

第七章 光电转换器件

表 7-1 光子效应分类

| | 效应 | 相应的探测器 | |
|-------|-------|------------|---------|
| 外光电效应 | 光电子发射 | 光电管 | |
| | 光电子倍增 | 光电倍增管、像增强管 | |
| 内光电效应 | 光电导 | 光敏电阻、光导管 | |
| | 光生伏特 | PN 结零偏 | 光电池 |
| | | PN 结反偏 | 光电二极管 |
| | | 雪崩 | 雪崩光电二极管 |
| 肖特基势垒 | | 肖特基势垒光电二极管 | |

表 7-2 光热效应分类

| 效应 | 相应的探测器 |
|---------|-----------------------|
| 测辐射热计效应 | 热敏电阻、金属测辐射热计、超导远红外探测器 |
| 温差电效应 | 热电偶、热电堆 |
| 热释电效应 | 热释电探测器 |

§ 7-1 光电导探测器

一、 光电导器件工作特性

1. 响应度（灵敏度）

电流响应度：

$$R_I = \frac{I}{P} (A/W) \quad (7.1)$$

电压响应度：

$$R_V = \frac{V}{P} (V/W) \quad (7.2)$$

2. 光谱特性

峰值响应波长为

$$\lambda_m (\mu m) = \frac{1.24}{E_g (eV)} \quad (7.3)$$

杂质和晶格缺陷所形成的能级与导带间禁带宽度比价带与导带间的主禁带宽度窄——光谱响应向长波长方向扩展；

光敏电阻对短波长光吸收系数大，在表层载流子浓度高，自由载流子在表层复合速度快——对波长短于峰值波长的光响应灵敏度降低。

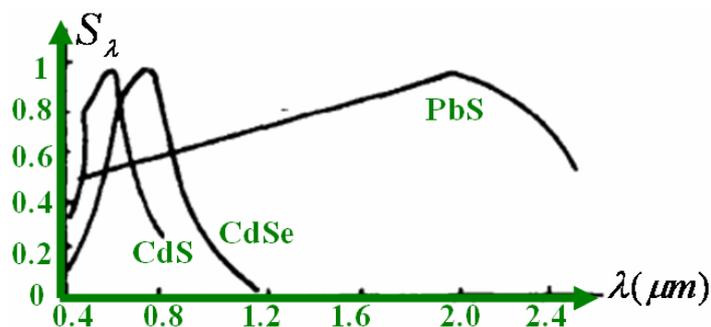


图 7.1 三种光敏电阻的光谱响应特性

3. 照度特性

外加电压一定时，光生电流与光照度关系：

$$I = KV^\alpha E^\gamma \quad (\text{非线性}) \quad (7.4)$$

低偏压、弱光照条件下可近似为：

$$I = KVE \quad (7.5)$$

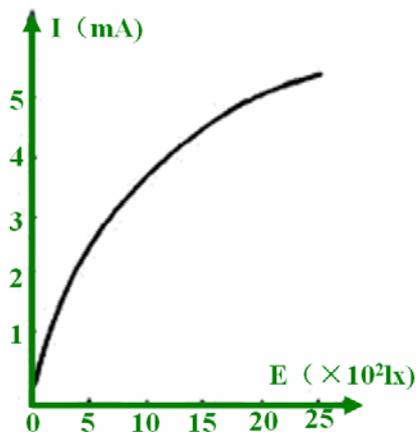


图 7.2 CdS 光敏电阻的光照特性曲线

4. 响应速度

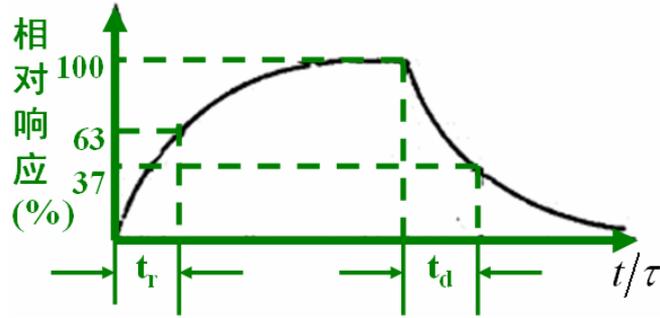


图 7.3 光电导的驰豫

t_r : 光生电流从零上升到 $0.63I_0$ 时所需时间;

t_d : 光生电流从稳定值下降到 $0.37I_0$ 时所需时间。

响应时间决定了器件对调制频率的影响: 当调制频率升高, 响应度比低频时的响应度下降, 变化关系为

$$R_v = \frac{R_{v0}}{(1 + \omega^2 \tau^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (7.6)$$

截止频率: R_v 下降到 R_{v0} 的 0.707 倍时对应的 ω 值。

5. 温度效应

温度升高时产生的影响:

- 热噪声变大
- 灵敏度降低
- 峰值响应波长向短波长方向移动
- 响应时间下降

6. 噪声特性

工作频率 > 1MHz: 热噪声为主要噪声源

工作频率 < 1kHz: $1/\nu$ 噪声为主要噪声源

1MHz > 工作频率 > 1kHz: 产生一复合噪声为主要噪声源

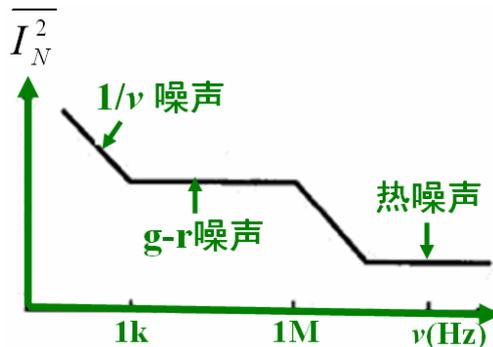


图 7.4 典型光电导探测器的噪声功率谱

7. 基本工作电路

暗电阻：在室温和全暗条件下测得的稳定电阻值称为暗电阻，或暗阻。此时流过的电流称为暗电流。

亮电阻：在一定光照条件下测得的稳定电阻值称为亮电阻或亮阻。此时流过的电流称为亮电流。

(1) 低频条件下的负载匹配问题

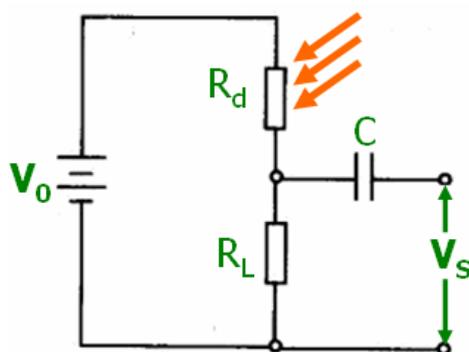


图 7.5 光电导探测器工作电路

在一定光照条件下，回路电流：

$$i = \frac{V_0}{R_L + R_d} \quad (7.7)$$

光照强度发生变化时回路电流：

$$i + \Delta i = \frac{V_0}{R_L + R_d + \Delta R_d} \quad (7.8)$$

电流变化量：

$$\Delta i = -\frac{V_0 \Delta R_d}{(R_L + R_d + \Delta R_d)(R_L + R_d)} \approx -\frac{V \Delta R_d}{(R_L + R_d)^2} \quad (7.9)$$

端电压变化量：

$$\Delta V_s = \Delta i R_L = -\frac{V \Delta R_d R_L}{(R_L + R_d)^2} \quad (7.10)$$

使 V_s 有最大值时的负载电阻：

$$(\Delta V_s)'_{R_L} = 0 \Rightarrow R_d = R_L \quad (\text{最佳匹配条件}) \quad (7.11)$$

(2) 偏压选择问题

电流在负载电阻上产生的热损耗功率：

$$\left[\frac{V_0}{R_L + R_d} \right]^2 R_d \leq P_{\max} (\text{最大耗散功率}) \quad (7.12)$$

当 $R_d = R_L$ 时, 有 $V_0 \leq (4R_d P_{\max})^{1/2}$

二 几种典型的光敏电阻

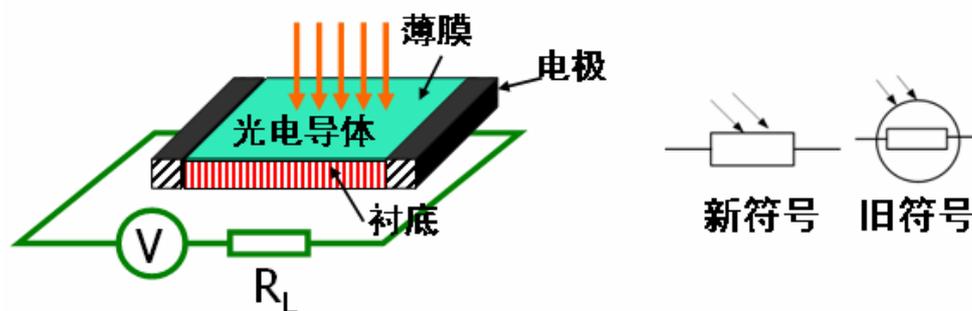


图 7.6 光敏电阻原理图及符号

特点：自身电阻随光照强度可变，光照越强，阻值越小。

1. 种类

- (1) CdS 和 CdSe：自动化技术和摄影机中的光计量。
- (2) PbS：遥感技术和武器红外制导。
- (3) InSb：快速红外信号探测。

2. 使用注意事项

- (1) 光源光谱须与光敏电阻的光谱响应特性匹配。
- (2) 防止杂散光影响。
- (3) 电压、功耗等电参数不超过允许值。
- (4) 根据不同用途选择不同特性的光敏电阻。

3. 光敏电阻的典型应用

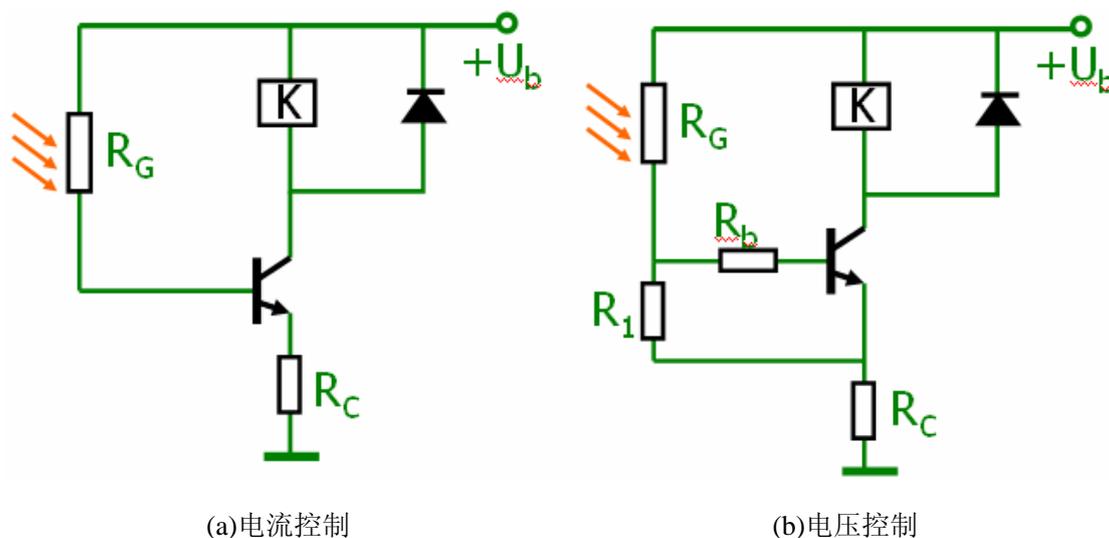


图 7.7 光控光开关电路

电流控制电路：光照时 R_G 下降 \rightarrow 晶体管的基极电流增大 \rightarrow 集电极电流增大 \rightarrow 继电器吸合

电压控制电路： R_G 与 R_1 的分压控制晶体管的基极电压 \rightarrow 晶体管导通或截止

§ 7-2 光电池

一 光电池的结构与原理

原理：光生伏特效应

应用：

- (1) 光电探测器，光电耦合、激光准直等
- (2) 电源，如野外灯塔、无人气象站等

结构：

- (1) 金属—半导体接触型：硒光电池
- (2) PN 结型：硅光电池

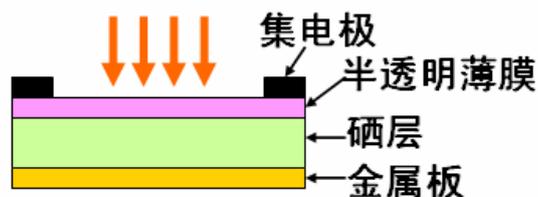


图 7.8 金属—半导体型光电池结构图

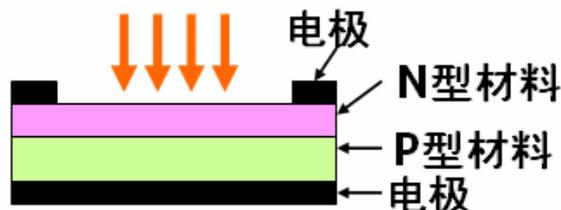


图 7.9 PN 结型光电池结构图

二 光电池特性

1. 光谱特性

硒光电池：400~700nm，峰值响应波长 540nm，适用于可见光波段。

普通硅光电池：400 nm~1100 nm，峰值响应波长 800~900nm，适用于可见光和近红外波段。

蓝硅光电池：峰值响应波长 600nm 附近。

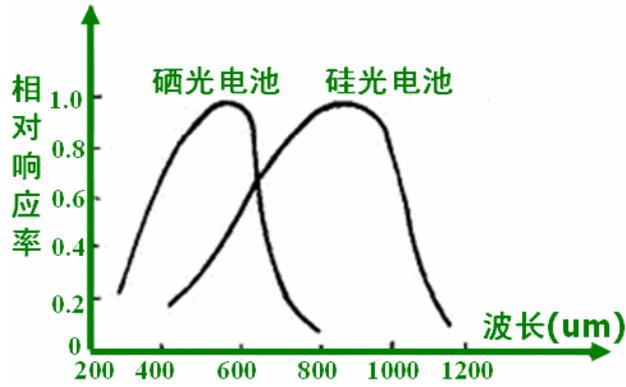


图 7.10 光电池光谱特性曲线

2. 伏安特性

即输出电流和电压随负载电阻变化的特性。

短路电流：在一定光功率照射下将光电池两端用一低内阻电流表短接，所测得的电流值。

开路电压：在一定光功率照射下将光电池两端开路，用一高内阻电压表所测电压值。

注：实际工作中光电池的开路电压和短路电流不是计算而是实际测量得到的。

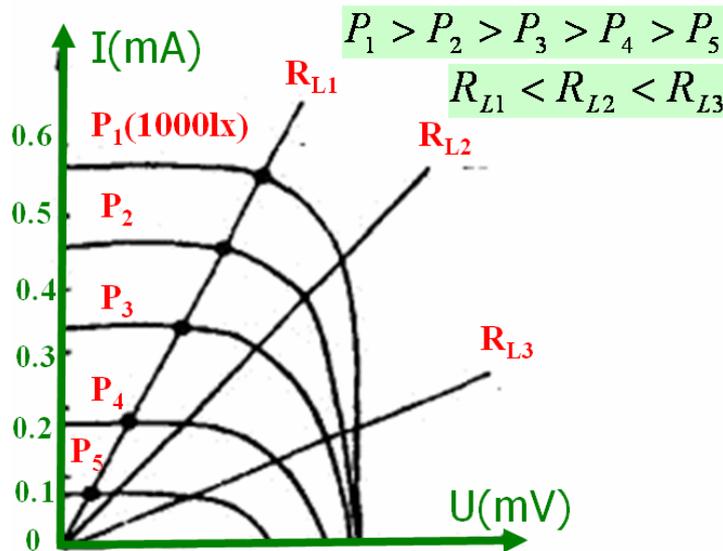


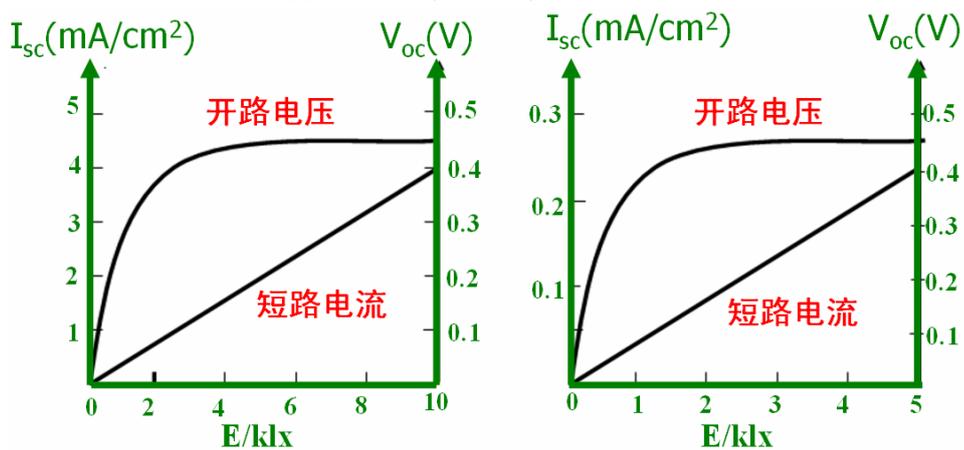
图 7.11 硅光电池的输出特性

3. 光照特性

短路电流 I_{sc} ：与光照度在一定范围内成线性关系。光照度较小时， I_{sc} 很小；当光照度过大时， I_{sc} 趋于饱和。

开路电压 V_{oc} ：随着照度增加， V_{oc} 增加很快，但当照度增加到一定程度时，内部非平衡载流子已基本分别集中在 PN 结的两端，使 V_{oc} 随

照度变化缓慢，出现饱和现象。



(a) 硅光电池

(b) 硒光电池

图 7.12 光电池的光照特性曲线

当负载不为零时，光电流与光照度成非线性关系，负载越大，非线性越显著。

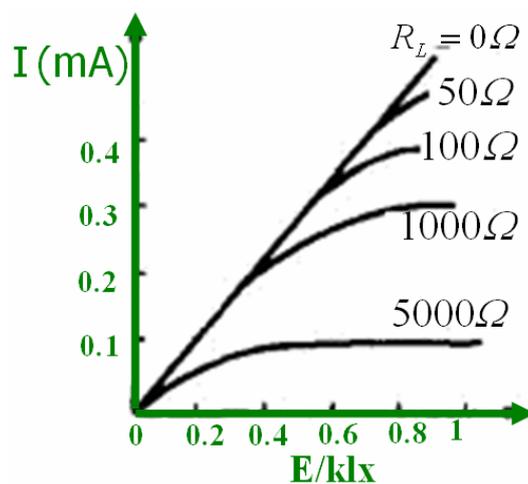


图 7.13 硒光电池的光照特性与负载电阻的关系

4. 频率特性

光电池 PN 结面积大，极间电容大，频率特性较差。

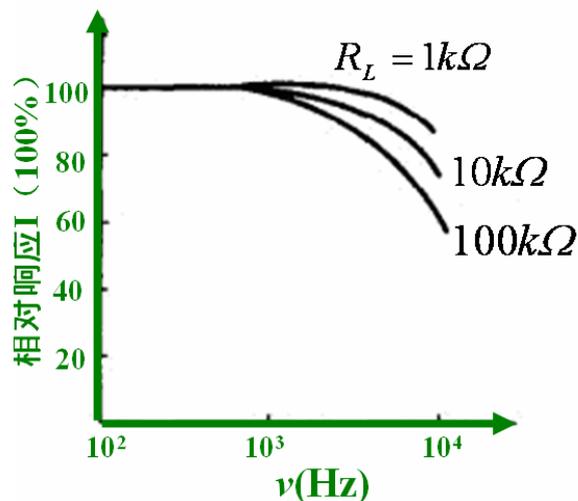


图 7.14 硅光电池的频率特性曲线

5. 温度特性

硒光电池结温 $<50^{\circ}\text{C}$ ，硅光电池结温 $<200^{\circ}\text{C}$ 。

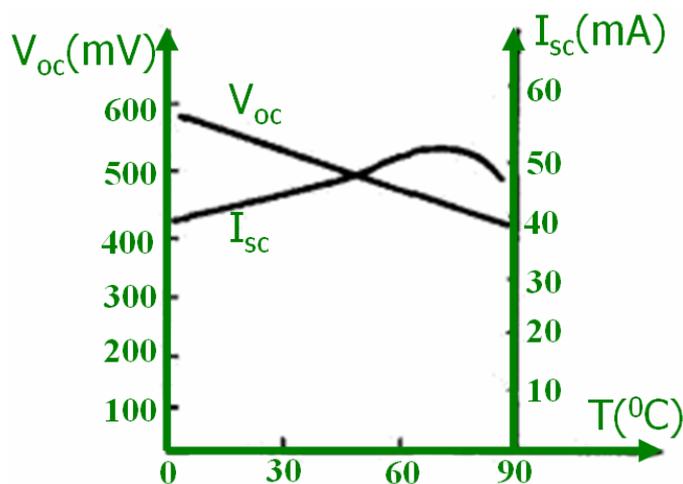


图 7.15 光电池的温度特性曲线

6. 输出功率和最佳负载电阻

光电池电输出功率： $P = ui$

光电池转换效率：最大电输出功率与入射光功率的比值，即

$$\eta = \frac{P_m}{P_0} (10\% \sim 15\%) \tag{7.13}$$

最佳负载电阻：获得最大电功率输出时的负载电阻。

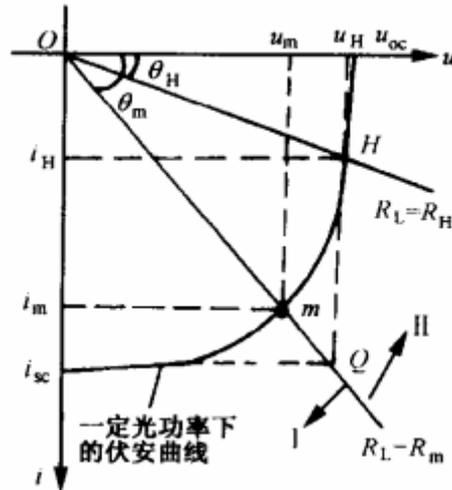


图 7.16 硅光电池输出功率曲线示意图

作图法寻找最佳负载电阻数值 R_m ：过开路电压 u_{OC} 及短路电流 i_{SC} 做伏安特性曲线的切线，两切线相交于 Q 点。连接 OQ 与伏安特性曲线的交点 m 点，即得

$$R_m = \frac{1}{\tan \theta_m} \tag{7.14}$$

注： R_m 数值随光功率增大而减小。

三 太阳能电池

- 在实际使用中为获得较大的输出电压，常采用多个电池串并连组合使用
- 为实现稳定供电，将光电池组和蓄电池组合使用
- 为提高光电转换效率，采用表面制绒技术

§ 7-3 光电二极管

光电二极管和光电池一样，都是基于 PN 结的光伏效应而工作的，但和光电池有所不同，主要有：

- (1) 就制作基底材料的掺杂浓度而言，光电池的掺杂浓度较高，约为 $10^{16} \sim 10^{19}$ 原子数/cm³，而硅光电二极管约为 $10^{12} \sim 10^{13}$ 原子数/cm³。
- (2) 光电池的电阻率较低，约为 0.1~0.01 欧姆/cm，而硅光电二极管则为 1000 欧姆/cm。
- (3) 光电池在零偏下工作，而硅光电二极管通常在反向偏置下工作。
- (4) 光电池的受光面积要比光电二极管大的多，所以硅光电二极管的光电流要小的多，通常在微安量级。

工作原理:

入射光照射探测器表面，当入射光波长满足

$$\lambda(\mu\text{m}) \leq \lambda_c = \frac{1.24}{E_g(\text{eV})} \quad (7.15)$$

在耗尽区产生电子—空穴对（PN 结价带电子吸收光能跃迁到导带，价带随之产生空穴），即光生载流子。在反向偏压提供的外电场力作用下，电子向 N 区移动，空穴向 P 区移动，载流子的定向运动形成与光照强度成正比的光生电流。

一 光电二极管的工作特性**1. 光电转换特性****(1) 量子效率**

表示入射光子能够转换成光电流的概率。当入射功率中含有大量光子时，量子效率可用转换成光电流的光子数和入射的总光子数的比来表示。即

$$\eta = \frac{I_p/e}{P/h\nu} \quad (7.16)$$

(2) 响应度（灵敏度）

入射功率和光生电流的转换关系也可以直接用响应度来表示，即

$$R_0(\mu\text{A}/\mu\text{W}) = \frac{I_p}{P_0} = \eta \frac{e\lambda}{hc} \quad (7.17)$$

2. 光谱特性

光电二极管的截止波长定义为

$$\lambda_c(\mu\text{m}) = \frac{1.24}{E_g(\text{eV})} \quad (7.18)$$

硅光电二极管： $\lambda_c \approx 0.9\mu\text{m}$ ；锗光电二极管： $\lambda_c \approx 1.6\mu\text{m}$ 。

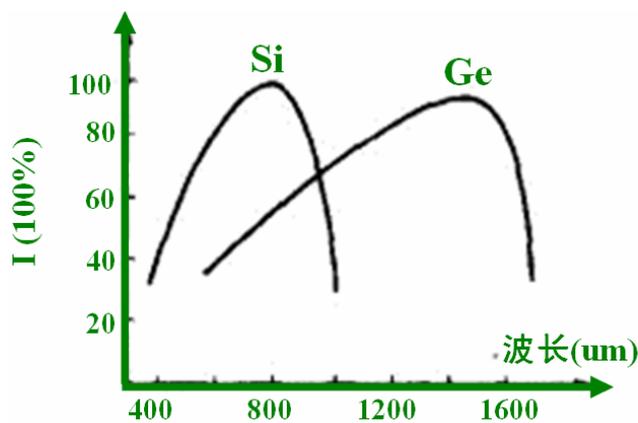


图 7.17 光电二极管光谱响应曲线

3. 照度特性

线性度好，但光生电流数值较小（微安量级），灵敏度较低。

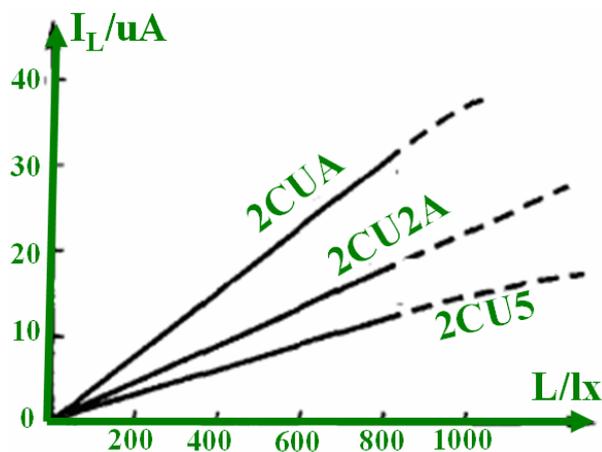
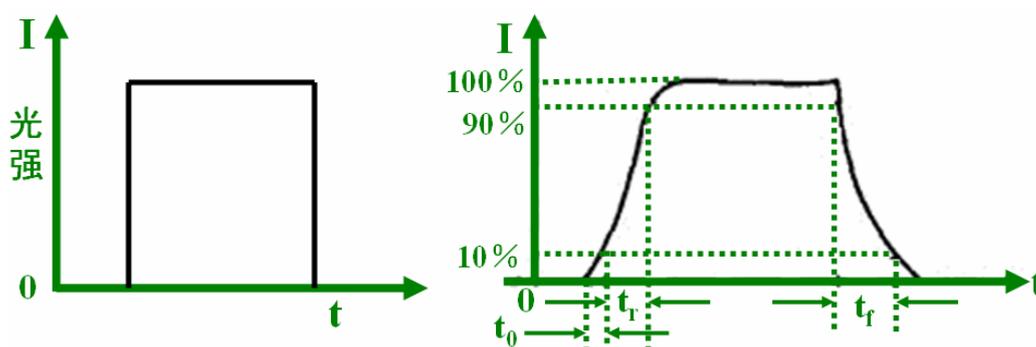


图 7.18 硅光电二极管光照特性曲线

4. 响应时间



(a) 入射的矩形光脉冲信号

(b) 探测器输出光电流波形

图 7.19 光电二极管探测响应波形图

影响响应时间的主要因素：载流子的运动速度。

5. 伏安特性

工作电压较低时输出光电流表现为非线性，即光电流与偏压有关；随着

电压的增加，光电流几乎不随工作电压的改变而变化，只随照度的增大而增加。

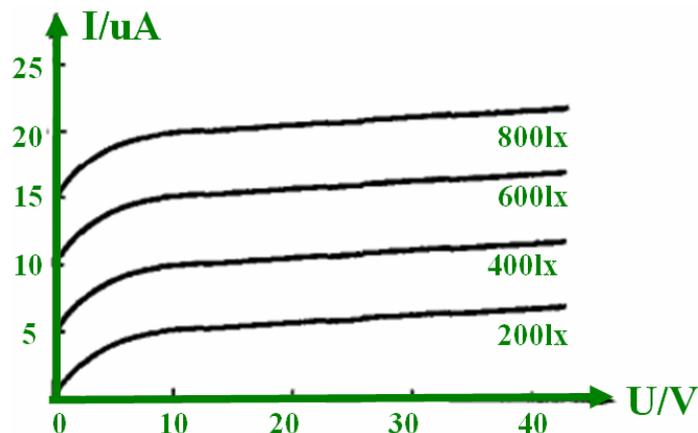


图 7.20 硅光电二极管伏安特性曲线

6. 温度特性

光电流和暗电流均随温度的变化而变化，温度升高，暗电流增大，输出信噪比变差，不利于弱光信号的探测。

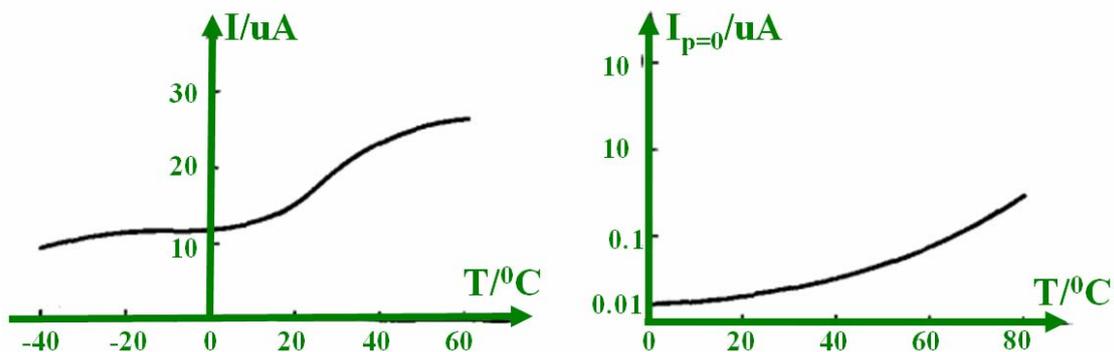
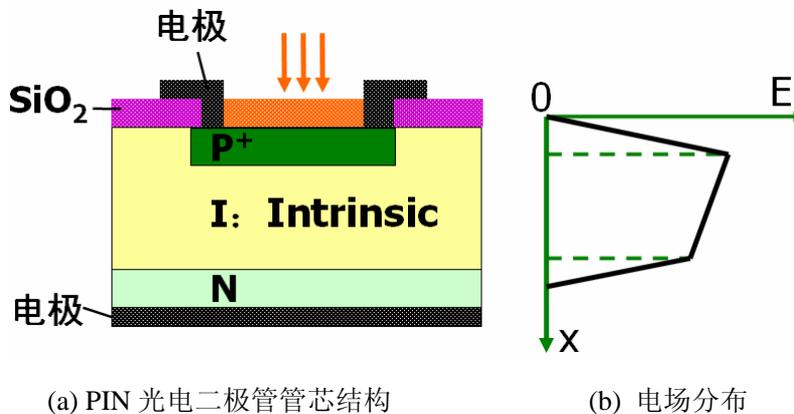


图 7.21 硅光电二极管温度特性曲线

二 PIN 光电二极管



(a) PIN 光电二极管管芯结构

(b) 电场分布

图 7.22 PIN 光电二极管

结构特点：在 PN 结中间设置一层掺杂浓度很低的本征半导体(I 层, Intrinsic)
 本征层引入后的优点：

- (1) 本征层的高电阻使暗电流数值减小。
- (2) 本征层高电场使电子—空穴快速分离，并作快速漂移运动。
- (3) 加大了P⁺区耗尽层厚度，可缩短载流子扩散过程。
- (4) 耗尽层的加宽使结电容减小，使电路时间常数减小。
- (5) 有利于长波长区光辐射的吸收。

表 7-3 PIN 光电二极管的一般性能

| | Si-PIN | InGaAs-PIN |
|------------------------|---------------------|-------------------|
| 工作波长范围 $\lambda/\mu m$ | 0.4~1.0 | 1.0~1.6 |
| 响应度 $\rho/(A/W)$ | 0.4 (0.85 μm) | 0.6(1.3 μm) |
| 暗电流 I_d/nA | 0.1~1 | 2~5 |
| 响应时间 τ/ns | 2~10 | 0.2~1 |
| 结电容 C_j/pF | 0.5~1 | 1~2 |
| 工作电压 $/V$ | -5~-15 | -5~-15 |

三 APD 雪崩光电二极管

性能优点：具有电流内增益功能，能够探测微弱信号。

1. 结构与工作原理

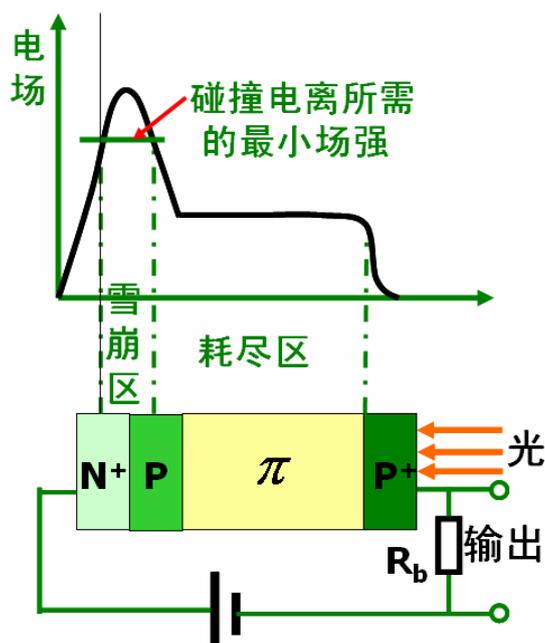


图 7.23 硅拉通型雪崩光电二极管结构及电场分布图

电流放大机理：耗尽区内的光生电子被高电场加速→动能增加→与晶格的原子碰撞而使原子电离→产生二次电子—孔穴对→新生电子再次参与碰撞电离→如此往复，使 PN 结内电流急剧增加。

2. APD 的倍增增益

倍增增益与偏置电压的关系

$$G = \frac{1}{1 - \left(\frac{V}{V_b}\right)^\alpha} \quad (7.19)$$

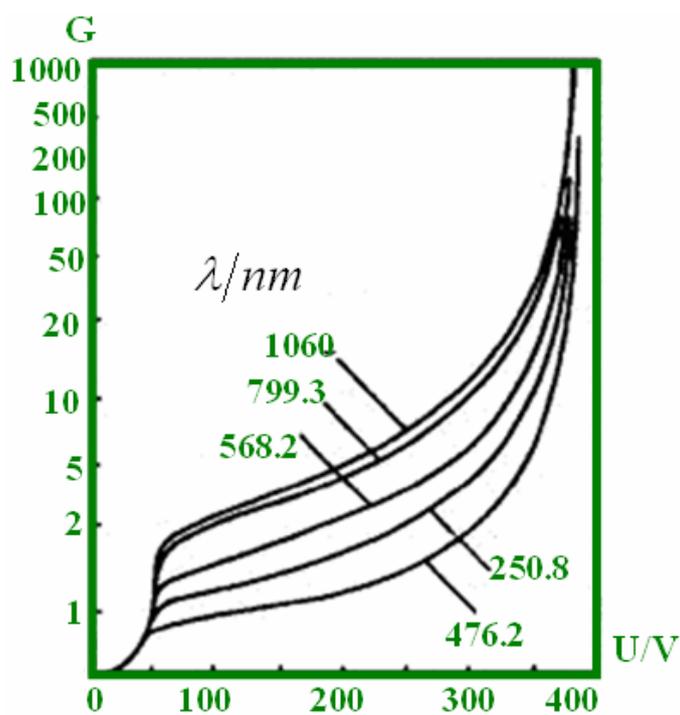


图 7.24 APD 电流增益与偏压的关系曲线

表 7-4 APD 光电二极管的一般性能

| | Si-APD | InGaAs-APD |
|------------------------|---------|------------|
| 工作波长范围 $\lambda/\mu m$ | 0.4~1.0 | 1.0~1.65 |
| 响应度 $\rho/(A/W)$ | 0.5 | 0.5~0.7 |
| 暗电流 I_d/nA | 0.1~1 | 10~20 |
| 响应时间 τ/ns | 0.2~0.5 | 0.1~0.3 |
| 结电容 C_j/pF | 1~2 | <0.5 |
| 工作电压 V | 50~100 | 40~60 |
| 倍增因子 g | 30~100 | 20~30 |
| 附加噪声指数 x | 0.3~0.4 | 0.5~0.7 |

四 肖特基光电二极管

1. 结构

由金属和 N 型材料接触形成势垒。

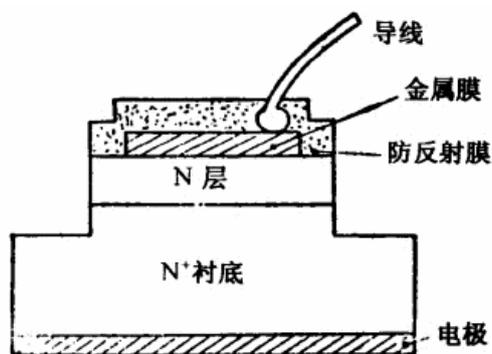


图 7.25 肖特基结型光电二极管的管心结构

2. 肖特基势垒的形成

金属和半导体的逸出功不同，如果选用的金属和半导体有： $W_M > M_S$ ，则当金属与半导体接触后，半导体中的电子将从半导体表面区域进入金属，在半导体表面区域形成正的空间电荷区，产生内建电场，使得该区域具有表面势，造成能带弯曲，在界面处形成势垒 ΔE 。势垒的实验测量数值为

$$\Delta E = \frac{2}{3} E_g \tag{7.20}$$

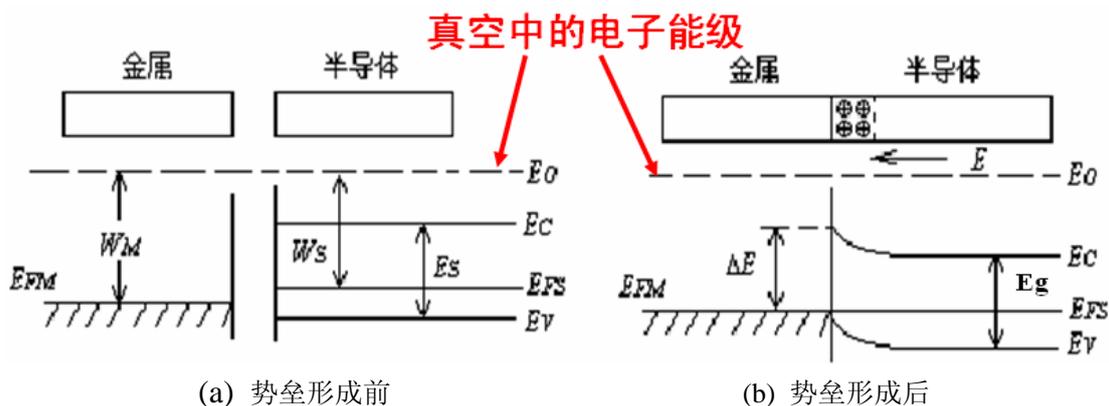


图 7.26 肖特基势垒的形成

3. 工作方式

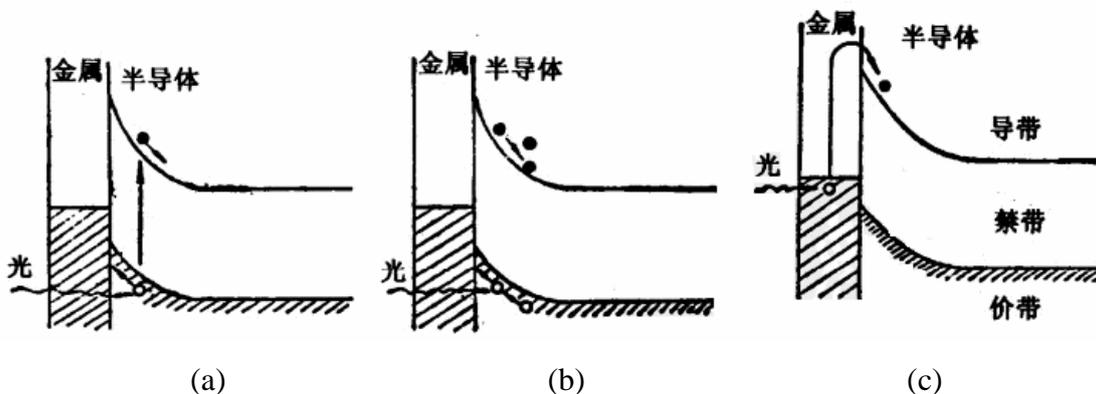


图 7.27 肖特基结型光电二极管的工作方式

- (a) $h\nu > E_g, V \ll V_B$: 光照产生光生载流子，类似于普通光电二极管。
- (b) $h\nu > E_g, V \rightarrow V_B$: 能够在耗尽区引起载流子倍增效应，类似于 APD 管。
- (c) $h\nu < E_g$: 光在金属中被吸收。若电子能量高于势垒高度，可越过势垒进入半导体区被加速形成定向移动。

§ 7-4 光电倍增管

一 结构与工作原理

1. 结构

阴极 K，阳极 A，倍增极 D

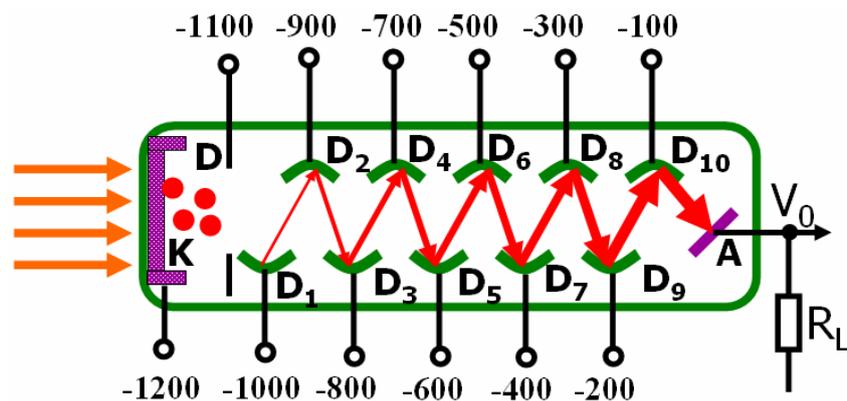


图 7.28 光电倍增管结构图

非聚焦型倍增极：倍增系数较高，但由于电子的散射效应，造成脉冲信号展宽，响应时间长。

聚焦型倍增极：有效避免散射效应，响应时间短。但每对倍增极工作状态受邻近倍增极工作电压影响，对电源稳定性要求高。

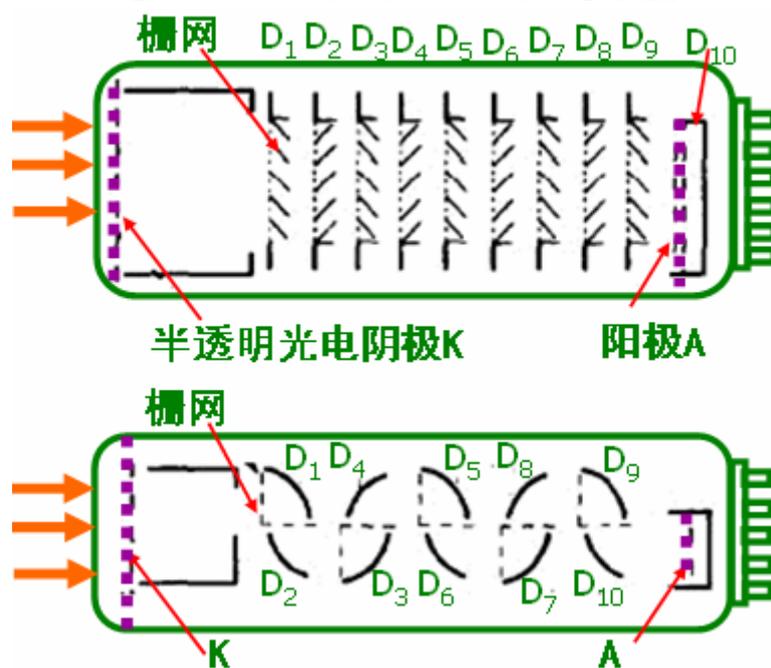


图 7.29 两种非聚焦型倍增极结构图

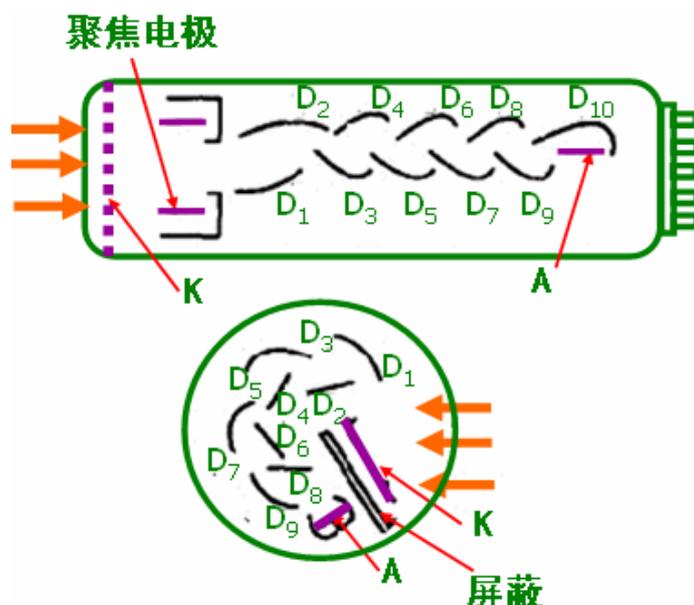


图 7.30 两种聚焦型倍增极结构图

2. 工作原理

光照阴极发射光电子，光电子受到极间电场作用获得较大能量。当电子以足够高的速度打到倍增极上时，倍增极产生二次电子发射，使得向阳极运动的电子数量成倍增长，倍增的电子到达阳极后形成正比于光照强度的光生电流。

3. 工作电路与电压供给

负高压供电：电源正极接地、负载电阻 R_L 接阳极，适用于探测缓慢变化的光信号。

正高压供电：电源负极接地、负载电阻 R_L 接阴极，适用于脉冲光信号的探测。

分压电阻的选择：阴极到第一倍增极间的 R_1 阻值要大些，末极倍增极选取较小的分压电阻，中间各极一般分压均匀。

在脉冲信号情况下最后几级电阻两端并联电容的目的：防止这几级极间电压产生突变。

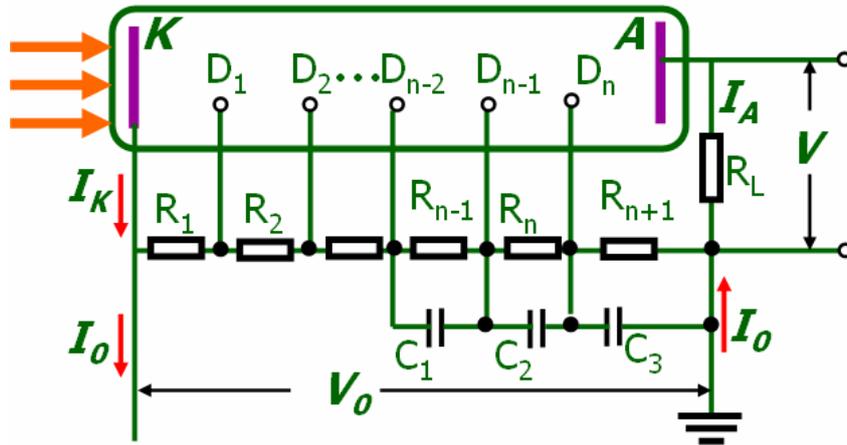


图 7.31 光电倍增管供电回路

二 工作特性参数

1. 阴极灵敏度

光阴极被光照射后产生的初始电流 I_K 与入射光通量 Φ_v 之比。

$$S_k = \frac{I_K}{\Phi_v} (\mu A / lm) \quad (7.21)$$

2. 阳极灵敏度

阳极输出电流与光通量之比。

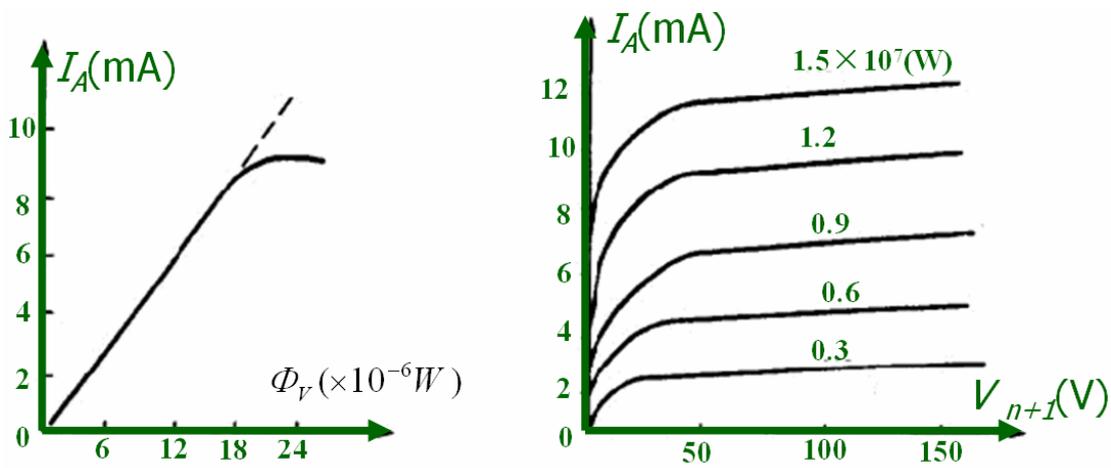
$$S_A = \frac{I_A}{\Phi_v} (\mu A / lm) \quad (7.22)$$

放大倍数 G:

$$G = \frac{I_A}{I_K} = \frac{S_A}{S_K} \quad (7.23)$$

放大倍数 G 取决于系统的倍增能力，因此它是工作电压的函数。

3. 阳极伏安特性



(a) 光电特性

(b) 伏安特性

图 7.32 光电倍增管工作特性

4. 暗电流

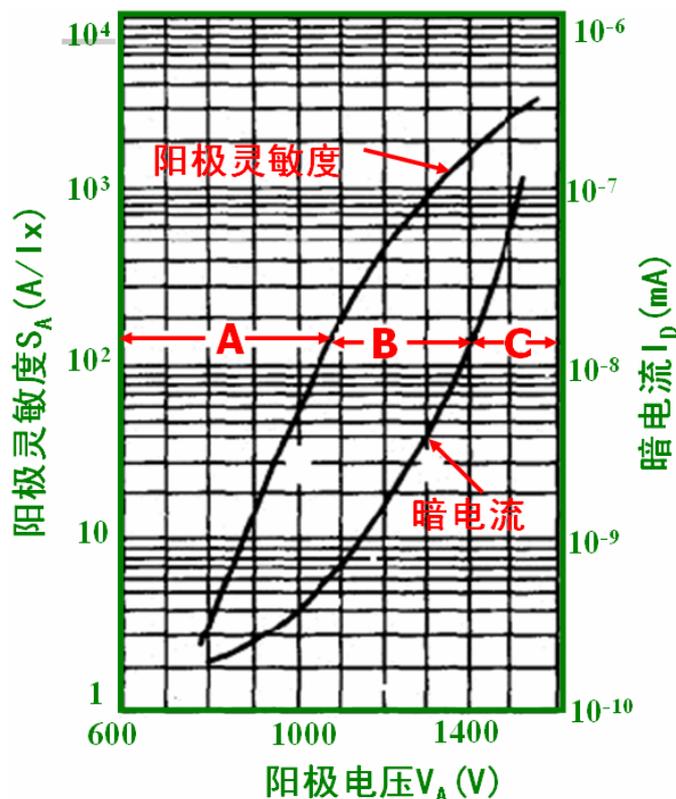


图 7.33 暗电流与工作电压关系曲线

正常工作电压下暗电流的主要来源：光阴极与第一倍增极的热电子发射

高电压下暗电流的主要来源：反馈电流

5. 频率特性

保持内增益条件下截止频率为

$$v_c = \frac{1}{2\pi R_L C} \tag{7.24}$$

§ 7-5 电荷耦合器件

成像方式分类：

扫描成像：包括电子束扫描成像、光机扫描成像（如热像仪）、固体自扫描成像（CCD 摄像机）

非扫描成像：包括照相机（使用胶片）、电影摄像机等。

扫描：把光学图像转变为电信号，即把入射到光敏面上的按空间分布的光强信号转换为按时序串行输出的电信号—视频信号，而视频信号能再现入射的光图像信号。

固体摄像器件分类:

电荷耦合器件 (Charge Coupled Device, 即 CCD)

互补金属氧化物半导体图像传感器 (Complementary Metal Oxide Semiconductor, 即 CMOS)

电荷注入器件 (Charge Injection Device, 即 CID)

电荷耦合摄像器件 CCD:

CCD 特点—以电荷作为信号

CCD 基本功能—电荷存储和电荷转移

CCD 工作过程—信号电荷的产生、存储、传输和检测的过程

一 电荷耦合器件的基本原理

1. 电荷存储

CCD 是按一定规律排列的 MOS 电容器阵列组成的**移位寄存器**，其基本单元的 MOS 结构如下图所示。

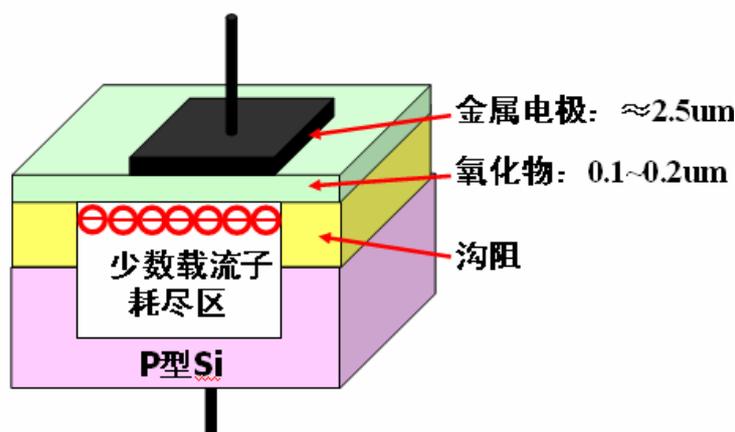


图 7.34 CCD 的 MOS 电容剖面图

- (1) MOS 电容的电极无偏压，半导体中的空穴均匀分布。
- (2) 在P型硅电极上加正偏压（对N型硅衬底加负偏压），电场穿过SiO₂薄层，排斥P型硅中的多数载流子—空穴，在SiO₂下形成耗尽区（无载流子的本征区）。
- (3) 当电极电压增加时、达到阈值电平以上时，耗尽区进一步向体内延伸，并将P型半导体内的电子（少数载流子）吸引到表面，产生反型层。由于半导体表面电势为正，耗尽区对电子而言形成“势阱”，起到收集电子的作用：所加偏压越大，势阱越深。
- (4) 信号电荷若在势阱或其附近出现，便聚集在势阱中，称为势阱的填充。

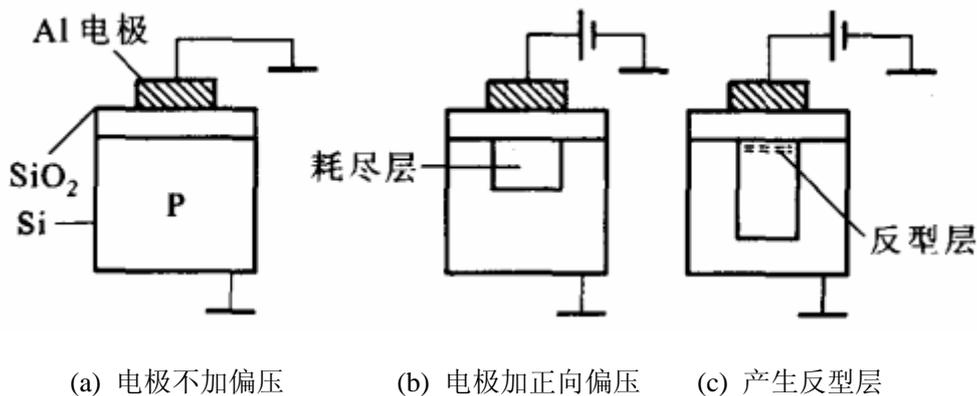


图 7.35 MOS 电容偏压图

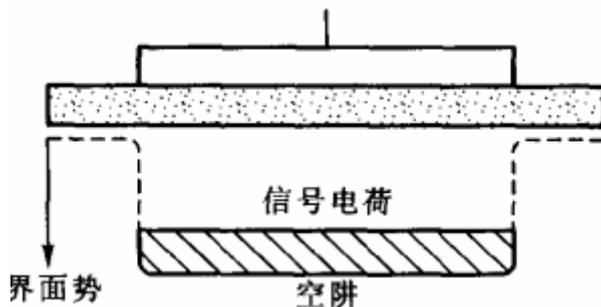


图 7.36 势阱的填充

2. 电荷转移

三相电极结构：每三个栅作为一组，每隔两个栅的栅电极连接到同一时钟控制脉冲上。

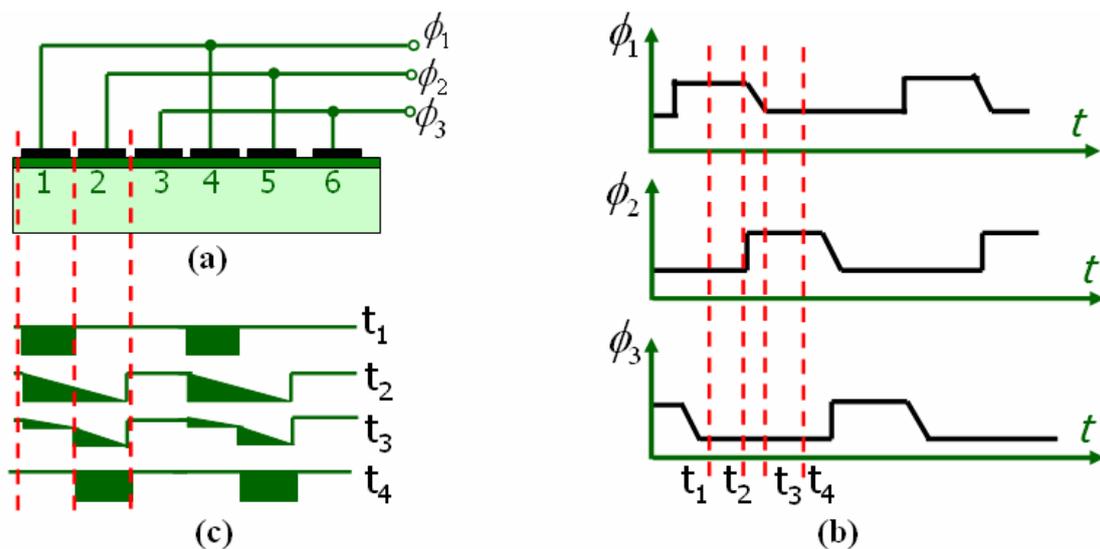


图 7.37 三相电极结构及电荷转移

为简化电极结构，多使用两相电极结构。

表面沟道器件：信号电荷只在贴近界面的极薄的衬底层内转移运动。

体内沟道器件：用离子注入方法改变转移沟道的结构，使势能极小值脱离界面而进入衬底内部，形成体内转移沟道。

3. 电荷检测

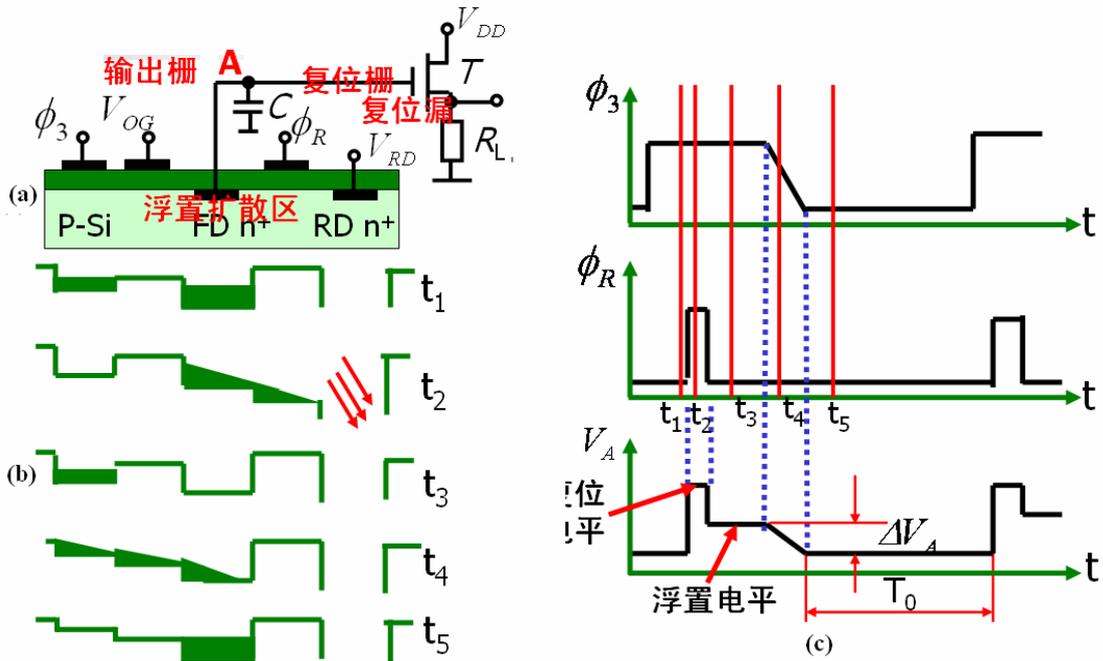


图 7.38 信号电荷的检测

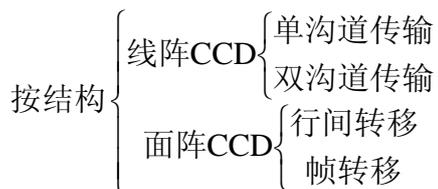
检测过程：

V_{OG} 为一定值的正电压，在OG电极下形成耗尽层，使 Φ_3 与FD之间建立导电沟道。在 Φ_3 为高电位期间，电荷载存储在 Φ_3 电极下面。随后复位栅R加正复位脉冲 Φ_R ，使FD区与RD区沟通，因 V_{RD} 为正十几伏的直流偏置电压，则FD区的电荷被RD区抽走。复位正脉冲过去后FD区与RD区呈夹断状态，FD区具有一定的浮置电位。之后， Φ_3 转变为低电位， Φ_3 下面的电荷载通过OG下的沟道转移到FD区。FD区(即A点)的电位变化量为

$$\Delta V_A = \frac{Q_{FD}}{C} \tag{7.25}$$

信号电荷的大小 Q_{FD} 转换为 ΔV_A 大小被检测输出。

二 电荷耦合摄像器件的工作原理





1. 线阵 CCD

以单沟道结构为例，



图 7.39 线阵 CCD 摄像器件的构成

光敏元：采用光电二极管完成图像光信号到电信号的转换。

转移栅：控制光敏元势阱中的信号电荷向 CCD 中转移。

CCD 区：完成信号电荷的传输。

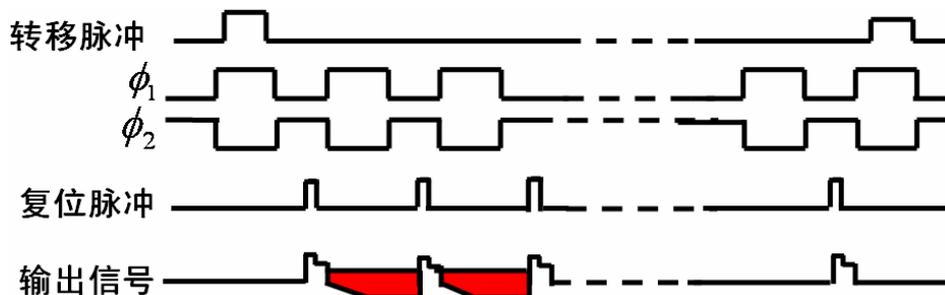


图 7.40 线阵 CCD 器件工作波形

工作流程：

光敏元进行光积分→转移栅加高电平→N 个光敏元处的光信号电荷**并行**转移到各自对应的 CCD→转移栅加低电平，将光敏区和水平 CCD 间的势阱隔断→

- { N个光信号电荷沿水平CCD串行输出
- { 光敏元进行下一场光积分

2. 面阵 CCD

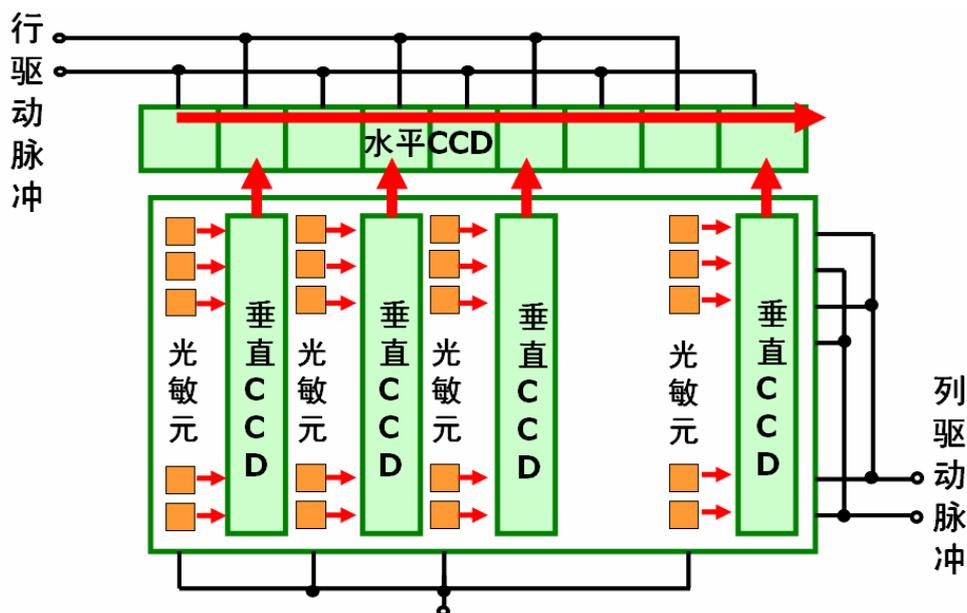


图 7.41 行间转移面阵 CCD

行转移结构工作流程:

水平 CCD 驱动一行信息读完后进入行消隐→垂直 CCD 向水平 CCD 并行转移一行信号电荷→水平 CCD 开始新一行信息的读出（串行）→如此循环，一场信息全部被读出后进入场消隐→新一场的光信号电荷从光敏区同时并行转移到各自对应的垂直 CCD→逐行读出……

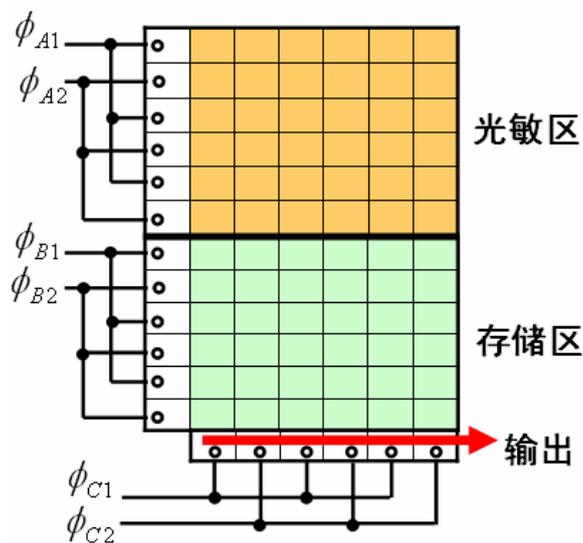


图 7.42 两相帧转移面阵 CCD

帧转移结构工作流程:

光敏区进行光积分→光敏区一场光信号电荷转移至存储区→存储区信号电荷逐行并行转移到水平 CCD→水平 CCD 中的信号电荷串行输出

3. 彩色 CCD

三片式：利用分光棱镜将入射光分为红、绿、蓝三基色后，由各自对应的 CCD 器件进行光电转换。

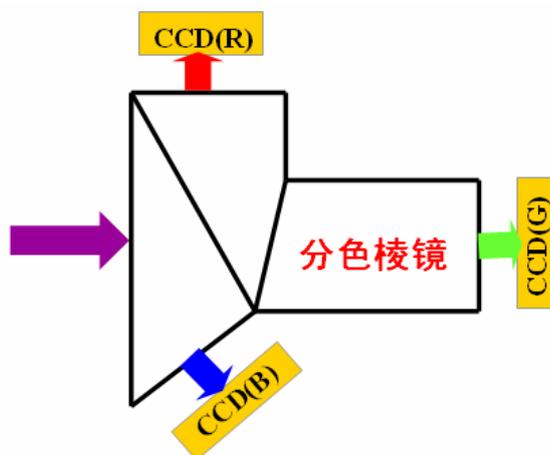


图 7.43 三片式彩色 CCD

单片式：使用滤色器将入射光分解为红、绿、蓝三基色，每个滤色器对应一个 CCD 光敏单元。

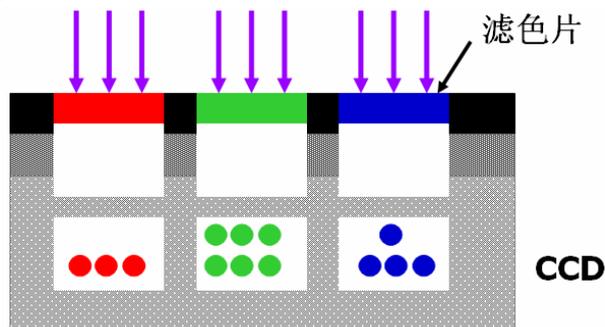
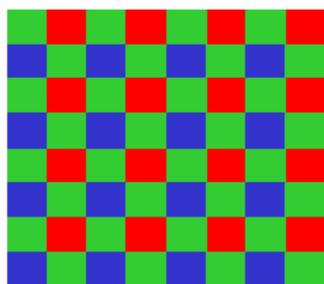
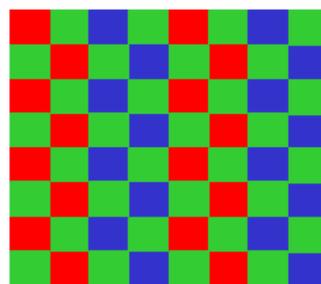


图 7.44 单片式彩色 CCD

滤色器排列方式 { 拜尔方式(黄蓝闪烁)
行间排列方式



(a) 拜尔方式



(b) 行间排列方式

图 7.45 常用的滤色器排列方式

三 电荷耦合摄像器件的特性参数

1. 转移效率

转移效率 η ：信号电荷包从一个栅转移到下一个栅的效率。

$$\eta^n = \frac{Q_n}{Q_0} \quad (7.26)$$

2. 暗电流

暗电流：既无光照也无电注入情况下的输出电流。

起因：耗尽区内产生一复合中心的热激发。

危害：(1) 限制器件的低频限；(2) 引起图像的固定噪声。

3. 灵敏度

灵敏度：在一定光谱范围内，单位曝光量的输出信号电压（电流）。

曝光量（V/W 或 A/W）：光强与光照时间的乘积，相当于投射到光敏元上的单位辐射功率所产生的电压（电流）。

4. 光谱响应

光谱响应范围：长波端截止波长与短波端截止波长之间的波长范围。

5. 噪声

- (1) 散粒噪声：信号电荷包电子数围绕平均值上下变化，形成散粒噪声。
- (2) 转移噪声：由转移损失及表面态俘获所引起的噪声。
- (3) 热噪声：由固体中载流子的无规则热运动引起的噪声。

6. 动态范围与线性度

$$\text{动态范围} = \frac{\text{光敏元满阱信号}}{\text{等效噪声信号}}$$

线性度：在动态范围内，输出信号与曝光量是否成线性关系。