

电子技术教学小丛书

光电成像器件及其应用

张彤编

高等教育出版社

15

内 容 简 介

本书是电子技术教学小丛书之一，是继《光电接收器件及其应用》（小丛书之一）之后编写的。前册主要介绍非成象光电器件及其应用，本册重点介绍成象器件的工作原理、外特性、图象信号变换和检取，内容包括：变象管和象增强器、摄像管和电荷耦合摄像器件等。每章附有例题、思考题和习题，在附录中列有一些成象器件的主要参数和应用电路。

本书可供大专文化水平以上的科技人员作为自学光电器件课程的教科书，也可作为有关专业本科生和研究生的参考书。

本书责任编辑章浩平。

电子技术教学小丛书

光电成象器件及其应用

张彤 编

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京二二〇七工厂印刷

开本787×1092 1/32 印张4.25 字数91 000

1987年2月第1版 1987年2月第1次印刷

印数 00 001—2 540

ISBN 7-04-000098-9/TN·7

定价 0.83 元

序 言

本册书是按照《电子技术教学小丛书征稿简则》编写的，可作为高等学校《电子技术基础》课程的教学小丛书。

本册是继《光电接收器件及其应用》小丛书之后编写的。前册主要介绍非成象光电器件及其应用，同时还介绍了有关光的基本知识。因此，本册不再叙述有关光的量度及单位。本册编写内容的重点是光电成象器件的结构、工作原理、外特性、图象信号变换及检取等。在书中附有计算例题、思考题和习题，在附录中列出一些光电成象器件的主要参数和应用电路。本册编写的目的是使读者能正确使用光电成象器件，并能利用所学的电子技术基础知识达到初步设计和调试应用电路的能力。

在本书编写过程中得到了西安交通大学沈尚贤教授和北京工业学院周立伟副教授的热情指导。浙江大学缪家鼎副教授进行认真的审稿，写出详细的评审和修改意见。在此一并致以衷心感谢。

由于编者教学水平所限，再加上光电成象器件的应用还不广泛，搜集的资料不多，因此，书中必然存在许多缺点和错误，恳切希望兄弟院校师生和其他读者给予批评和指正。

编者

1986年6月

目 录

第一章 概 述

1.1 光电成象器件的类型	1
1.1.1 直接显示型光电成象器件	2
1.1.2 间接显示型光电成象器件	3
1.2 光电成象器件的基本特性	4
1.2.1 光谱响应	4
1.2.2 转换特性	4
1.2.3 分辨率	9

第二章 变象管和象增强器

2.1 变象管和象增强器的工作原理	13
2.1.1 象管的基本原理	13
2.1.2 光电阴极	15
2.1.3 电子光学系统	16
2.1.4 荧光屏	19
2.2 变象管	20
2.2.1 近贴式变象管	20
2.2.2 静电聚焦式变象管	22
2.2.3 选通式变象管	23
2.2.4 X射线变象管	25
2.3 象增强器	27
2.3.1 级联式象增强器	27
2.3.2 透射式二次电子发射象增强器	28

2.3.3 微通道板象增强器	30
2.4 象管的特性	32
2.4.1 放大率和畸变	32
2.4.2 转换系数和亮度增益	33
2.4.3 暗背景亮度和等效背景照度	36
2.5 高压电源	37
2.5.1 工作原理	37
2.5.2 设计中注意的几个问题	39
思考题和习题	41

第三章 摄 象 管

3.1 摄象管的一般原理	43
3.1.1 图象顺序传送	43
3.1.2 聚焦和偏传	45
3.2 视象管	48
3.2.1 结构	48
3.2.2 工作原理	49
3.3 视象管靶	51
3.3.1 氧化铅靶	51
3.3.2 硅靶	56
3.3.3 异质结靶	58
3.4 光电发射式摄象管	59
3.4.1 增强硅靶摄象管	60
3.4.2 二次电子电导摄象管	61
3.4.3 微光摄象管简介	65
3.5 摄象管的基本电路	66
3.5.1 基本偏置电路	66

3.5.2 噪声	69
3.5.3 前置放大器	72
思考题和习题	76

第四章 电荷耦合摄象器件

4.1 CCD 的 MOS 结构及工作原理	77
4.1.1 MOS 结构及工作原理	77
4.1.2 MOS 结构的非稳态特性	79
4.2 电极结构及工作原理	81
4.2.1 三相 CCD	81
4.2.2 二相 CCD	84
4.3 电荷传输	86
4.3.1 传输效率	86
4.3.2 传输损失	87
4.4 电荷注入和检取	92
4.5 CCD 摄象器件	94
4.5.1 线阵 CCD	95
4.5.2 面阵 CCD	99
4.5.3 CCD 摄象器件的主要特性	103
4.6 驱动电路	104
思考题及习题	108
参考文献	109
附录一 成象器件参数	112
(一) 象管特性参数	112
(二) 摄象管特性参数	117
(三) CCD 特性参数	119
附录二 象管供电电路	121

(一) 高压供电电路	121
(二) 手调增益(亮度)控制电路	122
附录三 摄像器件应用电路	124
(一) 摄像管放大电路	124
(二) CCD 放大电路	124

第一章 概 述

1.1 光电成象器件的类型^[1,3,4,6~8]

用眼睛观察周围图象信息是人类生存、生产活动和科学实践的需要。因此,从古至今人人都珍惜自己的视力。但是,用人眼直接观察图象信息还受到种种限制:(1)光谱限制,人眼仅对波长为 $0.38\sim 0.78\ \mu\text{m}$ 的光敏感;(2)灵敏度限制,当可见光减弱到一定程度(如夜间)人的视觉近于丧失;(3)分辨率限制,没有足够的亮度对比或物体间距,就无法分辨图象细节;(4)时间限制,人眼只能实时观察景象,但是,观察过的景象不能保留在视觉上。为此,很早以前人类就在扩展视觉功能方面进行了大量的工作和探索,并取得了显著的成效。例如,望远镜延长了人眼的视见距离;显微镜扩展了人眼观察微小物体的能力;照相技术可以长期保存景象等等。可是,应用光电成象技术来扩展视见光谱范围和视见灵敏度等方面的工作还是近半个世纪的事情。

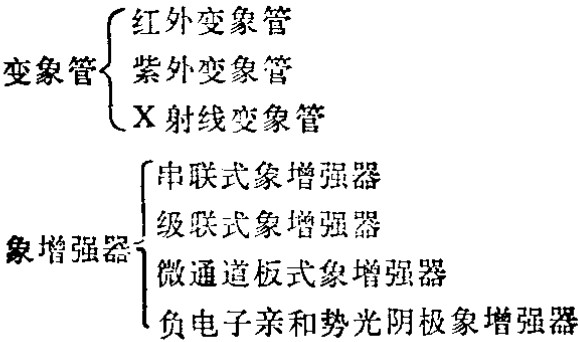
二十世纪光电子学技术发展非常迅速,并形成了一门新的学科。直接观察式成象器件由四十年代的变象管,五十年代的象增强器,六十年代的微通道板象增强器,发展到今天的微光夜视。象管(变象管和象增强器总称)可以将红外、紫外和X射线图象转换并增强为可见图象,这样便大大地扩展了人眼的视觉功能。电视摄象器件在近二十年内已经发展到相当成熟的阶段。新型视象管、二次电子电导管和增强硅靶管的出现大大提高了摄象管的灵敏度和分辨率。热释电视象管

的研制为红外电视开拓了新的前景。电荷耦合固体摄像器件的发明是摄像器件领域中的一次革命。如今摄像器件已被成功地应用在广播电视、工业电视、军用电视、微光电视和红外电视等各个领域。

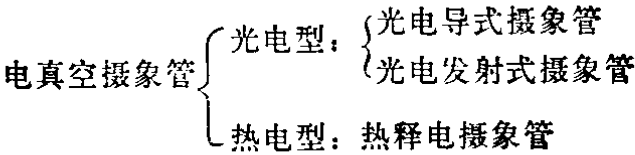
总之,光电成像技术现在已成为一个重要的技术领域,它在我国实现四个现代化的过程中必将发挥重要作用。

目前,各种功能的光电成像器件已构成系列。下面我们进行简单的分类,以便对它有一个概略的了解。

直接显示型:



间接显示型:



固体摄像器件:电荷耦合摄像器件

1.1.1 直接显示型光电成像器件

直接显示型光电成像器件用于直接观察的仪器中,器件本身具有图象的转换、增强和显示等部分。例如,变象管和象增强器属于这类器件。它的工作过程:景象通过外光电效应转换为电子图象;电子图象进行增强;经过增强的电子图象被聚焦在荧光屏上产生可见光图象。

直接显示型光电成象器件按接收的辐射波段又分为两种。一种是接收不可见辐射图象(包括红外、紫外和X射线图象),然后把它转换成可见图象,这种仪器称为变象管。例如,红外变象管和X射线变象管等,其中红外变象管多用于主动式红外夜视技术中。另一种是把接收到的微弱光的图象增强到在荧光屏上可以观察或摄像的程度,这种器件称为象增强器。例如,串联式象增强器,级联式象增强器,二次透射式象增强器,微通道板式象增强器等。这类器件通常用于被动式夜视技术、高速摄影技术、天文观测、以及医疗诊断和金属探伤等方面。

1.1.2 间接显示型光电成象器件

间接显示型器件一般用于电视技术中的摄像方面。器件本身具有图象的转换、存储和扫描等部分。它的工作过程,景象通过光电转换在靶面上积累电荷图象;电子束扫描输出视频电信号。因此,这类器件本身不能显示图象,其输出信号可供图象信息传输和处理等。间接显示型器件按其结构和工作原理分为电真空摄像器件和固体摄像器件两类。

电真空摄像器件按图象转换的物理效应分光电效应和热释电效应两类。光电效应的摄像器件又分内光电效应摄像器件和外光电效应摄像器件两种。内光电效应摄像器件通常称为视象管,例如,硫化锑管、氧化铅管、硅靶管和异质结靶管等。外光电效应摄像器件可称为光电发射式摄像管,例如,二次电子电导(SEC)管和增强硅靶(SIT或SEM)管等。

基于热释电效应的摄像器件为热释电摄像管,例如,硫酸三甘肽(TGS)热释电摄像管和氟铍酸三甘肽(TGFB)热释电摄像管等。

电荷耦合器件(CCD)是固体摄像器件。它将图象的转换、寄存、扫描和输出等部分实现了固体化。因此,它是摄像器件的一次革命,必将促进电视技术和夜视技术的迅速发展。

1.2 光电成像器件的基本特性^[1,2,3~5]

1.2.1 光谱响应

光电成像器件的光谱响应取决于光电转换材料(光敏材料)的光谱响应,其短波限有时决定于窗口材料的吸收特性。例如,属于外光电效应的象管和光电发射式摄像管的光谱响应由光阴极材料决定;属于内光电效应的视象管和 CCD 摄像器件的光谱响应则分别由光电靶材料和硅材料决定;热释电摄像管基于热释电效应,所以它能无选择性地吸收辐射光谱,其光谱响应特性近似直线。

图 1-1 示出了三种成像器件的光谱响应特性。图示光谱响应曲线表明,由于象管、摄像管和 CCD 三种器件的光电转换材料不同,因而它们的光谱响应特性有很大差异。

在选用光电成像器件时,应当考虑器件的光谱范围与被观测目标的辐射光谱范围要尽量一致或接近。这就是通常所说的辐射源与器件的光谱分布之间的匹配关系,即光谱匹配。如果选用合适的成像器件,达到良好光谱匹配条件,将使整个观测系统获得更高的灵敏度。

1.2.2 转换特性

转换特性通常被定义为器件的输出物理量与对应的输入物理量的比值关系。转换特性的参量有灵敏度(或响应度)、转换系数及亮度增益等。如果器件的输入量与输出量用量子

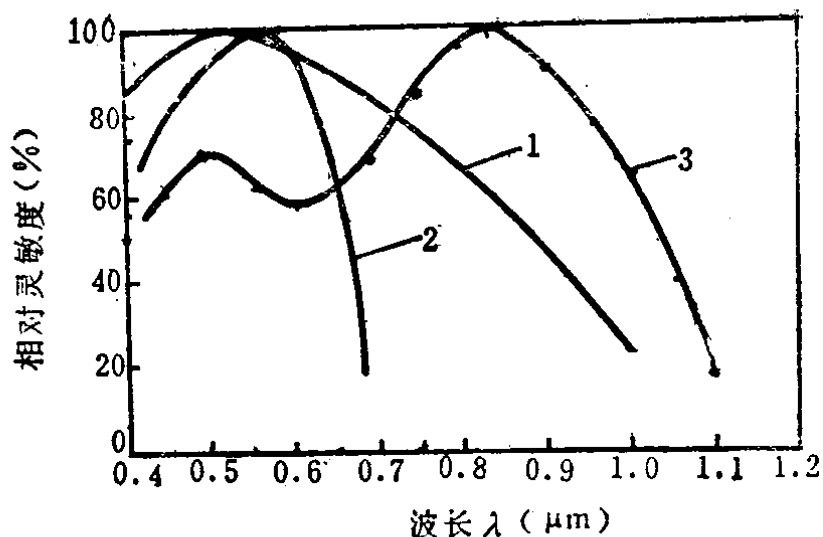


图 1-1 光谱特性曲线示意图

1——多碱铯化物光阴极象管；2——氧化铅摄像管；3——CCD 摄像器件

数表示时,则转换特性的参量为量子效率。

象管的输入量有辐射和光度二种度量单位^①,输出量为光度量单位,而每种度量的量和单位又较多,因此,表示象管转换特性有很多参量。目前,表示象管转换特性的参量大体上有两种:一是转换系数;二是亮度增益。

例如,红外变象管和X射线变象管的输入量为辐射量,输出量为光度量,它们的转换特性通常用转换系数表示。若红外变象管的输入量为辐通量(ϕ_e)或辐照度(E_e),输出量为光通量(ϕ_v)或光出射度(M_v)时,红外变象管的转换系数(Conversion Coefficient,简记为 C.C.)按定义 C.C. 表示为

$$C.C. = \frac{\phi_v}{\phi_e} \quad (\text{lm/W})$$

或

(1-1)

^① 参阅文献[2]1-1节。

$$C.C. = \frac{M_v}{E_v} \quad (\text{lm/W})$$

X射线变象管的输入量设为照射量率($\dot{X}$), 其单位为伦琴每秒(R/s), 输出量为亮度(L_v), 则X射线变象管的C.C.表示为

$$C.C. = \frac{L_v}{\dot{X}} \left(\frac{\text{cd/m}^2}{\text{R/s}} \right) \quad (1-2)$$

当象管的输入量和输出量采用光度量单位时, 一般用亮度增益(G_L)来表示象管的转换特性。通常它的定义^①是: 象管荧光屏的光出射度(M_v)与照射在光电阴极上的照度(E_v)之比, 即

$$G_L = \frac{M_v}{E_v} \quad (\text{倍}) \quad (1-3)$$

按式(1-3)定义, G_L 是无量纲的。因为荧光屏可以看成是朗伯发光体(余弦发光体), 其亮度 L_v 与光出射度 M_v 之间的关系为

$$M_v = \pi L_v$$

因此

$$G_L = \pi \frac{L_v}{E_v} \quad (\text{cd/lm}) \quad (1-4)$$

按式(1-4)定义的亮度增益是有单位的, 其单位为 $(\text{cd/m}^2)/\text{lx} = \text{cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx}) = \text{cd/lm}$ 。

摄象器件的输出量为信号电流, 而输入量有辐射量和光度量, 因此, 摄象器件的灵敏度单位也较多。若摄象器件的输入量为辐照度(E_v)或辐通量(ϕ_v)时, 按着定义灵敏度 S 表示

① 参阅文献[1] 181~182页。

为

$$S = \frac{I_s}{E_v} \quad (\mu\text{A}/\mu\text{W}/\text{cm}^2)$$

或

$$S = \frac{I_s}{\phi_v} \quad (\mu\text{A}/\mu\text{W}) \quad (1-5)$$

式中 I_s 为 摄像器件的信号电流。若摄像器件 的输入量为光照度(E_v)或光通量(ϕ_v)时,则 S 表示为

$$S = \frac{I_s}{E_v} \quad (\mu\text{A}/\text{lx})$$

或

$$S = \frac{I_s}{\phi_v} \quad (\mu\text{A}/\text{lm}) \quad (1-6)$$

为了保证摄像器件的光电转换特性为线性,希望 器件的灵敏度 S 在一定范围内为一恒定量。

在双对数坐标上描绘信号电流与照度的关系 曲线,其曲线的斜率称为“ γ ”特性。

令 I_s 表示信号电流, E_v 表示照度,则有

$$\ln I_s = \ln A + \gamma \ln E_v \quad (1-7)$$

式中 A 为常数。

电视系统的 γ 值关系到大面积信号灰度等级在转换过程中有无丧失。若 $\gamma=1$ 则从输入(景物)到输出(图象)的灰度等级没有丧失。若 $\gamma<1$,则强光信号受到压缩。反之,若 $\gamma>1$,则对比度低的输入信号得到提高。

摄像管的 γ 特性决定于光电转换元件(光阴极或光电靶)的特性。一般光电阴极的 γ 值等于 1, 光导靶 的 γ 值小于 1, 硅靶的 γ 值近似为 1。

器件的量子效率一般定义为单位时间内器件发射的量子数与入射器件的量子数之比。通常用量子效率来描述入射光与光电转换元件之间的相互作用程度,即表示光电转换元件的转换特性。因为光和光电转换元件之间的相互作用与光的波长有关,所以,量子效率通常被定义在某一特定波长 λ 上,即用单色量子效率 η_λ 表示, η_λ 定义^①为

$$\eta_\lambda = \frac{\text{每秒发射的光电子数}}{\text{每秒波长为}\lambda\text{的入射光子数}} \quad (1-8)$$

由式(1-8)可知,量子效率 η_λ 是无量纲的。 η_λ 的值为1,意味着入射一个光子就能发射一个光电子(或产生一对电子-空穴对),实际上光电转换元件的 η_λ 值小于1。

如果用量子效率来表示具有内增益器件的转换特性时,量子效率包含有增益,该值要比1大很多倍。

光电转换元件的量子效率与灵敏度之间的关系式可进行如下推导:光电转换元件每秒发射的光电子数可用下式表示

$$\frac{I_s}{q} = \frac{S_\lambda \phi_{e,\lambda} d\lambda}{q} \quad (1-9)$$

式中 I_s 为转换元件输出的信号电流, q 为电子电荷, S_λ 为转换元件的单色灵敏度, $\phi_{e,\lambda}$ 为单位波长的辐通量, $d\lambda$ 为波长增量(窄带)。在波长窄带 $d\lambda$ 内入射转换元件的辐通量为 $\phi_{e,\lambda} d\lambda$,换算成每秒入射光子数为

$$\frac{\phi_{e,\lambda} d\lambda}{h\nu} = \frac{\lambda \phi_{e,\lambda} d\lambda}{hc} \quad (1-10)$$

式中 $c = \nu\lambda$, c 为光速, ν 和 λ 分别为辐射的频率和波长, h 为

① 参阅文献[5]121页。

普朗克常数。将式(1-9)和式(1-10)代入式(1-8)得到

$$\eta_{\lambda} = \frac{S_{\lambda} h c}{q \lambda} \quad (1-11)$$

常数 $h c / q = 1.23985 \times 10^{-6} (\text{W} \cdot \text{m} / \text{A})$, 所以

$$\eta_{\lambda} = \frac{1.23985 S_{\lambda}}{\lambda} \quad (1-12)$$

式中 λ 单位为 μm 。

1.2.3 分辨率

分辨率是用来表示能够分辨图象中明暗细节的能力。分辨率通常有两种方式来表示:一种是极限分辨率;另一种是调制传递函数。分辨率有时也称为鉴别率或分解力等。

测量成象器件的极限分辨率时,要用专门的测试卡来进行。在测试卡上有几组不同宽度的黑白线条,黑白线条要等宽度,而且它们之间的对比度要尽可能大。通过光学系统把测试卡上的线条成象到器件的光阴极(或光电靶)上,并在器件的荧光屏(或显象管的屏幕)上显示出来。然后用人眼观察,人眼能分辨的最细线条数就是器件的极限分辨率。对于不同类型的器件其极限分辨率的表示方法也不一样。例如,象管的极限分辨率用每毫米线对数(lp/mm)表示;摄象器件的极限分辨率用在图象(或光栅)范围内所能分辨的等宽度黑白线条数来表示。摄象器件的分辨率又有水平分辨率和垂直分辨率之分。如在水平宽度内最多能分辨 300 对垂直的黑白线条,则水平分辨率为 600 线;若在垂直高度内最多能分辨 250 对水平的黑白线条,则垂直分辨率为 500 线。

用人眼分辨的方法带有很大的主观性。为了客观地表示成象器件的分辨率,一般采用调制传递函数 (Modulation

Transfer Function), 简记为 MTF。

成象器件的调制传递函数的测试是通过正弦扫描板或黑白相间的线条光栅调制光信号, 然后用光电方法测量器件的输入、输出调幅波信号的幅值大小, 最后通过计算得到 MTF 与空间频率的关系曲线。一般采用光栅调制方法, 如果调制信号为非正弦(例如矩形), 可以用电学方法滤掉高次谐波, 得到正弦信号。

一黑一白线条为一“线对”, 透过对应光的亮度为一暗一亮, 构成调制信号的一个周期。每毫米长度上所包含线对数为空间频率, 单位是“线对/毫米”, 符号为 lp/mm。如在 1 mm 长度上包含 5 对黑白相间的线条, 则空间频率 $f = 5 \text{ lp/mm}$ 。设调幅波信号的最大值为 $A_{\max}$, 最小值为 $A_{\min}$, 平均值为 A_0 , 振幅为 A_m , 则调制度 M (有时也称对比度) 的定义为

$$M = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} + A_{\min}} = \frac{A_m}{A_0} \tag{1-13}$$

所以, M 为调幅波振幅与平均值之比。图 1-2 注示了调制度

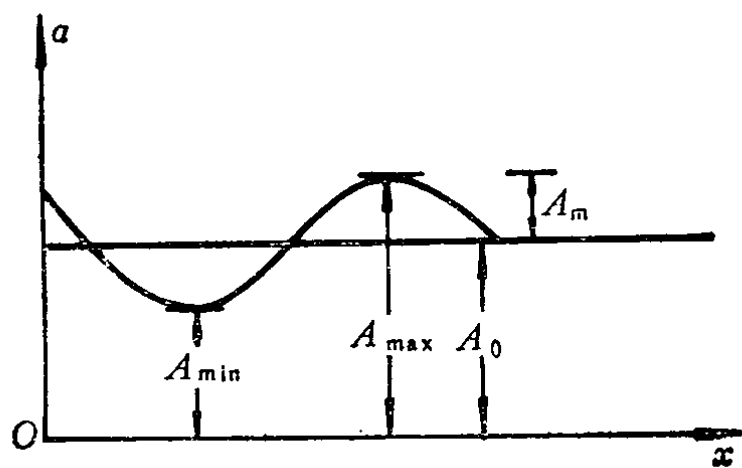


图 1-2 调制度定义