



南京工业大学
NANJING TECH
UNIVERSITY

光电信息科学与工程

第4章 光电探测器及校正技术

4.1 概述

光电探测器的工作原理是将光辐射的作用视为所含光子与物质内部电子的直接作用。也就是物质内部电子在光子作用下，产生激发而使物质的电学特性发生变化。这种变化主要有以下三类：

(1) 外光电效应

某些物质在光子的作用下，可以从物质内部逸出电子的现象叫做外光电效应。逸出电子的动能可用下式表示：

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - p_0$$

式中， m 为电子质量； v 为电子逸出后所具有的速度； h 是普朗克常数； p_0 为该物质的逸出功

(2) 内光电效应

某些物质在光子作用下，使物质导电特性发生变化，这种现象叫做内光电效应。

利用内光电效应材料制成的光电探测器主要是各种类型的光敏电阻。

(3) 障层光电效应

在不同材料的接触面上，由于它们电学特性不同而产生障层。

利用障层光电效应制成的光电探测器主要有各种类型的光电池和光电二极管、光电三极管等。

4.2 光电倍增管

利用外光电效应制成的光电器件主要有光电管和光电倍增管。光电管结构简单，如图4-1所示；图4-2所示是真空光电管的伏安特性

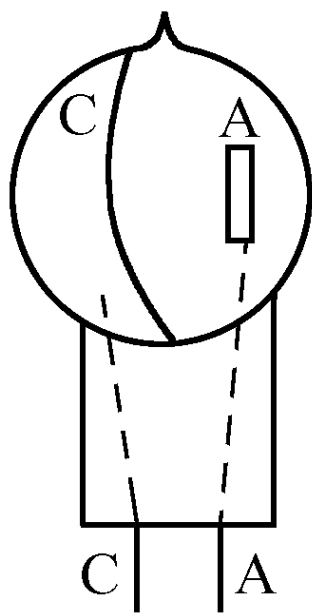


图4-1 光电管结构示意图

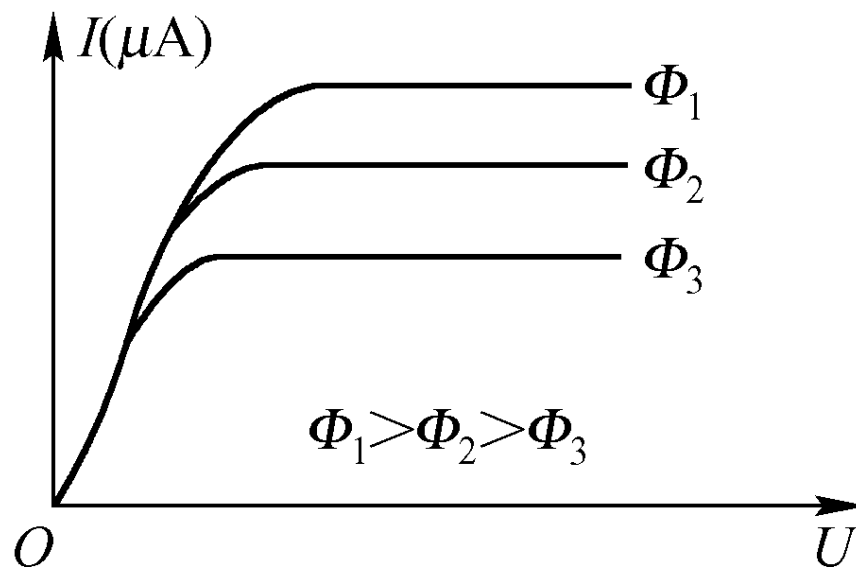


图4-2 真空光电管的伏安特性

1. 光电倍增管的工作原理

光电倍增管是由封装在真空泡壳中的光阴极、阳极和若干中间二次发射极所组成。它的结构原理及偏置电路如图4-3所示。

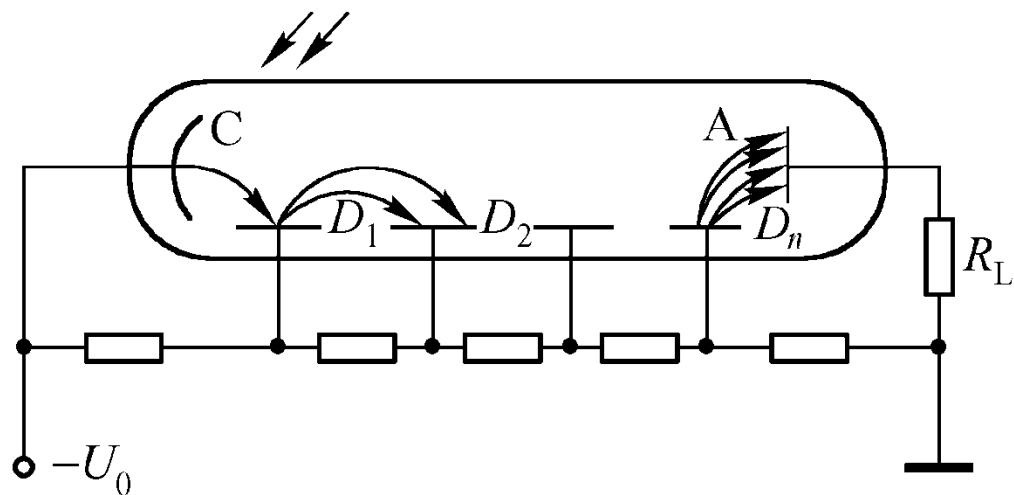


图4-3 光电倍增管及回路示意图

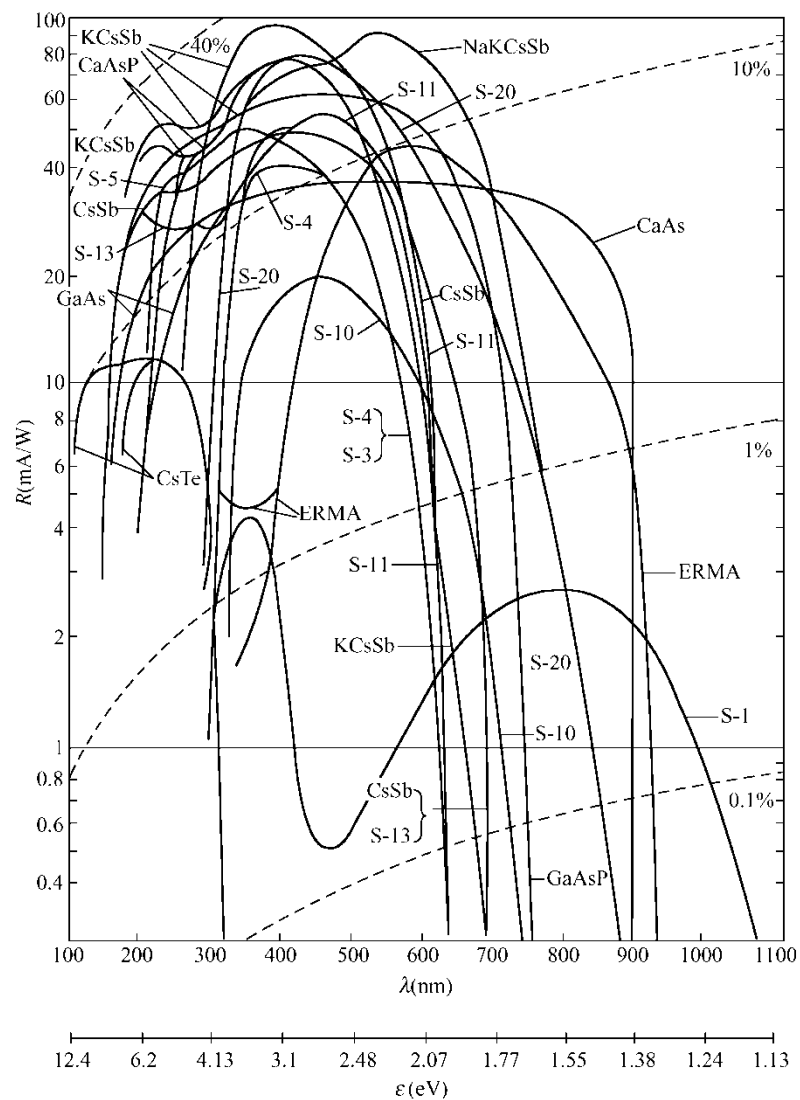
(1) 光阴极

目前用于光电倍增管的光阴极材料主要有银氧铯、铯铯、铯钾钠铯和 III—V 族砷化镓等。它们的主要特性见表 4-1。

表 4-1 几种光阴极材料及主要特性

光阴极材料	峰值响应波长 (μm)	典型灵敏度 ($\mu\text{A}/\text{lm}$)	峰值波长处灵敏度 (mA/W)	峰值波长处量子效率 (%)	25℃ 下的暗发射 (fA/cm^2)
银氧铯 Ag-O-Cs(S-1)	0.80	30	2.8	0.43	900
铯铯 Sb-Cs(S-11)	0.44	70	56	15.7	3
铯钾钠铯 Sb-Na-KCs-Sb(S-20)	0.42	150	64	18.8	0.3
砷化镓 Ga-As	0.83	300	68	10	0.1

光阴极材料的光谱特性曲线如图4-4所示。



(2) 二次发射极

二次发射极简称二次极，有时又叫做打拿极。二次发射极的主要材料有铯铟(CsSb)、氧化铍(BeO)、银镁(AgMg)合金、磷化镓(GaP)和磷砷化镓等。

二次发射体的重要参数是二次发射系数 δ :

$$\delta = n_2 / n_1$$

式中 n_1 、 n_2 分别是输入二次发射体的一次电子数和二次发射体对应发出的电子数。二次电子发射系数与材料本身特性、一次电子的动能或极间电压的大小有关，如图4-5所示。

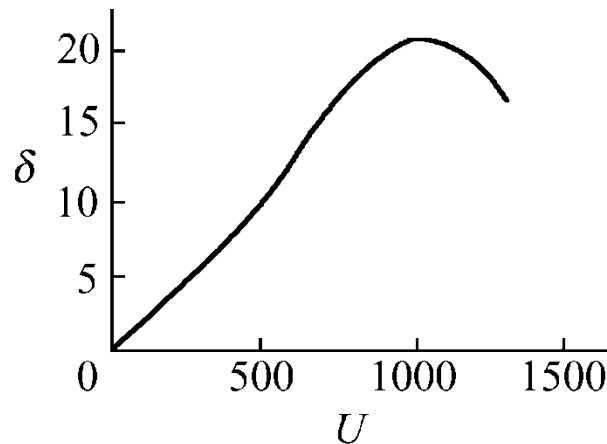


图4-5 δ — U 关系曲线

二次发射极在光电倍增管中除提供大的电子增益外，另一个重要作用是引导管内电子的渡越，使电子从上一级正确地转移到下一级上去，这一作用叫做电子聚焦。如图4-6中给出了四种结构的示意图。

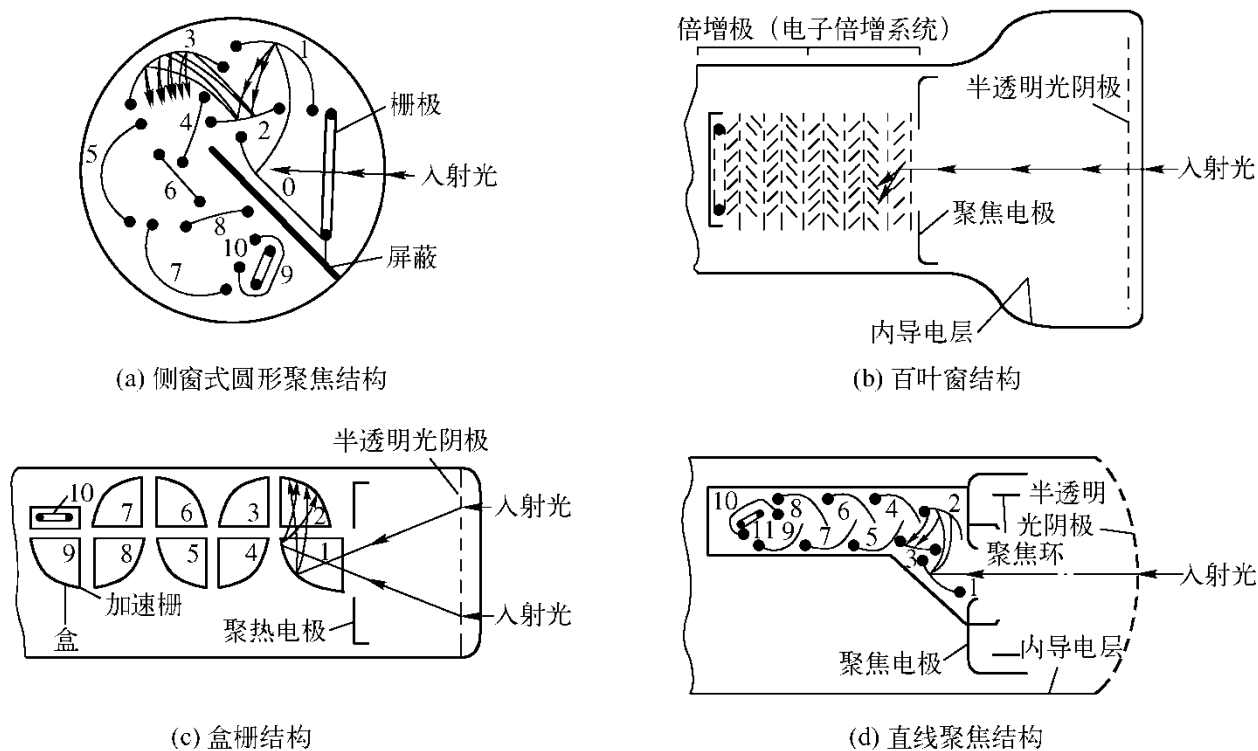


图4-6 几种光电倍增管的结构示意

(3) 阳极

阳极又称收集极。光电流经过各二次发射极倍增后，由阳极收集并形成信号电流输出。阳极是管内电压最高的地方，当最后一个二次极发出的电子飞到阳极上后，阳极也会产生二次电子发射，这将破坏稳定的输出。

(4) 分压器

它的作用是使光电倍增管中从光电阴极到依次各二次极，最后到阳极的电位逐渐升高，使光电子顺利完成电子倍增过程、在各种类型的分压器中，用得最多也最简单的是电阻分压器，按照各极间所需电压的比例采用相应的电阻值，使总电压分配到各极间去。

2. 光电倍增管的主要特性

(1) 光电倍增管的光谱特性

光电倍增管的光谱特性主要由光阴极和玻壳材料的特性来确定。影响光电倍增管光谱特性的还有一些其它因素，如温度、受照点位置和磁场等。

图4-8为铯铯光阴极光谱特性随温度的变化曲线。

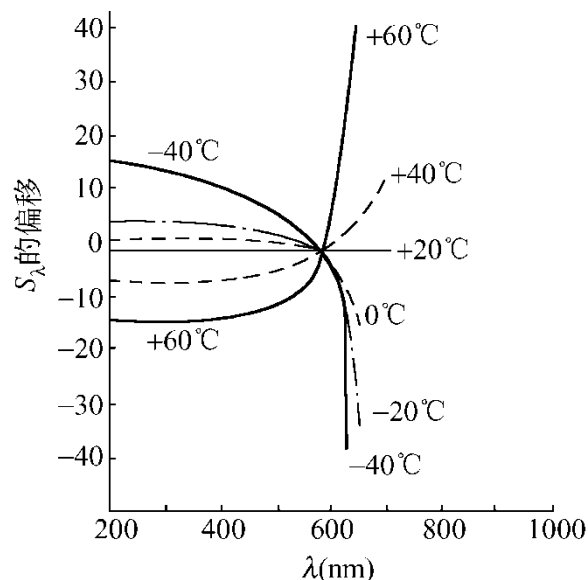


图 4-8 铯铯阴极 S_λ 随T偏移的曲线

图4-8中纵坐标是光谱相对偏移，其定义为

$$\frac{S_{\lambda T} - S_{\lambda 20C}}{S_{\lambda 20C}} \times 100\%$$

式中 $S_{\lambda 20^\circ\text{C}}$ 为 20°C 时铯铷阴极的光谱灵敏度； $S_{\lambda T}$ ——温度为 T 时的光谱灵敏度。

图4-9所示是多碱阴极的光谱特性随温度变化的曲线。

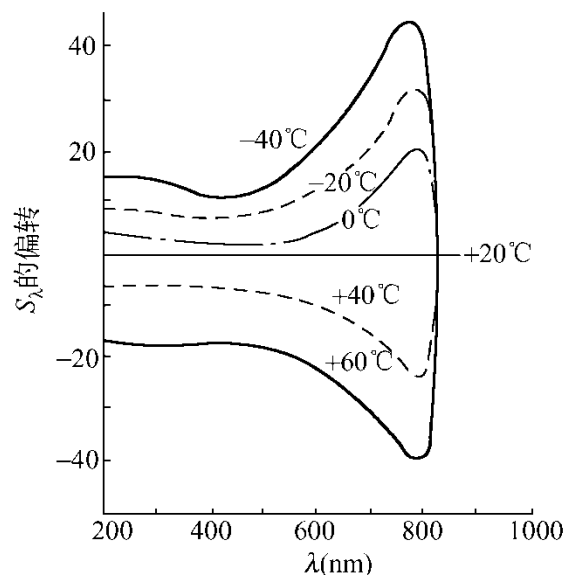


图 4-9 多碱阴极 S_{λ} 随 T 偏移的曲线

(2) 灵敏度

光电器件灵敏度的定义有许多种，而对光电倍增管常用阳极灵敏度来表征这一特性。

定义阳极光谱灵敏度 $S_a(\lambda)$ 为

$$S_a(\lambda) = I_a(\lambda) / \Phi(\lambda)$$

式中，单色光通量为 $\Phi(\lambda)$ ，阳极电流为 I_a

(3) 线性度

在高精度的光电检测中，要求光电探测器的光特性具有良好的线性度，且线性范围尽可能宽。光特性是指倍增管输出信号电流随输入光通量变化的曲线，即 $I=f(\Phi)$ 。一般认为产生光特性非线性原因主要有两个：一是内部的非线性源，它们包括光阴极的电阻率及材料特性、管内空间电荷间的互相作用，以及电子聚焦或收集效率的变化等。另一方面是外部非线性源，其中包括负载电阻的负反馈作用，以及由于信号电流过大造成极间电位的重新分布等。

图4-12给出了随入射通量 Φ 增加输出电流 I_a 偏离直线的情况

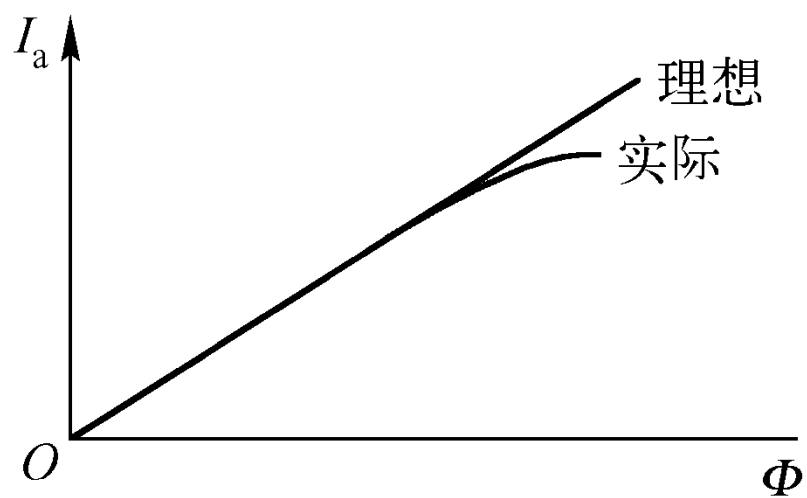


图4—12 I_a 与 $f(\Phi)$ 曲线

(4) 最大额定值

光电倍增管是极其灵敏的微信号光电探测器,为正确使用应了解各参量的最大额定值。

①最大阴极电流 I_{cm} ,有时给出最大电流密度($\mu A/cm^2$)。工作时不应超过额定值。有时阴极电流 I_c 虽小于 I_{cm} ,但入射光点很小,也会因电流密度过大而引起局部损坏。这时应按电流密度的额定值来限制输入。

②最大阳极电流 I_{am} ,该值通常是以不产生严重的和不可逆的损坏为限,通常阳极功率限制在0.5w以下。应当注意说明书中的 I_{am} 不是指使用时的线性限,有的厂家还给出这时的非线性度,如10%等。

③最大额定电压 U_m ,该指标是从管子的绝缘性能和工作可靠性出发给出的。为使噪声不至太大,一般建议采用的总电压 $U < (60—80)\% U_m$ 。

(5) 光电倍增管的不稳定性

管子工作的不稳定性主要表现在以下三个方面:

- ①由于光谱响应随时间缓慢地不可逆地变化
- ②在几分钟或几小时内,由于可逆的疲劳所构成的漂移
- ③滞后作用造成阳极输出的不稳定

(6) 暗电流

在无光输入时,由阳极输出的电流叫做暗电流。暗电流的主要来源有热发射、漏电流、管内电子散射引起泡壳荧光反馈阴极引起的发射电流、残余气体电离和宇宙射线等。

热电流 I_{aoT} 是由于光阴极或二次极材料在温度作用下,其中获得大于材料逸出功所需能量的电子逸出后产生的。其大小与环境温度、材料面积和工作电压等因素有关。阳极热电流可表示为

$$I_{aoT} = I_{co}\delta^n + I_{i0}\delta^{n-1} + \cdots + I_{i0}\delta^{n-i} + \cdots \quad (4-16)$$

式中, I_{co} 为光阴极发出的热电流; I_{i0} 为第*i*个二次极发出的热电流。

几种光阴极材料的暗电流密度与温度的关系如图4-13所示。暗电流、增益与电压间的关系如图4-14所示。

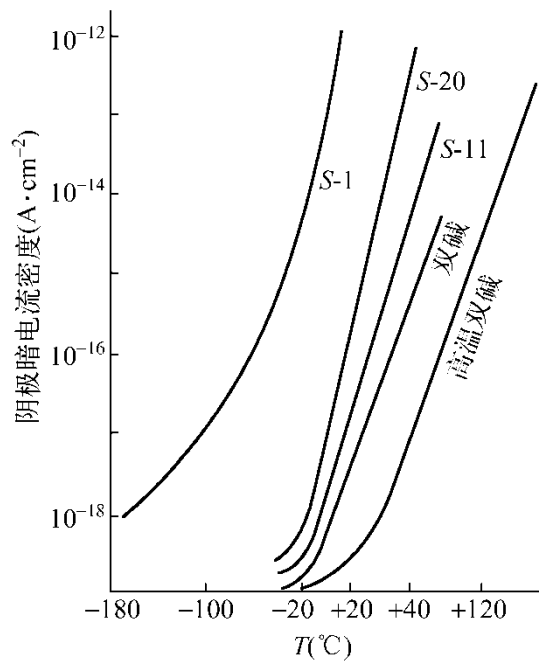


图4—13 阴极暗电流密度随温度的变化

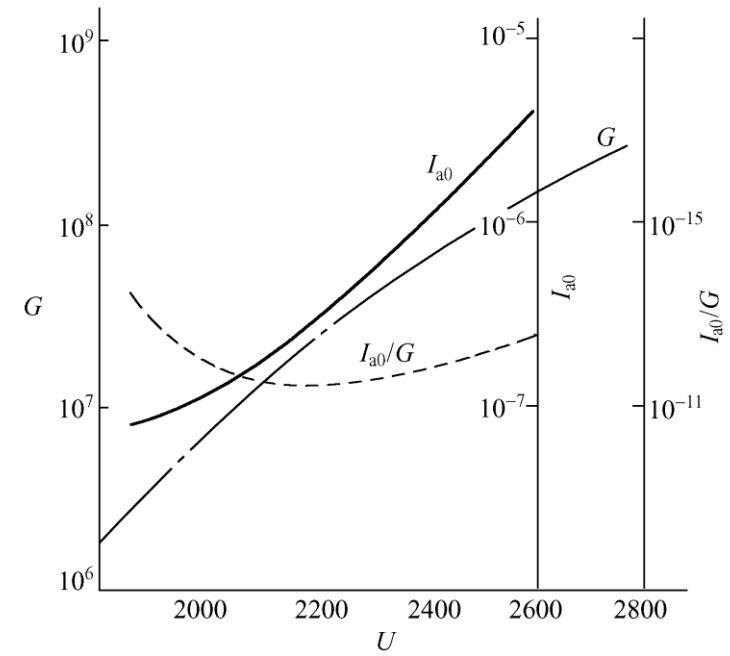


图4—14 I_{a0} 、 G 与电压间的关

(7)光电倍增管的噪声与信噪比

光电倍增管中的噪声源主要来自光阴极和二次极的热发射。入射光辐射本身亦带来噪声。

由光电阴极和K个二次发射极组成的光电倍增管中，综合在阳极输出时的噪声电流用均方根值表示为

$$(i_{an}^2)^{\frac{1}{2}} = G \left[(2qI_c \Delta f) \left(1 + \frac{1}{\delta_1} + \frac{1}{\delta_1 \delta_2} + \cdots + \frac{1}{\delta_1 \delta_2 \cdots \delta_k} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

当 $\delta_1 = \delta_2 = \cdots = \delta_k = \delta$ 时，则有

$$(i_{an}^2)^{\frac{1}{2}} = G(2qI_c \Delta f \frac{\delta}{\delta - 1})^{\frac{1}{2}}$$

如果把暗发射也考虑在内，则阳极输出的信噪比为：

$$\frac{S}{N} = \frac{I_a}{(i_{an}^2)^{\frac{1}{2}}} = \frac{I_a}{\left[2q\Delta f(i_c + i_{c0}) \frac{\delta}{\delta - 1} \right]^{\frac{1}{2}}}$$

由该式可知,要提高光电倍增管的信噪比可采取以下方法。

- ①管子致冷可减少 I_{c0} 值；
- ②当入射光斑较小时，应尽量选用光阴极面小的管子；
- ③选用 δ 较高的材料做二次发射极，并提高工作电压；
- ④减小检测系统频带宽度 Δf ，以提高信噪比；

(8)光电倍增管的时间特性

光电倍增管时间特性用其对脉冲光的响应特性来表示。脉冲光可用激光脉冲来产生，如采用上升时间50ps，半宽度70ps的激光脉冲。响应特性常用图4-15所示的三个量来表示。

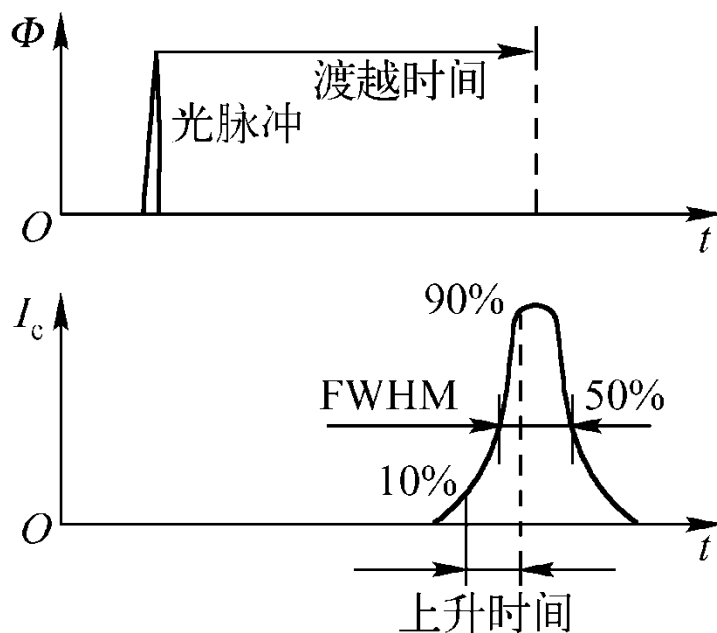


图4-15 倍增管的时间特性

3. 光电倍增管的一般使用准则

为使光电倍增管工作稳定，推荐图4-16所示的电路。

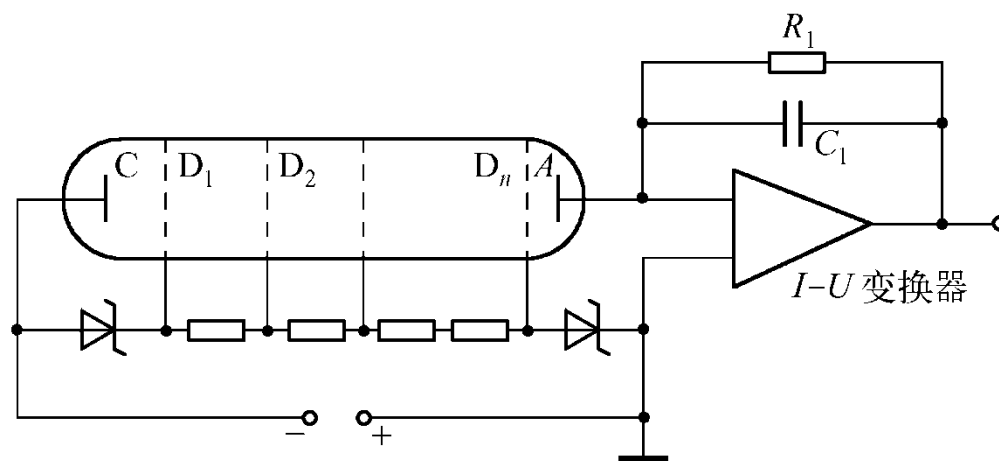


图4-16 光电倍增管基本偏置电路

(1) 阳极电流不超过几微安的数量级。

(2) 分压链中的电流应在1mA的数量级，应是阳极输出最大电流的1000倍，但也应避免电流过大而发热。

(3) 高压电源的稳定度应十倍于所要求的检测精度，并采用负高压供电。

(4) 光阴极和第一个二次极之间，最后一个二次极与阳极之间的电压可独立于总电压，用稳压管进行单独稳压。

(5) 阳极电流输出的信号放大，建议采用“电流—电压变换器”的型式。有利于减小阳极负载，稳定回路的工作。

(6) 为减少外界磁场对极间运动电子的作用，其中包括地磁的作用，在高精度检测时必须屏磁。如对端窗式光电倍增管可用圆筒屏磁罩，并要求罩长度超出光阴极面至少半个阴极的直径。

(7) 光电倍增管应存放在黑暗的环境中。即使未加高压，也只能暴露在极弱光的条件下。工作前应在高压供电条件下，在黑暗中处理数小时。

(8) 如要通过致冷以减小暗电流时，致冷温度不必过低。对银氧铯阴极可致冷到 -77°C ，而其它阴极致冷到 -20°C 即可。致冷过深会导致阴极电阻剧增、使噪声增加，信噪比下降。

(9) 如果光电倍增管的灵敏度足够高，光阴极前应加性能良好的漫射光器，以使入射光均匀照射全部光阴极面。

(10) 光电倍增管不应在氦气环境中使用，如有氦气分子渗入管内，因电离会产生大的附加噪声。

(11) 在光电倍增管使用中，如对光谱特性的稳定性要求很高，那么应选用有放数年后的管子。

(12) 如需了解使用光电倍增管的光谱特性、必须对该管进行单独测试，样本或说明书所给的资料只是一般性的指导。同厂家同型号的管子也很难有相同的光谱特性。

4. 利用微通道板制成的光电倍增管

目前也有多种类型利用微通道板进行电子倍增的光电倍增管。图4-17所示就是一种近贴式的管型，其主要参数列于图中，其它参数为通道直径 $D=15\text{—}40\mu\text{m}$ ；长径比 $L/D=40$ ；板厚为 $0.6\text{—}1.6\text{mm}$ ；增益 $G=10^4$ ；响应时间约为 0.5ns 。

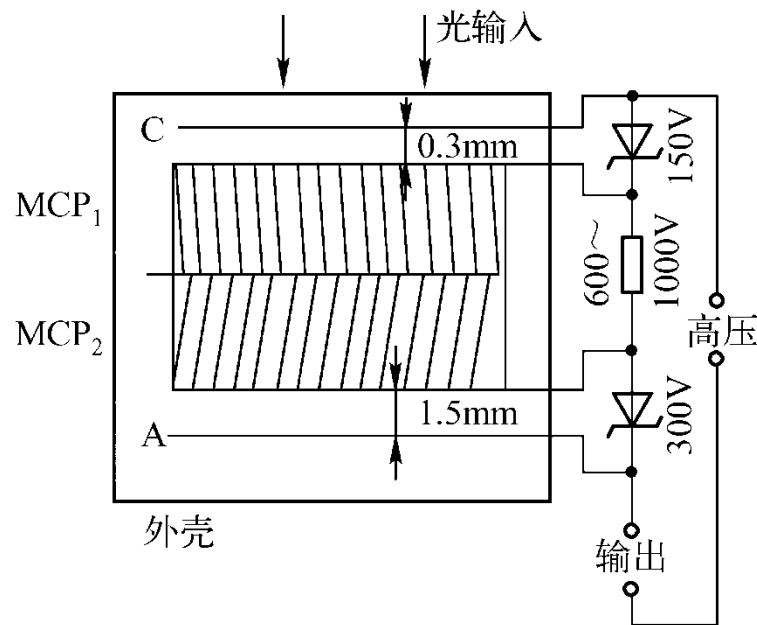


图4-17 微通道光电倍增管

4.2 光电导器件

1. 光电导器件的基本参数

(1) 光敏器件的光特性

光敏器件的光特性是表征光照下光敏器件的输出量，如电阻、电压或电流等量与入射辐射之间的关系；

(2) 光敏器件的灵敏度

灵敏度又称响应度。它表示器件将光辐射能转换为电能的能力。具体定义为：器件产生的输出电信号与引起该信号的输入光辐射通量之比。输出电信号由器件及偏置电路的特性决定，既可以是电流，也可以是电压，如电流表示的光灵敏度

$$R_I = I / \Phi$$

(3) 光谱响应

光敏器件对某个波长光辐射的响应度或灵敏度叫做单色灵敏度或光谱灵敏度。

(4) 量子效率 η

光敏器件的量子效率是指器件吸收辐射后，产生的光生载流子数与入射辐射的光子数之比

$$\eta = \frac{n_e}{n_0}$$

式中 n_e 为器件产生的载流子数； n_0 入射的光子数。

(5) 光敏器件的噪声

当器件无光辐射入射时，输出电压或电流的均方值或均方根值叫做噪声。

(6) 光敏器件的噪声等效功率

它是指在特定的带宽内，产生与均方根噪声电压或电流相等的信号电压或电流所需要的入射辐射通量或功率。用 NEP 来表示。

(7)光敏器件的探测率 D

该特性也是光敏器件探测极限水平的表示形式,它是噪声等效功率的倒数。

(8)光敏器件的归一化探测率 D^*

该特性表示单位面积的器件,在放大器带宽为1Hz条件下的探测率

$$D^* = D \cdot A^{\frac{1}{2}} \cdot \Delta f^{\frac{1}{2}} = (1/NEP) \cdot A^{\frac{1}{2}} \cdot \Delta f^{\frac{1}{2}}$$

式中 A 为器件光敏面的有效面积; Δf 为所用放大器的带宽;

(9)光敏器件的频率特性

该特性表示器件惰性的尺寸。

2. 常用光敏电阻及其特性

光敏电阻可用多种光电导材料制成。表4-2给出了几种常用光电导材料的禁带宽度和大致的光谱响应范围。

表 4-2 常用光电导材料的参数

光电导材料	禁带宽度(eV)	光谱响应范围(μm)	峰值波长(μm)
硫化镉(CdS)	2.45	0.4 ~ 0.8	0.515 ~ 0.55
硒化镉(CdSe)	1.74	0.68 ~ 0.75	0.62 ~ 0.73
硫化铅(PbS)	0.40	0.50 ~ 3.0	2.0
碲化铅(PbTe)	0.31	0.60 ~ 4.5	2.2
硒化铅(PbSe)	0.25	0.70 ~ 5.8	4.0
硅(Si)	1.12	0.45 ~ 1.1	0.85
锗(Ge)	0.66	0.55 ~ 1.8	1.54
锑化铟(InSb)	0.16	0.60 ~ 7.0	5.5
砷化铟(InAs)	0.33	1.0 ~ 4.0	3.5

(1) 硫化镉、硒化镉光敏电阻

这两种光敏电阻用于可见光和近红外区域中，是使用最广泛的光电导器件。其结构如图4-18所示。



图4-18 光敏电阻结构示意图

(2) 硫化铅和硒化铅光敏电阻

硫化铅(PbS)是一种多晶薄膜型光电探测材料。适用的光谱范围可从可见光到中红外波段。表4-3给出了不同温度下硫化铅的性能。

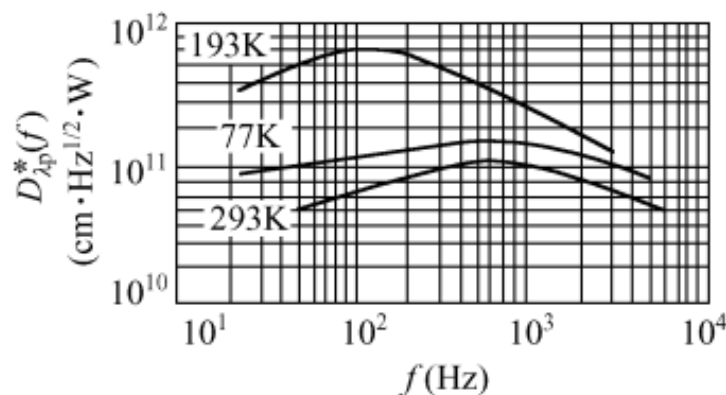
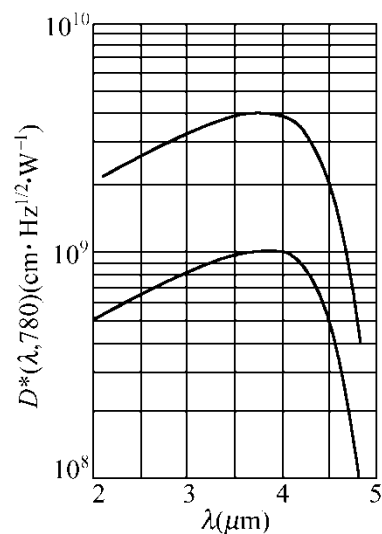


图4-19 不同温度下 PbS 峰值比探测率与频率的关系

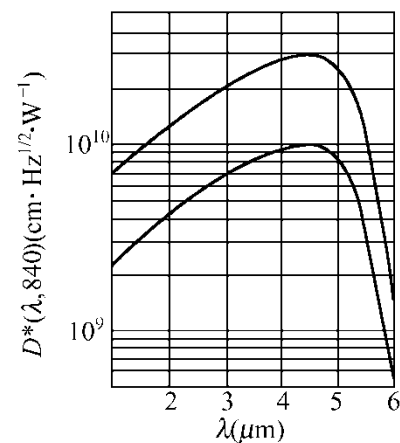
硒化铅(PbS)也是多晶薄膜型光电导材料，响应时间比硫化铅快。室温下可工作在3.3 μm —5 μm 的光谱范围中。表4-4给出了PbS探测器的性能参数。图4-20给出了两种温度条件下硒化铅探测器的光谱特性

表 4-4 PbSe 探测器的性能

工作温度	295K	193K	77K
响应时间(μs)	≈ 2	30	40
暗阻($\text{M}\Omega/\text{方}$)	< 10	< 10	< 10
峰值波长(μm)	3.8	4.6	5.1
$D_{\lambda\text{P}}^*$ ($\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$)	1×10^{10}	4×10^{10}	2×10^{10}
$D_{\lambda\text{P}}^*/D^*$ (500K)	10	5.5	3.5(Si 窗口) 4.0(宝石窗口)



(a) ATO型



(b) ITO型

图4-20 不同温度下PbSe探测器的光谱特性

(3) 碲化铟和砷化铟光电探测器

碲化铟是单晶本征型探测器。表4-5给出了它在不同温度下的性能；图4-22给出了PC型InSb探测器响应度、噪声和相对 D^* 与频带间的关系。

表 4-5 InSb 在不同温度下的性能

工作温度	77K	300K	工作温度	77K	300K
光谱范围(μm)	1 ~ 7.4	1 ~ 5.6	D^* ($\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$)	$1 \times 10^{10} \sim 1 \times 10^{11}$	$2 \times 10^8 \sim 1 \times 10^9$
峰值波长(μm)	6	5.3	D_{AP}^*/D^* (500K)	5.5	3.3
响应时间(μs)	10 ~ 15	0.04	暗阻($\Omega/\text{方}$)	5000	30 ~ 130
灵敏度(V/W)	10^4	1			

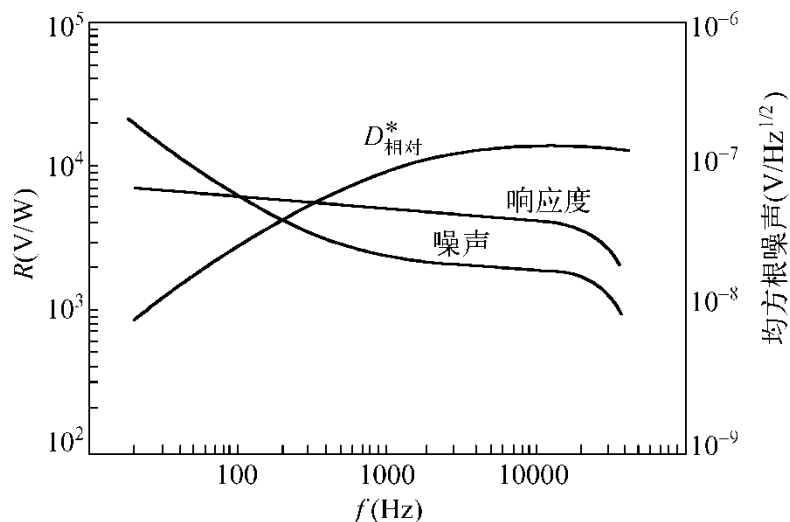


图4-22 PC型InSb响应度、噪声和相对 D^* 与频率的关系

光伏型锑化铟常在接近直流短路状态下工作,可以得到最佳的探测率和灵敏度。图4-23给出了77K时PV型InSb探测器的光谱特性。图4-24给出了PV型InSb探测器信号、噪声、探测度与频率之间的关系。

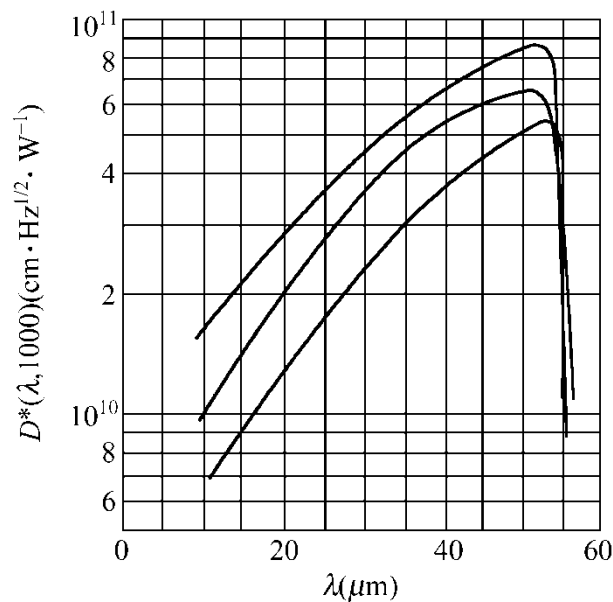


图4-23 PV型InSb探测器的光谱特性

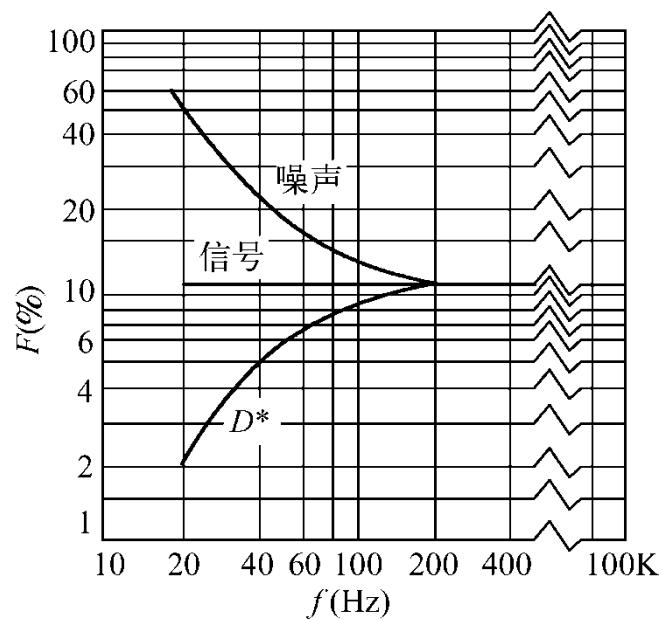


图4-24 PV型InSb探测器信号、噪声、探测度与频率的关系

砷化铟(InAs)探测器是单晶本征型光伏器件。适用于1—4 μm 光谱范围中工作。图4-25给出了不同温度下InAs探测器的光谱特性。图4-26给出了InAs探测器的噪声谱。

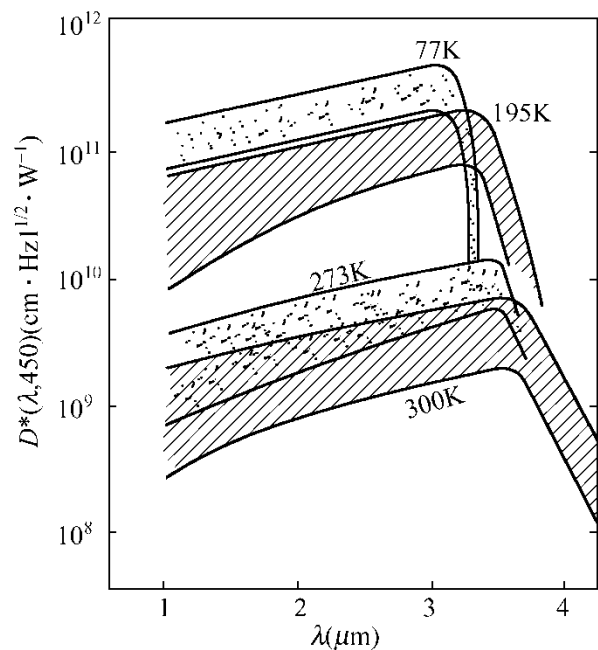


图4-25 不同温度下InAs探测器的光谱特性

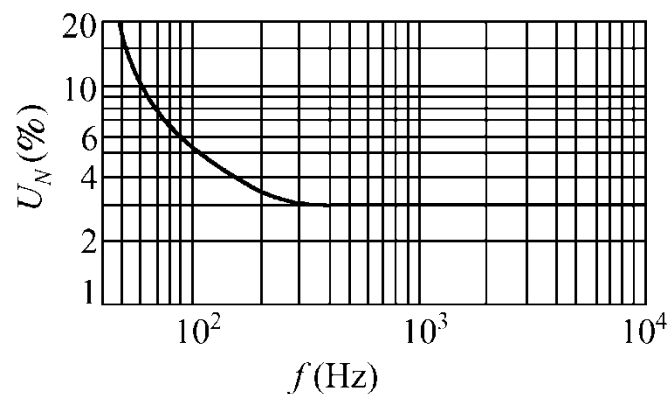


图4-26 InAs探测器的噪声谱

(4) 碲镉汞和碲锡铅光电探测器

碲镉汞材料($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$)的禁带宽度 E_g 随组分 x 的改变而变化。其主要特性列于表4-6中。

表 4-6 碲镉汞探测器的主要参量

波段(μm)	1 ~ 3	3 ~ 5	8 ~ 14	
组分 x	0.4 ~ 0.5	0.25 ~ 0.4	0.2	
类型	PV	PC	PC	PV
探测率($\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$)	$D_{300}^* = 10^{10}$ $D_{27}^* = 2 \times 10^{11}$	$D_{\lambda_P}^* = 1 \times 10^9$ ($\lambda_P = 5 \mu\text{m}, 300\text{K}$)	$D_{\lambda_P}^* = 2 \times 10^{10}$ $\lambda_P = 10 \mu\text{m}$	$D_{\lambda_P}^* = 3 \times 10^{10}$ $\lambda_P = 9 \mu\text{m}$ $f = 900\text{Hz}$
响应时间 τ	10ns	400ns	1 μs	10 ~ 20ns(零偏) 3ns(反偏)
暗电阻(Ω)	< 1k	< 10	20 ~ 400/方	100 ~ 500 ($0.1 \times 0.1 \text{mm}^2$)
灵敏度(V/W)		30	10^4	200 ~ 700
量子效应(%)	> 40	> 40	> 70	
结电容	15pF			10
光敏面积	$10^{-4} \sim 4 \times 10^{-2} \text{cm}^2$	$0.5 \times 0.5 \text{mm}^2$	线度 0.05 ~ 2mm	线度 0.001 ~ 0.25mm
工作温度(K)	77, 200, 300	77, 200, 300	77	77

图4-27给出了三种不同组分的PC型碲镉汞探测器在77K和 2π 视场条件下的光谱特性。图4-28为PV型碲镉汞三种组分探测器在77K、视场为300时的光谱特性。

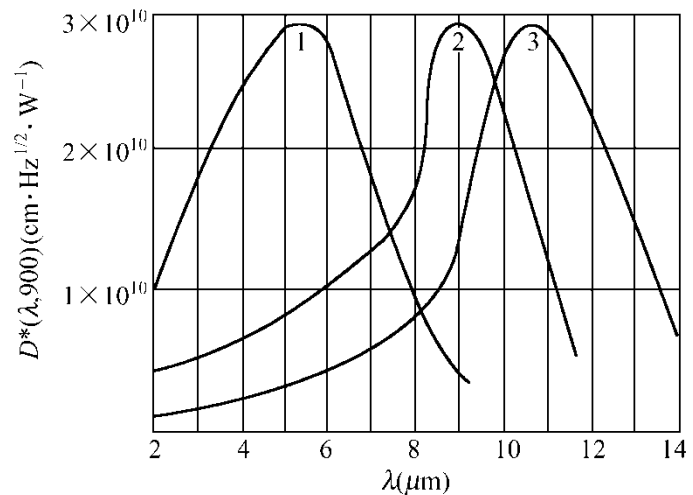
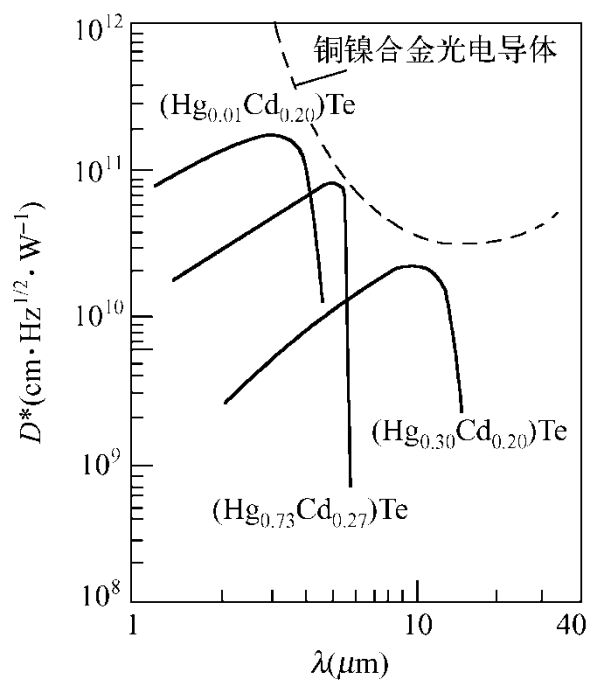


图4-28 PV型碲镉汞探测器的光谱特性

图4-27 碲镉汞探测器的光谱特性

图4-29给出了不同窗口材料、77K、视场为60° 条件下PV碲锡铅锡铅探测器的光谱特性。

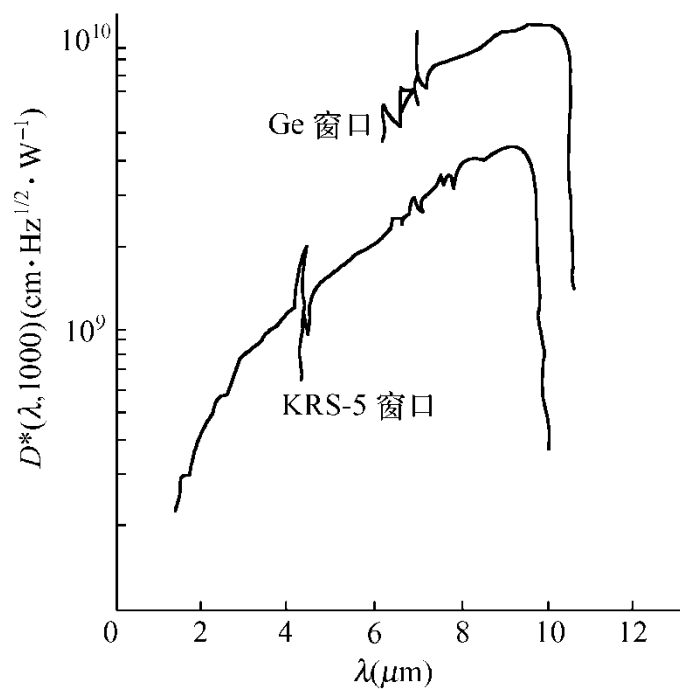


图4-29 碲锡铅探测器的光谱特性

(5) 杂质光电导探测器

锗掺金探测器是P型杂质光电导探测器，图4-30所示为77K、 2π 视场、背景为295K条件下锗掺金探测器的光谱特性。图4-31所示为锗掺金探测器探测率与频率的关系。

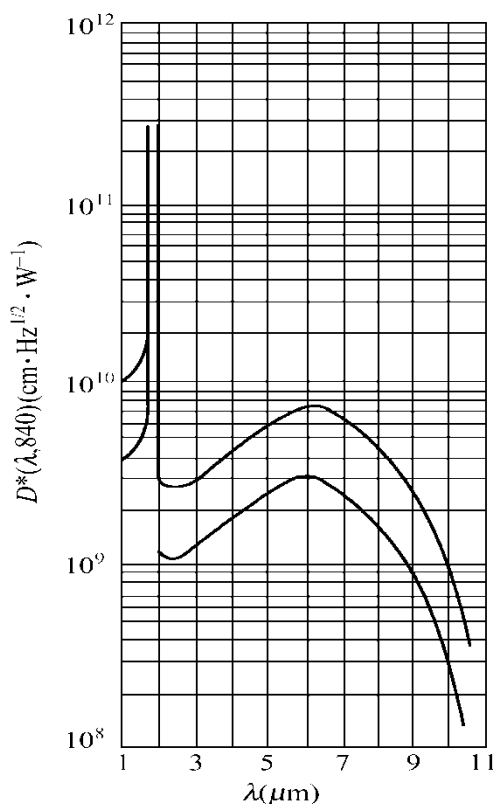


图4-30 锗掺金探测器的光谱特性

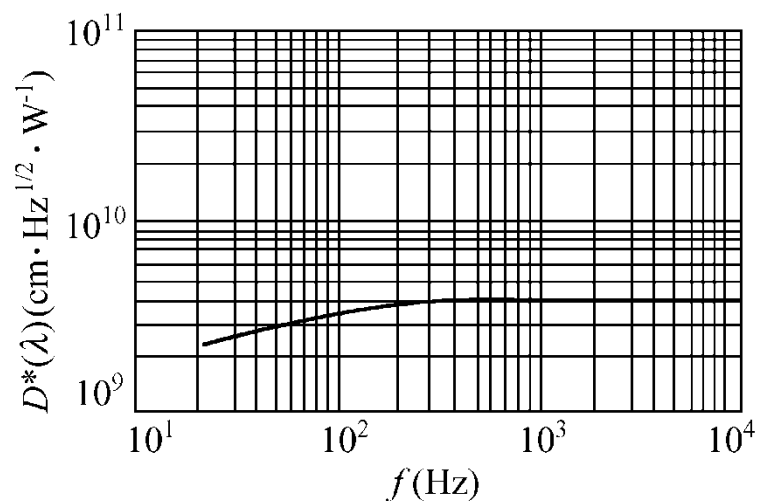


图4-31 锗掺金探测器探测率与频率的关系

表4-7列出了主要硅掺杂探测器的特性。

表 4-7 硅掺杂探测器的特性

探测器	波长范围 (μm)	峰值波长 (μm)	比探测率 D^* ($\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$)	工作温度 (K)	暗阻(Ω)	调制频率 (kHz)
Si: Bi	4 ~ 17	16	1×10^{10}	20	10^5	1
Si: Ga	4 ~ 17	15	2×10^{10}	18	10^5	1
Si: Al	4 ~ 18	17	2×10^{10}	20	10^5	1
Si: As	6 ~ 25	23	2×10^{10}	12	10^5	1
Si: Sb	6 ~ 33	28	1×10^{10}	4	10^5	1
Si: In	~ 7.4			77		

图4-32所示温度为27K时硅掺镓探测器的光谱特性。图4-33所示为50K时锗硅合金掺金探测器的光谱特性：

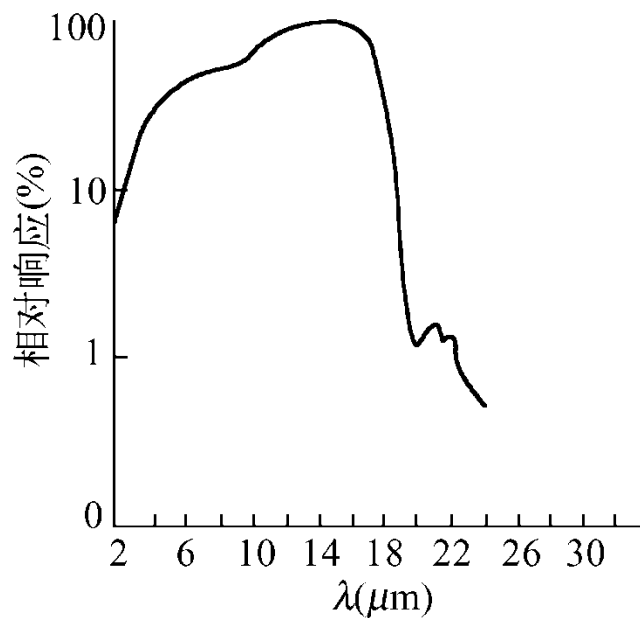


图4-32 硅掺镓探测器的光谱特性

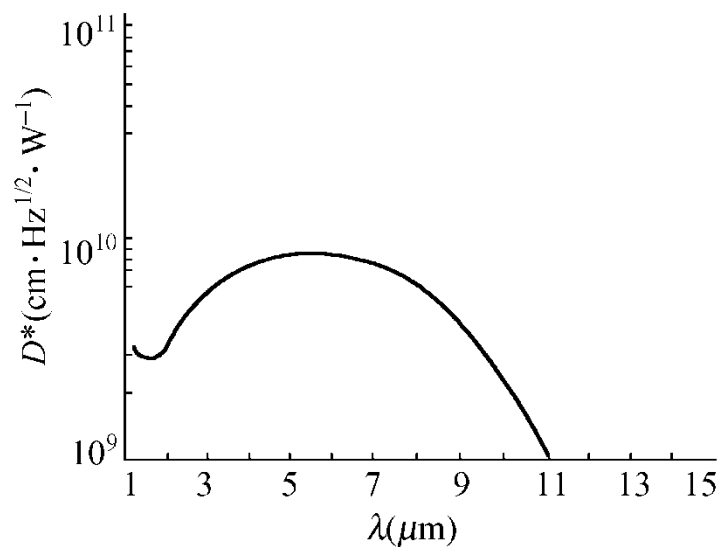


图4-33 锗硅合金掺金探测器的光谱特性

3.光敏电阻使用中的有关计算及偏置电路

(1)比探测率 D^* 在使用中的转化

设探测器与特定黑体间光谱匹配系数为 α ，而探测器与目标间光谱匹配系数为 α' ，那么，比探测率 D^* 应修正为 $D^{*'}$ ，即

$$D^{*'} = (\alpha' / \alpha) D^*$$
$$NEP^{'} = (\alpha' / \alpha) NEP = (\alpha' / \alpha) A^{\frac{1}{2}} \Delta f^{\frac{1}{2}} / D^*$$

通常探测器的频率特性曲线如图4-34所示

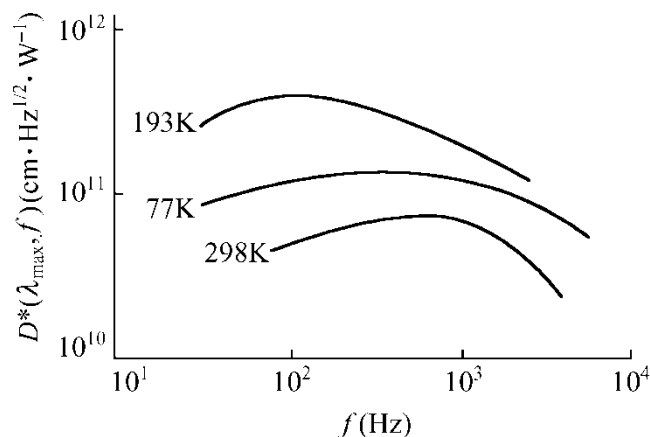


图4-34 PbS探测器的频率特性曲线

(2) 减小噪声提高信噪比的措施

利用信号调制及选频技术可抑制噪声的引入。光电导探测器的噪声谱如图4-35所示,而一般放大器的噪声谱如图4-36所示。

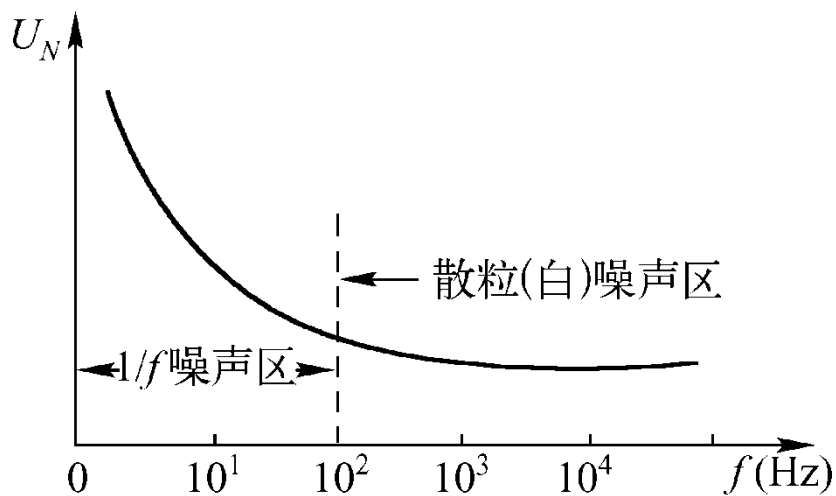


图4-35 光敏电阻的噪声频率特性

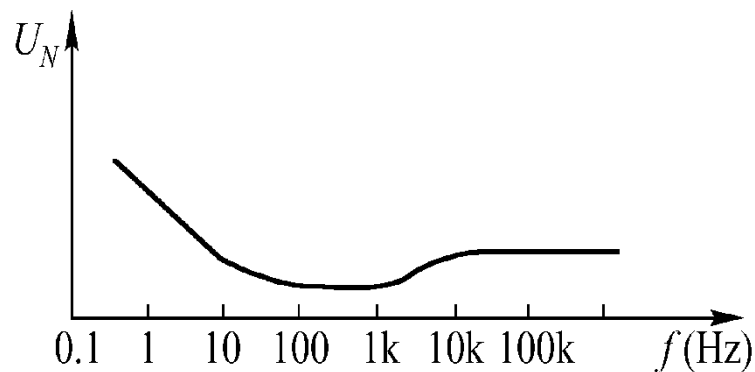


图4-36 放大器的噪声频率特性

减少光敏电阻噪声的另一种方法是将器件致冷，以减小热发射，也可降低产生—复合噪声。常用的液氮杜瓦瓶致冷器原理如图4-37所示。

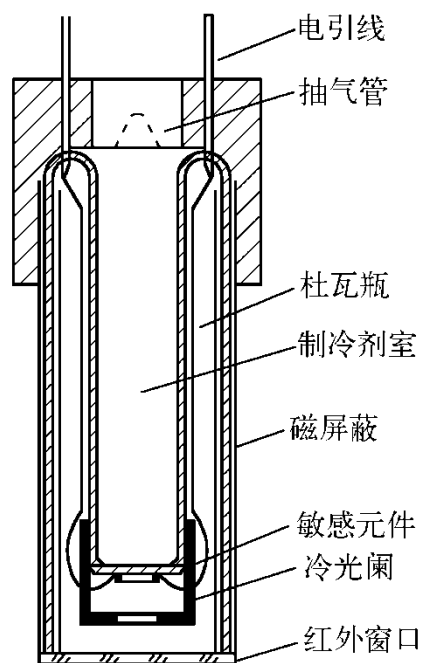


图4-37 杜瓦瓶致冷器原理图

(3) 几种典型的偏置电路

① 恒流偏置电路

在一定光照下，光敏电阻产生的信号和噪声均与通过光敏电阻的电流大小有关，其关系曲线如图4-38所示。

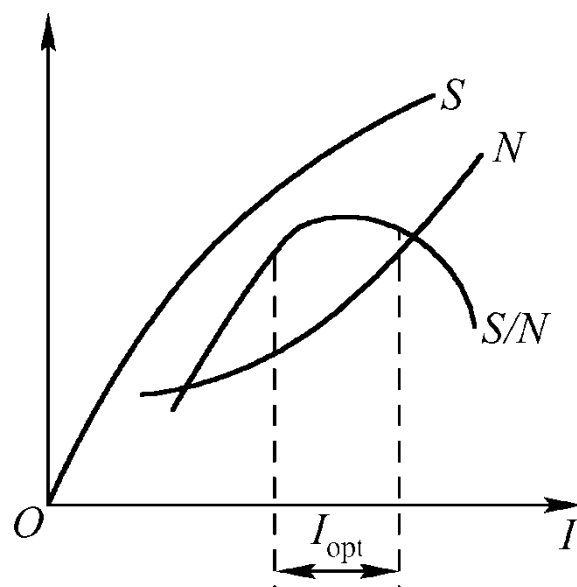


图4-38 信号、噪声、倍噪比与光敏电阻中电流间的关系

由图4-38中可知，信噪比曲线有一极大值存在，从这一特点出发希望偏置电路使器件偏流稳定，并取值在最佳电流 I_{opt} 的区域中。按此要求设计的恒流偏置电路如图4-39所示。

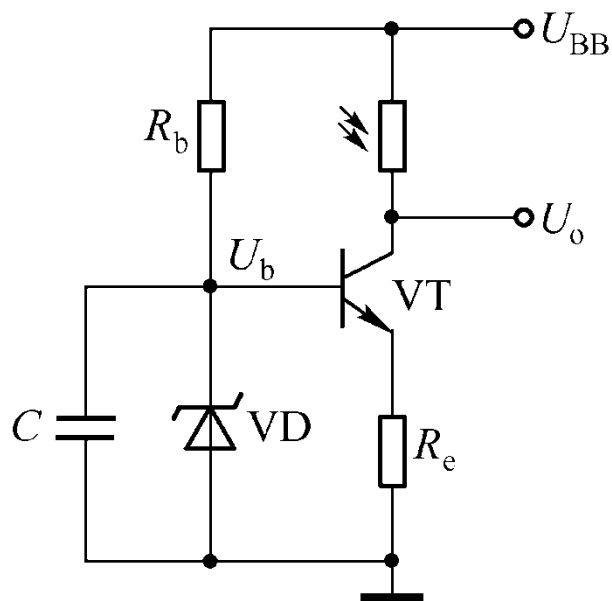


图4-39 晶体管恒流偏置电路

②恒压偏置电路

将恒流偏置电路稍加改变便可形成如图4-40所示的恒压偏置电路。

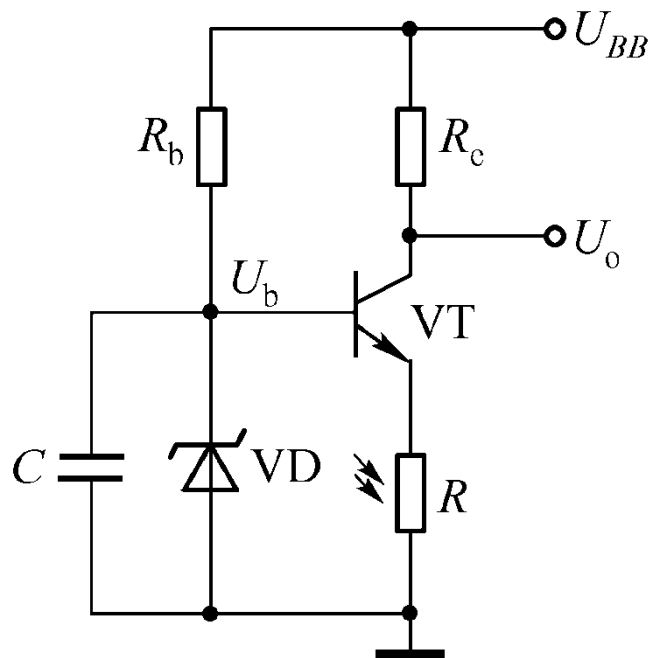


图4-40 晶体管恒压偏置电路

③最大输出及继电器工作的偏置电路

这类简单的光敏电阻偏置电路如图4-41所示。图4-42所示是对应平均照度 E_0 、最大照度 E'' 和最小照度 E' 的三条伏安特性曲线。

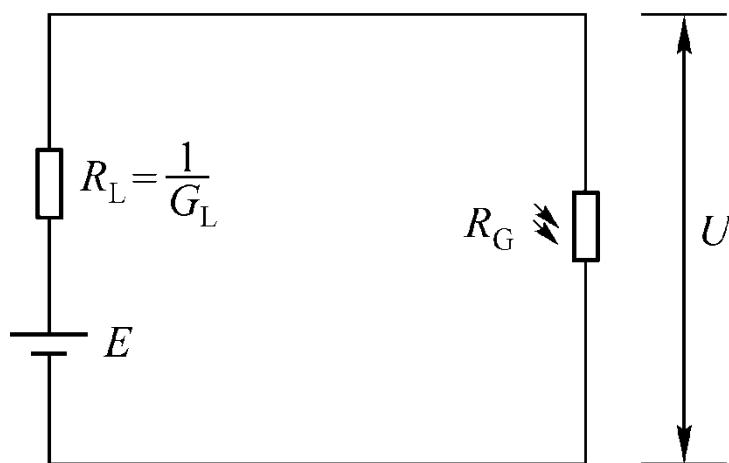


图4-41 光敏电阻偏置电路

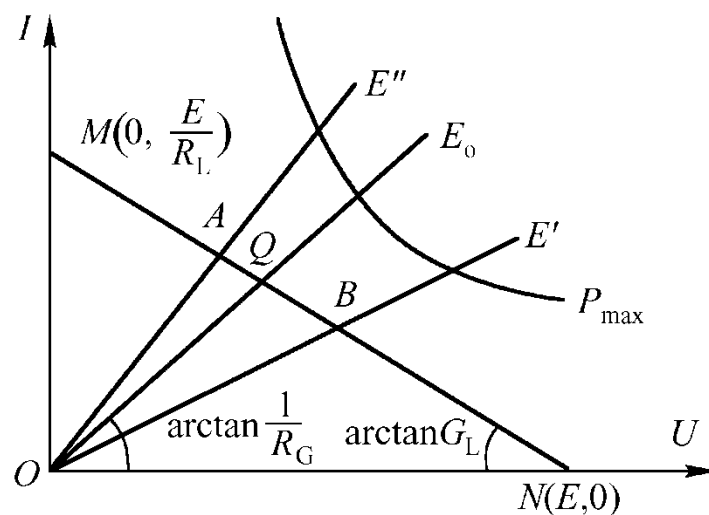


图4-42 不同照度下光敏电阻的伏安特性

a. 检测光量时负载电阻 R_L 的确定

R_L 的选择原则是在一定 R_G 、 ΔR_G 和 E 的条件下，使信号电压 u 的输出最大。通过取极值 $du/dR_L = 0$ 则有

$$\frac{E\Delta R_G}{(R_L + R_G)} \left[-\frac{2R_L}{R_L + R_G} + 1 \right] = 0$$

于是有，

$$R_L = R_G$$

b. 在继电器型式工作时 R_L 的确定

$$R_L = \sqrt{R_{G1} \cdot R_{G2}}$$

$$(U_1 - U_2)_{\max} = E \frac{\sqrt{R_{G1}} - \sqrt{R_{G2}}}{\sqrt{R_{G1}} + \sqrt{R_{G2}}}$$

c. 电源电压的选择

从以上各式都可以看到、选用较大的电源电压对产生信号十分有利、但又必须以保持长期正常工作，不损坏光敏电阻为原则。有时在器件的说明书中给出。

4.4 光电池和光电二极管

1. PN结与光伏效应的产生

当P型半导体和N型半导体直接接触时，P区中的多数载流子—空穴向空穴密度低的N区扩散，同时N区中的多数载流子—电子向P区扩散。这一扩散运动在P区界面附近积累了负电荷，而在N区界面附近积累了正电荷，正负电荷在两界面间形成内电场。在该电场逐步形成和增加的同时，在它的作用下产生载流子的漂移运动。随着扩散运动的进行和界面间内电场的增高，促使漂移运动加强。这一伴生的对立运动在一定温度条件下一定时间后达到动态平衡。如图4-43所示。

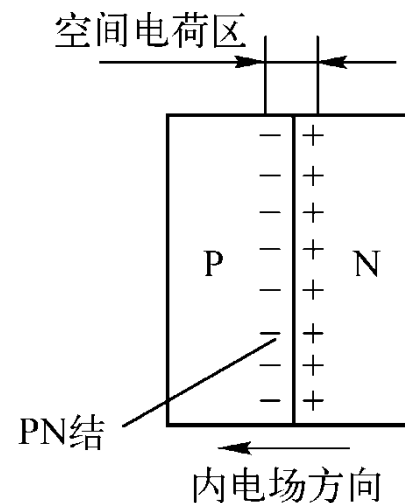


图4-43 P-N结的形成

当有外界光辐射照射在结区及其附近时，只要入射光子的能量 $\varepsilon=h\nu$ 大于半导体的禁带宽度 E_g ，就可能产生本征激发，激发产生电子—空穴对。P区中的光生空穴和N区中的光生电子，因受P-N结的阻挡作用而不能通过结区，结区中产生的电子—空穴对在内电场作用下，电子驱向N区，空穴驱向P区。而结区附近P区中的光生电子和N区中的空穴如能扩散到结区，并在内电场作用下通过结区，这样在P区中积累了过量的空穴，在N区中积累了过量的电子，从而形成一个附加的电场，方向与内电场相反，如图4-44(a)所示。该附加电场对外电路来说将产生由P到N方向的电动势。当联接外电路时，将有光生电流通过，这就是光伏效应。

当P-N结端部受光照时，光子入射的深度有限，不会得到好的效果。实际使用的光伏效应器件，都制成薄P型或薄N型，如图4-44(b)所示。入射光垂直P-N结面入射，以提高光伏效应的效率。

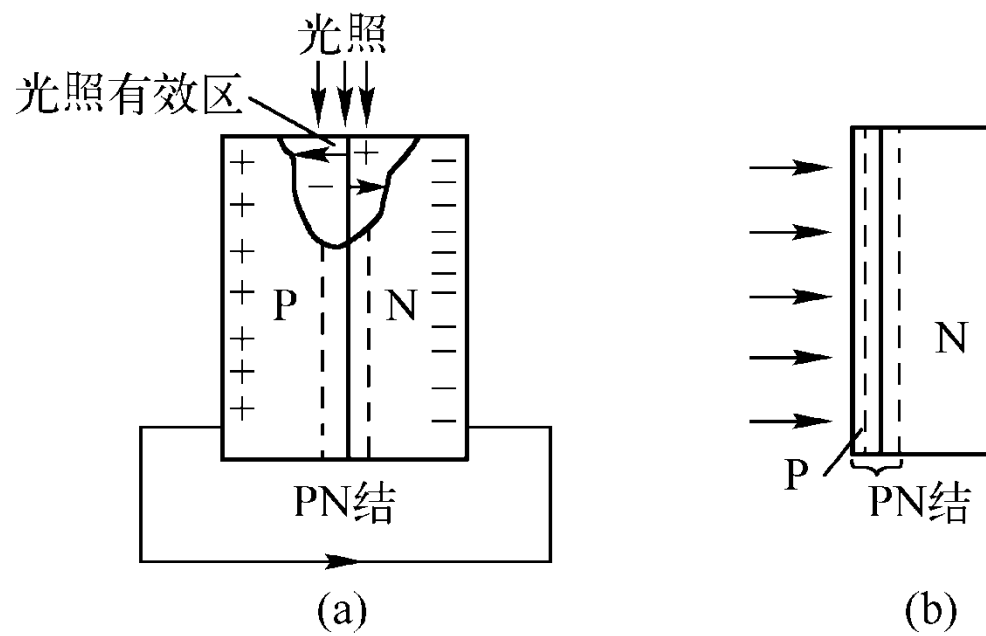


图4-44 障层光电效应原理

2. 光伏效应器件的伏安特性

光伏效应器件工作的等效电路如图4-45所示。这类器件的伏安特性图4-46所示。

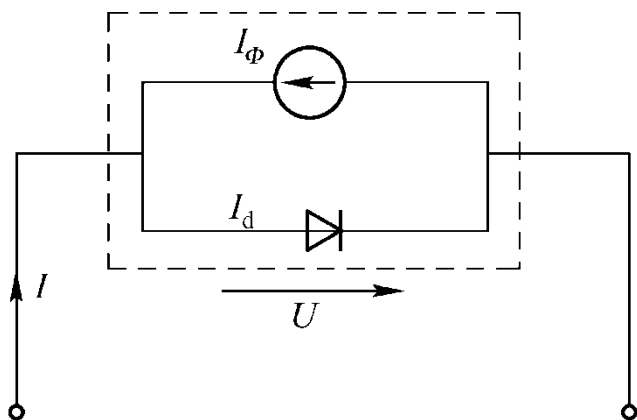


图4-45 光伏效应器件的等效电路

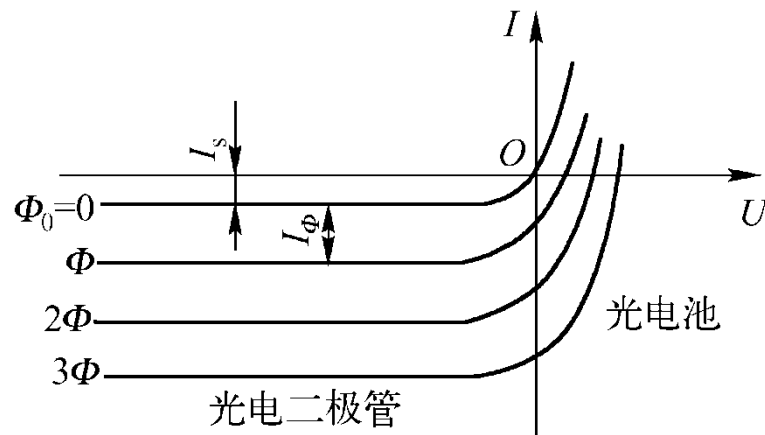


图4-46 光伏器件的伏安特性曲线

3. 光伏效应光电池

分析图4-46第IV象限中曲线的情况可知，外加电压为正，而外电路中的电流却与外加电压方向相反为负。即外电路中电流与等效电路中规定的电流相反，而与光电流方向一致。这一现象意味着该器件在光照下能发出功率，以对抗外加电压而产生电流，该状态下的器件被称为光电池。

曲线族与电压轴的交点，即 $I=0$ ，表示光电池外电路开路的情况。输出电压 U_{oc} 可求：

$$U_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{\Phi}}{I_s} + 1\right)$$

图4-47所示为上述两种光电池的相对光谱特性，图4-48给出了硅光电池的光特性曲线。

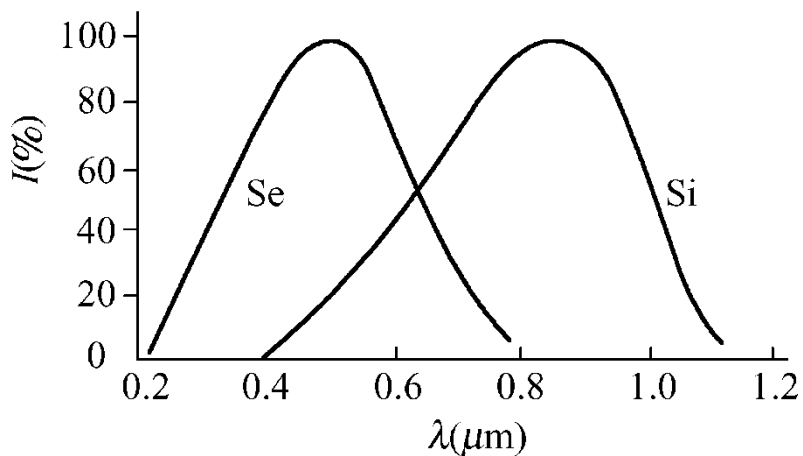


图4-47 硅、硒光电池的相对光谱特性曲线

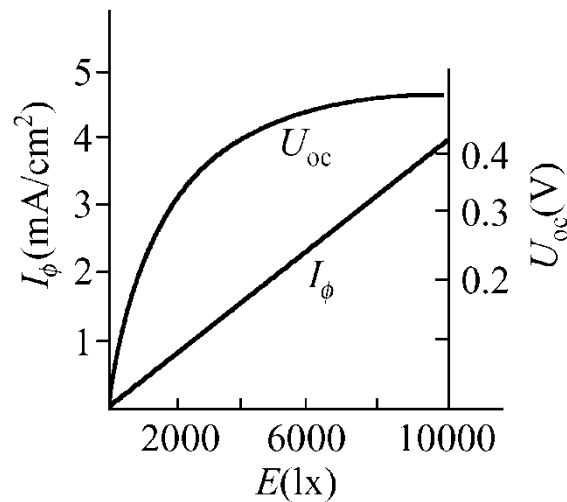


图4-48 硅光电池的光特性曲线

图4-49给出了硒光电池的光特性曲线，图4-50给出了不同负载下的光特性曲线。

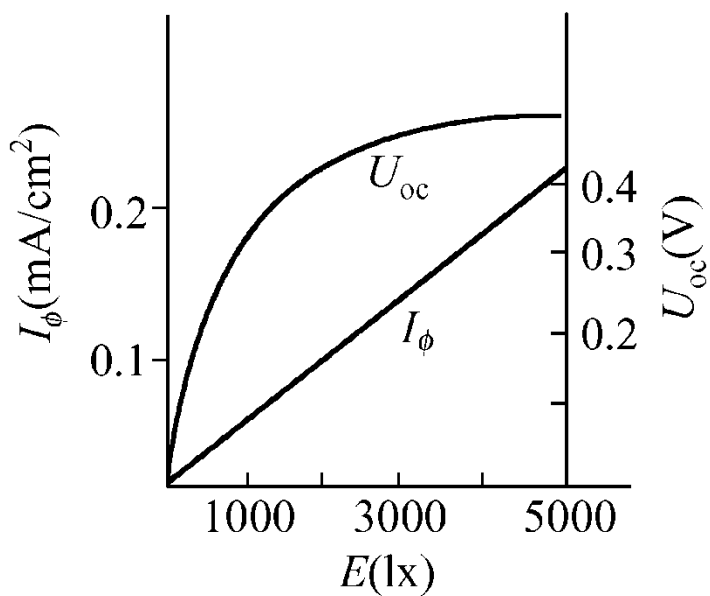


图4-49 分硒光电池的光特性曲线

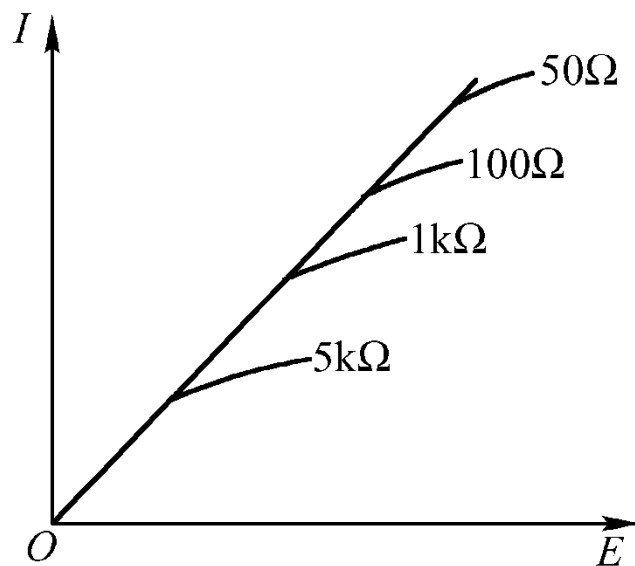


图4-50 不同负载下光电池的光特性曲线

下面分析光电池几种不同输出要求的偏置电路。

(1) 光电池作为电流输出的电路

将图4-36第IV象限的曲线经翻转，处理后获得如图4-51所示的光电池伏安特性。

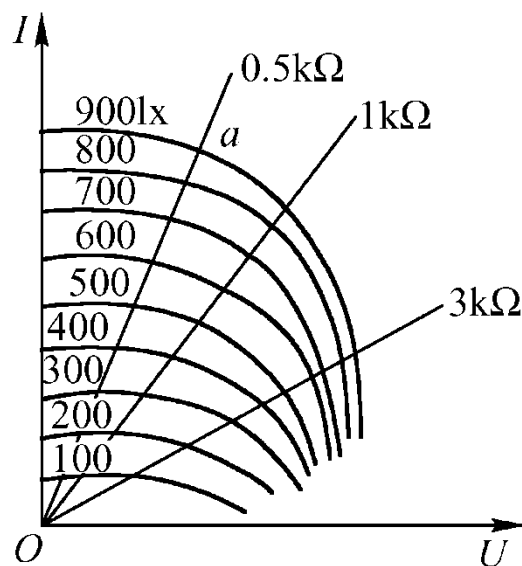


图4-51 光电池的伏安特性曲线

在光电检测中希望线性输出时，为此应采用低输入阻抗的电路来完成放大工作。图4-52所示电路就是典型的原理图。

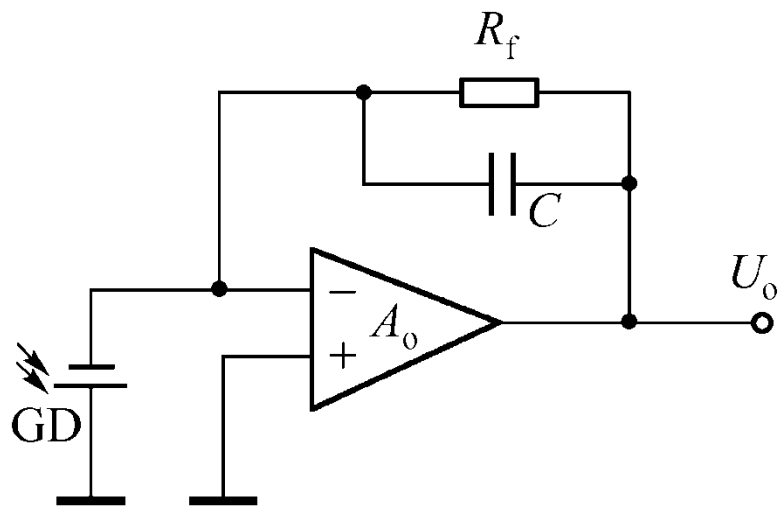


图4-52 光电池低输入阻抗放大电路

有时对输出信号与入射光量间的线性关系要求不高，又希望能有比较简单的电路型式，如图4-53所示。

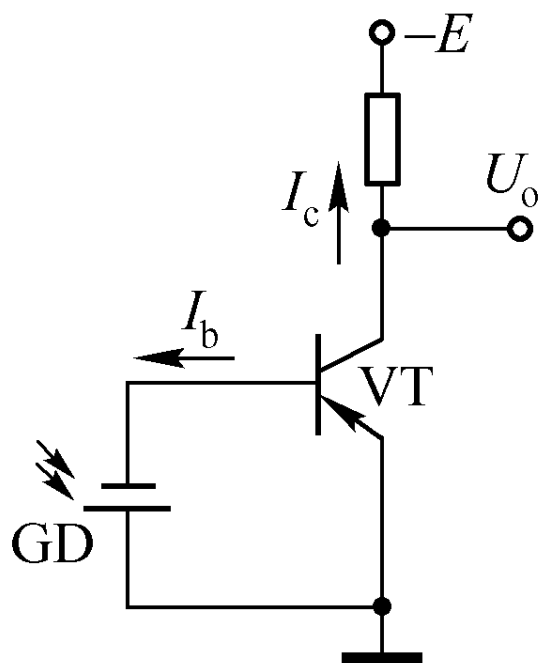


图4-53 利用锗管的放大电路

图4-54所示是采用RW提供可调电压，图4-55所示是用锗二极管D提供一定电压。

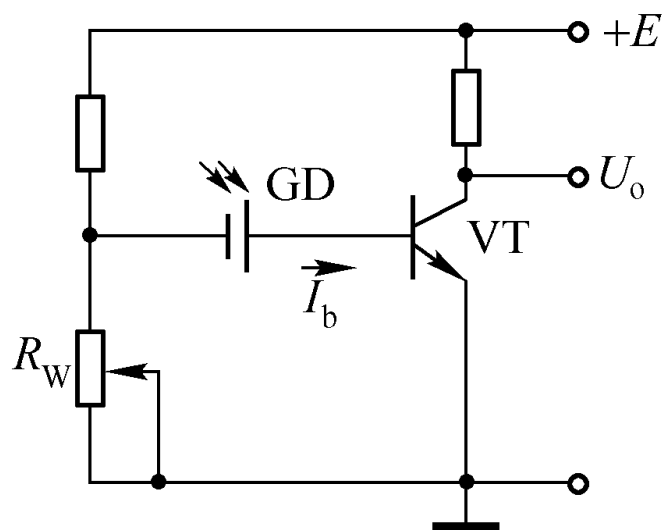


图4-54 利用 R_w 提供可调电位

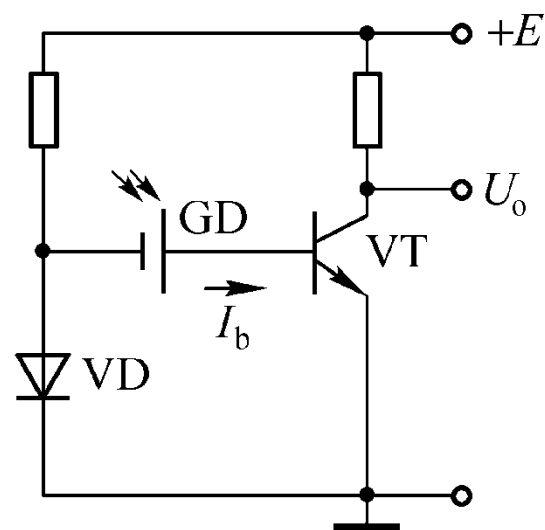


图4-55 利用锗二极管VD提供电位

(2) 光电池作为开路输出的电路

有时为获得较大的电压输出而不要求线性关系时，可采用高输入阻抗的前放，这时光电池相当开路工作。图4-56所示为高输入阻抗低噪声放大器的原理图。

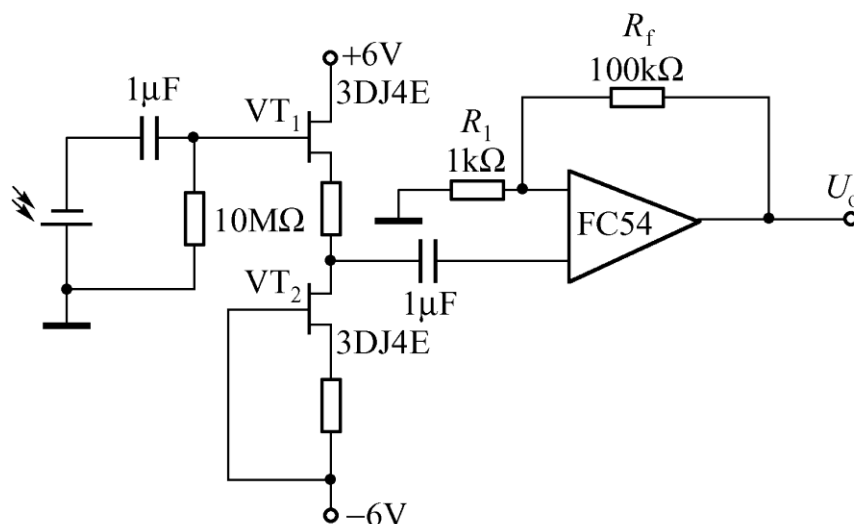


图4-56 光电池高输入阻抗放大器

(3)光电池作功率输出的电路

采用光电池做为将光能转换为电能的太阳能电池时，要求有大的输出功率和转换效率，可用多个光电池串、并联构成大的受光面积。如图4-57所示是光电池给负载 R_L 供电的电路图。最佳负载与入射照度间的关系如图4-58所示。

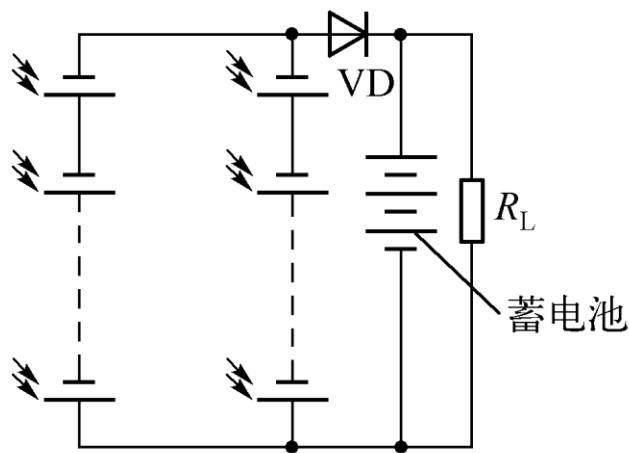


图4-57 光电池作功率输出电路

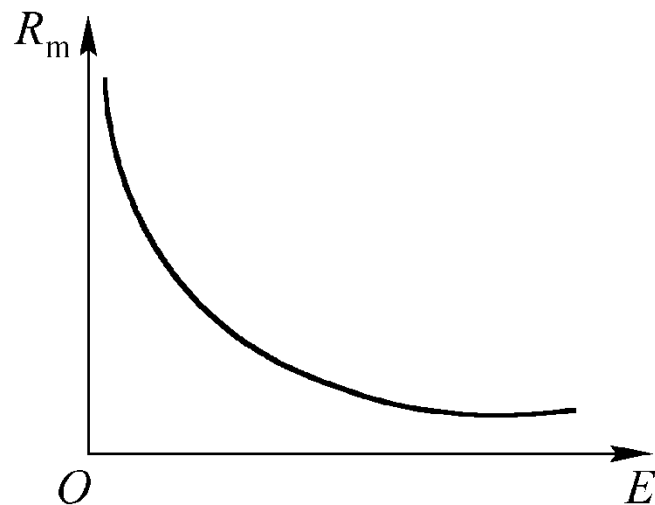


图4-58 最佳负载曲线

4. 光电二极管

(1) 光电二极管的构造原理

目前常使用的光电二极管是用锗或硅制成,通常把N型硅做基底,上面通过扩散法掺入硼,形成P区,这就形成了P+N结构的光电二极管,其型号为2CU,如图4-60所示。

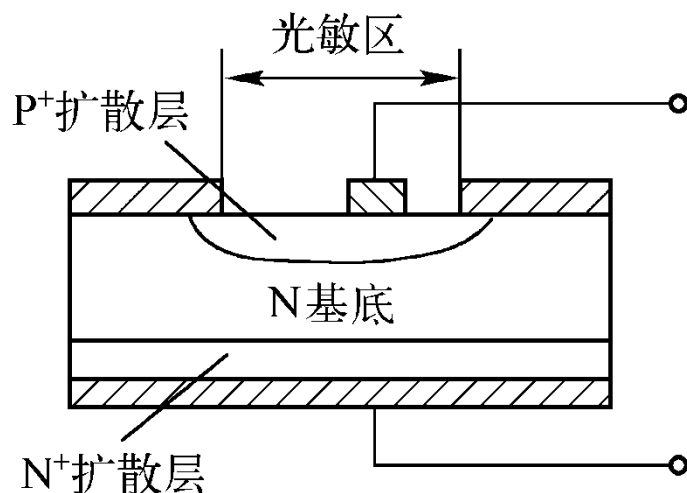


图4-60 2CU结构示意图

当用P型硅作基底，上面通过扩散法掺入磷，形成N区的构造称为N+P结构，其型号为2DU。如图4-61所示。

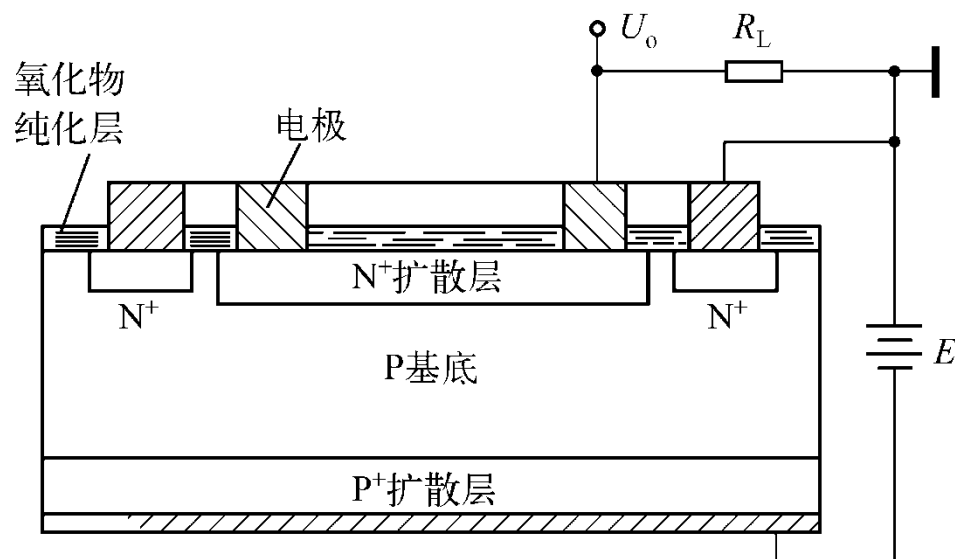


图4-61 带环极2DU结构示意图

图4-62中给出了2CU和2DU的偏置电路；图4-63给出了它们的等效电路和在第I象限表示的伏安特性。

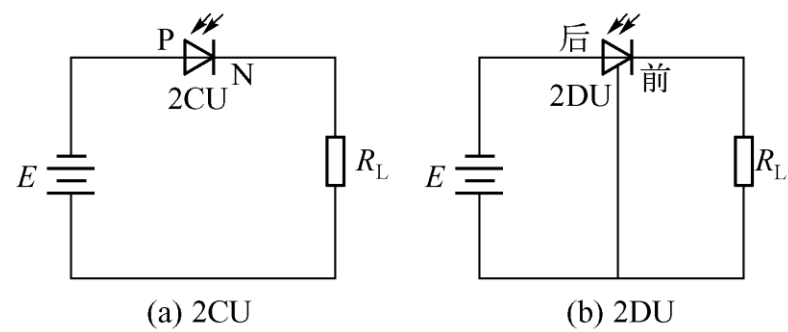


图4-62 光电二极管偏置电路

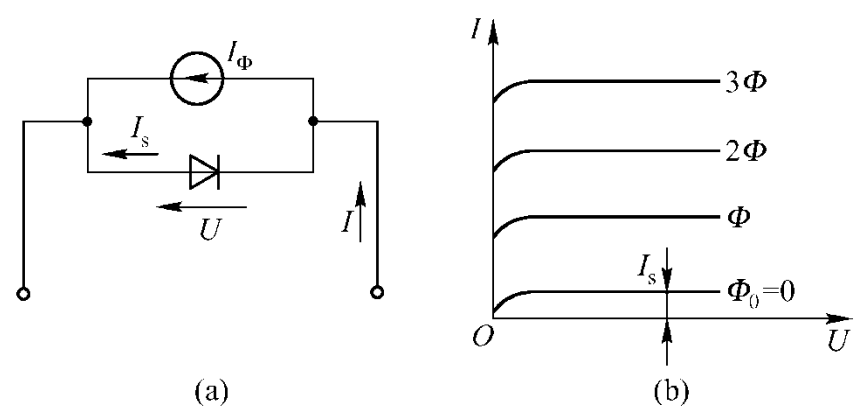


图4-63 光电二极管的等效电路和在第I象限表示的伏安特性

(2) 光电二极管的主要特性

① 光特性

描述光电流 I 随入射光照度或通量变化的关系、即 $I=f(E)$ 或 $I=g(\Phi)$ 。硅光电池二极管的光特性如图4-64所示。

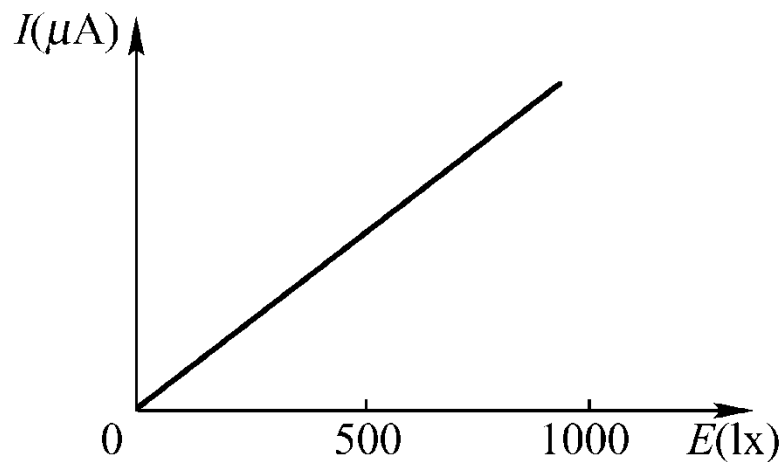


图4-64 硅光电二极管的光特性

②光电二极管的光谱特性

该特性通常是由材料来决定，图4-65给出了锗和硅两种光电二极管的光谱特性。

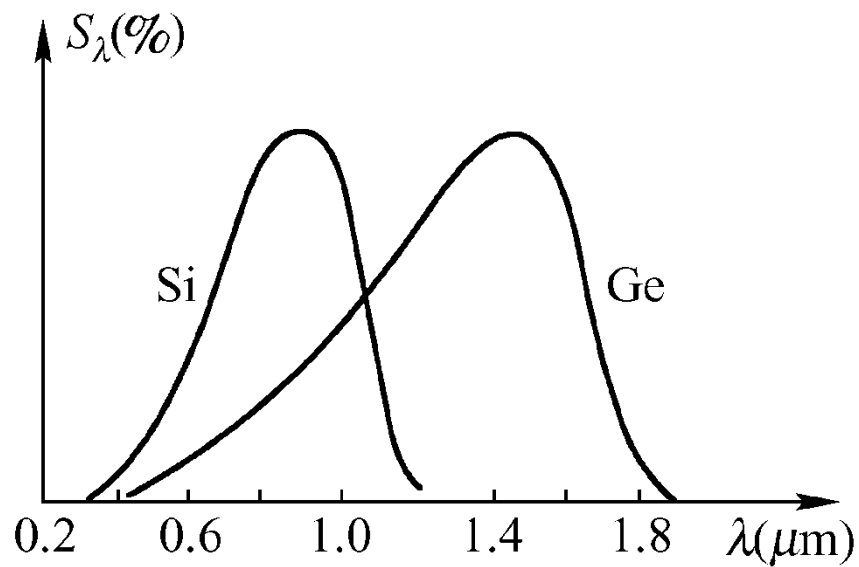


图4-65 光电二极管的光谱特性

③光电二极管的伏安特性。

该曲线如图4-63(b)所示，实际与理想情况略有出入，曲线略向上偏。

④光电二极管的频率特性

器件中影响频率响应速度的主要因素是：结电容和杂散电容的影响；在P—N结外产生的光生载流子需经一段时间的扩散才能入结，与P—N结内的光生载流子形成时间差的影响；

⑤光电二极管的温度特性

在外加电压为50V，入射照度不变的条件下，光电流随工作温度 T 的变化曲线 $I=f(T)$ 如图4-66所示。

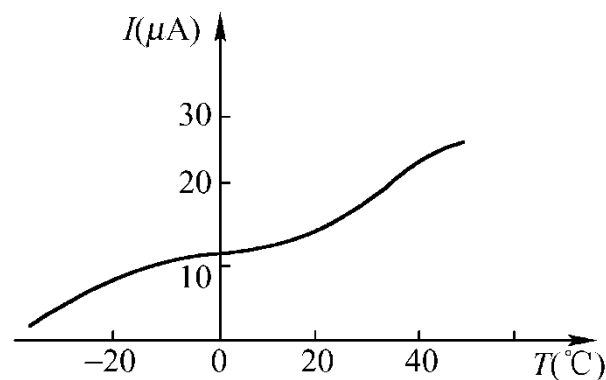


图4-66 光电二极管的温度特性

⑥光电二极管的暗电流

当无入射光照射时，硅、锗两光电二极管的暗电流 $I_{\Phi=0}$ 随温度变化的关系如图4-67所示。

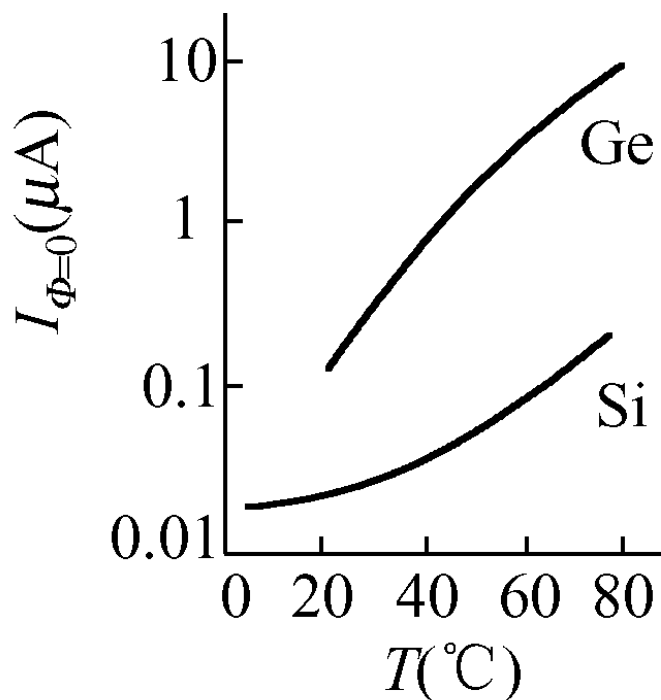


图4-67 光电二极管的暗电流曲线

(3) 硅光电二极管的性能

硅光电二极管可分为四种类型：Ⅰ型为高灵敏度硅光电二极管；Ⅱ型为快速响应，灵敏度稍低的光电二极管；Ⅲ型为大面积硅光二极管；Ⅳ型为高速响应，光谱扩展到红外的硅光电二极管。

①Ⅰ型硅光电二极管的主要特性：

探测率： $=10^{12}\text{cm Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ ；

量子效率： $\eta > 90\%$ (加增透膜)；

工作温度：环境温度；

光敏面积：线度为 $0.05 \sim 2.5\text{mm}$ ；

电容：与光敏面积成正比，随温升稍有增加

②Ⅱ型硅光电二极管的主要特性：

探测率： $=6 \times 10^{11}\text{cm Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ ；

响应时间： $t \approx 3\text{ns}$ ；

光敏面积： 1mm^2 $D_{\lambda_p}^*$

③III型硅光电二极管的主要特性:

探测率: $D^*(0.9\mu\text{m}, 270) = 4 \times 10^{12} \text{ cm Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$;

响应时间: $\approx 10\text{ns}$ ($U_R = 10\text{V}$, $R_L = 50\Omega$),

光敏面积: $2 \times 2\text{mm}^2$ 、 $5 \times 5\text{mm}^2$ 、 $10 \times 10\text{mm}^2$

④IV型硅光电二极管的主要特性:

探测率: ($U_R = 0$, $R_L = 40\text{M}\Omega$) $= 5 \times 10^{12} \text{ cm Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$;

$D^* (U_R = 60\text{V}, R_L = 50\Omega) = 10^{12} \text{ cm Hz}^{1/2}\text{W}^{-1}$;

响应时间: $\approx 2\text{ns}$ ($U_R = 60\text{V}$, $R_L = 50\Omega$);

工作温度: ~~环境~~_p温度;

光敏面积: $5 \times 5\text{mm}^2$ 。

它们的光谱特性曲线如图4-68所示。

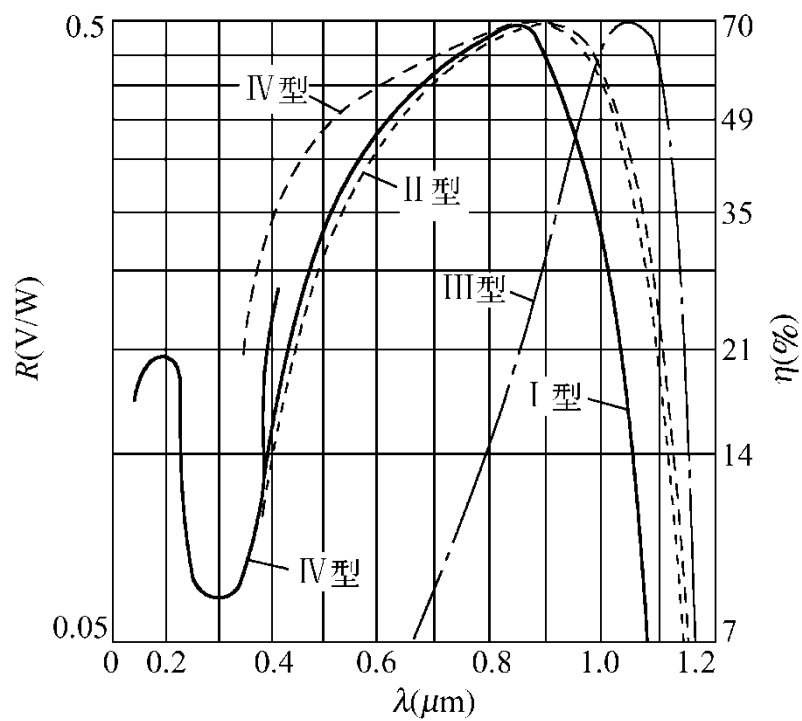


图4-68 各类硅光电二极管的光谱特性

(4) 光电二极管偏置电路的计算

利用光电二极管的伏安特性，按图4-62所示的光电二极管的偏置电路进行分析和计算。假设入射光照度 $E=100+100\sin\omega t(\text{lx})$ ，为使负载 R_L 上输出有10V的电压变化，求 R_L 和 E_0 值的大小，并画出输出电流和电压的变化曲线。分析计算的步骤如下：

- ①按入射照度变化范围可知，最小输入照度为零，最大输入照度为200lx；
- ②画出所用光电二极管的伏安特性曲线；
- ③计算负载电阻 R_L ；
- ④在曲线族上画出照度的正弦变化曲线，并在相应处画出 i 和 u 随时间变化的曲线。

5. 雪崩光电二极管和光电三极管

(1) 雪崩光电二极管

它的工作原理是在PN结上施加高反向偏压，使其接近击穿电压。这时由光子产生的电子—空穴对在高反压形成的强电场作用下，做定向运动并加速，使其动能迅速增加，并与晶体分子碰撞，激发出新的电子和空穴。如此多次重复这一过程，形成类似雪崩的状态，使光生载流子得到倍增，光电流增大。可见，这是一种内部电流增益的器件。

光电流增益的大小常用光电流增益因子G表示

$$G = \frac{i}{i_0}$$

G与反向偏压U之间的关系可用下述经验公式表示

$$G = \frac{1}{[1 - (U/U_B)^n]}$$

G 与反向偏压 U 之间的关系也可由曲线表示, 如图4-73,图4-74给出了硅、锗雪崩光电二极管的探测率与增益因子间的关系

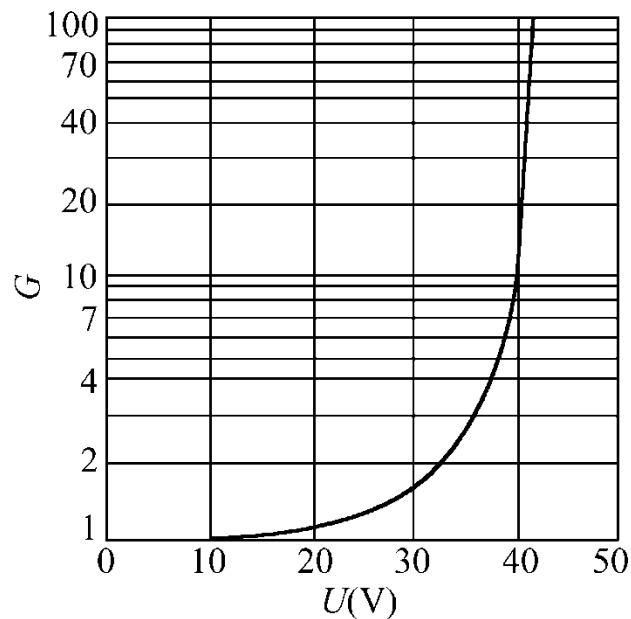


图4-73 雪崩光电二极管 $G = F(U)$ 曲线

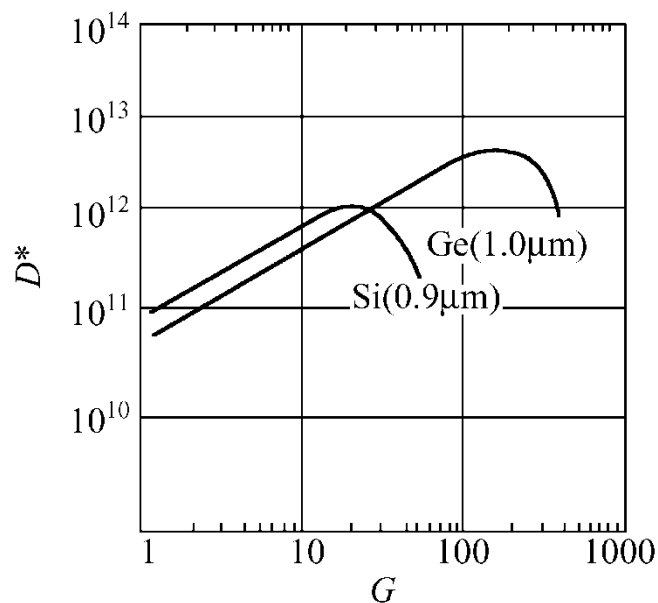


图4-74 硅、锗雪崩光电二极管的探测率 D^* 与增益 G 的关系

表4-8是常用硅雪崩光电二极管的主要特性

表 4-8 硅雪崩光电二极管特性参数

类 型	光谱响应 范围(μm)	光敏面积 (mm^2)	M	工作偏压 (V)	暗电流 (nA)	电流响应度 (A/V)	响应时间 (ns)	噪声等效功率 ($\text{W}/\text{Hz}^{1/2}$)	探测度 ($\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$)
n-i-P	0.5 ~ 1.1	1.96×10^{-1}	150	160 ~ 220	30	18	0.5	10^{-13}	3.3×10^{11}
n-i-P	0.5 ~ 1.1	6.15×10^{-2}	150	160 ~ 210	30	18	0.5	10^{-13}	1.9×10^{11}
n-i-P	0.5 ~ 1.1	7.85×10^{-3}	150	60 ~ 90	2	24	0.5	6×10^{-14}	4.4×10^{10}

在雪崩光电二极管的使用中还应注意以下两个问题:

①雪崩过程伴有一定噪声;

②局部击穿问题

基于以上两个问题,工作偏压选择必须适当。偏压太小,雪崩增强作用不明显,增益不大;而偏压过高,则噪声增大,甚至击穿烧毁。

(2) 光电三极管

目前最常用的光电三极管为NPN型，其结构如图4-75所示

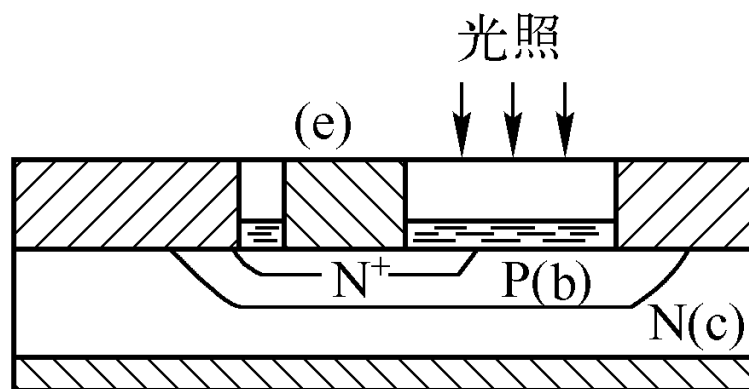


图4-75 光电三极管结构

入射光束落在相当晶体三极管的基极(b)和集电极(c)之间的结上。它的接线方法与晶体三极管不同，只接两个极而空出一个极，因此可供接线的方法有以卜三种，如图4-76所示。

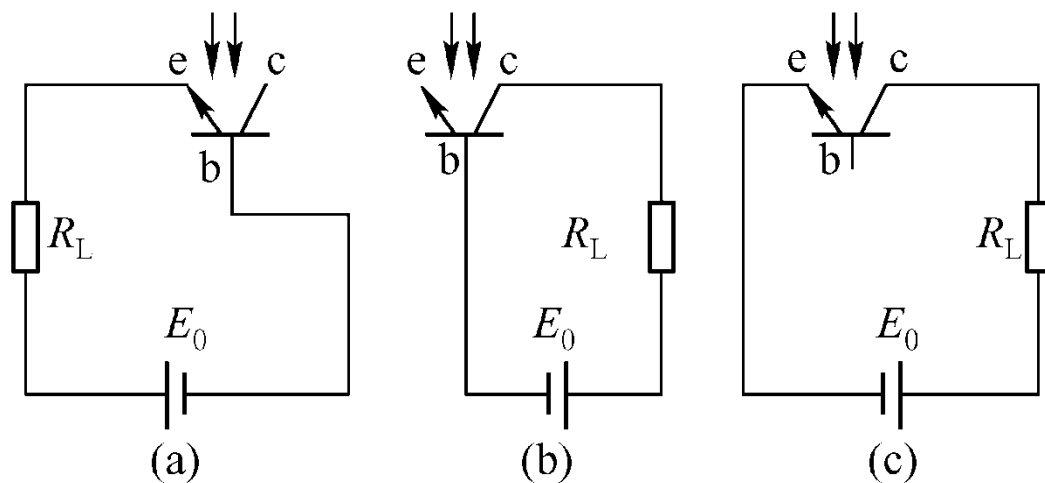


图4- 76 光电三极管回路的三种接法

当光照在集电结的基极区时产生电子—空穴对，由于集电结反向偏置，而使内电场增加。这样当电子扩散到结区时，很容易漂移到集电极中去。在基极留下的空穴，促使基极对发射极的电位升高，更有利于发射极中的电子大量经过基极而流向集电极，从而形成光电流。这一原理与晶体三极管的工作方式一致。随着光照增加，光电流也随之增加。这里集电极实际上起到了两个作用，可用图4-77加以说明。

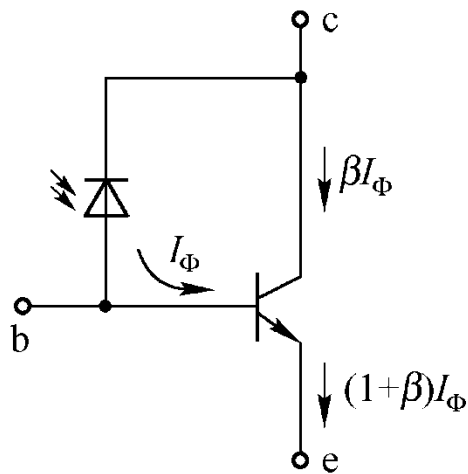


图4-77 光电三极管工作原理分析

(3) 光敏场效应晶体管

它是利用结型场效应晶体管的栅沟道，在光辐射作用下，引起漏极电流变化。它比光电三极管有更高的灵敏度，且可在 $1\sim 10^6$ 范围内任意调节。它的低温性能好，但高温性能和光电特性的线性较差。

(4) 光敏晶间管

它是利用光辐射控制晶闸管导通状态的光敏器件。光敏晶闸管是良好的电流开关，关闭状态时电阻可以达 $10\text{M}\Omega$ ，而在导通状态时电阻可低于 10Ω 。

6. 其它光电探测器

(1) 异质结光电探测器

异质结是由两种不同基质的半导体材料形成的P—N结，它与同质结不同，结两边不同基质的禁带宽度不同，常以禁带宽度大的材料作为光照面，设此面的禁带宽度为 E_{gm} ，当光垂直结面入射，能量 $h\nu \geq E_{gm}$ 的光子被光照面宽禁带材料吸收产生电子—空穴对。如果宽禁带材料的厚度大于载流子的扩散长度，则上述载流子因达不到结区，而对光电信号没有贡献。然而能量较小的长波光光子能顺利到达结区，并被窄禁带材料吸收，产生光生载流子形成光电信号。

(2) 肖特基势垒光电探测器

肖特基势垒是障层的一种，产生在金属和半导体材料的接触面附近。在接触时，由于载流子所处的能级不同，它们将由高能级向低能级方向转移。内电场作相应叠加到能带各处，形成如图4-78所示的能带图，图中界面形成的接触势 E_s ，叫作肖特基势垒，通常 $E_s < E_g$ 。

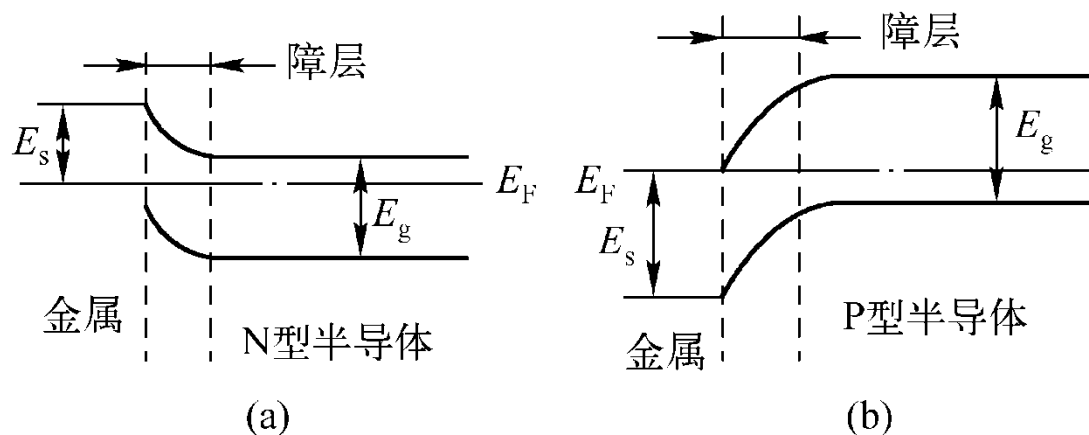


图4-78 金属与半导体界面间的能带图

(3) 光磁电效应光电探测器

将半导体光敏材料置于如图4-79所示的强磁场中，半导体表面受光照则产生电子—空穴对，由于表面载流子浓度大，便要向体内扩散，运动电荷在磁场作用下要发生偏转。电子向左，空穴向右，使半导体两侧面分别积累了正、负电荷，形成由右至左的内电场。该内电场引起的载流子漂移运动将逐步与偏转运动达到动态平衡，宏观上形成固定电场，该电场对外短路电路产生短路电流输出，对外开路电路产生开路电压。这种现象叫作光磁电效应，利用该现象制成的器件叫作光磁电探测器(PME)。

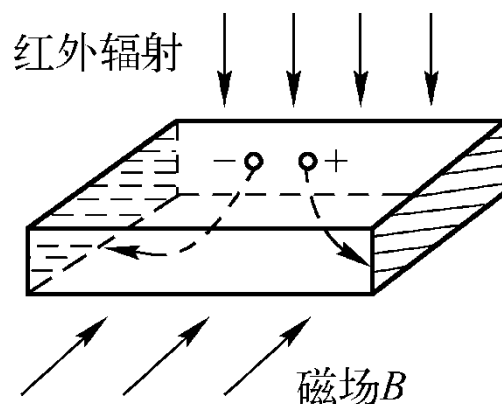


图4-79 光磁电效应原理图

(4) 四象限探测器

在光电检测中为了准直和跟踪的需要，设计了四象限探测器、它由四个性能完全相同的光电二极管按直角坐标要求排列成四个象限，按四个象限电压来取误差信号，以判别光斑位置或光束方向，如图4-80所示。把光斑照射四探测器上面积 S_{d1} 、 S_{d2} 、 S_{d3} 和 S_{d4} 、所对应的电压 U_1 、 U_2 、 U_3 和 U_4 按一定规则组合，解出光斑的位置信息。电压组合规则如下：

$$U_x = \frac{(U_1 + U_4) - (U_2 + U_3)}{(U_1 + U_2 + U_3 + U_4)}$$
$$U_y = \frac{(U_1 + U_2) - (U_3 + U_4)}{(U_1 + U_2 + U_3 + U_4)}$$

将 U_x 、 U_y 作为误差信号经过电子伺服系统再去控制光束方向或光电二极管的方位，即可完成光束的准直和跟踪的功能。

探测器之间的间隔称为“死区”，一般很窄，应以不产生信号间串扰为限，太宽将会使小光斑落在其中而无法判别。

目前已有硅光电二极管构成的四象限探测器，可用于可见光和近红外波段，中、远红外的器件尚不太成熟。

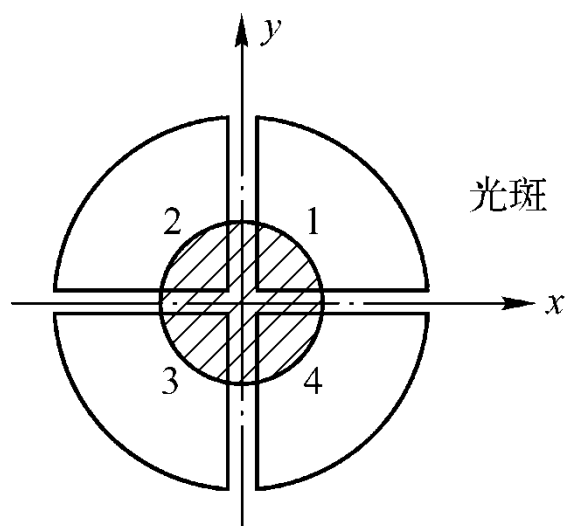


图4-80 四象限光电二极管结构示意图

4.5 CCD像传感器的工作原理

1. MOS光敏元的工作原理

MOS光敏元的结构是以硅Si半导体作为衬底，在其上部生长一层二氧化硅，然后再蒸涂具有一定形状的金属层作为电极。由此可见，它是由金属(M)、氧化物(O)和半导体(S)三层组成，如图4-81所示。

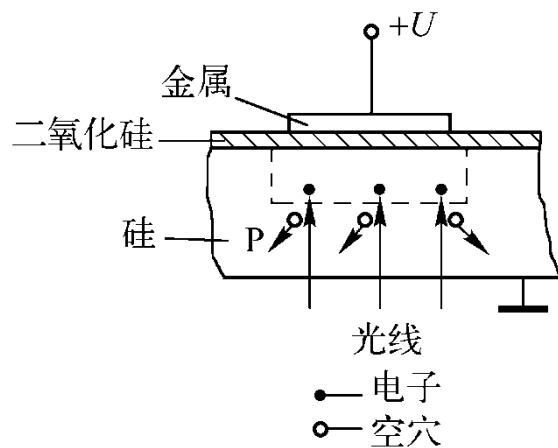


图4-81 MOS光敏元结构

MOS结构的移位寄存器的工作原理如图4-82所示

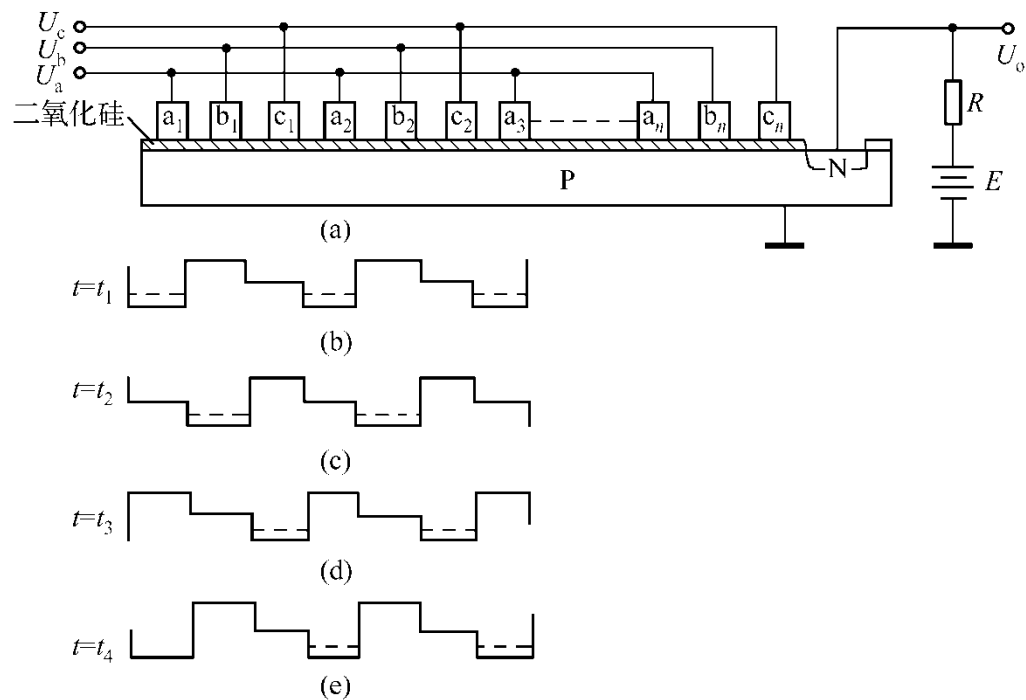


图4-82 MOS结构的移位寄存器工作原理

2. CCD线阵像传感器

欲完成摄像和传输两项功能的器件，应由接收并转换光信号为电信号的光敏区和移位寄存器按一定方式联合组成。CCD线阵传感器的工作原理如图4-84所示。

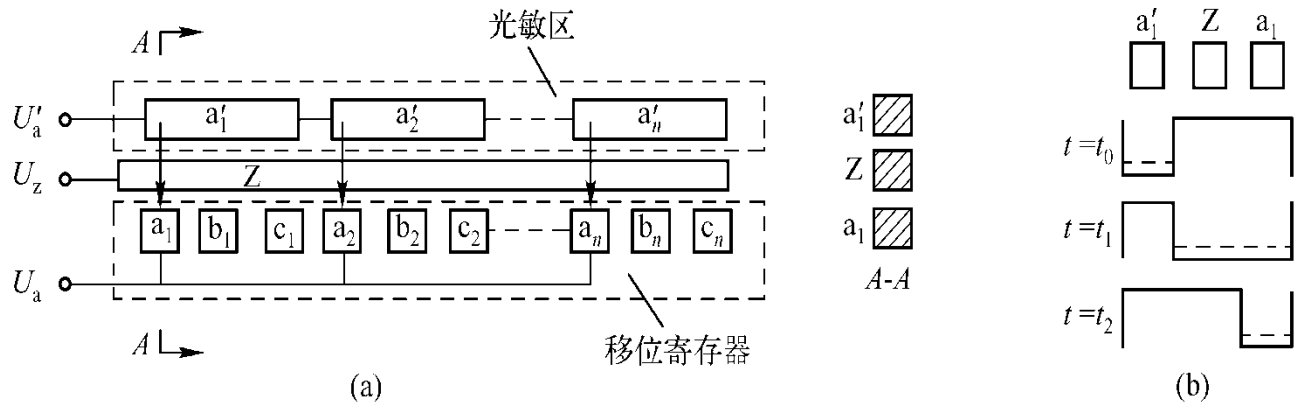


图4-84 CCD线阵像传感器

光敏区在光信号作用下产生光电子，由转移门电极z控制转移到a1，a2，...an相应的势阱中去，这是个平行转移的过程，在 U_a 、 U_z 和 U_a 间施加脉冲电压的时序关系如图4-85所示。

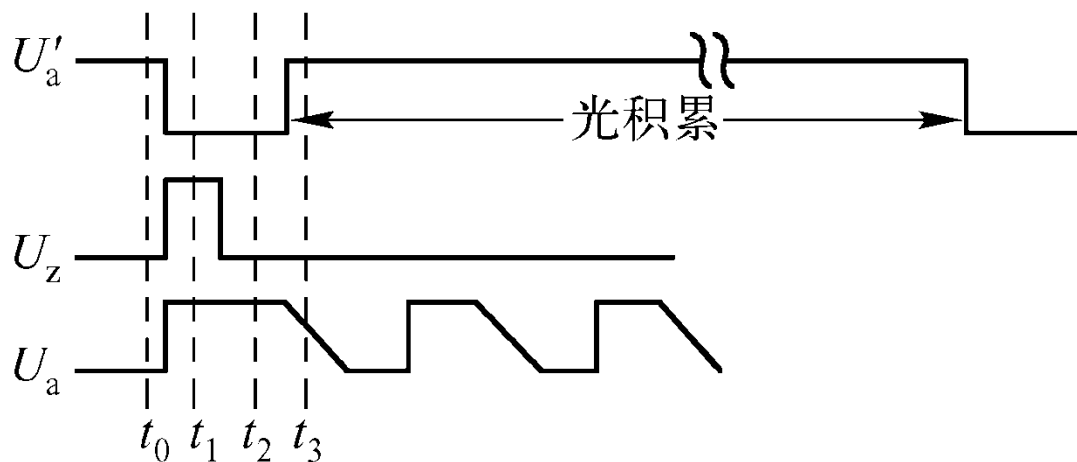


图4-85 时序脉冲关系

2. CCD线阵像传感器

实用中也常采用图4-86所示的结构和工作方式。

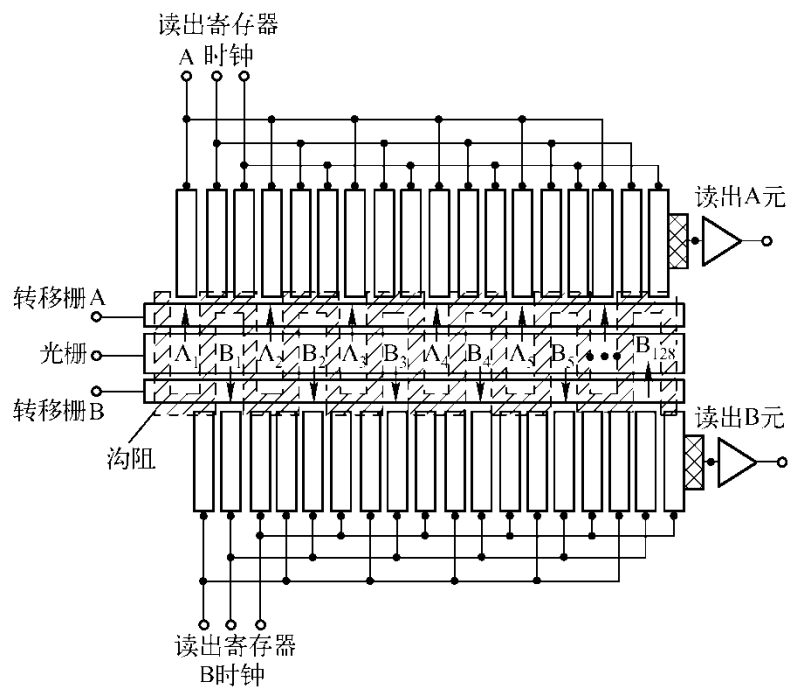


图4-86 实用线阵CCD

目前先进的光敏CCD探测面阵的主要参数如表4-9。

表 4-9 CCD 探测面阵的主要参数

类 型	512 × 512 CCD	1024 × 1024 CCD
像元数	512 × 512	1024 × 1024
像元尺寸(μm)	18 × 18	18 × 18
占空比	100%	100%
量子效率	0.5 ~ 0.7 (0.4 ~ 0.8 μm)	0.4 μm ≥ 0.5 0.6 ~ 0.7 μm ≥ 0.7 0.8 μm ≥ 0.55
帧频	慢扫 500 帧/s	慢扫 500 帧/s
暗电流(nA/cm ²)	0.3 (23℃)	0.3 (23℃)
灵敏度(μV/电子)	2	2

器件帧扫描结构原理如图4-91和图4-92。

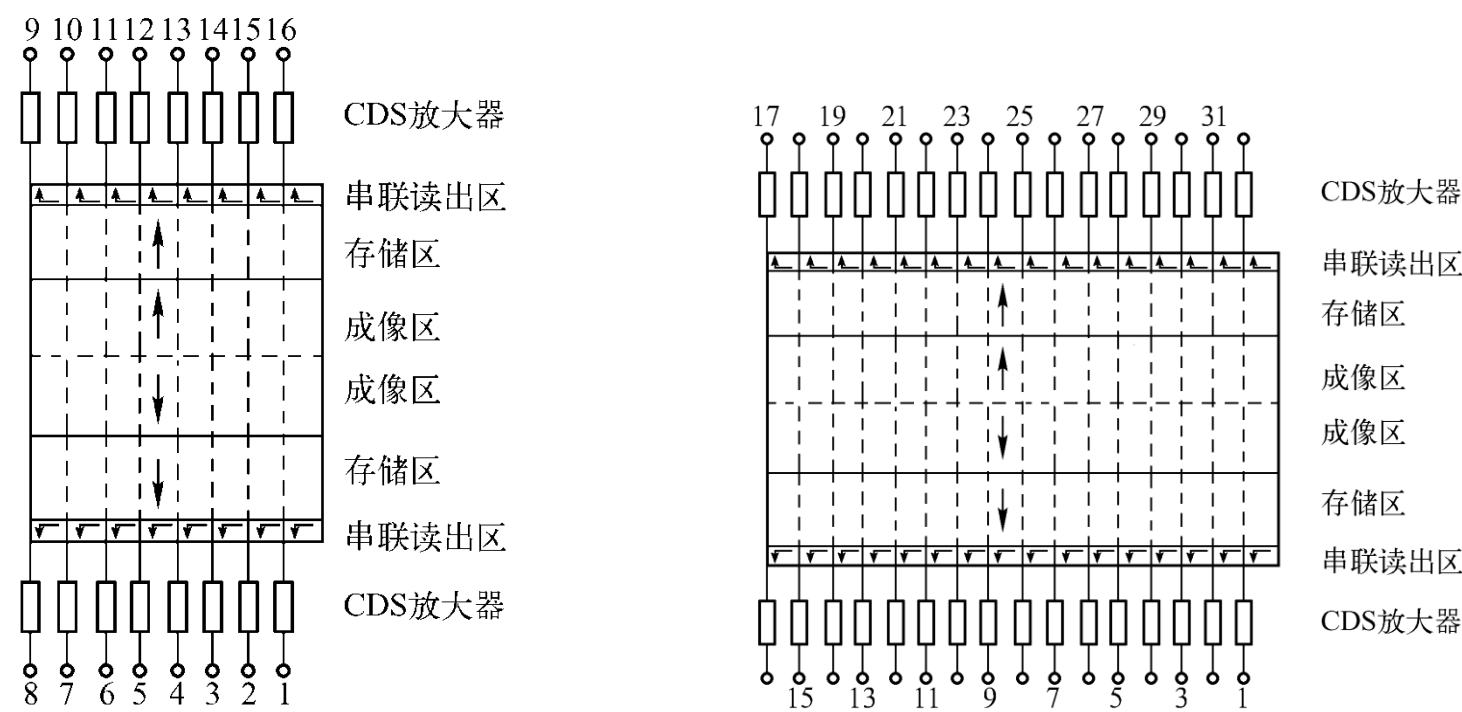


图4-91 512×512光敏CCD帧扫描原理

图4-92 1024×1024光敏CCD帧扫描原理

5. 红外CCD

在红外CCD(IRCCD)中，红外探测器阵列完成对目标红外辐射的探测，并将光生电荷注入到CCD寄存器中去，由CCD完成延时、积分、传输等信号处理工作。IRCCD具有自扫描功能，它是人们在红外探测器中应用大规模集成电路技术，实现红外焦平面列阵探测的主要方向之一。

(1) 实现红外探测的特殊问题

红外辐射探测器将受到很强的背景辐射的影响;在红外波段中，目标与背景的对比度极小;

(2) 单片式IRCCD

在单片式IRCCD中，红外探测器的光敏列阵和CCD都是用相同的半导体材料制作在同一块片子上。其中红外探测器可利用本征激发或杂质激发来实现。CCD既可以利用少数载流子来传输信息，也可以利用多数载流子来传输信息。目前单片式IRCCD主要有以下三种类型。

①窄禁带半导体材料IRCCD

②非本征硅IRCCD

③肖特基势垒IRCCD

④单片式IRCCD摄像头的性能指标

利用铂硅制成的 640×480 IRCCD摄像机扫描头的主要参量:

分辨力: $640(H) \times 480(V)$;

单元面积: $24 \times 24 \mu\text{m}^2$;

致冷: 斯特林式;

噪声等效温差: $\text{NETD} < 0.06\text{K}$ (F数为1的物镜, 背景温差 300K);

动态范围: 72dB ;

饱和信号水平: 1.5×10^6 个电子;

噪声水平: 300个电子;

最小可探测温差: $\text{MRTD} < 0.15\text{K}$ (耐魁斯特频率时)

一种 320×244 铂硅IRCCD的参数为:

噪声等效很差: $\text{NETD} < 0.04\text{K}$ (F数1.4);

积分时间: $1 / 30\text{s}$;

光谱范围: $1.0\text{—}5.5 \mu\text{m}$;

动态范围: 80dB ;

温度响应率: $30\text{mV} / ^\circ\text{C}$;

探测元面积: $23 \times 32 \mu\text{m}^2$ 。

(3) 混合式IRCCD

混合式IRCCD是用不同的材料分别制作红外探测器阵列和CCD移位寄存器，用阵列连结工艺使之组装在一起。由于当今本征CCD工艺和技术已经发展得相当成熟，因此几乎都用硅CCD作为混合式IRCCD的寄存器。而随着各种红外敏感的探测器制造技术的日趋完善，所以十分注重混合式IRCCD的研制工作。目前高密度镶嵌的红外探测器的集成技术获得了相当满意的成功，使之形成了一个红外焦平面技术的新领域。

制造混合式IRCCD的红外探测阵列材料目前主要是可工作在3—5 μm 波段内的锑化铟(InSb)，8—14 μm 的碲锡铅(PbSnTe)、碲镉汞(HgCdTe)和热释电材料等。

(4) 背景抑制

前面提到IRCCD有着“背景辐射强”的特点。由于CCD势阱容量被背景辐射产生的电子填充，这就减少了光生载流子的填充空间，因此需要采用一些特殊的处理方法。在实际应用中，热成像所要探测的常是相邻两个像元之间的温差，而且常常仅探测移动的目标，因此变化较快。而背景通常是固定的或是缓慢变化的。这就可在互连电路中采取交流耦合、背景适应或差动互连等方法，也可在CCD的输入存储势阱中对注入的电荷采取“按比例划分电荷”和“填充和溢出的方式”等背景撤除方法，对背景加以抑制。这样就可使CCD工作在线性区，达到增大动态范围，提高信噪比的目的。

图4-94给出了一种抑制背景的交流耦合电路， R_L 是负载。从探测器上得到的信号通过直流隔离电容 C 耦合到 G_1 栅上，以控制流入 G_2 栅下势阱中的电荷。

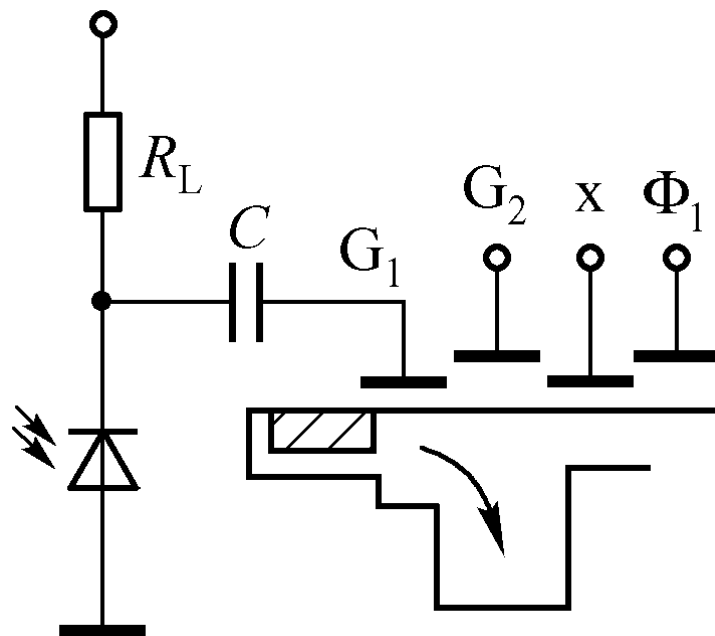


图4-94 抑制背景的交流耦合电路

4.6 热电探测器

1. 热敏电阻

半导体具有较大的负电阻温度系数，其电阻率随温度升高而呈指数减小，热敏电阻就利用了这一特性。其典型结构如图4-95所示。热敏电阻的静态伏安特性曲线如图4-96所示。

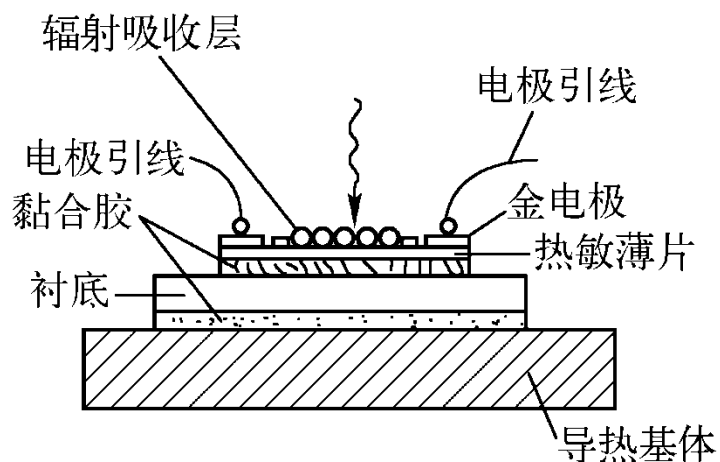


图4-95 热敏电阻的典型结构

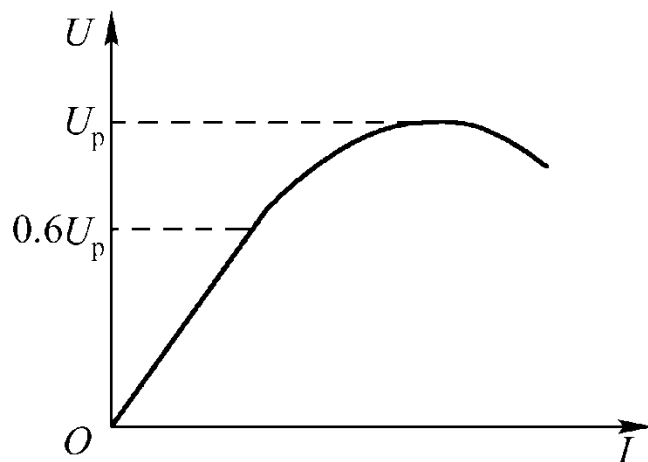


图4-96 热敏电阻的伏安特性曲线

使用时通常将两个性能相同的热敏电阻封装在一个壳内，其中一个外加光屏蔽用作温度补偿，叫作补偿热敏电阻，另一个接收光辐射，叫作受照热敏电阻。常采用桥式电路如图4-97所示。

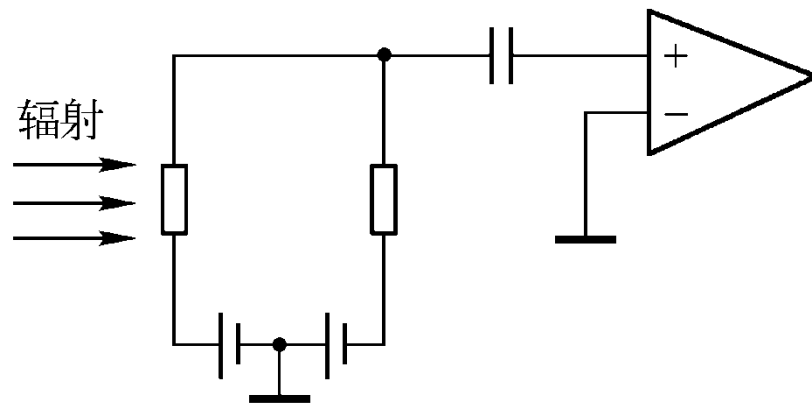


图4-97 热敏电阻的偏置电路

2. 热电偶

(1) 热电偶的基本工作原理

① 塞贝克效应

当两种不同金属或半导体材料的细丝，按图4-98所示方式联成闭合回路，并使两结点温度不同，如 $T > T_0$ ，则在该闭合回路中有电流流过，该电流叫作温差电流。与温差电流对应的电动势叫作温差电动势 ϵ_{12} 该值的正负由两种材料和冷热结点位置不同而定，并有 $\epsilon_{21} = -\epsilon_{12}$ ，该电动势的大小随温差的变化关系，可用其微分系数表示，式中， α_{12} 为塞贝克系数

$$\alpha_{12} = (d\epsilon_{12} / dT) T_0 (VK^{-1})$$

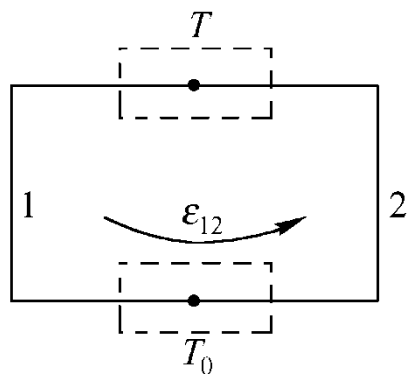


图4-98 塞贝克效应

②珀尔帖效应

将两种不同金属或半导体材料的细丝连接，当有电流 I_{12} 从材料1通过结点流向2时，这时结点变冷(或变热)，如图4-99所示。单位时间吸收的热量，即热功率与电流 I_{12} 成正比， π_{12} 为珀尔帖系数或珀尔帖电压：

$$P_{\text{珀}} = \pi_{12} I_{12} \text{ (W)}$$

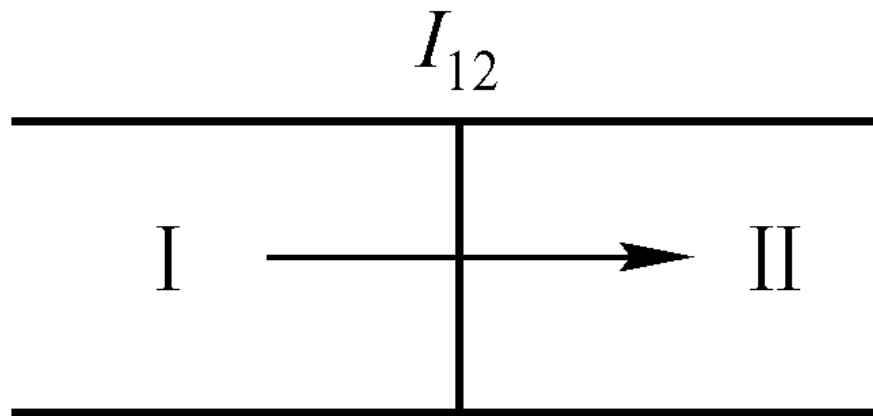


图4-99 珀尔帖效应

(2) 测辐射热电偶的响应特性

设由材料1和2构成的热电偶，如图4-100所示。按照有关定理可推导出热电偶灵敏度表达式。设两材料臂长 l ，截面积分别为 S_1 和 S_2 ，电阻率分别为 ρ_1 和 ρ_2 。整个热电偶的电阻为

$$r = r_1 + r_2 = (\rho_1 / S_1 + \rho_2 / S_2) l$$

两臂热导率为 k_1 和 k_2 ，热电偶热结和冷结之间的热导应是两臂热导之和，用下式表示，

$$y = y_1 + y_2 = (k_1 s_1 + k_2 s_2) / l$$

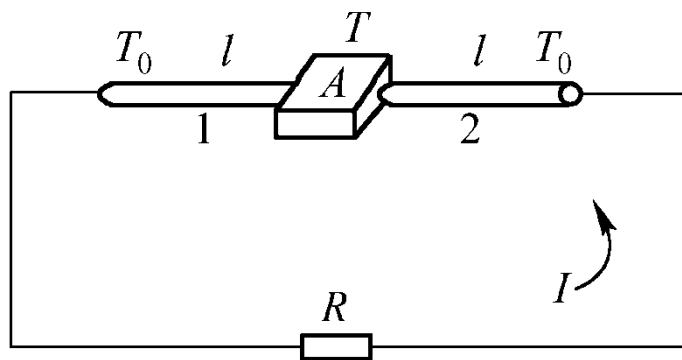


图4-100 热电偶简图

固定冷结温度为 T_0 ，而热结做成镀“黑”的面积为 A 的响应平面。当 A 吸收辐射功率 $P_{\text{吸}} = \alpha P_i$ ，式中 α 是镀黑面的吸收系数， P_i 是入射功率，这时 A 面产生升温至 T ， $T > T_0$ ，产生的信号电压为 U_s 。由此可推出热电偶灵敏度 $y(f)$ 的表达式：

$$y(f) = \frac{U_s}{P_i} = y(0)(1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2)^{-\frac{1}{2}}$$

为热电偶的时间常数； R 为负载电阻，热电偶中包括接收面 A 在内的结热容。

ε

3. 测辐射热电堆

为了增加上述热电偶的灵敏度，可用若干个这样的器件组合成实际中常用的热电堆。为了说明这一作用的效果，从单个热电偶参量间关系的讨论入手。

设负载电阻 R 与热电偶 r 间的关系为 $R/r=m$ ，这时可导出 $y(f)$ 与 τ 的表达式：

$$y(f) = \frac{\alpha_{12} \cdot m \cdot \alpha}{\varepsilon(1+m)} \cdot \frac{\tau}{(1+4\pi^2 f^2 \tau^2)^{-\frac{1}{2}}}$$

由以上关系可知：

(1) 电路开路时， $m=R/r \rightarrow \infty$ 和直流 $f=0$ 时的结果相同，；

(2) 由式中可知，塞贝克系数越大，灵敏度越高。

(3) 减小响应接收面的热容，虽然会使 τ 减小，但还可以使灵敏度上升。尽管能依靠缩小响应元的面积来减小热容，然而这会影响辐射的接收量。为此，可把一个响应平面分割成若干块，使每一块接成一个热电偶，并把它们串联起来，这样就构成了热电堆。

图4-101是热电堆的结构示意，设由N个热电偶组成每个电阻为r，热导率 和热容 y 外负载阻抗为z，则有：

$$y(f) = \frac{\alpha_{12} \cdot Z \cdot \alpha}{(Z + Nr)y_T} \left(1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2\right)^{-\frac{1}{2}}$$

$$\tau = \varepsilon / y_T$$

$$y_T = y + \frac{\alpha_{12}^2 T}{Z/N + r}$$

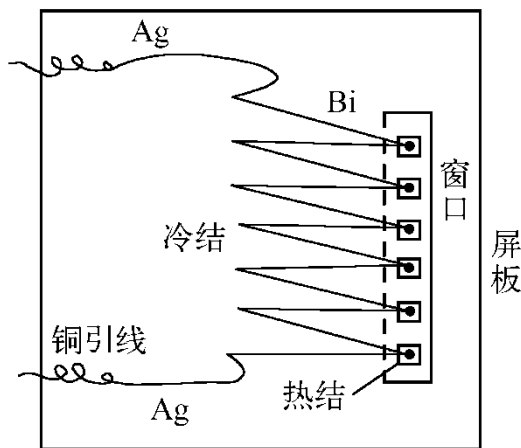


图4-101 热电堆结构示意

测辐射热电堆按其结构可分为两大类。一类是用金属丝或条形材料如银和铋、锰和铜镍合金、铜和铜镍合金等制成的热堆；另一类是用真空沉积和光刻技术制成的薄膜型温差热电堆，这类器件的工作特性较好，如表4-10所示。

表 4-10 薄膜热电堆的特性

工作面积	$1 \times 1 (\text{mm}^2)$	$0.25 \times 0.25 (\text{mm}^2)$	$\phi 2 (\text{mm})$	$0.12 \times 0.12 (\text{mm}^2)$
灵敏度(V/W)	50	220	160	180
时间常数(μs)	100	75	150	13
内阻(Ω)	6.3	10	47	5
噪声等效功率(W)	2.1×10^{-10}	5.9×10^{-11}	1.7×10^{-10}	3.3×10^{-11}
$D^* (\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1})$	5×10^8	4.2×10^8	1.0×10^9	3.6×10^9

3. 热释电探测器

热释电效应的原理可简述如下：在非中心对称结构的极性晶体中，即使在外电场和应力的条件下，本身也会产生自发电极化。而自发电极化强度 P_s 是温度 T 的函数。随着温度的升高，极化强度将相应下降。当温度高于某一温度 T_0 时， $P_s=0$ ，自发电极化效应消失。通常把温度 T_0 叫作居里温度。不同工作材料有不同的居里温度，而热释电器件只能工作在居里温度以下。

4.7 光电探测器的校正

1. 光电探测器的选用原则

在设计光电检测系统时，首先根据测量要求反复比较各种探测器的主要特性参数，然后选定最佳的器件。其中，最关心的问题有以下5个方面。

- (1)根据待测光信号的大小，确定探测器能输出多大的电信号，即探测器的动态范围。
- (2)探测器的光谱相应范围是否同待测光信号的相对光谱功率分布一致，即探测器和光源的光谱匹配。
- (3)对某种探测器，它能探测的极限功率或最小分辨率是多少——需要知道探测器的等效噪声功率，需要知道所产生电信号的信噪比。
- (4)当测量调制或脉冲光信号是，需要考虑探测器的响应时间或频率相应范围。
- (5)当测量的光信号幅值变化时，探测器输出的信号的线性程度。

除上述几个问题外，还要考虑探测器的稳定性、测量精度、测量方式等因素

2. 光量或辐射量与探测器之间的相关属性

实际应用中的光电探测器，由于本身的灵敏度、光谱特性、光特性、均匀性等方面的不同，以及它们所接收光束在强度、方向、光谱和偏振等特性上的差异，所以讨论两者间如何合理有效地匹配是一项重要的技术内容。

光量或辐射量与探测器之间主要有以下几方面的相关属性：

(1)时间属性;(2)光谱特性;(3)强度特性;(4)空间分布特性。

4.7.1 变光度的实现

1. 变光度的必要性

所谓变光度就是使某辐射光束在强弱上发生变化。具体地说是将光源或目标发出的光束利用衰减的手段，使光量满足探测接收的需要。

2. 对减光手段的基本要求

(1) 要求减光器无选择性，光束经衰减后不改变本身的光谱成份比，即光束各光谱成份按相同比例衰减。这对许多测量，特别是光度印色度的测量将十分重要。

(2) 要求减光器能精确地控制衰减量，光照下许多物理、化学过程的研究结果是要求找出一系列光照条件下的反应特性。于是施加的光照值必须准确给出，因此分段或连续减光器的衰减量就需精确控制。

(3) 要求减光器输出光束的几何形状，这对某些场合十分必要。如要求均匀减弱某照射面上的照度，而企图用可变光阑减光，虽然总光量得到衰减，但这只改变了光束的截面，却达不到均匀减光的目的。

(4) 对减光器偏振性的要求，当光束偏振性变化时，会使光电探测器的灵敏度发生变化。因此，在一般情况下，不应采用使偏振性发生变化的减光装置。

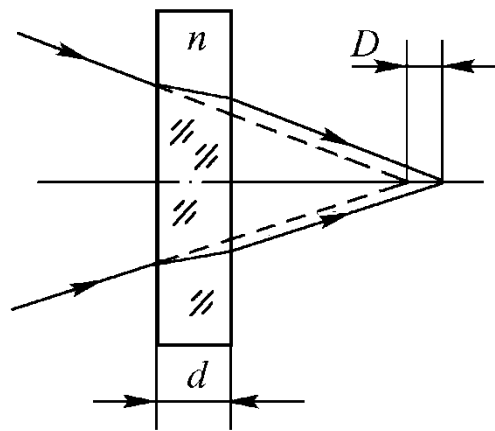
(5) 对减光器的其它要求，这些要求如可变光度的范围、连续性、准直和漫射性等。

3.一般变光度的方法

(1) 吸收滤光片

它用有一定吸收的玻璃、塑料或明胶片制成，是依靠吸收部分入射辐射达到减光的目的。有时也采用液槽内几种材料配比的溶液进行吸收来减光。此外，照相底片的黑化乳胶等也属这类减光器。

平板式减光器对光束特性有一定影响，在会聚光路中，垂直光轴插入平板时，会引起成像点的纵向位移，如图4-102所示。位移量 D 的大小为



$$D = \frac{n-1}{n} d$$

图4-102 光束几何位置的变化

当插入光路的平板与光轴不垂直时，还要引起像点的横向位移，如图4-103所示。横向位移量 L 为

$$L = d \sin \alpha \left[1 - \left(\frac{1 - \sin^2 \alpha}{n^2 - \sin^2 \alpha} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

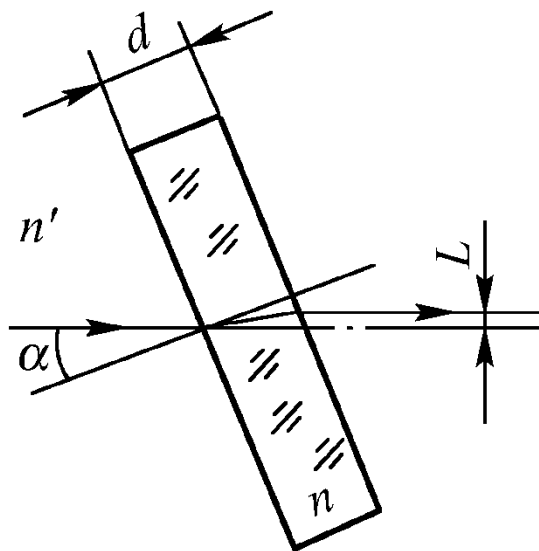


图4-103 光束的横向位移

(2) 薄膜滤光片相射线分离器

这类减光器是在玻璃或与其类似的衬底上，形成多层介质膜或金属薄膜，通过膜层的增反干涉或反射使透射辐射得到衰减。这类减光器可以制成整片均匀衰减的形式，也可制成透射比随位置不同而连续变化衰减的形式。但后者工艺复杂、精度较差，且只能用于细光束的条件下。这类减光器透射比的精度与玻璃滤光器类似。为获得大的衰减系数，可采用多片堆积，并通过标定来确定其衰减系数。

(3) 筛网或多孔板

筛网用细丝编织而成，并进行黑化处理。如用不锈钢丝织成的300目的筛网、其方形开口边长约为 $40\mu\text{m}$ 。还可使筛网相对于光轴产生不同倾斜来调整其透射比。也可在金属板上用腐蚀法制成多孔板型式的减光器。

(4) 膜片光阑或狭缝

是用固定的或可变的圆孔光阑或狭缝组成，通过改变射束的横截面积实现减光。

(5) 偏振减光器

这类减光器可用两偏振器构成，如图4-3(a)所示。第一个偏振器不动，第二个偏振器绕光轴转动，按马吕斯定理输出光通量 Φ ,

$$\Phi = \Phi_0 \cos^2 \alpha$$

为适应多种场合的应用，可采用图4-3(b)所示的三偏振器系统， P_1 和 P_3 偏振器主方向不变且平行，转动第二个偏振器，输出光通量为

$$\Phi = \Phi_0 \cos^4 \alpha$$

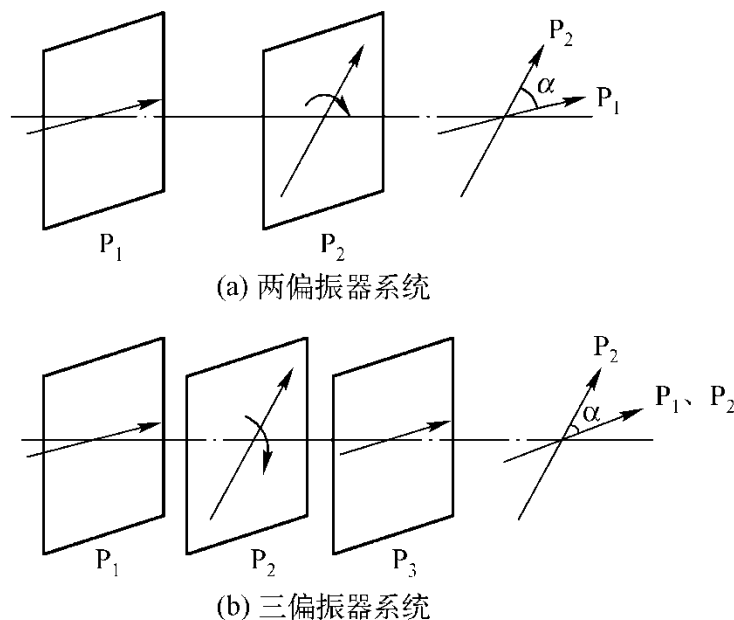


图4-104 偏振减光器

(6) 镜面反射器

利用玻璃或石英的抛光表面．通过镜面反射可实现减光或变化反射光量。其反射比可用费涅耳公式精确计算，对于垂直入射面振动的光束反射比 ρ_s 为

$$\rho_s = \frac{\sin^2(i_1 - i_2)}{\sin^2(i_1 + i_2)}$$

对于平行入射面振动的光束反射比 ρ_p 为

$$\rho_p = \frac{\operatorname{tg}^2(i_1 - i_2)}{\operatorname{tg}^2(i_1 + i_2)}$$

当入射为自然光时，反射比 ρ 为

$$\rho = \frac{1}{2} \left\{ \left[\frac{\sin^2(i_1 - i_2)}{\sin^2(i_1 + i_2)} \right] + \left[\frac{\operatorname{tg}^2(i_1 - i_2)}{\operatorname{tg}^2(i_1 + i_2)} \right] \right\}$$

当光束垂直于界面入射时，反射比可由简化的费涅耳公式给出

$$\rho = \left[\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right]^2$$

(7) 漫反射减光器

利用漫射表面对光束的漫反射，而获得对入射辐射的衰减。图4-105所示为利用朗伯漫射面P对入射光通量 Φ_1 ，衰减为出射光通量 Φ_2 的过程。

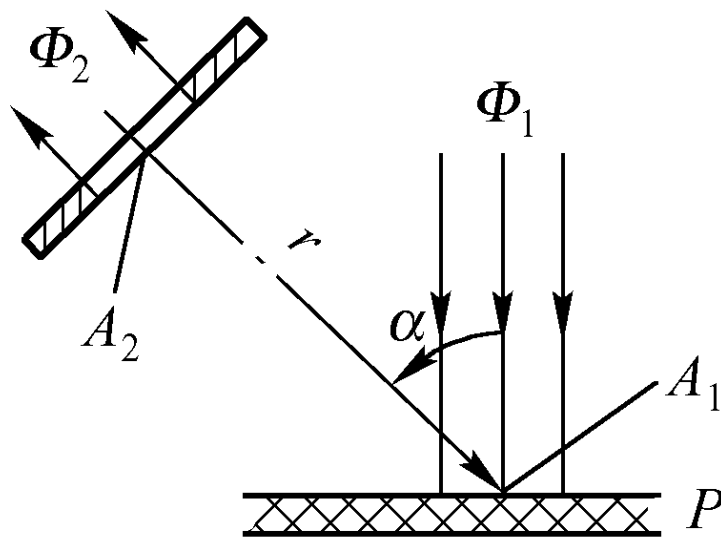


图4-105 漫反射减光器

4. 精确连续变照度的方法

(1) 光轨法变照度的原理及特点

光轨法是计量部门作为光度传递的基本方法。利用点光源在接收面处产生照度的距离平方反比定律，通过改变距离达到改变接收面照度的目的。其装置原理如图4-106所示。

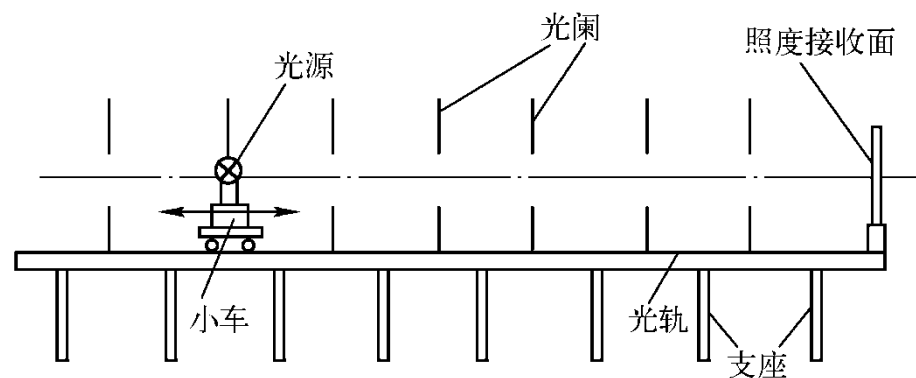


图4-106 光轨示意图

光源在接收面处形成的照度 E 为

$$E = \frac{I}{r^2}$$

(2) 虚像法变照度的研究

虚像法连续变照度的原理如图4-107所示。

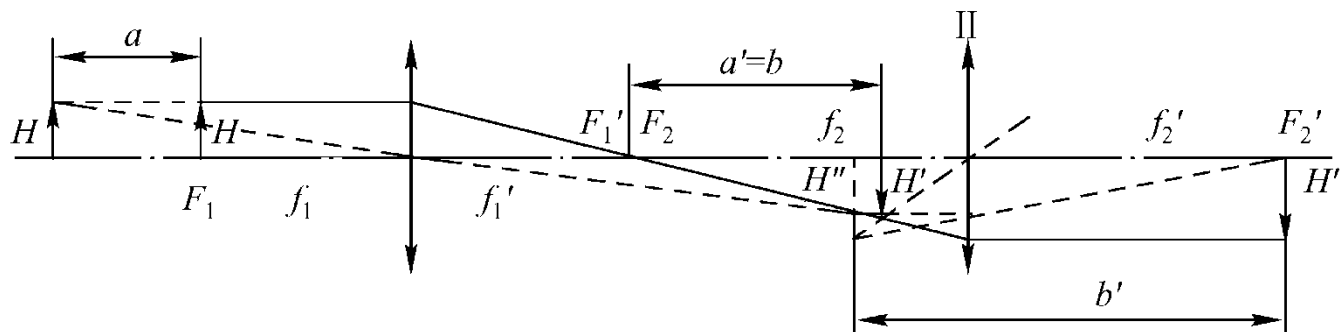


图4-107 虚像法变照度系统光路

由此可以得到以下结论：

- ①在上述安排的光学系统中，不论物在何处，像高与物高之比始终不变，且等于两透镜焦距之比；
- ②当物沿光轴移动时，像距与物距之比也不变，且等于两焦距平方之比；
- ③按应用光学推导的物像能量关系可知，不论所成像是虚像还是实像，物的亮度 L_0 和像的亮度 L_i 之间的关系为

$$L_i = \tau L_0$$

4.7.2 漫射体及其在光电检测中的应用

1.漫射体及漫射光源

广义的讲，能够将入射光束转变为漫射输出的物体统称漫射体，但是为了计算及使用方便，希望漫射体的发光尽可能符合朗伯体的辐射规律。即在任何方向上发光亮度相等，由此可知它在空间某方向上的发光强度 I_α 为

$$I_\alpha = I_0 \cos \alpha$$

式中， I_0 垂直于发光面方向上的发光强度， I_α 某方向与发光面法线间的夹角。

实用中的漫射体主要有内度式漫射体、透射式漫射体和反射式漫射体等三类。

图4-108是输出光可监控的漫射光源，主要由三部分组成：光源和减光系统构成的变光度系统；照度接收器等组成的光度监测系统；以及积分球。输出漫射光量的大小，由监测系统读出。图4-109所示为物镜系统杂光测试仪的原理图。它也利用积分球作为漫射光源。

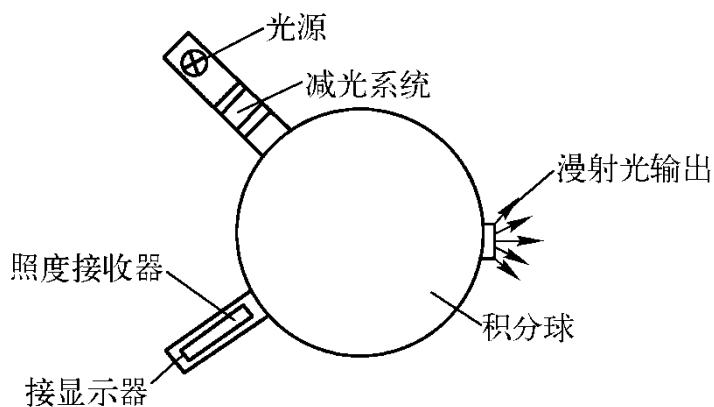


图4-108 可控输出光量的漫射光源

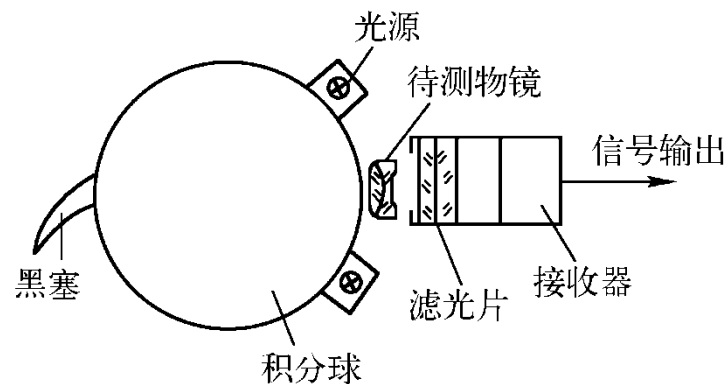


图4-109 物镜系统杂光检测仪原理

2. 漫射体在实现探测器均匀响应度方面的应用

(1) 积分球提供的均匀测量

如图4-110所示为一种利用积分球使探测器对入射辐射均匀测量的装置原理。探测器接收到的光通量 Φ_d 与入射通量 Φ_i 之比为

$$\frac{\Phi_d}{\Phi_i} \approx \frac{A_d \rho_w}{A - A_w \rho_w - A_d \rho_d}$$

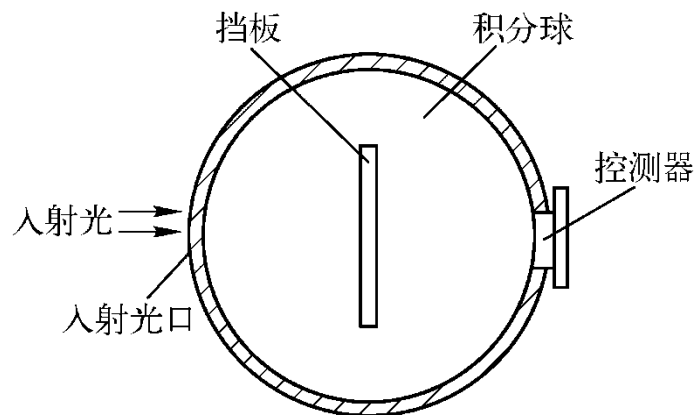


图4-9 积分球均匀测光器

(1) 积分球提供的均匀测量

图4-111所示为利用激光测定介质材料透射比的装置。

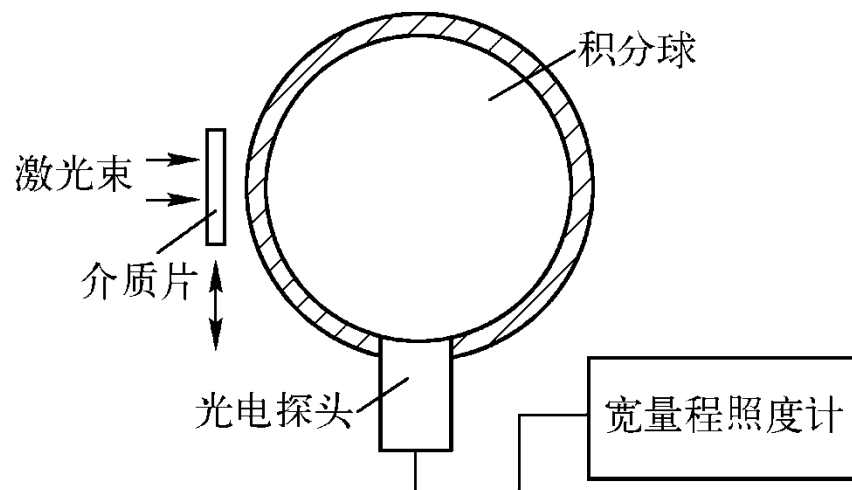


图4-111 介质透射比检测装置

(2) 筒型内腔提供的均匀测量

筒型内腔式漫射器是由高反射的圆筒和两端两块漫射片组成。图4-112所示为配在光电倍增管前的内腔漫射器结构原理。为适用于可见和近红外光谱区，圆柱可用铝陶土，两端可用2mm厚的乳白玻璃片组成，其传光效率可达15%左右。该装置也可与其它光电探测器配用。为消除因光束入射角不同，而使第一玻片反射不同所带来的误差，入射光束最好能接近垂直。

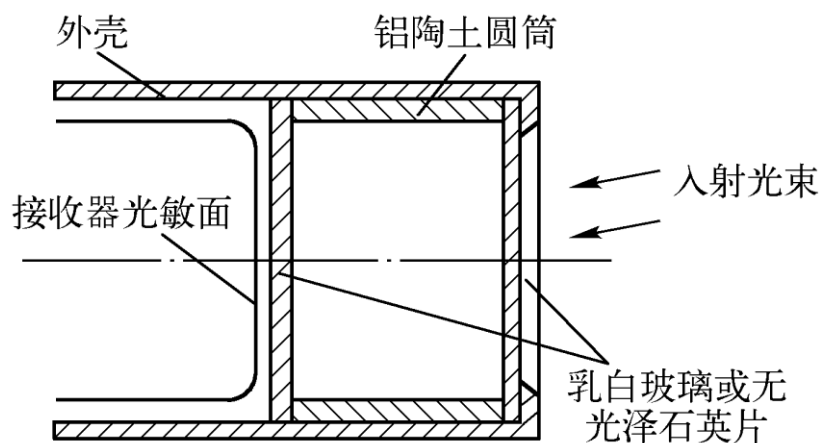


图4-11 筒型内腔式测量头

(3) 内腔式探测器

①带有半球反射镜的内腔探测器，其结构如图4-113所示。

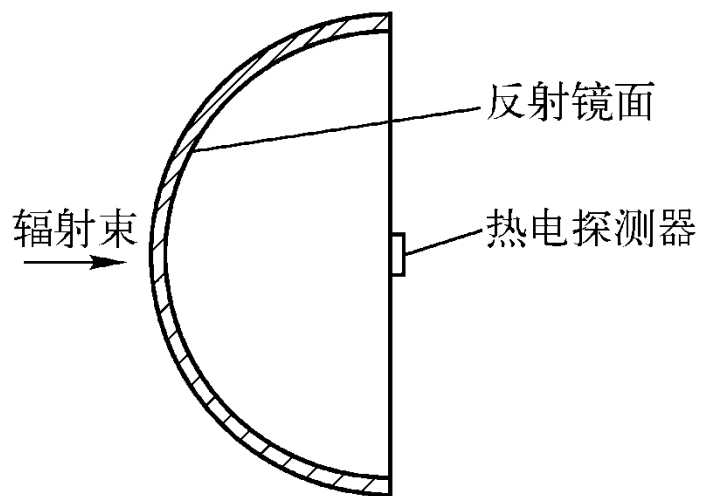


图4-113 带半球反射镜的内腔探测器

②圆筒形内腔辐射计

它由黑色圆形底板和几个可伸缩重叠的黑色圆环组成。在底部及环形外部装有多组热电偶，构成辐射计。如图4-114所示

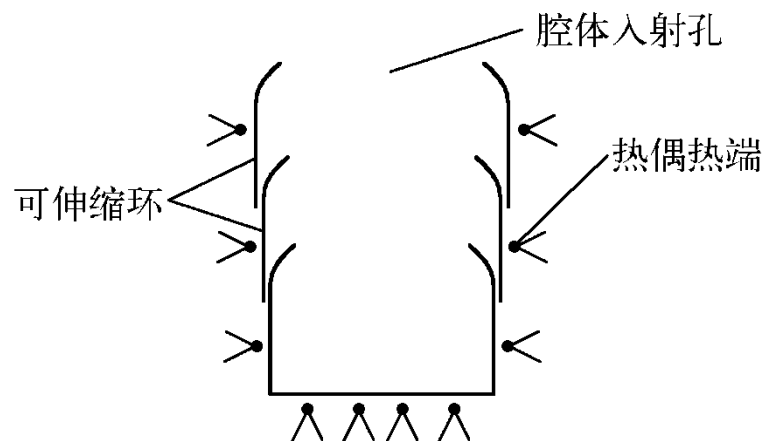


图4-114 圆筒形内腔辐射计

③盒式内腔辐射计

它由长方形盒构成内腔，其典型参数为：盒子尺寸 $10 \times 20 \times 70 \text{mm}^3$ ，在盒子面积为 $10 \times 20 \text{mm}^2$ 的一个端面上开 $9 \times 19 \text{mm}^2$ 的入射孔。底部安排四个热电偶，周围设置84个。响应度 $82 \text{mV} / \text{w}$ ，时间常数8s。黑色内壁对 $0.25—2.5 \mu\text{m}$ 波长区域内反射比为3—6%，而盒子入射孔的有效反射比下降到0.1%以下。

④锥形内腔的应用

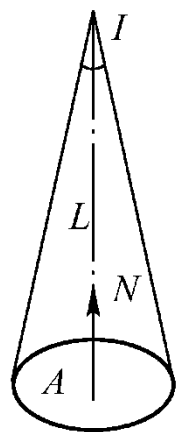
广泛研究与应用的锥形内腔有两种类型：一种采用镜面反射的内表面，就是第六章中所讨论的光锥；另一种锥形内腔采用无光泽内表面，大端作为入射孔，光束射到无光泽内锥面上有强烈向小端漫射的功能，从而起到集光作用，增加置于小端探测器的光通量接收。

3. 产生特殊角度响应度分布的浸射体

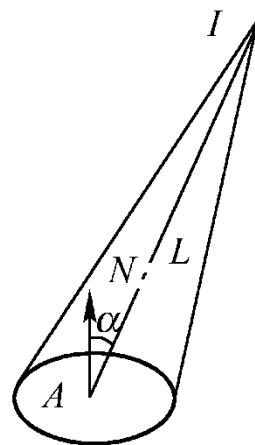
(1) 照度测量中探测器的余弦修正

当光束照射某接收面时，面上照度不仅与发光点到该面中心的距离有关，还与接收面法线与中心光线之间的夹角有关。设光源强度为 I ，受光面照度 E 如图4-115(a)所示时为 $E=I/L^2$ ；如图4-115(b)所示时为 $E=I\cos\alpha/L^2$ 。可见接收面照度与入射角的余弦成正比。如果探测器能将不同角度的入射通量全部接收，那么就必然符合余弦规律。但大多数探测器表面，以及因工作需要，在探测器前附加的各种校正器均具有光洁的表面。

(1) 照度测量中探测器的余弦修正



(a) 光束垂直接收面



(b) 光束与接收面成 α 角

图4-115 照度的余弦修正

3. 产生特殊角度响应度分布的浸射体

(1) 照度测量中探测器的余弦修正

下面是一些余弦修正的方案。图4-116所示为采用乳白玻璃的修正器,图4-117(a)、(b)、(c)中,给出了三种利用积分球构成余弦修正器的方案。

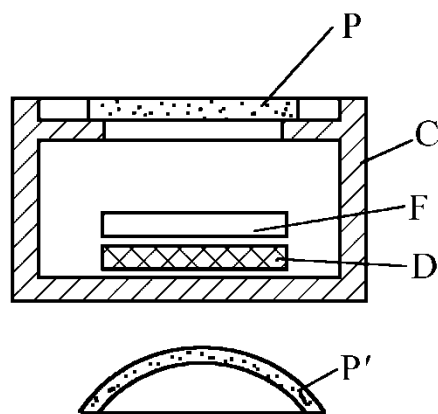


图4-116 乳白玻璃修正器

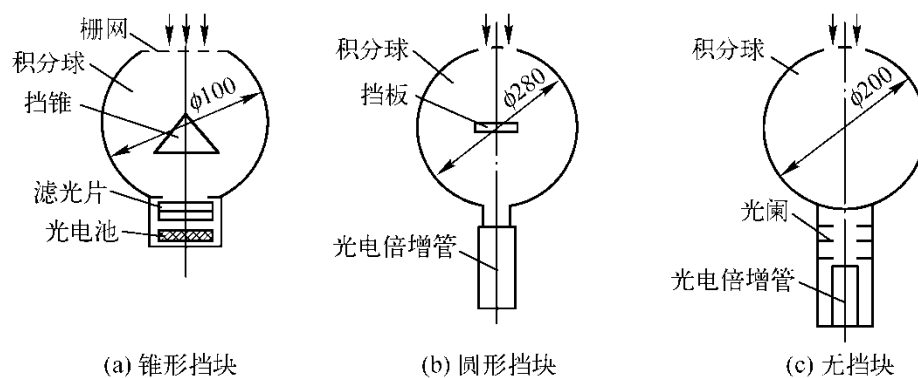


图4-117 利用积分球进行余弦修正

对于扩展光源来说，产生总误差的计算还与面光源的亮度分布 $L(\alpha, \beta)$ 有关。其中 α 是入射角， β 是从参考入射面算起，各入射面的方位角。利用具有 $\varepsilon_1(\alpha)$ 相对偏差的探测器测量时，所产生的总误差 ε_2 由下式给出

$$\varepsilon_2(\alpha) = \frac{\int \varepsilon_1(\alpha) \cdot L(\alpha, \beta) \cos \alpha d\Omega}{\int L(\alpha, \beta) \cos \alpha d\Omega}$$

对半球天空,当 $L(\alpha, \beta) = L(\alpha)$ ，即与 β 无关时，有

$$\varepsilon_2 = \frac{\int \varepsilon_1(\alpha) L(\alpha) \sin 2\alpha d\alpha}{\int L(\alpha) \sin 2\alpha d\alpha}$$

当天空扩展源亮度不变时， $L(\alpha) = \text{const}$ ， $\int_0^{90^\circ} \sin 2\alpha d\alpha = 1$ 有

$$\varepsilon_2 = \int_0^{85^\circ} \varepsilon_1(\alpha) \sin 2\alpha d\alpha$$

当天空为多云时，

$$L(\alpha) = \frac{1}{3} [L(0)(1 + 2\cos \alpha)]$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\int \varepsilon_1(\alpha) (1 + 2\cos \alpha) \sin 2\alpha d\alpha}{\int (1 + 2\cos \alpha) \sin 2\alpha d\alpha}$$

(2) 标量辐射照度的测量

所谓标量照度是用以标定来自全方位进入某小体积的总通量，也就是说用相等的权，积分来自 4π 立体角中的通量，所以又称球形照度。如图4—118所示为标量照度计的典型结构。

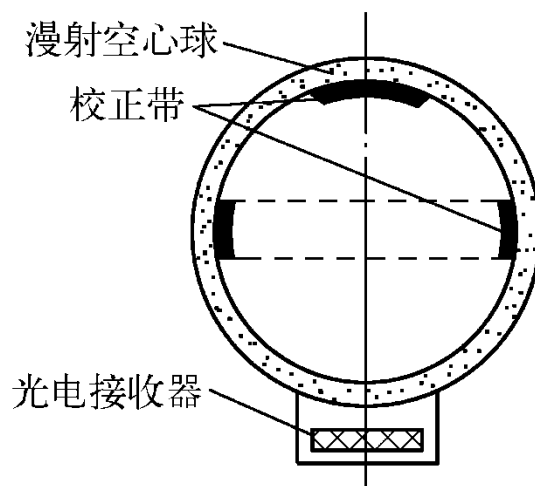


图4-118 标量照度计

1. 光谱校正的主要应用

(1) 光源发光光谱的校正

这里主要是指热光源，其光谱分布与黑体类似，呈不对称的钟形分布，短波截止较快，长波延伸较长。作为发光光谱校正的一个例子是高色温光源的获得。一般白炽灯的色温约在2200—3000K之间，当要求色温在3000K或4000K以上时，要求灯丝温度很高，一般难以实现。通过附加校正滤光片，可满足这一要求，如图4-119所示。

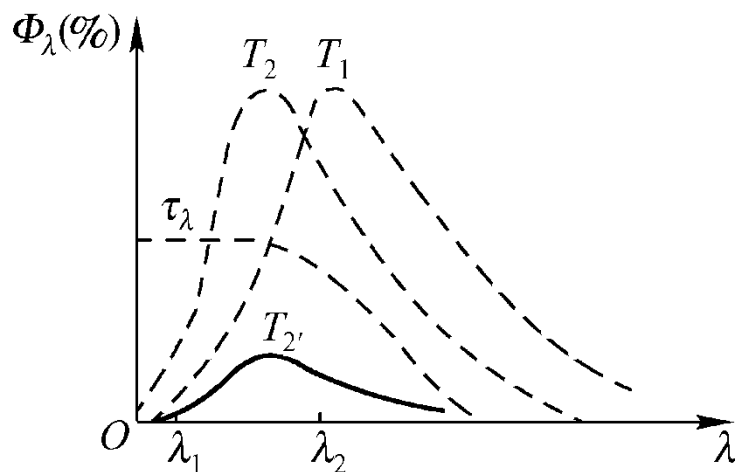


图4-119 发光光谱的校正

作为发光光谱校正的另一个例子是使光谱均匀化。用白炽灯作为光学过程光谱特性测量的光源时，各波长发出的通量相差很大，这就要求光电探测器、电子线路和显示器等都有很宽的线性工作范围，有时很难做到。为解决这一矛盾、可采用如图4-120所示的光谱校正方法。

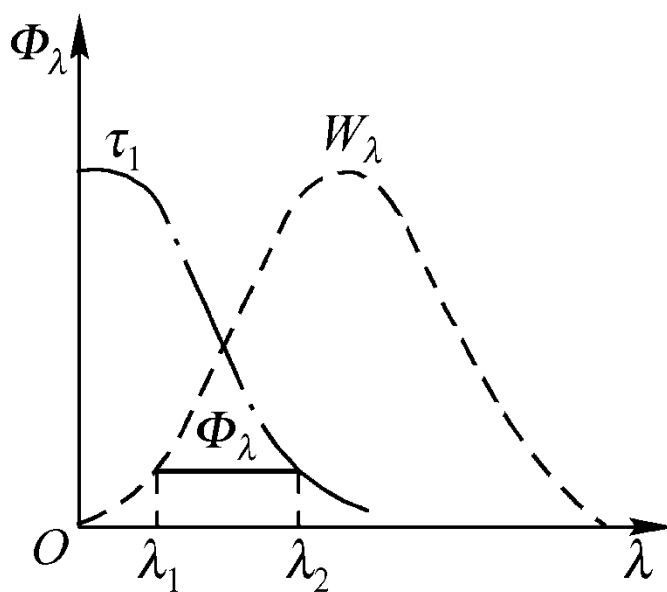


图4-120 光谱校平

(2) 光电器件视见函数的校正

在用光电器件代替人眼进行光度测量时，由于探测器光谱特性与人眼视见函数之间的差异，与待测光源间将有不同的光谱匹配系数，将造成光度测量的误差。为此，必须将所用探测器经光谱校正，获得尽可能与视见函数一致的光谱特性，如图4-121所示。

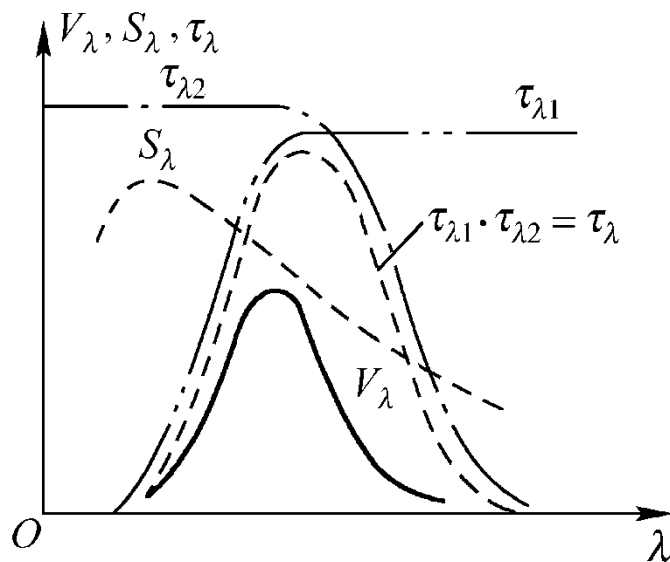


图4-121 视见函数的校正

(3) 模仿非选择性探测器

在有些光度量检测中，如测定通量，采用非选择性探测器测量就很方便。但是，常用的非选择性热电探测器存在着反应慢和灵敏度低的缺点，为此，可采用光电探测器，但必须对其光谱特性进行校正，使之在规定光谱范围内，成为灵敏度较高的非选择性探测器。

(4) 光子探测器的光谱校正

在许多光生物化学的过程中，所需测定的不是光的通量，而是光的量子数。非选择性探测器可直接测定入射光辐射的通量，而要使它的输出信号与入射光子数成正比，则应将探测器光谱特性校正成光子型特性。所谓光子型光谱曲线是指它的光谱灵敏度按光子能量的倒数，不同波长 λ 所对应的光子能量 ε_λ 为

$$\varepsilon_\lambda = \frac{hc}{\lambda}$$

可见，光辐射通量相等而波长不同时，短波对应的光子数少,而长波对应的光子数多。因此，光子型光谱特性应按图4-122所示的实线进行校正。由于实际校正中的困难，如能按虚线进行校正也就可以了。

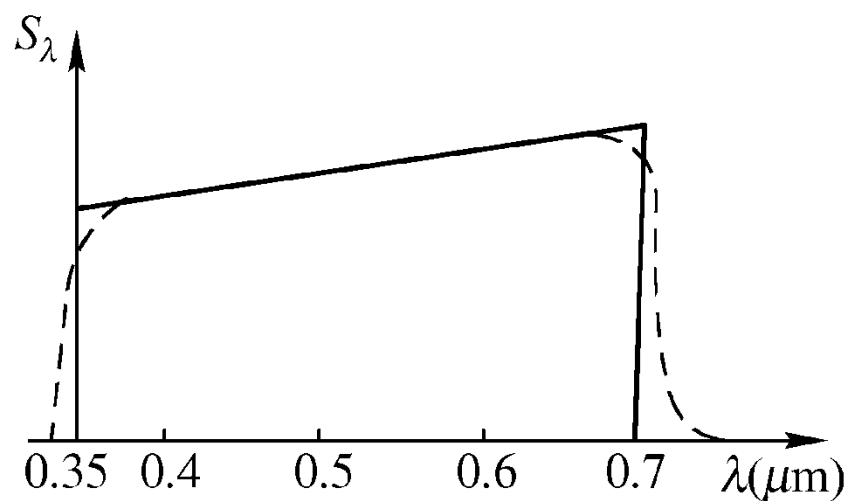


图4-122 光子型光谱曲线

2. 光谱校正的评价

(1)均方根偏差

$$G_1 = \left\{ \int [T(\lambda) - A(\lambda)]^2 d\lambda \right\}^{\frac{1}{2}}$$

(2)相对均方根偏差

$$G_2 = \left\{ \int [t(\lambda) - a(\lambda)]^2 d\lambda \right\}^{\frac{1}{2}} / \int t(\lambda) d\lambda$$

(3)相对偏差

$$G = \frac{\int |t(\lambda) - a(\lambda)| d\lambda}{\int t(\lambda) d\lambda}$$

(4)与相对响应度有关的评价

$$a(Z) = \frac{\left[\int Z(\lambda) a(\lambda) d\lambda \right] \left[\int S(\lambda) t(\lambda) d\lambda \right]}{\left[\int Z(\lambda) t(\lambda) d\lambda \right] \left[\int S(\lambda) a(\lambda) d\lambda \right]}$$

3. 光谱校正技术

(1) 均匀滤光片法

①适当滤光片的组合，它是由多片光谱透射比函数为 $\tau_i(\lambda)$ 的有色玻璃或明胶滤光片串联堆积而成，其组合光谱透射比 $\tau_c(\lambda)$ 为

$$\tau_c(\lambda) = \tau_1(\lambda) \cdot \tau_2(\lambda) \cdots \tau_i(\lambda) \cdots \tau_n(\lambda)$$

②干涉滤光片，用于校正光谱响应特性的干涉滤光片，应预先按透射比光谱特性的需要进行膜系设计，然后制造。

③特殊熔料的玻璃滤光片。利用着色氧化物(CuO 、 CoO 、 NiO 等)掺杂到多种玻璃(硅酸盐、硼酸盐、磷酸盐和硫化物)中，可制成光谱按钟形分布的滤光片，用以拟合 V_λ 曲线。当改变合成物时，可制成完整的带通系列滤光片，其峰值波长可由 $0.40\mu\text{m}$ 变至 $0.75\mu\text{m}$ 。

④液体染料的混合，利用预定的几种染料，按计算的比例混合而成。

⑤发光材料与滤光片的组合，这里的发光材料用来实现光谱转换，通常是将短波光转变为长波光。利用该组合构成某些特殊函数。

(2) 镶嵌滤光片法

在利用滤光片作光谱校正时，其排列既可按图4-125(a)所示的形式，也可按图中(b)的形式。

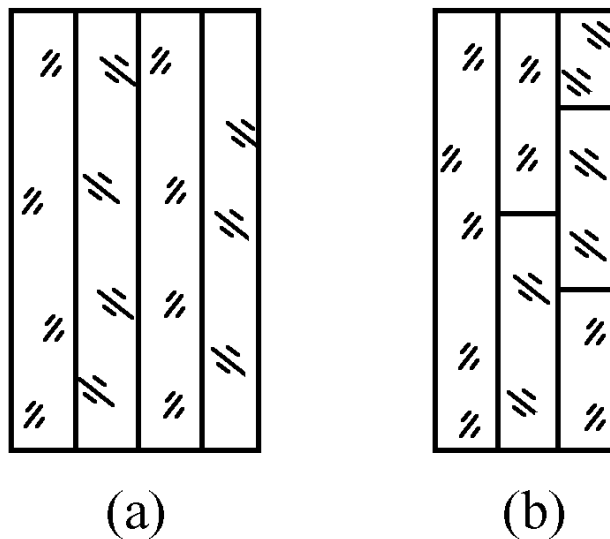


图4-124 光谱校正滤光片的排列

用紫通和红通两块滤光片按图4-126(b)所示排列，可得到如图4-126(a)中粗实线光谱校正的效果。使用时可改变两滤光片的位置，使输出光谱曲线发生变化。左移则长波增多，短波减少；反之亦然。如在两滤光片间留一缝，则光谱曲线中间增高。

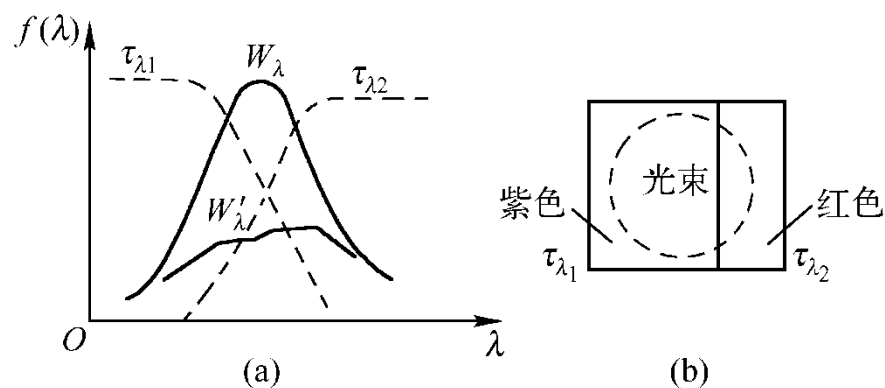


图4-126 光谱校正实例

(3) 光谱的模板法校正

该方法的基本原理如图4-127所示:

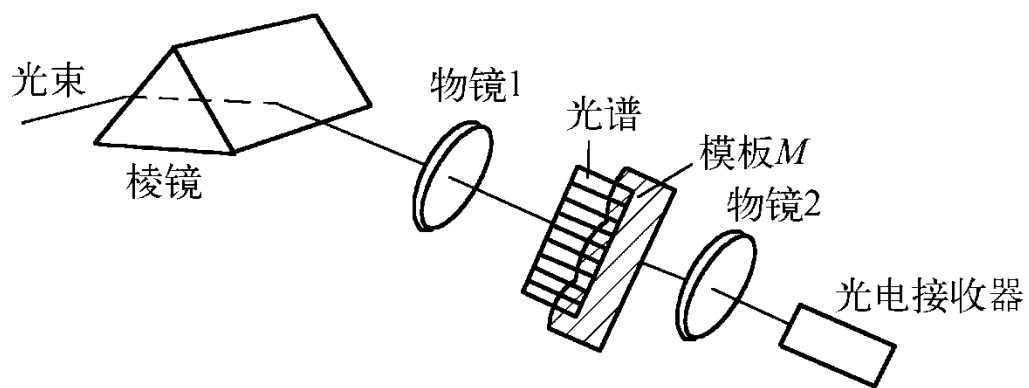


图4-127 光谱模板校正法