

第五章 光辐射的探测

§ 5-1 物质中的光吸收

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。主要发生在价带顶部和导带底部之间。

条件： $h\nu \geq E_g = h\nu_0$

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

1. 直接跃迁

波矢为 k 的电子吸收光子后跃迁到波矢为 k' 的状态时， k 和 k' 的关系为

$$h(k' - k) = \text{光子动量} \quad (5.1)$$

由于光子动量与能带中电子动量相比很小，上式可近似为 $k' = k$ 。

准动量守恒：即电子吸收能量后动量基本保持不变。

直接跃迁：在 $E(k)$ 曲线中，电子动量基本保持不变。表现为电子跃迁前后状态在同一垂线上，也称垂直跃迁。

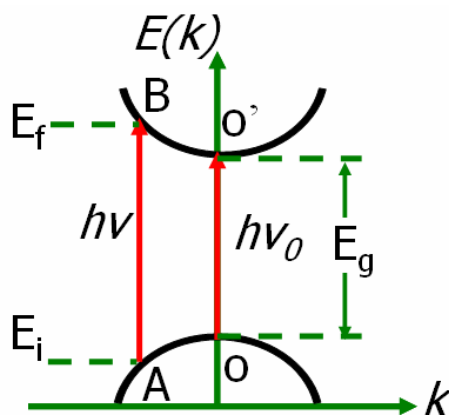


图 5.1 电子的直接跃迁

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。该类半导体受光照射后电子跃迁几率较大，如 GaAs, InSb。

2. 间接跃迁

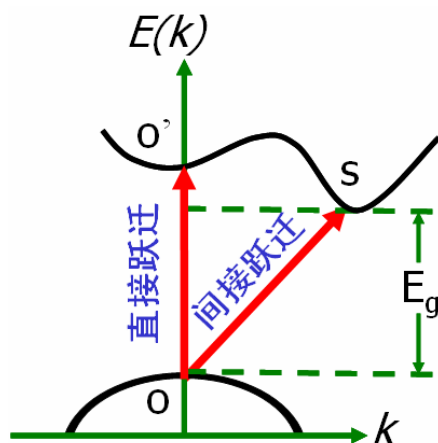


图 5.2 直接跃迁和间接跃迁比较

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，本征吸收的长波限不是对应于 k 空间原点的直接跃迁，而是对应于间接跃迁，即在跃迁过程中动量发生变化。如 Si, Ge。

要实现这种跃迁，除吸收光子外，还有借助于声子，可发射声子也可吸收声子。

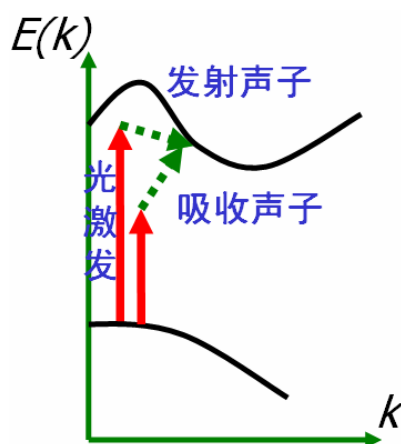


图 5.3 有声子参与的吸收过程

二、晶格振动吸收

在 $10\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ 的红外波段，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。

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**。频率为 ν_a 的格波具有量子化的能量：

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

当晶格和其它物质（电子、光子等）相互作用发生能量交换时，晶格原子的振动状态发生改变，格波能量随之变化，其改变量只能是 $h\nu_a$ 的整数倍， $h\nu_a$ 称为 **声子**。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。

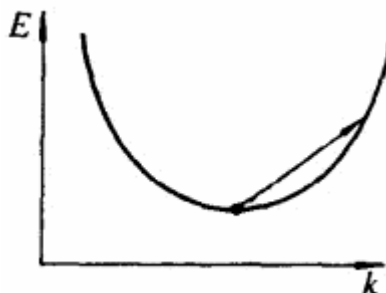


图 5.4 自由载流子的吸收

四、激子吸收

光子能量小于 E_g 时，价带中的电子虽跃出价带，但无足够的能量到达导带，而仍然受到空穴的库仑作用力不能成为自由电子。此时受激电子与价带中的空穴相互束缚组成一个新系统：电子与空穴没有完全分离，也没有完全复合。这种束缚状态称为**激子**。这种激子能够在半导体中运动，也称为自由激子。

激子吸收谱主要位于本征吸收的长波限附近。

五、杂质吸收

杂质能级通常位于禁带中，是在离导带不远（施主能级）或离价带不远（受主能级）的位置。

光照射到晶体上，杂质能级也可能参与光吸收过程，电子吸收光子跃迁到导带，或电子离开价带跃迁到杂质能级，这类吸收称为杂质吸收。

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

光热效应：探测器将吸收的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。**对光波频率无选择性，响应速度慢。**

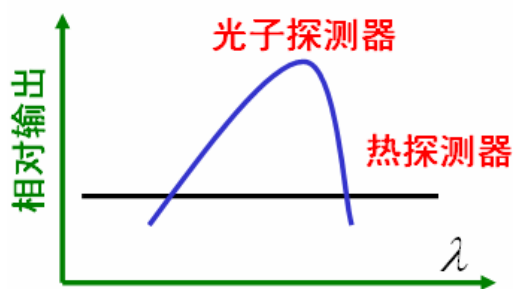


图 5.5 理想探测器的光谱响应

一、光子效应

1. 外光电效应（光电发射效应）

响应范围：可见光波段

响应时间： 10^{-12}s

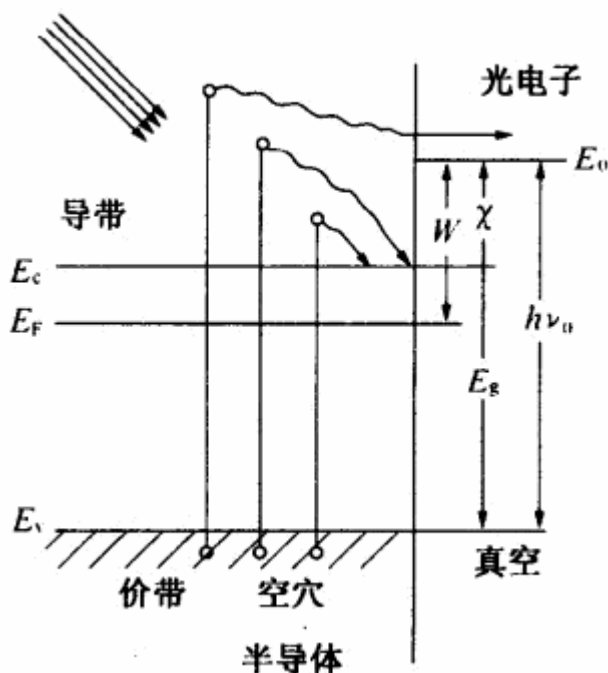


图 5.6 半导体能带和光电发射示意图

(1) 光子被材料吸收

电子被激发后的能量必须高于真空能级 E_0 才有可能最终逸出表面。

本征发射体：由本征半导体吸收光子而产生光电子的发射体。

（铯铯光电阴极，铯钾钠铯光电阴极）

杂质发射体：由杂质吸收造成的光电子发射体。（银氧铯光电阴极）

(2) 光电子向材料表面运动

光子照射到物质表面并渗透到一定深度，在此范围内被吸收，电子跃迁至高能态。

被激发电子在向界面运动过程中，光电子能量主要通过两种方式损失：
晶格散射和与价带电子碰撞。

(3) 光电子逸出界面

电子亲和势 χ ：

$$\chi = E_0 - E_c \quad (5.2)$$

正电子亲和势光电阴极： $E_0 > E_c$

负电子亲和势光电阴极： $E_0 < E_c$ ，如重掺杂 P 型材料。

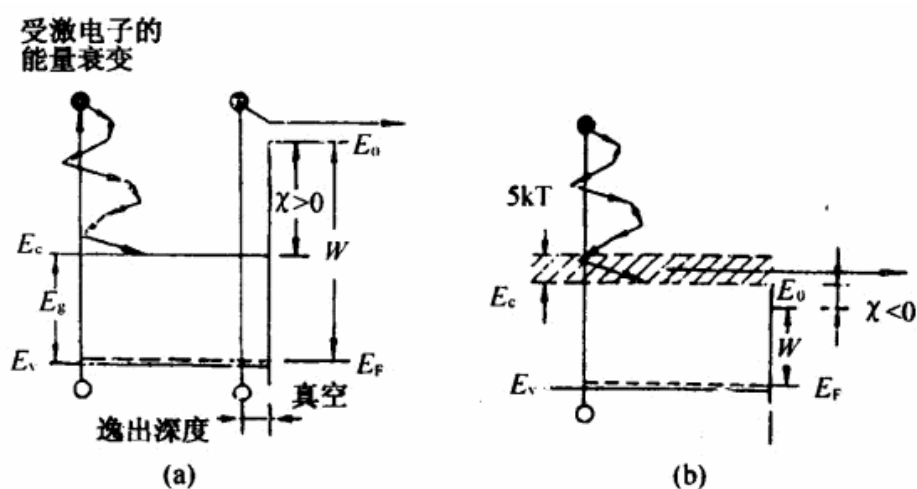


图 5.7 普通光电阴极和负电子亲和势光电阴极的能带

光电转换基本定律：

(1) 爱因斯坦定律

$$\frac{1}{2}mv_{\max}^2 = h\nu - W \quad (5.3)$$

(2) 斯托列托夫定律

$$I_K = S_K \Phi_V \quad (5.4)$$

2. 内光电效应

(1) 光电导效应

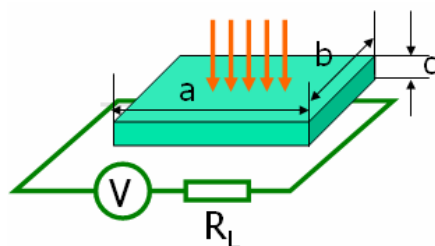


图 5.8 光电导效应原理图

光电导效应：由光照激发新产生的电子—空穴对增加了原来半导体材料中载流子的数目。载流子数目的增加伴随着半导体中电导率的增加（电导率和载流子数目成正比），电导率的增加使其电阻率变小，从而造成电阻阻值下降。

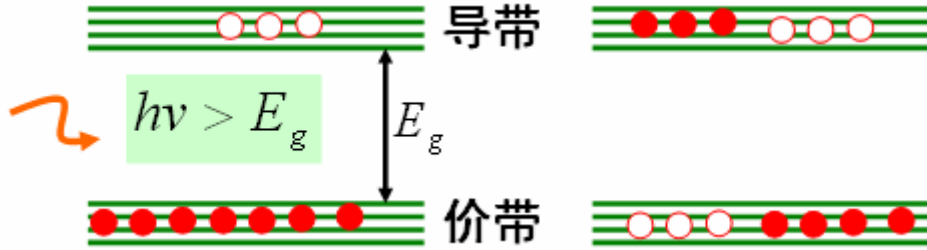


图 5.9 光电导效应示意图

光辐射端电压为 V 的半导体，若波长满足

$$\lambda(\mu m) \leq \lambda_c = \frac{1.24}{E_g(eV)} (\text{本征}) = \frac{1.24}{E_i(eV)} (\text{杂质}) \quad (5.5)$$

光辐射每秒钟激发的电子—空穴对数 N 可表示为

$$\begin{cases} \Delta n = \frac{N}{abc} \cdot \tau_n \\ \Delta p = \frac{N}{abc} \cdot \tau_p \end{cases} \quad (5.6)$$

则半导体电导率的增量 $\Delta\sigma$ 可表示为

$$\Delta\sigma = e(\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p) \quad (5.7)$$

半导体材料的电阻变为

$$R_d = \frac{l}{(\sigma + \Delta\sigma)A} \quad (5.8)$$

(2) 光伏效应

光伏效应：光照零偏 PN 结产生开路电压。

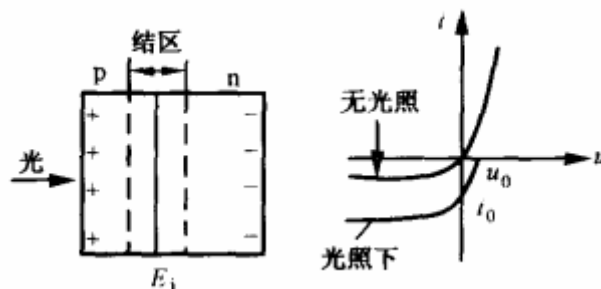


图 5.10 光生伏特效应示意图

PN 结在零偏状态下，若入射光波长满足

$$\lambda (\mu m) \leq \frac{1.24}{E_i (eV)} \quad (5.9)$$

会激发电子—空穴对。若光照 P 区，光生空穴对 P 区空穴浓度影响很小，而光生电子对 P 区电子浓度的影响却很大，从 P 区表面向区内形成电子的扩散趋势。若 P 区的厚度小于电子扩散长度，大部分光生电子将扩散进入 PN 结。一旦进入结区，光生电子就被内电场扫向 N 区。光生电子—空穴对被电场分离，空穴在 P 区，电子进入 N 区。此时用电压表可测量出 P 区正、N 区负的开路电压。

光伏探测器的工作模式：

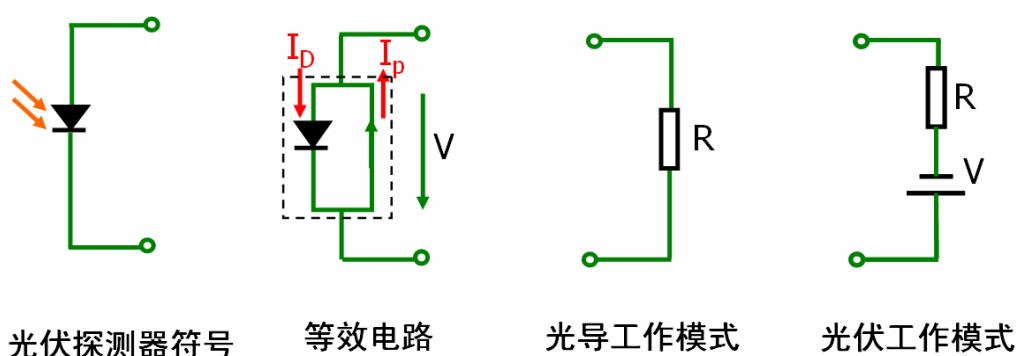


图 5.11 光伏探测器的工作模式

流过探测器的总电流为

$$I = I_D - I_p = I_{so} \left[\exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right] - i_p \quad (5.10)$$

利用上式可得下图所示的光伏探测器的伏安特性曲线。

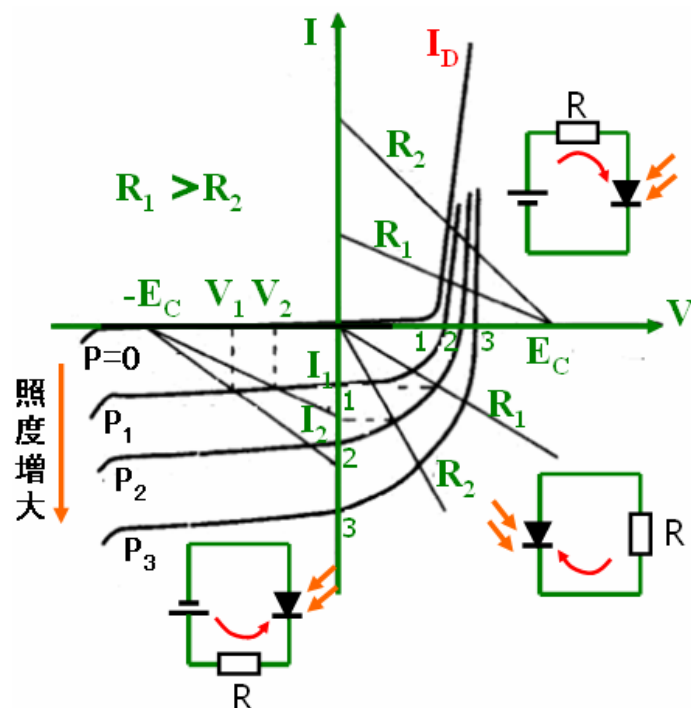


图 5.12 光伏探测器的伏安特性曲线

第一象限：光生电流 i_ϕ 不起主要作用，无意义。

第三象限：光生电流为探测器的主要电流，对应光导工作模式（**光电二极管**）。

第四象限：光伏工作模式（**光电池**）。

二、光热效应

1. 热释电效应

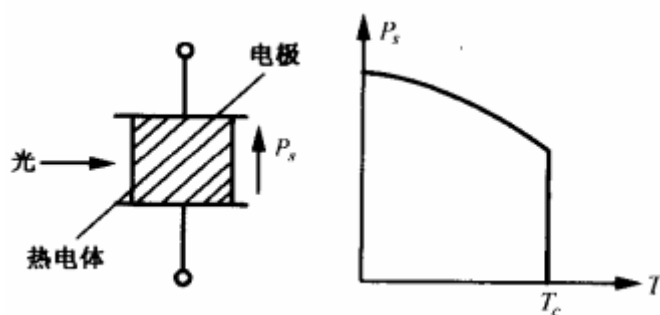


图 5.13 热释电效应

自发极化：电介质去掉电场后仍能保持其极化状态。

热释电现象：热电体表面呈现出相应于温度变化的面电荷变化。

短路热释电流：

$$i = A \frac{dP_s}{dt} = A \frac{dP_s}{dT} \cdot \frac{dT}{dt} = A\beta \frac{dT}{dt} \quad (5.11)$$

热释电探测器均为**交流或瞬时响应**的器件。

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。

电阻随温度的变化规律为

$$\Delta R = \alpha_T \Delta T R \quad (5.12)$$

其中 α_T 为电阻的温度系数， $\alpha_T > 0$ ：正温度系数； $\alpha_T < 0$ ：负温度系数。

金属材料： $\alpha_T = \frac{1}{T}$ ；半导体材料： $\alpha_T = -\frac{B}{T^2}$ (常数 B 的典型值为 3000K)。

3. 温差电效应

温差电效应：使用两种不同的材料（可选择金属或半导体）两端熔接，若光照熔接端，两接头温度不同，并联回路中就会产生温差电动势，回路中即可形成正比于光能量的电流。

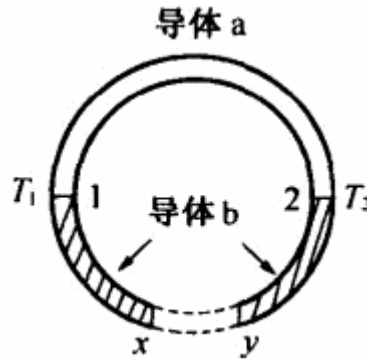


图 5.14 温差电效应示意图

(1) 珀耳贴效应

在两种导体串联组成的回路上的 x, y 两点引入电动势，则导体中有电流 I 流过，同时出现一个接头吸热、一个接头放热的现象。电流与吸（放）热速率成正比：

$$\frac{d\theta_p}{dt} = \Pi I \quad (5.13)$$

Π ：珀耳贴系数，表示单位电流在通过接头时所吸收或放出的热功率，单位 V 。

(2) 塞贝克效应

由两种不同的导体或半导体构成回路，两个结点分别置于不同的温度环境中（温差为 ΔT ），两结点间便会产生电动势 V （温差电动势），从而在回路中引起电流。

$$V = \int_{T_0}^T S dT \quad (5.14)$$

S :塞贝克系数, 单位 V/K 或 $\mu V/K$ 。

(3) 汤姆逊效应

在单一均匀导体中, 如果在电流 I 流动的方向上存在温差, 则该段导体上会出现吸(放)热现象。载流子能量差异由温度梯度引起。吸(放)热速率为

$$\frac{d\theta}{dt} = \mu \frac{dT}{dx} I \quad (5.15)$$

μ :汤姆逊系数, 表示材料在单位温差条件下通过单位电流时吸收或放出的热, 单位 V/K 。

三个系数直接的关系:

$$S = \frac{\Pi}{T} \quad (5.16)$$

$$\frac{dS}{dT} = \frac{\mu_a - \mu_b}{T} \quad (5.17)$$

§ 5-3 光辐射探测过程中的噪声

一、噪声来源

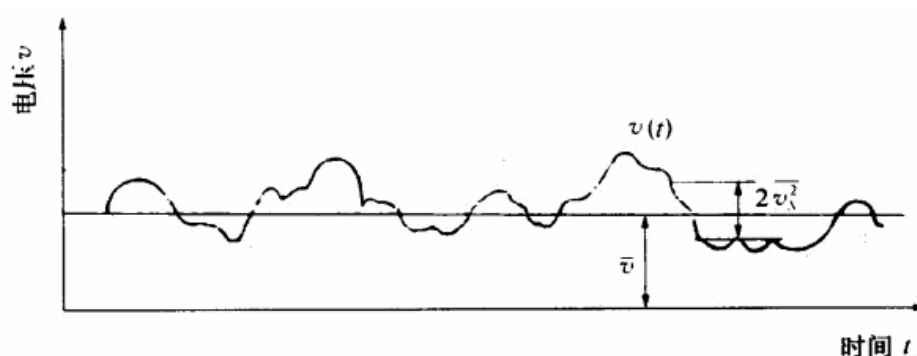


图 5.15 噪声电压波形图

1. 散粒噪声(量子噪声)
2. 暗电流噪声
3. 热噪声
4. 产生—复合噪声
5. 热噪声

二、噪声的主要特性

1. 噪声统计特性

采用均方值表示随即起伏的噪声量。

实际应用中, 均方噪声功率可写为:

$$\overline{v_N^2} = \overline{[v_N(t)]^2} \quad (5.18)$$

$$\overline{i_N^2} = \overline{[i_N(t)]^2} \quad (5.19)$$

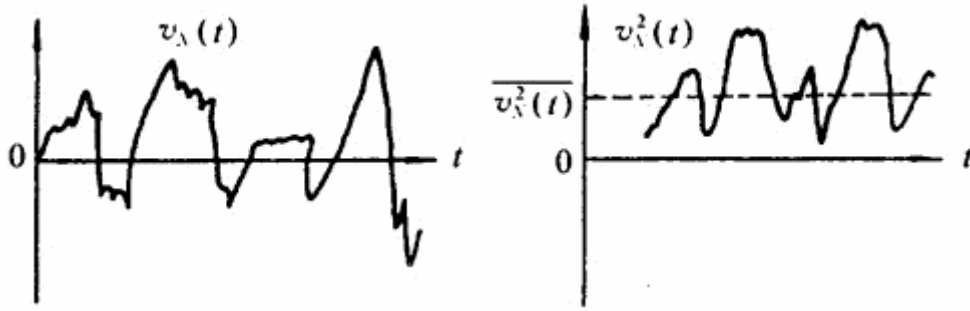


图 5.16 噪声电压 $v_N(t)$ 及其均方值电压 $v_N^2(t)$

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, 即噪声的功率频率谱分布。定义为

$$S_N(\nu) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{\overline{i_N^2(\nu, \Delta \nu)}}{\Delta \nu} \quad (5.20)$$

由功率谱密度可求得噪声功率为

$$i_N^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_N(\nu) d\nu \quad (5.21)$$

白噪声: 在较宽的频率范围内, 功率谱密度 $S_N(\nu)$ 大小与频率无关。

低频噪声: $S_N(\nu)$ 与 ν 成反比, 又称 $1/\nu$ 噪声。

高频噪声: $S_N(\nu)$ 与 ν^2 成正比。

抑制噪声的方法: 减小系统带宽, 使用滤波器等。

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。

$$\overline{i_{N\text{总}}^2} = \overline{i_{N1}^2} + \overline{i_{N2}^2} + \overline{i_{N3}^2} + \dots \quad (5.22)$$

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。

$$\sqrt{\overline{i_{N\text{总}}^2}} = \sqrt{\overline{i_{N1}^2}} + \sqrt{\overline{i_{N2}^2}} + \sqrt{\overline{i_{N3}^2}} + \dots \quad (5.23)$$

三、几种主要噪声源

1. 光电子噪声电流（量子噪声）

在光子发射、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和 PN 结中的载流子通过结区的随机起伏均为散粒噪声源。

$$\overline{i_Q^2} = \overline{\delta i_p^2} = 2eI_p \Delta v \quad (5.24)$$

2. 暗电流与漏电流

无光照时流经探测器的电流，具有随即起伏的性质。

$$\overline{i_D^2} = 2eI_D \Delta v \quad (5.25)$$

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

半导体器件中，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。

$$\overline{i_N^2} = 4eI \Delta v G \quad (5.26)$$

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。

$$\overline{i_N^2} = \frac{KI^\alpha \Delta v}{v^\beta} \quad (5.27)$$

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。

$$\overline{i_N^2} = \frac{4kT \Delta v}{R} \quad (5.28)$$

四、描述噪声作用的参量

1. 信噪比

$$SNR(dB) = 10 \lg \frac{S}{N} \quad (5.29)$$

2. 信噪比改善系数

$$SNIR = \frac{(SNR)_o}{(SNR)_i} \quad (5.30)$$

3. 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。

探测度 D :

$$D = \frac{1}{NEP} \quad (5.31)$$

4. 等效噪声带宽

$$\Delta\nu_{eq} = \int_0^\infty \frac{|A(\nu)|^2}{A_p^2} d\nu \quad (5.32)$$

5. 噪声系数

$$F_N = \frac{(SNR)_i}{(SNR)_o} \quad (5.33)$$