

第七章

光电转换器件

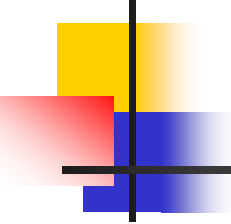
7.1 光电导探测器

7.2 光电池

7.3 光电二极管

7.4 光电倍增管

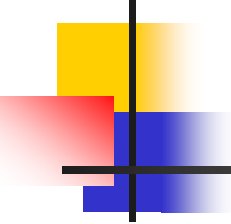
7.5 电荷耦合器件



第七章 光电转换器件

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



第七章 光电转换器件

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：

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

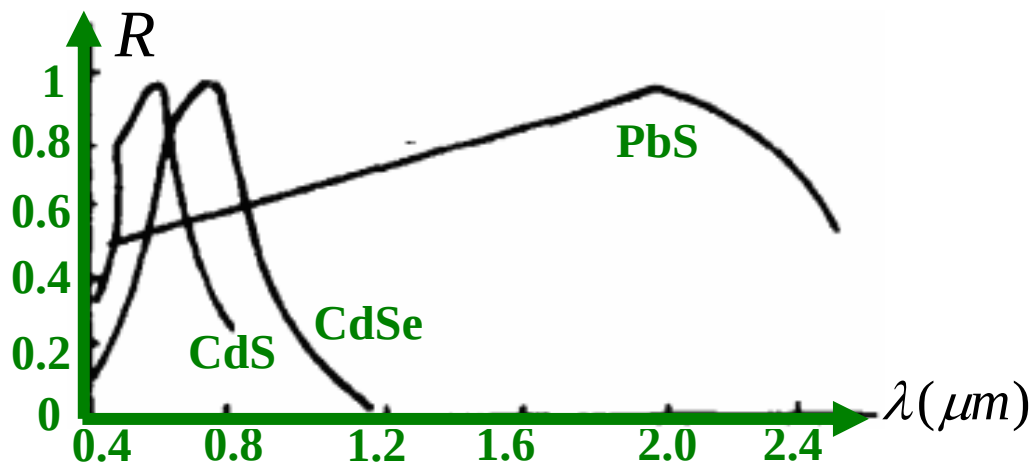
电压响应度：

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

2. 光谱特性

峰值响应波长：

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



三种光敏电阻的光谱响应特性

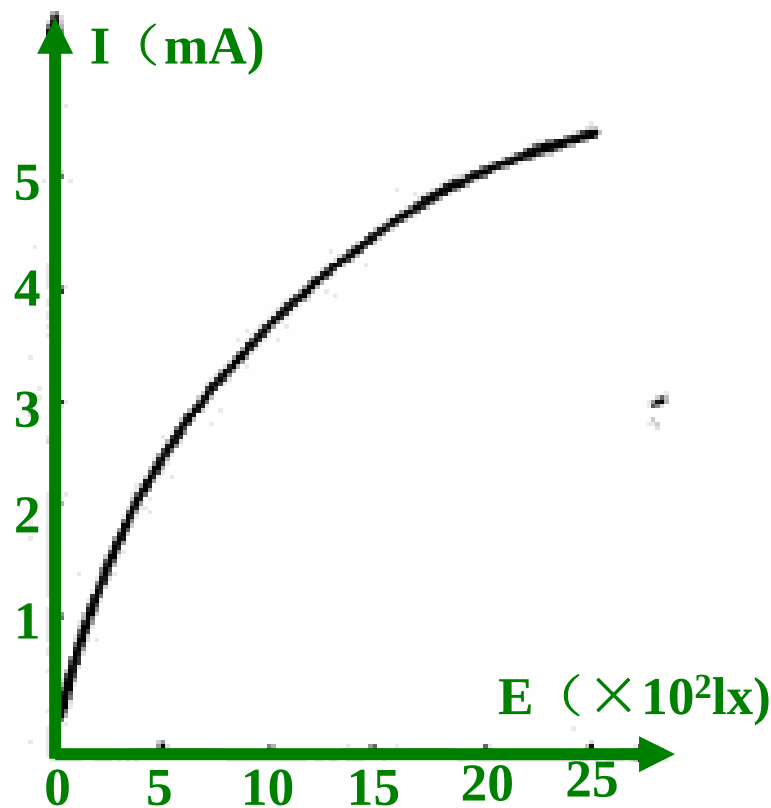
一 光电导器件工作特性

3. 照度特性

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

低偏压、弱光照条件下近似：

$$I = KVE$$



CdS光敏电阻的光照特性曲线

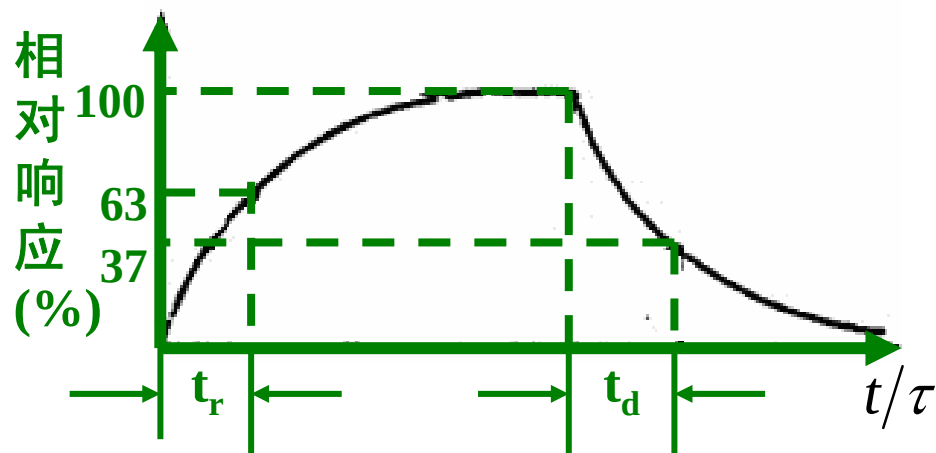
一 光电导器件工作特性

4. 响应速度

调制频率升高，响应度下降

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

截止频率: $R_v = 0.707 R_{v0} \Rightarrow \omega$



光电导的弛豫

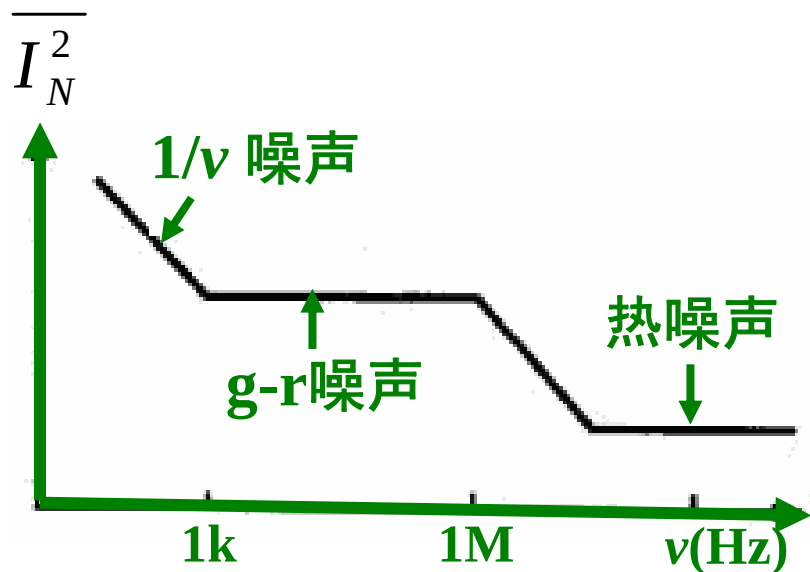
5. 温度效应

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

一 光电导器件工作特性

6. 噪声特性



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。

一 光电导器件工作特性

7. 基本工作电路

(1) 低频条件下的负载匹配问题

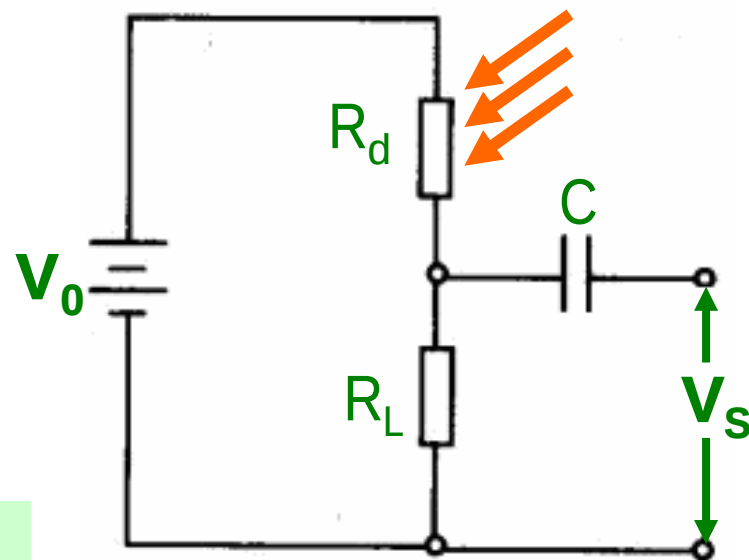
$$i = \frac{V_0}{R_L + R_d}$$

$$i + \Delta i = \frac{V_0}{R_L + R_d + \Delta R_d}$$

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

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

使 V_s 有最大值时的负载电阻: $(\Delta V_s)'_{R_L} = 0 \Rightarrow R_d = R_L$ (最佳匹配条件)



光电导探测器工作电路

一 光电导器件工作特性

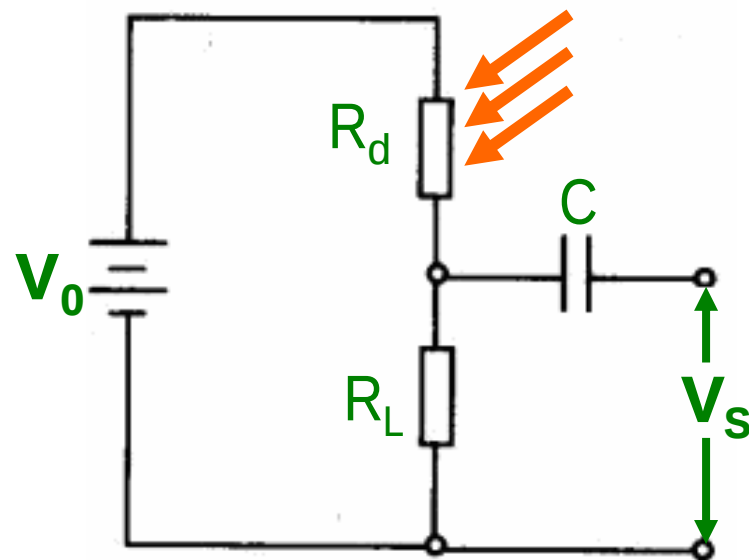
7. 基本工作电路

(2) 偏压选择问题

负载电阻热损耗功率:

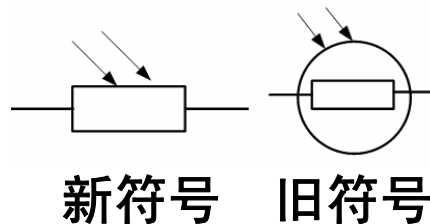
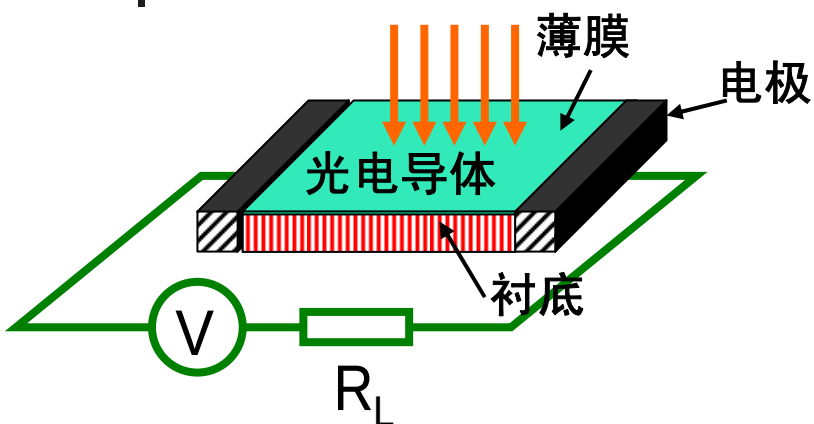
$$\left[\frac{V_0}{R_L + R_d} \right]^2 R_d \leq P_{\max} \text{ (最大耗散功率)}$$

$$R_d = R_L \Rightarrow V_0 \leq (4R_d P_{\max})^{1/2}$$



光电导探测器工作电路

二 几种典型的光敏电阻

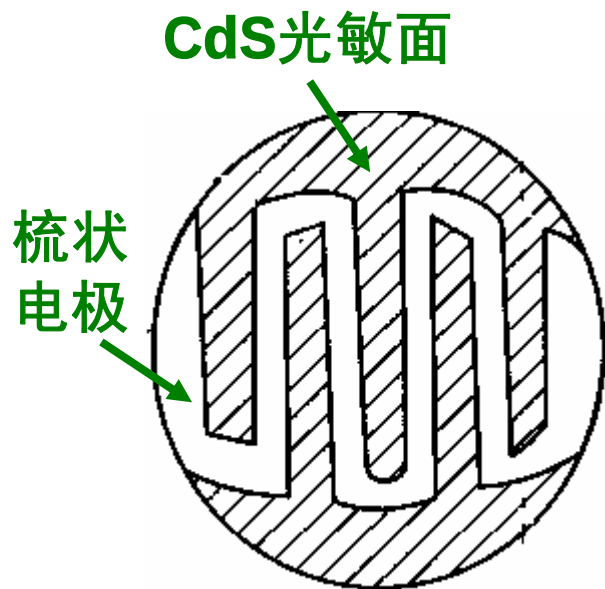


光敏电阻原理图及符号

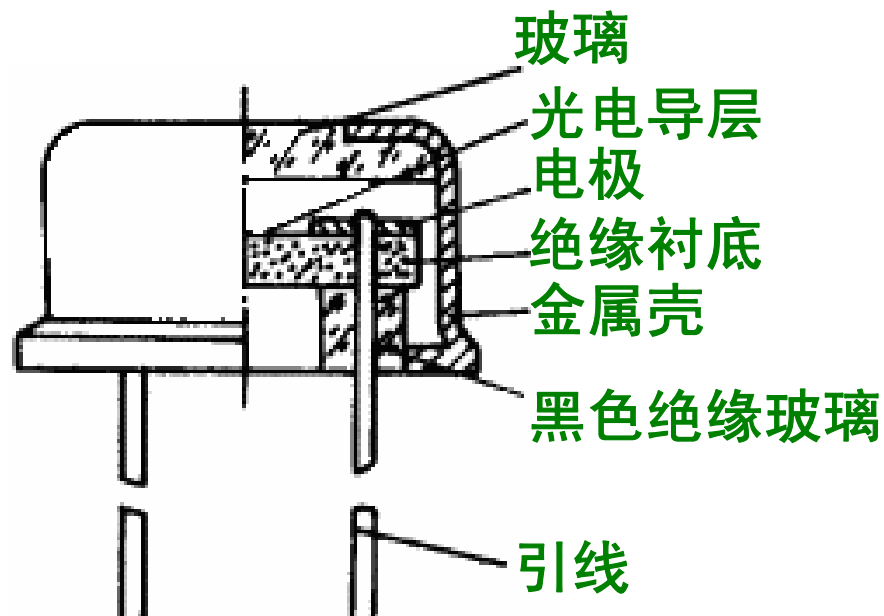
特点：在光照下会改变自身的电阻率。光照越强，电阻越小，又称光导管。



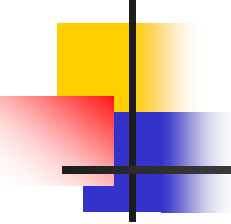
二 几种典型的光敏电阻



光敏电阻电极图案



金属封装的光敏电阻



二 几种典型的光敏电阻

1. 种类

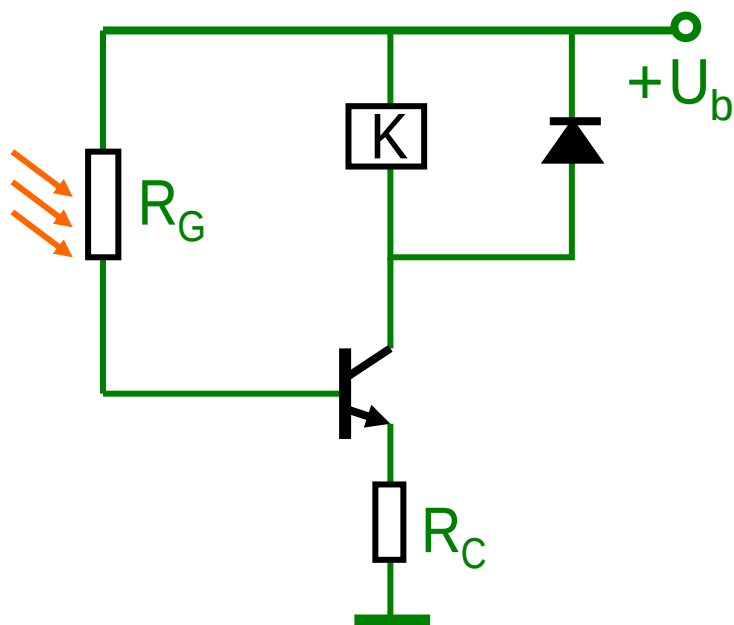
- CdS和CdSe：自动化技术和摄影机中的光计量。
- PbS：遥感技术和武器红外制导。
- InSb：快速红外信号探测。

2. 使用注意事项

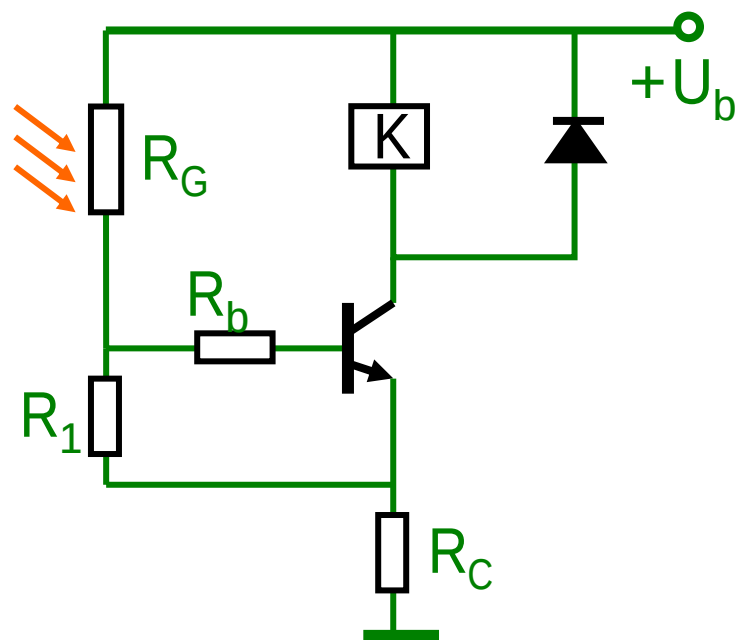
- 光源光谱须与光敏电阻的光谱响应特性匹配。
- 防止杂散光影响。
- 电压、功耗等电参数不超过允许值。
- 根据不同用途选择不同特性的光敏电阻。

二 几种典型的光敏电阻

3. 光敏电阻的典型应用



电流控制



电压控制

光控光开关电路

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、用作电源

- 野外灯塔
- 无人气象站
- 公交车站

2、用作光电探测器使用

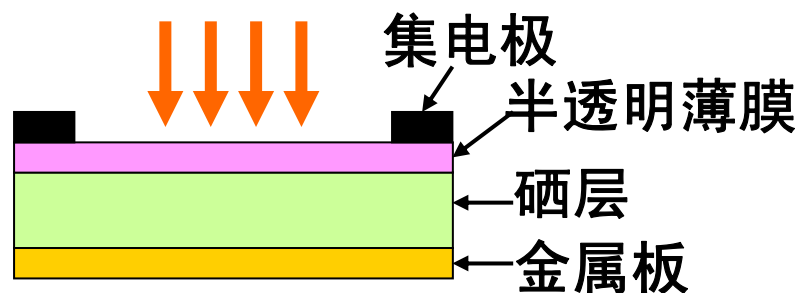
- 近红外辐射探测器
- 激光准直
- 光电开关



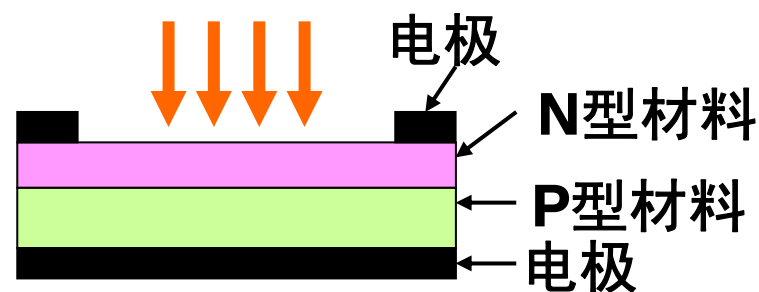
一 光电池的结构与原理

结构:

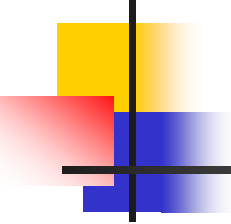
- 金属—半导体接触型：硒光电池
- PN结型：硅光电池



金属—半导体型光电池结构图



PN结型光电池结构图



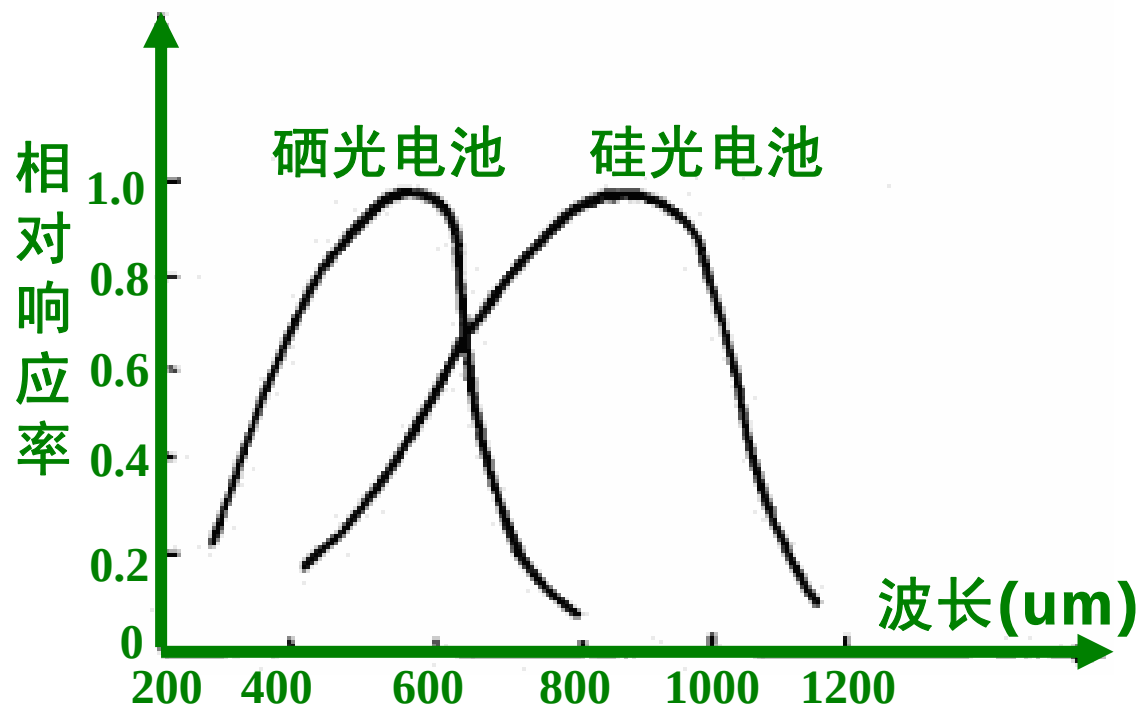
二 光电池特性

1. 光谱特性

	响应波段 (nm)	峰值响应波长 (nm)	应用
硒光电池	400~700	540	可见光波段
硅光电池	400 ~1100	800~900	可见光 近红外波段
蓝硅光电池		600	

二 光电池特性

1. 光谱特性



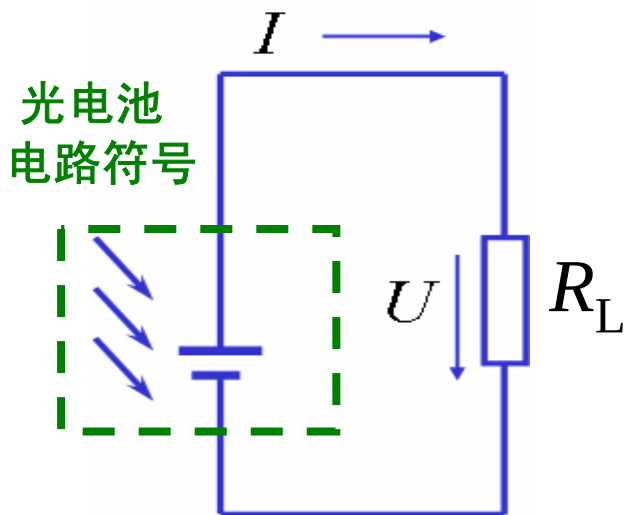
光电池光谱特性曲线

二 光电池特性

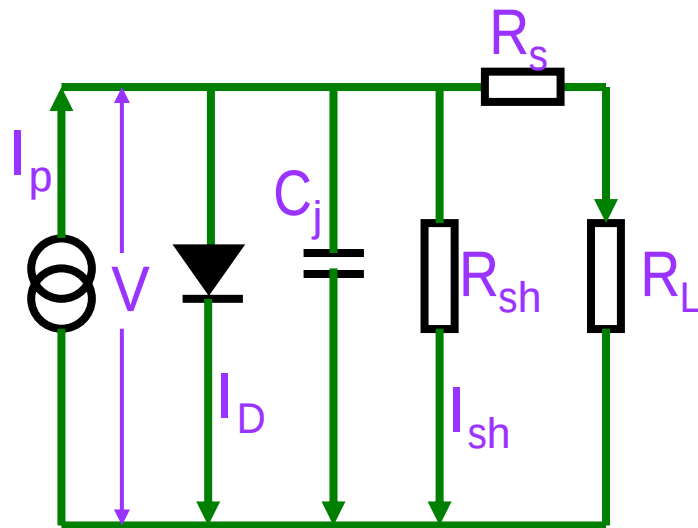
2. 伏安特性

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。



光电池的基本电路



光电池的等效电路

二 光电池特性

2. 伏安特性

短路电流

理想条件:

$$R_s \rightarrow 0, R_{sh} \rightarrow \infty$$



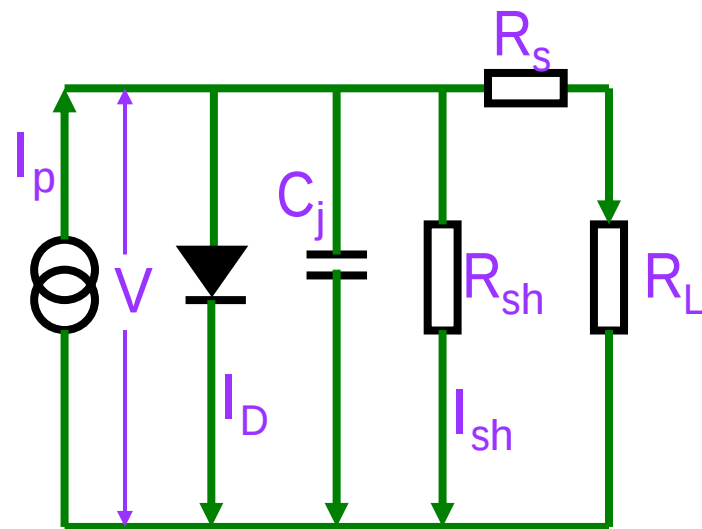
$$I_{SC} = I_P$$

实际:

$$I_{SC} = I_P - I_s \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right) - \frac{V}{R_{sh}}$$

开路电压

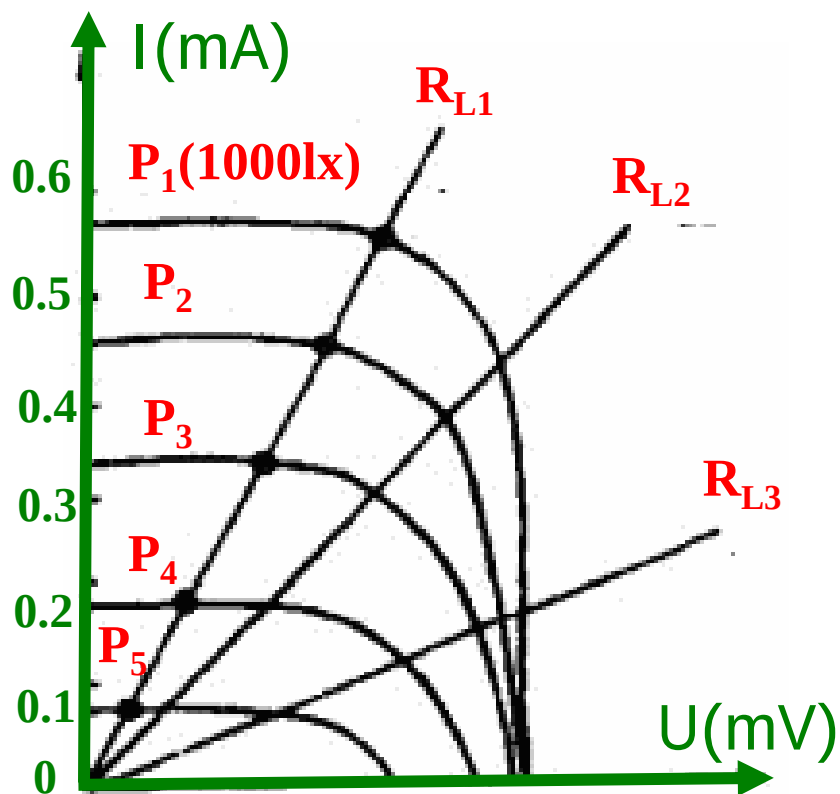
$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_P - I_{sh}}{I_s} + 1 \right)$$



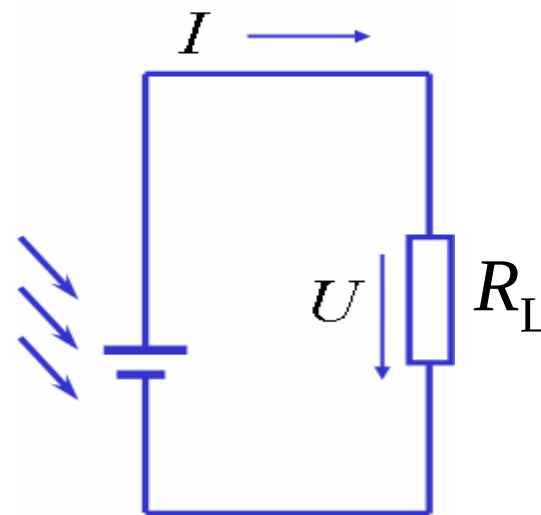
光电池的等效电路

二 光电池特性

2. 伏安特性



硅光电池的输出特性



光电池的基本电路

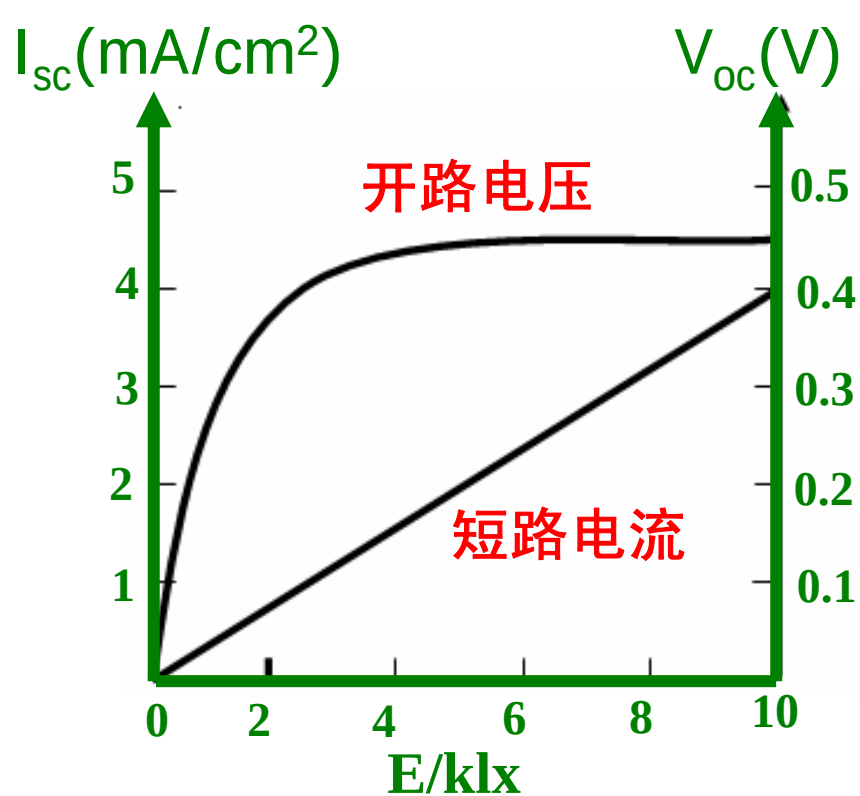
$$P_1 > P_2 > P_3 > P_4 > P_5$$

$$R_{L1} < R_{L2} < R_{L3}$$

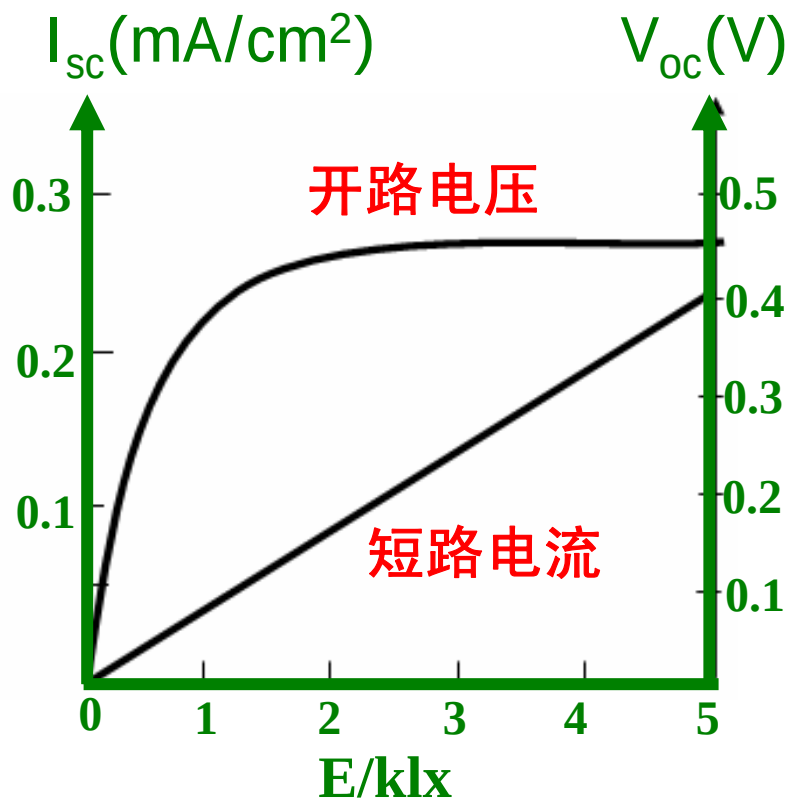
二 光电池特性

3. 光照特性

硅光电池



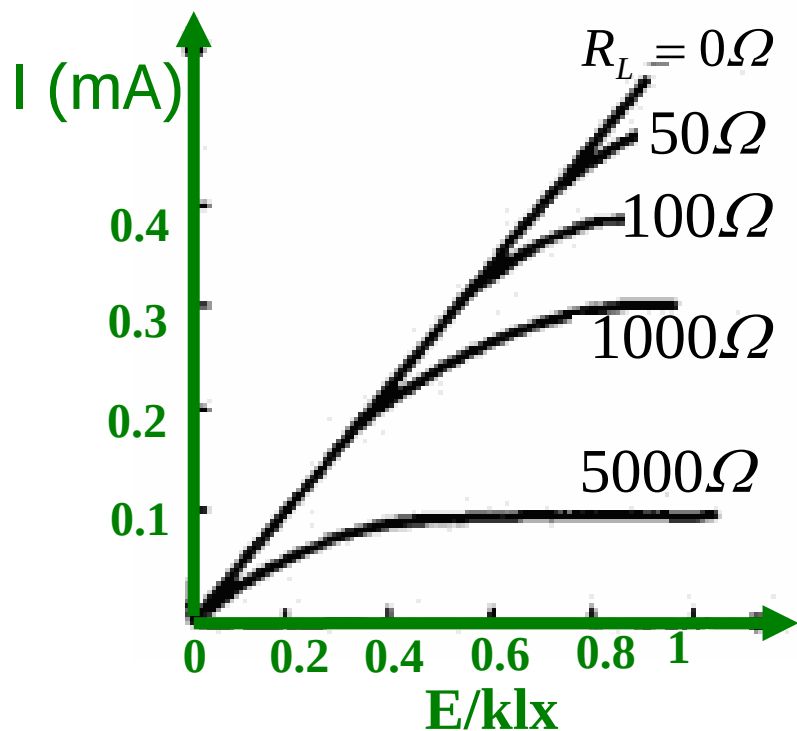
硒光电池



光电池的光照特性曲线

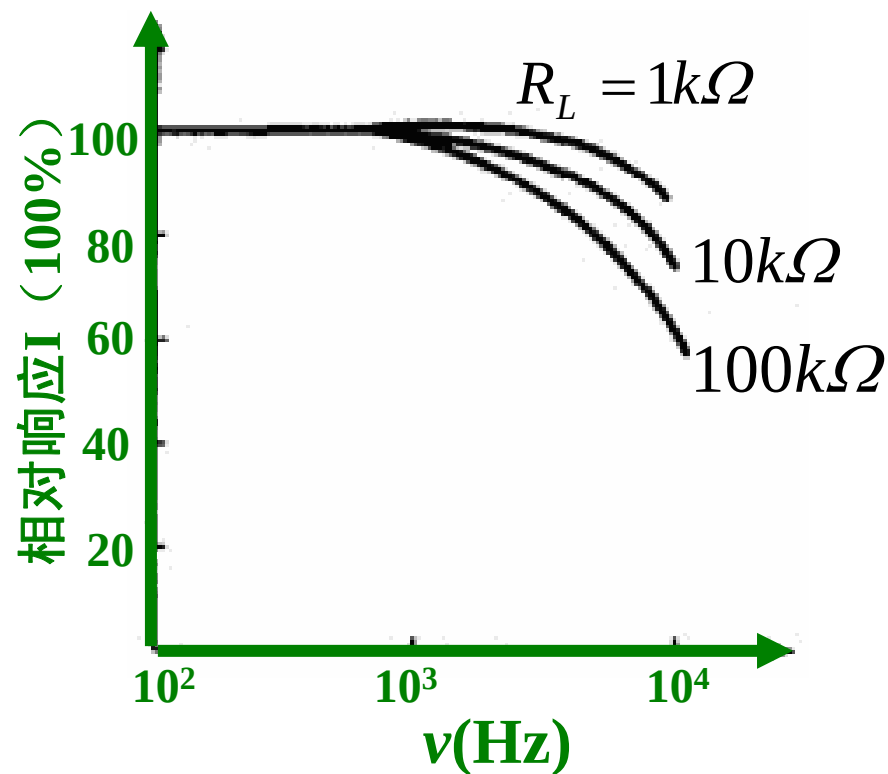
二 光电池特性

3. 光照特性



硒光电池的光照特性与负载电阻的关系

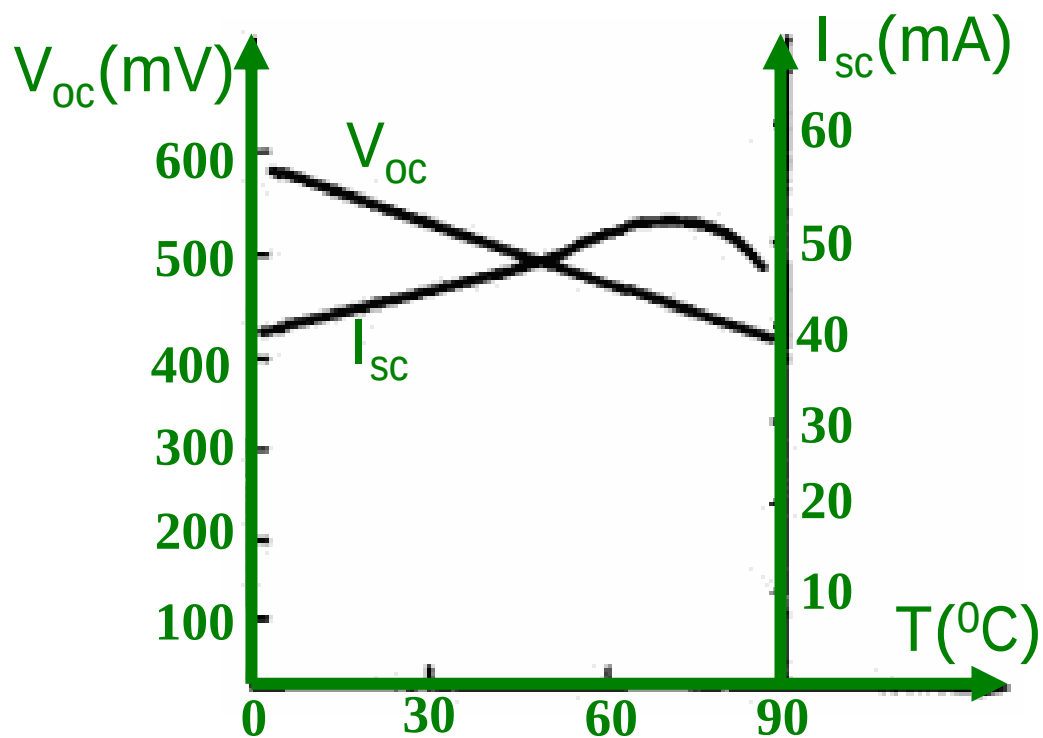
4. 频率特性



硅光电池的频率特性曲线

二 光电池特性

5. 温度特性



光电池的温度特性曲线

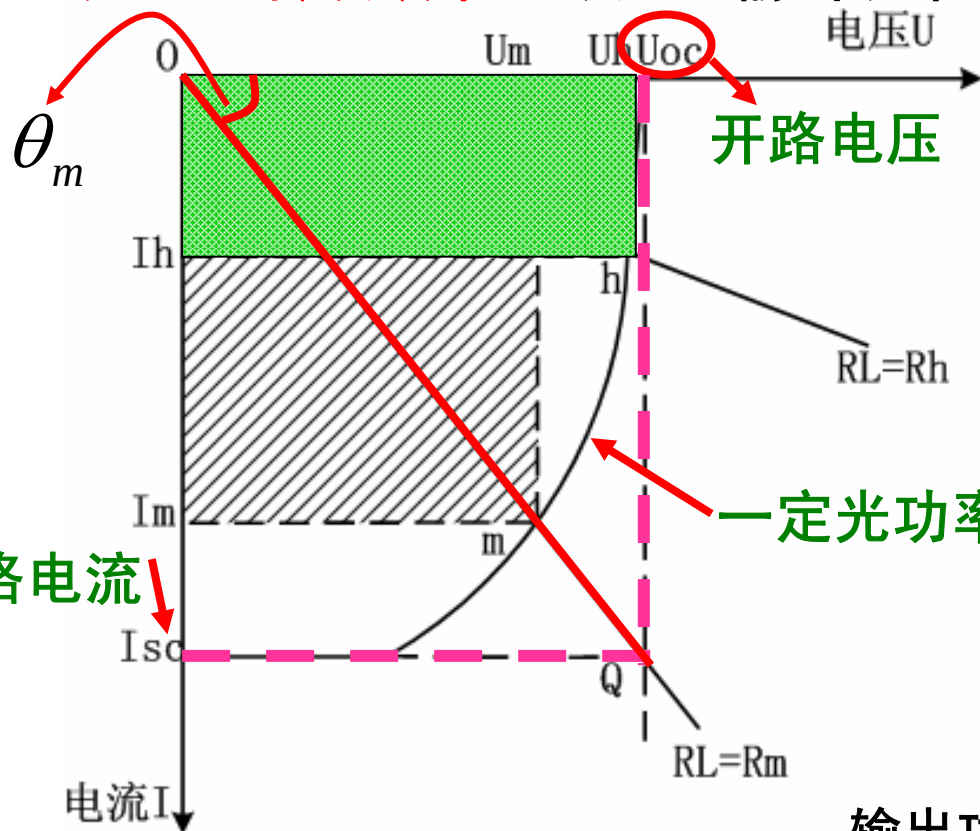
二 光电池特性

6、输出功率和最佳负载电阻

获得最大电功率输出时的负载电阻

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



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

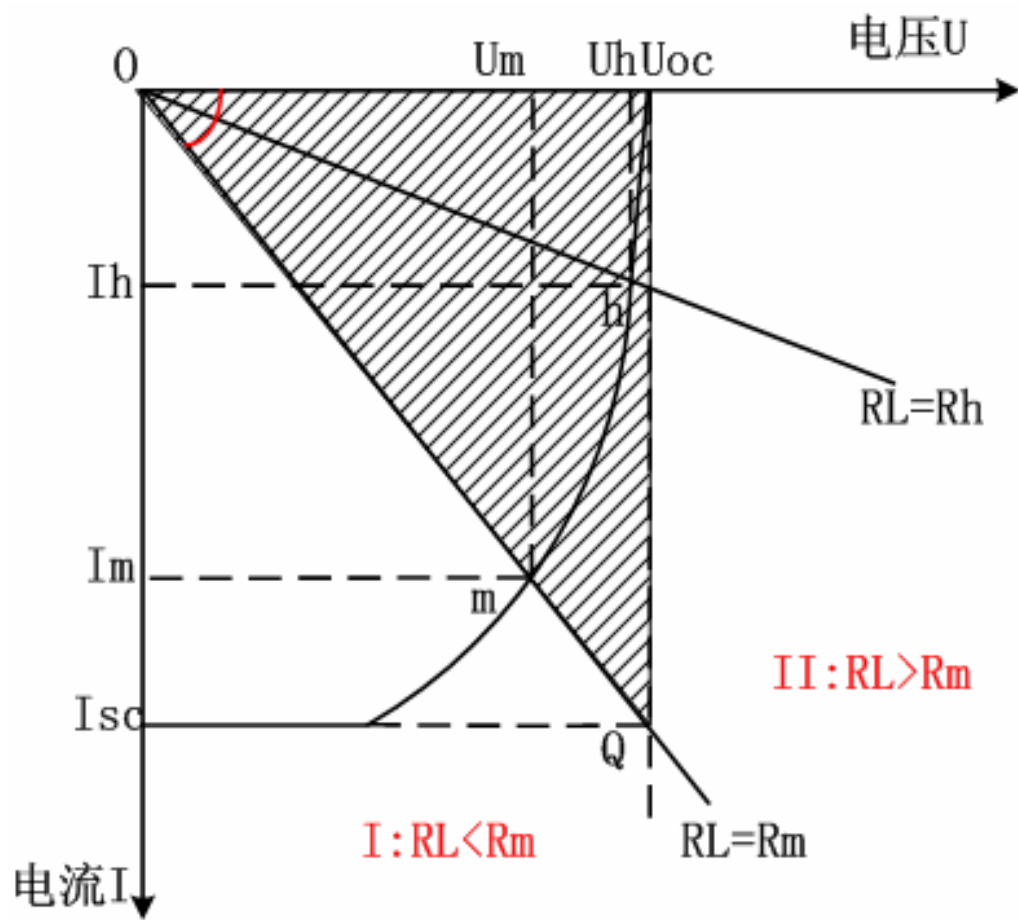
$$R_m = \frac{1}{\tan \theta_m}$$

输出功率曲线示意图

二 光电池特性

6、输出功率和最佳负载电阻

保证光电池线性工作时负载电阻 R_L 的**选择原则**：



I区特点：光电流与光照功率成正比，**光电流区域**

II区特点：输出电压与光照功率的对数成正比，**光电压区域**

二 光电池特性

6、输出功率和最佳负载电阻

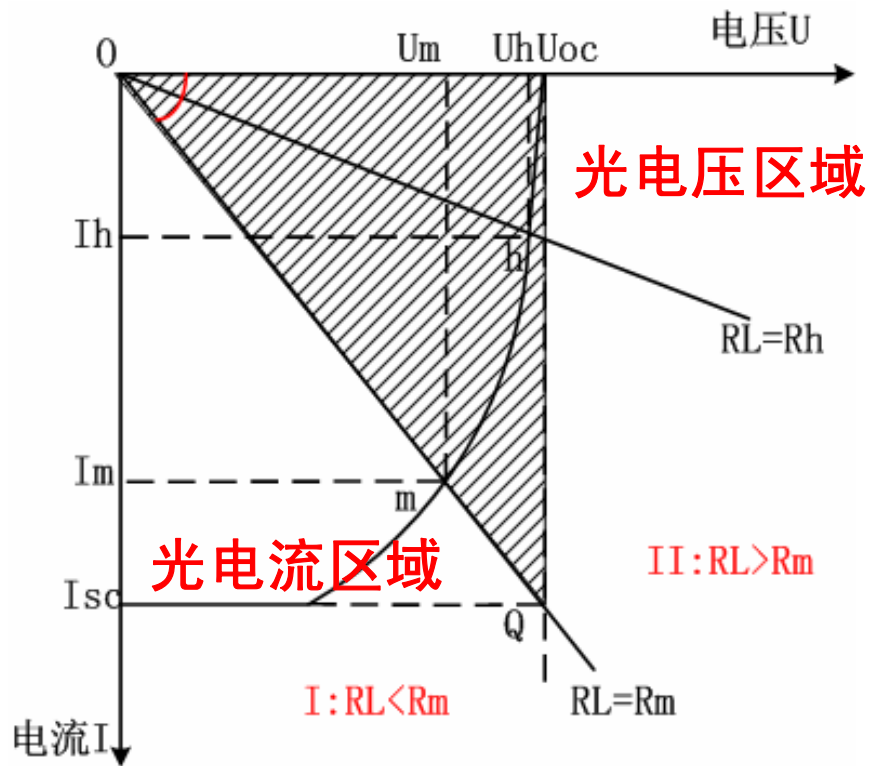
(1) 用光电池探测缓变光信号时：应工作在光电流区域

作为一个光电开关只鉴别有无光照时：允许工作在光电压区域

(2) 对光电流区域的两种输出方式:

- **电流输出：**负载电阻尽量小
- **电压输出：**负载电阻尽量大

$$R_L = 0.85 R_m$$

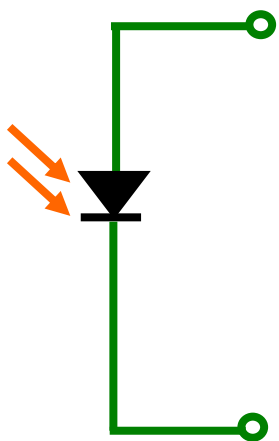


7-2 光電池

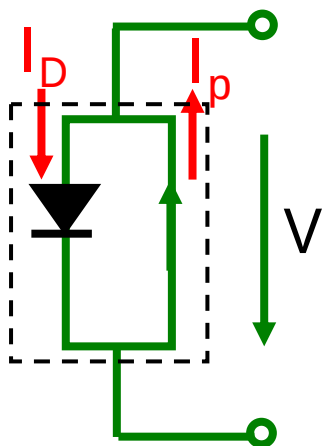


7-3 光电二极管

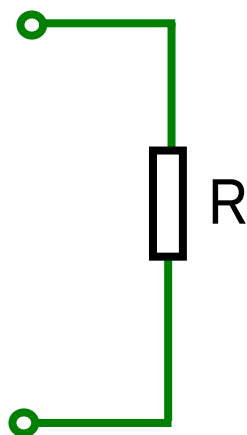
光伏探测器的工作模式



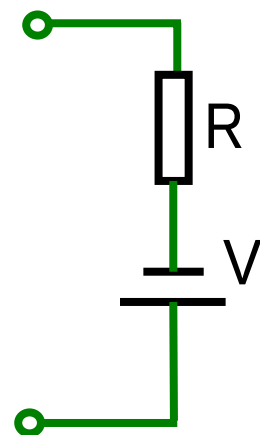
光伏探测器符号



等效电路



光伏工作模式



光导工作模式

7-3 光电二极管

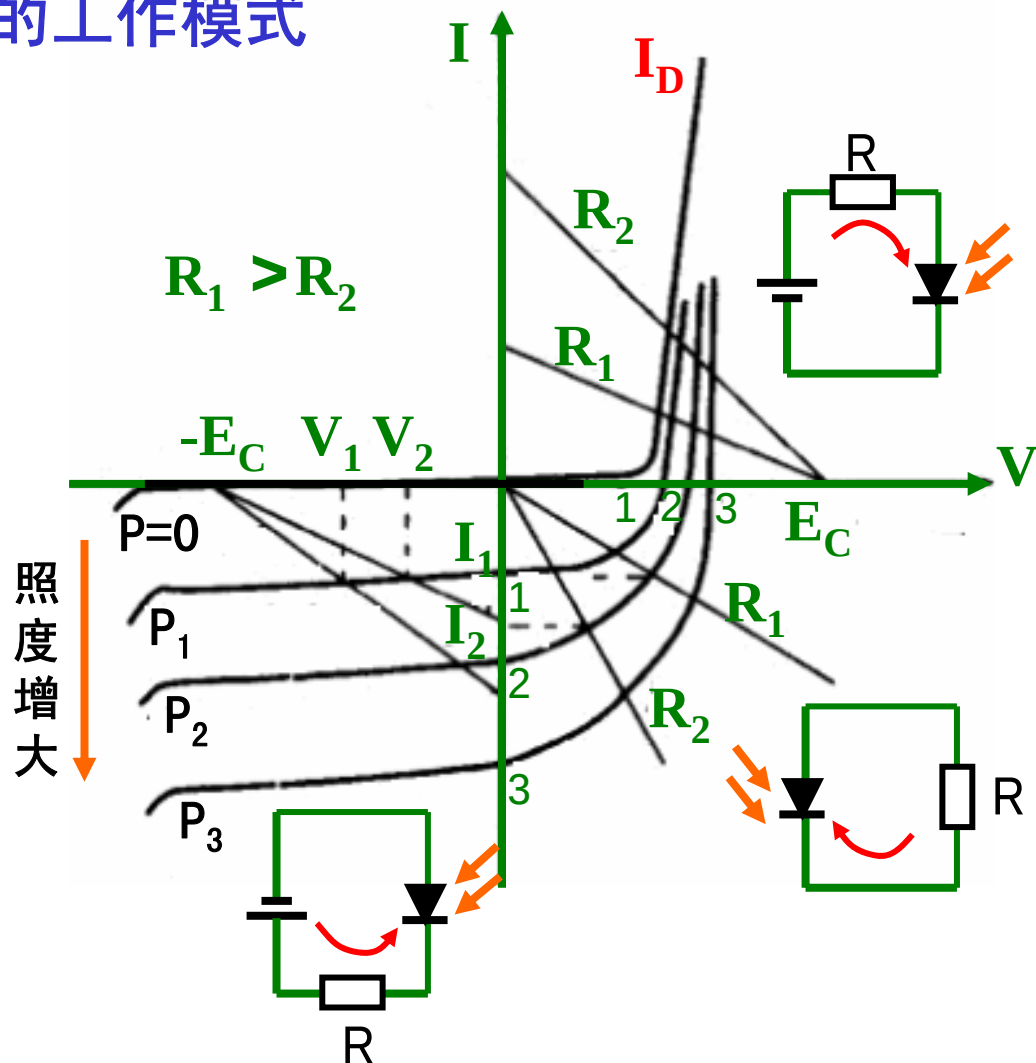
光伏探测器的工作模式

普通二极管伏安特性:

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

流过探测器的总电流:

$$i = i_D - i_p = i_{so} \left[\exp\left(\frac{eu}{k_B T}\right) - 1 \right] - i_p$$

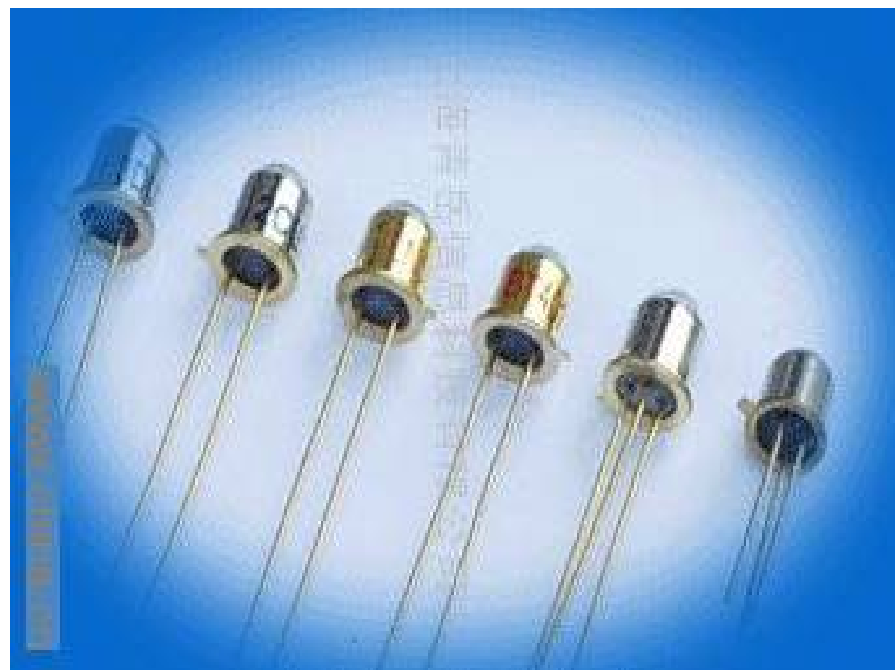


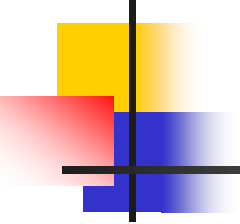
7-3 光电二极管

功能：把接收到的**光信号**转变为**电信号**的光电转换器件，它在微弱、快速光信号探测方面有着重要的作用。

种类：

- 硅光电二极管
- PIN光电二极管
- 雪崩光电二极管等





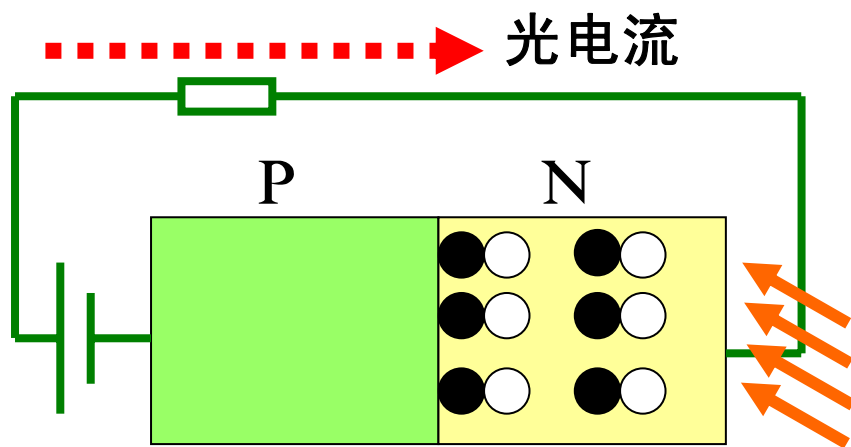
7-3 光电二极管

光电二极管和光电池比较,

同： 基于PN结的光伏效应

- 异：**
- 基底材料掺杂浓度：光电池约 $10^{16} \sim 10^{19}$ 原子数/cm³
硅光电二极管约 $10^{12} \sim 10^{13}$ 原子数/cm³
 - 电阻率：光电池约0.1~0.01欧姆/cm
硅光电二极管**1000欧姆/cm**
 - 工作电压：光电池在**零偏下**
硅光电二极管**反向偏压**
 - 光电流：光电池>>光电二极管（**微安量级**）

一 光电二极管工作原理



光电二极管工作原理示意图

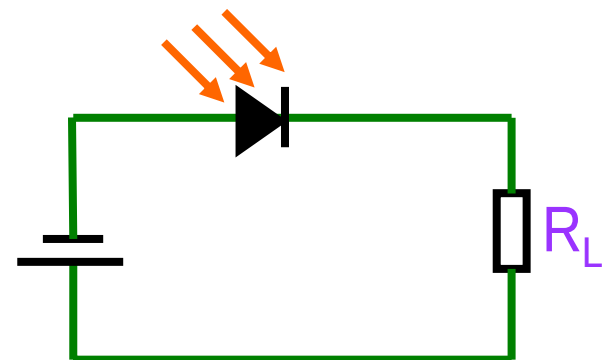
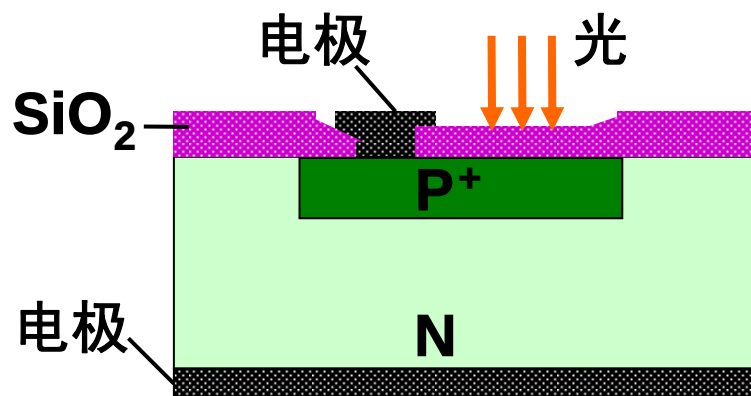
入射光波长需满足：

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

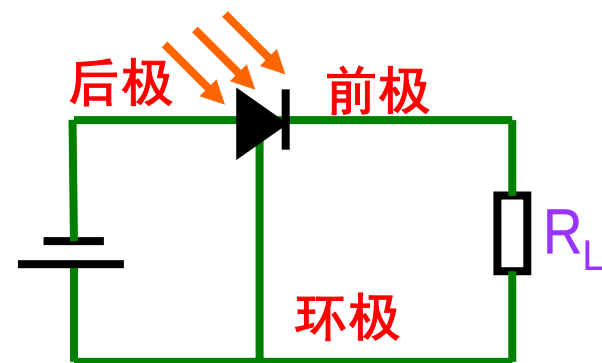
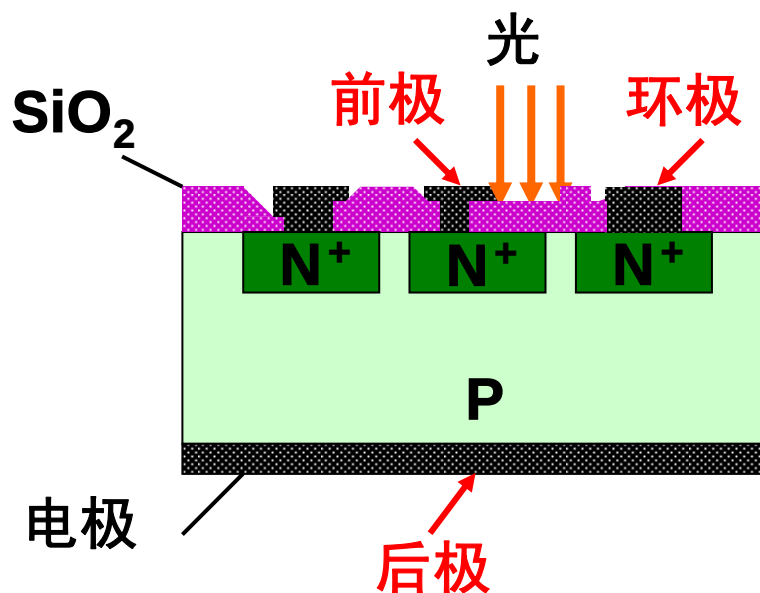
二 光电二极管结构

硅光电池的两种典型结构:

2CU型

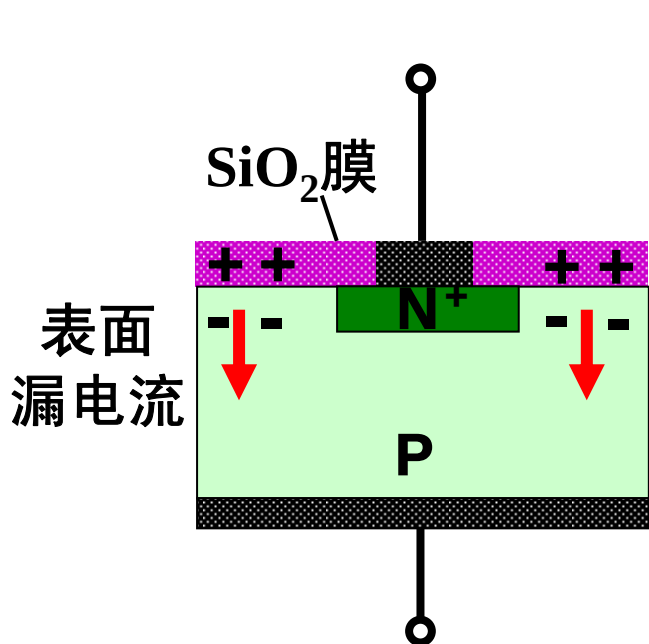


2DU型

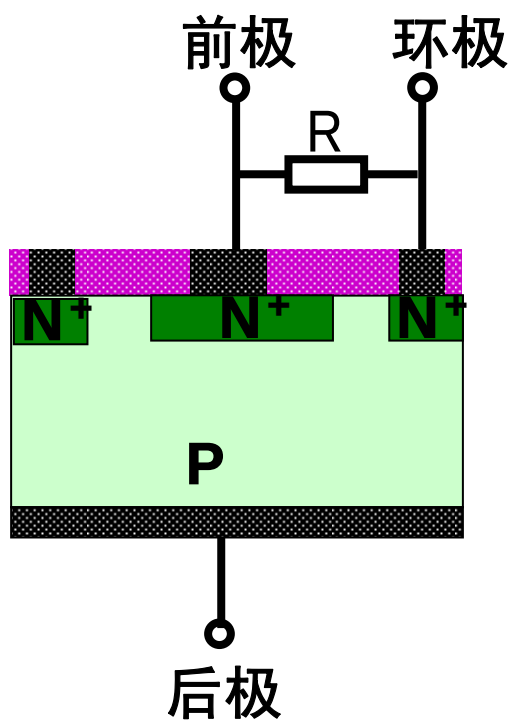


二 光电二极管结构

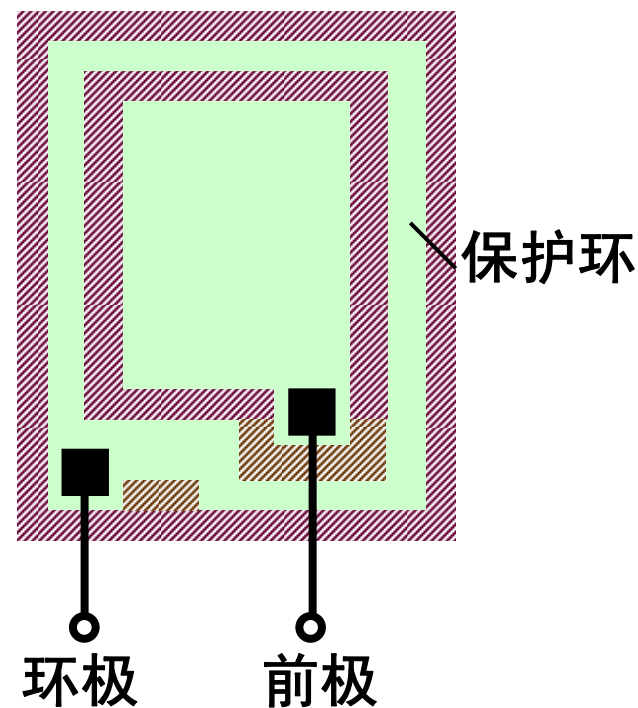
环极的作用：



表面漏电流的形成

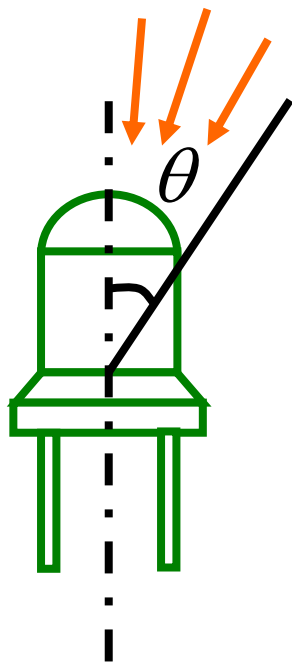


环极结构

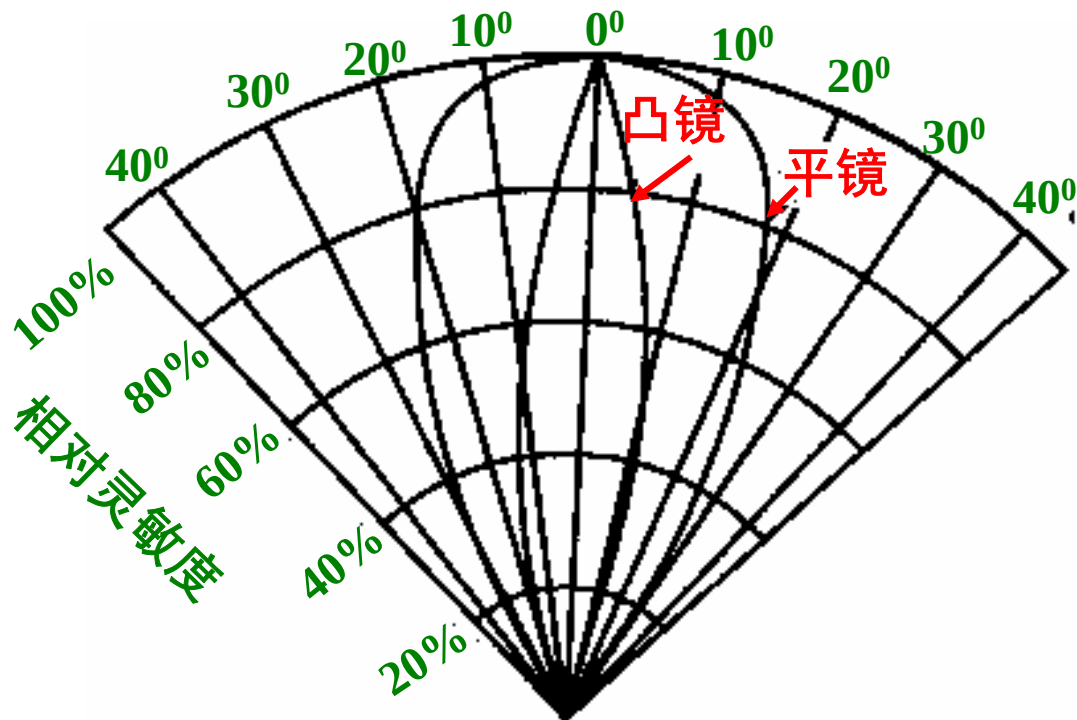


二 光电二极管结构

硅光电二极管的外形及灵敏度的方向问题：



硅光电二极管的外形



灵敏度的角度变化

三 光电二极管的工作特性

1. 光电转换特性

(1) 量子效率

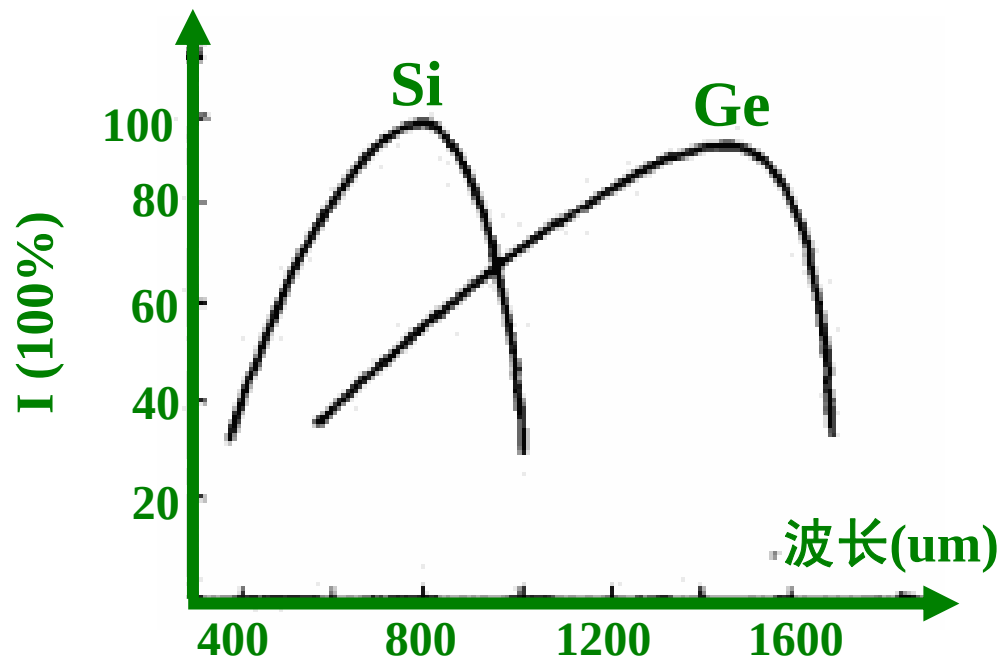
$$\eta = \frac{I_p / e}{P / h\nu}$$

(2) 响应度 (灵敏度)

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

2. 光谱特性

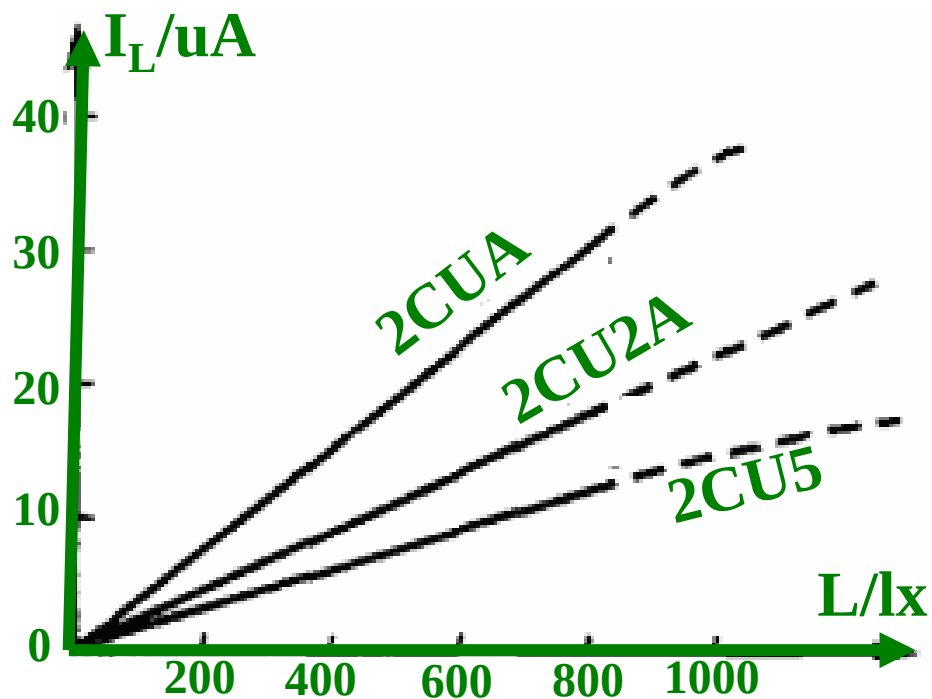
截止波长: $\lambda_c (\mu m) = \frac{1.24}{E_g (eV)}$



光电二极管光谱响应曲线

三 光电二极管的工作特性

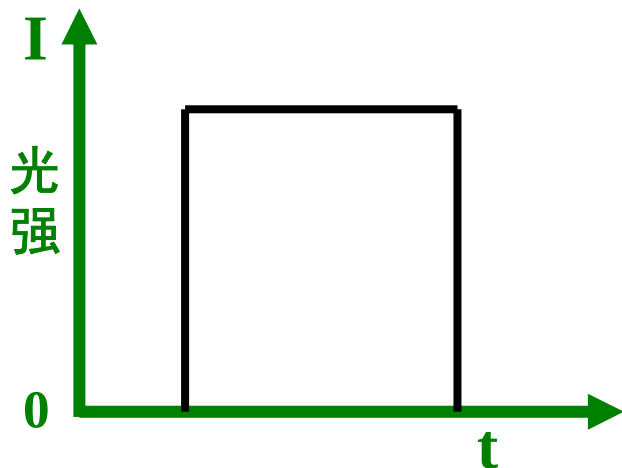
3. 照度特性



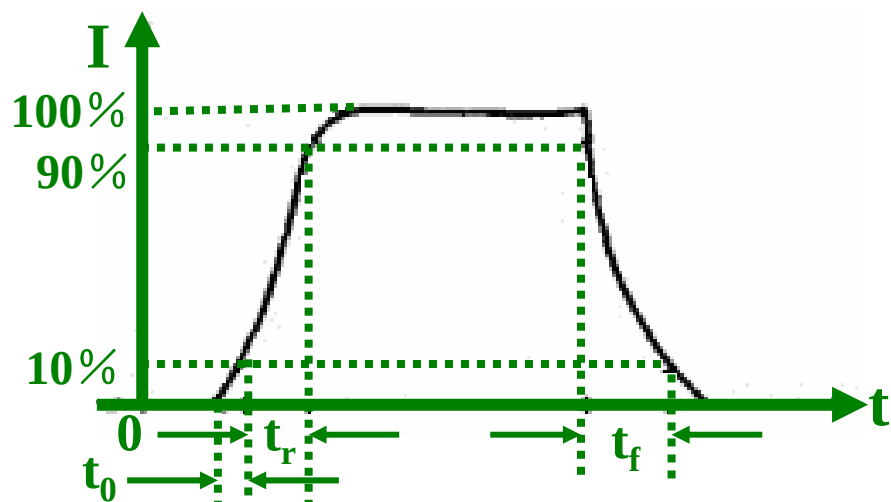
硅光电二极管光照特性曲线

三 光电二极管的工作特性

4. 响应时间



入射的矩形光脉冲信号

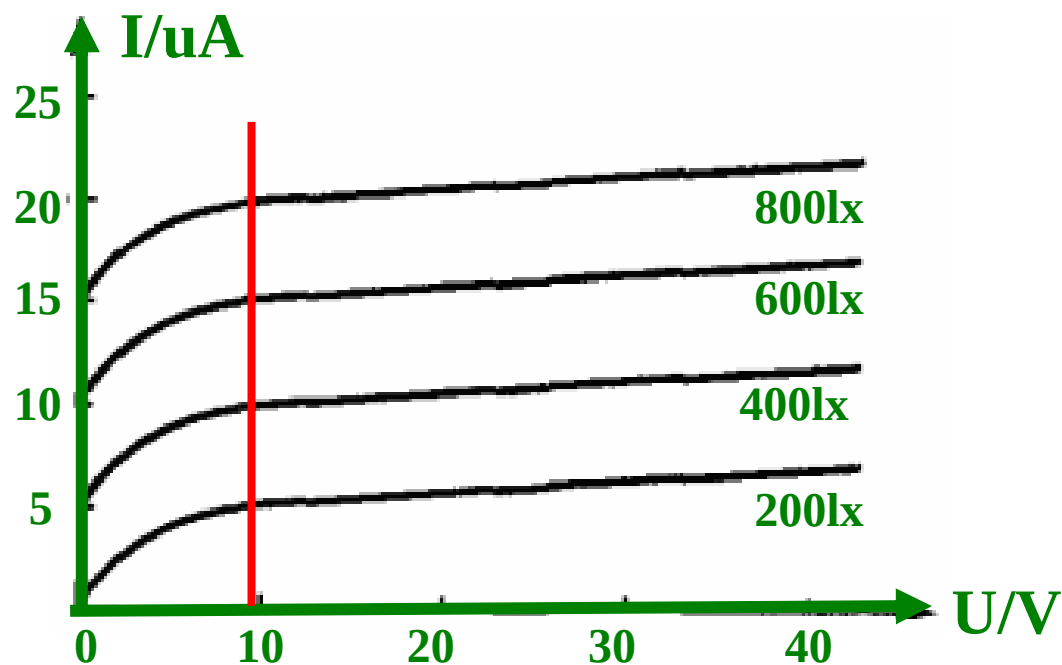


探测器输出光电流波形

影响响应时间的**主要因素**：载流子的运动速度

三 光电二极管的工作特性

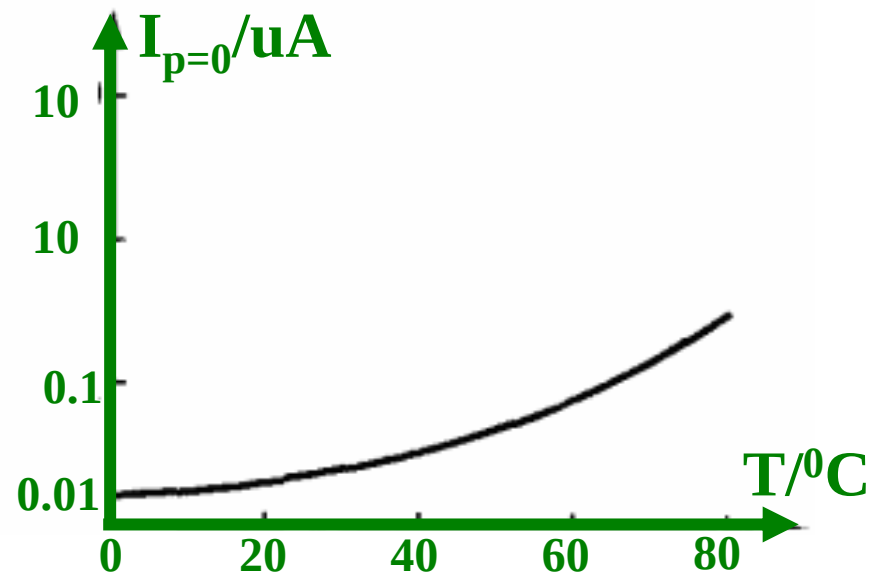
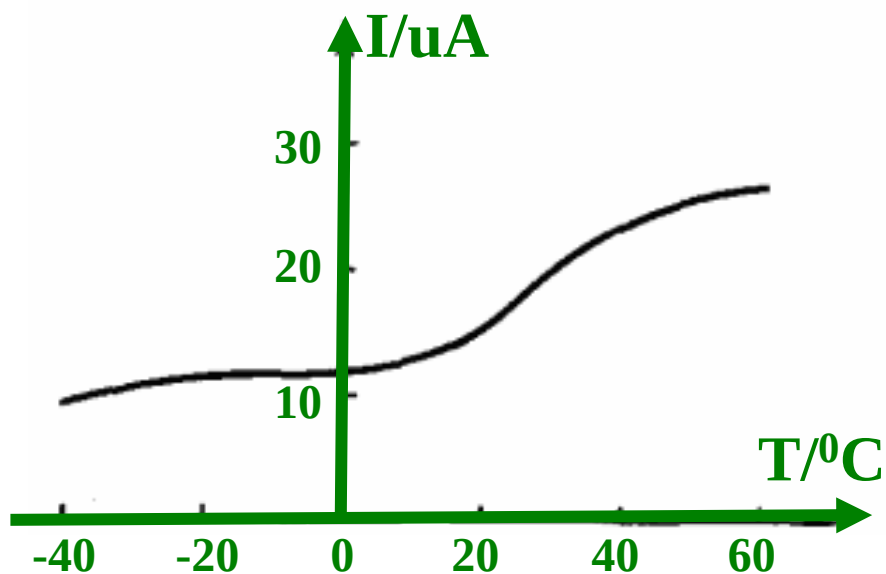
5. 伏安特性



硅光电二极管伏安特性曲线

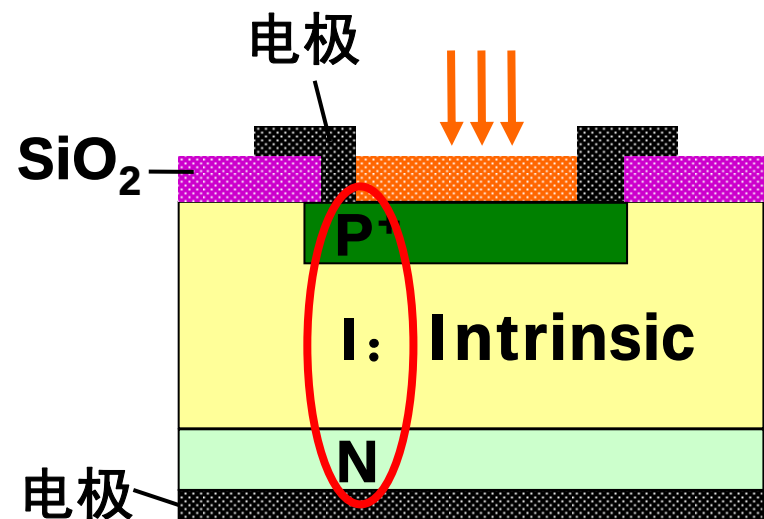
三 光电二极管的工作特性

6. 温度特性

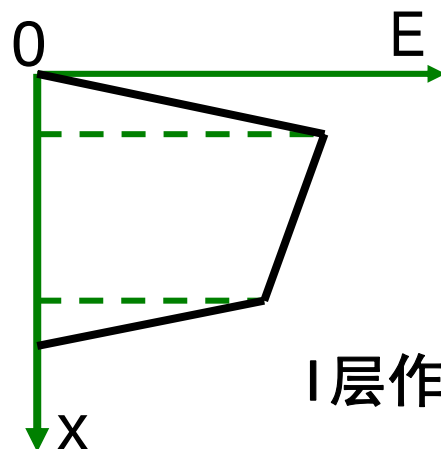


硅光电二极管温度特性曲线

四 PIN光电二极管



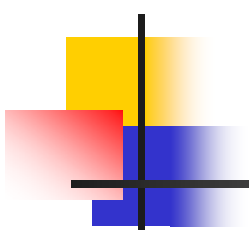
PIN硅光电二极管管芯结构



电场分布

I层作用:

- 暗电流减小
- 扩散过程缩短
- 漂移速度加快
- 电路时间常数减小
- 增加长波长光波的吸收率



四 PIN光电二极管

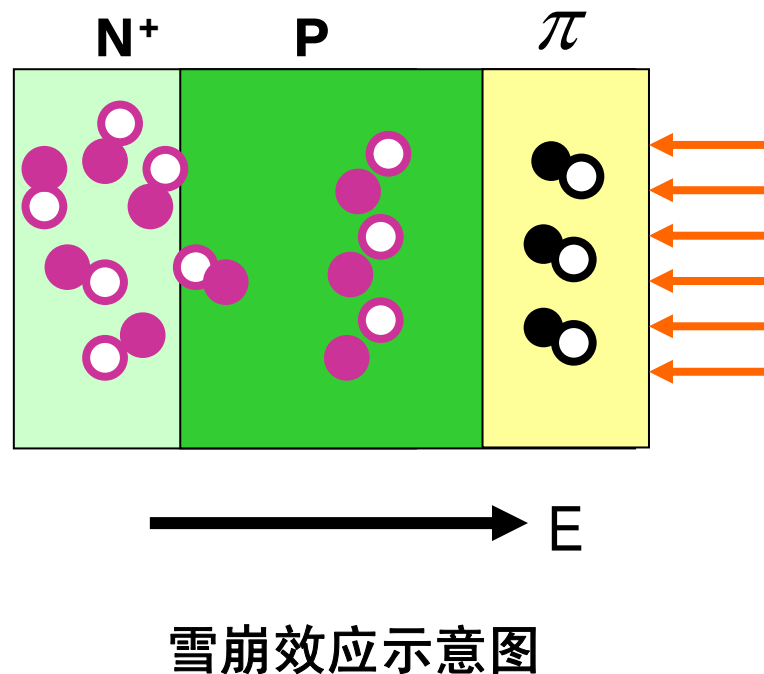
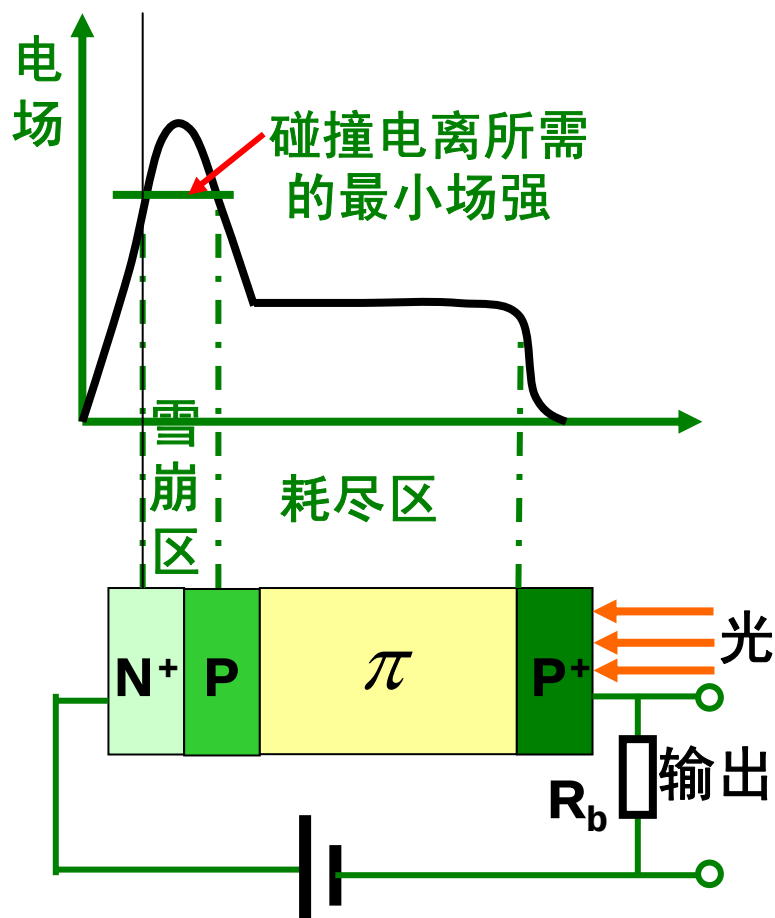
PIN光电二极管的一般性能

	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 (0.85um)	0.6(1.3um)
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

五 APD光电二极管

Avalanche Photodiode

1. 结构与工作原理



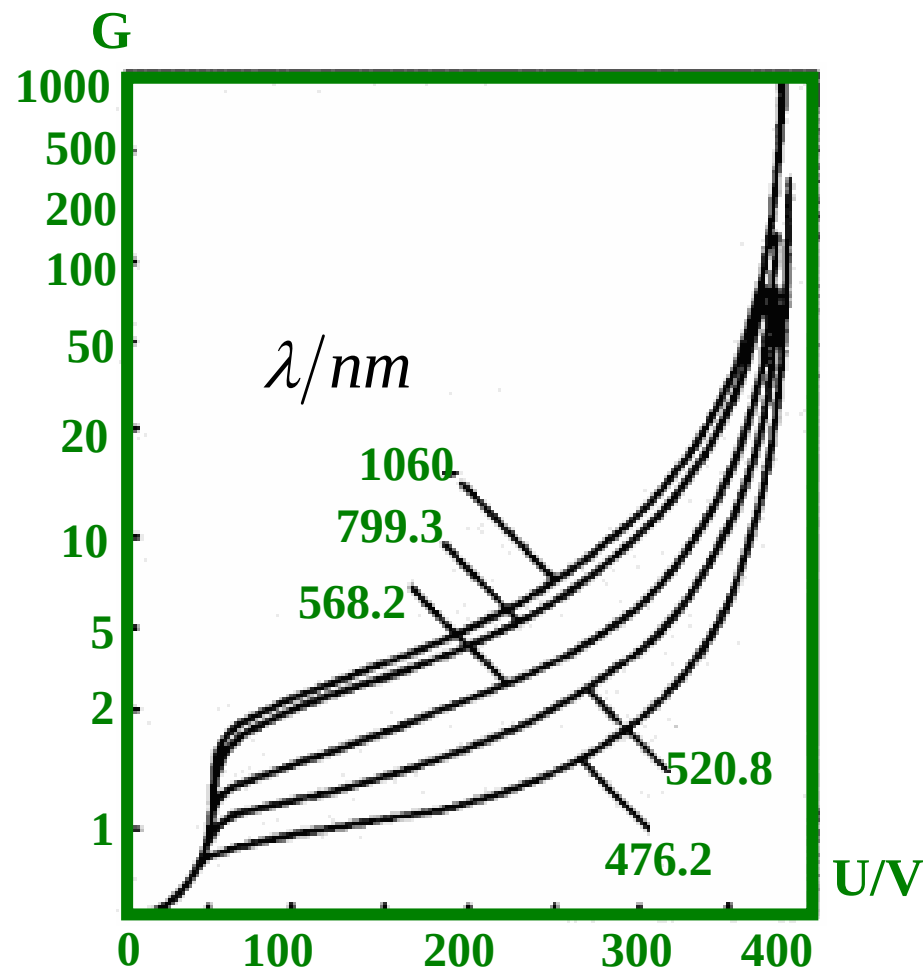
硅拉通型雪崩光电二极管结构及电场分布图

五 APD光电二极管

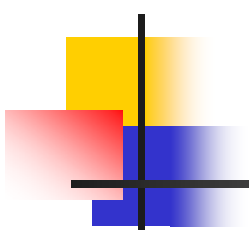
2. APD的倍增增益

倍增增益与偏置电压的关系:

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



APD电流增益与偏压的关系曲线



五 APD光电二极管

3. APD的一般性能

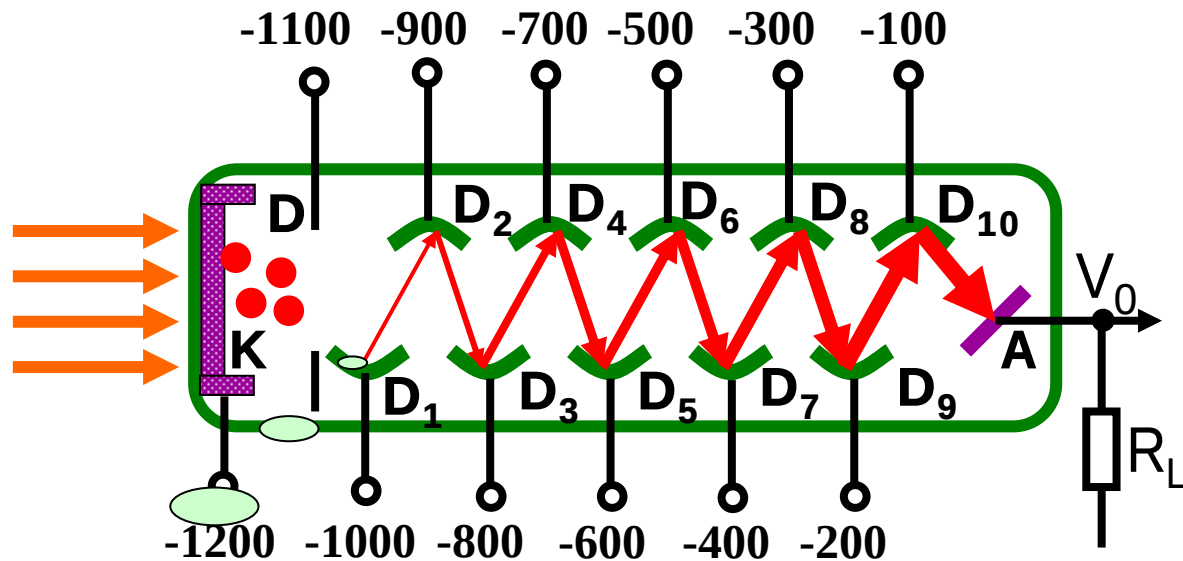
	Si-APD	InGaAs-APD
工作波长范围 $\lambda/\mu m$	0.4~1.0	1.0~1.65
响应度 $\rho/(A/W)$	0.5	0.5~0.7
暗电流 I_d/nA	0.1~1	10~20
响应时间 τ/ns	0.2~0.5	0.1~0.3
结电容 C_j/pF	1~2	<0.5
工作电压 $/V$	50~100	40~60
倍增因子 g	30~100	20~30
附加噪声指数 χ	0.3~0.4	0.5~0.7

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



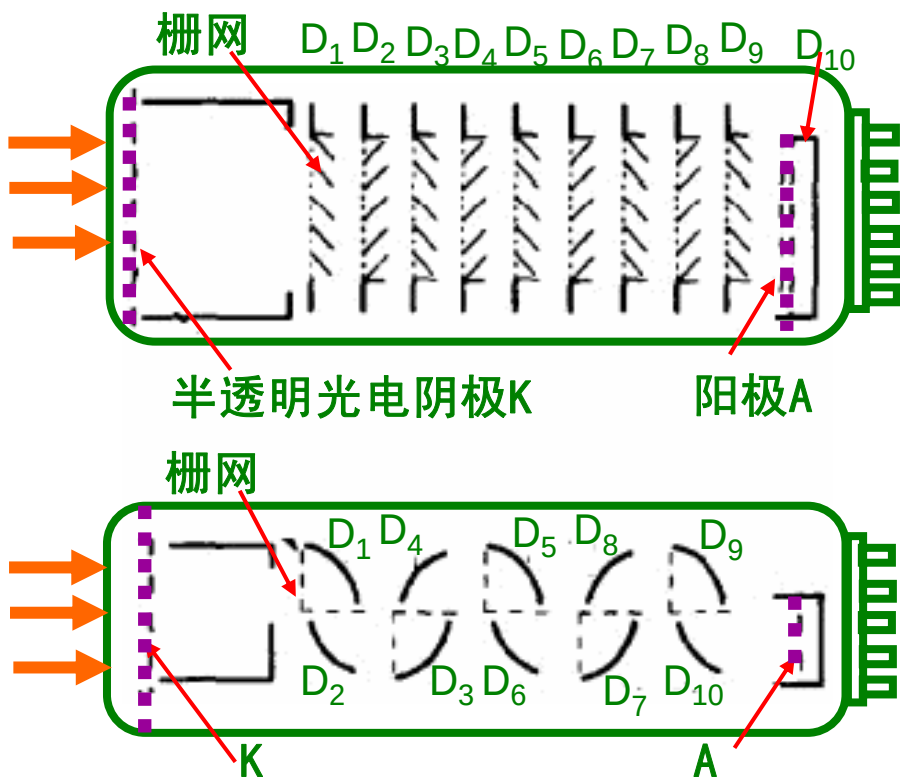
二次电子
发射效应

光电倍增管结构图

一 结构与工作原理

1. 结构

倍增极的分类：聚焦型和非聚焦型



两种非聚焦型倍增极结构图

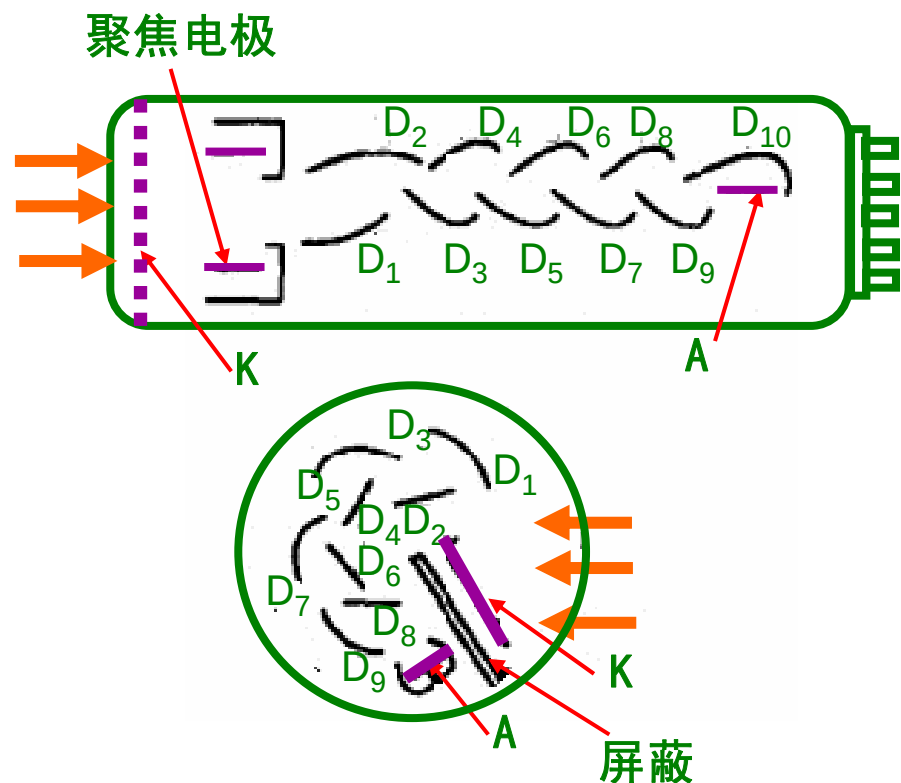
- 倍增系数较高
- 存在电子散射效应
- 脉冲信号展宽
- 响应时间长

一 结构与工作原理

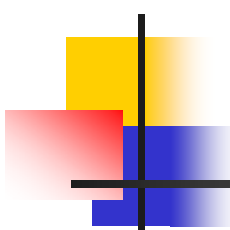
1. 结构

倍增极的分类：聚焦型和非聚焦型

- 避免散射效应
- 响应时间短
- 对电源稳定性要求高



两种聚焦型倍增极结构图



一 结构与工作原理

2. 工作原理

光照阴极发射光电子

光电子在极间获得较大能量

以足够高的速度打到倍增极

倍增极产生二次电子发射

向阳极运动的电子数量成倍增长

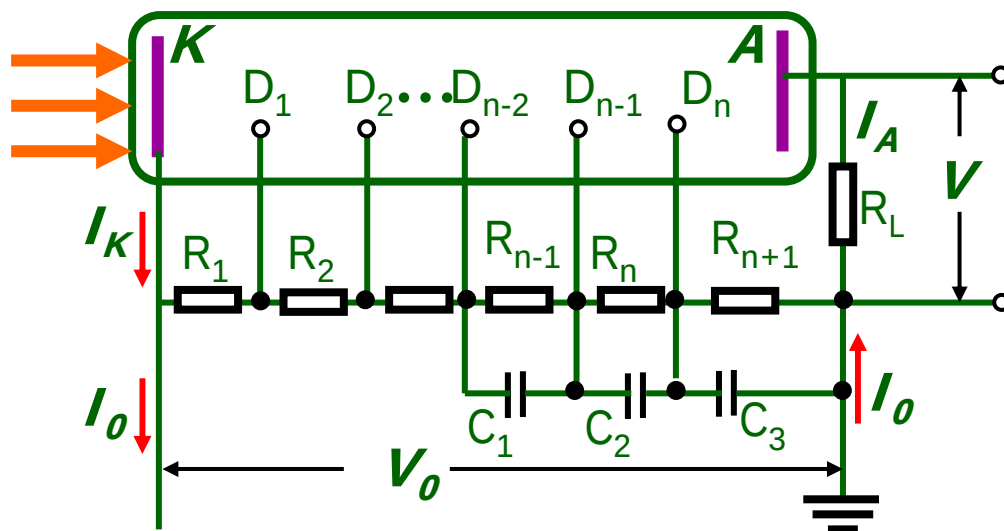
倍增的电子到达阳极

形成正比于光照强度的光生电流



一 结构与工作原理

3. 工作电路与电压供给



光电倍增管供电回路

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。

二 工作特性参数

1. 阴极灵敏度

光阴极初始电流

$$S_k = \frac{I_K}{\Phi_V} (\mu A/lm)$$

入射光通量

2. 阳极灵敏度

阳极输出电流

$$S_A = \frac{I_A}{\Phi_V} (\mu A/lm)$$

入射光通量

3. 频率特性

保持内增益条件下截止频率:

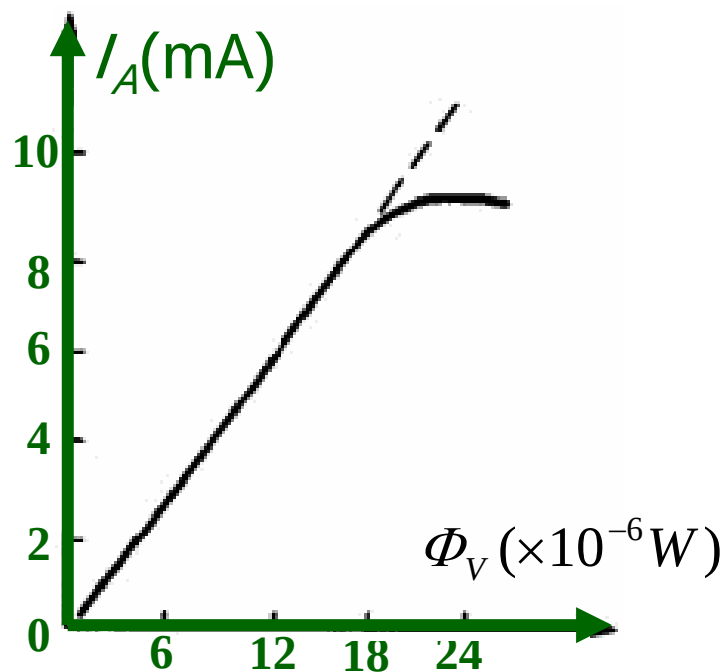
$$\nu_c = \frac{1}{2\pi R_L C}$$

放大倍数G:

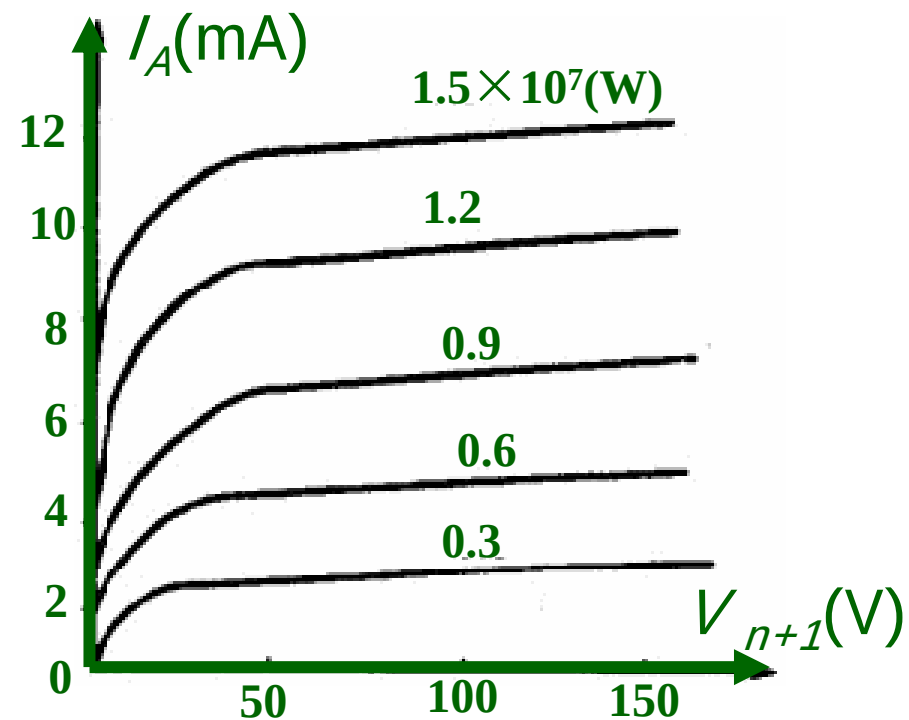
$$G = \frac{I_A}{I_K} = \frac{S_A}{S_K}$$

二 工作特性参数

4. 阳极伏安特性



光电特性



伏安特性

二 工作特性参数

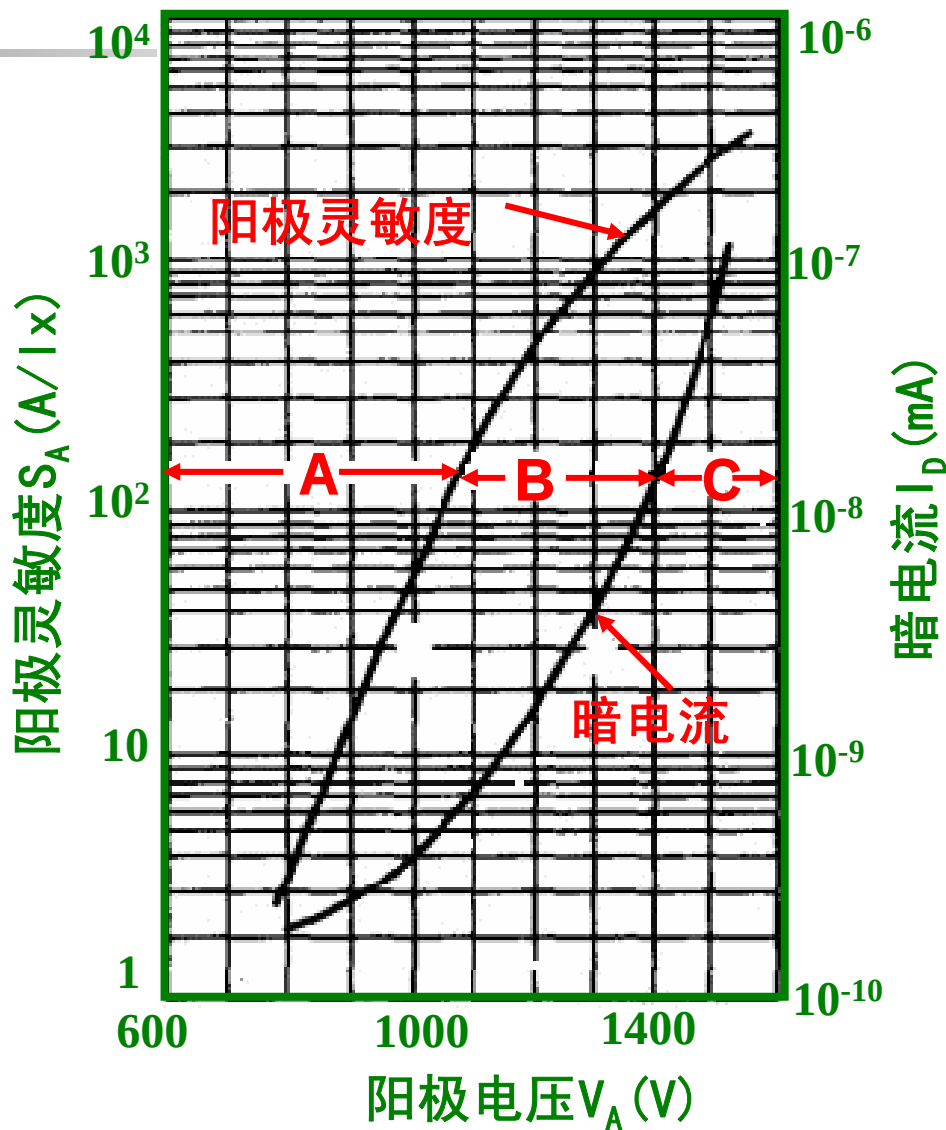
5. 暗电流

正常工作电压下暗电流的主要来源：

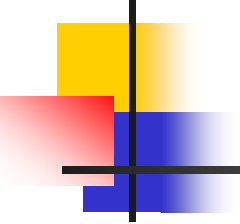
光阴极与第一倍增极的热电子发射

高电压下暗电流的主要来源：

反馈电流



暗电流与工作电压关系曲线



7-5 电荷耦合器件

图像探测器的成像方式:

➤ 非扫描成像:

照相机（使用胶片）、电影摄像机等

➤ 扫描成像

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）

扫描：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

7-5 电荷耦合器件

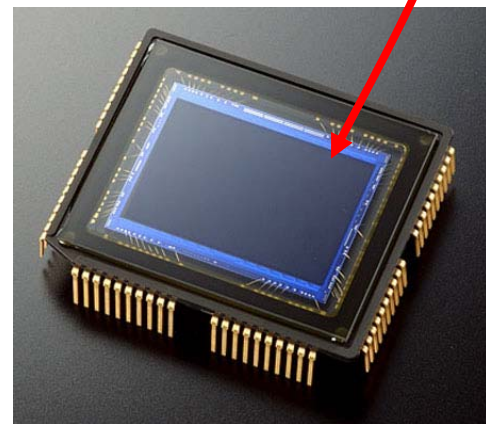
固体摄像器件分类:

- 电荷耦合器件 (Charge Coupled Device, **CCD**)
- 互补金属氧化物半导体图像传感器
(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)
- 电荷注入器件 (Charge Injection Device, CID)

CCD特点—以**电荷**作为信号

CCD基本功能—电荷存储和电荷转移

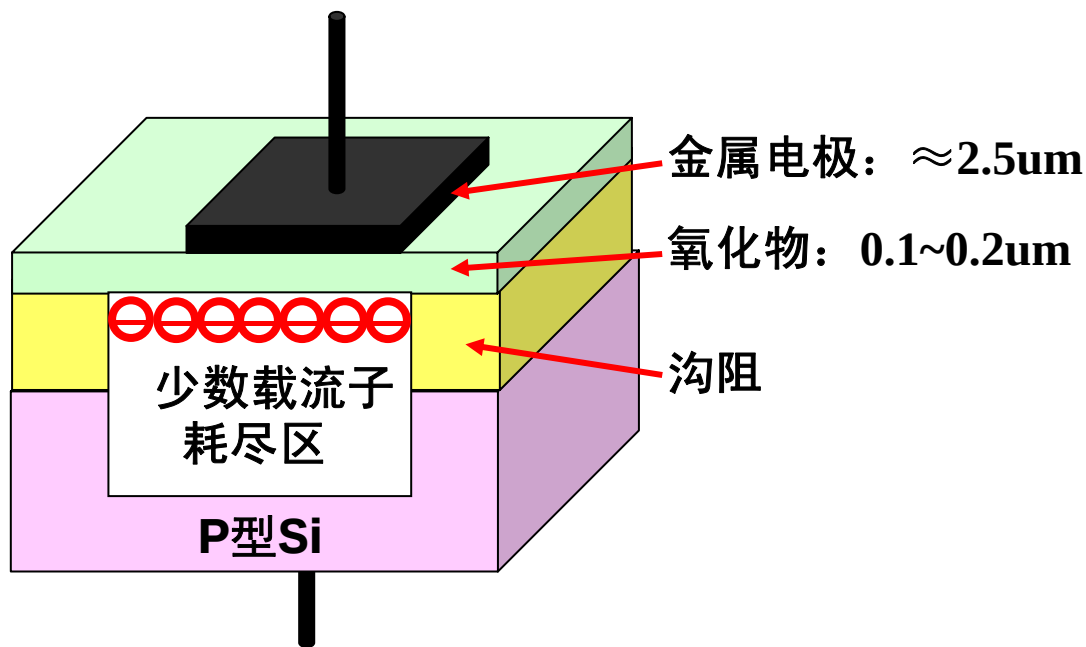
CCD工作过程—信号电荷的产生、存储、传输和检测



一 电荷耦合器件的基本原理

1. 电荷存储

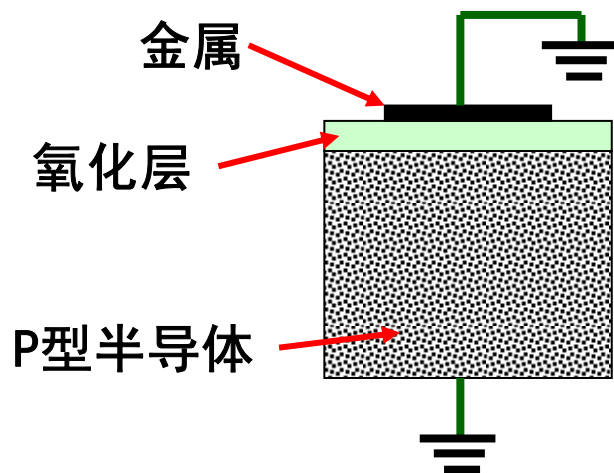
构成CCD的基本单元：MOS（金属-氧化物-半导体）电容器



CCD的MOS电容剖面图

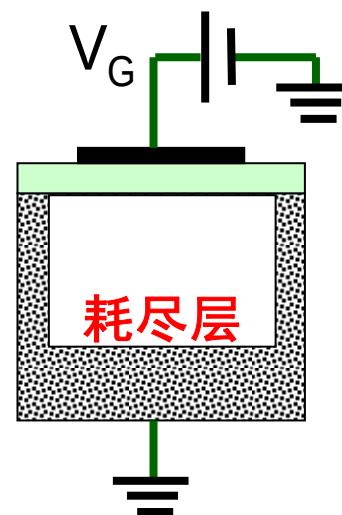
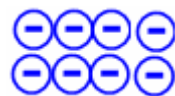
一 电荷耦合器件的基本原理

1. 电荷存储



电极不加偏压

信号电荷



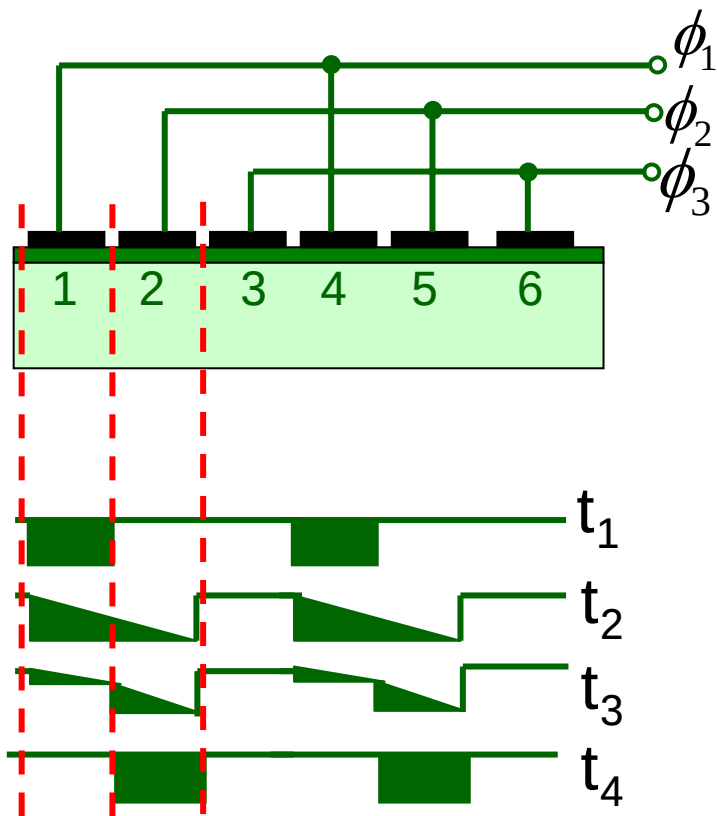
“电子势阱”

势阱的填充

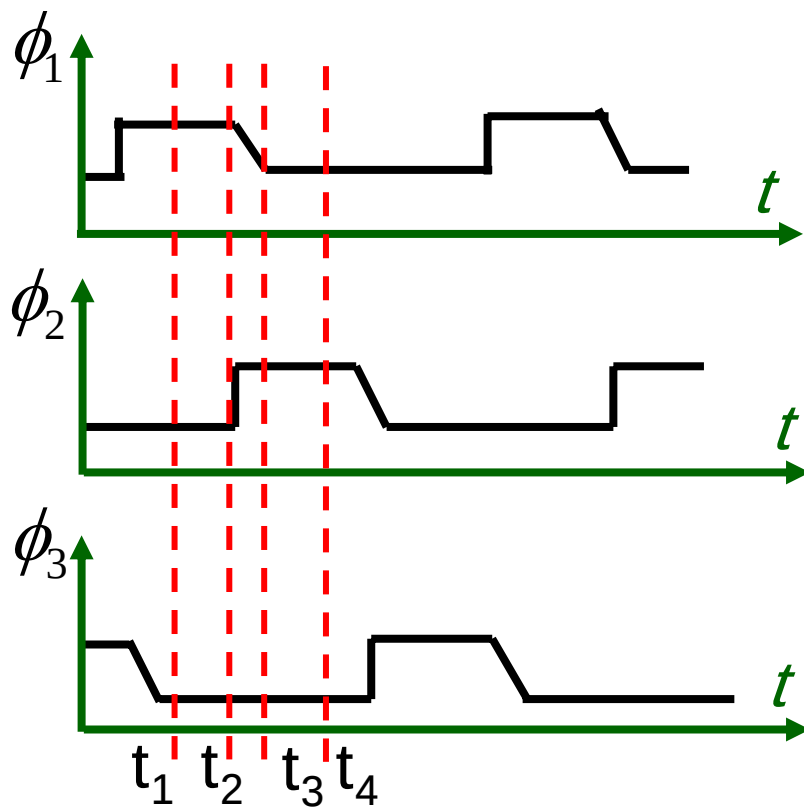
电极加正向偏压

一 电荷耦合器件的基本原理

2. 电荷转移



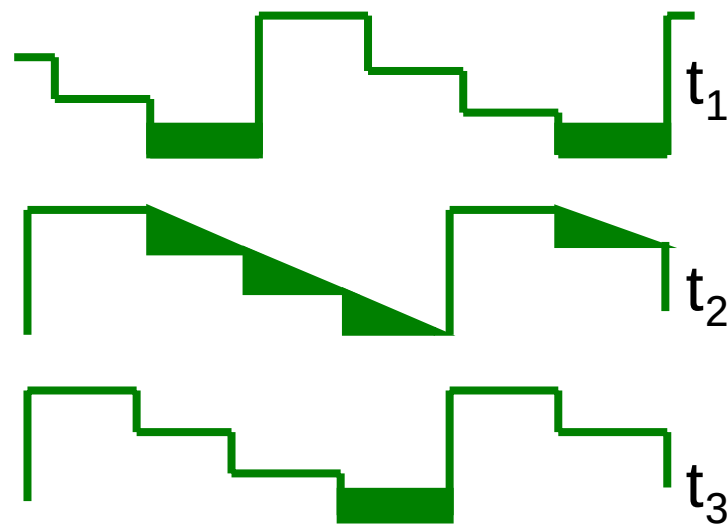
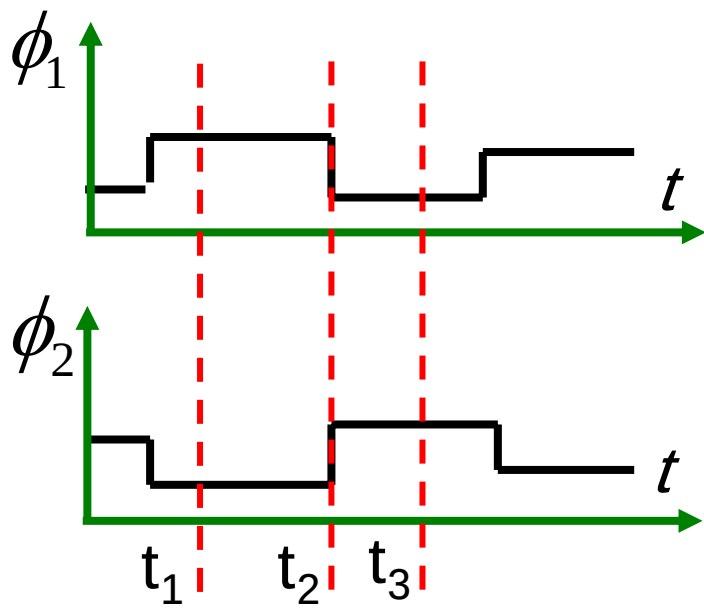
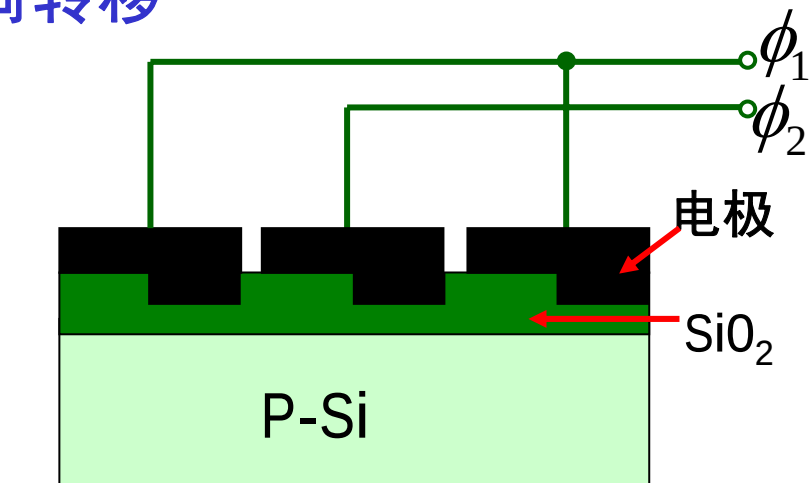
三相电极结构及电荷转移



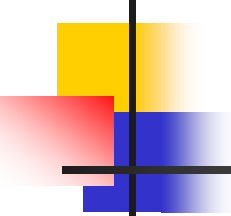
时钟控制脉冲

一 电荷耦合器件的基本原理

2. 电荷转移



两相电极结构及电荷转移



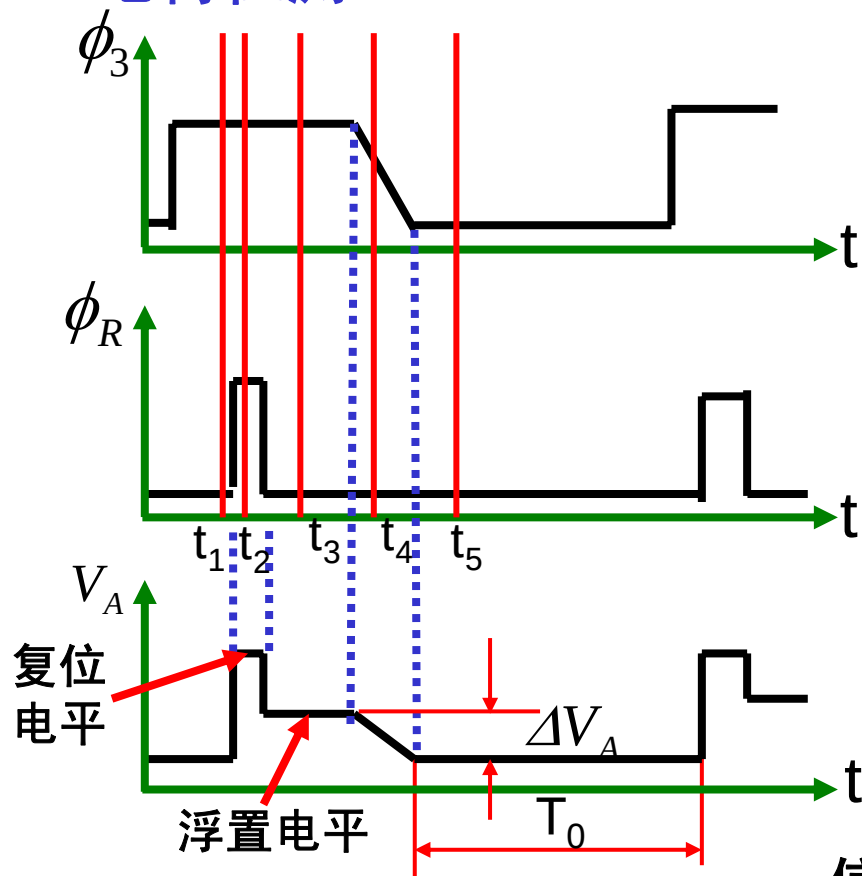
一 电荷耦合器件的基本原理

2. 电荷转移

- **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。
转移效率99.9%，工作频率<10MHz
- **体内沟道（或埋沟道）**：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，形成体内的转移沟道。
转移效率>99.999%，工作频率>100MHz

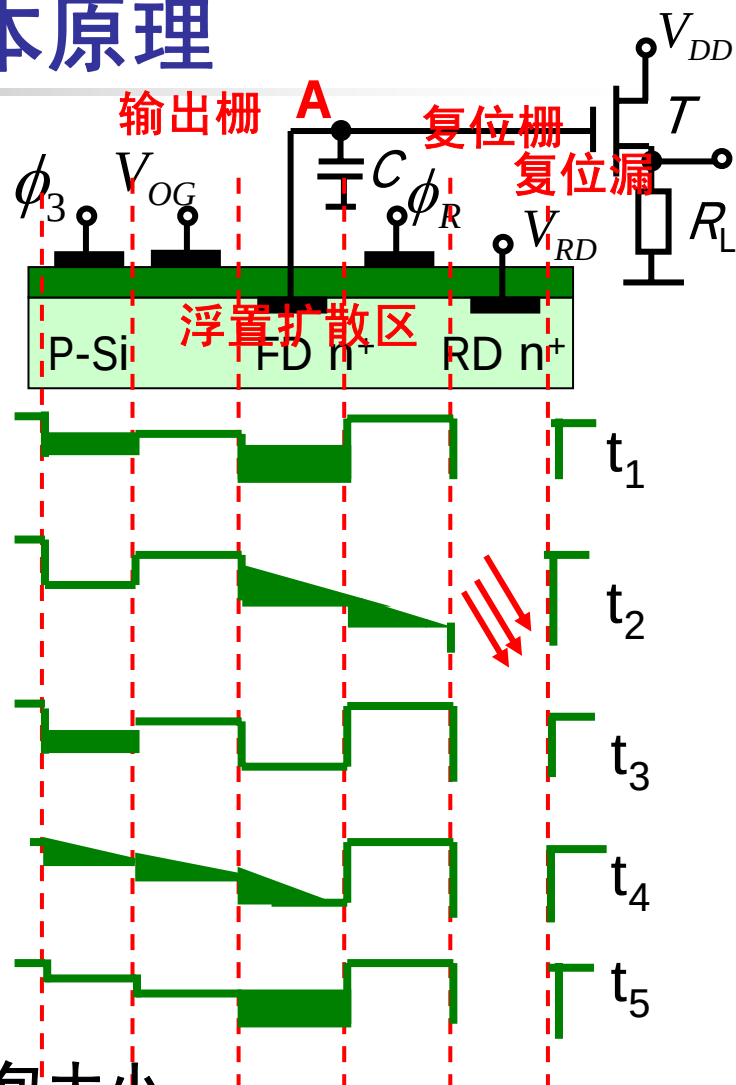
一 电荷耦合器件的基本原理

2. 电荷检测

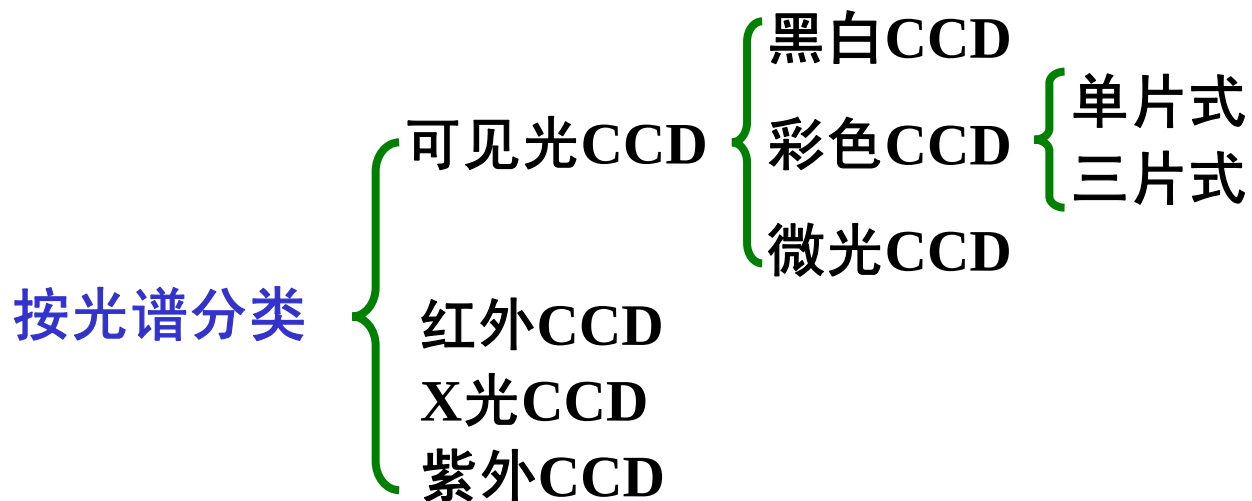
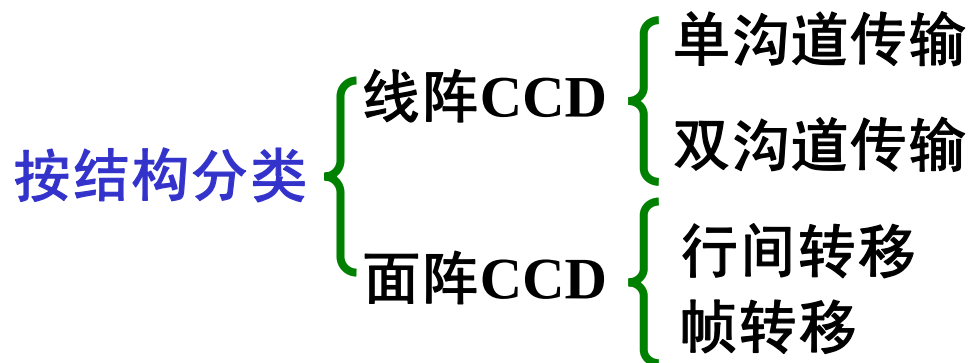


信号电荷包大小

A点电位变化量:
$$\Delta V_A = \frac{Q_{FD}}{C}$$
 与FD区有关的总电容



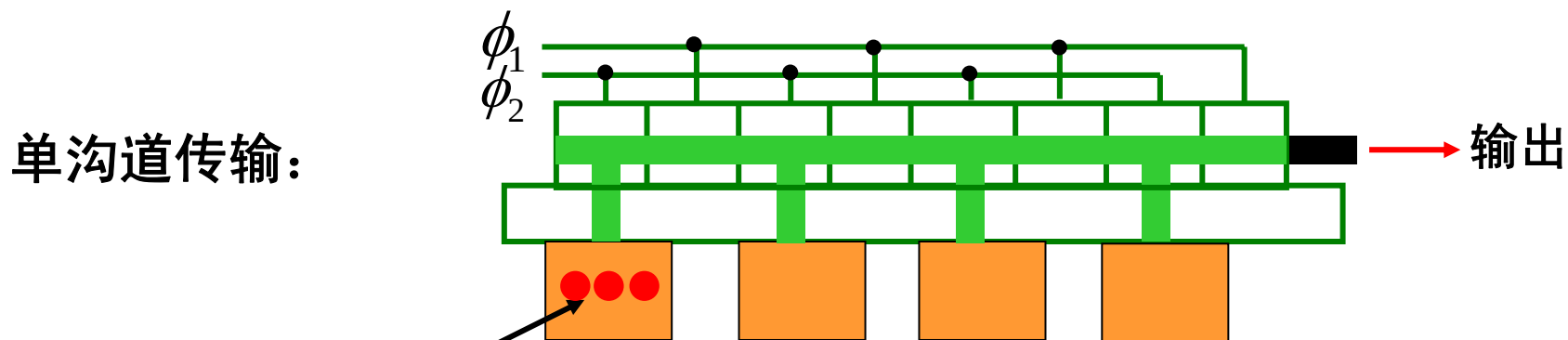
二 电荷耦合摄像器件的工作原理



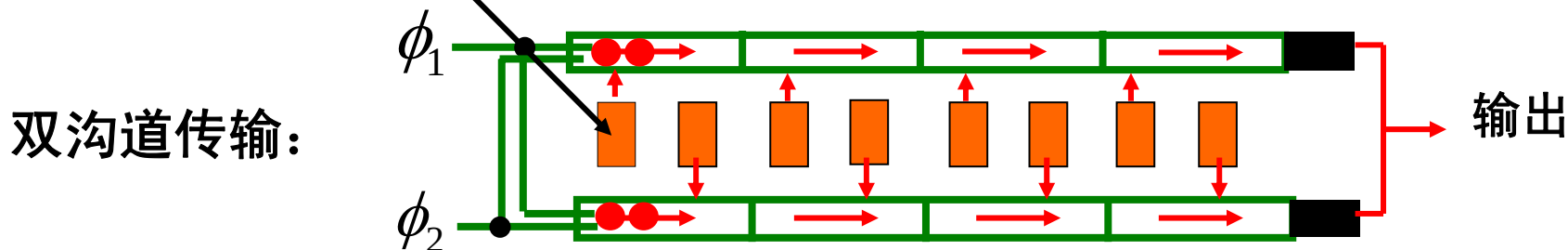
二 电荷耦合摄像器件的工作原理

1. 线阵CCD

线阵：光敏元排列为一行。



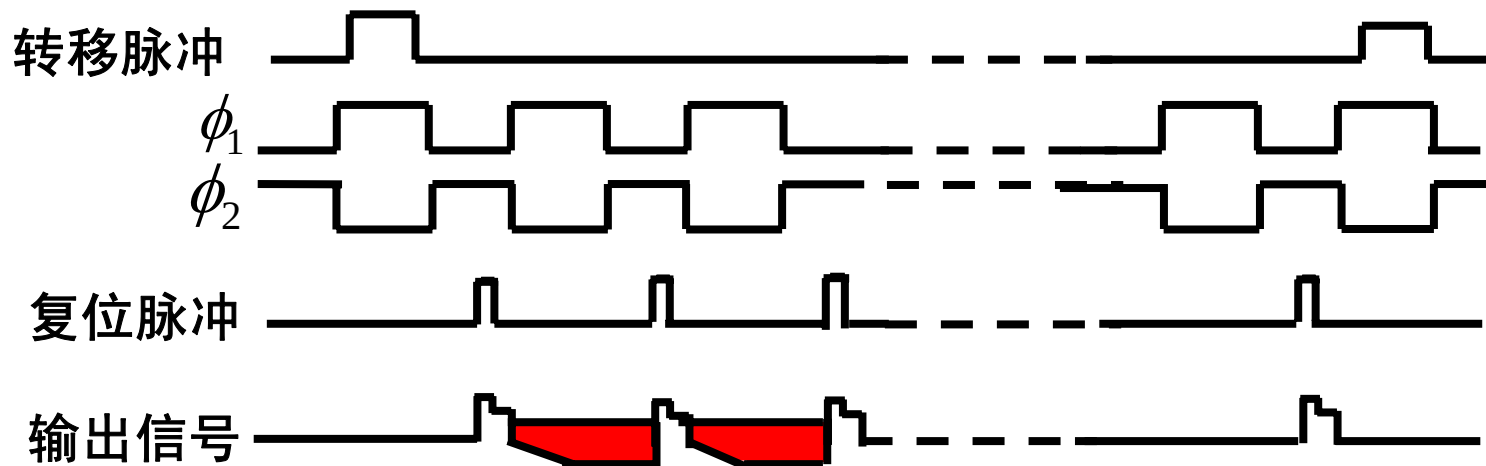
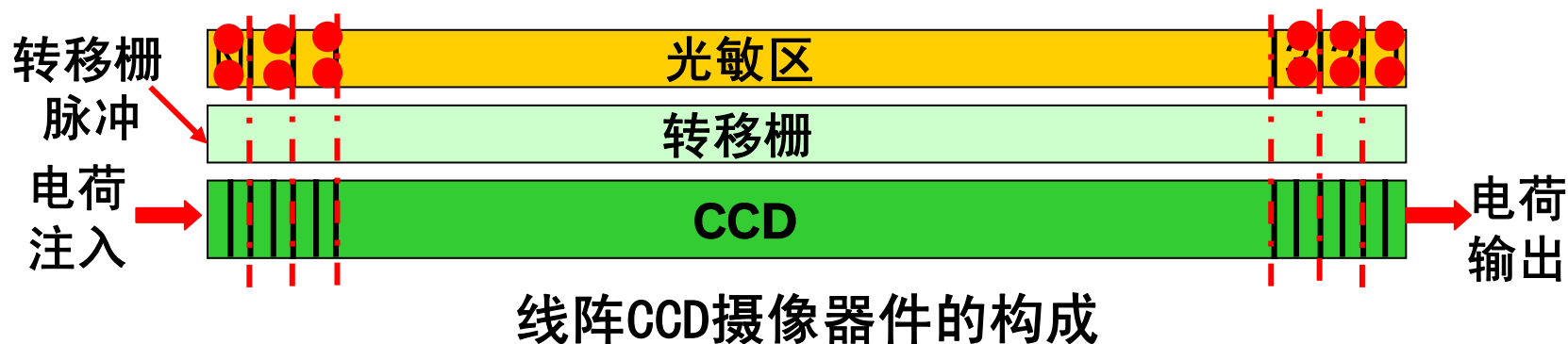
光敏元



线阵CCD摄像器件

二 电荷耦合摄像器件的工作原理

1. 线阵CCD

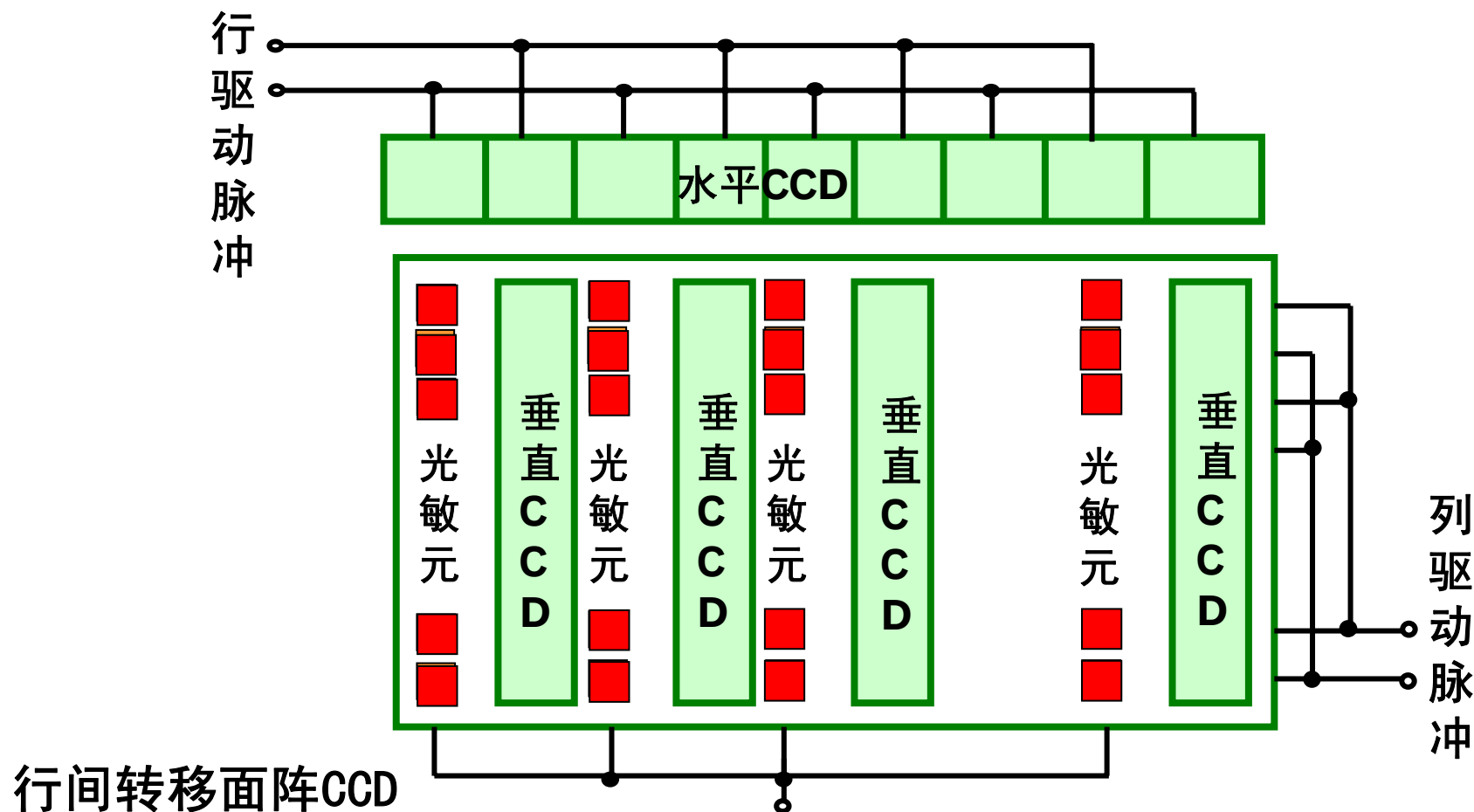


线阵CCD摄像器件工作波形

二 电荷耦合摄像器件的工作原理

2. 面阵CCD

面阵：器件像元排列为一平面，它包含若干行和列的结合。



二 电荷耦合摄像器件的工作原理

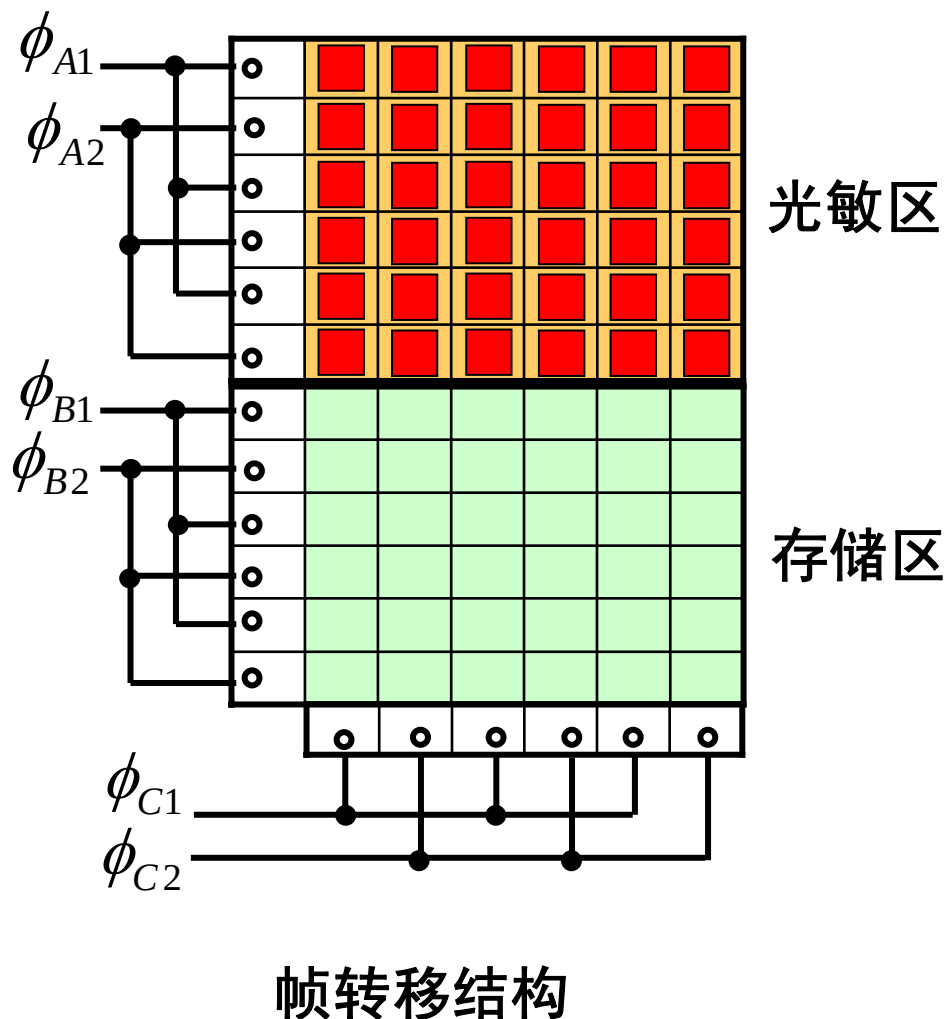
2. 面阵CCD

优点:

行间转移结构的转移次数少;
帧转移结构光敏区占空因子高

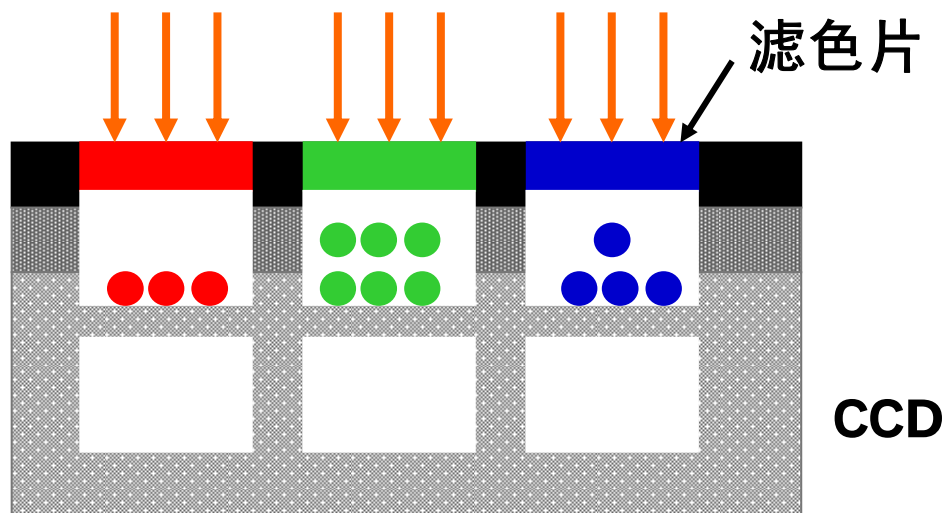
像元数量:

线阵CCD: 128位至5000位、
7000位不等
面阵CCD: 25万至数百万个不等

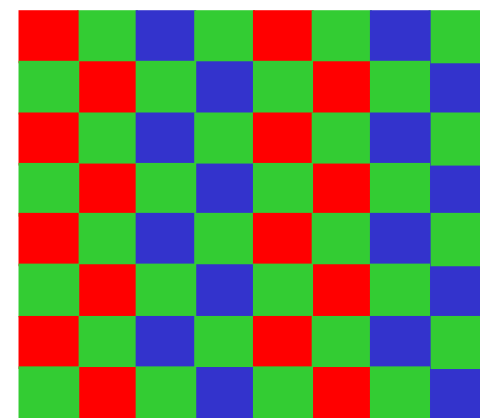


二 电荷耦合摄像器件的工作原理

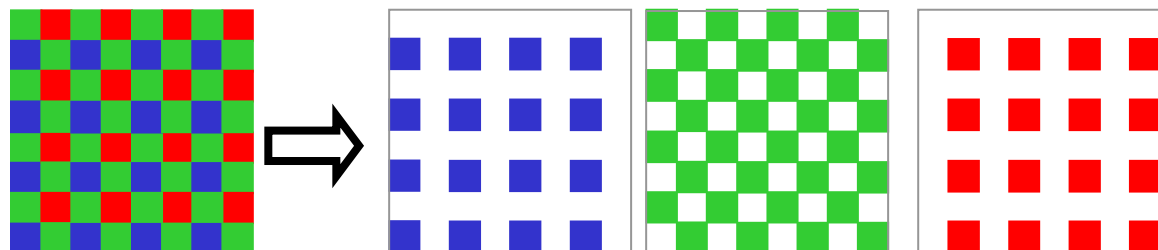
3. 彩色CCD



单片式彩色CCD物理结构



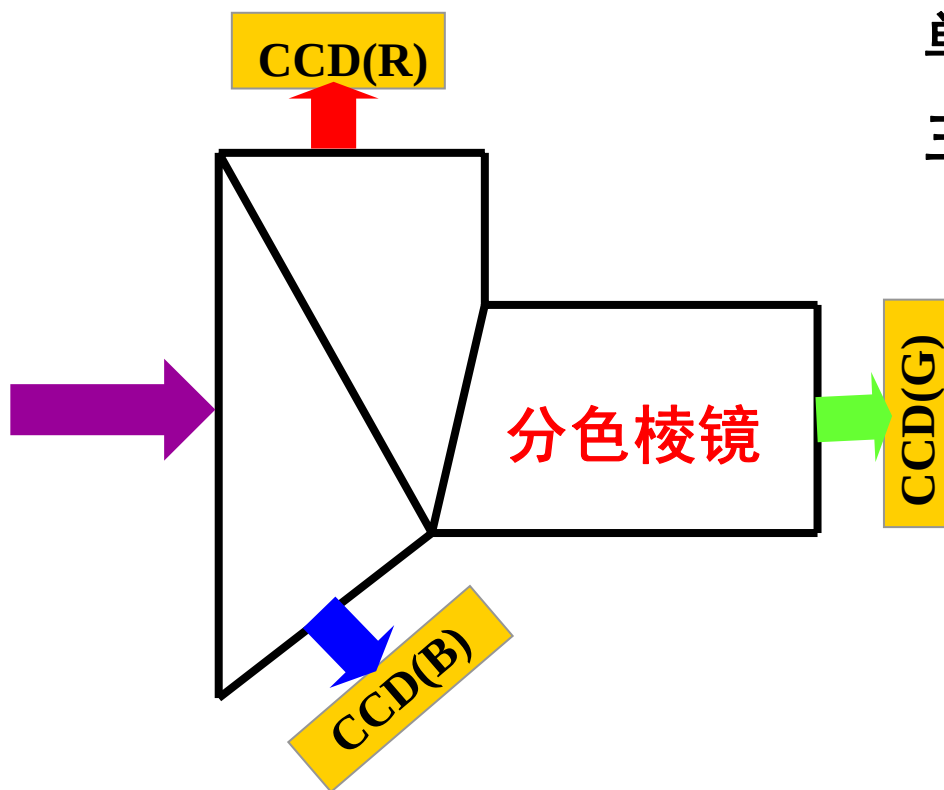
行间排列滤色器



拜尔方式滤色器

二 电荷耦合摄像器件的工作原理

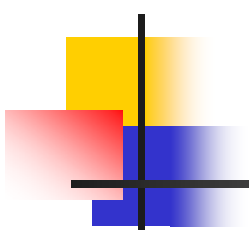
3. 彩色CCD



单片式：工业、家用摄像机

三片式：高质量摄像机

三片式彩色CCD



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

$$\eta^n = \frac{Q_n}{Q_0}$$

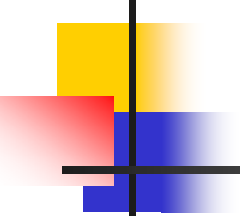
2. 暗电流

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：

- 限制器件的低频限；
- 引起图像的固定噪声



三 电荷耦合摄像器件的特性参数

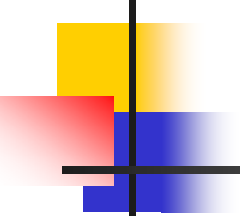
3. 灵敏度

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。



三 电荷耦合摄像器件的特性参数

5. 噪声

- 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。
- 转移噪声：由转移损失及表面态俘获所引起的噪声。
- 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。