

第五章 光辐射的探测

5.1 物质中光的吸收

5.2 光探测的基本物理效应

5.3 光辐射探测过程中的噪声

5.1 物质中光的吸收

一本征吸收

半导体中的本征吸收：电子吸收光子能量后，由价带跃迁到导带。

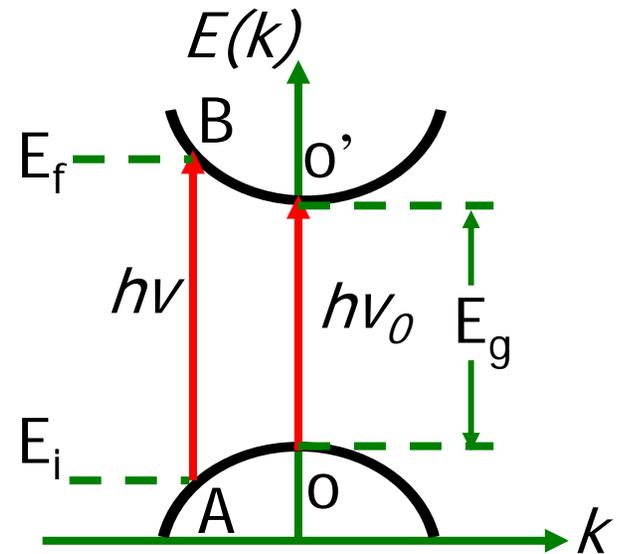
条件： $h\nu \geq E_g = h\nu_0$

截止波长（长波限）： $\lambda_0 = \frac{hc}{E_g (eV)} = \frac{1.24}{E_g (eV)} (\mu m)$

1. 直接跃迁

直接跃迁：在 $E(k)$ 曲线中，
电子动量基本保持不变。

直接带隙半导体：导带极小值与
价带极大值对应相同的波矢。

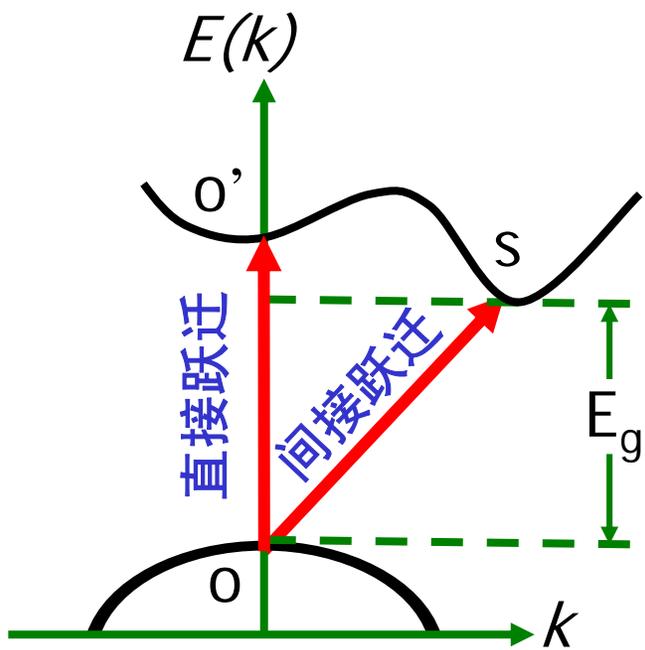


电子的直接跃迁

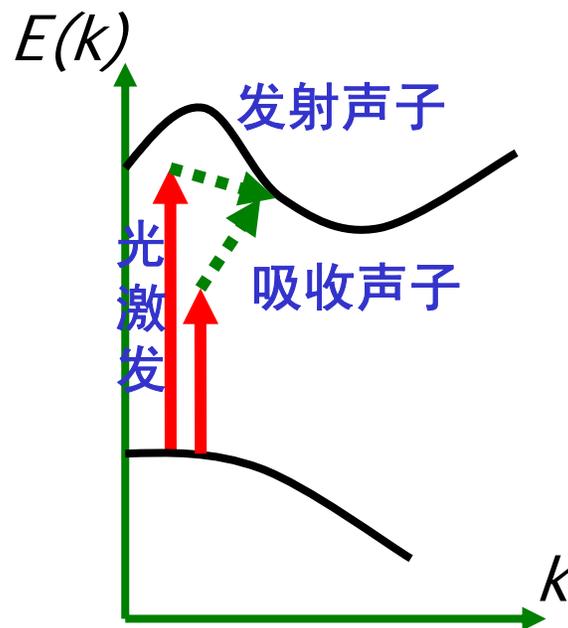
一本征吸收

2 间接跃迁

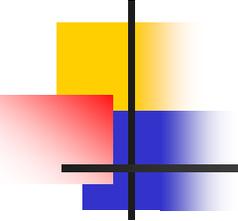
间接跃迁：导带最低能量状态与价带最高能量状态的 k 值不相等。
即在跃迁过程中动量发生变化。



直接跃迁和间接跃迁比较



有声子参与的吸收过程



二 晶格振动吸收

所有固体都具有一个因**光子**和**晶格振动**相互作用而引起的吸收区域：

$$10\mu m \sim 100\mu m$$

晶格中原子的振动都是由若干不同的基本波动按波的叠加原理组合而成，这些基本波称为**格波**。

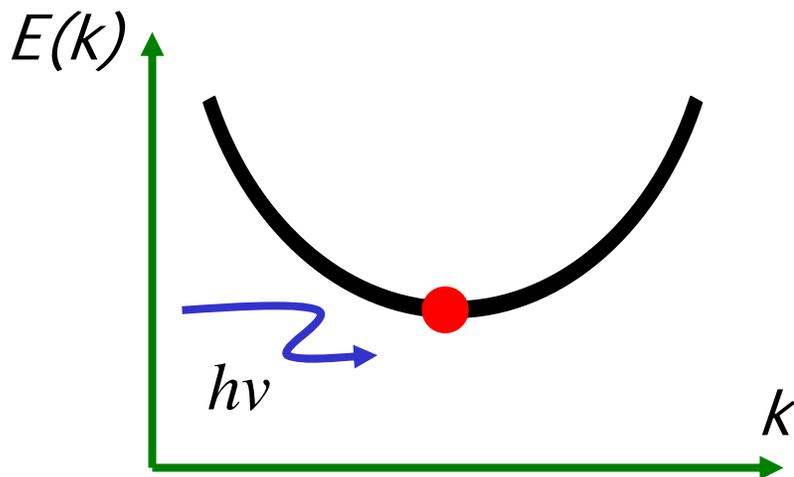
$$E_a = (n + 1/2)h\nu_a, n = 0, 1, 2, \dots$$

声子： $h\nu_a$

晶格能量的改变可看作吸收或发射声子的过程。

三 自由载流子的光吸收

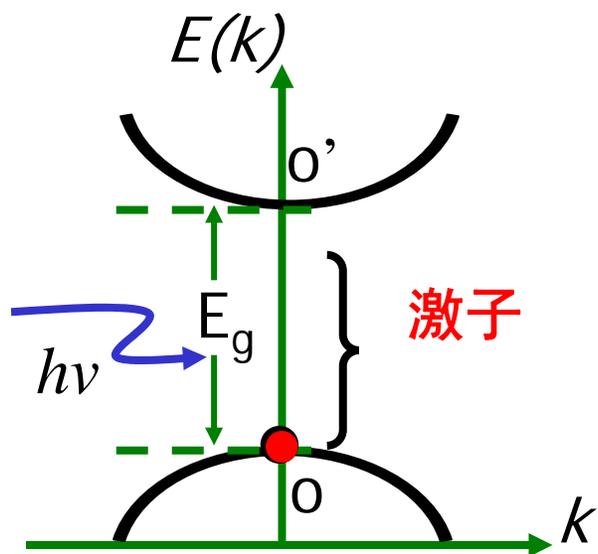
自由载流子的光吸收：当入射光（主要是红外波段）能量较低时，导带中的电子或价带中的空穴吸收光子后，引起载流子在能带内的跃迁。



自由载流子的吸收

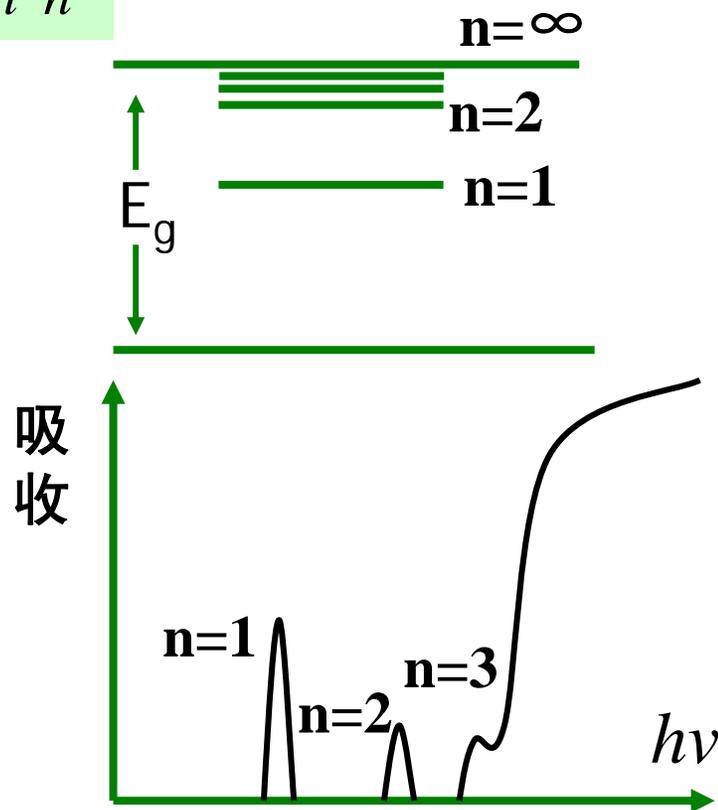
四 激子吸收

$$E_{ex}^n = -\frac{e^4 m_r}{8\epsilon_0^2 \epsilon_r^2 h^2 n^2}$$



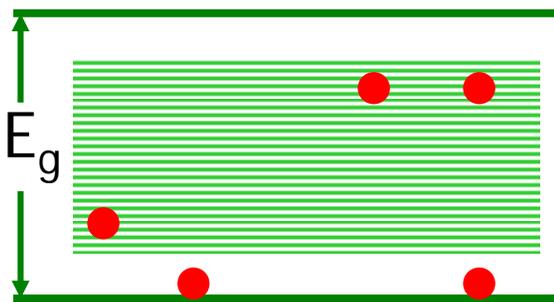
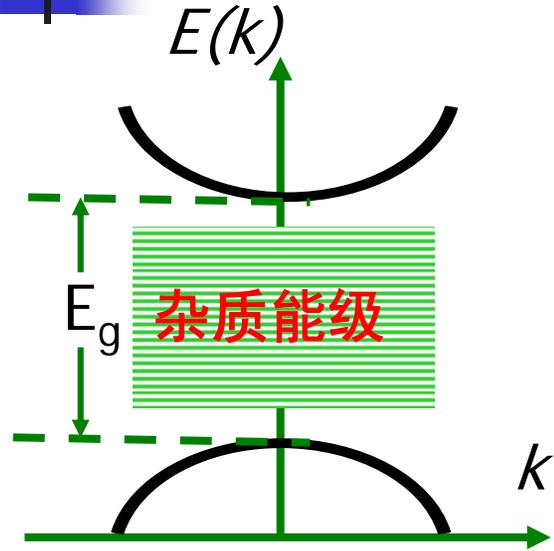
$$h\nu < E_g$$

激子吸收示意图

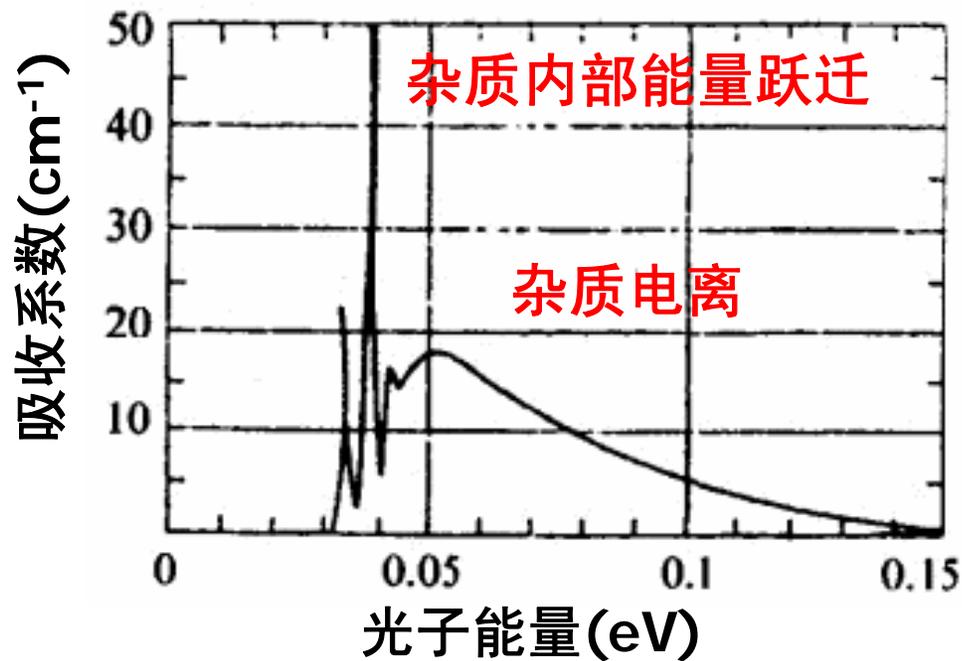


激子吸收谱

五 杂质吸收



杂质吸收中的电子跃迁



杂质吸收光谱 (Si)

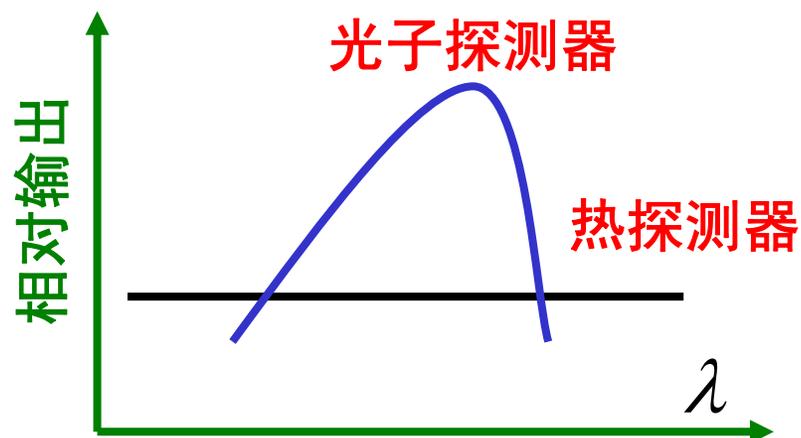
5.2 光探测的基本物理效应

光子效应：探测器吸收光子后，直接引起原子或分子的内部电子状态的改变。

特点：光子能量的大小直接影响内部电子状态的改变。
对光波频率具有选择性，响应速度快。

光热效应：光辐射能量转变为晶格热运动能量，引起元件温度上升，致使探测元件的电学或其它物理性质发生变化。

特点：对光波频率无选择性，
响应速度慢。



理想探测器的光谱响应

一 光子效应

1. 外光电效应（光电发射效应）

光电发射效应：在光照条件下，物体向表面以外的空间发射电子（光电子）的现象。



— 光子效应

1. 外光电效应（光电发射效应）

(1) 光子被材料吸收

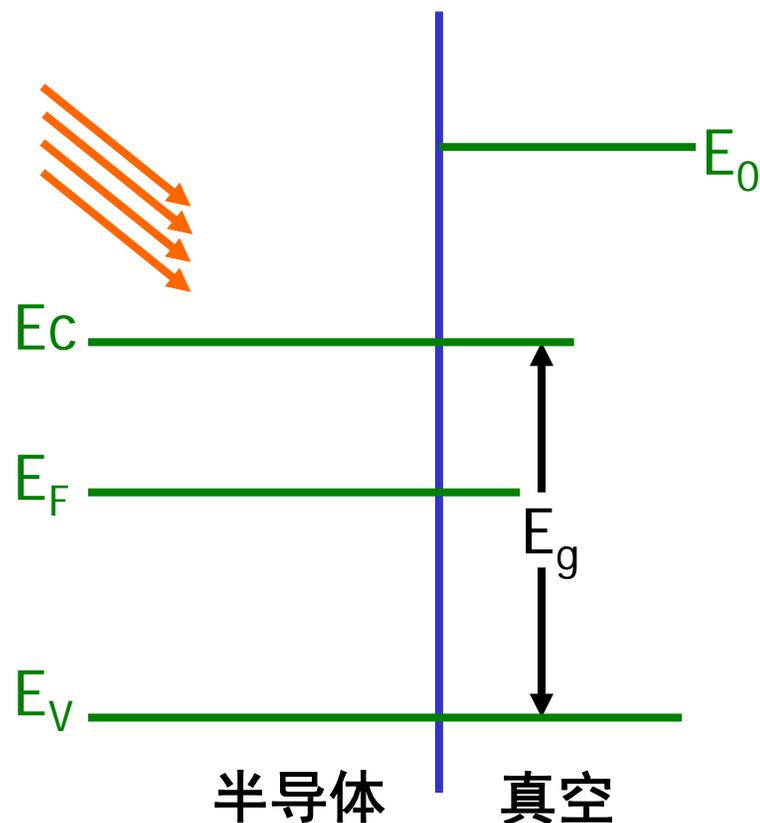
本征发射体：本征半导体吸收

例：铯光电阴极

铯钾钠铯光电阴极

杂质发射体：杂质吸收

例：银氧铯光电阴极



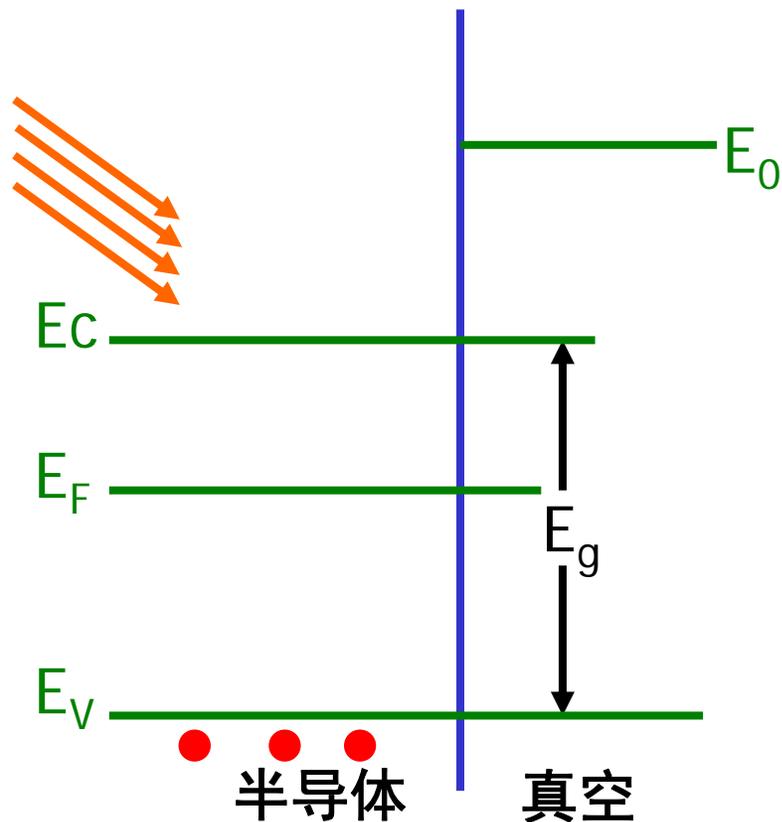
半导体能带和光电发射示意图

一 光子效应

1. 外光电效应（光电发射效应）

(2) 光电子向材料表面运动

能量损失 { 晶格散射
价带电子碰撞



半导体能带和光电发射示意图

一 光子效应

1. 外光电效应（光电发射效应）

(3) 光电子逸出界面

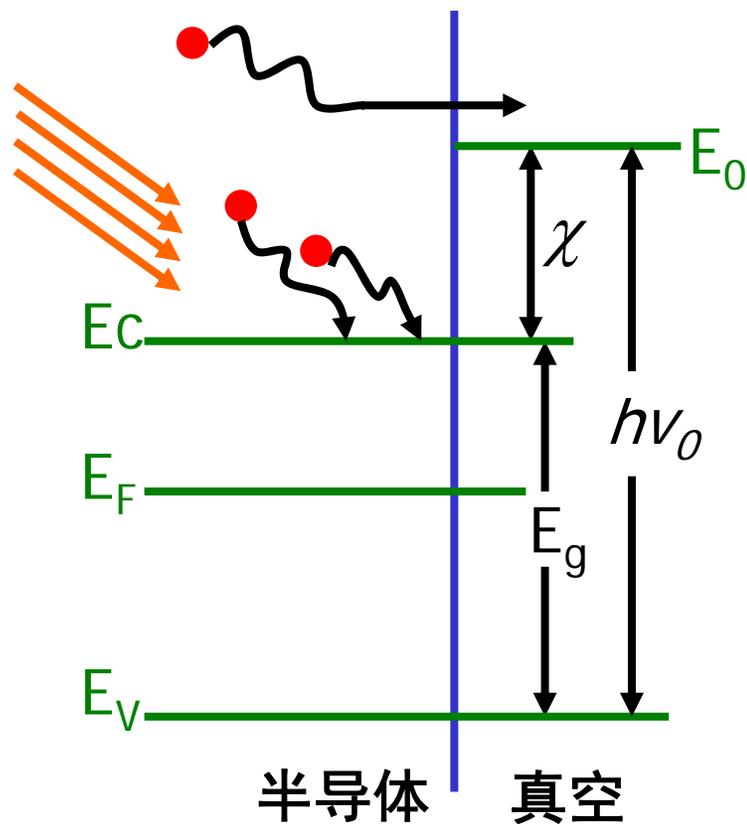
亲和势： $\chi = E_0 - E_c$

正电子亲和势光电阴极：

$$E_0 > E_c$$

负电子亲和势光电阴极：

$$E_0 < E_c$$



半导体能带和光电发射示意图

— 光子效应

1. 外光电效应（光电发射效应）

响应范围：可见光波段

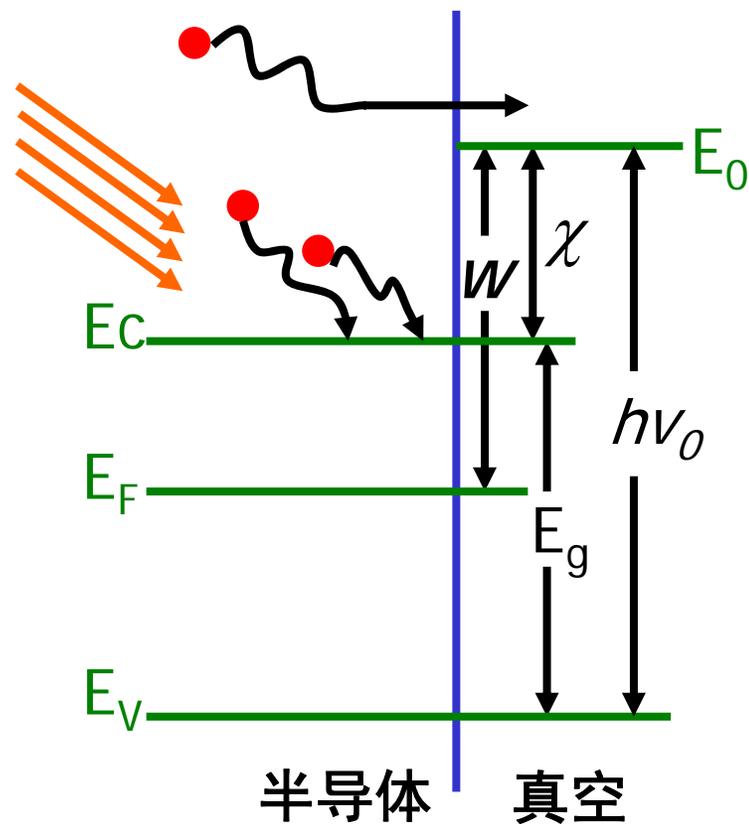
响应时间： 10^{-12}s

W ：逸出功

爱因斯坦定律：
$$\frac{1}{2}mv_{\max}^2 = h\nu - W$$

截止波长：
$$\lambda_c(\mu\text{m}) = \frac{1.24}{W(\text{eV})}$$

斯托列托夫定律：
$$I_K = S_K \Phi_V$$

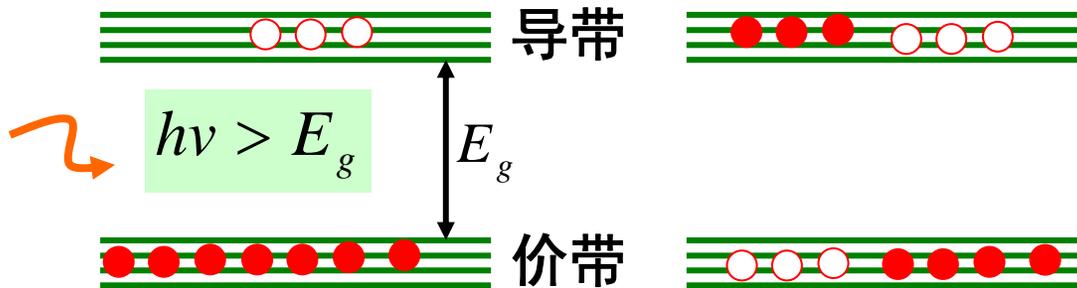


半导体能带和光电发射示意图

— 光子效应

2. 内光电效应

(1) 光电导效应—概念



载流子浓度增量:

$$\Delta n = \frac{N}{abc} \cdot \tau_n$$

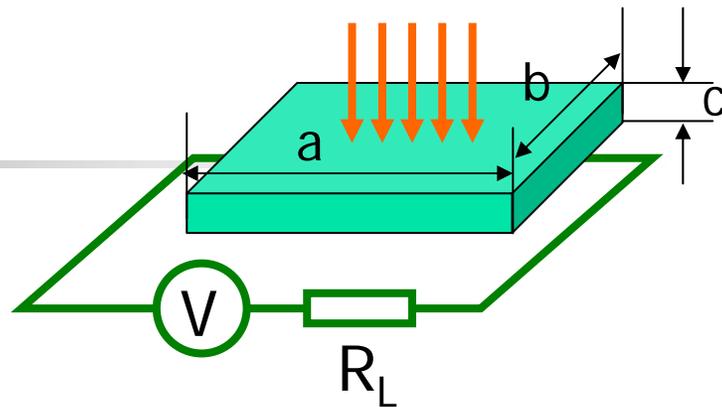
$$\Delta p = \frac{N}{abc} \cdot \tau_p$$

半导体电导率的增量:

$$\Delta \sigma = e(\Delta n \mu_n + \Delta p \mu_p)$$

半导体材料的电阻:

$$R_d = \frac{l}{(\sigma + \Delta \sigma)A}$$



光电导效应分析模型

— 光子效应

2. 内光电效应

(1) 光电导效应—概念

光照激发新产生的电子—空穴



半导体材料载流子数目增加



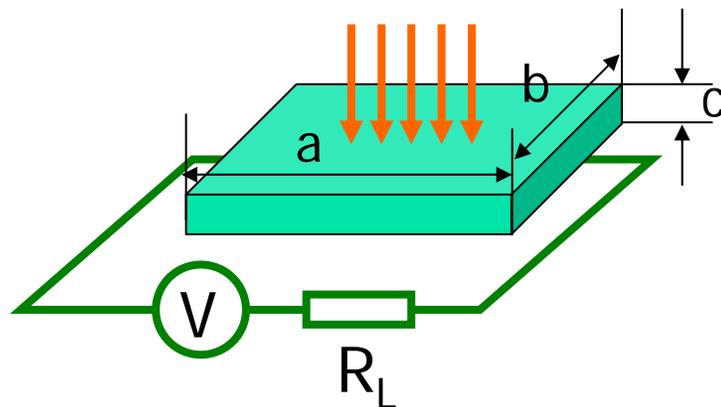
半导体电导率增加



半导体材料阻值下降

光波长:

$$\lambda(\mu m) \leq \lambda_c = \frac{1.24}{E_g(eV)} (\text{本征}) = \frac{1.24}{E_i(eV)} (\text{杂质})$$



光电导效应分析模型

— 光子效应

2. 内光电效应

(1) 光电导效应—增益

单位时间、单位体积内的光生载流子数目:

$$Q = \frac{\eta P}{h\nu abc}$$

单位时间、单位体积内因复合而消失的载流子数目:

$$R = \frac{\Delta n}{\tau}$$

$$\Delta n = \frac{\eta P \tau}{h\nu abc}$$

光生电流:

$$I = e\Delta n \mu_N bcE = e\eta \frac{P}{h\nu} \frac{\tau}{\frac{a}{\mu_N E}} = e\eta \frac{P}{h\nu} \frac{\tau}{T_d}$$

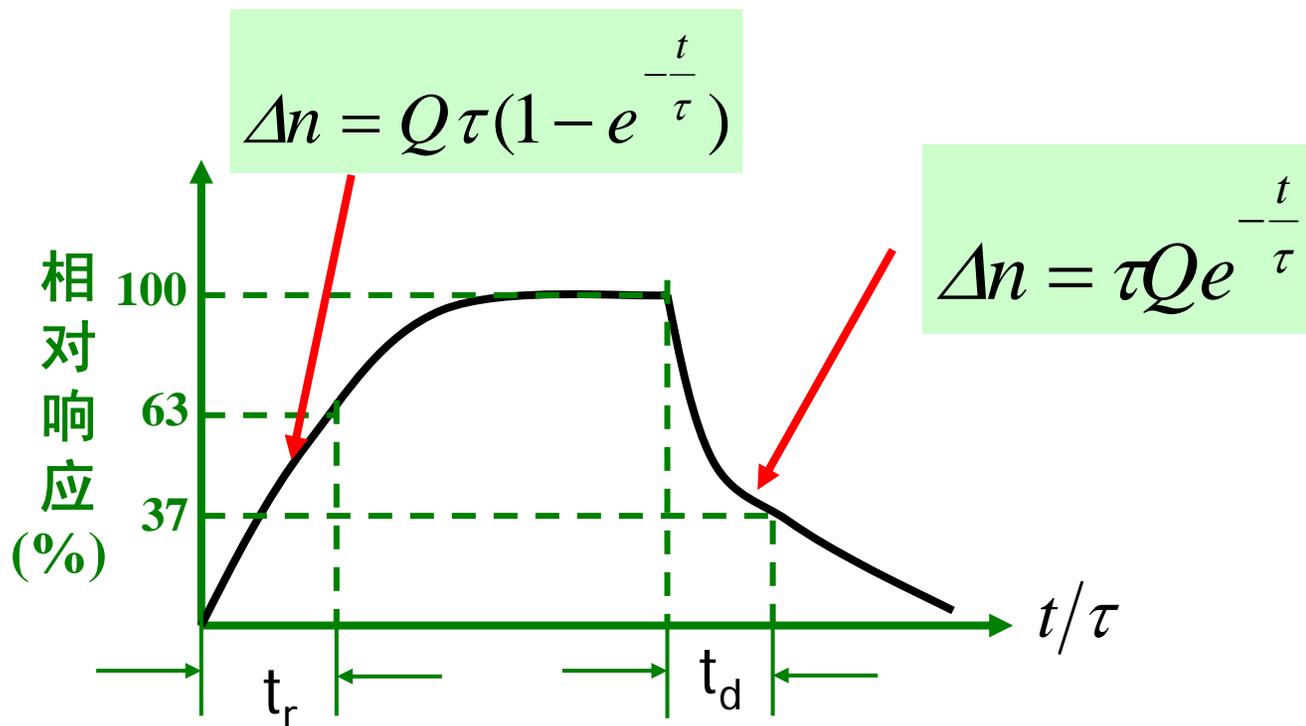
光电导增益:

$$G = \frac{\tau}{T_d} \left\{ \begin{array}{l} \leftarrow \text{光生载流子寿命} \\ \leftarrow \text{电子渡越时间} \end{array} \right.$$

— 光子效应

2. 内光电效应

(1) 光电导效应—弛豫

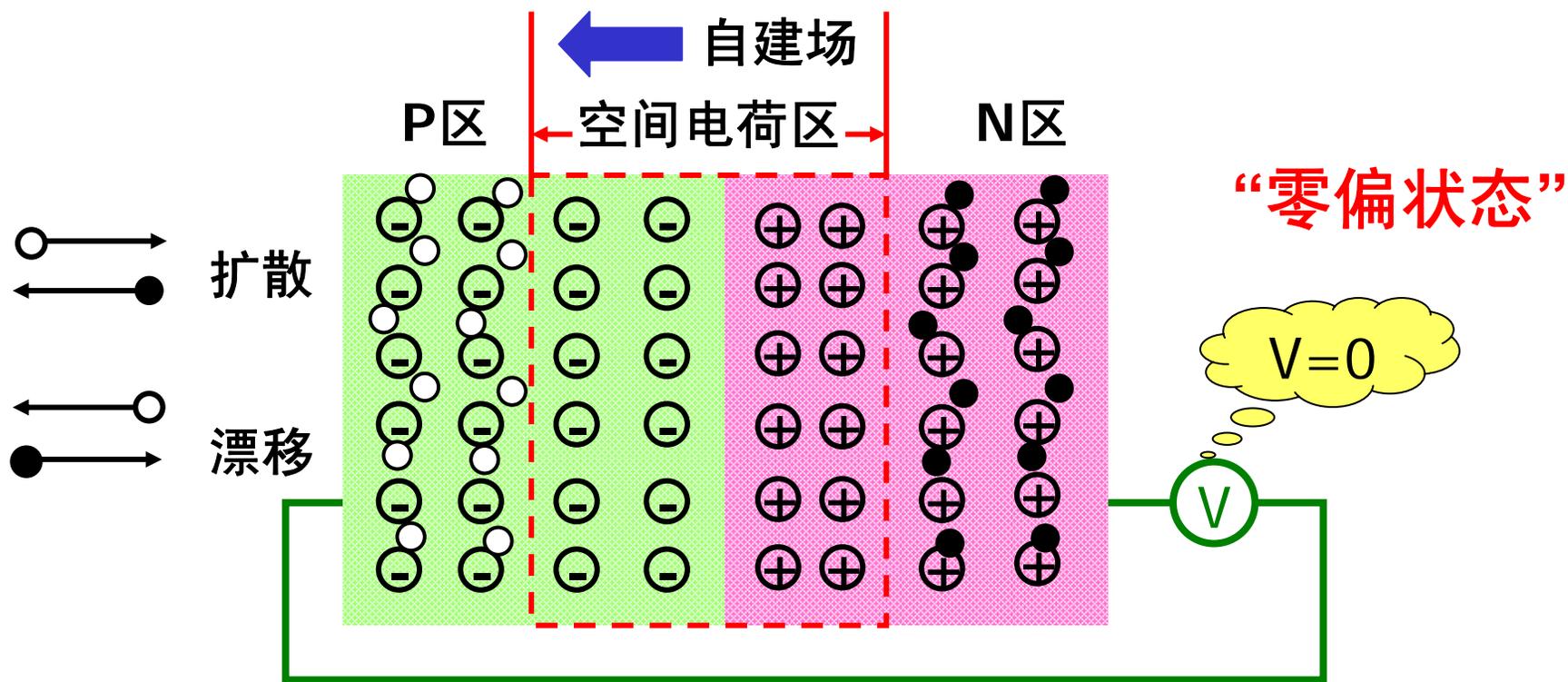


光电导弛豫现象

— 光子效应

2. 内光电效应

(2) 光伏效应—PN结的零偏状态



PN 结空间电荷区的形成

— 光子效应

2. 内光电效应

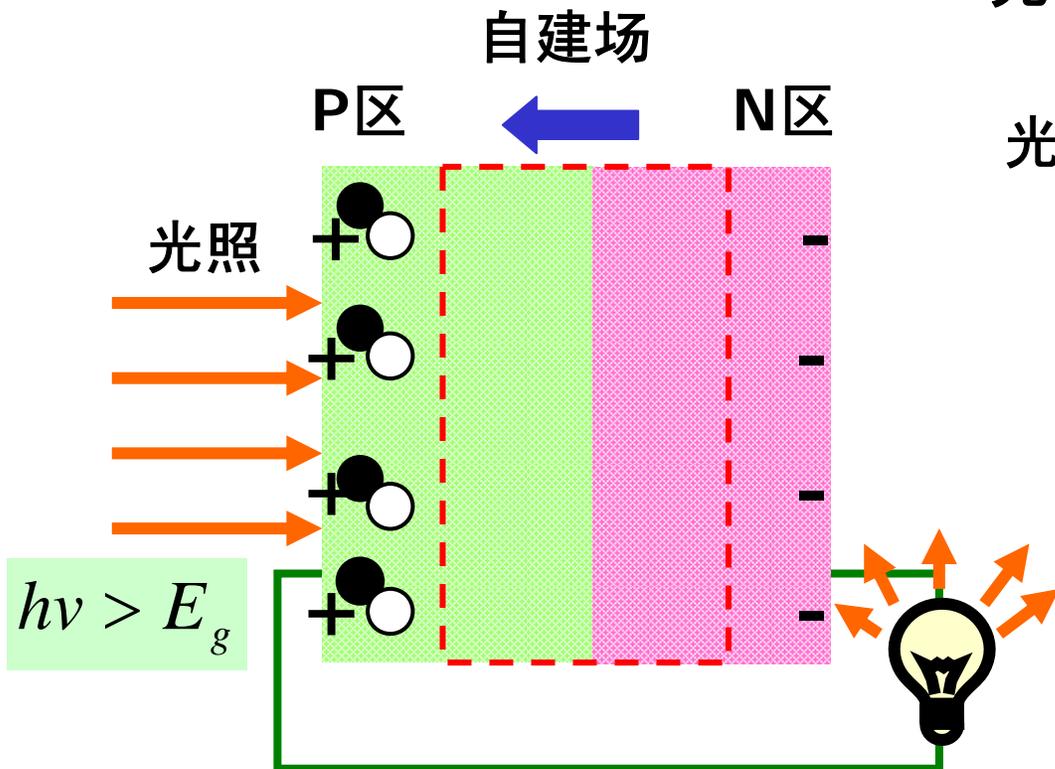
(2) 光伏效应—光照零偏PN结

光伏效应:

光照零偏PN结产生开路电压。

光波长:

$$\lambda(\mu m) \leq \lambda_c = \frac{1.24}{E_g(eV)}$$



二 光热效应

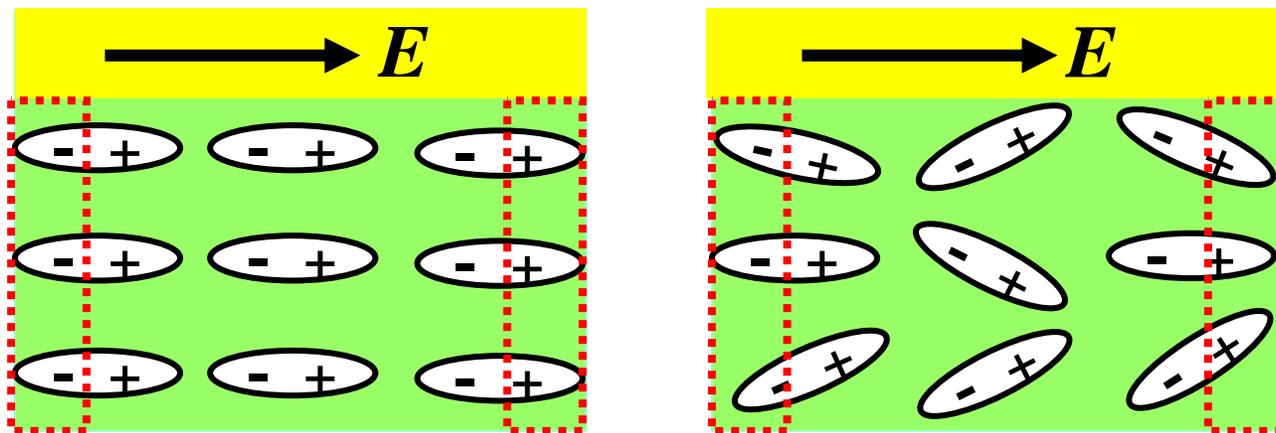
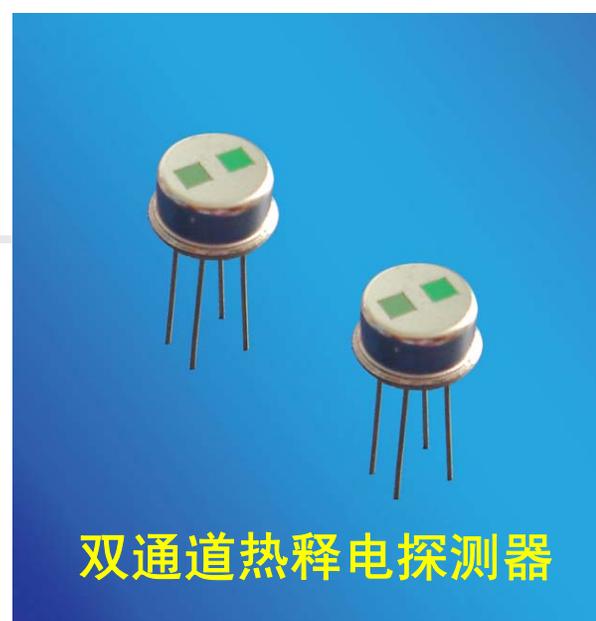
1. 热释电效应

电介质在电场中的极化现象：

非极性分子：分子内部正、负电荷重心重合。

极性分子：分子内部正、负电荷重心不重合。

自发极化：电介质去掉电场后仍能保持其极化状态。



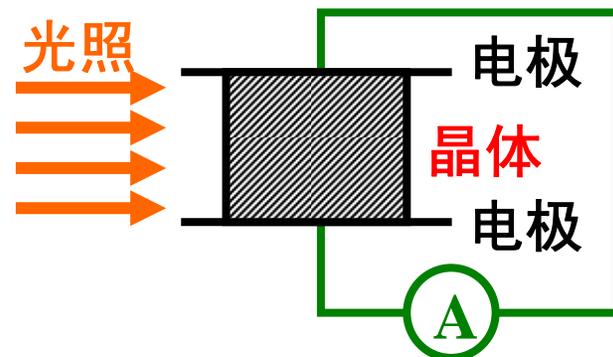
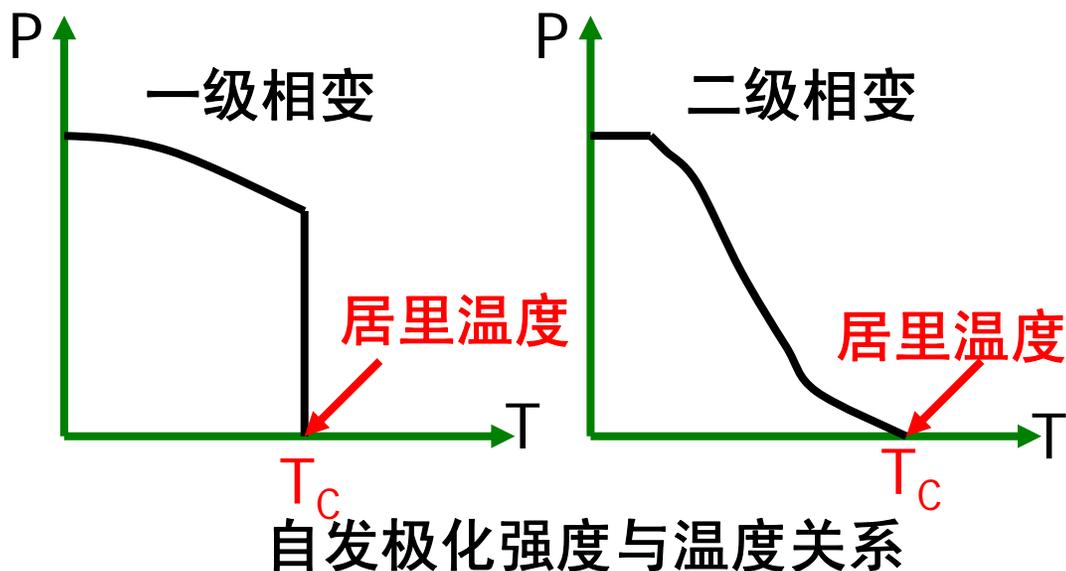
$$\sigma' = |P_s|$$

在外电场中的电介质

二 光热效应

1. 热释电效应

热释电现象：自发极化晶体表面呈现出相应于温度变化的面电荷变化。



注：热释电探测器是一种交流或瞬时响应的器件。

短路热释电流：
$$i = A \frac{dP}{dt} = A \frac{dP}{dT} \cdot \frac{dT}{dt} = A\beta \frac{dT}{dt}$$

热释电系数：

$$\beta = \frac{dP}{dT}$$

二 光热效应

1. 热释电效应

几种常用热释电材料的性能

材料	居里温度($^{\circ}\text{C}$)	热释电系数 ($\times 10^{-8}\text{C}/(\text{cm}\cdot\text{K})$)
TGS	49	4.0
LiTaO ₃	618	2.3
PZT	200	≈ 18
LiNbO ₃	1200	0.4
PbTiO ₃	470	6.0
SBN	115	6.5
PVF ₂	120	0.24

二 光热效应

2. 测辐射热计效应

测辐射热计效应：光辐射使材料受热导致电阻率变化的现象。

$$\Delta R = \alpha_T \Delta TR$$

电阻的温度系数

$\alpha_T > 0$: 正温度系数

$\alpha_T < 0$: 负温度系数

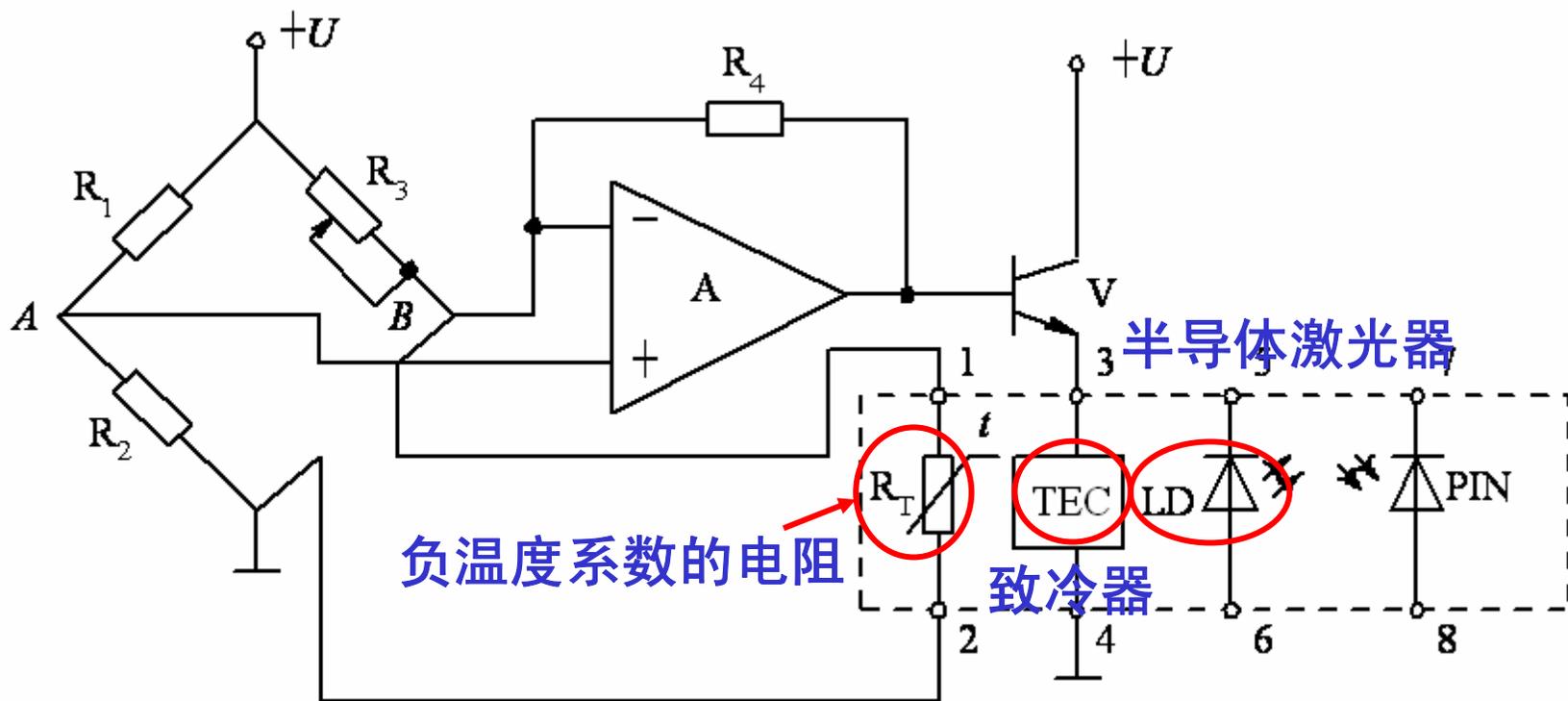
金属: $\alpha_T = \frac{1}{T}$

半导体: $\alpha_T = -\frac{B}{T^2}$

二 光热效应

2. 测辐射热计效应—应用

热敏电阻：锰、镍、铜氧化物或锗、硅等半导体



温度控制电路实例

二 光热效应

3. 温差电效应

两种不同材料两端熔接



若光照熔接端



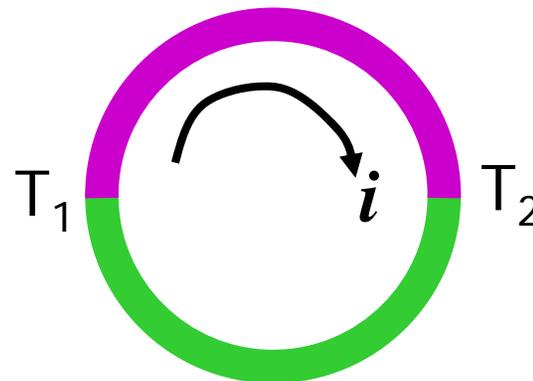
两接头温度不同



并联回路中产生温差电动势



回路中形成正比于光能量的电流

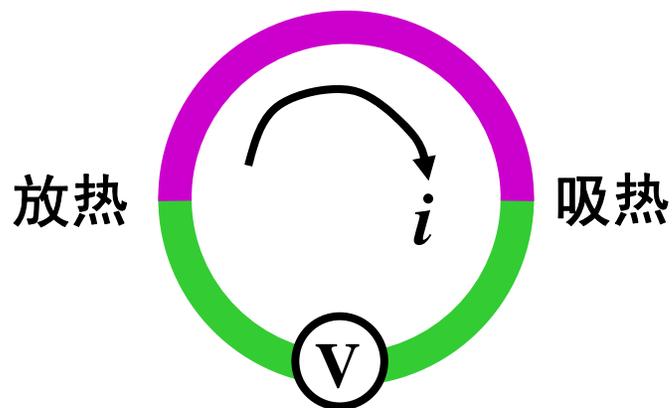


温差电效应示意图

二 光热效应

3. 温差电效应

(1) 珀耳贴效应



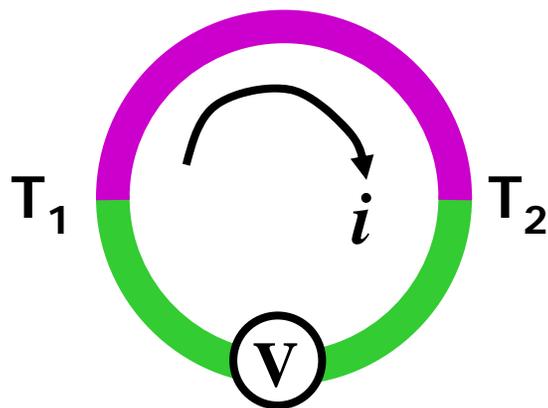
$$\frac{d\theta_P}{dt} = \Pi I$$

$\Pi(V)$: 珀耳贴系数, 表示单位电流通过接头时所吸收或放出的热功率。

二 光热效应

3. 温差电效应

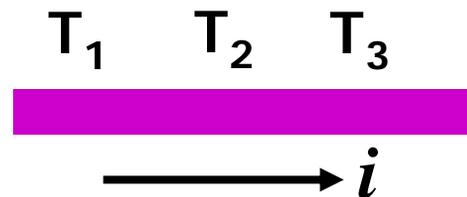
(2) 塞贝克效应



$$V = \int_{T_0}^T S dT$$

$S(V/K, \mu V/K)$: 塞贝克系数

(3) 汤姆逊效应

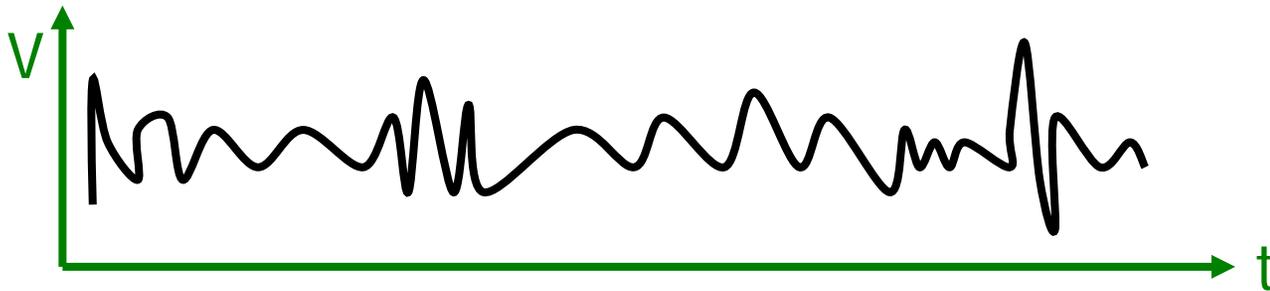


$$\frac{d\theta}{dt} = \mu \frac{dT}{dx} I$$

$\mu(V/K)$: 汤姆逊系数

5.3 光辐射探测过程中的噪声

一 噪声来源

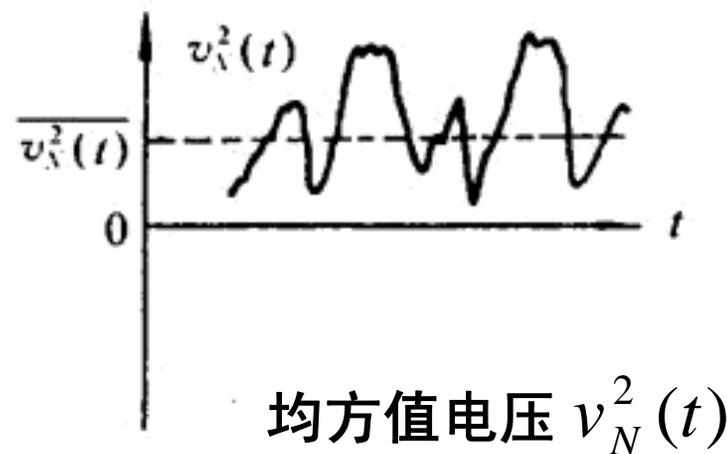
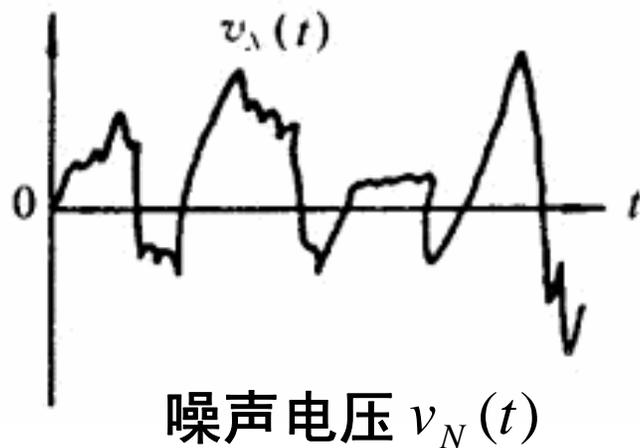


噪声电压波形图

- 散粒噪声（量子噪声）
- 暗电流噪声
- 热噪声
- 产生—复合噪声

二 噪声的主要特性

1. 噪声统计特性



均方噪声功率

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{v_N^2} = \overline{[v_N(t)]^2} \\ \overline{i_N^2} = \overline{[i_N(t)]^2} \end{array} \right.$$

二 噪声的主要特性

2. 噪声的功率谱密度

功率谱密度 $S_N(\nu)$: 对噪声的随机时间函数进行傅利叶频谱分析, 得到的噪声功率随频率的变化关系。

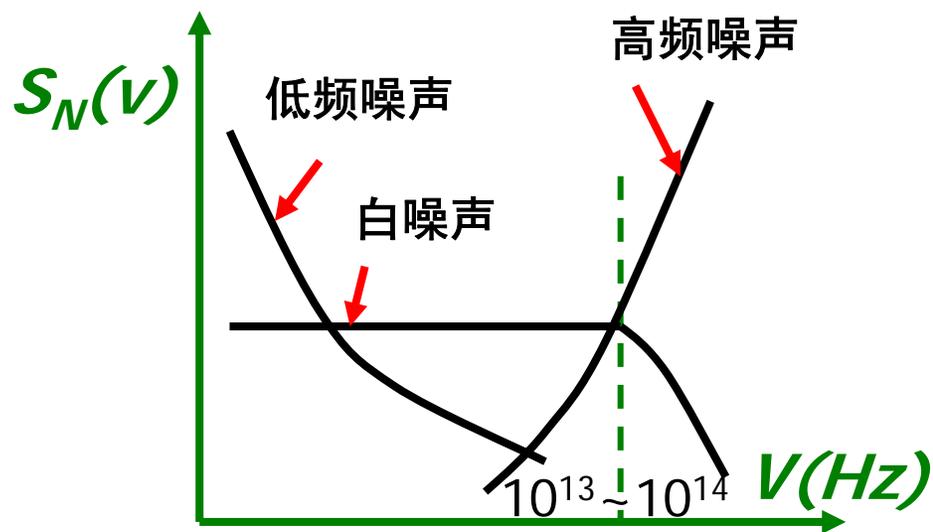
$$S_N(\nu) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{\overline{i_N^2(\nu, \Delta \nu)}}{\Delta \nu}$$

白噪声: 在较宽的频率范围内,
 $S_N(\nu)$ 与频率无关

低频噪声: $S_N(\nu)$ 与 ν 成反比

高频噪声: $S_N(\nu)$ 与 ν^2 成正比

噪声功率: $i_N^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_N(\nu) d\nu$



典型噪声功率谱密度曲线₃₀

二 噪声的主要特性

3. 噪声的相关性

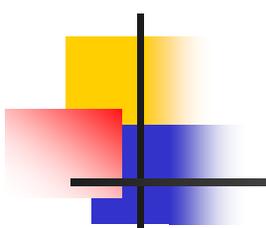
不同时刻的噪声取值彼此之间可建立一定的联系，则称其**相关**；否则称为噪声无关。

非相关噪声源：总噪声功率为各个噪声功率的简单叠加。

$$\overline{i_{N总}^2} = \overline{i_{N1}^2} + \overline{i_{N2}^2} + \overline{i_{N3}^2} + \dots$$

完全相关噪声源：总噪声均方根电流等于各个噪声均方根电流的叠加。

$$\sqrt{\overline{i_{N总}^2}} = \sqrt{\overline{i_{N1}^2}} + \sqrt{\overline{i_{N2}^2}} + \sqrt{\overline{i_{N3}^2}} + \dots$$



三 几种主要噪声源

1. 光电子噪声电流（量子噪声）

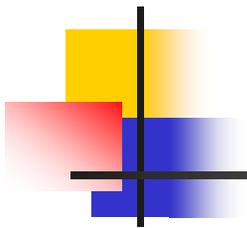
- 光子发射、电子发射、电子流中存在的随机起伏
- 光电子从阴极表面逸出的随机起伏
- PN结中的载流子通过结区的随机起伏

$$\overline{i_Q^2} = \overline{\delta i_p^2} = 2eI_p \Delta\nu$$

2. 暗电流与漏电流

无光照时流经探测器的电流。

$$\overline{i_D^2} = 2eI_D \Delta\nu$$



三 几种主要噪声源

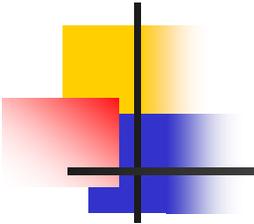
3. 倍增噪声

具有电流内增益的光电探测器件其倍增因子的随即起伏引入的附加噪声源。

4. 产生—复合噪声

载流子不断产生和复合，使得载流子浓度存在随机起伏，引起器件电导率起伏，使输出电流中带有该噪声。

$$\overline{i_N^2} = 4eI\Delta\nu G$$



三 几种主要噪声源

5. $1/v$ 噪声

由半导体与电极的接触情况、内部及表面势垒引起的噪声源。

$$\overline{i_N^2} = \frac{KI^\alpha \Delta v}{v^\beta}$$

6. 热噪声

在电阻及放大电路中，由于热激发出现大量载流子的不规则热运动，产生随即起伏的电流，形成热噪声。

$$\overline{i_N^2} = \frac{4kT\Delta v}{R}$$

四 描述噪声作用的参量

1. 信噪比

$$SNR(dB) = 10 \lg \frac{S}{N}$$

3. 等效噪声带宽

$$\Delta\nu_{eq} = \int_0^{\infty} \frac{|A(\nu)|^2}{A_p^2} d\nu$$

2. 信噪比改善系数

$$SNIR = \frac{(SNR)_o}{(SNR)_i}$$

4. 噪声系数

$$F_N = \frac{(SNR)_i}{(SNR)_o}$$

四 描述噪声作用的参量

5. 等效噪声功率和探测度

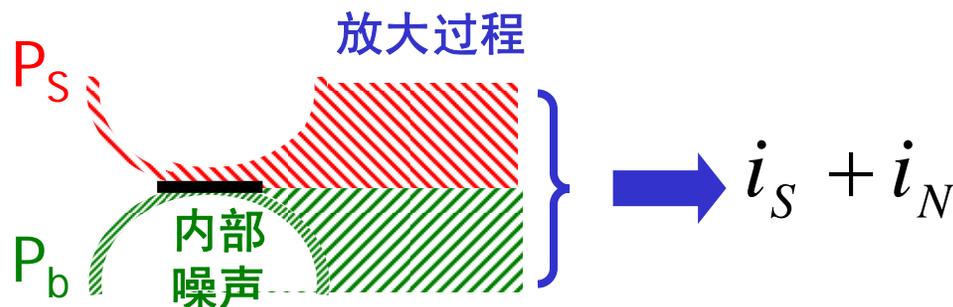
判据：信号光电流等于噪声电流

噪声等效功率NEP：单位信噪比条件下所能探测的信号光功率

$$NEP(W) = P_S \Big|_{(SNR)_i=1} = P_S \Big|_{(SNR)_u=1}$$

探测度D:

$$D = \frac{1}{NEP}$$



包含噪声在内的光电探测过程