

光电检测技术与应用知识点整理

(标黄处是老师给出的往年真题对应的知识点)

一、绪论

1、信息技术

(1) 研究内容：信息的产生和获取、转换、传输、控制、存储、处理、显示

(2) 分类：微电子信息技术（电集成）、光子信息技术（光集成）、光电信息技术（光电集成）

2、光电信息技术

(1) 定义：简称光电技术，是光学和电子学结合而产生出来的一门技术学科，主要研究光与电之间的转换及其应用技术。

(2) 特点：

(i) 光学技术的快速、非接触、灵敏度和精度高等优点。

(ii) 电子技术的成熟和方便等优点。

(3) 优点：

(i) 有广泛的适用范围

能获取和处理各种光学信息以及可以转换为光信息的非光学参量，包括探测机构内部或危险环境下的工作参量。

(2) 有较高的信号检测能力

能进行远距离、非接触、快速、高灵敏度的检测和传输；检测所需的输入能量几乎不影响被测物的能量状态；检测信噪比高，信息容量大，传输能力强。

(3) 有较强的信息运算能力

可进行复杂信息的并行处理和多种形式的数学运算；运算速度快，空间互连效率高，抗干扰能力强，信号变换灵活。

光学辐射包括紫外线、可见光和红外线，如图 1 所示：

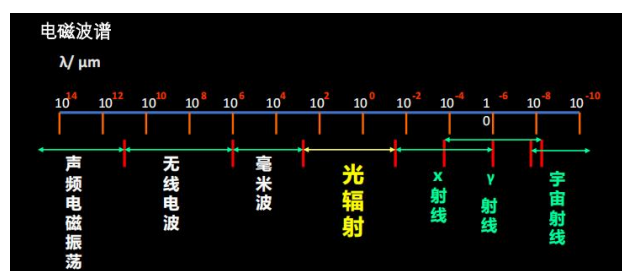


图 1

频率和波长范围如图 2 所示:

光谱 — 紫外 → 可见光 → 红外			
光波	波长 10nm-1mm		频率 $10^{16} \sim 3 \times 10^{11}$
光	紫外	可见光	红外(近、中、远)
波长	100-380nm	380-780nm	780nm-1mm

图 2

3、光电检测技术

光电信息技术的主要技术之一。在光电转换技术的基础上, 利用光电传感器实现各类检测、研究光信息的获取、测量及相关光电处理技术。

(1) **基础:** 光电子学

(2) **核心:** 光学变换、光电转换

①**光学变换:** 通过光与被测物体相互作用, 将带测量加载到光信号中。其本质是光调制 (强度、相位、频率、偏振等) 。

②**光电转换:** 光学变换后, 携带带测量的光信息, 由光电检测器件, 转换为电能。

③**光电器件:** 能实现光电相互转换功能的器件, 即能够发射或接收某种电磁辐射 (光学辐射) 的电子器件。

4、光电检测与光电传感器概念

检测是通过一定的物理方式分辨出被测参数量并归属到某一范围, 以此来判别被测参数是否合格或参数量是否存在的过程。

(1) **测量方法**

(i) **直接测量:** 对仪表读数不经任何运算, 直接得出被测量的数值。

例如: 测长度用直尺、游标卡尺、千分尺; 测电压用万用表

(ii) **间接测量:** 测量几个与被测量相关的物理量, 通过函数关系式计算被测量。

例如: 测电功率: $P = I * V$ (电流/电压)

(2) **光电传感器与敏感器**

①**传感器:** 非电量与电量系统间的接口, 检测系统中用以完成检测获取电信号功能的单元, 从功能上讲, 传感器通常由敏感元件、转换元件及转换电路组成。

②**敏感器:** 在完成非电量到电量的变换时, 并非所有的非电量都能直接转换成电量, 往往是先变换为另一种易于变成电量的非电量, 然后再转换成电量。

按转换元件的能量转换方式, 传感器可分为有源型和无源型:

有源型也称能量控制型，依靠电源把非电量变成电参数。如磁电式、压电式、光电阻、热电偶等。

无源型也称能量转换型，把非电量变成直接变成电量。如电压量、电流、电荷量等

5、光电检测系统的组成及特点

(1) 定义：通过光电检测技术，将所有被研究的信息都将通过各种效应（机、热、声、电、磁）调制到光载波上，然后将携带被研究的信息光载波转换为电信号，并通过电子线路和计算机的综合处理，实现光学仪器的自动化。

所谓光电检测，指的是对光信号的调制变换和接收解调两个主要方面。包括光学变换和光电转换这两个核心部分。如图 3 所示：

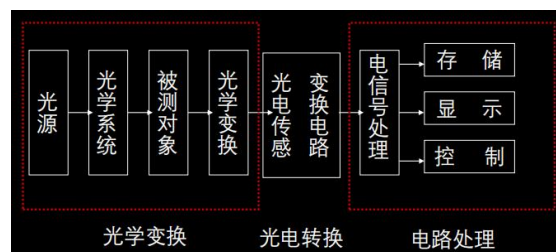


图 3

(2) 特点：

(i) 光学变换：快速，高精度，非接触，无损

(ii) 光电转换

(iii) 电路处理：技术成熟

6、光电检测技术的特点

①高精度：从地球到月球激光测距的精度达到 1 米。

②高速度：光速是最快的。

③远距离、大量程：遥控、遥测和遥感。

④非接触式检测：不改变被测物体性质的条件下进行测量。

⑤寿命长：光电检测中通常无机械运动部分，故测量装置寿命长，工作可靠、准确度高，对被测物无形状和大小要求。

⑥数字化和智能化：有很强的信息处理、运算和控制能力。

但成本高,操作复杂,对环境要求苛刻等

二、光电检测器件工作原理及特性

光电效应应按部位不同分为内光电效应和外光电效应,内光电效应包括光电导和光生伏特效应。

其中较为重要的是内光电效应。

1、内光电效应

在光线作用下,对于半导体材料吸收了入射光子能量,若光子能量大于或等于半导体材料的禁带宽度,就激发出电子-空穴对,使载流子浓度增加,半导体的导电性增加,阻值减低,这种现象称为光电导效应。

光敏电阻就是基于这种效应的光电器件。

(1) **本征光电导**: 只有光子能量 $h\nu$ 大于材料禁带宽度 E_g 的入射光,才能激发电子空穴对,使材料产生光电导效应:

$$h\nu > E_g$$

本征光电导材料的截止波长为:

$$\lambda_0 = \frac{h\nu}{E_g}$$

(2) 光电导弛豫过程

光电导材料从光照开始到获得稳定的光电流是要经过一定时间的;光照停止后光电流也是逐渐消失的。这些现象称为弛豫过程或惰性。

下图 4 为光电导体受矩形脉冲光照时,载流子浓度变化的情况:

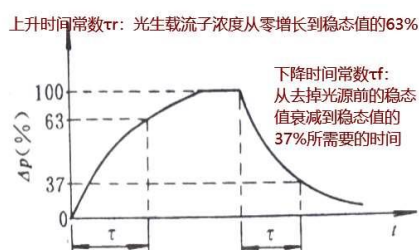


图 4

(3) 光电导增益

光电导增益是外部光电流与内部光电流之比。其计算表达式如下:

$$M = \frac{\tau}{t_{dr}}$$

M 为光电导增益； τ 为器件的时间响应（载流子寿命）； t_{dr} 为载流子在两极间的渡越时间

一般光敏面尽可能大，提高光电灵敏度；两极间距离尽可能小，以提高带宽。

如图 5 所示：

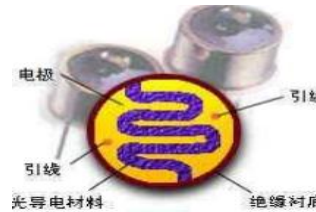


图 5

2、光生伏特效应

光生伏特效应是指当光照射到某些金属表面时，金属中的电子被光子激发并从金属表面释放出来的现象。

① 光照前：热平衡

②光照后：

(i)光生少子漂移电流大于光生多子扩散电流；

(ii)开路时：内建电场被消弱，光生少子的漂移电流减小，光生多子扩散电流增加，最终达到新的平衡（光生少子的漂移电流=光生多子的扩散电流）；

短路时，光电流=光生少子漂移电流-光生多子扩散电流 \approx 光生少子漂移电流，并构成回路；加负载并构成回路时，内建电场被消弱，并有回路电流（介于前二者之间）。

重要公式如图 6 所示：

① 开路电压： $V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I_p}{I_s} + 1\right)$ (

可见 V_{oc} 与 I_p 为非线性关系。如果负载接入外回路，电流为 I ，则 PN 结两端的电压为

② $V = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I_p - I}{I_s} + 1\right)$ (

③ 如果 PN 结短路，则 $V=0$ ，求得短路电流就是光生电流，即

I_{sc} 为短路电流 $I_{sc} = I_p$ I_p 为光生电流 (

在没有光照时， $I_p=0$ ，外加正向电压为 V 时，有

④ 总电流=暗电流 $I = I_s \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right)$ I_s 为 PN 结饱和电流 (

图 6

3、光热效应

某些物质在受到光照后，温度变化造成材料性质发生变化。

(1) 热释电效应

热释电效应指的就是某些晶体的电极化强度随温度的变化而释放表面吸附的部分电荷（引起表面电荷变化）。

当红外辐射照射到已有自发极化强度的热释电晶体上时，引起晶体的温度升高，而导致表面电荷减少，这相当于“释放”了一部分电荷，释放的电荷可以用放大器转变成输出电压。

如果红外辐射继续照射使晶体的温度升高到新的平衡值，那这时候表面电荷也就达到新的平衡浓度，不再释放电荷，即不再有输出信号。

(2) 辐射热计效应

热敏电阻的物理过程是吸收辐射，产生温升，从而引起材料电阻的变化。

对于由半导体材料制成的热敏电阻可定性地解释为：吸收辐射后，材料中电子的动能和晶格的振动能都有增加。

因此，其中部分电子能够从价带（基态）跃迁到导带（激发态）成为自由电子，从而使电阻减小，电阻温度系数是负的。（阻值和温度负相关）

(3) 温差电效应

由两种不同的导体材料构成的接点，在接点处可产生电动势。这个电动势的大小和方向与该接点处两种不同的导体材料的性质和两接点处的温差有关。

如果把这两种不同的导体材料接成回路，当两个接头处温度不同时，回路中即产生电流，此现象称为温差电效应。

4、光电检测器件的特性参数

(1) 响应度(灵敏度)

是光电探测器输出信号与输入光功率之间关系的度量。

- 响应度表示光电探测器件的光电转换效率
- 响应度与外加偏压、载流子寿命和器件长度有关
- 响应度是随入射光波长变化而变化的
- 响应度分电压响应率和电流响应率

(2) 频率响应:

光电探测器的响应随入射光的调制频率 而变化的特性利用 RC 电路 UC 推导。

光电探测器信号产生和消失存在着一个滞后过程，所以入射光的调制频率，对光电探测器的响应会有较大的影响。

(3) 线性度

线性度是描述光电探测器输出信号与输入信号保持线性关系的程度。在某一范围内探测器的响应度是常数，称这个范围为线性区。

(4) 温度特性

一般，光谱特性主要决定于材料：材料的禁带宽度越窄则对长波越敏感；但禁带很窄时，半导体中热激发也会使自由载流子浓度增加，使复合运动加快，灵敏度降低，响应峰值波长向短波方向移动。

光敏电阻的允许功耗,随着环境温度的升高而降低。因此，采取冷却灵敏面的办法来提高灵敏度往往是很有有效的。

(5) 噪声

光电探测器的噪声可大致分为散粒噪声、热噪声和低频噪声三类。

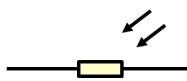
信噪比: S/N

三、半导体光电检测器件及应用

半导体对光的吸收可分为本征吸收、杂质吸收和自由载流子吸收。(书 P20)

1、光敏电阻(本征吸收、杂质吸收改变电导率)

(1) 定义：利用光电导效应制作的光电器件。

(2) 符号：

(3) 原理：光电导效应

无光照时，半导体导电率很低，暗电阻很大。

有光照时，导电率增加，亮电阻小，在外加电压作用下，将在光电导探测器的输出回路中产生光电流或者光电压。

(4) 材料：主要有 Si、Ge、II-VI 族和 III-V 族化合物，及某些有机材料

(5) 特点

- ① 光谱响应范围宽（特别是对于红光和红外辐射）：
- ② 有的灵敏域可达红外区域或远红外区域。
- ③ 光谱特性取决于材料(的能级结构)，且与温度有关。
- ④ 偏置电压低，工作电流大，可达几个 mA；
- ⑤ 所测的光电强度动态范围宽，既可测强光，也可测弱光；
- ⑥ 光电导增益大，可以等于 1，灵敏度高；
- ⑦ 结构简单，使用方便，无极性之分。

(6) 缺点

- ① 主要是多子导电，光电弛豫时间较长，频率特性较差。
- ② 响应速度慢，频率响应范围较窄，一般仅为几兆 Hz。
- ③ 价电子数量有限，强光下，光电线性度差。
- ④ 温度特性复杂，不宜高温使用：温度升高时，其灵敏度明显下降。

(7) 特性参数

(I) 光电特性：光电流与入射光照度的关系

$$I_{\text{光}} = S_g E^\gamma U^\alpha$$

γ 与材料的入射光强弱有关。对于硫化镉光电导体：

- (i) 弱光时， $\gamma=1$ ，光电流与照度成线性关系；
- (ii) 强光时， $\gamma=0.5$ ，光电流与照度成抛物线（线性变差）

(II) 伏安特性：在一定的光照下，光敏电阻的光电流与所加的电压关系

光敏电阻是一个纯电阻，因此符合欧姆定律，其伏安特性曲线为直线，不同光照度对应不同直线。如图 7 所示：

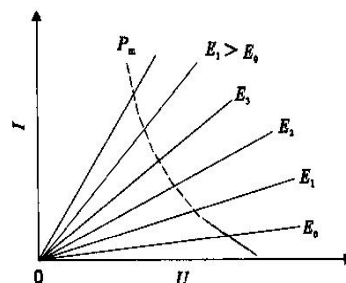


图 7 光敏电阻的伏安特性曲线

(III) 频率特性：

光敏电阻时间常数比较大，其上限截止频率低。只有 PbS 光敏电阻的频率特性

稍好些，可工作到几千赫。

(IV) **时间响应**：光敏电阻的时间响应特性较差，要经过一定时间才能稳定。

(V) **温度特性**：光敏电阻是多子导电，温度特性复杂。

温度升高，光敏电阻的暗电阻和灵敏度都下降，温度变化影响光谱特性曲线：

① $T \uparrow \rightarrow$ 热激发的自由电子和空穴浓度（暗电导，暗电流） $\uparrow \rightarrow$ 光生载流子被复合的几率 $\uparrow \rightarrow$ 光生载流子浓度 $\downarrow \rightarrow$ 光电流 $\downarrow \rightarrow$ 光电流灵敏度 \downarrow 。

② $T \uparrow \rightarrow$ 热激发的自由电子和空穴浓度 $\uparrow \rightarrow$ 亮电流 \uparrow 。

例如：硫化铅光敏电阻，随着温度的升高光谱响应的峰值将向短波方向移动。尤其是红外探测器要采取制冷措施。如图 8 所示：

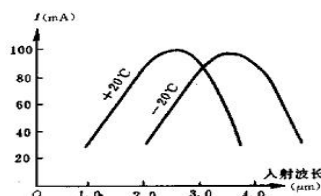


图 8 硫化铅光敏电阻的光谱温度特性

(8) 光敏电阻的应用

(I) 火焰探测报警器

其电路图如图 9 所示：

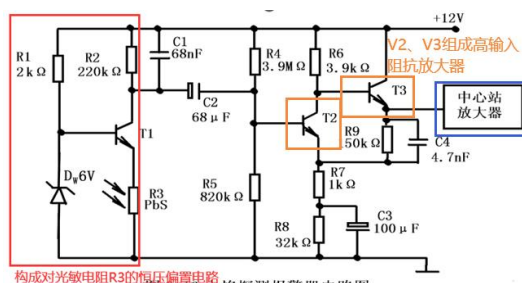


图 9

(II) 照相机电子快门

其电路图如图 10 所示：

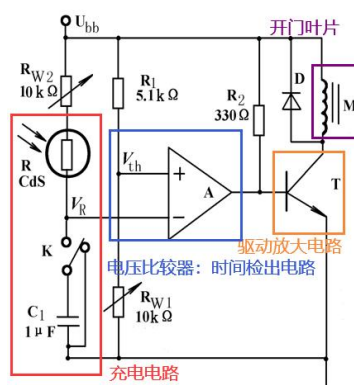


图 10

(III) 照明灯的光电控制电路

其电路图如图 11 所示：

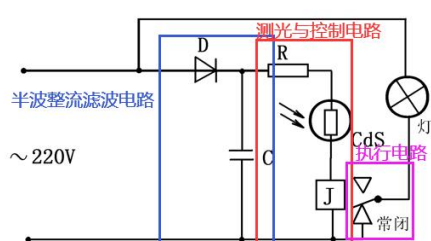


图 11

2、光生伏特器件

(1) 定义：利用半导体 PN 结的光生伏特效应的器件

(2) 原理

当用适当波长的光照射 PN 结时，光生载流子（电子 N 区，空穴 P 区），在 PN 结的建电场的作用下向相反方向运动（电子 N 区，空穴 P 区），在 PN 结的两端形成光生电动势，相当于 PN 结上加一个正电压。如将 PN 结短路，则会出现电流（光生电流）。

(3) 分类

光电池、光电二极管、光电晶体管、光电场效应管、PIN 管、雪崩光电二极管、光可控硅、阵列式光电器件、象限式光电器件、位置敏感探测器（PSD）、光电耦合器件等

(4) 特点

暗电流小，噪声低，响应速度快，光电特性线性度好，受温度影响小。但，弱信号检测能力和光谱响应范围不如光电导器件。

(I) 光电池

光电池是一种不需加偏压(零偏压)就能把光能转换成电能的结型光电器件,其基本结构就是一个P-N结。

(i) 结构特点:

- 光电池核心部分是个PN结,一般为面积大的薄片状,来接收更多入射光。
- 在N型硅片上扩散P型杂质(如硼),受光面是P型层;或在P型硅片上扩散N型杂质(如磷),受光面是N型层。
- 受光面有二氧化硅抗反射膜,起到增透作用和保护作用。
- 上电极做成栅状,为了更多的光入射。
- 因光子入射深度有限,为使光照到PN结上,实际光电池制成薄P型/N型。

因PN结材料不同,可分为硒光电池、硅光电池、砷化镓光电池和锗光电池。

(ii) 光电池等效电路

光电池等效电路如图12所示:

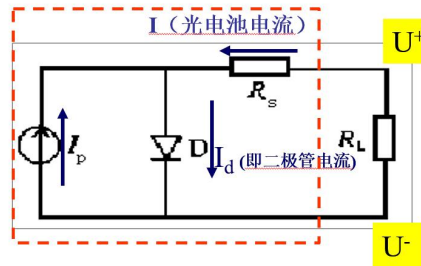


图 12

$$I_L = I_p - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q}{kT} (U - I_L R_s) \right] - 1 \right\}$$

I_p 为光电池等效电路中的恒流源, I_0 为光电池等效二极管反向饱和电流, q 为电子电荷量, U 为光电池输出电压

R_s 为光电池等效电路中串联电阻, R_s 很小, 可以忽略: $I_L = I_p - I_0 \left[\exp \left(\frac{qU}{kT} \right) - 1 \right]$

有:

$$\text{当 } I = 0, \text{ 得到开路电压 } U_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_p}{I_0} + 1 \right) \approx \frac{kT}{q} \ln \frac{I_p}{I_0} = \frac{kT}{q} \ln \frac{S_L E}{I_0}$$

开路电压与入射光强度的对数成正比

当 $U = 0$, 得到短路电流 $I_{sc} = I_p$, I_{sc} 与入射光强度成正比

(iii) 光电池的特性

① 伏安特性

无光照时, 光电池伏安特性曲线与普通半导体二极管相同; 有光照时, 沿电

流轴方向平移，平移幅度与光照度成正比。

曲线与电压轴交点称为开路电压 V_{OC} ，与电流轴交点称为短路电流 I_{SC} 。

反向电流（光电流）随光照度的增加而上升，如图 13 所示：

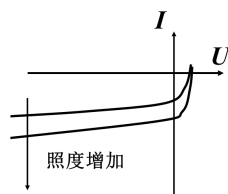


图 13

② 温度特性

随着温度的上升，硅光电池的光谱响应向长波方向移动，开路电压下降，短路电流上升。光电池做探测器件时，测量仪器应考虑温度的漂移，要进行补偿。

③ 光谱响应度

硅光电池：响应波长 0.4-1.1 微米，峰值波长 0.8-0.9 微米。

硒光电池：响应波长 0.34-0.75 微米，峰值波长 0.54 微米。

如图 14 所示：

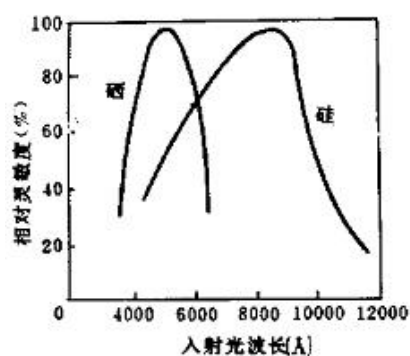


图 14

(iv) 光电池的应用

① 光电探测器件：利用光电池做探测器有频率响应高，光电流随光照度线性变化等特点。

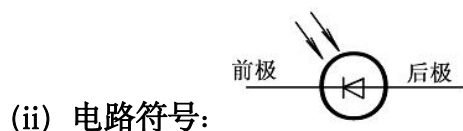
② 将太阳能转化为电能：实际应用中，把硅光电池经串联、并联组成电池组。

(II) 光敏二极管

(i) 结构：光敏二极管与普通二极管一样有一个 PN 结，属于单向导电性的非线性元件。

外形不同之处是在光电二极管的外壳上有一个透明的窗口以接收光照射，实

现光电转换。为了获得尽可能大的光生电流，需要较大的工作面，即 PN 结面积比普通二极管大得多，以扩散层作为它的受光面。为了提高光电转换能力，PN 结的深度较普通二极管浅。



2DU 型硅光电二极管的基本结构如图 15 (a) 所示；工作原理如图 15 (b) 所示：

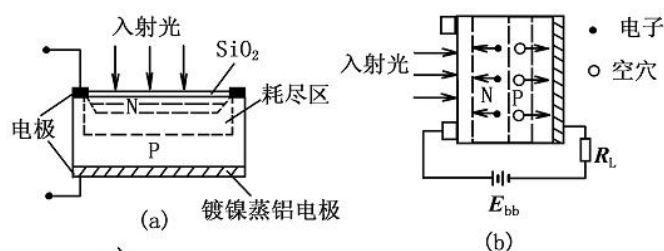


图 15

国产光电二极管按衬底材料的导电类型不同可分为两种结构形式：以 P 型硅为衬底的 2DU 型以及以 N 型硅为衬底的 2CU 型。

2CU 系列光电二极管只有两个引出线，而 2DU 系列光电二极管有三条引出线，除了前极、后极外，还设了一个环极（目的：减少暗电流和噪声）。

(iii) 特点：

与光电池相比，主要有如下不同：

➤ 基底材料的掺杂浓度不同

光电池为 $10^{16} \sim 10^{19}$ 个/cm³；硅光电二极管约为 $10^{12} \sim 10^{13}$ 个/cm³。

➤ 电阻率不同

光电池约为 $0.1 \sim 0.01 \Omega/\text{cm}$ ；硅光电二极管 $1000 \Omega/\text{cm}$ 。

➤ 偏置电压不同

光电池通常在零偏置下工作，硅光电二极管在反向偏压下工作。

➤ 输出电流强度（光电流灵敏度、带宽）不同

光电池受光面积比光电二极管大很多，因此光电二极管的光电流很小，一般为微安级。

(iv) 主要特性

① 伏安特性

由电流方程可以得到光电二极管在不同偏置电压下的输出特性曲线图 16

(a)。光电二极管的工作区域应在图的第 3 象限与第 4 象限。

用重新定义电流与电压正方向的方法（以 PN 结内建电场的方向为正向）把特性曲线旋转成如图 16 (b) 所示。

因开路电压相比外加反压小很多，可略去不计，常用曲线为图 16 (c)。

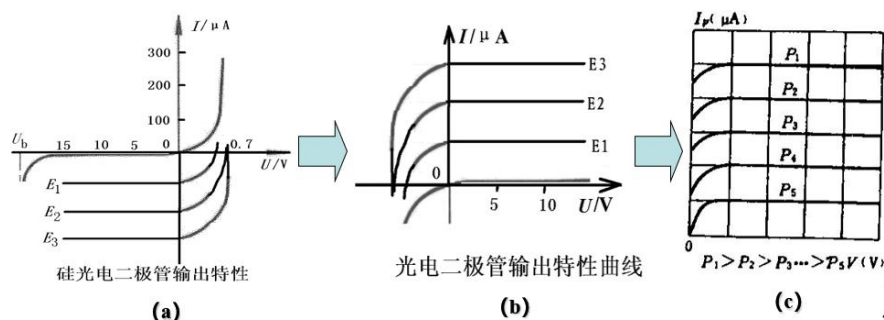


图 16

低偏压时：光电流变化非常敏感，这是由于反偏压增加使耗尽层加宽，结电场增强，所以对结区的光的吸收率及光生载流子的收集效率加大；

高偏压时：收集已达极限，光电流趋于饱和，曲线近似平直，且低照度部分比较均匀，可用作线性测量。

② 光谱特性

以等功率的不同单色辐射波长的光作用于光电二极管时，其电流灵敏度与波长的关系。典型光生伏特器件的光谱响应如图 17 所示：

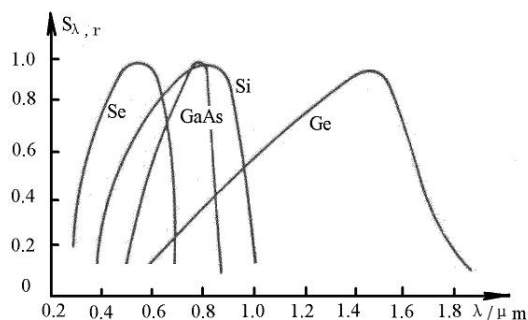


图 17

典型硅光电二极管光谱响应长波限为 $1.1\mu\text{m}$ 左右，短波限接近 $0.4\mu\text{m}$ ，峰值响应波长为 $0.9\mu\text{m}$ 左右，与硅光电池相同。

③ 温度特性

由于反向饱和电流对温度的强烈依赖性, 光敏二极管的暗电流对温度的变化十分敏感。

(III) 光敏三极管

光敏三极管是在光敏二极管的基础上发展起来的, 它和普通晶体三极管相似——具有电流放大的作用。

集电极电流受光通量的控制, 制作材料多为半导体硅; 外形由光窗、集电极和发射极的引出脚等组成。如图 18 所示:

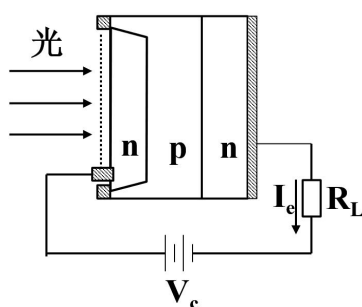


图 18

光敏三极管的光电特性不如光敏二极管, 但灵敏度高, 电流达 mA 级。

(i) 工作原理:

两个过程: 光电转换和光电流放大。

光敏三极管工作时各电极所加的电压与普通晶体管相同, 即需要保证集电极反偏, 发射极正偏。由于集电极反偏, 在结区内有很强的内建电场, 内建电场的方向由 C 到 B, 与光敏二极管的工作原理相同。

光敏三极管的光电转换部分是在集基结区内进行的。在原理上完全可以把它看作一个由光敏二极管与普通晶体管结合而成的组合件。原理图如图 19 所示:

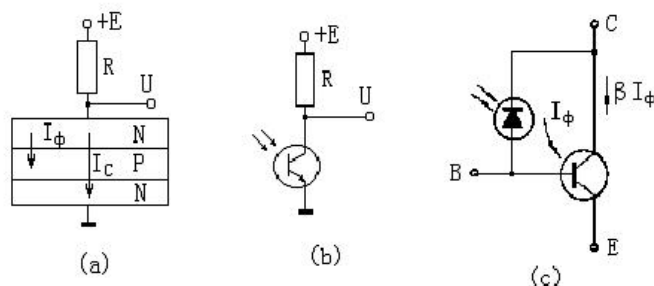


图 19

NPN 光电三极管 (3DU 型), 使用时光电二极管的发射极接电源负极, 集

电极接电源正极；不受光时，相当于普通三极管基极开路的状态。集电结(基—集结)处于反向偏置，基极电流等于 0，因而集电极电流很小，为光电三极管的暗电流。

当光子入射到集电结时，就会被吸收而产生电子—空穴对，处于反向偏置的集电结内建电场使电子漂移到集电极，空穴漂移到基极，形成光生电压，基极电位升高。

(ii) 主要特性

① 伏安特性

- 硅光电三极管的光电流在毫安量级，硅光电二极管的光电流在微安量级。
- 在零偏压时硅光电三极管没有光电流输出，但硅光电二极管有光电流输出。
- 工作电压较低时输出电流有非线性，硅光电三极管的非线性更严重。（因为放大倍数与工作电压有关）
- 在一定的偏压下，硅光电三极管的伏安曲线在低照度时间隔较均匀，在高照度时曲线越来越密

对比如图 20 所示（左图为硅光电二极管，右边为硅光电三极管）：

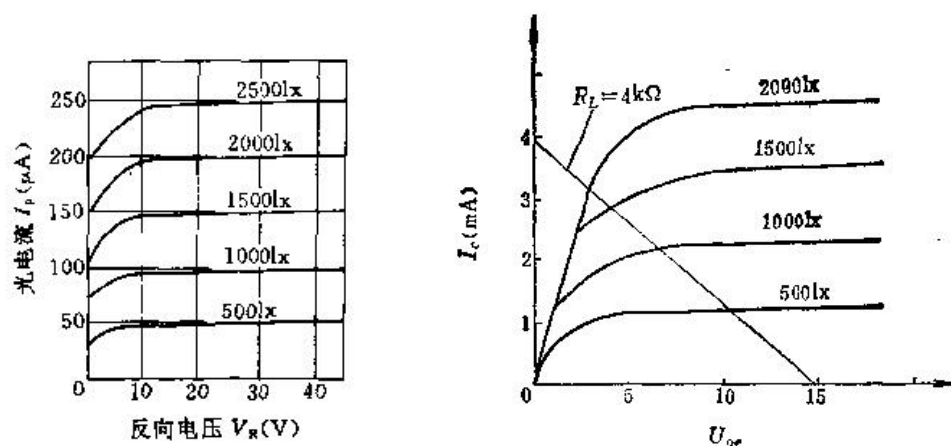


图 20

② 温度特性

温度特性反映了光敏三极管的暗电流及光电流与温度的关系。温度变化对光电流和暗电流都有影响，对暗电流的影响更大。

精密测量时，应采取温度补偿措施，否则将会导致输出误差。。光电三极管的光电流和暗电流受温度影响比光电二极管大得多

温度特性如图 21 所示:

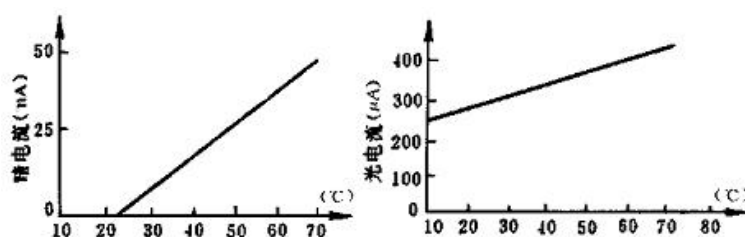


图 21

③ 频率特性

光敏三极管的频率特性受负载电阻的影响, 减小负载电阻可以提高频率响应。一般来说, 光敏三极管的频率响应比光敏二极管差。

对于锗管, 入射光的调制频率要求在 5000Hz 以下, 硅管的频率响应要比锗管好。

(iii) 应用: 施密特触发器, 适用于微弱信号的开关电路

(IV) 光电倍增管

(i) 原理: 光电子发射 (外光电效应) + 二次电子发射

如图 22 所示:

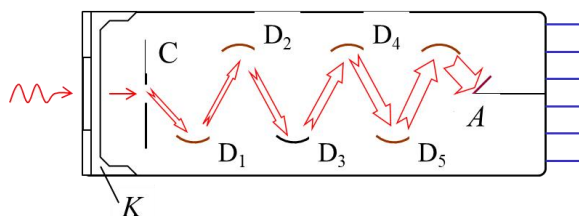


图 22

(ii) 结构: 光窗、光电阴极、电子光学系统、电子倍增系统、阳极。

(iii) 特性:

- 阴极灵敏度: $S_K = I_K / P$
- 阳极灵敏度: $S_A = I_A / P$ (1~100A/lm)
- 电流增益: $M = I_A / I_K = S_A / S_K$ ($10^5 \sim 10^8$)
- 光电特性: 宽范围内线性良好
- 暗电流: $I_d = 1 \sim 10 \text{ nA}$ (相当于入射光通量 $10^{-10} \sim 10^{-13} \text{ lm}$)
- 噪声: 光电阴极光电子发射的随机性; 各倍增极二次电子发射的随机性。

(iv) 应用: 光电倍增管可用来测量辐射光谱在狭窄波长范围内的辐射功率。

(V) 发光器件

分类如图 23 所示:

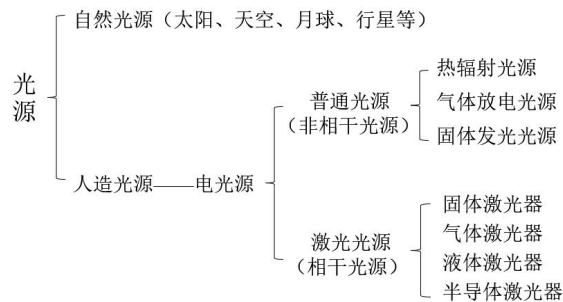


图 23

◆ 发光二极管

(i) 大多为 III-V 族化合物半导体材料 (GaP、GaN、GaAsP、GaAlAs 等)，有红、橙、黄、绿、蓝等颜色。

(ii) **特点:** 小而轻、耐震、寿命长(>5000h)、响应速度快、单色性好、直接电调制光强。

(iii) **缺点:** 发光效率低、有效发光面难以做大。

(iv) **应用:** 电子设备、仪器、仪表、家用电器等的指示灯，照明灯 (车灯、路灯)，用作光纤通信、传感等的光源。

◆ 激光器

(i) **基本结构:** 激光工作物质、泵浦源、谐振腔

基本结构如图 24 所示:

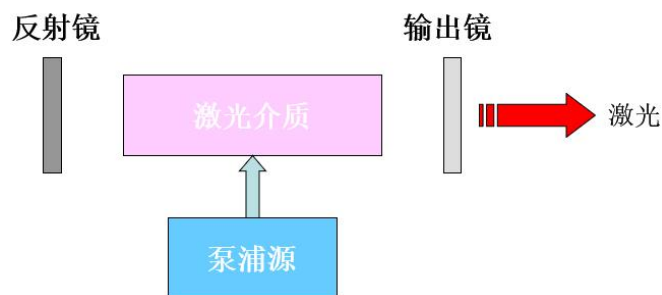


图 24

(ii) **基本原理:**

原子的能级结构: 基态、激发态、亚稳态

热平衡下处于各能级的原子数 (粒子数) 服从玻尔兹曼分布

由于能级跃迁 $E=E_2-E_1=h\nu$ ，光与原子相互作用的三个过程如图 25 所示:

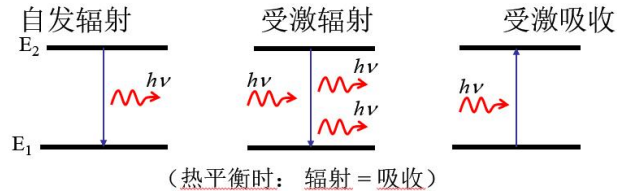


图 25

产生激光的基本条件：粒子数反转和光放大

(iii) 激光器的类型

➤ 按激活介质分：

气体 (He-Ne、 Ar^{3+} 、 CO_2 、 N_2 、准分子、铜蒸气、…)

液体 (染料，如若丹明、……)

固体 (红宝石、YAG、Nd 玻璃、钛宝石、…)

半导体 (GaAs、InGaAs、InGaAsP、…)

➤ 按激励方式分：

光泵、放电激励、电激励、热激励、化学激励、核激励等

➤ 按工作方式分：连续、脉冲

➤ 按工作波长分：红外光、可见光、紫外光、X 射线

➤ 按输出功率分：高、中、低（或者大、小等）功率

(iv) 激光器的特性参数

- 功率（平均 / 峰值），能量
- 波长，频率，线宽
- 脉冲宽度，重复频率
- 光斑直径，发散角，M – 平方因子
- 模式，波长可调谐性
- 稳定性（波长 / 频率 / 功率 / 能量 / 方向等），寿命，光电效率

(v) 激光器的应用

激光技术现已获得广泛的应用，几乎没有科学技术领域不感受到激光巨大魅力的影响。从物理、化学到天文、地理，从生物、医学到电子、计算机，从工业、农业到国防技术、社会生活，激光无处不在。

(VI) 光电耦合器件

光电耦合器是发光器件和光电器件组合的一种器件，它是以光作为媒介把输

入端的电信号耦合到输出端。

将发光器件 (LED) 和光敏器件 (光敏二、三极管) 紧密组装在一起, 密封在一个对外隔光的封装之内形成的一个电-光-电器件。如图 26 所示:

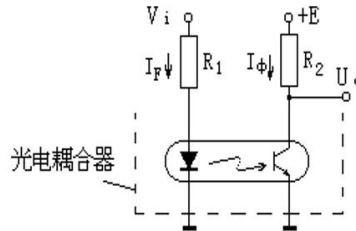


图 26

(i) **工作原理:** 发光器件与光接受器件封装一体, 但不接触, 有很强的电气绝缘性, 信号通过光传输。

(ii) **特点**

- 具有电隔离 ($10^{10} - 10^{12}$ 欧姆) 功能;
- 信号传输单向 (脉冲或直流), 适用于模拟 / 数字信号;
- 具有抗干扰和噪声能力;
- 响应速度快 (微 / 纳秒, 直流 - 10 兆赫兹), 体积小, 寿命长, 使用方便;
- 既有耦合特性, 又有隔离功能;

(iii) **特性参数**

重点: 光耦合器为什么能有效的抑制尖脉冲和各种噪声的干扰?

- 光耦合器件的输入阻抗很小 (正偏 PN 结的阻抗), 干扰电压在其上的分压也较小, 因此很难形成足够的能量使二极管发光;
- 光耦合器的输入电路和输出电路之间没有电气耦合, 也没有共地; 两者之间的分布电容极小, 而绝缘电阻又很大, 因此一边的各种干扰很难从光耦合器一边馈送到另一边;
- 光耦合器输入端的发光二极管的发光需要一定的能量, 而大多数的干扰信号即使有较高的幅值, 也没有足够的能量;
- 光耦合器具有很好的安全保障作用, 因为输入回路和输出回路之间可以承受几千伏的电压;
- 光耦合器的响应速度快, 响应延迟只有 10^{-8} s 左右;
- 使用调整灵活, 可实现补偿设计。

(iii) 应用:

- 代替脉冲变压器耦合从零到几兆赫兹的信号, 失真小;
- 代替继电器使用, 做光电开关用;
- 把不同电位的两组电路互连, 完成电平匹配和电平转移;
- 作为计算机主机与输入 / 输出端的接口, 大大提高计算机的可靠性;
- 在稳压电源中作为过流保护器件, 简单可靠。

(VII) 光电位置敏感器件 (PSD)

光电位置敏感器件 (PSD) 是一种对其感光面上入射光点位置敏感的光电器件。当入射光点落在器件感光面上时, 输出的电信号随入射光点落在器件感光面的不同位置而变化, 并且与入射光点的强度和尺寸大小均无关, 而只与入射光点的“重心”位置有关。

(i) 分类: 可分为一维 PSD 和二维 PSD

一维 PSD 可以测定光点的一维位置坐标; 二维 PSD 可测光点的平面位置坐标。

(ii) 应用:

PSD 广泛应用于对激光束的监控 (对准、位移和振动)、平面度测量、二维位置检测系统等等。

(VIII) 光热辐射检测器件

◆ 热敏电阻 (测辐射热计)

(i) 定义: 是由电阻温度系数大的导体材料制成的电阻元件。中低温区 $-200 \sim 850^{\circ}\text{C}$ 最常用的一种温度检测器。少数情况下, 低温可测量至 1K, 高温达 1000°C 。它的主要特点是测量精度高, 性能稳定。

(ii) 基本结构:

热敏电阻的灵敏面是一层由金属或半导体热敏材料制成的厚约 0.01 mm 的薄片, 粘在一个绝缘的衬底上, 衬底又粘在一金属散热器上。

使用热特性不同的衬底, 可使探测器的时间常数由大约 1 ms 变到 50ms 。因为热敏材料本身不是很好的吸收体, 为了提高吸收系数, 灵敏面表面都进行黑化。

如图 27 所示:

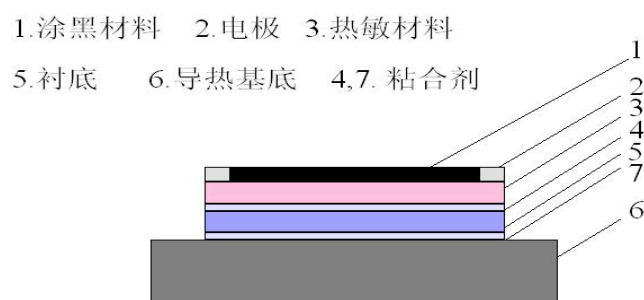


图 27

◆ 热释电器件

(i) **定义：**热释电器件是一个以热电晶体为电介质的平板电容器。因热电晶体具有自发极化性质，自发极化矢量能够随着温度变化，所以入射辐射可引起电容器电容的变化，从而可利用这一特性来探测变化的辐射。

(ii) 工作原理：

电介质的内部没有载流子，所以没导电能力。但它也是由带电的粒子如电子、原子核等组成。在外加电场的作用下，带电粒子也要受到电场力的作用，它们的运动也会发生一些变化。

对于大多数电介质来说，在电压除去后极化状态随即消失，带电粒子又回复到原来状态。但在某些电解质晶体中，不加外电场就存在了这种极化现象。且具有一定的极化强度 P_s （称为自发极化强度）。

热电晶体是压电晶体中的一种，具有非中心对称的晶体结构。自然状态下在某个方向上正负电荷中心不重合，从而晶体表面存在着一定量的极化电荷，称为自发极化。温度恒定时，因晶体表面吸附有来自于周围空气中的异性电荷，而观察不到它的自发极化现象。

晶体温度变化时，可引起晶体的正负电荷中心发生位移，因此表面上的极化电荷即随之变化，而它周围的吸附电荷因跟不上它的变化，失去电的平衡，这时即显现出晶体的自发极化现象。

这种晶体的自发极化强度与温度有关，温度升高极化强度降低，并且升高到一定温度时自发极化就突然消失。我们把这个温度称为“居里温度”或“居里点”。这种晶体就称为热释电晶体。

◆ 热电偶器件

温差电偶也叫热电偶，是最早出现的一种热电探测器件，工业上最常用的温度检测元件之一。

(i) 优点:

- ① 测量精度高。因热电偶直接与被测对象接触，不受中间介质影响
- ② 测量范围广。常用的热电偶从-50~+1600℃均可连续测量，某些特殊热电偶最低-269℃（如金铁镍铬），最高可达+2800℃（如钨-铼）。
- ③ 构造简单，使用方便。热电偶通常是由两种不同的金属丝组成，而且不受大小和开头的限制，外有保护套管，用起来非常方便。

(ii) 工作原理: 温差电效应(塞贝克效应):

由两种不同的导体材料构成的接点，在接点处可产生电动势。这个电动势的大小和方向与该接点处两种不同的导体材料的性质和两接点处的温差有关。

(iii) 应用:

温差电偶的主要应用是温差电堆

- 铋碲蒸发薄膜的温差电堆: 性能虽然比某些热电探测器件低，但它坚固，容易制作，既可以制成单个元件，也可以制成超过 100 个单元的探测器阵列。因此，它的应用很广泛，已成功地应用于某些航天仪器，包括星际航行仪器。
- 半导体材料制成的温差电堆: 一般都很脆弱，容易破碎，使用时应避免振动。另外，工作时环境温度不宜超过 60℃。

3、光探测器件的性能比较

如图 28 所示:

	最好	较好
响应特性	雪崩 PIN 光敏二极管	光敏二极管 光电倍增管
光电特性	光电倍增管	光敏二极管 光电池
灵敏度	光电倍增管 雪崩光敏二极管	光敏电阻 光敏晶体管
输出电流	光电池	光敏电阻 光敏二极管
外加偏压	光电池	光敏二极管 光敏晶体管
暗电流	光电倍增管 光敏二极管	光电池
光谱特性	光电倍增管（偏紫外）	光敏电阻（偏红外）
稳定性	光电池 光敏二极管	光电倍增管 光敏晶体管

图 28

◆ 应用选择:

真空光敏管: 分光光度计

光电倍增管: 微弱信号检测 天文测距 闪烁计数

光敏电阻: 光亮度控制 相机快门

光电池: 电源 探测器件

光敏二极管: 工业控制

雪崩光敏二极管: 激光测距 光纤通信

四、光电信号检测电路

这一章主要是计算题。

光电检测电路处理流程如图 29 所示:

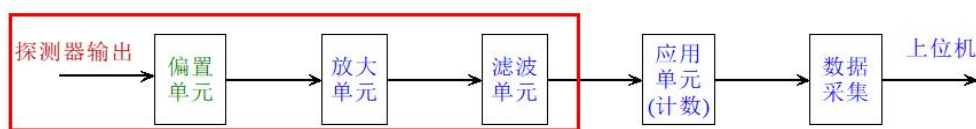


图 29

1、光电检测电路的设计要求

(1)灵敏的光电转换能力: 光电灵敏度 线性范围

使给定的输入光信号在允许的非线性失真条件下有最佳的信号传输系数, 得到最大功率、电压或电流输出。

(2)快速的动态响应能力: 频率响应

满足信号通道所要求的频率选择性或对瞬变信号的快速响应。

(3)最佳的信号检测能力: 信噪比

具有保证可靠检测所必需的信噪比或最小可检测信号功率。

(4)长期工作的稳定性与可靠性。工作要求 (精度 重复性)

根据这些要求, 检测电路的设计通常包括的步骤为: 电路静态计算、电路动态计算、噪声估算和放大电路的选择与设计。

2、光电信号输入电路的静态计算 (重点)

光电二极管输入电路的基本电路如图 30 所示:

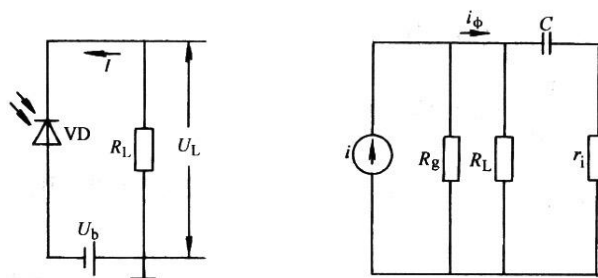


图 30

U_b 为反向偏置电压，耦合电容和二极管漏电阻一般忽略

(1) 计算方法: 图解计算法

◆ 图解计算法

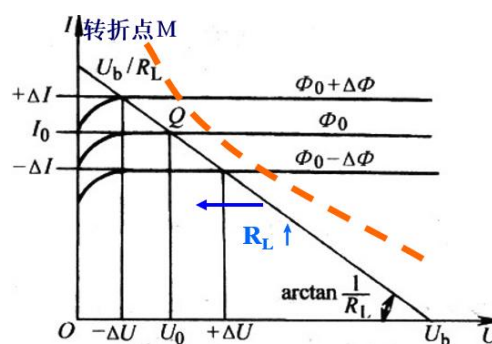
非线性电路 $U = f(I)$

线性电路 $U = U_b - R_L I$

故有: $f(I) = U_b - R_L I$

负载线的斜率 $1/R_L$ ，利用输出的线性关系确定 R_L ， U_b

图中，Q 为工作点。



① 当偏置电压 U_b 不变时:

对同样的光通量， R_L 减小会增大 I_0 和 U_0 ，减小 ΔU ， ΔI 不变。但 R_L 的减小会受到最大工作电流和功耗的限制。为了提高输出信号 ΔU 应增大 R_L ，但过大的 R_L 会使负载线越过特性曲线的转折点 M 进入非线性区，而在非线性区光电灵敏度不再是常数，这会使输出信号的波形发生畸变。

② 当 R_L 不变，偏置电压 U_b 增大时:

增大 I_0 和 U_0 ， ΔU 和 ΔI 不变，且线性度得到改善。但电路的功耗随之加大，并且过大的 U_b 会引起光电二极管的反向击穿。

利用图解法确定输入电路的负载电阻 R_L 和 U_b 值时，应根据输入光通量的变化范围和输出信号的幅度要求，使负载线稍高于转折点 M，以便得到不失真的最大电压输出，同时保证 U_b 不大于器件的最大工作电压。

特别适用于大信号状态下电路分析。

◆ 解析计算法

如图 31，已知光通量 $\Phi_{\min} \sim \Phi_{\max}$ ，非线性伏安特性按照一定的画法进行

分段折线化，在转折点 M 处将曲线分作两个区域。

(a)所示的情况是作直线与原曲线相切；(b)所示的情况是经过转折点 M 和原点连线，得到折线化特性的非线性部分，再用一组平行的直线分别和实际曲线的恒流部分逼近。

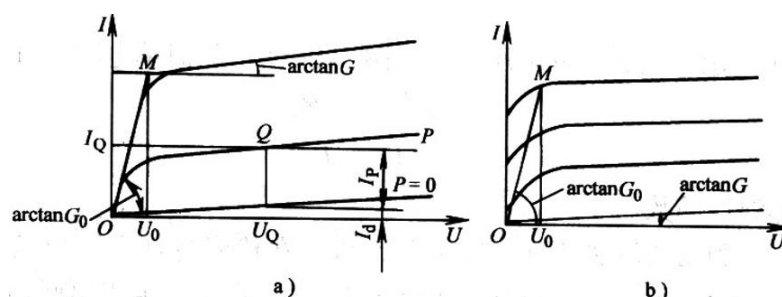


图 31

折线化伏安特性可用下列参数确定：

- 转折电压 U_0 ——对应于曲线转折点 M 处的电压值
- 初始电导 G_0 ——非线性区近似直线的初始斜率。
- 结间漏电导 G ——线性区内各平行直线的平均斜率。
- 光电灵敏度 S ——单位输入光功率所引起的光电流值。

利用折线化后的伏安特性，可将线性区内任意点 Q 处的电流值 I 表示为两个电流分量的组合，在线性区内的伏安特性解析式如下：

$$I = f(U, \Phi) = I_d + I_p = GU + S\Phi$$

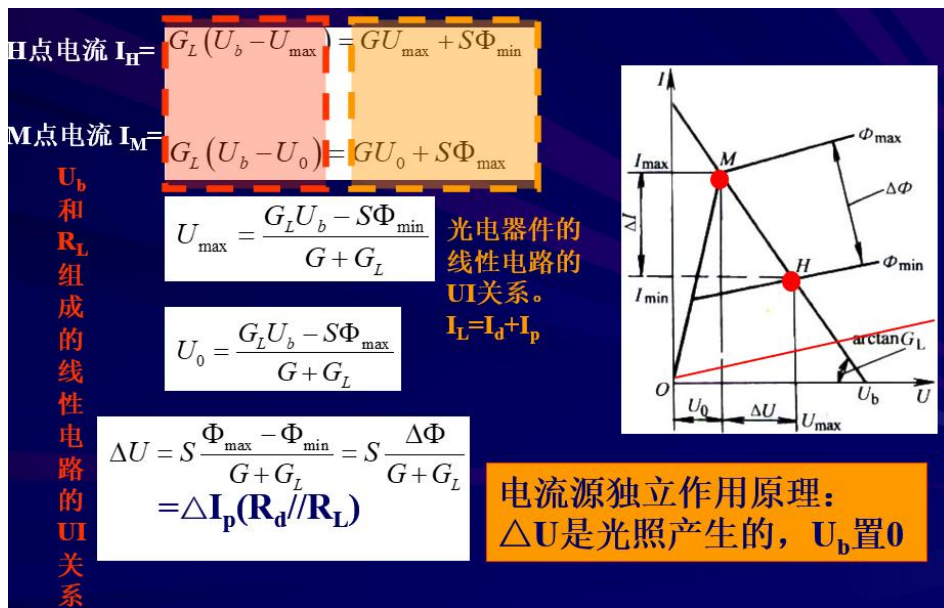
其中， I_d 是暗电流，与二极管端电压 U 成正比； I_p 是光电流，与端电压无关，取决于输入光功率。

注意：上式假设暗场时，暗电流与电压为线性关系

理想的光电二极管等效电路，由等效恒流源 I_p 和结间漏电导 G 并联组成。

在输入光通量变化范围为已知的条件下，用解析法计算输入电路的工作状态可按下列步骤进行。

(i) 确定线性工作区域(确定 U_0, G_0, G, S 的关系)



(iv) 计算输出电流幅度

由偏置电路：

$$\Delta I = I_{\max} - I_{\min} = \Delta U G_L = S \frac{\Phi_{\max} - \Phi_{\min}}{1 + G/G_L}$$

或由光电器件：

H点电流 $I_H = G_L(U_b - U_{\max}) = GU_{\max} + S\Phi_{\min}$

M点电流 $I_M = G_L(U_b - U_0) = GU_0 + S\Phi_{\max}$

$$\Delta I = I_M - I_H = -G\Delta U + S\Delta \Phi$$

$$\dots = S\Delta \Phi \left(1 - \frac{G}{G + G_L}\right) = I_p \frac{R}{R + R_L}$$

(v) 计算输出功率

$$P = \Delta U \Delta I = G_L \left(\frac{S\Delta \Phi}{G + G_L} \right)^2$$

其中， $\Delta U = S \frac{\Phi_{\max} - \Phi_{\min}}{G + G_L} = S \frac{\Delta \Phi}{G + G_L}$ ， $\Delta I = S\Delta \Phi \left(1 - \frac{G}{G + G_L}\right)$

光变化形式的影响： $\Phi(t) = \Phi_0 + A \sin \omega t$ ， $\Phi(t) = \Phi_0 + Au(t)$

3、光伏型光电检测电路的静态计算

光通量较小时，近似线性关系；光通量较大时，逐渐饱和状态。电阻越大越明显，所以负载电阻的选取影响输出信号。

光电池伏安特性曲线如图 33 所示：

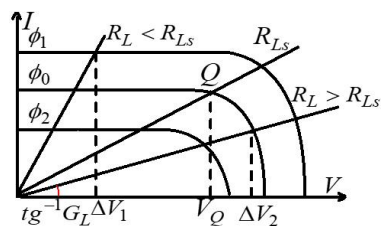


图 33

确定的电阻 R_L (以 R_{Ls} 为例) ,

- 当输入光通量较小时, 负载上的输出电压和电流随光通量成正比例增加;
- 当入射光通量较大时, 输出电压和电流呈饱和状态。电阻越大越明显。

R_L 增加, I 不变, U 增加; R_L 大于 R_{Ls} 后, I 减小, U 不变, 对应相同的 $\Delta \Phi = \Phi_1 - \Phi_2$:

当 $R_L < R_{Ls}$ (临界电阻) 时, I_Q 、 V_Q 与 $\Delta \Phi$ 呈线性;

当 $R_L > R_{Ls}$ 时, 呈非线性 (电压饱和) , 在检测电路中往往希望线性。

光电池输入电路的基本电路如图 34 所示:

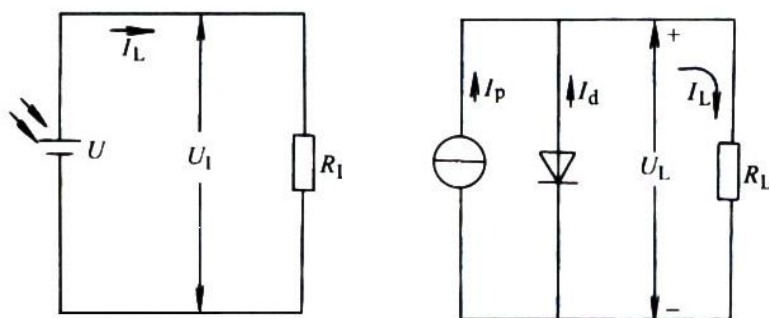


图 34

$$\text{输出电流和电压: } U_L = I_L R_L, \quad I_L = I_p - I_0 \left(e^{\frac{U_L}{U_T}} - 1 \right)$$

◆ 图解法确定工作状态

如图 35 所示, 根据负载的不同, 光电池主要有如下不同的工作状态:

- 短路电流或线性电流放大(区域 I)
- 空载电压输出(区域 IV)
- 线性电压输出(区域 II)

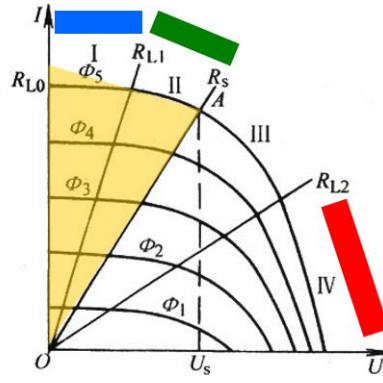


图 35

① 在短路电流或线性电流放大区域 I:

此时负载电阻很小,接近 0,则电路工作状态接近于短路工作状态,此时输出电流为:

$$I_L = I_p - I_0 \left[e^{\frac{I_L R_L}{U_T}} - 1 \right]_{R_L \rightarrow 0} = I_{SC} = S\Phi$$

有 $\Delta I = S\Delta\Phi$, 线性关系良好

② 在空载电压输出区域 IV:

光电池的开路电压通常为 0.45-0.6V, 当入射光强做跳跃式变化时, 不要求电压随光通量线性变化 (IV 区), 适合开关电路或继电器工作状态。

开路电压是:

$$U_{\infty} = \frac{KT}{q} \ln \left[\frac{I_p}{I_0} + 1 \right]_{\frac{I_p}{I_0} \gg 1} \approx \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_p}{I_0} \right) = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{S\Phi}{I_0} \right)$$

有:

$$U_{\infty} - U_{\infty 0} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{S\Phi}{I_0} \right) - \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{S\Phi_0}{I_0} \right)$$

这种状态下, 对于较小的人射光通量, 开路电压输出变化较大, 有利于弱电信号的检测, 光电池相当于电流源。

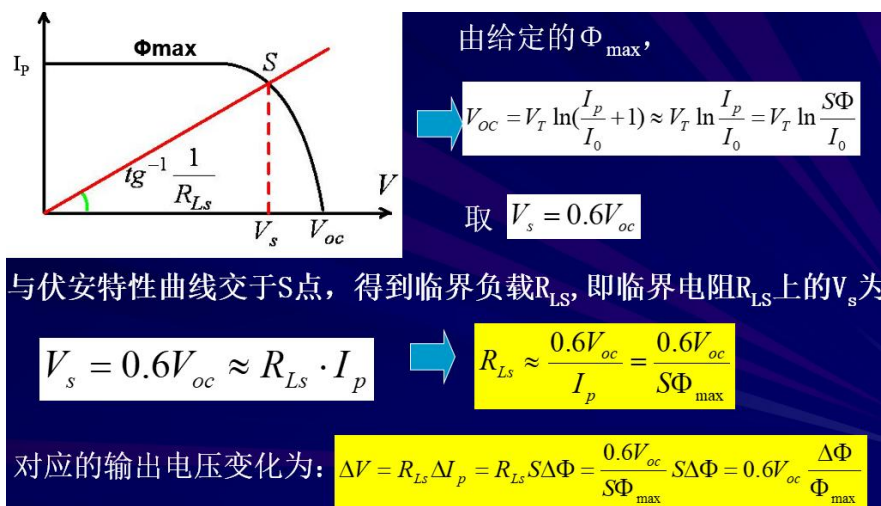
③ 在线性电压输出区域 II :

此时负载电阻处于中间值, 小于临界负载 R_s , 输出电压与输入光通量近似线性, 通常是我们需要的工作状态。

增大负载电阻有助于提高电压, 但却引起输出信号的非线性畸变。因此需确定负载电阻的临界值。在线性度要求不高时,可用图解法通过 OA 负载线,确定 R_s :

$$R_s \approx \frac{0.7U_{oc}}{I_p} = \frac{0.7U_{oc}}{S\Phi_{max}}$$

综上，图解法计算临界电阻 R_{LS} 步骤如下：



综上所述，线性区工作分两种情况：电流放大和电压放大。

4、光敏电阻三种偏置方式

恒流偏置、恒压偏置、恒功率偏置（匹配偏置）

5、光电信号输入电路的动态计算（重点）

在交变光信号输入电路中，为了给检测器件提供正常的工作条件，首先要确定直流工作点。另一方面，输入电路和后续电路之间通常是经阻容连接等多种方式耦合的。后续电路的等效输入阻抗将和输入电路的直流负载电阻并联组成检测器的交流负载。如图 36 所示：

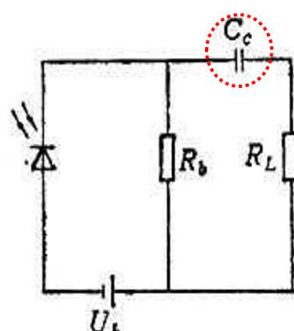


图 36

反向偏置光电二极管交流检测电路及计算如图 37（a）、（b）：

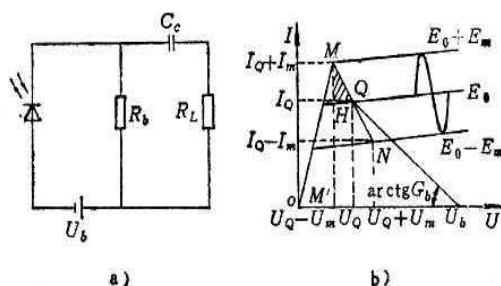


图 37

负载电阻上的输出电压峰值 U_m 可利用图 b 中阴影线三角形 MHQ 的数值关系计算。若交流负载线的斜率是 $G_L + G_b$ ，设交流负载 $(R_L // R_b)$ 总电流峰值为 I_m ，则有：

$$U_M = \frac{I_m}{G_L + G_b}$$

在图中的线段 MH 上有电流关系：

$$I_m = S_E E_m - G U_m$$

由此可求 R_L 电压、电压及电功率。

除图解法外，也可用解析法计算：

静态工作点 Q 的电流值由伏安特性有 $I_Q = G U_Q + S_E E_0$

由负载线有 $I_Q = (U_b - U_Q) G_b$

求解上二式，有 $U_Q = (G_b U_b - S_E E_0) / (G + G_b)$

在电压轴上工作点 Q 处的电压 U_Q 为 $U_Q = U_m + U_M = S_E E_m / 2(G_b + G) + U_M$

比较前二式可计算出 G_{b0} 或 R_{b0} 为 $G_b = [S_E (E_m + 2E_0) + 2G U_M] / 2(U_b - U_M)$

若 R_b 已知，则可由上式计算 U_b 值。

6、光电池工作于电压线性放大模式时（重点）

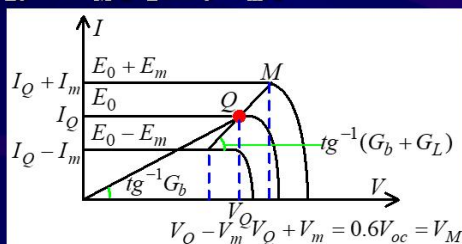
M 点的电压 U_M 应满足

$$U_M = U_Q + U_m \leq 0.6 U_{oc}$$

式中， U_m 是与正弦输入的光照度相对应的输出电压峰值， U_{oc} 为光照度最大时的开路电压。

对于 $G_L = G_b = G_{L0}$ 的最大功率输出条件下输出电压、功率和电流有类似的形式。偏置电阻的数值可计算为

$$R_{b0} = R_{L0} = 2 U_M / [S_E (2E_0 + E_m)]$$



输出电压 $V_m = \frac{I_m}{G_b + G_L} = \frac{S_E E_m}{G_b + G_L}$; 电流 $I_L = V_m / R_L = G_L V_m = I_m \frac{R_b}{R_b + R_L}$

所以输出负载 R_L 上的功率值 P_L 为 $P_L = \frac{1}{2} G_L V_m^2 = \frac{G_L}{2} \left[\frac{S_E E_m}{G_L + G_b} \right]^2$

最大功率输出条件为 $G_L = G_b$, 故:

得最大功率输出时 :

$P_{L\max} = \frac{(S_E E_m)^2}{8G_b}$ (有效值)	$V_{L\max} = \frac{S_E E_m}{2G_b}$ (峰值)	$I_{Lm} = \frac{2P_{L\max}}{V_{L\max}} = \frac{1}{2} S_E E_m$ (峰值)
---	--	---

又因为 $V_Q = V_M - V_{L\max} = V_M - \frac{S_E E_m}{2G_b}$, $V_Q = \frac{S_E E_0}{G_b}$

比较上两式得: $G_{b0} = \frac{S_E (E_m + 2E_0)}{2V_M}$ 或 $R_{b0} = \frac{2V_M}{S_E (E_m + 2E_0)}$

7、光电信号检测电路的噪声

光电检测系统的噪声来自两个方面: 外部扰动和内部噪声

一定波长的光照下光电探测器输出的电信号并不是平直的, 而是在平均值上下随机地起伏, 它实质上就是物理量围绕其平均值的涨落现象:

$$I = \bar{i} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt$$

用均方噪声来表示噪声值大小:

$$\overline{\Delta i(t)^2} = \frac{1}{T} \int_0^T [i(t) - \bar{i}(t)]^2 dt$$

(1) 噪声估算的步骤:

- 确定检测器件和前级电路的噪声源;
- 计算等效电路和复合阻抗下的噪声等效带宽, 画出检测电路的噪声等效电路;
- 根据噪声等效电路计算噪声输出电压、信噪比和最小输出光功率值。

光电倍增管的整管噪声取决于光电阴极和倍增极的散粒噪声。

阳极电流的散粒噪声有效值表示为: $I_{NA} = \sqrt{2qI_A M \Delta f \sigma}$

倍增管检测电路负载电阻 R 上的热噪声电流为

$$I_T = \sqrt{4kT \Delta f R}$$

因此，负载电阻上总的噪声输出电流为

$$I_N = \sqrt{(2qI_A M \sigma + 4kT/R) \Delta f}$$

在检测阈值光通量的弱光情况下，有 $I_{A0}=0$ ，此时的总噪声电流 I_{Nm} 取决于暗电流 I_d ，有

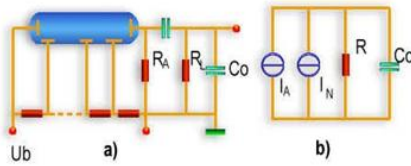
$$I_{Nm} = \sqrt{2qI_d M \sigma \Delta f}$$

负载电阻 R 上的噪声输出电压为

$$U_{Nm} = \sqrt{2qI_d M \sigma \Delta f} R$$

对于负载电阻 R 上有并联电容的情况，则有

$$\Delta f = \Delta f_e = 1/4RC$$



光电倍增管检测电路及噪声等效电路

a) 检测电路 b) 噪声等效电路

阳极输出总信噪比 SNR_A 是直流光电流 I_A 与噪声电流有效值 I_N 之比值，即

$$SNR_A = I_A / \sqrt{2qI_d M \sigma \Delta f}$$

灵敏阈 Φ_{smin} 是暗电流噪声电流有效值 I_{Nm} 与阳极灵敏度之比

$$\Phi_{smin} = I_{Nm} / S_A = (1/S_A) \sqrt{2qI_d M \sigma \Delta f}$$

比灵敏阈为

$$\begin{aligned} \Phi_s^* &= \Phi_{smin} / \sqrt{\Delta F A} \\ &= (I_{Nm} / S_A) (1 / \sqrt{\Delta F A}) \\ &= \sqrt{2qI_d M \sigma \Delta f} / S_A \sqrt{\Delta F A} \end{aligned}$$

式中，对于纯电阻情况下 $\Delta f = \Delta F$ 是后级放大器通频带。在只有并联电容的情况下，有 $\Delta f = \Delta f_e = 1/4RC$ ， $\Delta F = 1/2\pi RC$ 。A 为光阴极光敏面积。

五、光电直接检测系统

光强度调制直接检测模型如图 38 所示：

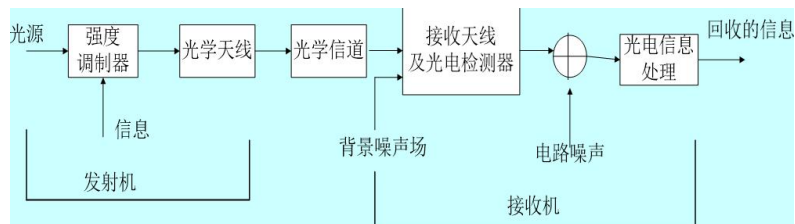


图 38

假设入射光信号 $E_s(t) = A \cos \omega t$ ，式中 A 为信号光电场振幅， ω 为信号光的频率。

(i) 平均功率为：

$$P_s = \overline{E_s^2(t)} = A^2 / 2$$

(ii) 光检测器输出电流为：

$$I_s = \alpha P_s = \frac{e\eta}{h\nu} \overline{E_s^2(t)} = \frac{e\eta}{2h\nu} A^2$$

式中： $\overline{E_s^2(t)}$ 表示 $E_s^2(t)$ 的时间平均值；

(iii) α 为光电变换比例常数，且有 $\alpha = \frac{e\eta}{h\nu}$

(iv) 若光检测器的负载电阻为 R_L ，则光电检测器输出功率为：

$$P_o = I_s^2 R_L = \left(\frac{e\eta}{h\nu}\right)^2 P_s^2 R_L$$

(v) 直接探测系统的信噪比：

$$P_{so} + P_{no} = \left(\frac{e\eta}{h\nu}\right)^2 (P_{si} + P_{ni})^2 R_L = \left(\frac{e\eta}{h\nu}\right)^2 (P_{si}^2 + 2P_{si}P_{ni} + P_{ni}^2) R_L$$

$$SNR_{po} = \frac{P_{so}}{P_{no}} = \frac{P_{si}^2}{2P_{si}P_{ni} + P_{ni}^2} = \frac{(SNR_{pi})^2}{1 + 2(SNR_{pi})}$$

(vi) 直接探测系统的探测灵敏度：

输出总噪声功率主要考虑散弹噪声功率和探测器与电路的热噪声功率：

$$SNR_o = \frac{P_{so}}{P_{no}} = \frac{\left(\frac{e\eta}{h\nu} P_s\right)^2}{2e\left[\left(\frac{e\eta}{h\nu}\right)(P_s + P_b) + I_d\right]\Delta f + 4kT\Delta f / R_L}$$

直接检测系统不适合弱光检测。

相位测距法测量距离：

相位式光电测距中，一般要选择长、短两把“光尺”配合使用，长光尺用来保证两成，短光尺用来保证精度。

具体例子见作业 5—10。

六、光外差检测系统

1、基本原理：基于两束光的相干。

必须采用相干性好的激光器作光源，在接收信号光的同时加入本振光。本振光的频率与信号光频率极为接近，使本振光和信号光在光电探测器的光敏面上形成拍频信号。只要光电探测器对拍频信号的响应速度足够高，就能输出中频光电流，从而检测出信号光中的调制信号。

2、特点：

- ①光外检测可获取全部信息
- ②光外差检测转换增益高
- ③良好的滤波性能
- ④信噪比损失小

3、光外差检测系统对检测器性能的要求：

- ①响应频带宽
- ②均匀性好
- ③工作温度高

七、光纤传感检测技术

1、光纤介绍

- ①光纤波导简称光纤，用透光率高的电介质(石英、玻璃、塑料等)构成的光通路。
- ②由圆柱形内芯和包层组成，而且内芯的折射率 n_1 略大于包层的折射率 n_2 。
- ③通常直径为几微米到几百微米

2、光纤波导原理：

当一束光线以一定的入射角 θ_1 从介质 1 射到与介质 2 的分界面上时，一部分能量反射回原介质；另一部分能量则透过分界面，在另一介质内继续传播。

2、光纤传感器分类：

(1) 功能型（全光纤型）光纤传感器

光纤在其中不仅是导光媒质，而且也是敏感元件，光在光纤内受被测量调制。

优点：结构紧凑、灵敏度高。

缺点：须用特殊光纤，成本高，

典型例子：光纤陀螺、光纤水听器

(2) 非功能型（或称传光型）光纤传感器

光纤在其中仅起导光作用，光照在非光纤型敏感元件上受被测量调制。

优点：无需特殊光纤及其他特殊技术，比较容易实现，成本低。

缺点：灵敏度较低。

实用化的大都是非功能型的光纤传感器。

3、光纤调制技术：强度调制、相位调制、偏振调制、频率调制、光谱调制

(1) 强度调制与解调：

利用被测对象引起载波光强度变化，从而实现对被测对象进行检测的方式。
光强度变化可以直接用光电探测器进行检测，

优点：结构简单、容易实现、成本低。

缺点：易受光源波动和连接器损耗变化等的影响

(2) 偏振调制与解调

利用光的偏振态的变化来传递被测对象信息

应用：

电流、磁场传感器：法拉第效应；

电场、电压传感器：泡尔效应；

压力、振动或声传感器：光弹效应；

温度、压力、振动传感器：双折射性

优点：可避免光源强度变化的影响，灵敏度高。

(3) 相位调制与解调：

通过被测能量场的作用，使能量场中的一段敏感单模光纤内传播的光波发生相位变化，利用干涉测量技术把相位变化变换为振幅变化

应用：

迈克尔逊干涉仪

马赫-泽德尔干涉仪

塞格纳克干涉仪

法布里-珀罗干涉仪

4、光纤传感器特点：

- ① 灵敏度高、电绝缘性能好、抗电磁干扰、可挠性、可实现不带电的全光型头；

- ② 频带宽动态范围大;
- ③ 可用很相近的技术基础构成测不同物理量的传感器;
- ④ 便于与计算机和光纤传输系统相连 , 易于实现系统的遥测和控制;
- ⑤ 可用于高温、高压、强电磁干扰、腐蚀等恶劣环境;
- ⑥ 结构简单、体积小、重量轻、耗能少

5、分布式光纤传感器: 将传感光纤沿场排布, 并采用独特的检测技术, 对沿光纤传输路径上场的空间分布和随时间变化的信息进行测量和监控。

主要技术:

- (1) 反射法: 光时域反射法, 偏振光时域反射法
- (2) 波长扫描法
- (3) 干涉法
- (4) 连续波调频法

八、光电信号的数据采集与微机接口

1. CCD 视频信号的二值化处理

(1) 固定阈值法:

固定阈值法是一种最简便的二值化处理方法。将 CCD 输出的视频信号送入电压比较器的同相输入端, 比较器的反相输入端上加可调电平的电位器就构成了如图所示的固定阈值二值化电路。

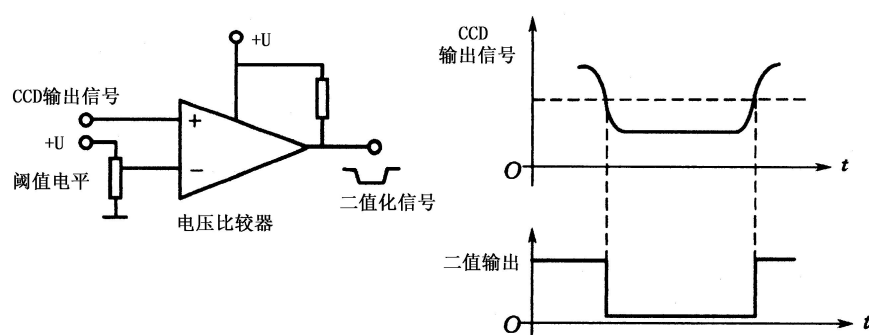


图9-1 固定阈值二值化处理

当 CCD 的视频信号输出含有被测物体直径的信息时, 可以通过适当地调节阈值电压获得方波脉冲宽度与被测物体直径值的精确关系。

在不能保证入射到 CCD 像敏面上的光是稳定的情况下, 固定阈值法会产生测量误差。

(2) 浮动阈值法：

浮动阈值法是使电压比较器的阈值电压随测量系统的光源或随 CCD 输出视频信号的幅值浮动。当光的强度变化引起 CCD 的视频信号起伏时，通过电路将信号的起伏反馈到阈值设定电路，使阈值跟着变化，保证二值化脉冲的宽度稳定不变。线阵 CCD 输出信号经采样保持器采得线阵 CCD 在该周期中输出的背景信号并将其保持整个周期，跟随器将采样输出信号通过电位器 W 送到电压比较器提供浮动的阈值。

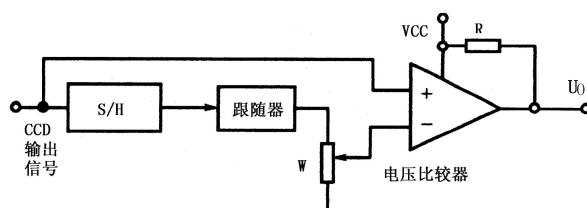


图9-2 浮动阈值二值化电路原理

根据信号光及背景光的影响进行适当调整，完全消除光的不稳定带来的测量误差是困难的。

(3) 微分法：

这种方法必须将 CCD 输出的调幅脉冲信号经过采样保持电路或低通滤波电路进行处理，变成连续的平滑曲线。将 CCD 输出信号经过微分电路 1 微分，对应于输出信号变化率最大位置(图中的 A 及 A' 点)处，输出两个负与正脉冲。取绝对后，为两个正脉冲，再次微分，其过零点为两个边界点。通过过零触发器可以获得微分法的二值化输出脉冲，脉冲的宽度即为图像 A A' 的宽度。

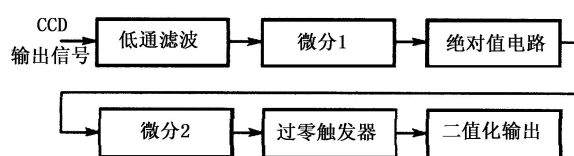


图9-3 微分法原理框图

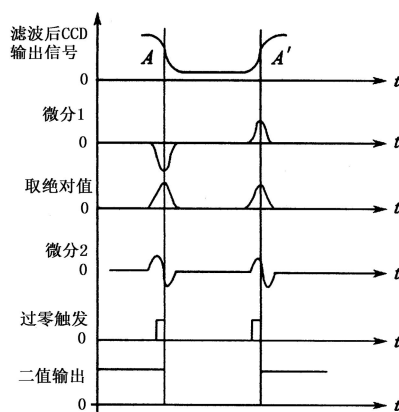


图9-4 微分法的工作波形

2. 二值化数据采集与计算机接口

(1) 硬件二值化数据采集电路

硬件二值化数据采集电路的原理如图所示。它由“与”门电路、二进制计数器、锁存器和显示器等硬件逻辑电路构成。CCD 的驱动器除产生 CCD 工作所需的各路驱动脉冲外，还要产生与 SH 同步的控制脉冲 F_c 和用作二值化计数的输入脉冲 CR_t 。

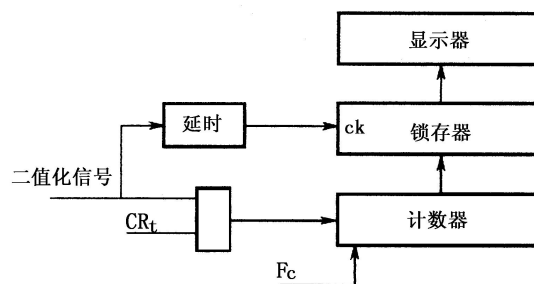


图9-5 硬件二值化采集原理方框图

下图为硬件二值化数据采集电路工作波形图。图中 F_c 的低电平使计数器清零，变为高电平后可以计数。计数器的输入脉冲 CR_t 只有在二值化脉冲的高电平期间才能通过与门输送到计数器的输入端。计数器在一个行周期计得的 CR_t 脉冲数将在二值化脉冲的下降沿产生，并将计数器的值存入锁存器，再经译码、驱动、显示与二值化脉冲宽度有关的数值。 CR_t 脉冲的频率是复位脉冲 RS 频率的整数 N 倍，而一个 RS 脉冲代表了一个像元的长度量，一个 CR_t 脉冲应为像元尺寸的 N 分之一。计数器一个周期内所计的数实际上为二值化脉冲高电平所代表的被测物体的外径值。

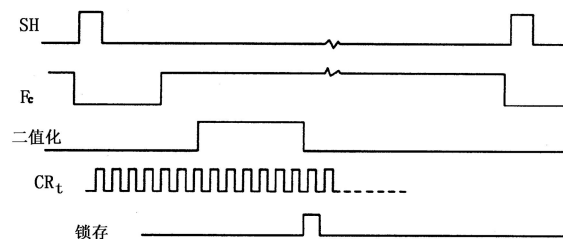


图9-6 硬件二值化数据采集波形图

(2) 边沿送数法二值化数据采集

下图所示为边沿送数法二值化数据采集计算机接口电路的原理方框图。由线阵 CCD 行同步脉冲 F_c 控制的二进制计数器计每行的标准脉冲（可以是 CCD 的复位脉冲 RS 或像元采样脉冲 SP ）数，当标准脉冲为 CCD 的复位脉冲 RS 或像元采样脉冲 SP 时，计数器某时刻的计数值为线阵 CCD 在此刻输出像敏单元的位置

序号值，若将此刻计数器所存的数值用锁存器锁存，那么锁存器就能够将 CCD 某特征像元的位置输出，并存储起来。

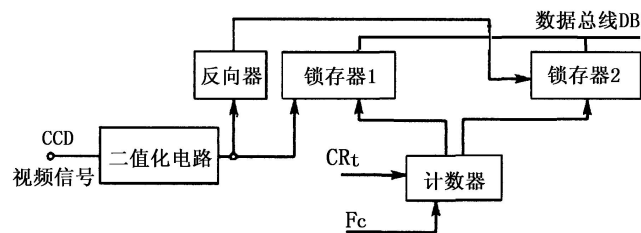


图9-9 边沿送数法二值化数据采集电路

CCD 输出的载有被测物体直径图像的视频信号经过二值化处理电路产生被测信号的方波脉冲，方波脉冲前、后边沿分别对应于线阵 CCD 上的两个位置。将方波脉冲分别送给两个边沿信号产生电路，该电路产生两个上升沿，它们分别对应于方波脉冲的前、后边沿，即线阵 CCD 上的两个位置。用这两个边沿脉冲信号使两个存储器分别锁存二进制计数器在上升沿时刻所计的数值 N_1 和 N_2 ，则 N_1 为二值化方波前沿时刻所对应的位置值， N_2 为后沿所对应的位置值。在行周期结束时，再存入计算机内存。

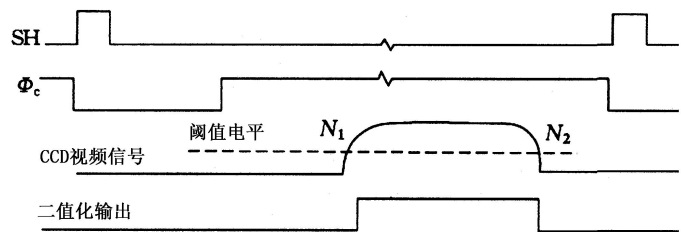


图9-10 边沿送数法二值化数据采集波形图

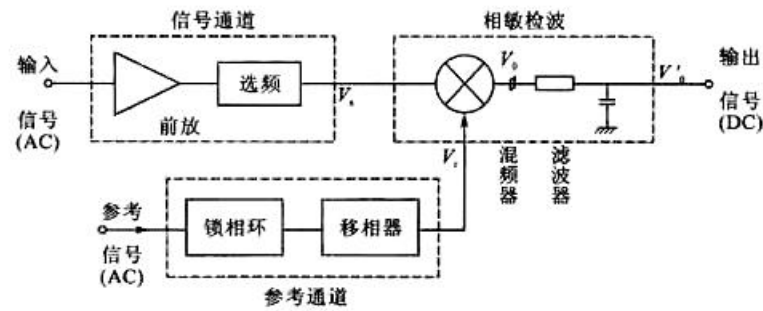
九、光电检测技术典型应用

1、微弱光信号检测技术

(1) 锁相放大器：

利用和被测信号有相同频率和相位关系的参考信号作比较基准，只对被测信号本身和与参考信号同频、同相的噪声分量有响应。

① 锁相放大器的构成



锁相放大器的组成方框图

信号通道：对信号选频放大，对噪声做初步的窄带滤波

参考通道：提供参考电压

相敏检波：混频，滤波，得差频信号

② 锁相放大器的原理

设信号通道输出 V_s 与参考通道输出 V_r 为：

$$V_s = V_{sm} \cos [(\omega_0 + \Delta\omega)t + \theta]$$

$$V_r = V_{rm} \cos \omega_0 t$$

经乘法混频器后，输出信号：

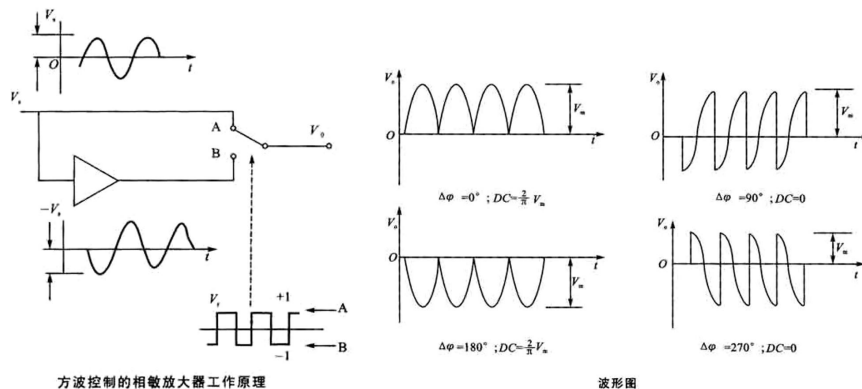
$$\begin{aligned} V_0 &= V_s \cdot V_r \\ &= \frac{1}{2} V_{sm} V_{rm} \{ \cos (\theta + \Delta\omega t) + \cos [(2\omega_0 + \Delta\omega)t + \theta] \} \end{aligned}$$

经低通滤波器的差频信号：

$$V_0' = \frac{1}{2} V_{sm} V_{rm} \cos (\theta + \Delta\omega t)$$

(2) 方波控制的相敏检波器：

采用方波信号，可使相敏检波器工作稳定，开关效率高



方波控制的相敏放大器工作原理

波形图

(3) 锁相放大器的特点

① 要求对入射光束进行斩光或光源调制，适用于调幅光信号的检测；

- ② 极窄带高增益放大器，增益可达 1011，带宽窄到 0.0004Hz;
- ③ 交流 - 直流信号变换器;
- ④ 可以补偿光检测中的背景辐射噪声 & 前置放大器的固有噪声。信噪比改善可达 1000 倍。

(4) 锁相放大技术的四个基本环节:

- ① 通过调制或斩光，将被测信号由零频范围转移到设定的高频范围内。检测系统变成交流系统;
- ② 在调制频率上对有用信号进行选频放大;
- ③ 在相敏检波中对信号解调。同步解调作用截断了非同步噪声信号，使输出信号的带宽限制在极窄的范围内;
- ④ 通过低通滤波器对检波信号进行低通滤波。

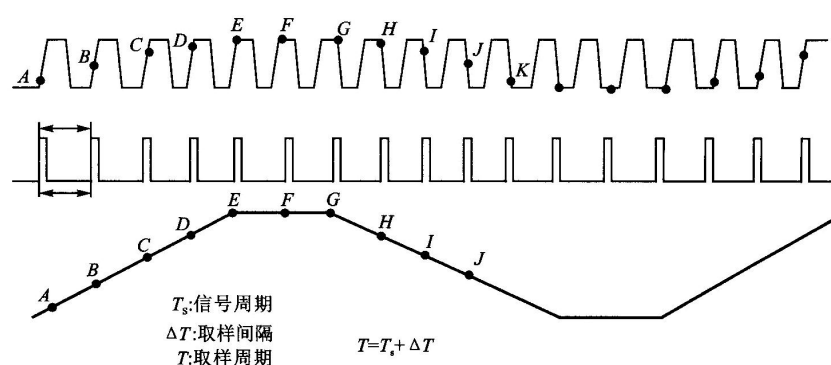
2、取样积分器 (Boxcar 平均器)

利用取样 & 平均化技术测定深埋在噪声中的周期性信号的测量装置。

(1) 运行步骤:

- ① 利用检测光脉冲的激励源取得 & 输入光脉冲同步的触发信号;
- ② 利用门延时 & 门脉冲宽度控制单元形成与触发脉冲具有恒定时延或时延与时间成线性关系的可调脉宽取样脉冲串;
- ③ 取样脉冲控制取样开关对连续的周期性变化信号进行扫描取样;
- ④ 积分器对取样信号进行多次线性累加，经过滤波后获得输出信号。

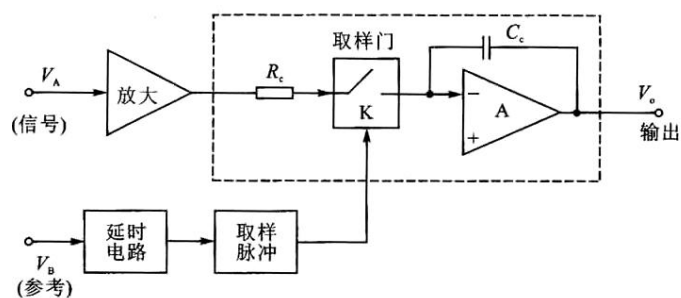
(2) 原理:



固定位置取样及同步积累原理

利用周期信号的重复特性，而噪声多次重复的统计平均值为零。

(3) 定点式取样积分器:



定点式取样积分器原理方框图

对信号固定点取样、平均

(5) 取样积分器的特点

- ① 适用于由脉冲光源产生的连续周期变化的信号波形测量或单个光脉冲的幅度测量。需要有与光脉冲同步的激励信号；
- ② 是一个取样放大器，在每个信号脉冲周期内只取一个输入信号值；
- ③ 在多次取样过程中，门积分器对被测信号的多次取样值进行线性叠加，而对随机噪声是矢量叠加，所以，对信号有恢复&提取作用；
- ④ 在测量占空比小于 50% 的窄脉冲光强度下，信噪比好于锁相放大器；
- ⑤ 用扫描方式测量信号波形时能得到 100ns 的时间分辨率；
- ⑥ 双通道系统能提供自动背景和辐射源补偿。