

GUANG DIAN JISHU JICHU

普通高等院校光电工程系列“十二五”规划教材

光电技术基础

苏俊宏 尚小燕 弥谦 编著



國防工業出版社
National Defense Industry Press

普通高等院校光电工程系列“十二五”规划教材

光电技术基础

苏俊宏 尚小燕 弥谦 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

全书分为八章。第一章为光电技术及光电器件基础,主要介绍半导体物理基础、光电效应、光电器件的分类及其特性评价。第二章介绍发光器件及其应用。第三章介绍常用的半导体光电器件的工作原理、特性参数及其应用。第四章、第五章介绍以光电发射现象为基础而发展起来的真空光电器件、光电成像器件以及摄像管的工作原理、特性参数。第六章介绍固体成像器件及其应用,主要以电荷耦合器件为主。第七章介绍光电耦合器件及其应用。第八章以应用为目的,重点介绍几种典型的光电系统。

本书可作为测控技术与仪器、光信息科学与技术、光电信息工程、精密仪器等专业的教材;也可作为从事光学技术与光电工程、检测及计量技术、自动化仪器仪表、信息工程、产品质量检测与控制等有关专业工程技术人员与科技人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

光电技术基础 / 苏俊宏, 尚小燕, 弥谦编著. —北京: 国防工业出版社, 2011. 10
普通高等院校光电工程系列“十二五”规划教材
ISBN 978 - 7 - 118 - 07635 - 6

I. ①光... II. ①苏...②尚...③弥... III. ①光电技术 - 高等学校 - 教材 IV. ①TN2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 192855 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 16 1/4 字数 384 千字

2011 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 30.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前 言

光电技术是光学和电子技术相结合而产生的一门学科。光电技术的科学基础之一是近年来发展起来的光电子学,光电子学以研究物质中电子与光子的相互作用为主要任务,是一门以光电系统中光和电信号的形成、传输、采集、变换及处理方法为研究对象的技术学科,其处理对象可以是光学的、电学的或其他非光学量。光电技术的核心是光电器件,它包含两大类:光—电器件和电—光器件。前者将光辐射转变为电信息,主要分为光电探测器件和作能源转换用的太阳能电池。后者将电信息转换为光辐射,常用的器件则有发光二极管与激光器。

光电转换技术是研究应用一定的器件及手段,在一定条件下,如何使光能(光信息)转换成电能(电信息)、电能转换成光能的一门技术。能使光能转换成电能、电能转换成光能的器件称为光电探测器件或光电器件,也就是说,光电器件就是能够接收、发射某种电磁辐射的电子器件。这里,某种电磁辐射指光学辐射。光学辐射波包括紫外线、可见光、红外线。将光辐射转换成电信息的器件称为接收器件,电信息转换成光辐射的器件称为发射器件。

光电器件的用途主要有两类。其一是用来察觉微弱光信号的存在和测量光信号的强弱,这里主要考虑的是器件探测微弱光信号的能力。作为这一用途的器件,通常称为“探测器”,或者严格地称作“辐射探测器”。其二是在自动控制中作为光电转换器,这里主要考虑的是光电转换效能。除这两类主要用途外,还有一些特殊用途。例如,把光电器件作为电源看待,称为光电池。专为转换太阳光能而设计的光电器件,称为太阳能光电池,主要考虑的是光能转变成电能的转换效率。

近年来,综合性的自动化、智能化光电系统的类型日益增多,其应用方面也越来越广泛。这些系统是光学、精密机械、微电子学、电子学、信息理论与科学、计算机科学技术等多种学科成果的综合应用。现代的光学仪器,已经从简单的光学机械结构形式,发展为现代光学、精密机械、电子技术、计算机技术相结合的综合性仪器。随着光学仪器与光电技术、电子技术和计算机技术越来越紧密地结合,原来主要以光学、机械为主的仪器,逐渐增加电的比重,量变引起质变,开辟了光电仪器(也称光电装置)的新领域。特别是目视光学仪器中人的眼睛,已经逐渐从光学仪器中解放出来。由数字、数符、图像等屏视显示设备代替人眼对光学

信息进行接收,使光学仪器的自动化程度和测量精度向更高级发展。

全书共七章,第一章到第四章及第八章由苏俊宏编写,第五章、第六章由尚小燕编写,第七章由弥谦编写,全书由苏俊宏统稿。

由于编者水平有限,书中的缺点错误在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2011 年于西安

目 录

第一章 光电技术及光电器件基础	1
1.1 光电技术及其特点、应用和发展	2
1.1.1 光电技术的发展	2
1.1.2 光电信息系统	2
1.1.3 光电技术和光电检测	4
1.1.4 光电技术的特点、应用和发展	5
1.2 半导体物理基础	6
1.2.1 半导体的能带和种类	6
1.2.2 I 型、N 型和 P 型半导体	7
1.2.3 热平衡条件下的载流子浓度	8
1.2.4 载流子的运动	11
1.2.5 半导体的结	14
1.2.6 光辐射与半导体的相互作用	22
1.3 光电效应	25
1.3.1 光电效应概述	25
1.3.2 光电效应的分类	26
1.3.3 光电效应的几种现象	26
1.4 光电器件的分类	31
1.4.1 按工作波段分	31
1.4.2 按应用分	31
1.4.3 按反应机理(结构形式)分	32
1.5 光电器件特性及评价基础	32
1.5.1 响应特性	32
1.5.2 噪声特性	39
1.5.3 光电器件的空间分辨特性	42
1.6 光电器件主要参数的测试	48
1.6.1 响应率的测试	48
1.6.2 光谱响应率函数的测试	49
1.6.3 调制传递函数的测试	49
思考题与习题	52
参考文献	52

第二章 发光器件及其应用	53
2.1 电致发光原理	53
2.1.1 电致激发过程	53
2.1.2 辐射复合与非辐射复合过程	53
2.1.3 注入式半导体发光器件的量子效率	55
2.2 发光二极管结构与原理	57
2.2.1 发光二极管的结构原理	57
2.2.2 发光二极管的材料选择	58
2.2.3 发光二极管(LED)使用须知	58
2.3 发光二极管的特性与参数	59
2.3.1 伏安特性	59
2.3.2 光谱特性	59
2.3.3 发光特性	60
2.3.4 温度特性	61
2.3.5 辐射效率 η_r	61
2.3.6 发光二极管的参数	63
2.4 半导体激光器	63
2.4.1 激光的产生	64
2.4.2 PN 结注入式半导体激光器	66
2.4.3 半导体激光器的性能	69
2.5 发光器件的应用	71
2.5.1 发光二极管应用实例	71
2.5.2 半导体激光器的应用	74
参考文献	75
第三章 半导体光电器件	76
3.1 光电导型光电探测器件	76
3.1.1 光电导特性分析	76
3.2 光敏电阻	83
3.2.1 光敏电阻的工作原理	84
3.2.2 光敏电阻的结构及种类	84
3.3 势垒型光电探测器件	94
3.3.1 光电池	94
3.3.2 光电二极管	100
3.3.3 光电三极管	109
3.3.4 光电场效应管	112
思考题与习题	113
参考文献	114

第四章 真空光电器件	115
4.1 光电发射与二次电子发射	115
4.1.1 光电发射	115
4.1.2 二次电子发射	117
4.1.3 倍增极(打拿极)	118
4.2 光电管	119
4.2.1 真空光电管	119
4.2.2 充气光电管	124
4.2.3 光电管的应用——普朗克常数的测定	126
4.3 光电倍增管	128
4.3.1 光电倍增管的工作原理及结构	128
4.3.2 光电倍增管的主要性能和参数	134
4.3.3 光电倍增管使用注意要点	139
4.3.4 光电倍增管的应用	139
4.3.5 光电倍增管应用中的几个问题	141
思考题与习题	143
参考文献	143
第五章 光电成像器件	144
5.1 像管及其成像的物理过程	144
5.1.1 光电成像原理的产生及发展	144
5.1.2 光电成像器件的类型	145
5.1.3 像管成像的物理过程	146
5.2 像管的工作原理与结构	148
5.2.1 光电阴极	148
5.2.2 电子光学系统	149
5.2.3 荧光屏	150
5.2.4 光学纤维面板	150
5.3 像管主要特性分析	152
5.3.1 光电转换特性及参数	152
5.3.2 时间响应特性	156
5.3.3 噪声特性	158
5.3.4 光学特性	159
5.4 变像管	161
5.5 像增强器	162
5.5.1 第一代微光像增强器	162
5.5.2 第二代微光像增强器	163
5.5.3 负电子亲和势(NEA)光电阴极像增强器	168

5.5.4 X 射线像增强器	169
5.6 摄像管	169
5.6.1 摄像管的分类和基本原理	170
5.6.2 摄像管的主要参数	172
思考题与习题	177
参考文献	177
第六章 电荷耦合器件	178
6.1 电荷耦合器件的基本原理	178
6.1.1 MOS 电容器的结构及性质	178
6.1.2 电荷耦合器件的工作条件及要求	180
6.1.3 电荷耦合器件的势阱深度与表面势的关系	181
6.1.4 CCD 的电荷耦合原理及信号传输	182
6.2 电荷耦合器件的基本结构	184
6.2.1 三相电极结构(三相 CCD)	184
6.2.2 二相电极结构(二相 CCD)	186
6.2.3 体内(埋沟)转移信道结构	187
6.3 电荷耦合器件的特征参数	189
6.3.1 转移效率及转移损失率	189
6.3.2 电荷存储能力	191
6.3.3 电荷耦合器件的噪声	192
6.3.4 暗电流	194
6.3.5 调制传递函数	195
6.3.6 电荷耦合器件的动态范围	196
6.3.7 功耗	196
6.4 电荷耦合成像器件	197
6.4.1 电荷耦合成像器件的原理与结构	197
6.4.2 一维(线阵)电荷耦合成像器件(LCCID)	198
6.4.3 二维(列阵或面阵)电荷耦合成像器件(ACCID)	202
6.4.4 电荷耦合成像器件性能分析	204
6.5 微光电荷耦合成像器件	207
6.5.1 光学耦合像增强器型 CCD	207
6.5.2 电子轰击式 CCD	208
6.5.3 电子倍增型 CCD	209
6.6 CMOS 成像器件	209
6.6.1 CMOS 图像传感器的结构与工作原理	209
6.6.2 CMOS 图像传感器的像元结构	211
6.6.3 CMOS 图像传感器与 CCD 的特性比较	212

思考题与习题	213
参考文献	213
第七章 光电耦合器件及其应用	214
7.1 光电耦合器件	214
7.1.1 光电耦合器件的含义	214
7.1.2 光电耦合器件的特点	214
7.1.3 光电耦合器件的种类	215
7.2 光电耦合器件的特性参数	216
7.2.1 传输特性	216
7.2.2 响应特性	217
7.2.3 光电耦合器件的抗干扰特性	219
7.3 光电耦合器件的应用	221
7.3.1 光电耦合器件的电路设计	222
7.3.2 光电耦合器件的应用实例	224
参考文献	229
第八章 典型实用光电系统	230
8.1 光学传递函数测试仪	230
8.1.1 仪器完成的任务	230
8.1.2 光学传递函数测试仪的原理	231
8.2 红外跟踪系统中的位标器	234
8.3 莫尔条纹测长仪	237
8.3.1 测长原理	237
8.3.2 四倍频细分判向原理	238
8.4 光电相位测距仪	241
8.4.1 相位测距原理	241
8.4.2 相位测距仪原理	243
8.5 激光多普勒测速	244
8.5.1 激光测流速的光学系统	244
8.5.2 多普勒测速的信号处理方式	246
8.6 傅里叶变换红外光谱仪	249
8.6.1 工作原理	249
8.6.2 信息处理中的几个问题	251
参考文献	255
附录 书中所用符号及意义	256

第一章 光电技术及光电器件基础

光电技术是研究光与电之间转换的一门技术性学科,要实现光信息与电信息、电信息与光信息之间的转换,就须知道它们之间的转换机理,而这些机理都是体现在光电器件中的。这样,研究光电技术实际上就是不断探索新型的光电器件,研究它们的原理、构造特性、技术参数等问题,进而再开发它们的应用。也就是说,研究光电技术就是研究光电器件,只要掌握了各种光电器件的特性、构成,再研究光电系统及它们的转换技术就很容易了。

一般来说,凡能探测某种电磁辐射(自 γ 射线到红外线)的各种电子器件,都应归入光电探测器件。然而,为了实用起见,我们只讨论在紫外、红外和可见光范围内感光并产生电信号的元件,这部分元件称为光电探测元件,简称光电器件。光电器件所依据的物理基础主要是固体的光电效应,就是固体中决定其电学性质的电子系统直接吸收入射光能,使固体的电学性质发生改变的现象。例如:光电子发射效应、光电导效应、光生伏特效应等。这里强调“直接”两字,是因为固体中也有一些过程不是电子系统直接吸收光能,而是间接地把光信息转变成电信息。其中主要的是物体吸收光能,其直接效果是它的温度上升,温度的上升再引起电子系统运动的改变,即引起物体的电学性质的改变。例如:金属或半导体的电阻随温度的变化,温差电偶两端的温度差引起的电动势,某些电介质的自发电极化随温度而变化等。这些热效应都曾被用来制成性能良好的辐射探测器,被称作热敏型辐射探测器的器件虽然不属于光电器件的范畴,但由于它们在红外技术中占有重要地位,其作用又与光电器件的作用相同,因而也得到了广泛的应用。

光电器件通常灵敏度高、惰性小,广泛用于辐射探测和光电技术方面。这类器件大都由半导体材料制成,也有用金属和其他材料制成的。

光电器件具有选择性的吸收特性,对不同波长的辐射也就具有选择性的灵敏度。光电器件接收光谱范围因制作光电器件所用的材料而异。

光电器件的用途主要有两类。其一是用来探测微弱光信号的存在和测量光信号的强弱,需主要考虑的是器件探测微弱光信号的能力。具备该用途的器件,通常被称为“探测器”,或者严格地称作“辐射探测器”。其二是在自动控制中作为光电转换器,需主要考虑的是光电转换效能。除这两类主要用途外,还有一些特殊用途。例如,把光电器件作为电源看待,称为光电池,专为转换太阳光能而设计的光电器件,称为太阳能电池,需主要考虑的是光能转变成电能的转换效率。

1.1 光电技术及其特点、应用和发展

1.1.1 光电技术的发展

在我们周围世界中,任何过程和现象都直接或间接地伴随着电磁辐射,其中包括人眼能直接观察的可见光、紫外光和红外辐射等。这些光辐射可能发自被研究对象本身,也可能借助外部辐射而间接产生。作为实际的载体,这些光辐射“载荷”着多种多样的信息,并且和被研究过程或现象之间有着内在的联系,人们可以根据这些信息来定量地确定物体的外观属性或物质的内部结构。以光辐射为传输载体,随时间变化或按空间分布的信息统称为光学信息。和其他种类的信息相比,光学信息有许多特点,它具有丰富的信息容量,占据宽阔的光频范围以及有多参量、并行、高速的传输处理能力,特别是它显示的直观性,能为人类的视觉所直接感受,因此光学信息是人类观察和认识世界的重要信息来源。

在人类社会发展中,为了有效地采集和处理光学信息,人们创造出了各种类型的光学装置和仪器。借助于它们的帮助,人类不断引申和扩展自己在空间分辨、时间存储和识别判读等方面的视觉能力。可以说光学技术为推动社会生产的发展曾经并正在发挥巨大的作用。传统光学仪器是在视觉参与下的人机系统,人的操作和观察是整个系统不可缺少的环节。科学技术的发展,对复杂光信息的高速采集和处理提出了更高的要求,这是传统的光学仪器所难以胜任的。新的光学现象的发现以及无线电电子学向着光频方向的扩展,为传统的光学技术提供了进一步发展的动力。

现代技术的进步超越了传统的学科界限,形成了彼此间的渗透和结合。在光学技术的发展中,无线电电子学和控制信息理论发挥了重要影响。这不仅反映在光学的基本理论方面(例如傅里叶光学和统计光学的产生),而且也反映在应用技术方面。许多在电子学中行之有效的技术方法,例如放大、振荡、编码、调制等都已相继移植到光学系统中来。许多电子学的有源、可控器件或单元电路功能也已经或正在采用光学方法实现。随着激光、薄膜和微电子技术的应用,有些光学装置也在向集成化(即光路固体化微型化)的方向发展。在传统的光学仪器中利用光电传感器、电子技术和微处理机技术更是光学仪器实现自动化的常用手段,可以说电子技术促进了现代光学技术的进步。另一方面光学技术对其他学科的发展也起着推动的作用。在电子学中,自动控制或人工智能等技术中,凡涉及到高精度远距离测量或与图像有关的应用,常常要借助于光学技术。与集成电路生产至关重要的 $10^{-6}\text{m} \sim 10^{-7}\text{m}$ 数量级的超精细加工和检测,更是与光学技术密切相关。这样,光学信息以及突出的特点吸引着电子技术并使之向光频波段扩展,开拓出新一代的光电子器件。这样的技术发展促进了光学技术和电子技术的渗透和结合,形成了综合使用光学和电子技术的光电混合系统。这里,以光电子学为基础的各种光电、电光、光控等有源可控器件起着决定性作用,它们沟通了光学和电子学系统间的联系,并为它们各自的发展增加了活力。

1.1.2 光电信息系统

广义的光电系统包括两个主要的分支,即光电能量系统和光电信息系统。光电能量

系统,如太阳能发电、激光加工、激光医疗和激光核聚变等。主要是解决有关大功率光辐射能量的产生、控制、利用以及向其他能量形式的转换。这是一个专门的学科,有着广阔的发展前景。

光电信息系统指的是以光辐射和电子流为信息载体,通过光电或电光相互转换,综合利用光学或电子学的方法进行信息的传输、采集、处理、存储或显示,以实现确定目标的混合系统,以下简称光电系统。

实现光电或电光等变换的关键环节是各种有源或无源的光电子器件。其中光电转换器件,例如各种光敏元件和摄像及变像器件等,可将各种光学参量或其空间分布转换为电量或相应的时序分布。电光转换和控制器件,例如各种电致发光、显示器件、激光器、空间调制器及可变折射率器件等,可将电量变成光量或用电量控制光波或光束的特性,以调制它们的参数。利用这些器件可以组成各种类型的光电系统。

光电系统的主要类型、基本组成和光电信号的联系表示如图 1-1 所示。它们大致可分为下列几种类型。

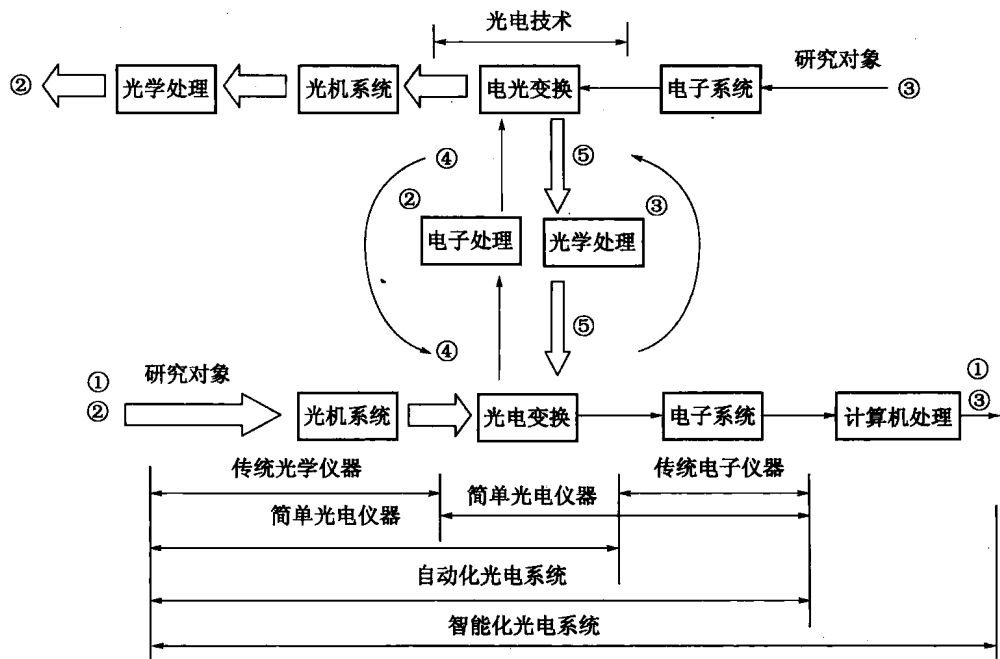


图 1-1 光电信息系统的类型、基本组成和光电信号的联系

(1) 光—电型。它们的组成和信号流程表示在图中的①—①分支中。在这种应用最广泛的系统中,载荷有被研究信息的光载波通过光电转换变成电信号,再利用常规的电信号处理来实现检测和控制的作用。光学仪器的自动化常采用这种方式。若进一步利用计算机对信息进行判读和评估,可进而组成能部分代替人的视觉和思维活动的机器视觉系统。

(2) 光—电—光型。如图中②—②分支。在这种系统中,由光机系统采集到的光信号通过光电变换变成电信号,经电信号处理后再经过电光变换形成光信号输出,电视技术中的摄像管、显像以及声像光盘中的录制和再现可看作是这类系统的代表。

(3) 电—光—电型。如图中③—③分支所示。电信号经过电光变换得到可在光路中

传输的光信号,再经光电变换转换为电信号后作进一步处理或输出。它的典型应用是光纤通信。

(4) 光电混合型。如图中④-④分支所示。它的主要特点是使传统光路实现光路器件的“有源化”和封闭的光束网络,例如光导纤维、空间调制器等。这将最终组成有源可控的光学系统和集成光路。和现有的无源光路比较,这无疑是光学技术的根本变革,为混合型光学信息处理开拓了美好前景。

(5) 电光混合型。如图中⑤-⑤支路所示。这种系统的目标是将电路系统元器件的功能用光学方法来实现,即电路元件的“光子化”,例如光学晶体管和光学双稳态器件等,目前许多单元器件已相继问世或正在研制中。后两种光电系统是光电技术未来的发展方向,其中的光电混合式或全光学式的光学计算机是这些系统最有吸引力的发展目标。

1.1.3 光电技术和光电检测

光电技术是研究光电系统中光和电信号的形成、传输、采集、变换及处理方法的技术科学。它的处理对象可以是光学的、电学的或其他的非光学量。采用光电方法的共同特点是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,而对光载波的处理可以是光学的或是电子学的。

从常用的光学技术角度出发,重要的是将光学信息或者可变为光学信息的其他信息转换为电信号,进而组成光、机、电、计算机的综合系统,实现光学仪器的自动化。在这个意义上光电检测作为一种共性技术具有重要的意义。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。图1-2是典型的光电检测系统的组成和信息流程图。图中,天然或人工的光辐射源通过光学系统投射到被检测物体上,利用被检测物体对入射辐射的反射、吸收、透射、衍射、干涉、散射、双折射等光学属性,将被测变量调制到光载波的特性参量上。这些参量可以是光载波的变化幅度、频率或相位以及光的偏振状态,甚至可以是光束的传播方向或介质折射率的变化。为了实现调制作用,需要利用光参量调制器,目前广泛应用的有机械、光学、声光、电光、磁光效应等各种方式。调制过程是一方面使光辐射随时间作有规律的变化以形成载波信号,另一方面使载波信号的一个或几个特征参量随被测信息改变。这种被测信息的感知和能量形式变换的过程称作调制变换。载荷着信息的光信号通过不同类型的光电接收器转换成电信号,经过滤波放大等预处理后进入到解调器,在此将输入信号和调制器中作为调制基准的参考信号相比较,消除载波信号的影响,得到与被测参量成比例的输出信号。这种光电信号的能量再转换和信号检波过程称作接收解调,解调的电信号可用常规的电子系统作进一步处理和数据输出,得到最终的

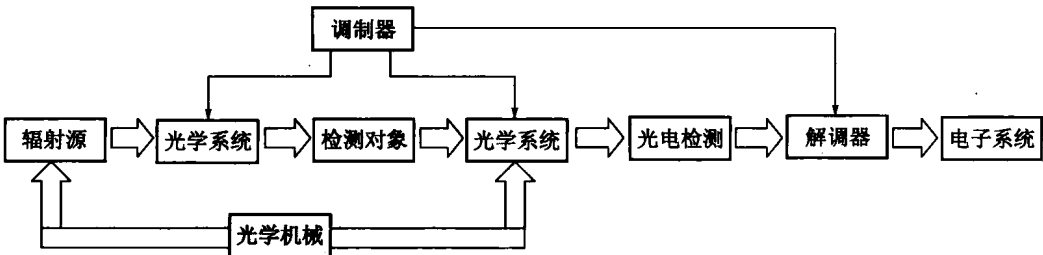


图 1-2 典型光电检测系统的组成和信息流程

测量结果。图中的光学机械环节是用来实现被测物的定位、传送和扫描运动的。

根据系统实现功能的不同,光电检测系统可以分为以下类型:

(1) 测量检查型。其基本功能是进行光学或非光学参量的光电检测,可测参量包括几何量(长度、角度、形状、位置、变形、面积、体积、距离等)、运动参量(速度、转动、流量、振动、加速度等)、表面形状参量(工件粗糙度、疵病、伤痕等)、光学参量(吸收、反射、透射、光度、色度、波长和光谱等)、成分分析(物理属性、浓度、浊度等)、机械量(质量、应力、应变、压强等)、电磁量(电流、电场、磁场等)以及温度和放射线的测量等。检测系统要求可靠的重复示值和可信度,并且要有适用的数据处理能力和数据输出方式。

(2) 控制跟踪型。这是一种有光电检测能力的反馈控制系统。光电传感器是信号反馈单元,当它检测到受控目标相对平衡状态的偏差信号时,可通过闭环控制使目标相对基准实现伺服跟踪或恒值调节。它的主要应用包括军事和科学应用(激光制导、热定向、飞行器自动跟踪等)和工业应用(精密工作台的自动定位、工业图形的自动加工、状态参量的极值控制以及有视觉能力的机器人等)。跟踪系统要求有准确的跟踪能力和快速的动态响应。

(3) 图像分析型。它的功能是采集目标的二维或三维的光强空间分布,记录和再现目标的图像并进行判读、识别或图像的运算处理。图形检测是图像分析的分支,其目的是同时完成图形几何坐标和光密度等级的精确测量,应用在工业图形检测中。图像测量和分析主要依靠扫描或摄像装置采集光信号,同时进行空间—时间和光量—电量的变换。为了将大容量的光学图像变成相应的数字图像,需要大容量的图像存储器。图像数据的处理和分析由计算机完成。

1.1.4 光电技术的特点、应用和发展

光学技术处理的是空间光强信息,它具有多维、并行、快速数据处理等能力。电子技术处理的是一维电量随时间的变化,它有较强的运算灵活性和变换精度。光电技术兼备这些优点,表现出以下的特征:

(1) 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,可调制变量多,信号变换灵活。

光电技术特别是光电检测、光通信、光电测量和控制、光电信息处理和光存储等的应用已遍及军事、科学研究、工业、农业、宇宙和环境科学、医疗卫生和民用等各个领域。从星体温度探测和人造卫星监测到生物细胞的显微测量和微循环检查,从视觉工业机器人和光学计算机到民用全自动照相机和简单光电开关,光电技术已经成为现代科学技术和人民生活中不可缺少的重要技术,特别是在生产领域中生产过程的视觉检查和制品加工自动化、各种性能参数的精密测试以及图形检测和分析判断等方面,光电技术将发挥重要作用。为了实现光学仪器的更新换代,光电技术将在机电一体化的光学仪器的研制中起主导作用。利用光电技术组成的各类光电装置是计算机控制、管理以及监控系统对外联

系的最有前途的外部设备,是一种在技术上最有潜力的信息机器。

回顾生产技术的发展过程,人类经过了以人和工具相结合为特点的手工化阶段,经历了由动力和机械相结合的机械化阶段,现今又踏进了以检测和控制为特点的,广泛应用电气和电子技术的电气化和自动化阶段。在当今的新技术革命中,以信息为标志,以计算机为代表,包括微电子学、生物工程、激光与光导纤维、新材料、新能源和海洋开发等在内的新兴技术正在推广应用,人类的生产技术已开始走向以信息机器和计算机结合为特征智能化的新时代。作为新一代的信息科学,光电技术正在取得重大的进展,类似于电工技术发展过程中半导体电子学技术的初期阶段。这是光电技术迅速发展的必然性。可以肯定,未来的信息技术不会是单纯的电子的世界,光子和电子相结合将会开辟出前所未有的新局面,创造出可以和过去几十年来电子技术的发展相媲美的更加广阔的新天地。

1.2 半导体物理基础

固体材料是制造光辐射探测器的基础。按照材料的电阻率不同可将固体材料分为导体、半导体和绝缘体三种。电阻率在 $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm} \sim 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内的属于导体,电阻率在 $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm} \sim 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内的属于半导体,电阻率大于 $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 的属于绝缘体。它们在探测器的不同部分分别起着不同作用。但探测器光敏面常采用的是半导体材料。为了更深入地理解各种探测器的工作原理、结构和特性,理解半导体材料受辐射的作用而产生的光电效应及其各种现象,本节对其中涉及的一些基本概念、基本理论作简要介绍。

1.2.1 半导体的能带和种类

物理学在阐述固体的能带后指出,半导体晶体的能带可区分为满带、价带、导带和禁带,它们之间的关系如图 1-3 所示。除禁带外每种能带内还有很多能级,由于构成晶体的原子数很大,相邻能级之间的能量差很小。

能带理论指出:晶体中电子只能处于能带的能级上,而每一个能带中都有与构成晶体的原子总数相适应的能级数。根据泡利原理,在每一能级上最多只能填充一个电子。因此在任一准许带中可能容纳的电子数最多为 N 个, N 是该能带的能级数。根据能量最小原理,电子填充能带时,总是从最低的能带、最小能量的能级开始填充。在满带中任何时间均填满电子,因此对半导体的光电特性没有影响,可以略去。在温度为 0K 时价带为价电子占满,而导带中没有电子。当价带中的电子获得足够的热能或辐射能后,就会跃过禁带进入导带。导带中的电子和价带中出现的空穴构成载流子,从而改变半导体的导电性能。在禁带内不允许电子存在,也没有能级。

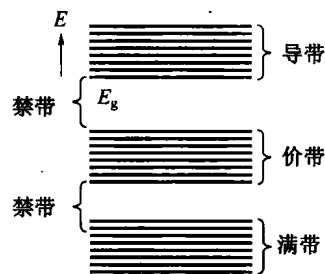


图 1-3 半导体晶体的能带图

以上说明的是理想晶体中的能带,对于实际的半导体晶体,其能带结构相当复杂,电子在能带间的跃迁是非垂直跃迁,这里不再描述。能带与能带之间的间隙称为禁带宽度,也称为能隙,用 E_g 表示。

1.2.2 I型、N型和P型半导体

实际晶体中往往存在与组成晶体的基质原子不相同的原子,即杂质原子,以及在晶体形成过程中出现的各种缺陷,如位错、晶粒间界、间隙原子等,从而降低了材料性能。为此常采用材料提纯去除有害杂质,进行各种处理以消除或减少晶体缺陷。但也有另一种情况,就是在晶体中有目的地掺入一定量的有用杂质,取得所需的重要特性。

1. I型半导体

I型半导体也称为本征型半导体。本征型半导体是指完全纯净和结构完整的半导体,它是完全由基质原子组成的晶体。0K时,在不受光、电、磁等外界因素作用下,导带没有电子,价带也没有空穴,因此,这时的本征半导体和绝缘体一样,不能导电;在热运动或其他外界因素作用下,价带的电子可激发跃迁到导带,产生自由电子和自由空穴(以下均简称为电子、空穴)对,构成导电的载流子,也就是说,在本征半导体中导带电子数和价带空穴数相等。其能级图如图1-4(a)所示。在热激发情况下,共价键上的电子挣脱束缚参与导电,从能级图看相当于电子进入导带参加导电。在共价键上出现的空穴将由附近的电子填补,构成空穴导电,这相当于价带空穴参与导电。由于电子从价带顶 E_+ 跃迁到导带底 E_- 需要大于或等于能隙的能量 E_g ,在常温下具有这种能量的电子概率很小,故参与导电的电子空穴对很少,结果造成本征半导体的电导率很低。

2. N型半导体

在纯硅晶体中掺入少量V族元素As或P的原子,其能级图如图1-4(b)所示。由于As、P原子有五个价电子,它用四个价电子与周围的硅原子组成共价键,余下的一个电子很松地束缚在五价原子周围。这一电子只要获得很小的能量,就能脱离原子而参加导电,这时原子带正电,但不出现空位。因此在N型半导体中导带电子在导电中起主要作用,这样的晶体称为“电子型半导体”或“N型半导体”,掺入的杂质称为“施主杂质”,杂质原子所占据的能级称为“施主能级”,用 E_D 表示。从图(b)的能级图可见,施主能级处于禁带内导带底的下面。电子从施主能级跃迁到导带所需的能量为 $E_i = E_- - E_D$, E_i 称为电离能。与 E_g 相比, E_i 是很小的,在常温下电子所具有的平均热能就足以使施主原子电离。因此,N型半导体具有较高的电导率,其电导率的高低与掺入施主杂质的浓度成正比。

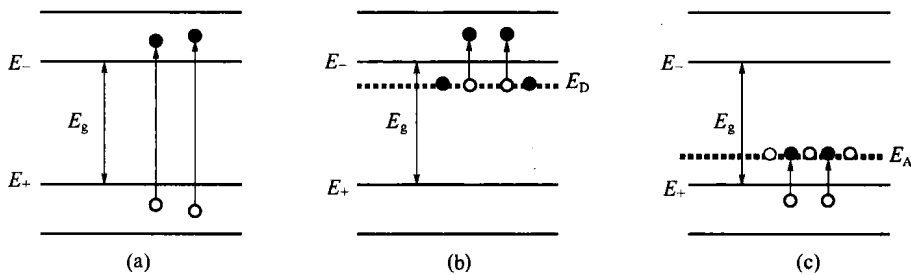


图1-4 半导体的能级图

在N型半导体中,除由施主杂质电离而产生的跃迁到导带的电子参与导电外,还存在由价带电子跃迁引起的电子空穴对的导电。但是在N型半导体中电子占绝对多数,因而称它们为“多数载流子”,而少量的空穴被称为“少数载流子”。