

自动化丛书

工业自动装置中的 光敏电阻

〔苏联〕M. M. 格林什捷因 著

上海科学技术出版社

工业自动化装置中的 光敏电阻

〔苏联〕M. M. 格林什捷因 著

上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书是“自动化丛书”之一。从书内容包括自动学及远动学的理論,自动装置、元件和仪器的結構及应用等。丛书选题主要取自苏联及其他国家的有关資料,也包括国内編写的专题論著。本丛书由“自动化丛书編輯委员会”主編。

本书討論各种类型光敏电阻的特性、基本参数及結構特点;同时介紹許多采用光敏电阻的工业自动装置。

本书供从事光电自动装置的运行,以及未受过专业训练的工程技术人員参考。

ФОТОСОПРОТИВЛЕНИЯ В ПРИБОРАХ ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИКИ

М. М. Гринштейн

Госэнергоиздат • 1962

自动化丛书(52)

工业自动装置中的光敏电阻

崔世鼎 譯

自动化丛书編輯委员会主編

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路450号)

上海市书刊出版业营业登记证出093号

上海市印刷三厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 787×1092 1/32 印张 3 4/32 排印字数 67,000

1965年8月第1版 1965年8月第1次印刷

印数 1-4,000

統一书号 15119·1790 定价(科六) 0.38元

目 录

第 1 章 光敏电阻的一般知識	1
1. 光电导的原理	1
2. 光敏电阻的結構	4
3. 光敏电阻的基本性能	5
第 2 章 光敏电阻的类型	14
4. 概述	14
5. 硒光敏电阻	14
6. 硫化鉍光敏电阻	16
7. 硒化碲光敏电阻	18
8. 硫化鉍光敏电阻	19
9. 硫化鉛光敏电阻	20
10. 碲化鉛光敏电阻	28
11. 硒化鉛光敏电阻	29
12. 硫化鎢光敏电阻	30
13. 硒化鎢光敏电阻	40
第 3 章 采用光敏电阻的光电自动裝置	43
14. 光电系統的結構原理	43
15. 光电继电器	49
16. 位置式光电調節器	62
17. 光电自动分析仪	66
18. 光电测温仪	87
19. 光电倫琴射綫剂量仪	92
参考文献	94

第 4 章

光敏电阻的一般知識

1. 光电导的原理

物质在光作用下放射电子的现象称为光电效应。

光电现象有三种基本类型：

- (1) 物质在光作用下放射电子；
- (2) 在光作用下，两种材料的界面上产生电势；
- (3) 物质在光照下电导改变。

第一类光电现象称为外光电效应，用在真空及充气光电管中。第二类称为壁垒层光电效应，用在半导体光电管中。这里不讨论外光电效应与壁垒层光电效应的理论，因在有关文献[1]中已有详细阐述；我们只讨论关于第三类光电现象——内光电效应。

现时代人们是根据能带理论来解释内光电效应的。

我们简略地谈一下能带理论的基本原理，同时推荐读者查阅相应的文献[6, 7, 8]。

固体是一个统一的系统，在这一系统中电子的能态(能级)构成称为能带的区域。各个电子在这些能带中只能有一定的，“容许的”能量，亦即都处于一定的能级上。

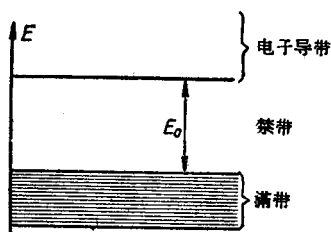
电子由低能级迁移到高能级时，要吸收一定的“部分的”

能量(量子)。

固体的能带被禁止的能量间隔(禁带)所分开。在固体导电过程中有两种能带:由原子的价电子能级构成的价电子能带(满带)以及处于满带之上的激发状态的能带,称为导带或自由带。

固体的导电性是由于导带中存在载流子。

在半导体中上述两种能带与金属不同,是被禁带所分隔,禁带的能量宽度 E_0 (参阅图 1) 大致为 1~2 电子伏。



能量单位——电子伏是能量在原子与电子现象领域内的基本尺度,它相当于一个电子为克服一伏电位差所需要的能量。

能量 E_0 的大小是半导体导电性的一个基本准则。

图 1 无杂质半导体的能带图

显而易见,使电子移入导带需要的能量(称为活化能)至少应不低于 E_0 的数值。这一能量可以是热能,也可以是光能。

电子被辐射能量子(光子)所激发的物理过程称为内光电效应,由这一过程所引起的附加电导称为光电导。

按照现代的概念,光通量的构成是不连续的而是由光子所组成的。

爱因斯坦确定,光子的能量严格地遵照以下的关系,它是任何时刻都成立的

$$\varepsilon = h\nu$$

式中, h 是普朗克常数,等于 6.62×10^{-27} 尔格·秒;而 ν 是光波振荡频率。

由爱因斯坦公式得出的重要结果称为界限波长定律，不过它只对纯金属才是严格正确的。

它的实质如下。因为对于不同半导体，能够使其激发的光子能的最小值不同，所以对于每种半导体都有它本身由某一频率 ν_0 决定的光电导界限。因此，只有频率大于或等于 ν_0 的射线才能引起光电导现象。

ν_0 值称为光电效应的界限频率，而与之对应的波长 λ_0 则称为界限波长或光电效应的长波界限。这些量的数值取决于半导体的本性。对于某些杂质半导体，按电导活化能之实验值而计算出的光电导界限频率与实际的 ν_0 值不相吻合^[6, 8]。

根据上述能带理论的原理，光电导原理可解释如下。

设在无光照不含杂质的半导体中有 n_1 个电子处于自由带。由热能所激发的这些电子引起某一起始的电导，称为暗电导。当半导体受到光照时，有些电子 n_2 在吸收能的作用下克服了禁带而迁入导带，这时导带中就有了 $n_1 + n_2$ 个电子。

导带中电子数增加，引起半导体电导增大，它等于

$$\sigma = n_1 e u + n_2 e u$$

式中 e ——电子的电荷；

u ——称为电子迁移率的一个量。

第一项相应于暗电导，第二项则相应于光电导。

如果对这种激发过的半导体加上某一电位差，则电子的运动就变得有方向性，从而形成电流。

某些半导体如硫化镉 (CdS) 在适当光照下，光电子数可高于暗电导电子数四个数量级。而在另一些对射线敏感较差的半导体中，光电子数则达电导电子总数的 20~30%。

温度变化强烈地影响光敏物质的光电导性。相对光电导随温度的降低而提高，因为温度降低就使暗电导减少，光电导

是在暗电导(它好象是个底数)上表现出来的。

温度下降也引起光电导绝对值上升。这一事实是由于随着暗载流子浓度减小,光电子复合的概率降低。

温度变化还影响光电导长波界限的位置。这时,这个界限移动的方向仅仅取决于半导体的本性。

这一事实可以解释为:有一些半导体的禁带宽度随温度下降而增大,另一些则随温度下降而减小。在这个例子中,我们简单假定在无杂质半导体中的载流子仅仅是电子。实际上这类半导体中除去电子导电外,还有“空穴”导电。在有杂质半导体中,导电过程还更为复杂^[6, 8]。

2. 光敏电阻的结构

图2所示是成批生产的光敏电阻的简图。在大多数场合

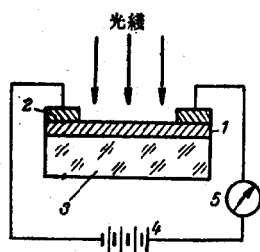


图2 光敏电阻的结构

- 1—光敏层; 2—金属电极;
3—玻璃底片; 4—电源;
5—检流计

它是涂布在玻璃板上的一薄层半导体物质。半导体层的两边装有金属电极,它们与半导体层保持可靠的电接触。涂半导体物质的玻璃板加压装入塑料盒内。金属电极与出线端(插脚)相联结,光敏电阻就通过出线端接入电路。

为了防止周围介质的影响,光敏层上复盖一薄层漆膜。这时,要选择漆膜成分,使它在光敏电阻最敏感的波长范围内透射率最大。

半导体层可用真空蒸发法或化学法涂布,后一种方法在外国已普遍地推广^[4]。

用真空蒸发法比化学法获得的半导体层更为灵敏。此

外,制造这种薄层的过程也較易控制。

还有一些其他的方法制成半导体层。

一种方法是将半导体物质磨成細粉,压成薄片。而后薄片經過特殊热处理,再在上面安上电极。薄片可以置于塑料盒內。不过,亦可不用盒子,而常常把它粘貼在玻璃片上。

另一种方法是将光敏半导体的单晶体切成薄片,而后用一般方法将薄片装入盒內。

說到光敏电阻的結構,还必須談談制造它所用的材料。

多次試驗証实,并非一切純半导体都显示光电导性,仅仅是介电常数高于4的半导体才有这种現象。对于不具备这一条件的物质,可以加入杂质使产生光电导性^[6]。

在所有各种具有光电导性的半导体物质中,用来生产光敏电阻的常有:鉍、鎢、鉛、鉍等的硫化物及硒化物以及某些碲化物,选择哪一种半导体物质視所需光敏电阻要具有什么样的光譜特性。

通过冷却能使光敏电阻的特性改善。这样的光敏电阻在本身結構中具有冷却装置。

3. 光敏电阻的基本性能

每一类型光敏电阻的应用范围取决于它由一系列特性所表示的性能及参数。其中最重要的应当是:灵敏度、光照特性及伏安特性、時間常数、最佳工作电压、暗电阻与亮电阻之比。

一般情况,光电元件的灵敏度是其轉換輻射能为电能底能力的尺度。应当将积分灵敏度与光譜灵敏度区别开。

光电元件的积分灵敏度了解为光电元件对不分解为光譜的总光通量灵敏度。这一物理量不仅取决于光敏物质的本性,而且也与照射光敏层的輻射能源的类型有关。因此,談到

光电元件的灵敏度时必须指出辐射能源的性质。

在苏联采用功率 100 瓦 МЭЛ3 型的充气钨丝白炽灯作为测量用的标准光源。在正常加热情况下，它的比色温度为 $T_c = 2850^\circ\text{K}$ 。

对于许多实际问题，当毋须考虑辐射光谱的组成而只着重在一定光通量所产生的光电流时，积分灵敏度的大小就特别重要。

要将积分灵敏度的概念应用到光敏电阻上，必须比较详细的一般地讨论一下光电元件的积分灵敏度。积分灵敏度由在单位通量辐射能的照射下光电元件短路回路中所通过的光电流 I_ϕ 决定。

换句话说，积分灵敏度 K 就是光电流与以功率单位表示的辐射能通量 P 的比

$$K = \frac{I_\phi}{P}$$

由光电元件积分灵敏度的定义得出它的因次为安/瓦。不过积分灵敏度常常表示为微安/流明，亦即光电流 I_ϕ 与光通量 Φ 之比

$$K = \frac{I_\phi}{\Phi} \text{ 微安/流明}$$

光通量 Φ 可由下式求得

$$\Phi = 10^{-4} S E$$

式中 S ——光敏电阻光敏层的面积，厘米²；

E ——照度，勒克司。

按照流明本身的定义，它只考虑辐射光谱的可见光部分，可是实际上在许多场合下不得不牵涉到辐射通量的更广的光谱成分。这是上述积分灵敏度公式的缺点。因此将辐射通量

的功率以瓦表示。

严格地讲，光电元件的积分灵敏度决定于在光照特性 $I_\Phi = f(\Phi)$ 的給定点上光电流对辐射通量的导数。外光电效应光电元件的光照特性具有綫性特征。由光电元件光照特性的特征可知，在允許光通量 Φ 範圍內，积分灵敏度 K 是一常数。

我們来看看适用于光敏电阻积分灵敏度的概念。由图 2 接有光敏电阻的电路可見，光电流既取决于光通量的大小，也取决于加在光敏电阻上的电压。換句話說，积分灵敏度应用于光敏电阻时，应当考虑到加在光敏电阻上电压的大小。

目前通常有两种方法来决定积分灵敏度：一种是光敏电阻加工作电压下，求光电流与入射光通量之比；第二种是求在一伏电压时的积分灵敏度。在第二种情况我們得出的是比灵敏度 K_0 的概念，在大多数場合它也表示光敏电阻的积分灵敏度。

由此灵敏度的定义亦可得出它对可見光譜的因次为

$$K_0 = \frac{I_\Phi}{\Phi U} \text{ 微安/流明} \cdot \text{伏}$$

式中， U 为加于光敏电阻上的电压。

如果我們想知道光敏电阻的积分灵敏度，則当其伏安特性(亦即光电流与所加电压的关系)为綫性时，只需将比灵敏度 K_0 乘以工作电压。反之， K_0 值亦可由在某一电压 U 下测得的灵敏度 K ，除以該电压值来求出。

大多数光敏电阻的伏安特性都是綫性的；只有当所加电场达到 10,000 伏/厘米或更高时，才出現非綫性的情况^[8]。

图 3a 所示是光敏电阻在无光照与有光照时的典型伏安特性。

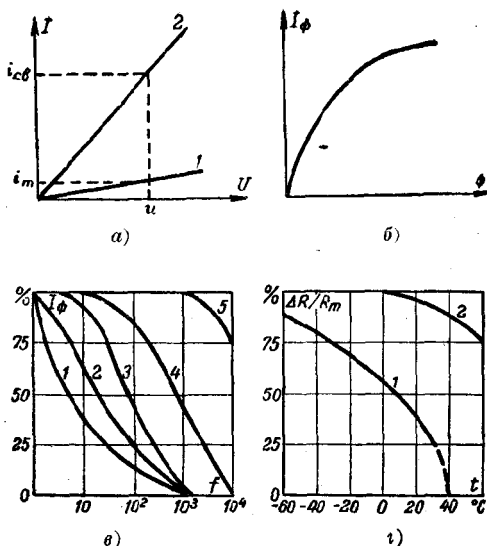


图3 光敏电阻的特性

a—伏安特性

1—无光照；2—有光照

b—光照特性

c—频率特性

1—硫化镉；2—硒；3—硫化铈；4—硫化铋；5—硫化铅

d—温度曲线

1—硫化铋；2—硫化铈

这些特性表明,在极大多数情况下,光敏电阻都是遵从欧姆定律的一般线性电阻。

伏安特性显示出光敏电阻与外光电效应光电元件间的基本差别。这种差别是当增加电压时,光敏电阻的光电流没有饱和现象,因此如前面所说,它的灵敏度正比于外加电压。

让我们再回到光敏电阻灵敏度的概念。

光敏电阻与外光电效应光电元件不同,具有非线性的光

照特性。各种光敏电阻的非线性程度都是各不相同的。

大多数场合证明，各种光敏电阻均存在着分析关系。这一关系为

$$I_p = k\Phi^\alpha$$

式中， k 为比例系数； α 是永远小于 1 的分数。

图 36 表示出上述的关系，由此可见，光电流 I_p 的增长落后于光通量 Φ 的增长，换句话说；当光通量增加时，光敏电阻的积分灵敏度下降。

在估计光敏电阻的灵敏度时必须注意到这一情况。

这样的光照特性，使得解算许多要求光电流与光强间必需保持正比关系的问题时不能利用光敏电阻。

不过必须指出，最近一系列研究肯定，光照的非线性特性并不是一切光敏半导体都必有的。目前已有就象真空光电管一样，它的光电流随光通量线性增大的光敏电阻的实验室试样^[2]。光敏电阻的积分灵敏度非常大，苏联最近研究出的硒-镉光敏电阻达到 12 安/流明，这比普通镉、铯真空光电管的灵敏度高 120,000 倍。

对于光敏电阻的整个灵敏度特性我们应用阈灵敏度的概念。它以光敏电阻负载中产生超过内部噪声 2~3 倍的电信号所需最小辐射通量来表示。光敏电阻的内噪声是由它们的电气性能所决定的。

噪声电平愈低，则阈灵敏度的数值愈小。它与制造方法及信号实现的方式有关。在微量辐射能测量中（主要在红外技术中），光敏电阻阈灵敏度的概念有着重大意义。

在许多场合，重要的是要知道光通量引起电阻值的相对改变而不是比灵敏度。为此首先要求出光敏电阻的增量

$$\Delta R = R_T - R_0$$

式中 R_r ——暗电阻；

R_e ——亮电阻。

ΔR 的大小仅仅取决于光通量，而与光敏电阻上所加电压 U 无关。

要确定电阻的相对改变，我们将 ΔR 除以 R_r 。

如果知道对应于通量 Φ 的 $\frac{\Delta R}{R_r}$ (或以百分率表示) 及暗电阻 R_r ，则可计算亮电阻 R_e 。

确定了 R_e 的数量后，根据给定的负载 R_n 及电源电压的数值，可以很容易计算出电流 i_e 及 i_r 。

光敏电阻亦可用所谓电阻变化比来表示。这一物理量就是暗电阻与亮电阻之比 $\frac{R_r}{R_e}$ ，它与光通量的大小有关。因此，谈到电阻变化比时，必须先说明 Φ 的大小。

不同类型的光敏电阻，电阻变化比都不相同。苏联工业生产的光敏电阻，是在 1.2 到 500 范围内。

实际上也可以直接测量伏特灵敏度，以伏/瓦来表示，它指的是在一定光强照射下光敏电阻负载上的电压。

光敏电阻的光谱灵敏度是以一定波长辐射能通量(单色光)照射在光敏电阻上每单位功率所获得的光电流来表示的

$$K_\lambda = \frac{I_\Phi}{P_\lambda}$$

每一波长的光谱灵敏度可以用一个数字来表示。可是因为光敏电阻是在某一段光谱上敏感，所以光谱灵敏度用图表来表示比较方便。这种图表称为光谱特性，它给出光敏电阻的相对光谱灵敏度与辐射波长间的关系。

相对光谱灵敏度定义为比值 $\frac{K_\lambda}{L_{\lambda \text{ макс}}}$ 。 K_λ 是光敏电阻在

受波长 λ 的单色光照射时的灵敏度。而 $K_{\lambda_{max}}$ 为最大灵敏度, 它对应于某一固定的波长。在某些场合, 不用相对灵敏度而用光电流的相对变化来作光谱特性。

光敏电阻的光谱灵敏度以单色光通量的单位能量来计量, 以安/瓦为单位。

光敏电阻不同于外光电效应光电元件, 在较宽的光谱范围内都很灵敏: 由紫外域直到近红外域。

可见光的波长范围在 $0.4 \sim 0.76$ 微米, 红外线波长比它长, 紫外线波长比它短。

图 4 示出许多光敏电阻的光谱特性。

由图可见, 光敏电阻的敏感范围直延伸到红外区。

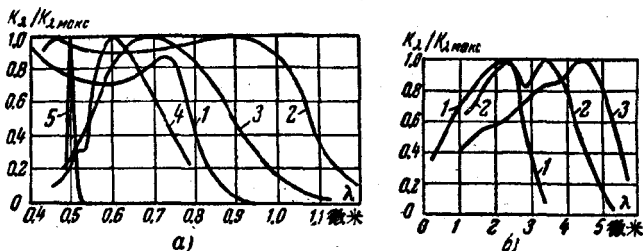


图 4 光敏电阻的光谱特性

- a—在可见光谱及近红外光谱区域内的灵敏度 1—硒; 2—硫化铅;
3—硫化铋; 4—硫化镉(多晶体); 5—硫化镉(单晶体)
b—在近红外光谱内的灵敏度 1—硫化铅; 2—硒化铅; 3—碲化铅

这种情况是由于使电子由满带迁移到导带所消耗的能量少于由光阴极表面取出电子所消耗的能量。

光敏电阻有很大的惯性, 这是它的缺点。这种惯性表现在光电流跟不上光通量的变化, 就是说当光敏电阻上的照度跃变时, 光电流并不立刻达到最终值, 而要经过一些时间。

当光敏电阻消去光照时也有这种现象。

通常用消光时光电流的下降来表示光敏电阻的慣性，可以认为这一过程是按指数規律变化，已足够准确。

因此，通常就取光电流减小 e 倍（自然对数的底 $e=2.7$ ）所经历的时间作为慣性的尺度。这一时间称为时间常数 τ ，各光敏电阻的时间常数各不相同。

图 5 示出了光敏电阻在光照与消光时电流的上升与下降曲线。

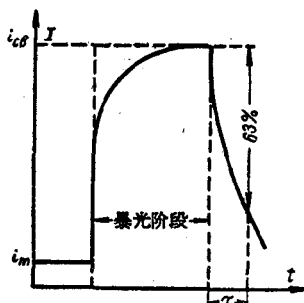


图 5 光敏电阻的慣性曲线

光敏电阻的慣性使光电流在很大程度上依从于光通量的调制频率，其间的关系是，随着频率增高，光电流减少。光电流与调制频率间的关系称为频率特性。

各种光敏电阻频率特性示于图 3g。

硫化铅光敏电阻慣性较小。光敏层的温度对光敏电阻的灵敏度有很大影响，是一项重要的缺点。图 3i 表示各种光敏电阻相对电阻与温度间的关系。不过利用硫化镉似乎有可能制作温度影响不大的光敏电阻。稳定性，亦即所有特性不随时间变化，是对光敏电阻提出的最重要的要求。

现在苏联工业生产以各种光敏电阻在一定使用条件下有足够高的稳定性。不过在许多光敏电阻中，高稳定性并不立

刻表現出来,而要經過一定时期,在此期間进行了电性能的最后稳定(老化)。光敏电阻各参数的稳定時間約为 300~400 小时,在此期間,有些类型电阻的灵敏度下降,而另一些則上升^[2]。在許多場合,光敏电阻需要在不正常的条件下使用。譬如光敏电阻要在高湿度(高于 80%)或液体介质中工作等情况。为此,生产一些带密封外壳的光敏电阻。

目前苏联工业部門生产的某些类型光敏电阻在短时脉冲下可达 100 毫安的光电流。因此,似乎有必要再引入一个参数——允許耗散功率。最后我們总结一下光敏电阻的主要优点与缺点,以便与真空光电管作比較,从而决定它在工业光电自动装置中的应用范围。

优点方面計有:

(1) 积分灵敏度高,超过某些真空光电管的灵敏度 120,000 倍;

(2) 耗散功率高,借光敏电阻可以控制功率达几瓦的电路;

(3) 尺寸小,重量輕,已有光敏面积小到 10^{-2} 毫米² 的光敏电阻試样。

缺点方面計有下列几点,这些缺点限制了它在工业自动化装置中的应用:

(1) 大多数类型光敏电阻均有慣性;

(2) 特性与温度有关,限制了光敏电阻在寬广的温度范围内使用;

(3) 光电流与輻射能通量間之关系是非綫性的;

(4) 同一型号的光敏电阻,其参数差別很大。