

电子技术教学小丛书

光电接收器件及其应用

张彤 编

高等教育出版社

内 容 简 介

本书是高等工业学校工科电工教材编审委员会电子技术编审小组组织评选的“电子技术教学小丛书”之一。内容有光电器件的基本知识、光敏电阻、半导体光电管、光电池、真空光电倍增管、光电耦合器件、光电变换器等六章。主要介绍非成像光电接收器件的工作原理、外特性、变换电路及信号的检取。各章末均附有思考题和习题。附录中还列出了一些光电器件的主要参数和典型的光电变换电路。

本书可作为大学生扩大知识面的阅读材料，也可供从事光电技术的工程技术人员和有关教师参考。

本书由西安交通大学唐立森副教授审阅。

电子技术教学小丛书 光电接收器件及其应用

张 彤 编

*

高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
上海市印刷四厂印装

*

开本 787×1092 1/32 印张 4.375 字数 88,000

1987年2月第1版 1987年2月第1次印刷

印数 00,01— 4,260

书号 15010·0570 定价 0.76 元

目 录

引言

第一章 光电器件的基本知识

1.1 入射光的基本度量单位.....	3
1.1.1 电磁波谱和光谱	3
1.1.2 通量单位	5
1.1.3 照度单位	6
1.1.4 辐射通量与光通量之间的关系	7
1.2 光电效应	8
1.2.1 光电导效应	8
1.2.2 光生伏特效应	10
1.2.3 外光电效应	12
1.3 光电器件的基本特性	13
1.3.1 灵敏度	13
1.3.2 光谱响应	15
1.3.3 频率响应	16
参考文献	17
思考题和习题	18

第二章 光敏电阻

2.1 光敏电阻的结构及种类.....	19
2.2 光敏电阻的基本工作原理	20
2.2.1 光电流	20
2.2.2 时间常数	23
2.2.3 耗散功率	24
2.2.4 噪声	25

2.3 光敏电阻的偏置电路	26
2.3.1 基本偏置电路	26
2.3.2 恒流偏置电路	29
2.3.3 恒压偏置电路	30
2.3.4 恒功率偏置电路	31
参考文献	33
思考题和习题	33

第三章 光生伏特器件

3.1 光生伏特器件的基本原理	35
3.1.1 光生伏特器件的电流特性	35
3.1.2 结电容	36
3.1.3 噪声	36
3.2 半导体光电管	37
3.2.1 光电二极管	37
3.2.2 光电三极管	44
3.2.3 光电场效应管	47
3.2.4 光电管的主要特性	48
3.3 光电管的基本电路	51
3.3.1 缓变信号的基本电路	51
3.3.2 交变信号的基本电路	53
3.4 光电池	59
3.4.1 光电池的结构及工作原理	60
3.4.2 光电池的基本电路	64
参考文献	68
思考题和习题	68

第四章 真空光电倍增管

4.1 真空光电倍增管的基本原理	70
4.1.1 光电发射	70

4.1.2 光电倍增管的工作原理	71
4.1.3 打拿极结构	73
4.2 真空光电倍增管的输出特性	75
4.2.1 主要特性	75
4.2.2 噪声	77
4.2.3 输出信号及等效电路	78
4.3 光电倍增管的供电电路	79
4.3.1 分压电阻的确定	79
4.3.2 分压电容	82
4.3.3 稳压电源	83
参考文献	87
思考题和习题	87

第五章 光电耦合器件

5.1 光电耦合器件的基本原理	89
5.1.1 结构原理	89
5.1.2 光电耦合器件的基本特性	90
5.2 光电耦合器件的基本电路	93
5.2.1 发光二极管的驱动电路	93
5.2.2 输出电路	94
参考文献	97
思考题和习题	97

第六章 光电变换器

6.1 光电变换器	99
6.1.1 光电变换器的基本形式	99
6.1.2 光电变换器的工作原理	105
6.2 光电器件接入电路的方式	106
6.2.1 温度补偿电路	106
6.2.2 差接式电路	107

参考文献	111
思考题和习题	112

附录 I 典型应用电路

附录 II 光电器件特性参数表

部分习题答案

引 言

光电技术是光学和电子技术相结合而产生的一门新学科，它的特点是用电子技术的方法对光学信息进行检测、传递、存储、控制、计算和显示。光电技术发展非常迅速，已得到了广泛应用。例如，在精密计量、红外探测、宇宙航行、激光雷达、夜视、空中侦察、光通讯、信息处理和计算技术等方面都应用了光电技术。由于光电检测精度高、速度快，是一种非接触式的检测方法，所以特别适用于生产过程中的自动检测和控制。在机床位移量的精确控制，生产过程中产品尺寸和外形的自动光电检测等方面，已经普遍应用到生产实践中去了。

为了深入了解光电技术，首先介绍光电装置的基本内容。图 0-1 为光电装置的一般方框图。图中表示光电装置的基本组成部分和信息变换过程。

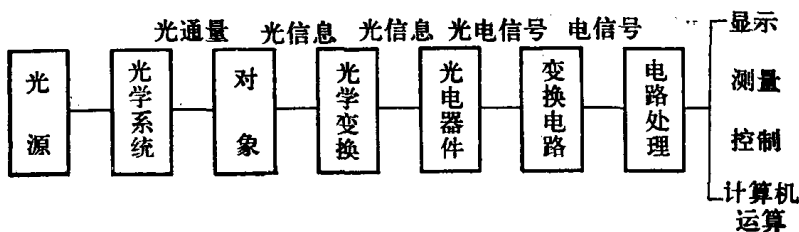


图 0-1 光电装置方框图

光是信息变换、处理和传递的媒介，所以光源是光电变换装置不可缺少的组成部分。光源发出的光通过光学系统一般

被会聚为点光源或为一束平行光,入射到被检测的对象上,由对象反射或透射的光通量与被测对象的性质和状态有关。所以,由对象反射或透射的光通量是一光信息量。

变换电路一般包括光电器件的偏置、负载和前置放大器。变换电路的作用是对光电信号进行检取和放大。光电器件转换的光电信号往往是很微弱的,所以要进行前置放大,以便于下一步进行再放大、传输和处理等。光电器件接入变换电路是很重要的一环,是整个变换技术的关键,变换电路性能的好坏直接影响电信号的质量。

电路处理是将电信号经过放大、整形、量化、逻辑变换等处理,变成显示、测量、控制和计算机运算的信号。

综上所述,光电变换技术的关键是光电信息的变换和检取。被检测和控制的对象都是非电量,如温度、照度、溶液浓度、速度、长度、角度、表面光洁度等等。这些非电量首先通过光学变换变成光信息量,然后通过光电器件转换成电信号。能够完成这种转换的光电器件有成象器件和非成象器件两类。本书着重讲述非成象光电接收器件的工作原理和特性,以及基本变换电路和信号检取。

第一章 光电器件的基本知识

1.1 入射光的基本度量单位

光电器件是光电信息转换的器件,其输出光电信息量与入射光的强弱和性质有关。为了深入了解光电器件的转换特性,先对入射光的最基本度量单位进行简单介绍。

1.1.1 电磁波谱和光谱

光和其他形式的电磁辐射一样,都是以约为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 的速度进行传播。可见光的频率甚高,约为每秒几百万亿次,因此,用波长来说明光的类型比用频率更方便些。光的波长 λ 、频率 ν 和光速 c 的关系为

$$\lambda \nu = c \quad (1-1)$$

图 1-1 列出了波长从 $10^{-10} \mu\text{m}$ 到 10^5 km 之间的全部电磁波谱^①。为了更清晰起见,将紫外光、可见光和红外光加以放大示出。

光的波长单位用 $\text{\AA}$ (埃)表示, $1 \text{\AA} = 10^{-10} \text{ m}$ 。

紫外光的光谱范围在 $0.01 \mu\text{m} \sim 0.38 \mu\text{m}$ 之间;可见光的光谱范围在 $0.38 \mu\text{m} \sim 0.78 \mu\text{m}$ 之间^②;红外光的光谱范围在 $0.78 \mu\text{m} \sim 1000 \mu\text{m}$ 之间。

① 参阅参考文献[5]5页。

② 见参考文献[4]15页。

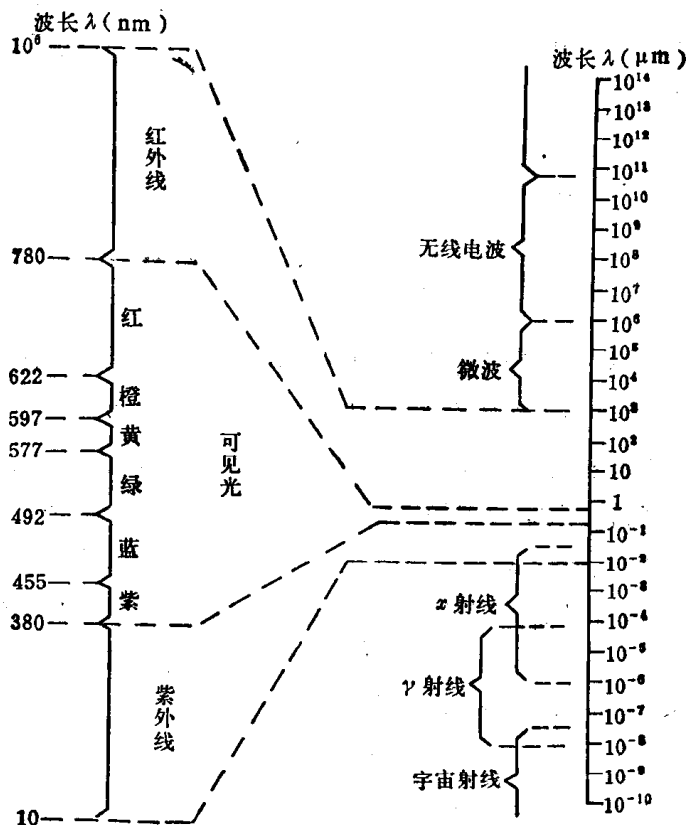


图 1-1 电磁波谱

光的基本度量有光度量和辐射量两种单位制。光度量是对可见光而言，与人眼的光谱范围一致，即在 $0.38\mu\text{m} \sim 0.78\mu\text{m}$ 之间。而辐射度量则包括整个光谱范围，即在 $0.01\mu\text{m} \sim 1000\mu\text{m}$ 之间。

入射到光电器件光敏面上的光，其基本度量单位有通量和照度两种。对于光度量则是光通量和光照度；而对于辐射度量则是辐射通量和辐照度。

1.1.2 通量单位

一、辐射通量

辐射通量^①是用来表示光源的辐射本领。光源表面一个元面积 dS 的辐射通量,即在单位时间内通过该元面积 dS 的辐射能,亦即辐射功率。我们称此功率为该元面积 dS 的辐射通量。若光源的辐射能 Q_e 是时间 t 的函数,辐射通量 ϕ_e 可表示为

$$\phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad (1-2)$$

式中 Q_e 的单位为 J (焦耳), t 的单位为 s (秒), ϕ_e 的单位为 W (瓦)。

二、光通量

人眼只对波长在 $0.38\mu\text{m} \sim 0.78\mu\text{m}$ 之间的辐射能引起视觉,而且即使在此范围内,人眼对不同波长光的视觉灵敏度也不一样。这就是说,人眼对光感觉的强弱不仅取决于光源辐射能量的大小,同时还取决于眼睛对辐射波长的视觉灵敏度。按人眼的感觉强度进行度量的辐射能大小称为光能,它和辐射能大小以及人眼的视觉灵敏度成正比。

在单位时间内通过元面积 dS 的光能,称为该元面积 dS 的光通量^②。若光能 Q_v 是时间 t 的函数,光通量 ϕ_v 可表示为

$$\phi_v = \frac{dQ_v}{dt} \quad (1-3)$$

① 可参阅文献[5]1~7页和文献[8]21~23页。

② 可参阅文献[3]157~159页和文献[5]17页。

式中若 Q_v 的单位为 $\text{lm} \cdot \text{s}$, t 的单位为 s , 则光通量单位为 lm (流明)。

1.1.3 照度单位

一、辐照度

辐照度是用来表示光源辐射到物体表面的辐射通量强弱的量。辐射到元面积 dS 的辐射通量 $d\phi_e$ 与该元面积 dS 之比称为辐照度 E_e ①, 即

$$E_e = \frac{d\phi_e}{dS} \quad (1-4)$$

在均匀辐射下, 则

$$E_e = \frac{\phi_e}{S} \quad (1-5)$$

式中 ϕ_e 的单位为 W , S 的单位为 m^2 , E_e 的单位为 W/m^2 。

二、光照度

与辐照度相对应的光照度, 是表示物体表面被光源照明强弱的量。照射到元面积 dS 的光通量 $d\phi_v$ 与该元面积 dS 之比称为光照度 E_v , 即

$$E_v = \frac{d\phi_v}{dS} \quad (1-6)$$

在均匀照明下

$$E_v = \frac{\phi_v}{S} \quad (1-7)$$

式中 ϕ_v 的单位是 lm , S 的单位为 m^2 , E_v 的单位为 lx (勒克斯)。

表 1-1 是辐射度量和光度量单位对照表。

① 可参阅文献[5]1~7页和文献[8]27~28页。

表 1-1 基本度量的单位和符号

辐射度量				光度量			
量的名称	符号	单位名称	代号	量的名称	符号	单位名称	代号
辐射能量	Q_e	焦耳	J	光能量	Q_v	流明·秒	lm·s
辐射通量	ϕ_e	瓦特	W	光通量	ϕ_v	流明	lm
辐照度	E_e	瓦特/米 ²	W/m ²	光照度	E_v	勒克司	lx

为了对光照度有些具体数值上的概念,表 1-2 列举了一些常见情况下的光照度的近似值^①。

表 1-2 一些实际情况下的光照度近似值

(单位为 lx)

无月夜天光在地面上所生的照度	3×10^{-4}
接近天顶的满月在地面所生的照度	0.2
办公室工作所必需的照度	20~100
晴朗的夏日在采光良好的室内照度	100~500
夏天太阳不直接照到的露天地的照度	1,000~10,000

1.1.4 辐射通量与光通量之间的关系

一个辐射光源所辐射的光,其中可见光只占一小部分,大部分为不可见光。而人眼对不同波长的光视感程度也不同,人眼对波长 $\lambda = 0.555 \mu\text{m}$ 的光最灵敏。在波长 $\lambda = 0.555 \mu\text{m}$ 处,由实验确定辐射通量与光通量的换算关系^②

$$1 \text{ W} = 683 \text{ lm}$$

① 参阅参考文献[1]137页。

② 参考文献[4]18~19页。

此换算关系对于不同测试条件也有差异。

在波长 λ 附近,对于波长间隔为 $d\lambda$ 的单色光来说,在引用眼睛的相对光谱灵敏度函数(相对视见函数) $V(\lambda)$ 表示^①后,其光通量为

$$d\phi_v = 683V(\lambda) \phi_e(\lambda)d\lambda \quad (1-8)$$

对于连续辐射光源(如钨灯),总的光通量等于在整个光谱内的积分

$$\phi_v = 683 \int_0^{\infty} V(\lambda) \phi_e(\lambda) d\lambda \quad (1-9)$$

1.2 光电效应

所谓光电效应是物质在光的作用下释放出电子的物理现象。光与物质的作用实质上是光子与电子的作用,电子吸收光子的能量后,改变了电子的运动规律。由于物质的结构和物理性能不同,以及光和物质的作用条件不同,所以,在光子作用下产生的载流子有不同的运动规律,即有各种不同的光电效应。

光电效应分为内光电效应和外光电效应。内光电效应又分为光电导效应和光生伏特效应。

1.2.1 光电导效应

图 1-2 为本征半导体能带简图。光入射到本征半导体材料后,处在满带中被束缚的电子吸收光子的能量,由满带跃过

① 参阅文献[3]157~158页。

禁带进入导带成为自由电子（用黑点表示），而在原来的满带中留下空穴（用圆圈表示）。光激发的电子-空穴对在外电场作用下，将同时参加导电。因此当光入射到半导体材料后，能改变半导体材料的导电性能，随着光强的增加，其导电性能越好，这种现象称为光电导效应。具有光电导效应的半导体材料称为光电导体。用光电导体制成的光电器件叫光敏电阻。

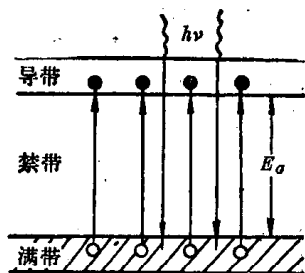


图 1-2 本征半导体能带简图

一个光子具有的能量为 $h\nu$ ， h 为普朗克常数， ν 为光的频率。光激发出的电子若能跃过禁带必须满足

$$h\nu \geq E_G \quad (1-10)$$

式中 E_G 为禁带宽度。由式(1-1)得

$$\nu = c/\lambda$$

所以，对应于某一波长 λ 的光子能量为 hc/λ 。从公式可看出，波长越短的光子能量越大，波长越长的光子能量越小。光激发电子的长波限(红限)①

$$\lambda_0 = \frac{hc}{E_G} = \frac{1.24}{E_G} \mu\text{m} \quad (1-11)$$

杂质半导体材料制成的光电导体，情况有所不同。光激发载流子主要是杂质起作用。图 1-3 为杂质光电导体能带简图。

N 型光电导体，主要是光子激发施主能级中的电子跃迁

① 参阅文献[7]26页。

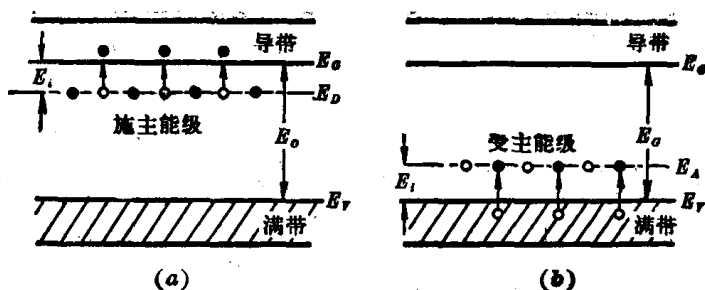


图 1-3 杂质光电导体能级简图
(a) N 型半导体 (b) P 型半导体

到导带中去,电子为主要载流子。P型光电导体,主要是光子激发满带中的电子跃迁到受主能级,与受主能级中的空穴复合,而在满带中留有空穴,作为主要载流子参加导电。只要光子能量满足

$$h\nu \geq E_i \quad (1-12)$$

就能激发出光生载流子。式中 E_i 为禁带中的施主能级 E_D 与导带 E_C 能级差(N型光电导体),或受主能级 E_A 与满带 E_V 能级差(P型光电导体)。光电导体的长波限为

$$\lambda_0 = \frac{1.24}{E_i} \mu\text{m} \quad (1-13)$$

可见,掺入杂质后,由于 E_i 比 E_G 小得多,可使长波限向红外扩展。

1.2.2 光生伏特效应

光生伏特效应产生在PN结型光电器件里。半导体PN结的导电特性在学习半导体晶体管时已经知道,半导体光电器件PN结的结构和特性与晶体管有相同之处。PN结光电器件的结构同样有两种型式,一种是以N型半导体为基片进

行P掺杂形成PN结；一种是以P型半导体为基片进行N掺杂形成PN结。下面以PN结的结构和能带简图(图1-4)说明光生伏特效应^①。

图1-4所示是N型硅为基片进行P掺杂而形成的PN结,在P端面处是入射光敏面。光入射半导体内部,光子将激发出电子-空穴对。这种激发现象有的在P区内产生,而大部分在耗尽层内激发,这样能提高转换效率。电子由满带被激发到导带后,而在满带中留有空穴,在内电场(位垒差)作用下,自由电子流向N区,而空穴流向P区,这样使PN两端产生电位差(电压),P端为正,N端为负。这种电位差值是由于入射光子激发的结果,所以称为光生伏特效应。如果在PN两端外接负载电阻 R_L ,则有光电流 I_ϕ 由P端流经负载电阻 R_L 到N端。

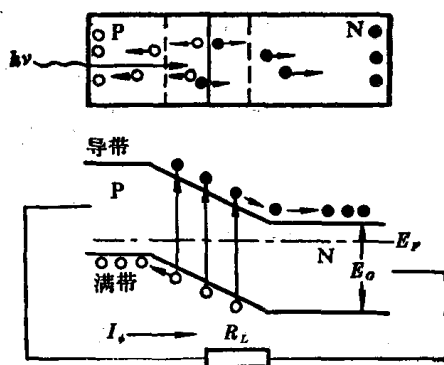


图1-4 PN结和能带简图

光子激发出电子-空穴对的条件为

① 参阅文献[9]317~321页。