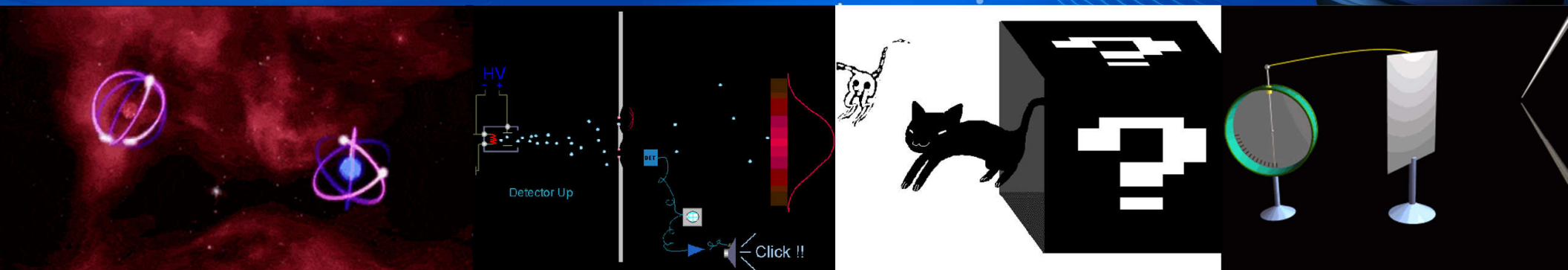


大学物理

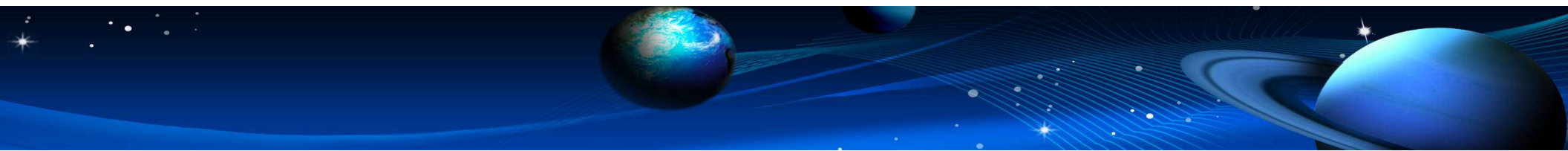


第六篇 量子物理

第16章 半导体与激光简介

尹 航

华中科技大学 物理学院



半导体

了解半导体及固体能带结构



激光

了解激光的特性、产生的机理及其应用

半导体

□ 半导体的发展

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...）

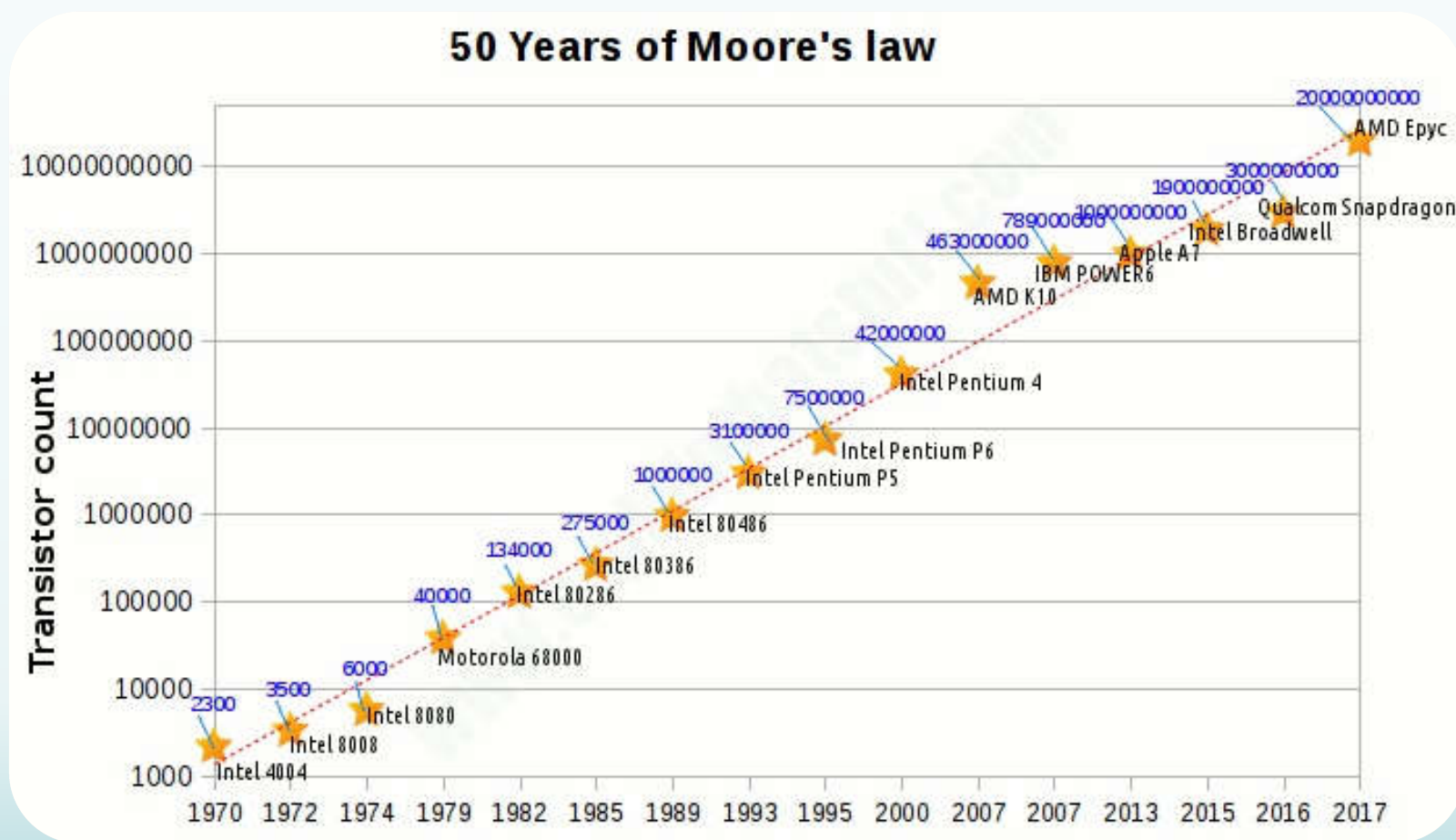
1928-29 建立能带理论并由实验证实

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
1997	pentium2		750万

半导体

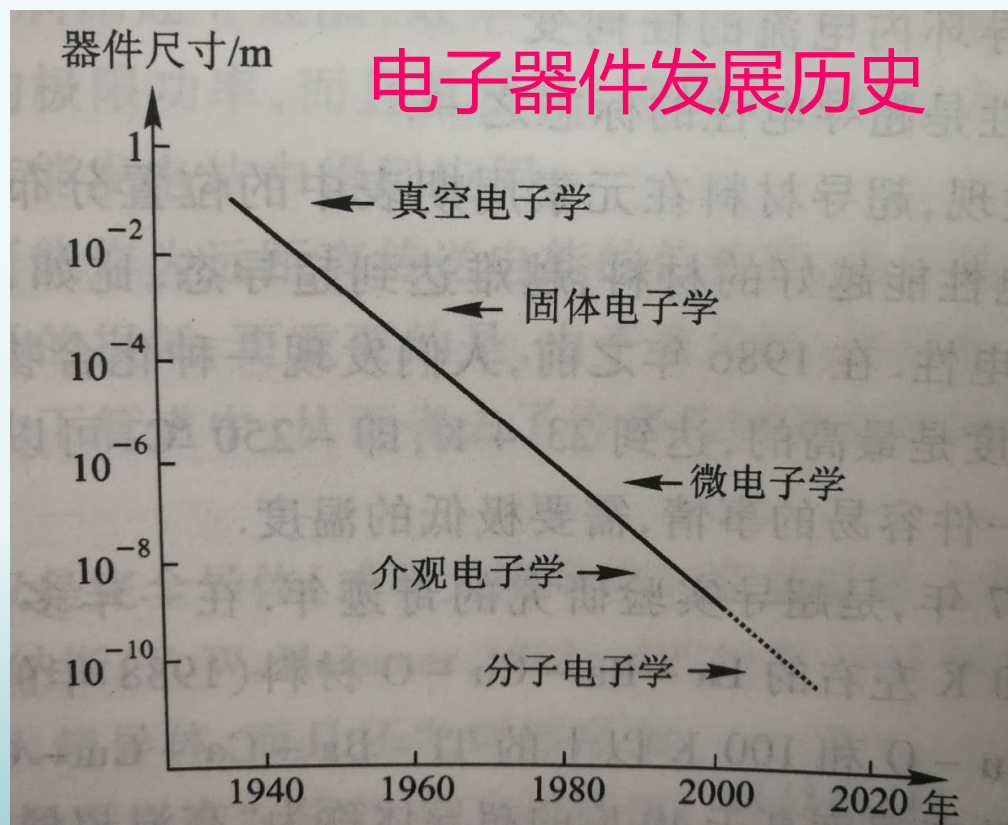


集成度每10年增加 1000 倍！

半导体

元器件集成度越高 → 量子尺寸效应开始出现

集成度的每一步提高，都和表面物理及光刻的研究分不开。



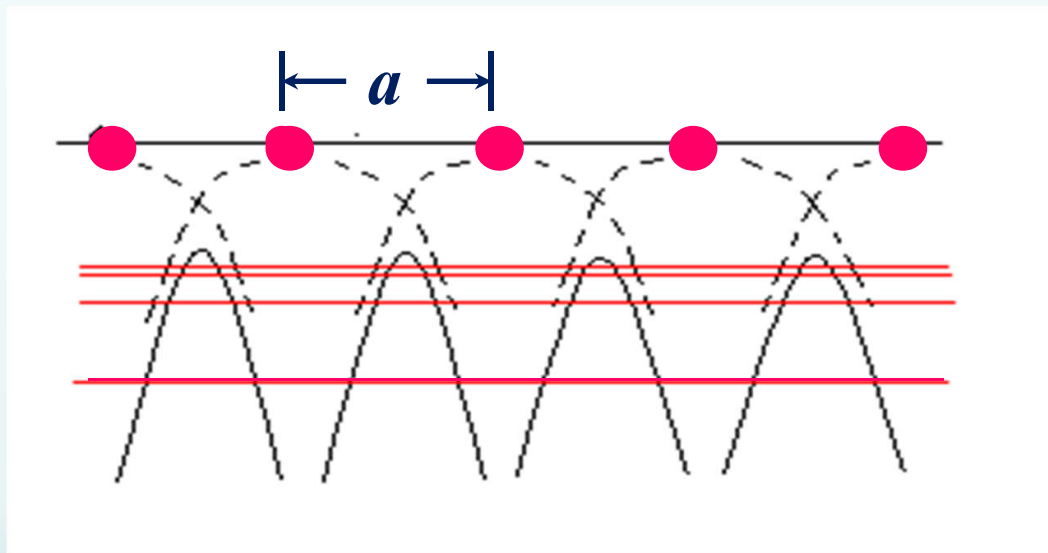
没有晶体管和超大规模集成电路，就没有计算机的普遍应用和今天的信息处理技术。

半导体

□ 固体的能带

• 能带的形成

晶体是具有大量分子、原子或离子有规则排列的点阵结构。

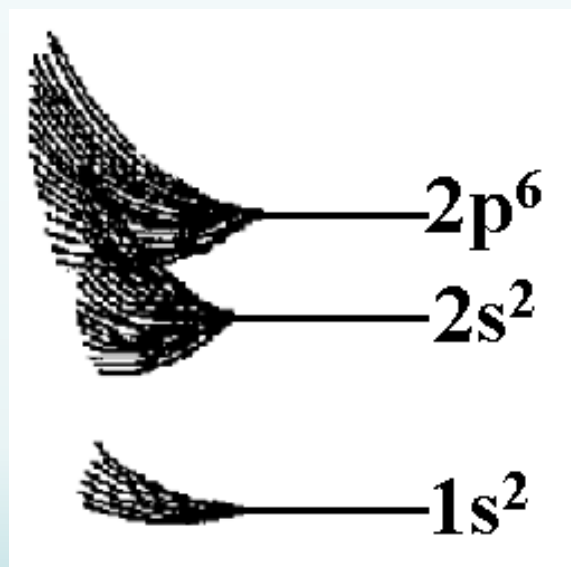
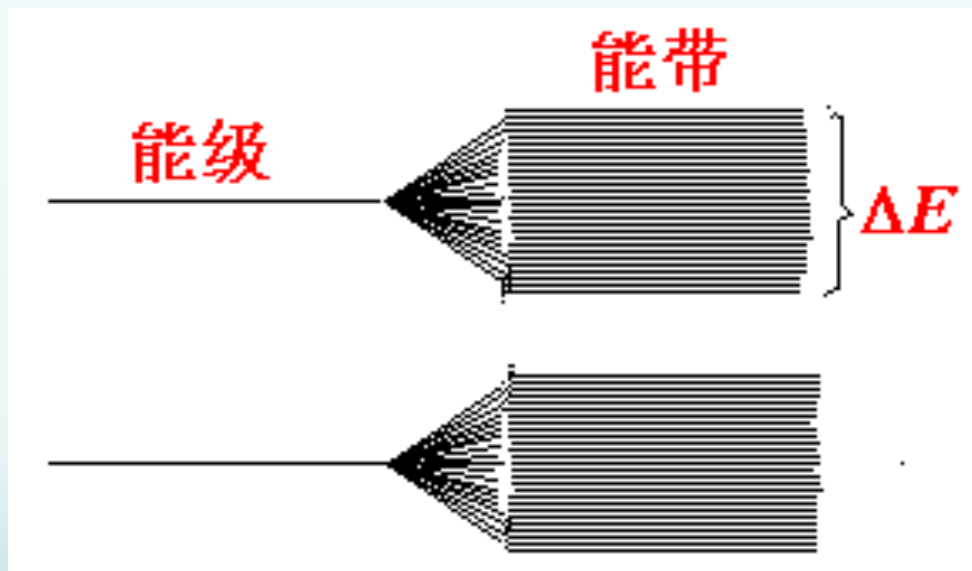


对孤立原子，其电子的能量是量子化的。

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。

半导体

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。



能带重叠

- ① 越是外层电子，能带越宽， ΔE 越大。
- ② 两个能带有可能重叠。

半导体

• 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 { 泡利不相容原理
服从能量最小原理

能带的分类和电子排布情况

- 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) : 能带中只有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

半导体

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。

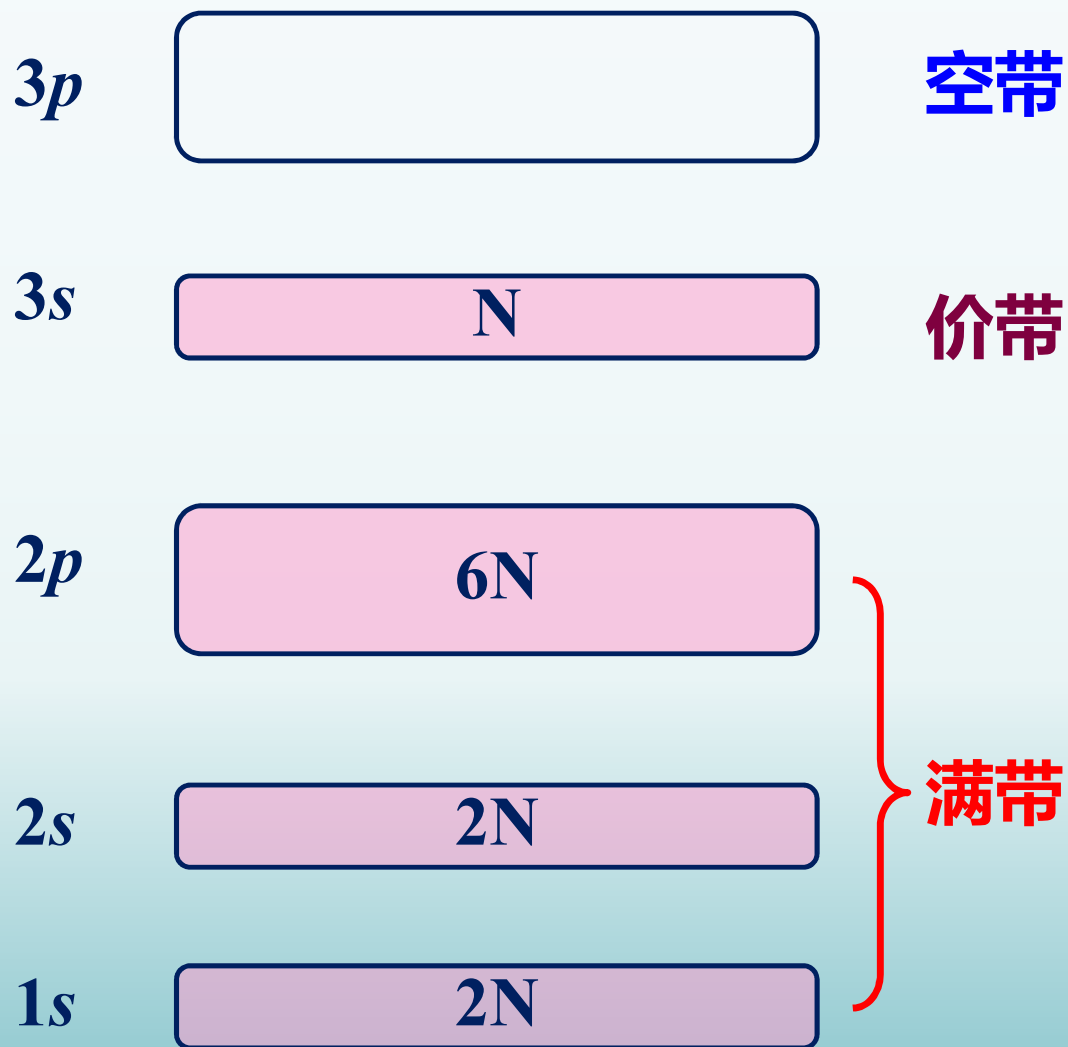
能带的分类和电子排布情况

- 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) : 能带中只有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
- ④ **禁带** : 相邻能带间不存在能级的区域 (不能排电子)
——不导电

导带

半导体

金属钠的各能带上电子的分布

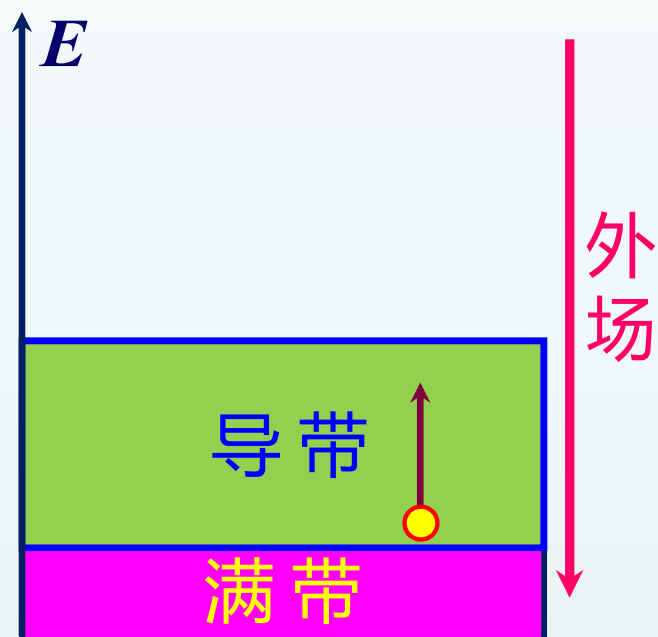


电子在满带中运动时不形成电流，只有当电子向更高能带跃迁后才形成电流。

半导体

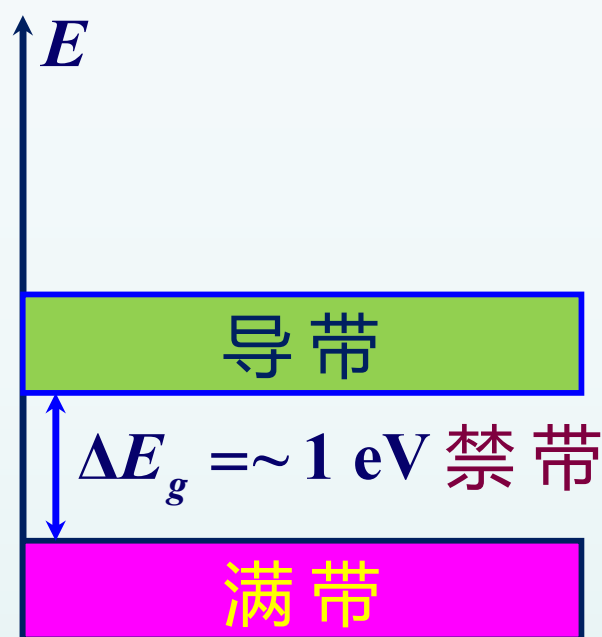
□ 导体、绝缘体、半导体的能带结构

导电性能不同 → 原因：能带结构不同



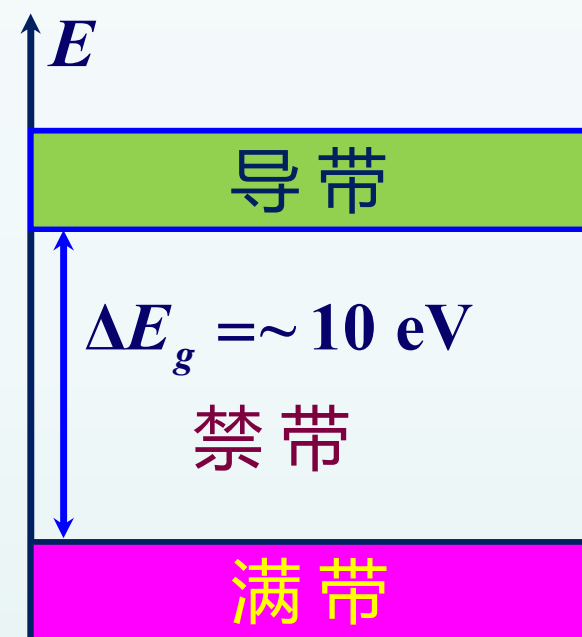
导体

没有禁带，故显示出很强的导电性。



半导体

禁带较窄，满带中的电子较易进入导带，形成电流。



绝缘体

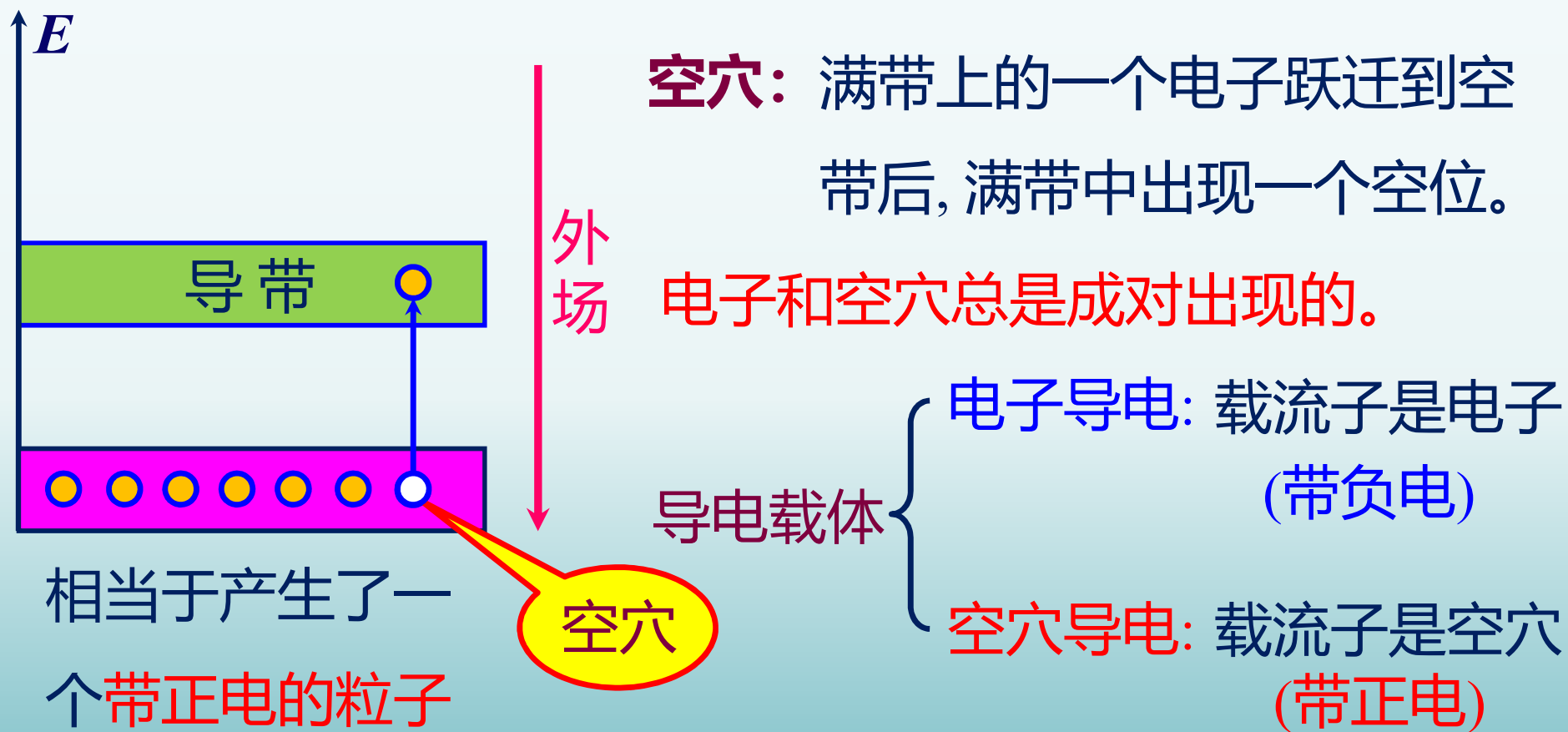
禁带很宽，满带中的电子很难进入导带，形不成电流，导电性很差。

半导体

□ 半导体的分类

- **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。

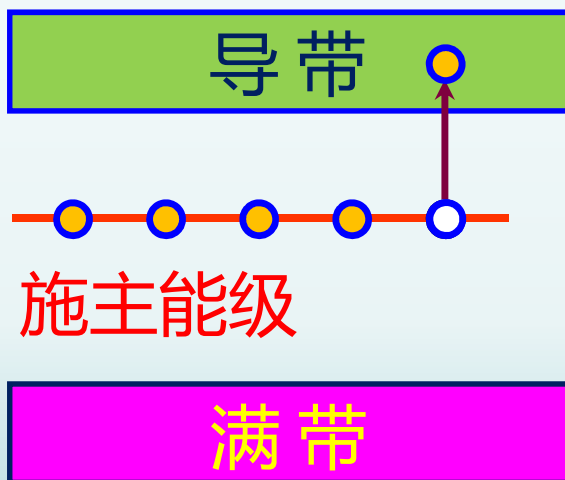


半导体

- 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，形成电子型半导体，称**n型半导体**。



量子力学表明，这种掺杂后**多余的电子**会在导带底附近形成的**局部能级**，极易形成电子导电。

该局部能级称为**施主能级**。

施主能级不断地为导带提供导电电子。

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形成**空穴型半导体**，称**p型半导体**。

导带

受主能级



满带

量子力学表明，这种掺杂后**多余空穴能**在满带顶附近形成**局部能级**，极易形成空穴导电。

该局部能级称为**受主能级**。

受主能级不断地收留满带中的电子，使满带中的空穴大大增加。



1 半导体

了解半导体及固体能带结构

2 激光

了解激光的特性、产生的机理及其应用

激光

□ 激光

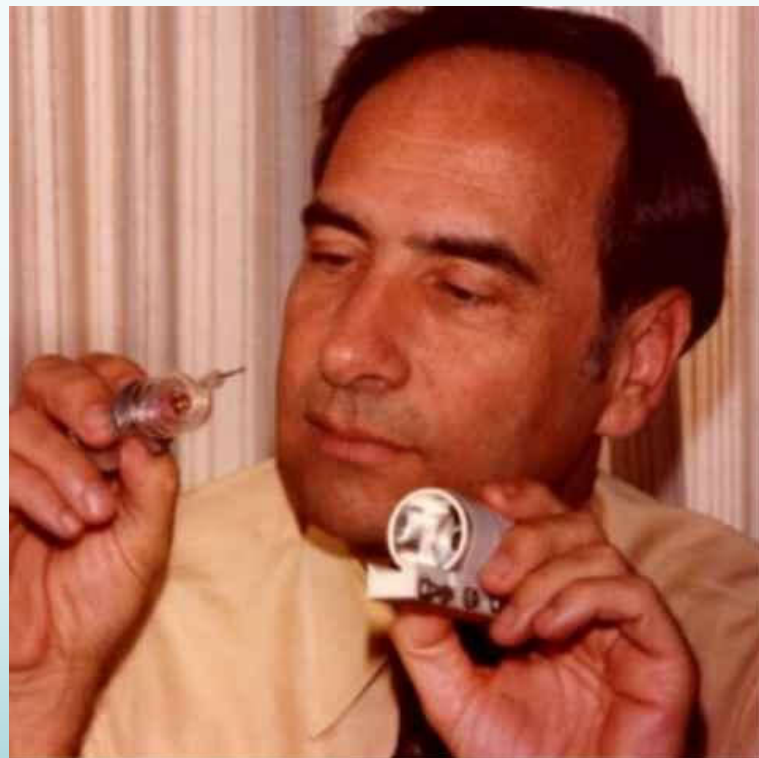
激光(Laser)

全名：Light amplification by stimulated emission of radiation

“受激辐射的光放大”

激光的基本原理都是基于1916年
爱因斯坦提出的受激辐射理论。

1960年，世界上第一台激光器诞生



西奥多·梅曼和他的激光器

激光

□ 激光的特点

- 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。

- 单色性好，相干长度长

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

普通光源 $\Delta\lambda$: 0.1~10 nm ;

氦氖激光器: $\Delta\lambda < 10^{-8}$ nm \longrightarrow 氦氖激光相干长度: 180 公里

- 亮度和强度极高

激光

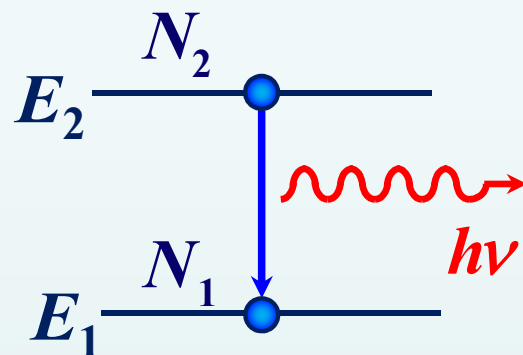
□ 激光的发光原理

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。

• 自发辐射

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

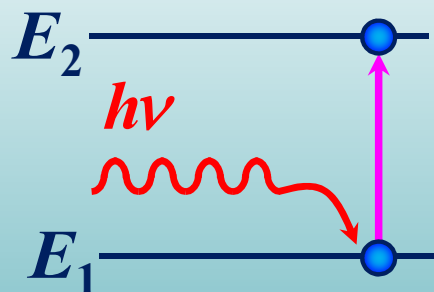


普通光源的发光机理。

各原子自发辐射的光是独立的非相干光。

• 受激吸收

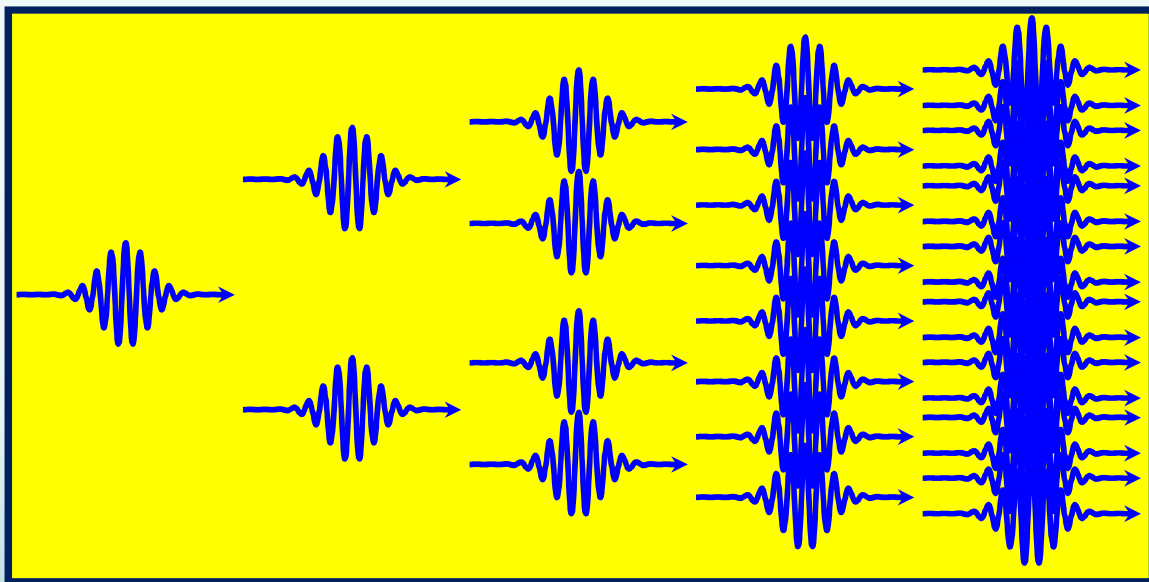
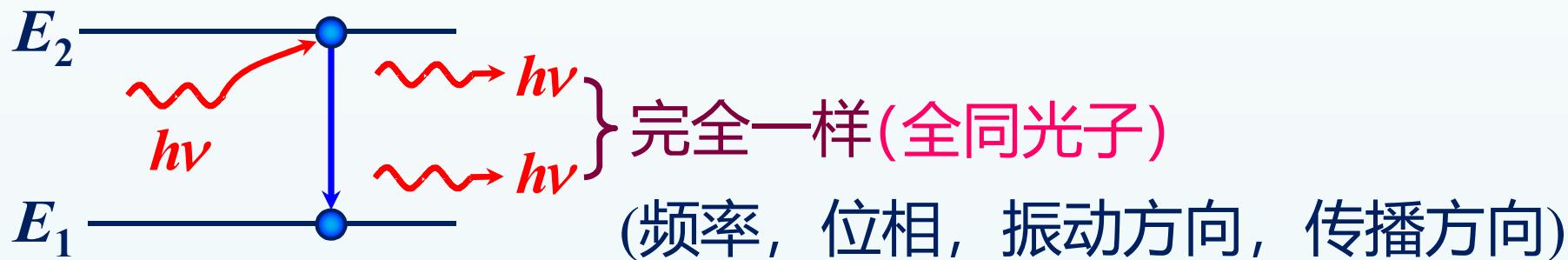
外来光子被吸收，
使原子从 $E_1 \rightarrow E_2$ 。



导致光子数越来越少

激光

- 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

大学物理课程答疑

本学期答疑时间和地点安排如下：

日期	地点	时间
2023-12-27 周三	东九B204	19:00~21:00
2024-01-03 周三	东九B204	

激光

□ 激光原理

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

• 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

$N_n = A e^{-\frac{E_n}{kT}}$ $E \uparrow \longrightarrow N \downarrow$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{通常光源中低能级上的原子数} \\ \text{比高能级上的原子数多得多。} \end{array} \right.$

若 $E_2 > E_1 \longrightarrow N_2 \ll N_1$

受激吸收较受激辐射更占优势！ 无法产生激光

激光

为了产生激光，必须将两个能级上的原子数目的关系倒过来：

$$N_2 \gg N_1 \text{ —— 粒子数反转}$$

实现“粒子数反转”是获得激光的必要条件。

• 实现粒子数反转的条件

① 利用激励能源，将基态原子激发到高能态



光、气体放电、化学、核能等

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？

激光

- 实现粒子数反转的条件

① 利用激励能源，将基态原子激发到高能态



光、气体放电、化学、核能等

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）

有的元素原子存在某些特殊的激发态 → 亚稳态



激发态寿命 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。

激光

- 光学谐振腔、激光的形成

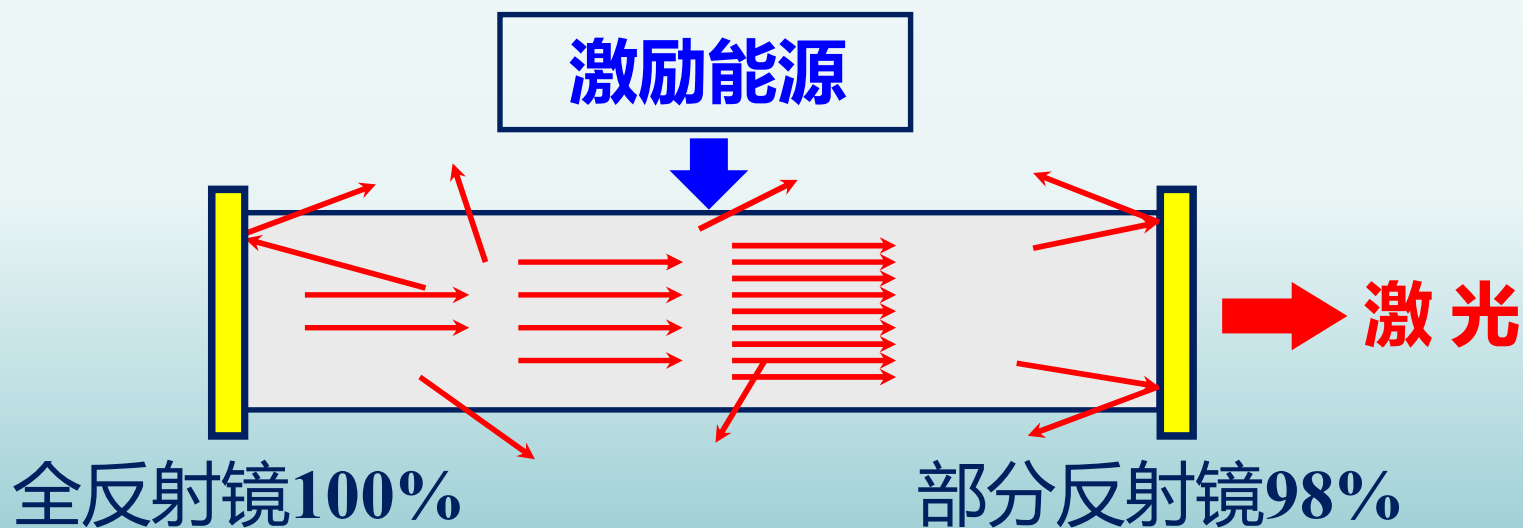
工作物质激活后，能产生光放大，虽可得到激光，但这时的激光寿命短，强度弱，没有实用价值。

必须加上一个

光学谐振腔

光波在其中来回反射从而提供光能反馈的空腔

激光器的
必要组件



激光

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（延长了工作物质寿命）；

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**。

$$nL = k\lambda/2, \quad k = 1, 2, 3, \dots$$



驻波。