

课程信息

- 作业补交截止日期：考试当天
（补交作业最多按50%计算成绩）

§ 7.8 异质结

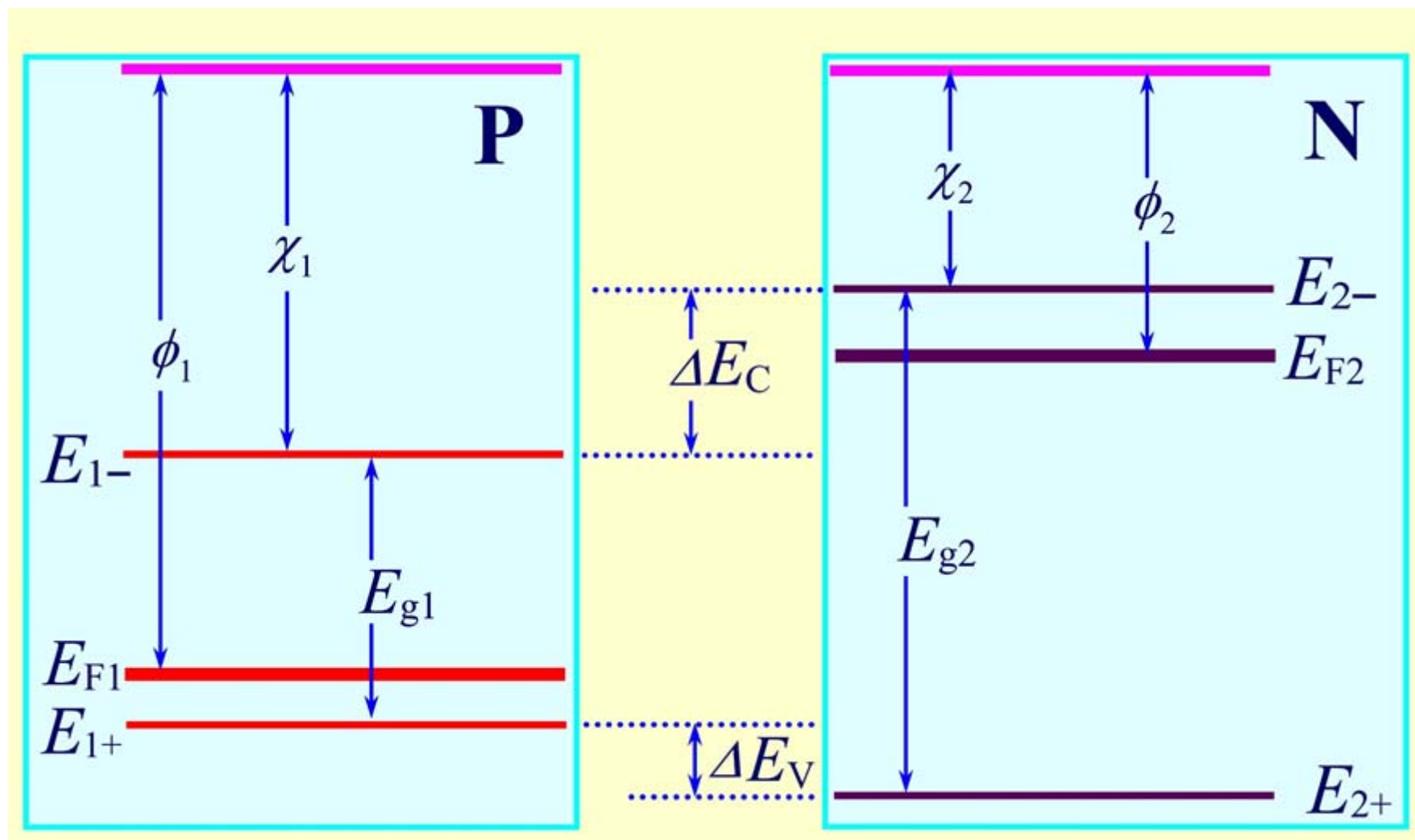
同质结 —— 由同种半导体材料构成N区或P区，形成的PN结

异质结 —— 两种带隙宽度不同的半导体材料生长在同一块单晶上形成的结

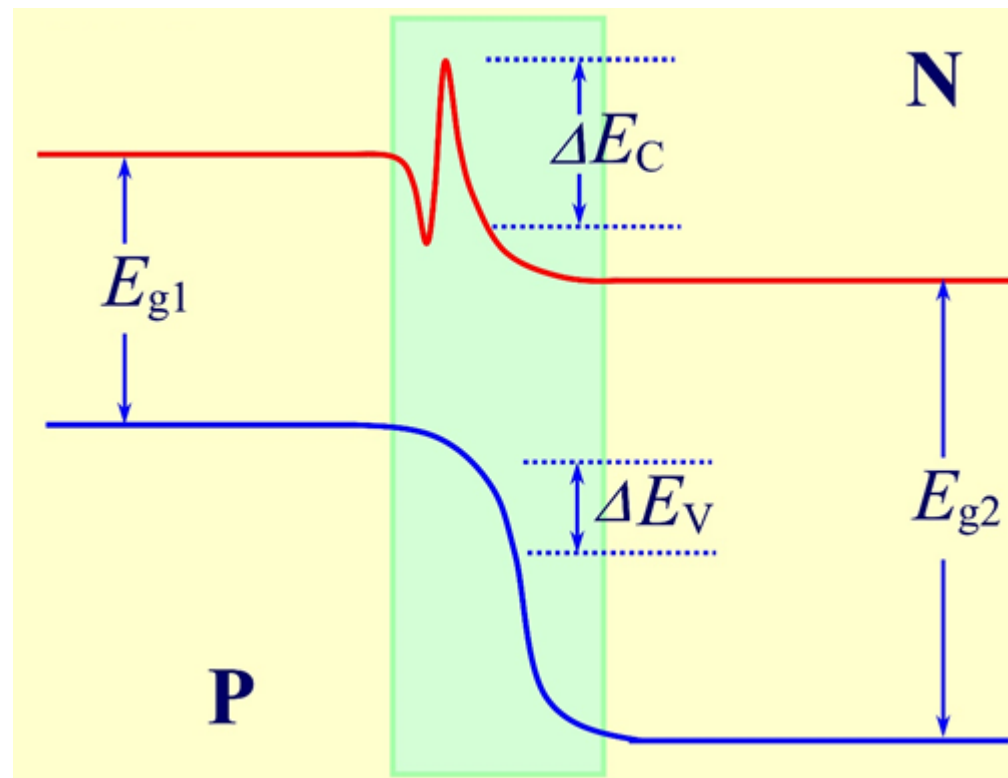
同型异质结 —— 结的两边导电类型相同：NN，PP

异型异质结 —— 结的两边导电类型不相同：NP，PN

两种材料未构成异质PN结之前的能级图



两种半导体材料构成异质PN结之后的能级图



异质PN结界面处导带底和价带顶不连续 —— 差值

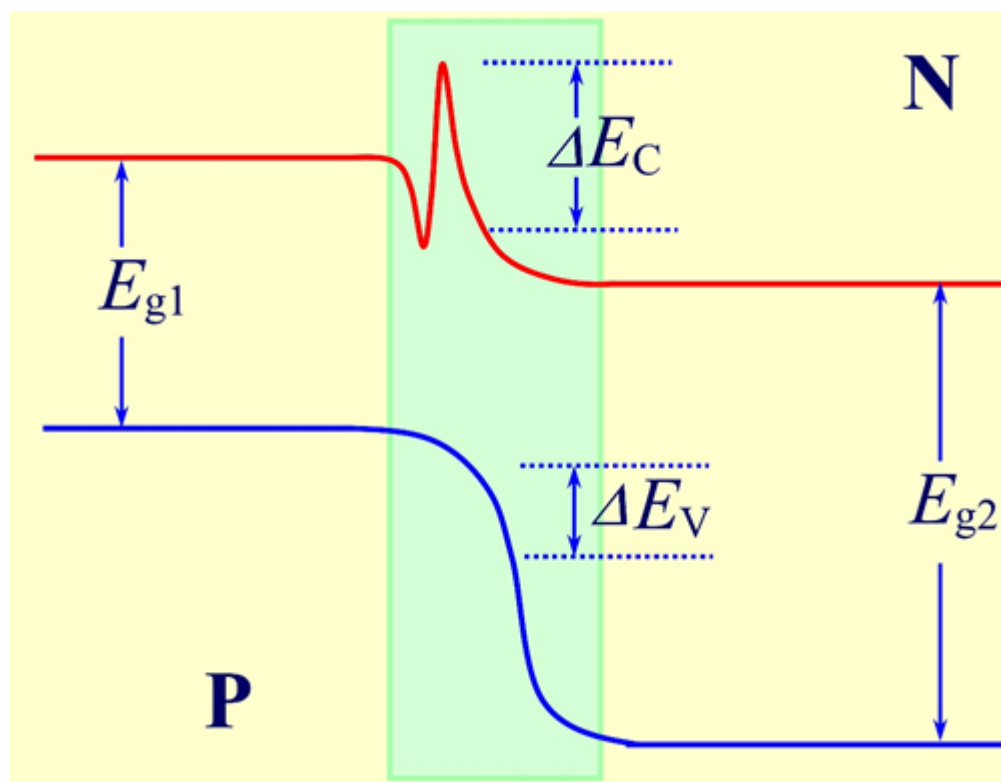
$$\Delta E_C = \chi_1 - \chi_2 \quad \Delta E_V = (\chi_1 + E_{g1}) - (\chi_2 + E_{g2})$$

$$\Delta E_C = \chi_1 - \chi_2 \quad \Delta E_V = (\chi_1 + E_{g1}) - (\chi_2 + E_{g2})$$

$$\Delta E_V = E_{g1} - E_{g2} + \Delta E_C$$

—— 两种材料的费密能级不同，电子从高费密能级材料流向低费密能级材料，形成PN结势垒

—— 形成异质结时，能带在界面处间断，在势垒的一侧出现尖峰，另一侧出现峡谷



异质结的“注入比”

P区的电子电流密度 $j_n = -qn_P^0(e^{qV/k_BT} - 1)\frac{D_n}{L_n}$

N区的空穴电流密度 $j_p = -qp_N^0(e^{qV/k_BT} - 1)\frac{D_p}{L_p}$

PN结注入比 $\frac{j_n}{j_p} = \frac{D_n L_p}{D_p L_n} \frac{n_P^0}{p_N^0}$

热平衡条件 $n^0 p^0 = N_- N_+ e^{-\frac{E_g}{k_B T}}$

异型同质PN结注入比 $\frac{j_n}{j_p} = \frac{D_n L_p}{D_p L_n} \frac{n_P^0}{p_N^0}$

$$n_P^0 = \frac{N_- N_+}{p_P^0} e^{-\frac{E_g}{k_B T}}$$

$$p_N^0 = \frac{N_- N_+}{n_N^0} e^{-\frac{E_g}{k_B T}}$$

$$\frac{n_P^0}{p_N^0} = \frac{n_N^0}{p_P^0} = \frac{N_D}{N_A}$$

N_D 和 N_A ——N区和P区掺杂浓度

$$\frac{j_n}{j_p} = \frac{D_n L_p}{D_p L_n} \frac{N_D}{N_A}$$

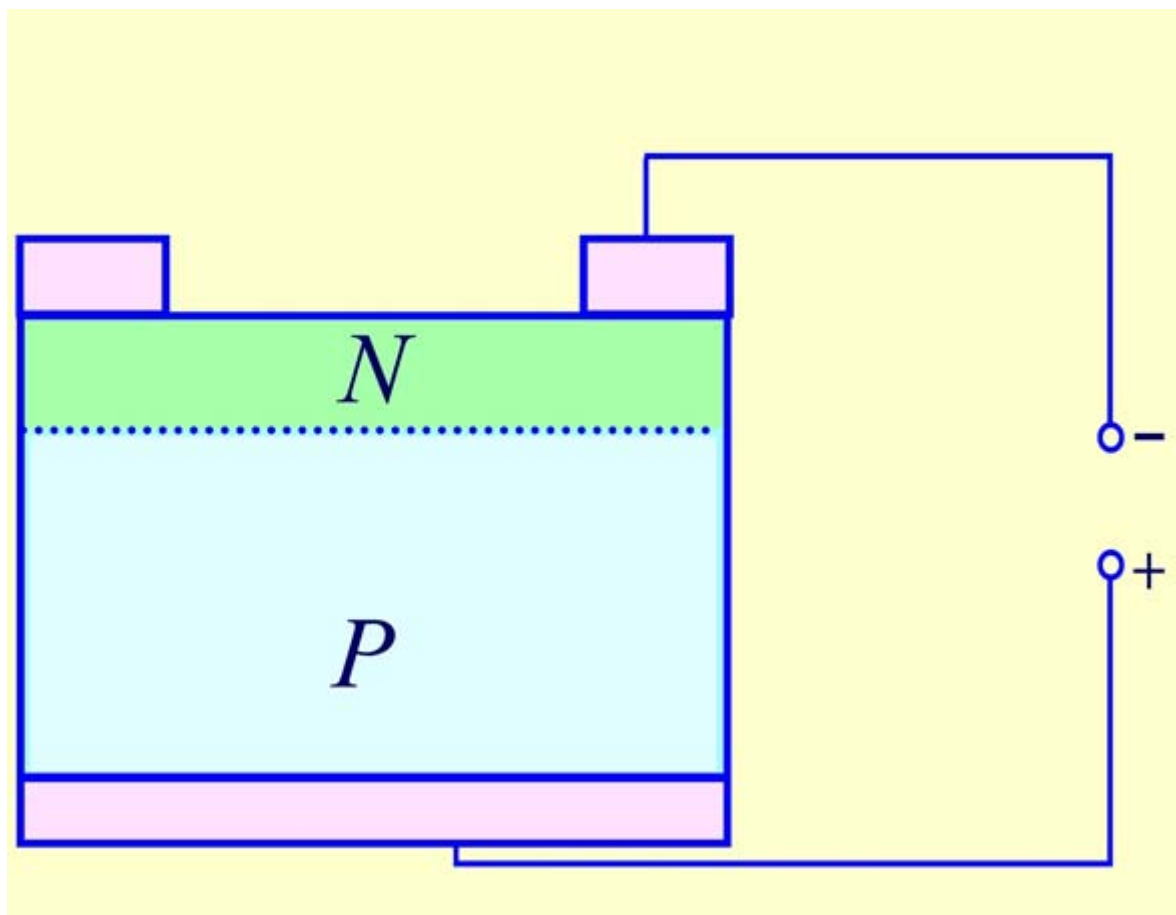
异型异质PN结
$$n_P^0 = \frac{N_- N_+}{p_P^0} e^{-\frac{(E_g)_P}{k_B T}} \quad p_N^0 = \frac{N_- N_+}{n_N^0} e^{-\frac{(E_g)_N}{k_B T}}$$

异质PN结注入比
$$\frac{j_n}{j_p} = \frac{D_n L_p}{D_p L_n} \frac{N_D}{N_A} e^{\frac{(E_g)_N - (E_g)_P}{k_B T}}$$

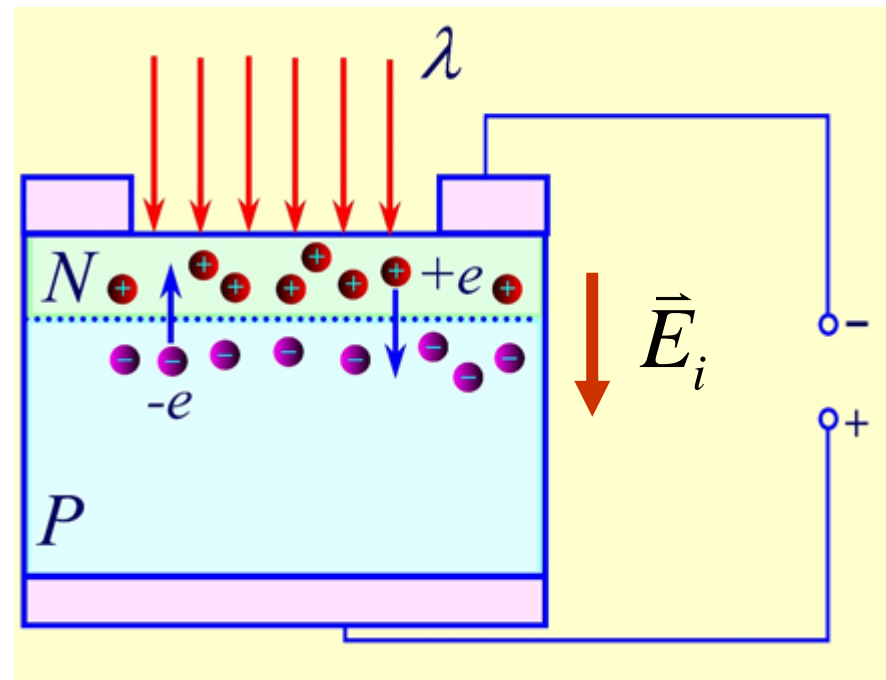
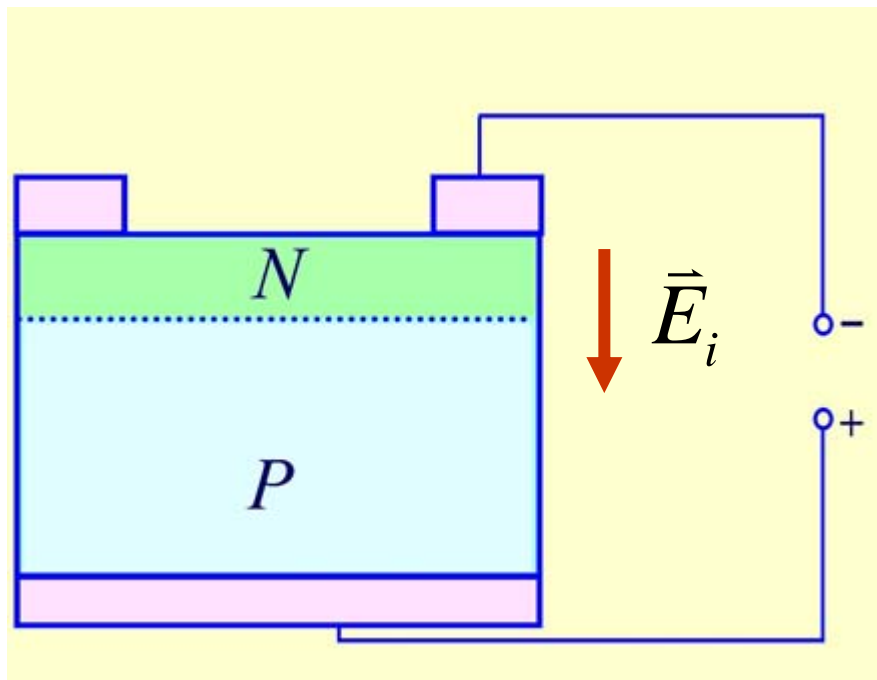
- 如果N型区的带隙宽度大于P型区带隙宽度，即使两边掺杂浓度差不多时，可以获得很高的注入比
- 异质结的注入比决定晶体管的电流放大系数、激光器的注入效率和阈值电流

光生伏特效应 —— 太阳能电池

—— 利用扩散掺杂，在P型半导体的表面形成一个薄的N型层

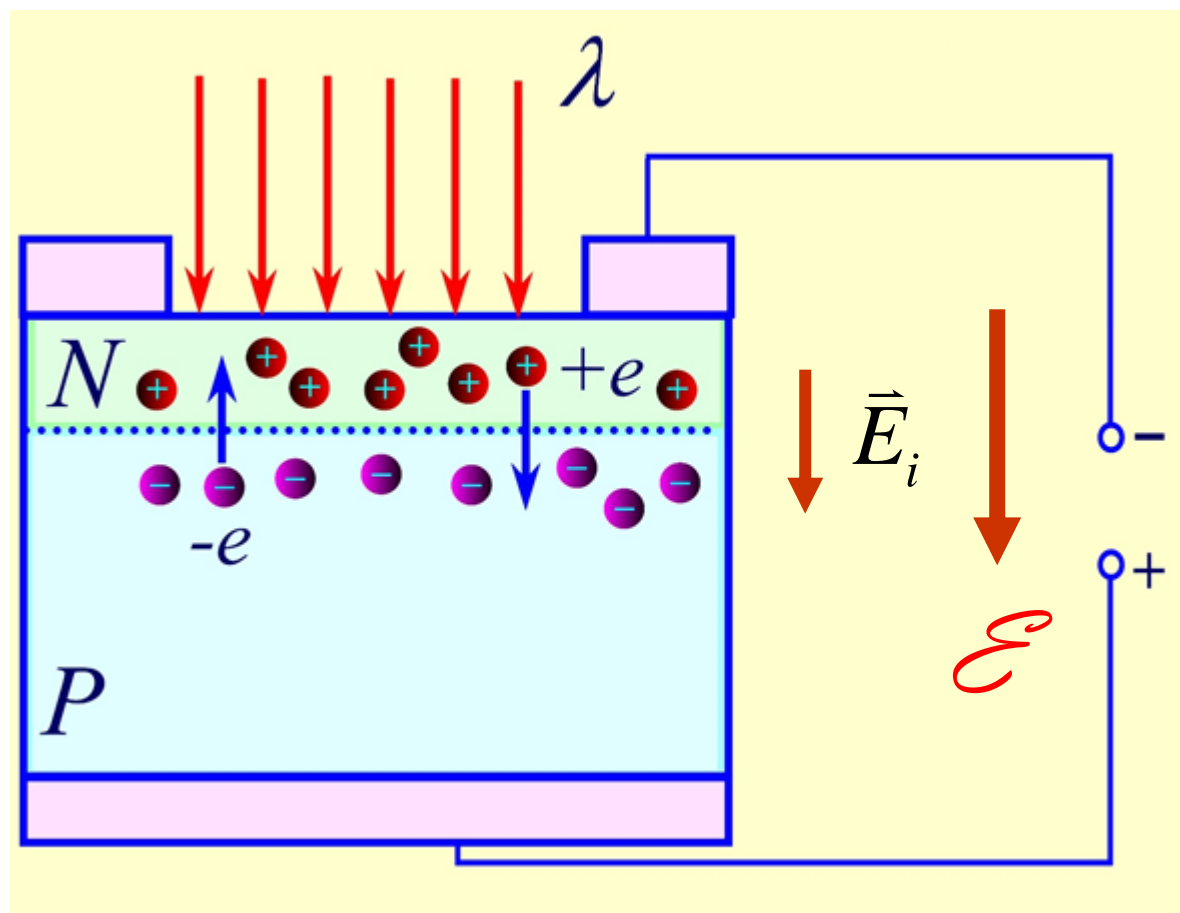


- **PN结的自建电场** — 强电场区域
- 光照射下，在**PN结**及附近产生大量的电子和空穴对
- **PN结**附近一个扩散长度内，电子—空穴对还没有复合就有可能通过扩散达到**PN结**的强电场区域



- 强电场将电子扫向N区
- 强电场将空穴扫向P区

- N区带负电
- P区带正电
- 上下电极产生电压

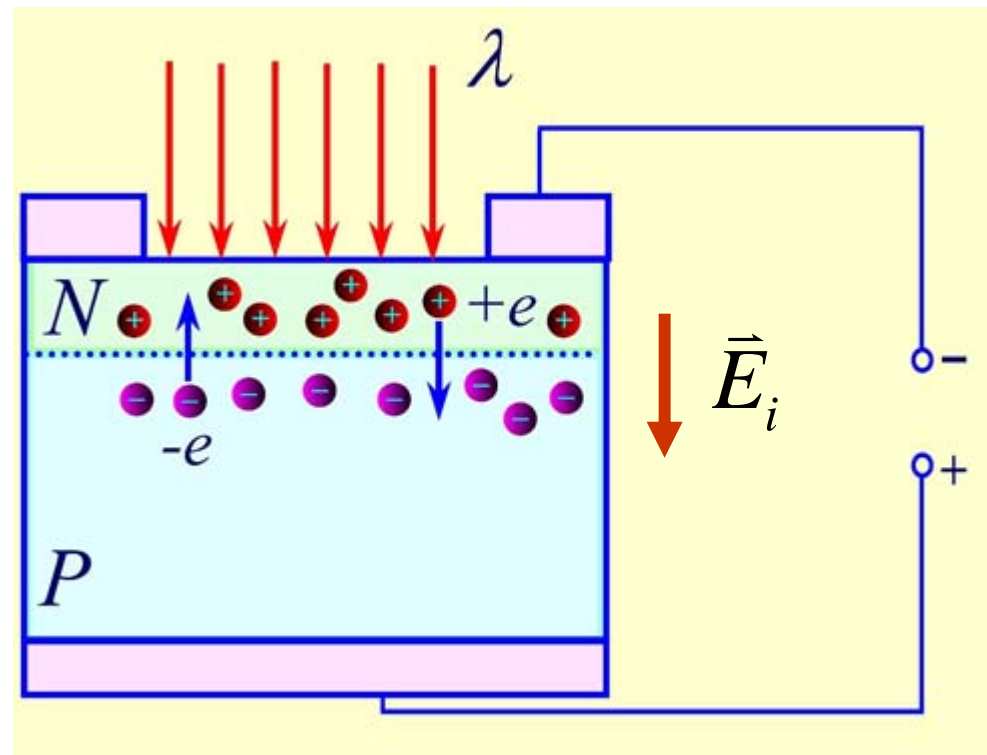


异质结的“窗口效应”

—— 光子能量小于宽带隙的N型层__ $h\nu < (E_g)_N$ ，可以透过N型层，在带隙较窄的P型层被吸收

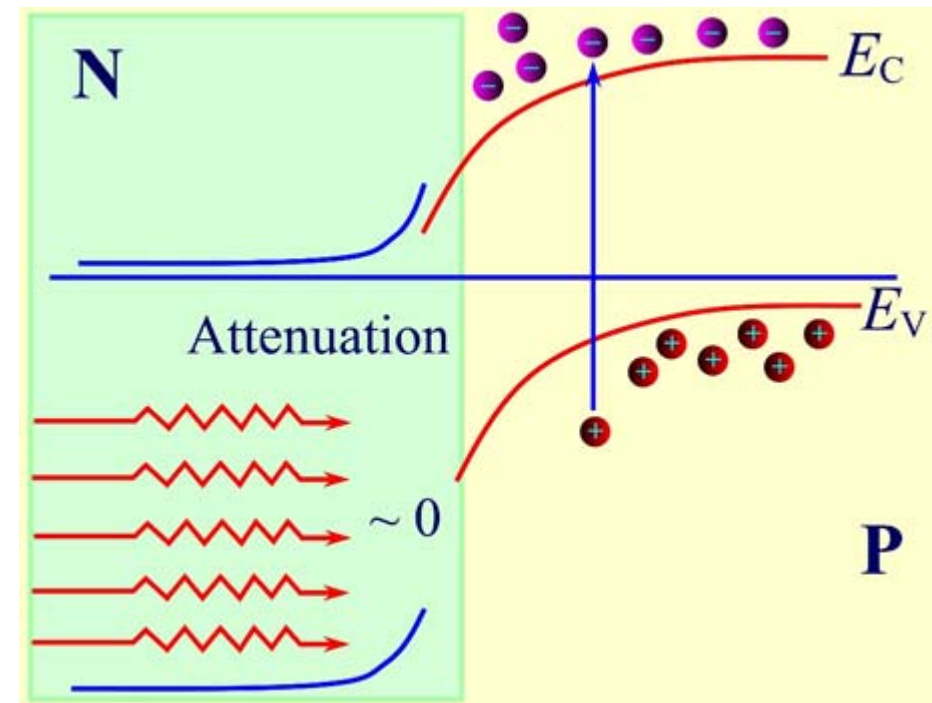
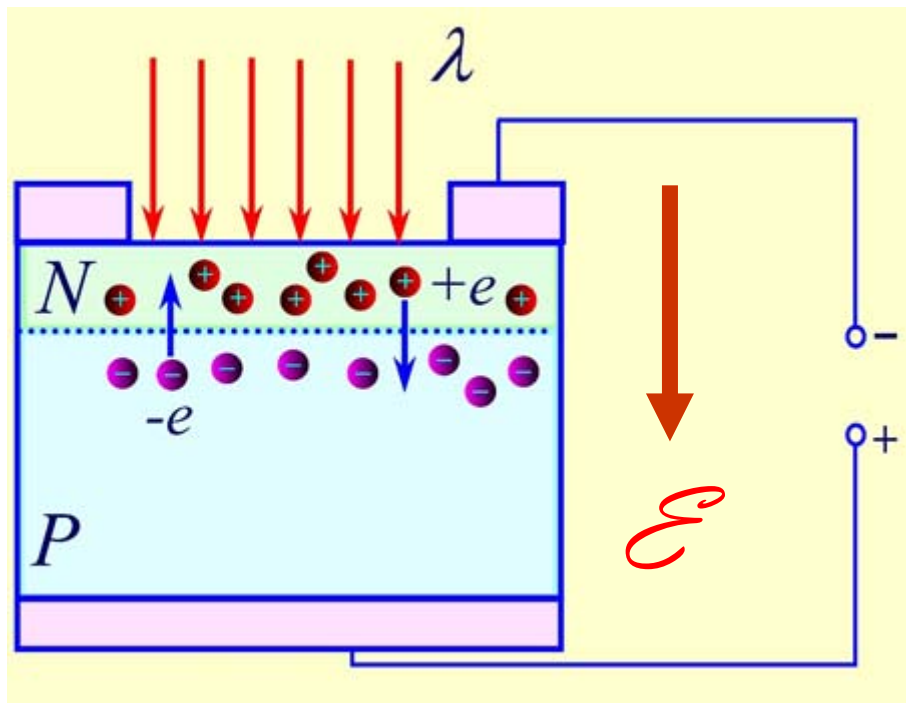
—— 同质PN结制作光电池，缺陷引起的表面复合和高掺杂层中载流子寿命低等因素

—— 使得一些电子-空穴对不能到达强电场区域

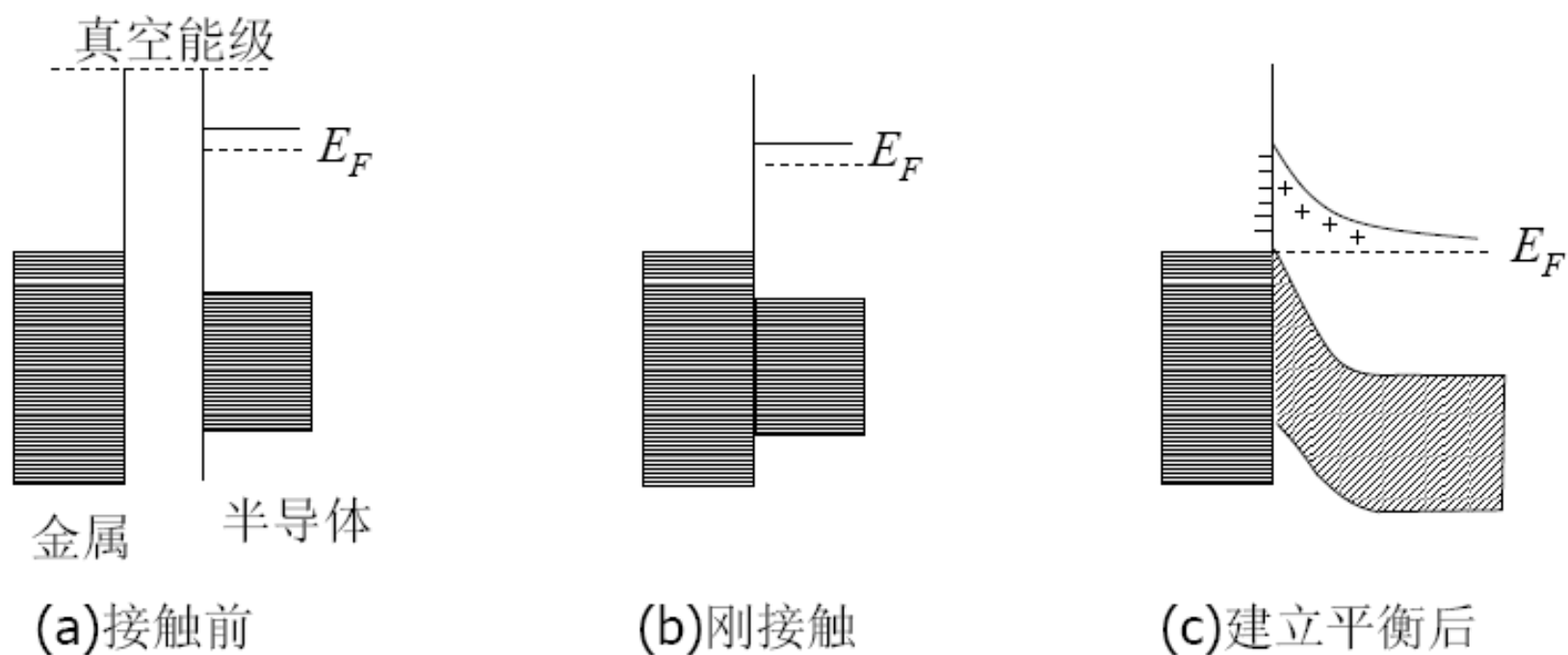


异质结的“窗口效应”

异质结的窗口效应 —— 有效地减小电子—空穴的复合率



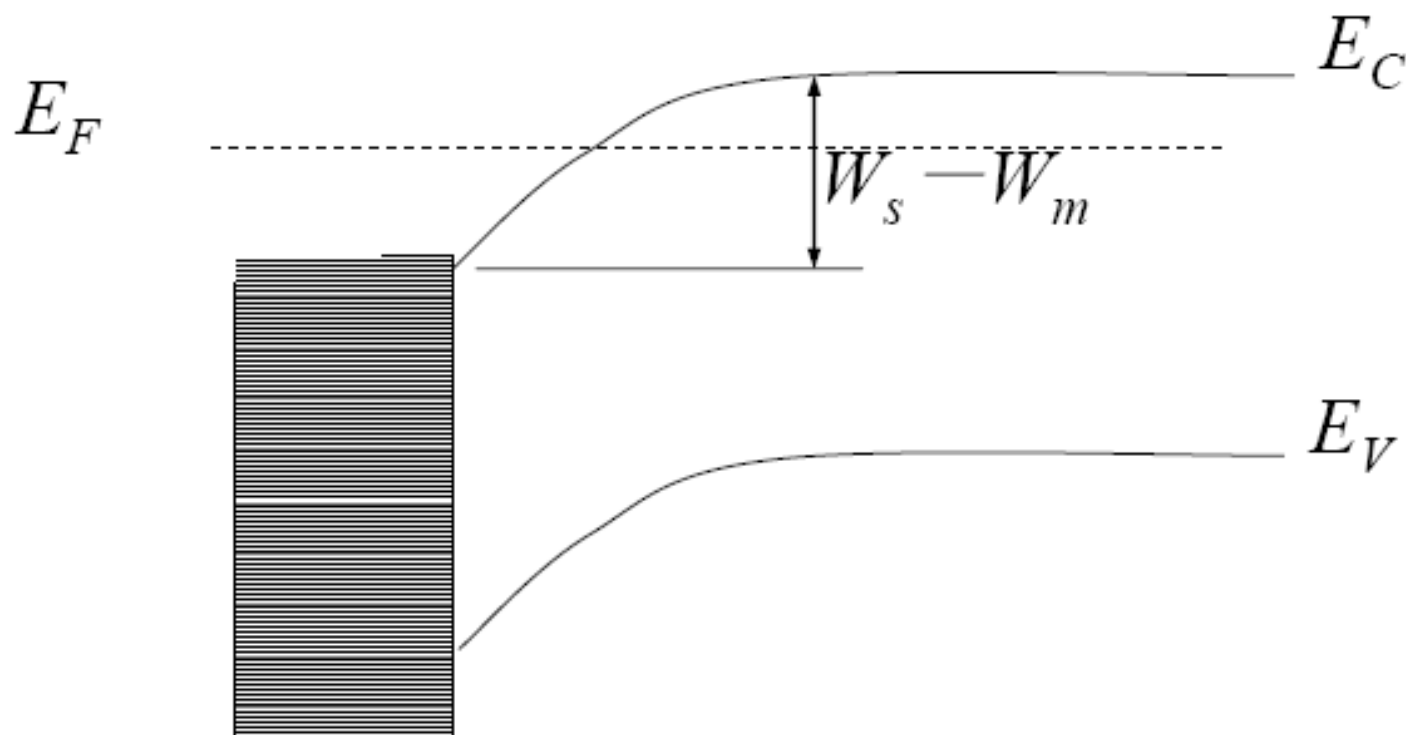
半导体 - 金属接触：肖特基接触



热平衡后，界面处半导体的电位高于金属，且有势垒的高度为：

$$eV_D = W_m - W_s$$

半导体 - 金属接触：欧姆接触



半导体体欧姆接触后的能带结构

第九章 固体中的光吸收

- 9-1 固体光学常数间的基本联系
- 9-2 固体中的光吸收过程
- 9-3 半导体的带间光吸
- 9-4 激子光吸收
- 9-5 自由载流子光吸收

研究固体中的光吸收，可以直接获得有关电子能带结构，杂质缺陷态，原子的振动等等多方面信息

若入射光强度为 J_0 ，反射光强度为 $J_{\text{反}}$ 时，则有反射系数。

$R=J_{\text{反}}/J_0$ 反射系数对频率的依赖关系 $R(\omega)$ 称为反射谱。

光进入固体以后，由于可能被吸收，光强随进入固体材料的深度 x 而衰减 $J(x)=J_0(1-R)e^{-\alpha x}$ ， α 为吸收系数，吸收系数随 ω 的依赖关系 $\alpha(\omega)$ ，称为吸收谱。

光学常数

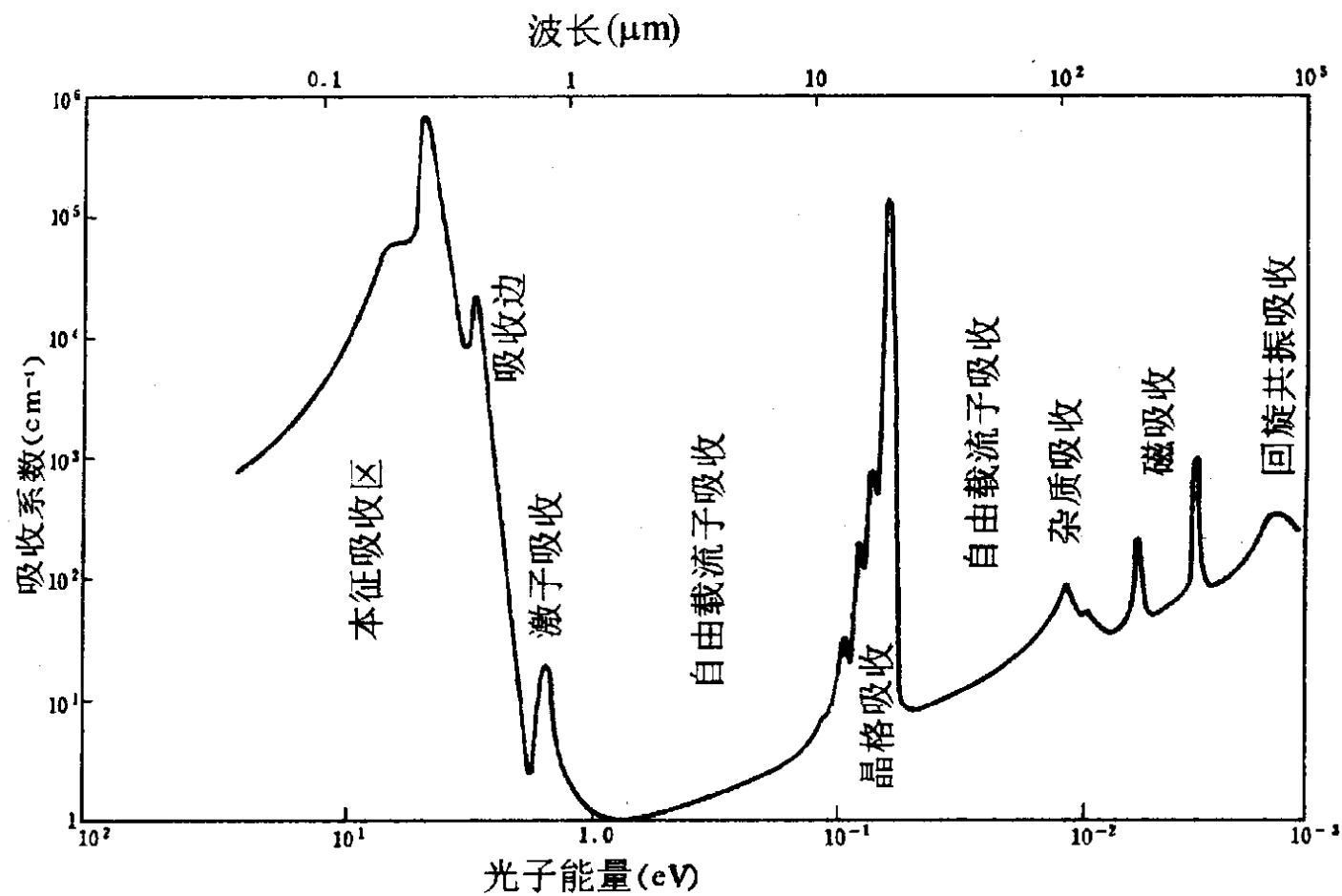
$n = \sqrt{\varepsilon}$ 为折射率，在吸收介质中，折射率在吸收介质中折射率 \mathbf{n} 应被 $\mathbf{n+ik}$ 所替代。

$$\left(n(\omega) + ik(\omega) \right)^2 = \varepsilon_1(\omega) + i\varepsilon_2(\omega)$$

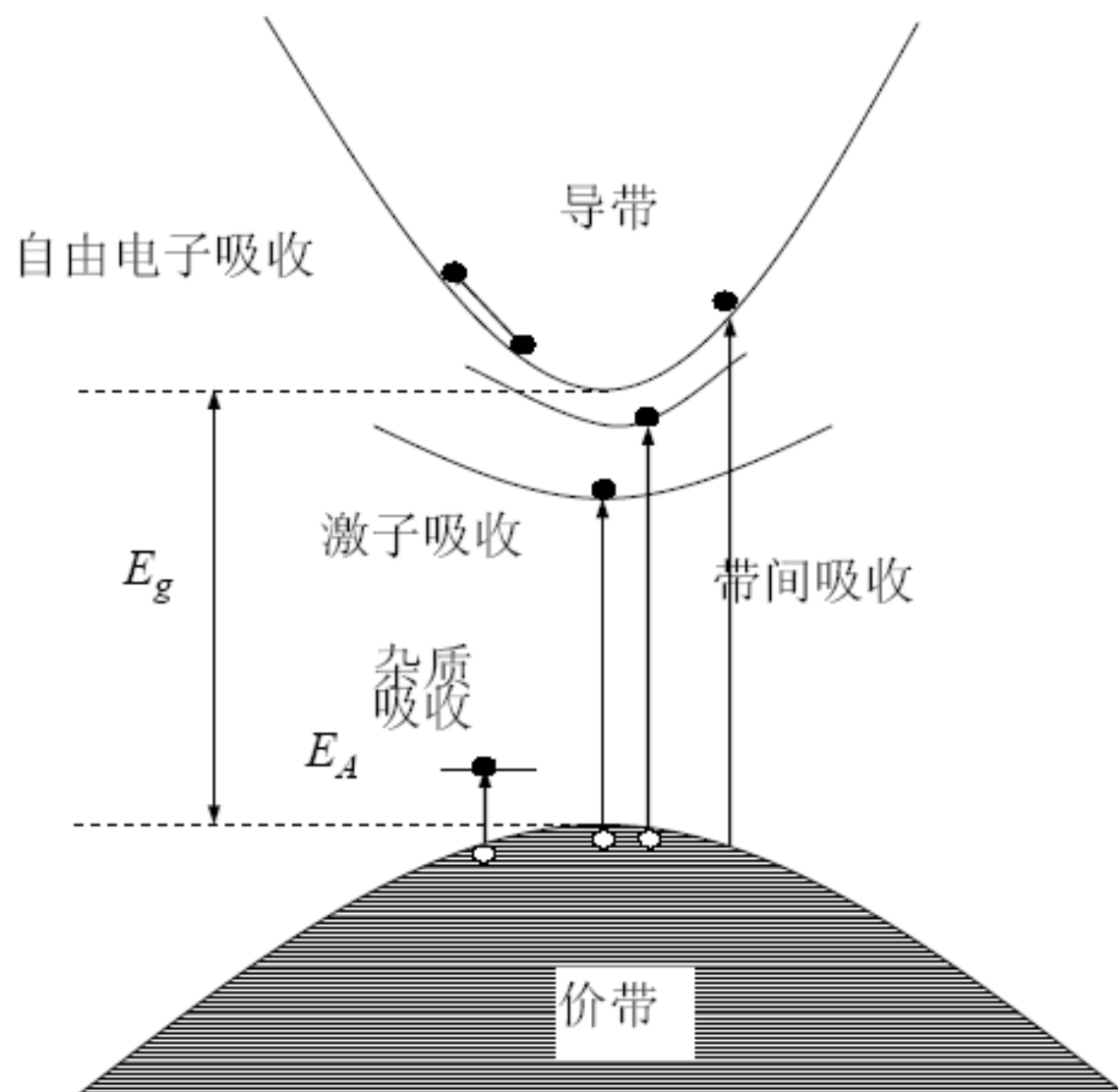
$$\begin{cases} n(\omega)^2 - k(\omega)^2 = \varepsilon_1(\omega) \\ 2n(\omega)k(\omega) = \varepsilon_2(\omega) \end{cases}$$

可以用 ε_1 , ε_2 描述固体的光学性质。

固体中的光吸收过程



固体中的光吸收过程



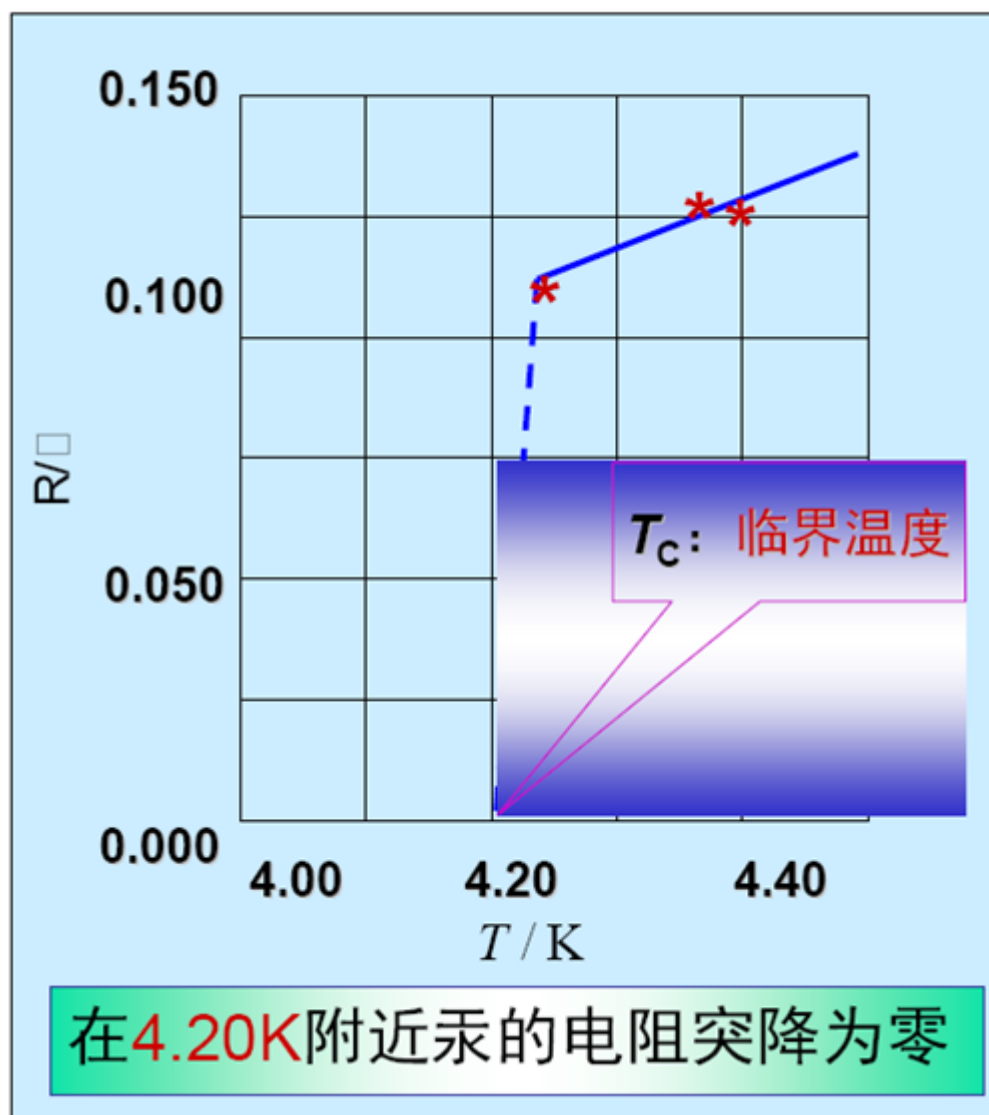
第十章

超导电的基本现象和 基本规律

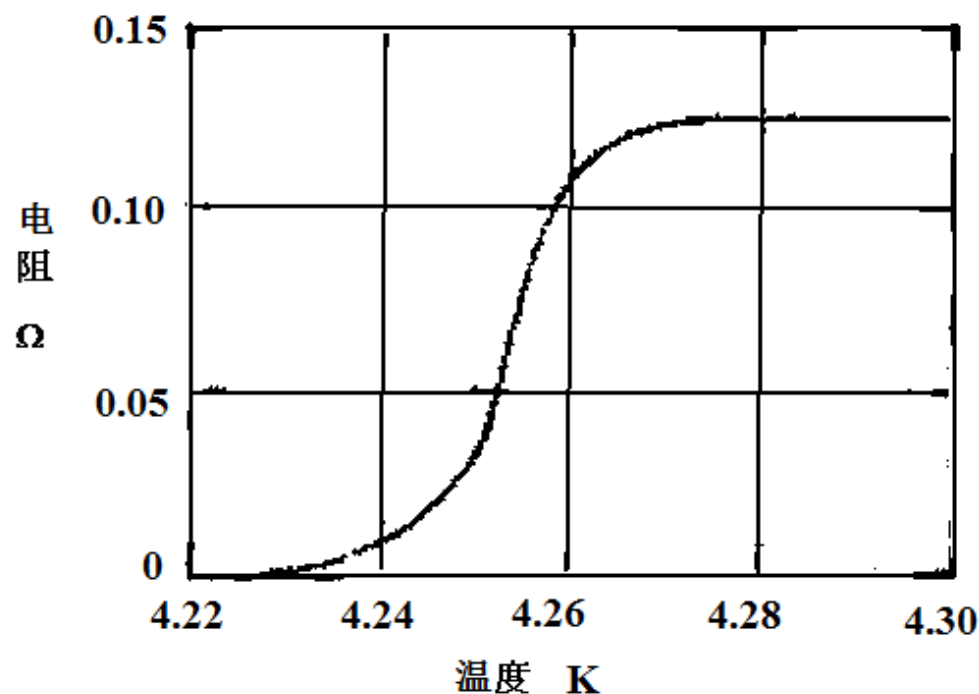
一、零电阻现象的发现

- 1908年荷兰物理学家昂内斯（K. Onnes）实现了氦的液化。
- 1911年昂内斯在研究Hg的低温电阻特性时，意外发现零电阻现象
- File等利用核磁共振方法车辆超导螺线管内的电流衰变，得出其衰变时间不小于10万年

—超导零电阻现象被确认

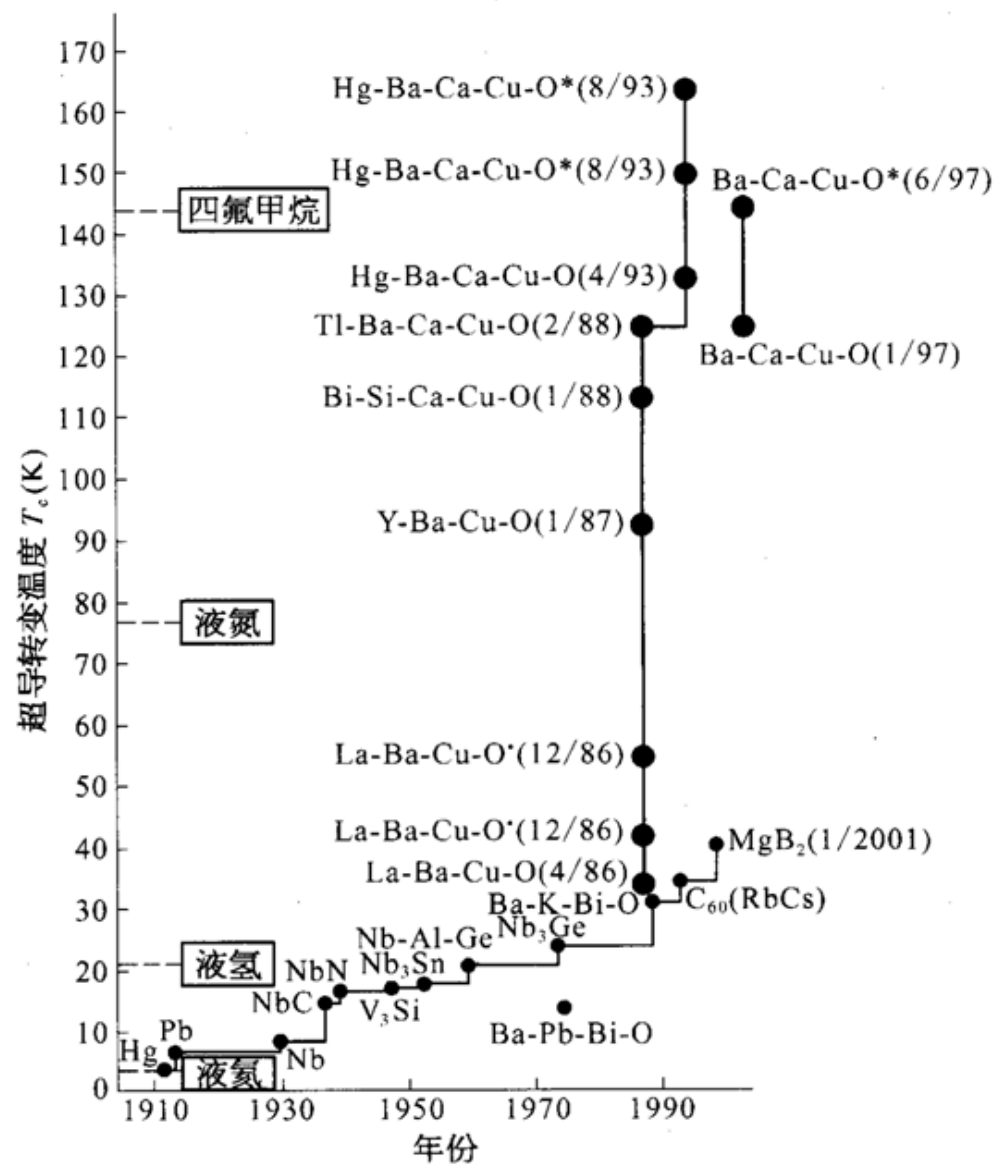


- 电阻突然消失的温度叫做超导体的临界温度，用 T_c 表示。 T_c 是物质常数，同一种材料在在相同条件下有确定值。例如；汞的 $T_c=4.15\text{K}$ ，铅的 $T_c=7.201\text{K}$ ，等
- 当温度在 T_c 以上时，超导体和正常金属一样，具有有限的电阻值，这时超导体处于正常态；当温度在 T_c 以下时，超导体进入零电阻状态----**超导状态**。



PERIODIC TABLE OF SUPERCONDUCTING ELEMENTS																	
alkali metals																	
1	2															18	
1 H																2 He	
alkaline earth metals																	
3 Li	4 Be															10 Ne	
20 K	26 mK 9.95 K film																
11 Na	12 Mg															17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
	15 K 150 GPa	0.34 K 21 GPa	0.5 K	5.4 K 17.2 K 120 GPa	3 K film		2 K 21 GPa				0.85 K 1.6 K film	1.08 K 8.6 K film	5.4 K 11.5 GPa	2.7 K 24 GPa	7 K 13 GPa	1.4 K 150 GPa	
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
	4 K 50 GPa	2.8 K 15 GPa	0.6 K 11 K 30 GPa	9.25 K 9.7 K 4.5 GPa	0.92 K	8.2 K	0.5 K	35 μ K	3.2 K irradiated		0.52 K	3.4 K 4.2 K film	3.7 K 4.7 K film	3.6 K 8.5 GPa	7.4 K 35 GPa	1.2 K 25 GPa	
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
1.66 K 8 GPa	5 K 20 GPa	6 K 12.8 K 20 GPa	0.38 K	4.4 K 4.5 K 40 GPa	0.01 K 5.5 K film	1.7 K	0.7 K	0.1 K			4.15 K	2.4 K	7.2 K	8.7 K 9 GPa			
87 Fr	88 Ra	89 Ac															
			58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
			1.75 K 5 GPa													0.1 K 1.2 K 18 GPa	
			90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	
			1.4 K	1.4 K	1.3 K 2.2 K 1 GPa			1 K									

图10-2 元素表中的超导元素



提高超导转变温度 (T_c) 的历史进程

(在图中标出了几种通用冷冻剂的沸点, “*”指高压下)

超导电性的应用举例

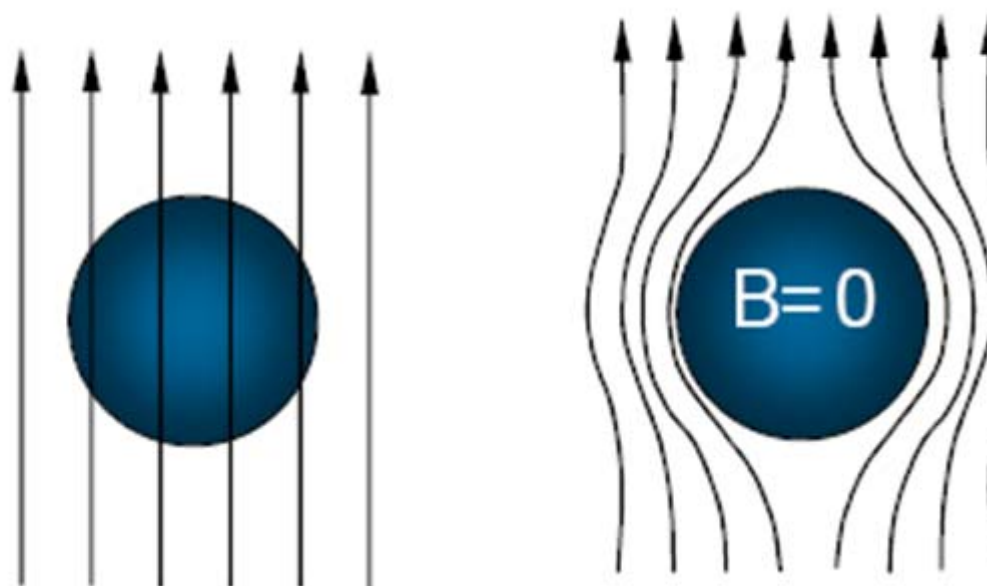
- **1、超导磁体**
- 大尺度、强磁场、低消耗
- **2、超导电缆**
- 电能零电阻输送，完全没有损耗
- **3、超导储能**
- 超导体圆环置于磁场中，降温至材料临界温度以下，撤去磁场，由于电磁感应，圆环中有感生电流产生。只要温度保持在临界温度以下，电流便会持续。

高温超导实用化

- 电力能源方面：输电电缆、发电机、电动机、变压器超导化 超导储能系统 大型电机设备形状与性能的革命
- 能源工业： 超导贮能调节电网负荷 超导磁体约束的等离子体和可能产生的核聚变
- 电子学方面： 超导计算机研究（计算速度快，体积小，功耗低，使用方便 信息储存量大）
- 医学和生物方面：核磁共振计算机断层诊断装置(**NMR-CT**)
- 超导量子干涉仪(**SQUID**)

二、麦森纳效应

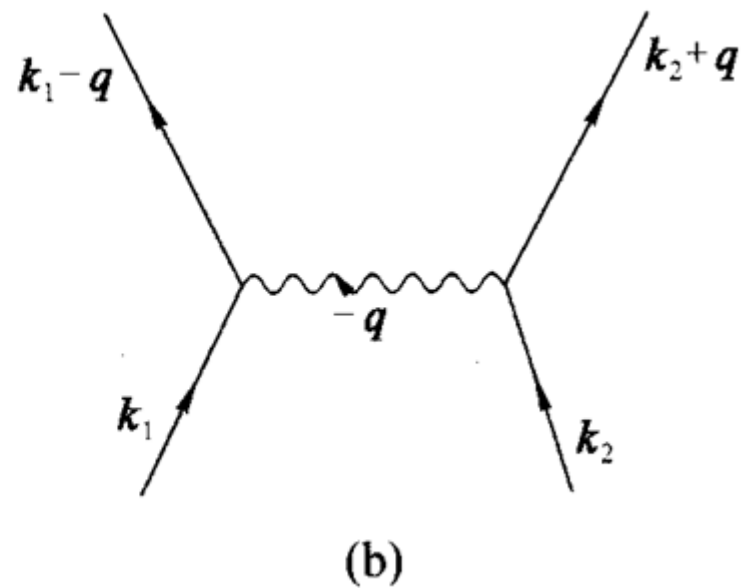
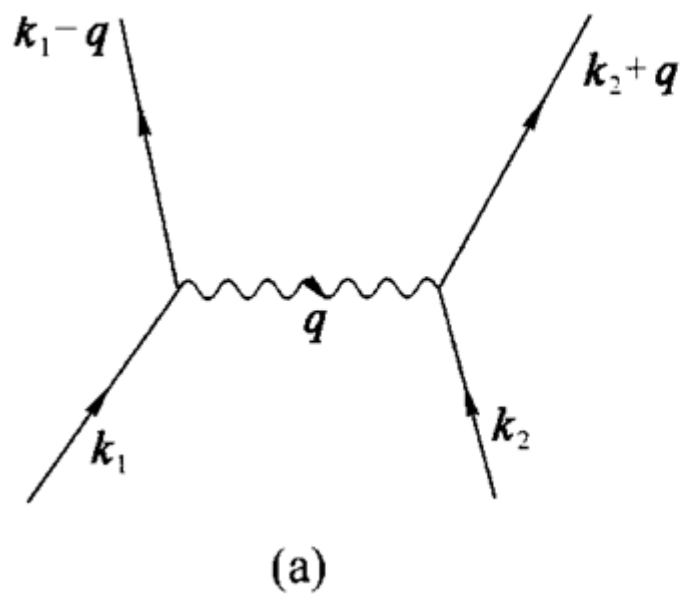
- 零电阻是超导体的一个基本特性，超导体的另一个基本特性是**完全抗磁性**，即迈纳斯效应。由于超导态的零电阻，在超导态的物体内部不可能存在电场，因此，电磁感应定律，磁通量不可能改变。施加外磁场时，磁通量将不能进入超导体内，这种磁性是零电阻结果。在磁场之中发生超导转变时，磁通量完全被排斥于体外的结果。麦森纳效应，往往概括说成：超导体具有“完全的抗磁性”。



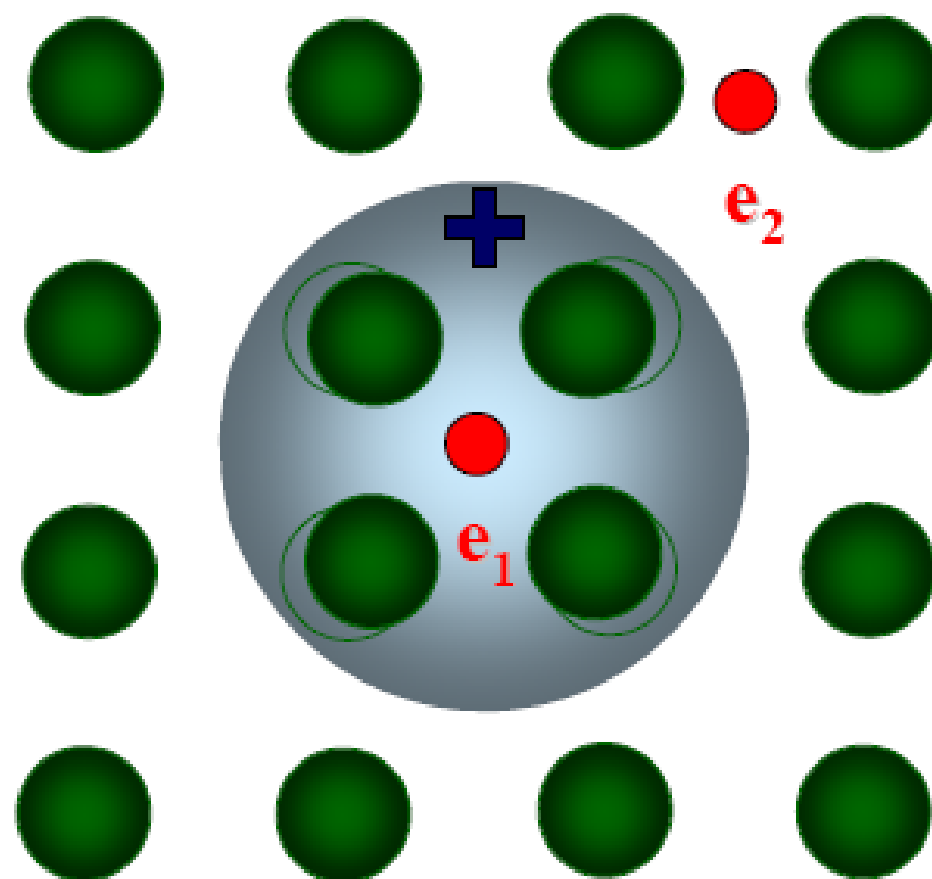
麦森纳效应

超导态微观图像

- 1957年，由巴丁，库伯和施里夫发表的经典性文章才确立了超导电性量子理论基础，通常称为BCS理论。在超微观理论建立的过程中，“同位素效应”起过很重要的作用。1950年实验发现，同一种超导元素的各种同位素的 T_c 与同位素原子质量之间存在下列关系 $T_c M^\alpha = \text{常数}$ 。称为同位素效应。对于一般元素， $\alpha \approx 1/2$ 。电子晶格振动的相互作用是超导电性的根源。1950年弗列里希指出两个电子之间可以通过换声子而产生间接的相互作用，即一个电子发射一个声子，随后这个声子立即被另一个电子所吸收。



由声子传递的电子—电子相互作用示意图



晶格畸变与电子之间的相互“吸引”

- 电子形成费米球的分布，在超导态时，低能量的，即在费米球内部的电子，仍与正常态中的一样，但在费米面附近的电子，在交换虚声子所引起的引力作用下，按相反地动量和自旋两两的结合成电子时，这种电子对通常称为库伯对。
- 在 $T=0$ ，在超导体内费米面附近的电子全部组成电子对，这就是系统的基态，把一个电子对拆成两个正常电子时，至少需要 2Δ 的能量。意味着系统不可能有在基态与 2Δ 之间的能量，这就表明存在有能隙，超导体的很多性质与存在这个能隙有关。

$$\Delta = 2\hbar\omega_L \exp\left[-1 / N(E_F)G\right]$$

这里 $\hbar\omega_L$ 是平均声子能量 $N(E_F)$ 为费米能级处的能态密度， \mathbf{G} 代表电子-声子耦合强弱系数， $N(E_F)$ 和 \mathbf{G} 越大越有利于产生超导电性。在有限温度下将出现热激发的正常电子，也就是说热扰动将会破坏库伯对。

THE END

**祝同学们在期末考试中
取得好成绩！**