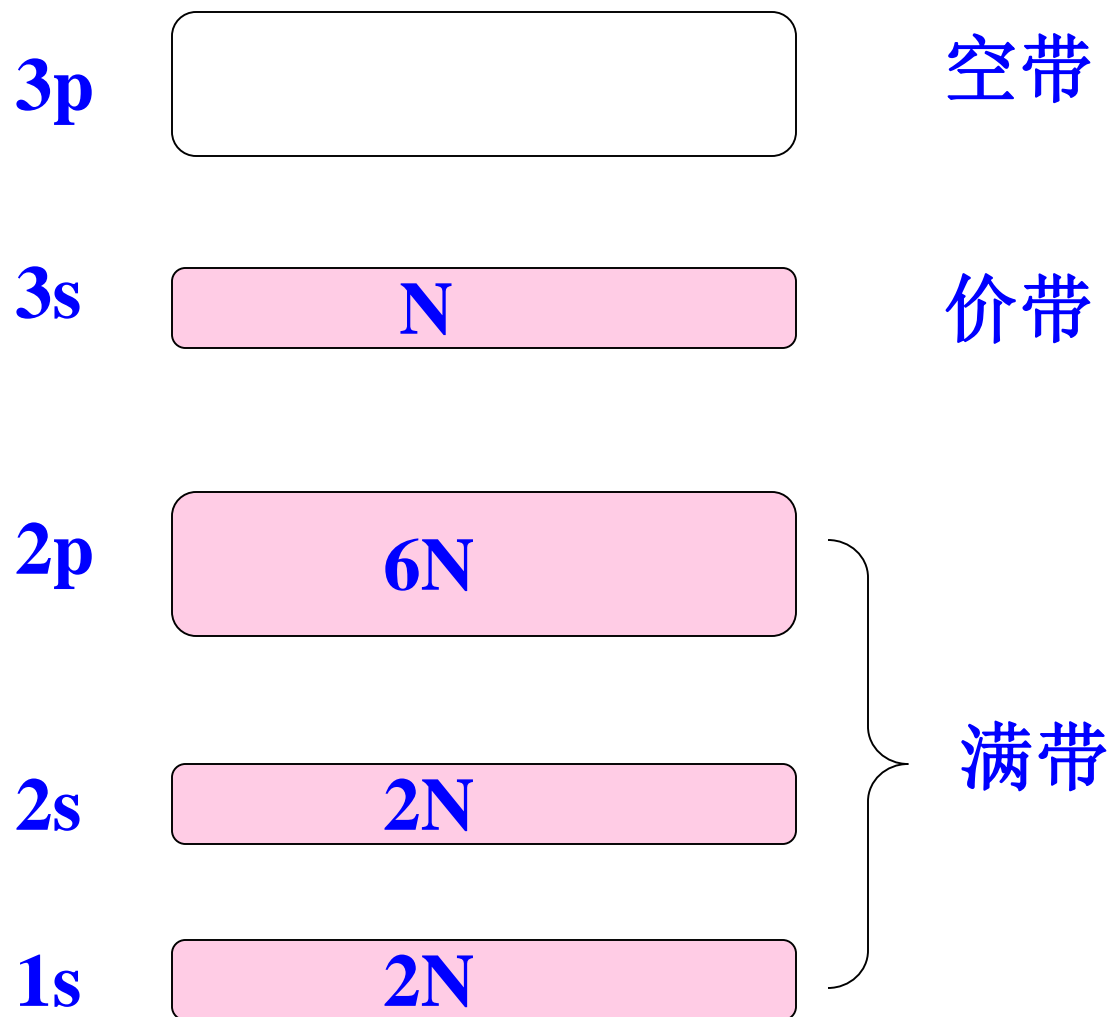
能带中一部分能级排满电子——能导电

3) **空带**（外层能级分裂）：

能带未排电子——能导电

**导带**

4) **禁带**：相邻能带间不存在能级的区域（不能排电子）



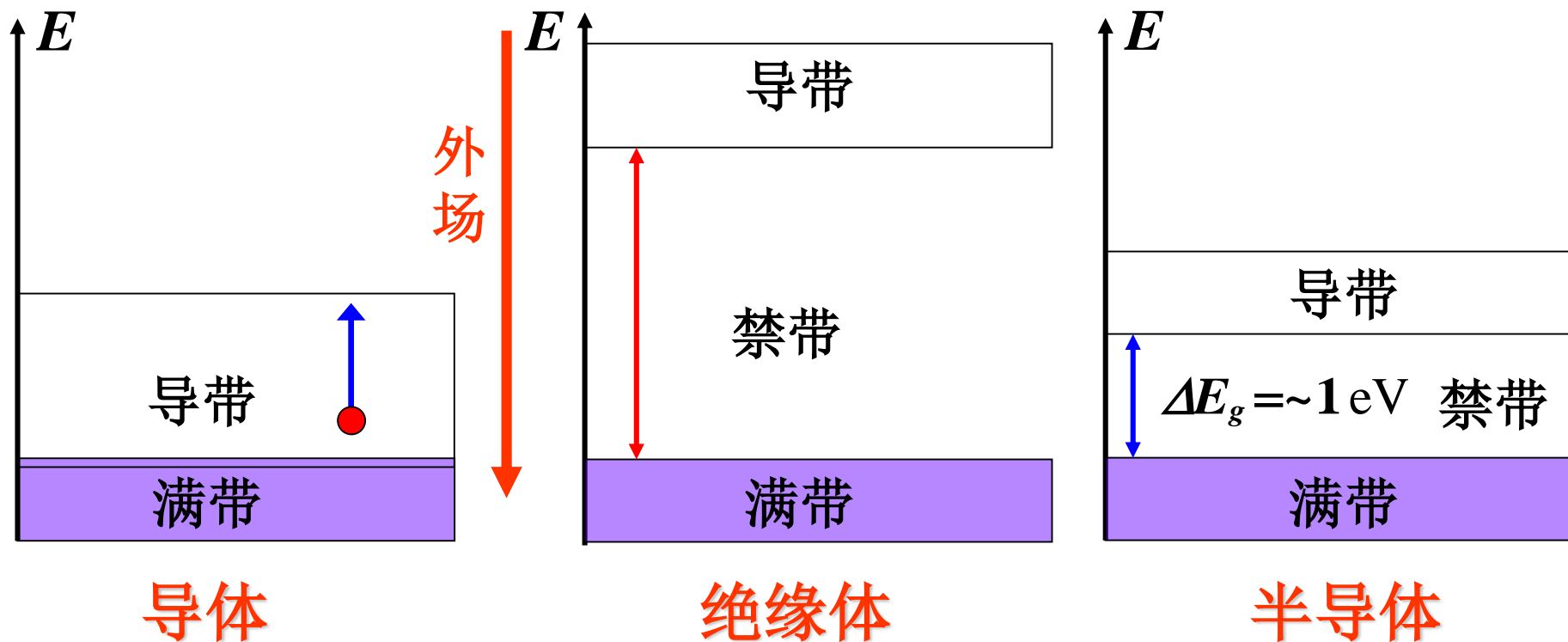
电子在满带中运动时不形成电流，只有当电子向更高能带跃迁时才形成电流。

金属钠的各能带上电子的分布



## 二、导体、绝缘体、半导体的能带结构

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。

### 三、半导体的分类

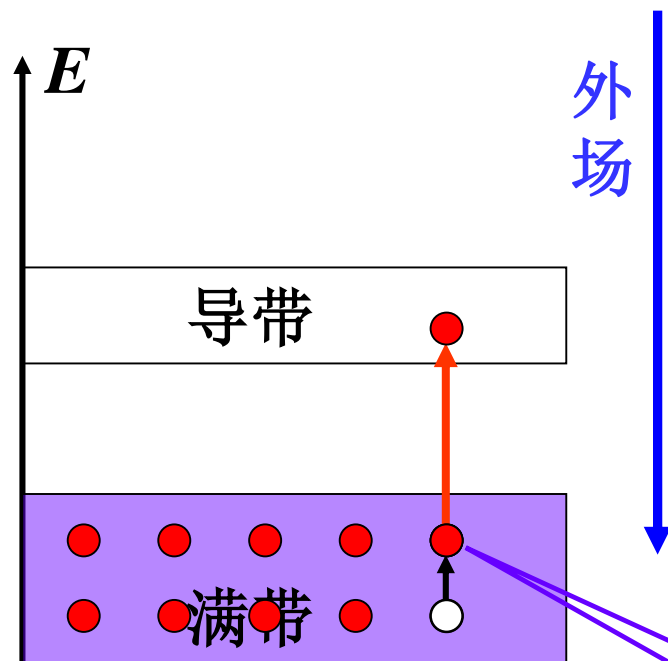
#### 1. 本征半导体（纯净的半导体，如硅、锗等）

满带中的能级全部被电子填满，导带中几乎没有电子。

**空穴：**满带上的一个电子跃迁到空带后，满带中出现一个空位。

**电子导电：**半导体的载流子是电子(带负电)

**空穴导电：**半导体的载流子是空穴(带正电)



**空穴**

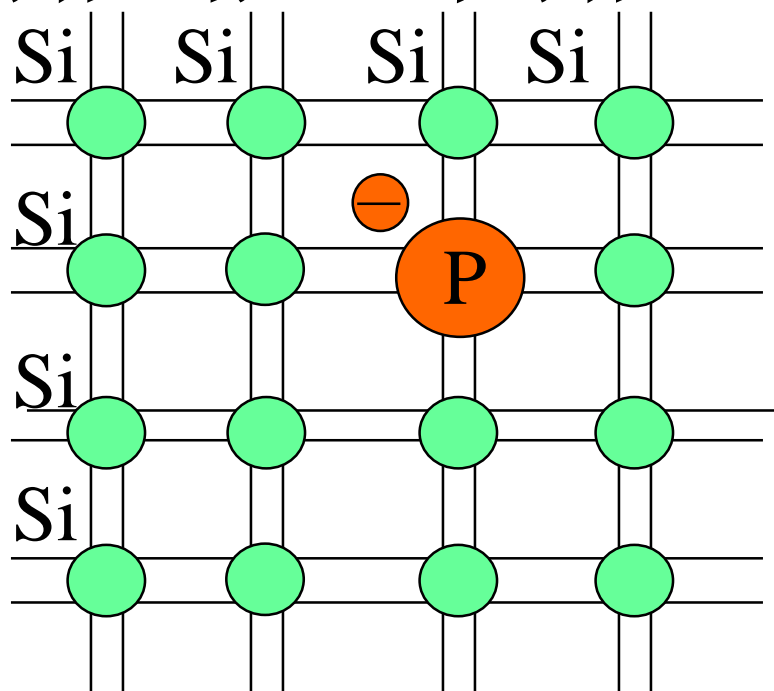
相当于产生了一个带正电的粒子

电子和空穴总是成对出现的。

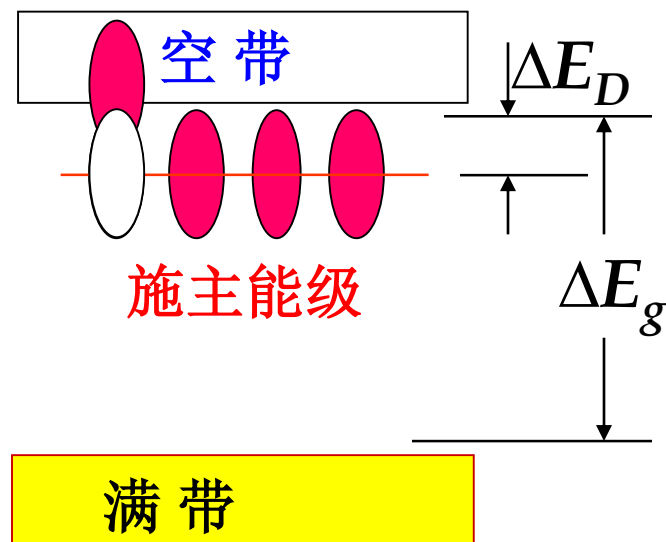
## 2. 杂质半导体

### 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。

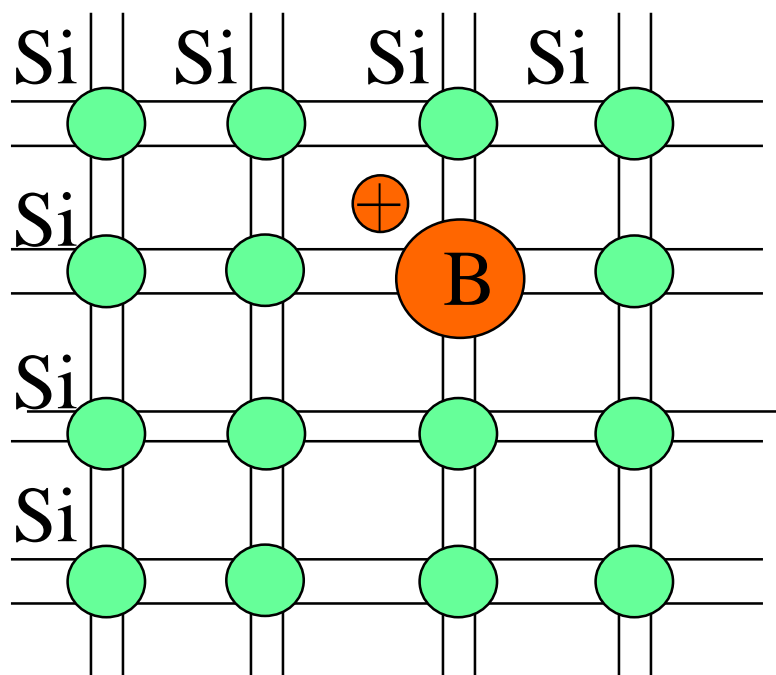


在 $n$ 型半导体中  
电子.....多数载流子  
空穴.....少数载流子

杂质能级不断地为导带提供导电电子。

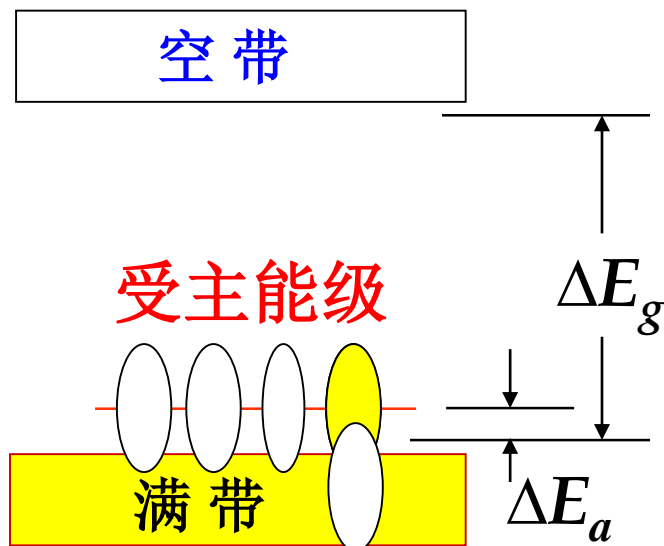
## 2) $p$ 型半导体

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。



杂质能级不断地收留满带中的电子，使满带中的空穴大大增加。

量子力学指出，这种掺杂后多余的电子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

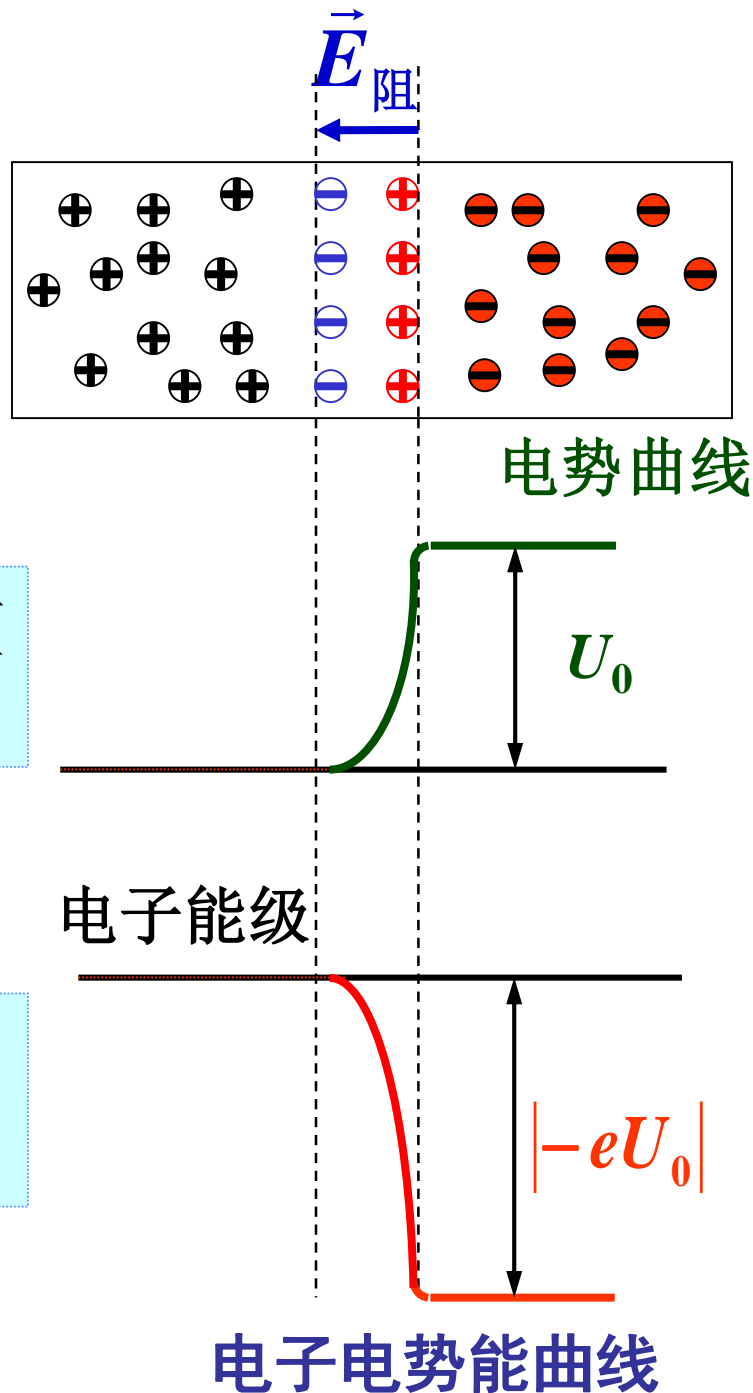
电子.....少数载流子

# P-N结

P-N结处存在电势差 $U_0$

它阻止 **P**区带正电的空穴进一步向**N**区扩散；

也阻止**N**区带负电的电子进一步向**P**区扩散。



**用途：** **P-N**结的单向导电性  
正向连接时

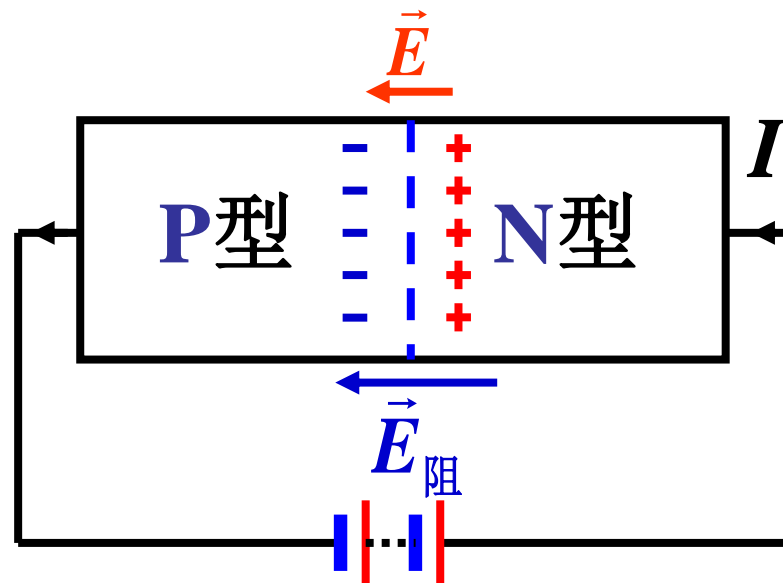
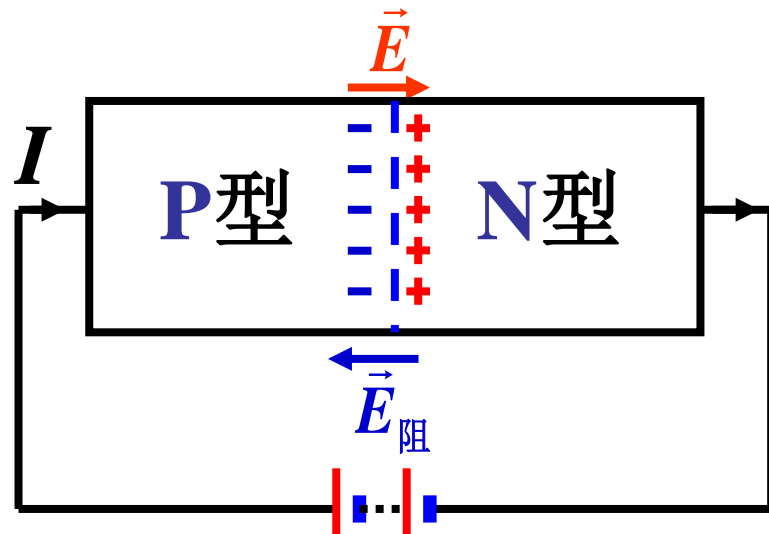
阻挡层势垒被削弱，变窄，**P**中的空穴，**N**中的电子都易于通过**P-N**结，形成**P→N**的正向宏观电流。

反向连接时

阻挡层势垒增大，变宽，**P**中的空穴和**N**中的电子都难以通过**P-N**结。

没有正向电流。

是制造二极管整流器和集成电路的好材料。



## 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）

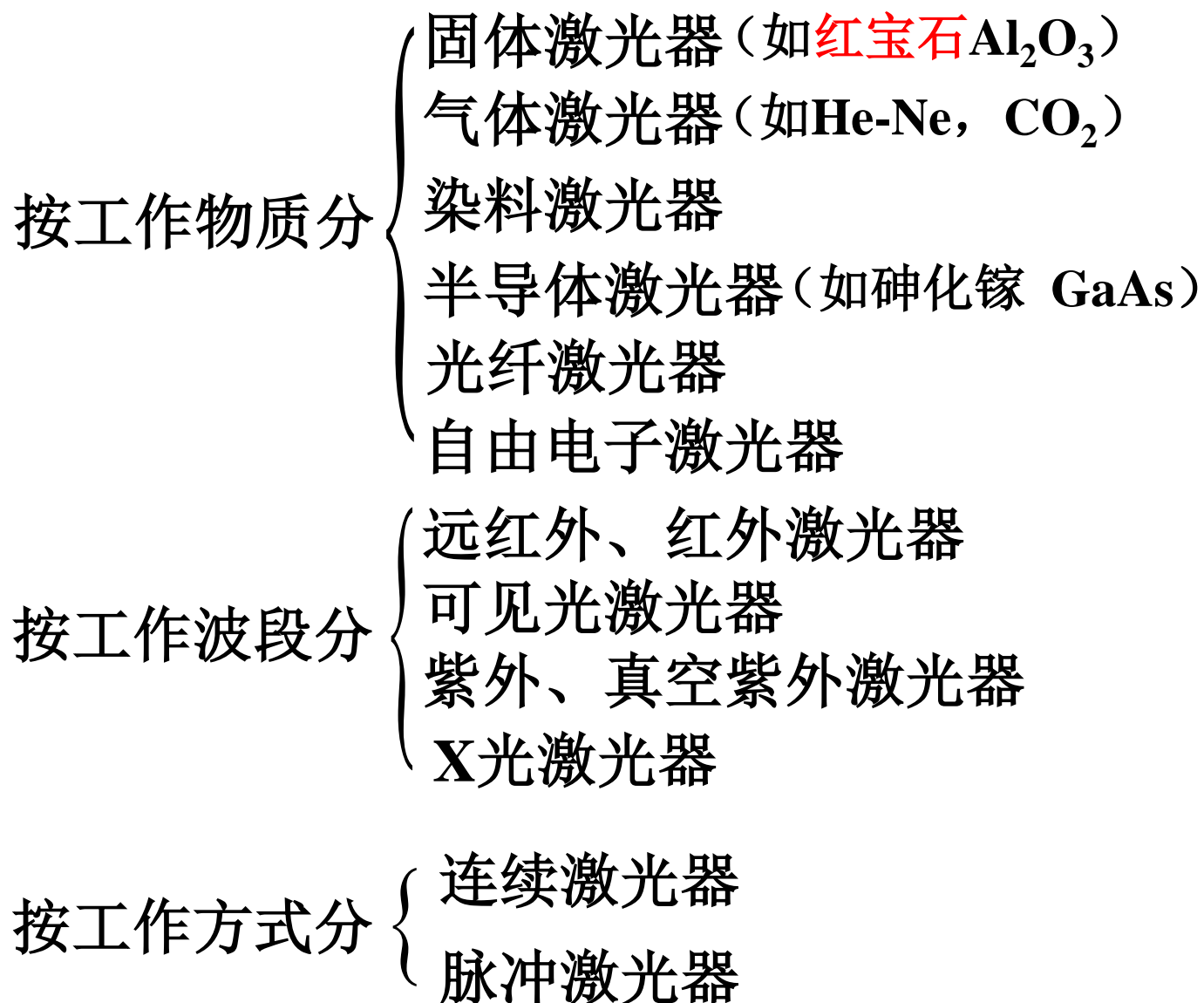
世界上第一台激光器诞生于1960年。

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

# 激光的种类:





# 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

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

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

普通光源：  $0.1 \sim 10 \text{ cm}$ ； 氦氖激光器： 180 公里

## 3. 亮度和强度极高

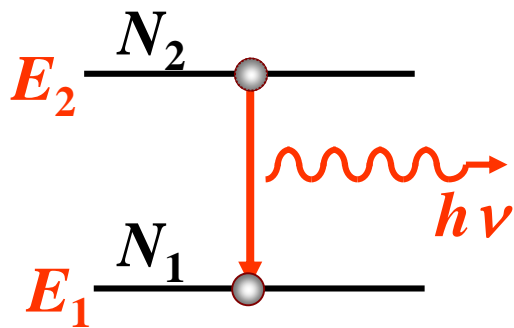
## 二、激光的发光原理

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

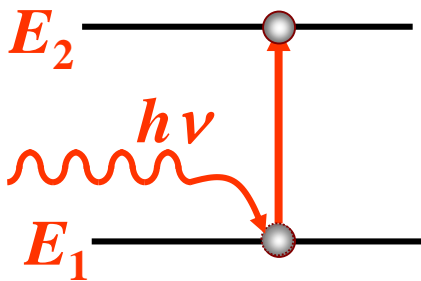
$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$$



普通光源的发光机理。  
各原子自发辐射的光  
是独立的**非相干光**。

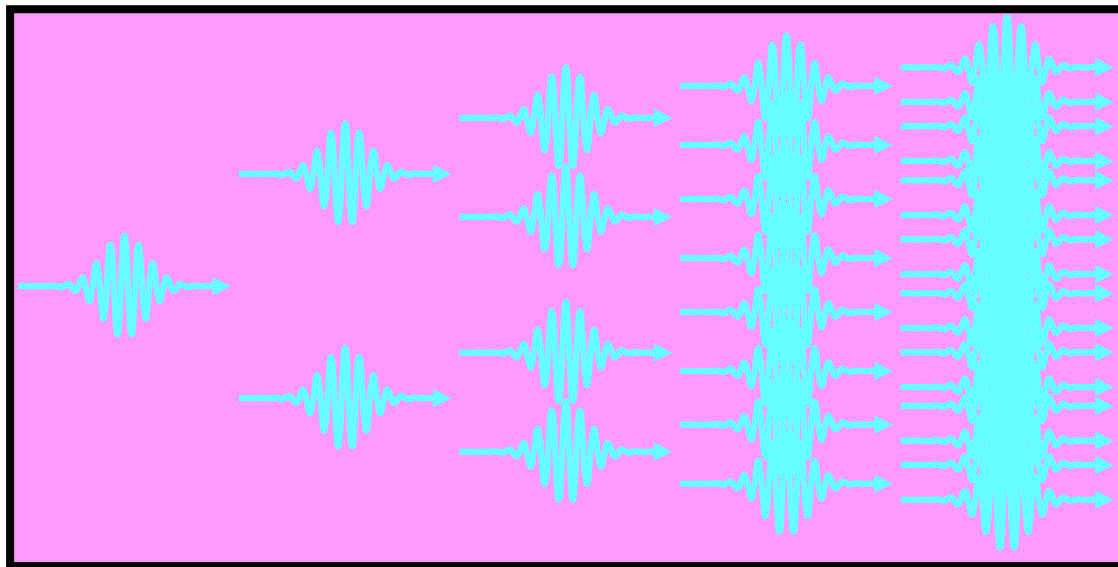
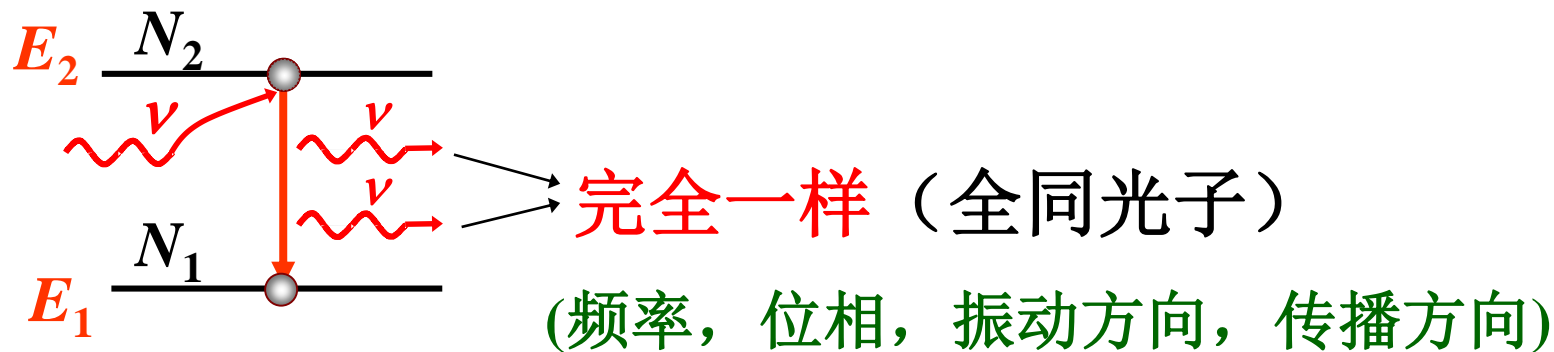
### 2. 受激吸收

外来光子被  
吸收，使原  
子从 $E_1 \rightarrow E_2$ 。



结果使光子  
数越来越少

### 3. 受激辐射 (爱因斯坦1916)

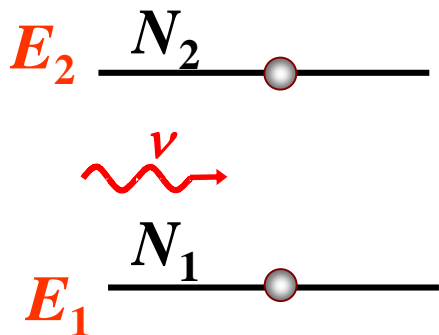


光放大

由受激辐射得到的放大的光是相干光——激光。

### 三、激光原理

外来光子  $h\nu = E_2 - E_1$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{受激辐射} \\ \text{受激吸收} \end{array} \right.$



#### 1. 粒子数反转

粒子数的正常分布:

原子数目按能级的分布服从玻尔兹曼统计分布率

$$N_n = A e^{-\frac{E_n}{kT}} \quad (E \uparrow, N \downarrow)$$

若  $E_2 > E_1$ :  $\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}} \ll 1$

通常光源中低能级上的原子数比高能级上的原子数多得多。

光吸收过程较光受激辐射过程占优势!

为了产生激光，必须设法使两个能级上的原子数目的关系倒过来： $N_{E_2} \gg N_{E_1}$  ——粒子数反转

实现“粒子数反转”是获得激光的必要条件。

## 2. 实现粒子数反转的条件：

1) 有激励能源（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) 工作物质（激活物质）

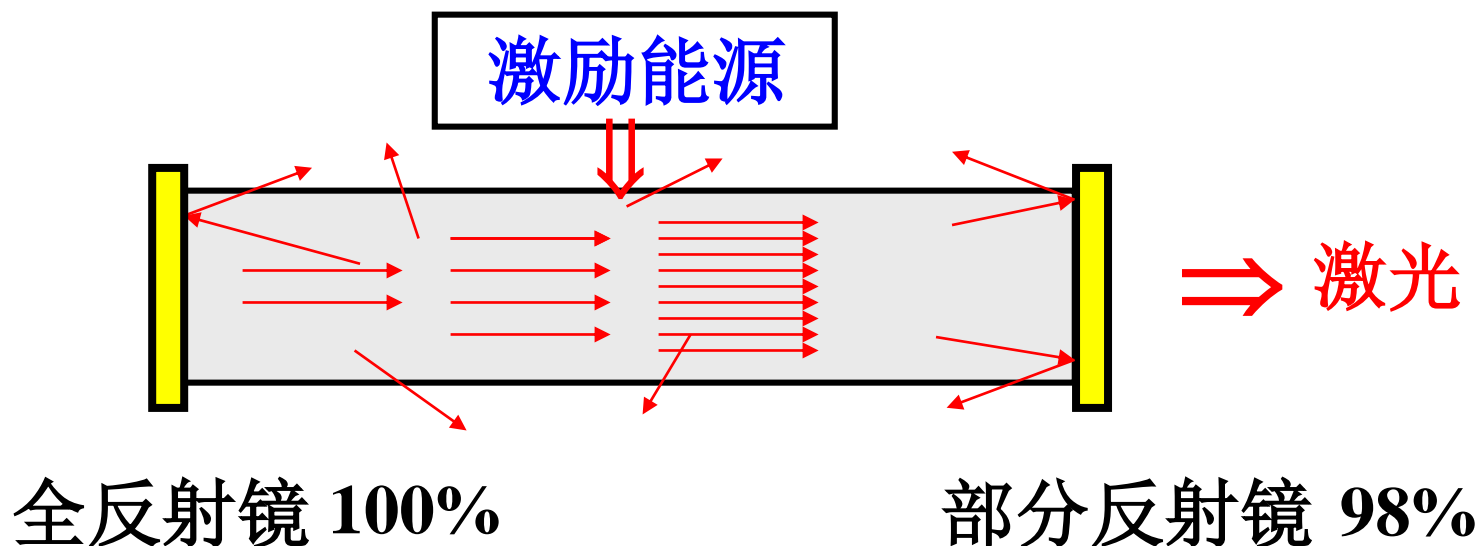
氦、氖、氩以及锰等几种元素的原子存在某些特殊的激发态——原子如果被激发到这些态上停留的时间长一些 $10^{-3}$ s（提高5-6个数量级）

利用具有亚稳态的元素做工作物质。

### 3. 光学谐振腔、激光的形成

工作物质激活后，能产生光放大，虽可得到激光，但这时的激光寿命短，强度弱，没有实用价值。

必须加上一个光学谐振腔：



## 光学谐振腔的作用：

1. 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。

2. 增强**光放大**作用（**延长了工作物质**）；

形成光振荡，从而获得很强的光。

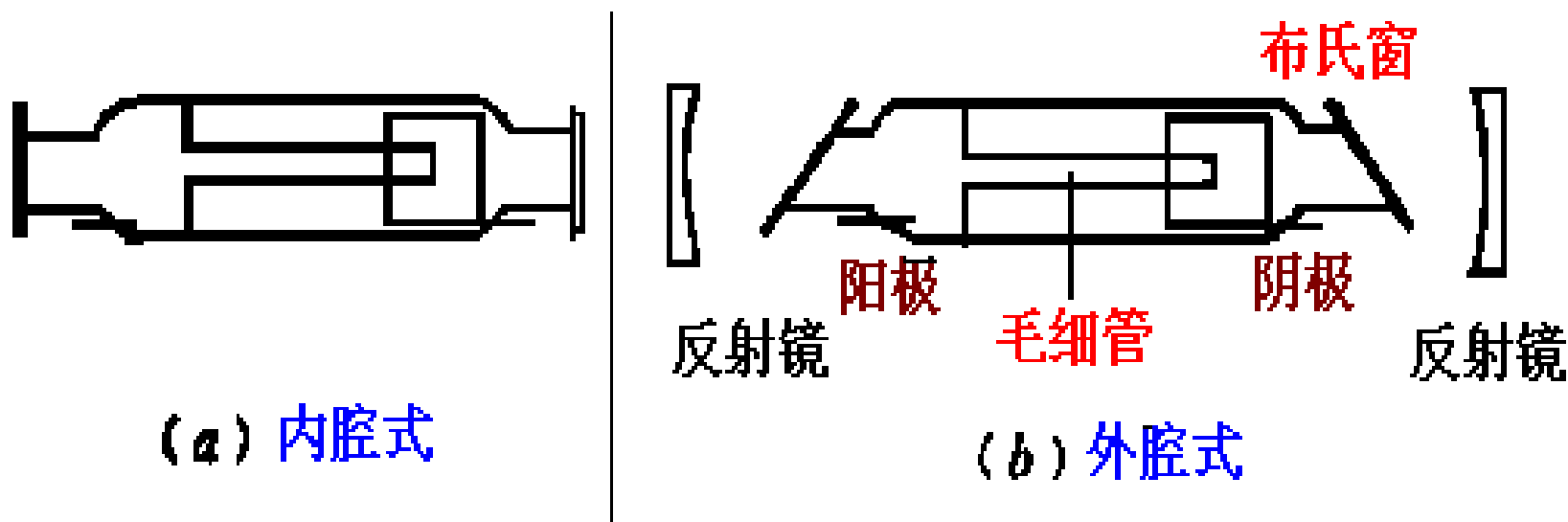
当光的放大作用与光的损耗达到动态平衡时，就形成稳定的光振荡——输出**激光**。

3. 使激光具有极好的**单色性**（选频）。

光在谐振腔内传播时形成以反射镜为节点的驻波，满足：

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

## 四、He—Ne 气体激光器



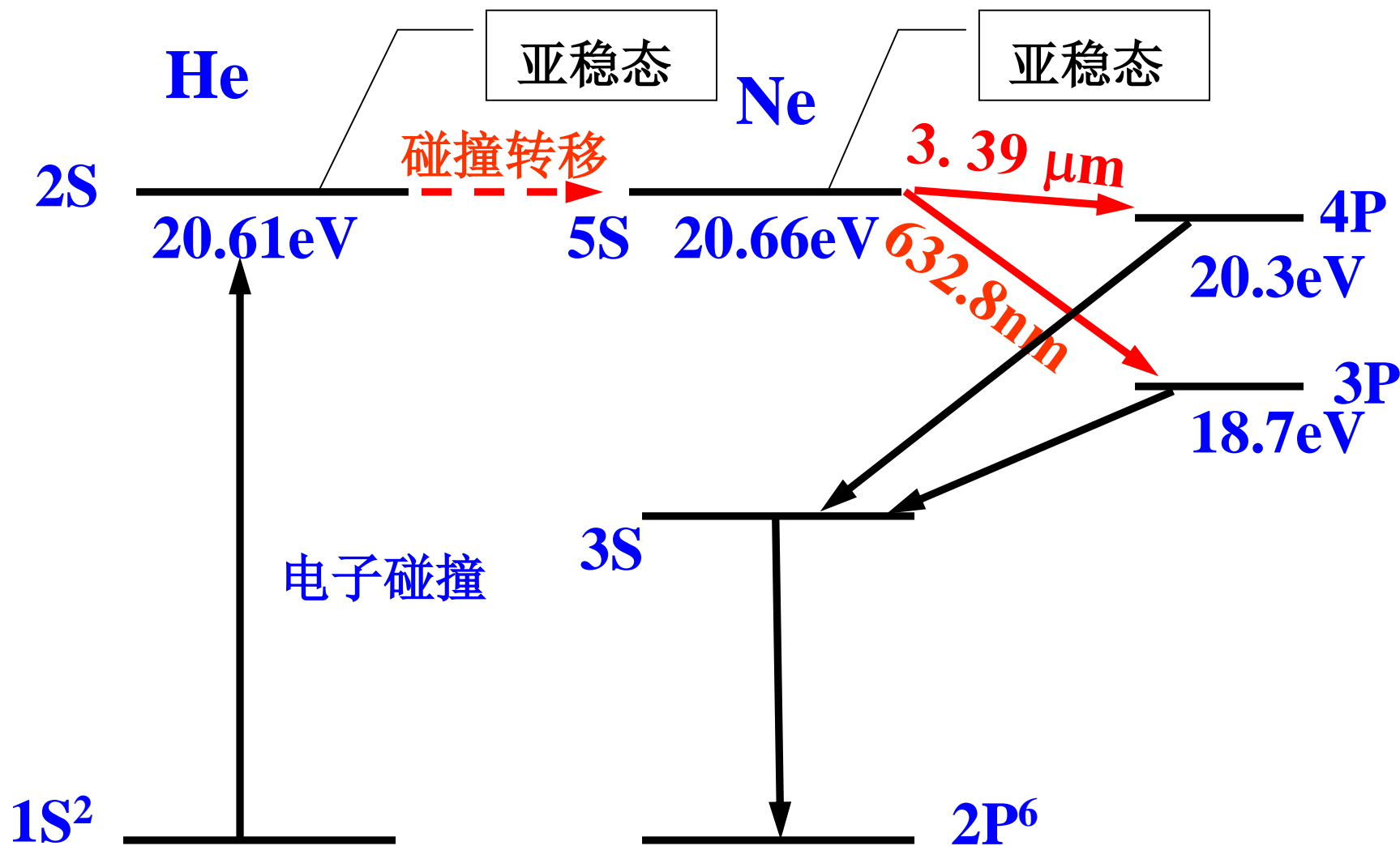
He -Ne 激光器中 **He** 是辅助物质，**Ne** 是激活物质，  
He 与 Ne 之比为 5 : 1 ~ 10 : 1。

激励方式为 **气体放电**（在两极间加几千伏电压）。

**He** 原子有两个电子，基态电子组态为  **$1S^2$** ；

**Ne** 原子有 10 个电子，基态电子组态为  **$1S^2 2S^2 2P^6$** ；





Ne原子可以产生多条激光谱线，图中标明了最强的两条：

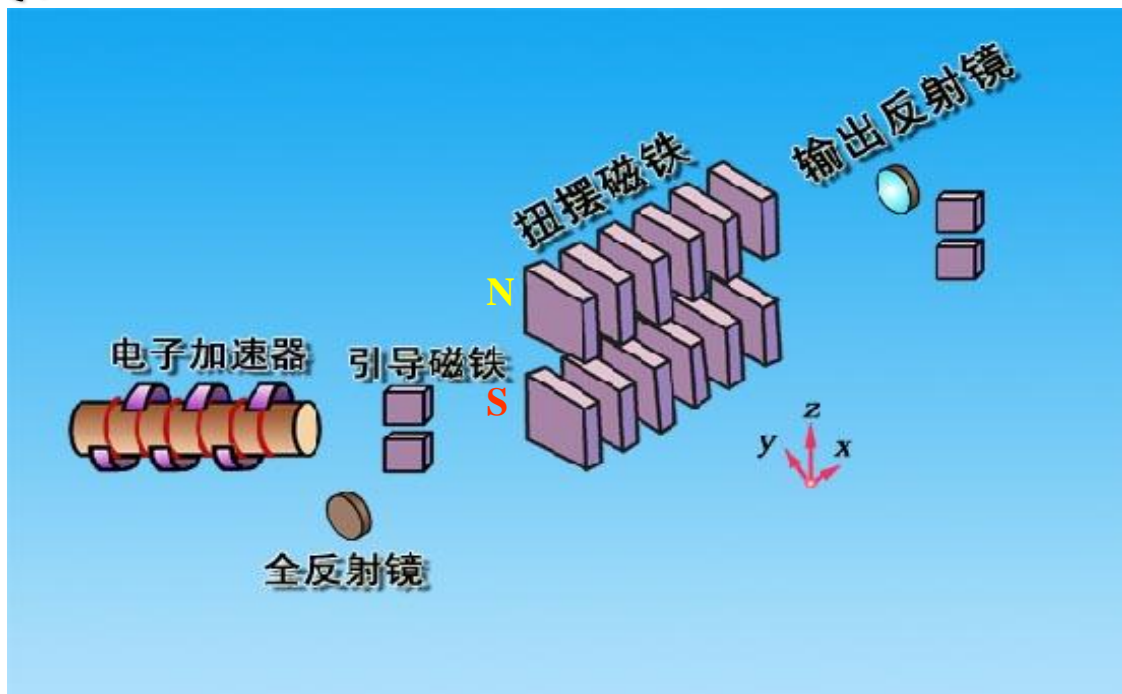
- 1、为什么不直接用He？ 不能得到可见光。
- 2、为什么不直接用Ne？ 不易使亚稳态粒子数反转。

## 五、自由电子激光器：

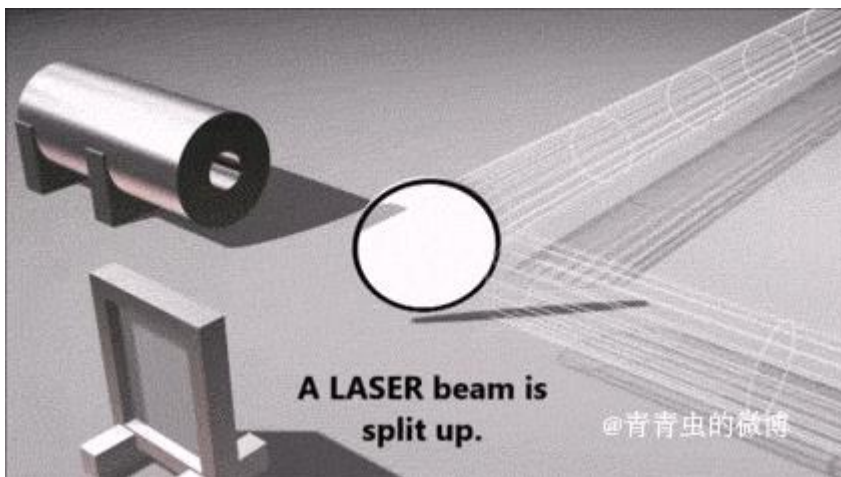
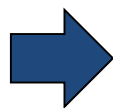
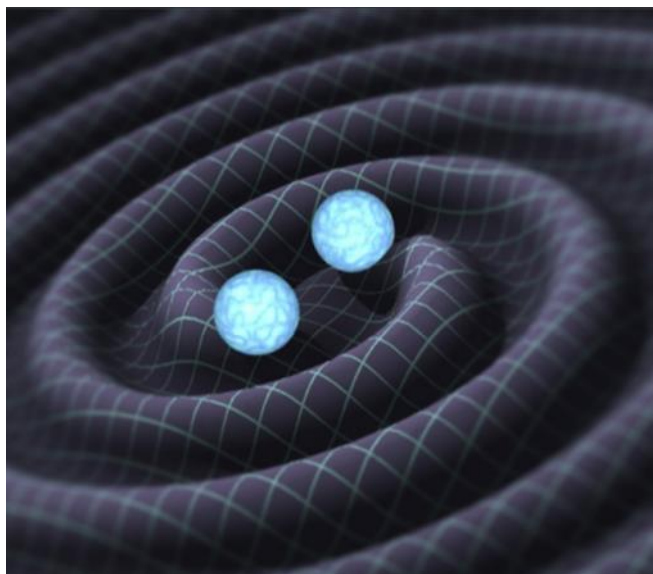
工作物质是自由电子，利用自由电子与电磁波相互作用产生相干辐射。

激光器由三部分组成：

- 电子加速器
- 扭摆磁场  
N、S交替排列
- 光学谐振腔



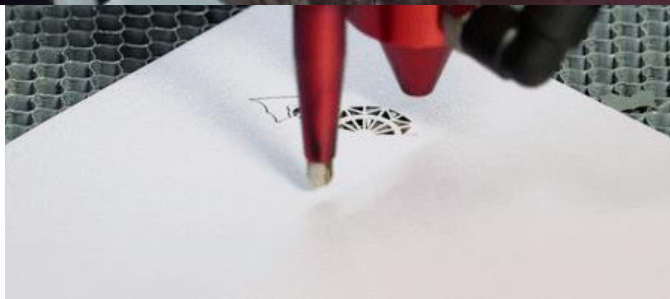
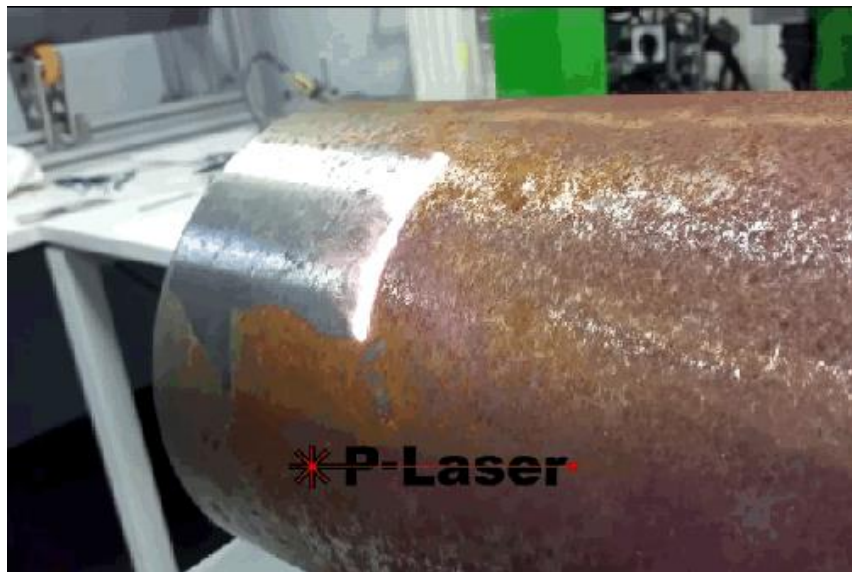
# 激光的应用



引力波探测-LIGO

2017年诺贝尔物理学奖

# 激光的应用



激光加工  
(打孔、焊接等)



激光通信  
(光纤到户)