



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

光电检测技术 及应用

OptoElectronic Measurement
Technology and Application

徐熙平 张宁 编著

第2版



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

光电检测技术及应用

第2版

徐熙平 张 宁 编著



机械工业出版社

本书为高等工科院校测控技术与仪器、光电信息科学与工程专业的“光电检测技术”课程的通用教材，是在第1版的基础上修订的。

本书分为上下两篇：上篇主要讲述了光电检测系统的组成、基本概念、基础知识，对光电检测技术中的光源，光电检测器件的结构、原理、特性参数和使用方法进行了详细说明，并对辐射信号检测的原理与方法和典型器件对应的检测电路设计进行了系统论述；下篇结合作者光电检测技术方面的科研成果，具体且系统地描述了光电检测技术的应用，如微弱光信号检测、外形尺寸检测、位移量检测、外观检测、光纤传感检测以及光电检测技术综合应用的具体实例。

本书具有理论和实际密切结合、论述系统深入而又通俗易懂的特点，既可以作为相关专业的大学本科教材，也可以作为研究生教材和相关工程技术人员设计光电检测系统的参考资料。

为方便教学，本书配有免费教学课件，各章节后的思考题和习题配有免费参考答案，欢迎选用本书作为教材的老师索取，索取邮箱：xxp@cust.edu.cn 或 custzn@126.com。

图书在版编目 (CIP) 数据

光电检测技术及应用/徐熙平,张宁编著. —2版. —北京:机械工业出版社, 2016.1

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
ISBN 978 - 7 - 111 - 52258 - 4

I. ①光… II. ①徐…②张… III. ①光电检测—高等学校—教材
IV. ①TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 283329 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 贡克勤 责任编辑: 贡克勤 王 康

版式设计: 霍永明 责任校对: 张晓蓉

封面设计: 张 静 责任印制: 乔 宇

唐山丰电印务有限公司印刷

2016年2月第2版第1次印刷

184mm × 260mm · 21.5 印张 · 530 千字

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 52258 - 4

定价: 43.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88379833

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-88379649

机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网: www.golden-book.com

前 言

光电检测技术是现代检测技术最重要的手段和方法之一，是计量检测技术的一个重要的发展方向，是测控技术与仪器、光电信息科学与工程专业的重要课程。为适应当前光电技术和光电检测技术的发展，满足当前信息化社会对高等学校人才培养的需要，结合多年来教学实践和科研成果并汲取相关书刊资料的精华，于2012年编写了《光电检测技术及应用》教材。教材自出版以来，深受广大师生的好评，被包括985、211在内的30多所兄弟院校选作教材，2015年被评为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材，现修订再版。

本书力求做到实用性、先进性和创新性三者有机结合，在理论方面力求简明易懂，选材方面力求紧跟技术发展动向。为了帮助学生及教师了解光电检测系统的组成，理解光电检测器件的性能及应用，掌握运用各种光电器件进行检测的方法，书中引入了大量工程实例，并且各章都给出了思考题和习题。

本书分为上下两篇，共12章。上篇主要是光电检测技术的基础理论，第1章介绍了光电检测系统的组成及特点；第2章介绍了辐射度量和光度量的基本概念、各类光电效应以及光电器件的基本特性参数；第3章分别介绍了光电导器件、光生伏特器件、光电发射器件、热辐射探测器件、热释电器件、光电耦合器件和图像传感器等各种光电传感器的结构、工作原理、特性参数和使用方法；第4章介绍了发光二极管、激光器等常用光源的工作原理、特性及其应用；第5章介绍了辐射信号检测的方法，如直接检测、光外差检测、基于几何光学方法的光电信息变换检测、莫尔条纹检测以及空间分布光信号检测，并结合实际举例说明如何使用调制盘检测、投影放大法、光三角法、光焦点法等进行长、宽尺寸测量的原理；第6章介绍了常用的光电传感器如光敏电阻、光敏二极管、CCD电荷耦合器件等对应的典型电路，并举例说明使用可编程逻辑器件进行CCD驱动的方法、视频信号的二值化处理、光电信号常用的辨向处理和细分电路。下篇结合长春理工大学光电工程学院光电检测技术方面的科研成果，具体且系统地描述了光电检测技术的应用：第7章讲述了光学相关检测的基本概念和应用、微弱信号检测的原理和典型电路；第8~10章讲述了光电检测技术在外形尺寸检测、位移量检测、外观检测方面的应用；第11章讲述了光导纤维的基本知识以及光纤传感器的原理和应用；第12章讲述了光电检测技术的综合应用，如光电多功能二维自动检测系统、曲臂光电综合测量系统、激光扫描圆度误差测量系统、飞轮齿圈总成圆跳动非接触检测系统、座圈尺寸光电非接触测量系统、管道直线度光电检测系统。

本书在第1版的基础上对内容进行了适当调整，增加了一些基本概念的讲述，如辐射度量和光度量、光电器件的特性参数；将光电器件典型电路的相关内容进行了整合；增加了微弱信号检测、光纤激光器、空间分布光信号检测方法和三维形貌检测的相关内容。

本书内容全面，理论与实践紧密结合，既可方便本科生学习光电检测技术的理论知识，为今后科研、生产解决光电检测技术问题打下基础，又可以给相关专业研究生和科研工作者

IV

开拓思维，提供参考。

本书由长春理工大学徐熙平教授（下篇）和张宁副教授（上篇）编写、主要注重光电检测技术及系统原理与应用，特别是对光电检测系统总体技术进行了详细介绍。在编写的过程中得到了长春理工大学多位老师的支持，特别是长春理工大学光电工程学院马宏教授对本书进行了详细的校正，提出了许多有价值的修改意见。同时参考了王庆有老师编著的《光电技术》、雷玉堂老师编著的《光电检测技术》和曾庆永老师编著的《微弱信号检测》等教材。另外本书编写过程中，长春理工大学光电工程学院光电检测实验室的研究生们付出了辛勤的劳动，进行了文字、公式和图表的编辑工作，在此一并表示感谢。

受作者知识面所限，书中难免有错误之处，敬请各位老师、同学提出宝贵意见。

作者

目 录

前言

上篇 基础理论篇

第1章 绪论	2	3.3 光电发射器件	61
第2章 光电检测技术基础	6	3.3.1 光电倍增管	61
2.1 辐射度量和光度量	6	3.3.2 真空光电管	71
2.1.1 光的基本概念	6	3.4 热辐射探测器件	71
2.1.2 辐射度量	7	3.4.1 热敏电阻	71
2.1.3 光度量	9	3.4.2 热电偶探测器	75
2.2 半导体物理基础	12	3.4.3 热电堆探测器	77
2.2.1 半导体的特性	12	3.5 热释电器件	79
2.2.2 能带理论	13	3.5.1 热释电器件的基本工作原理	79
2.2.3 半导体的导电结构	14	3.5.2 热释电器件的电压灵敏度	82
2.2.4 载流子的运动	16	3.5.3 热释电器件的噪声、响应时间 与阻抗特性	83
2.2.5 半导体的PN结	18	3.5.4 快速热释电探测器	84
2.2.6 半导体对光的吸收	20	3.6 光耦合器件	85
2.3 光电效应	21	3.6.1 光耦合器件的结构与电路符号	85
2.3.1 光电导效应	21	3.6.2 光耦合器件的特性参数	86
2.3.2 光生伏特效应	23	3.6.3 光耦合器件的应用	90
2.3.3 外光电效应	26	3.7 图像传感器	92
2.4 光电器件的基本参数	27	3.7.1 图像传感器的分类	92
2.4.1 有关响应方面的特性参数	27	3.7.2 真空摄像管	92
2.4.2 有关噪声方面的特性参数	29	3.7.3 电荷耦合器件	95
2.4.3 其他参数	31	3.7.4 CMOS图像传感器	106
思考题与习题	32	3.7.5 红外热成像	109
第3章 光电检测器件	33	3.7.6 图像的增强与变像	110
3.1 光电导器件	33	思考题与习题	116
3.1.1 光敏电阻的原理与结构	33	第4章 半导体发光管与激光器	118
3.1.2 典型光敏电阻	34	4.1 发光二极管	118
3.1.3 光敏电阻的基本特性	35	4.1.1 发光二极管的发光机理	118
3.2 光生伏特器件	40	4.1.2 发光二极管的应用	123
3.2.1 光敏二极管	41	4.2 半导体激光器	124
3.2.2 硅光电池	46	4.2.1 半导体激光器的发光原理	124
3.2.3 光敏晶体管	48	4.2.2 半导体激光器的结构	126
3.2.4 色敏光生伏特器件	51	4.3 几种典型的激光器	130
3.2.5 光生伏特器件组合件	53	4.3.1 气体激光器	130
3.2.6 光电位置敏感器件	58		

4.3.2 固体激光器	133	思考题与习题	165
4.3.3 染料激光器	133	第6章 光电检测系统典型电路	166
4.3.4 光纤激光器	135	6.1 光敏电阻的变换电路	166
思考题与习题	137	6.1.1 基本偏置电路	166
第5章 辐射信号检测	138	6.1.2 恒流电路	168
5.1 直接探测法	138	6.1.3 恒压电路	169
5.1.1 光学系统结构	138	6.2 光生伏特器件的偏置电路	170
5.1.2 调制盘	139	6.2.1 反向偏置电路	170
5.1.3 调制盘对背景信号的空间滤波 ..	141	6.2.2 无偏置电路	175
5.2 光外差探测法	143	6.3 CCD 器件驱动电路	177
5.2.1 光外差探测原理	143	6.3.1 CCD 驱动电路时序方法	179
5.2.2 光外差探测的特性	144	6.3.2 可编程器件产生 CCD	
5.3 几何光学方法的光电信息变换	145	驱动时序	179
5.3.1 长、宽尺寸信息的光电变换	145	6.4 视频信号二值化处理电路	182
5.3.2 位移信息的光电变换	149	6.4.1 阈值法	182
5.3.3 速度信息的光电变换	152	6.4.2 微分法	184
5.4 空间分布光信号的检测方法	155	6.5 光电信号辨向处理与细分电路	185
5.4.1 光学目标和空间定位	155	6.5.1 光电信号辨向处理	185
5.4.2 几何中心检测法	157	6.5.2 电子细分	188
5.4.3 亮度中心检测法	160	思考题与习题	200
5.5 莫尔条纹	163		

下篇 技术应用篇

第7章 微弱光信号检测	204	8.2 模拟变换检测法	219
7.1 基本概念	204	8.3 光电扫描检测法	221
7.1.1 能量信号与功率信号	204	8.3.1 光学扫描法	221
7.1.2 相关函数	204	8.3.2 电扫描法	225
7.1.3 相关接收	205	8.4 CCD 自扫描检测法	227
7.1.4 相敏检波器	207	8.5 光电三维形貌检测法	232
7.2 锁相放大器	208	8.5.1 双目机器视觉三维形貌检测法 ..	233
7.2.1 锁相放大器的工作原理	208	8.5.2 结构光三维形貌检测法	235
7.2.2 锁相放大器的应用及特点	210	思考题与习题	237
7.3 取样积分器	211	第9章 位移量检测	238
7.3.1 取样积分原理和工作方式	211	9.1 激光干涉位移检测	238
7.3.2 取样积分器应用和特点	213	9.1.1 激光干涉原理	238
7.4 光子计数器	214	9.1.2 激光干涉仪原理	240
7.4.1 光子计数器原理	214	9.2 光栅线位移检测	243
7.4.2 光子计数器的应用及特点	217	9.2.1 光栅位移传感器(光栅尺)	
思考题与习题	218	的光电读数头	244
第8章 外形尺寸检测	219	9.2.2 光源和光强调制	246
8.1 概述	219	9.2.3 四相交流信号和前置放大器	246

9.2.4 光栅位移检测装置 (光栅尺)	248	11.1.1 光纤传光原理	289
9.3 光栅角位移检测	249	11.1.2 光纤的分类	289
9.3.1 概述	249	11.1.3 光纤的基本特性	290
9.3.2 增量式轴角编码器	250	11.2 光纤传感器原理及应用	292
9.3.3 绝对式光电轴角编码器 的基本原理	252	11.2.1 分类与特点	292
9.3.4 读数和细分	256	11.2.2 光纤传感器	293
9.3.5 狭缝及光电信号	257	11.3 光纤传感器应用技术分析	299
9.3.6 编码器误差	259	思考题与习题	300
9.4 轴向位移测量	260	第 12 章 光电检测技术的 综合应用	301
9.5 激光测距	262	12.1 光电多功能二维自动 检测系统	301
9.5.1 脉冲法测距	262	12.1.1 测量系统的总体结构	301
9.5.2 相位法测距	265	12.1.2 同轴度误差测量系统	302
9.5.3 典型仪器简介	269	12.1.3 环距测量方法的研究	303
思考题与习题	271	12.2 曲臂光电综合测量系统	307
第 10 章 光电外观检测	272	12.2.1 系统的组成与总体布局	307
10.1 外观检测的方式和原理	272	12.2.2 被测参数测量原理	310
10.1.1 反射式与透射式外观检测	272	12.3 激光扫描圆度误差测量系统	316
10.1.2 正反射式与非正反射式 (漫反射式) 检测	273	12.3.1 圆度误差测量原理	316
10.1.3 扫描方式	274	12.3.2 工件安装偏心误差的检测	317
10.2 光电变换器	275	12.3.3 实验结果与分析	318
10.2.1 疵病信号	275	12.4 飞轮齿圈总成圆跳动非 接触检测系统	319
10.2.2 光源选择	277	12.4.1 测量系统原理	319
10.3 信号处理及检测装置	278	12.4.2 实验结果和分析	320
10.3.1 通量式疵病信号的 处理方法	278	12.5 座圈尺寸光电非接触测量系统	320
10.3.2 检测装置	280	12.5.1 总体结构与工作原理	320
10.4 表面粗糙度检测	283	12.5.2 直径测量原理	320
10.4.1 概述	283	12.5.3 数据处理系统设计	322
10.4.2 激光外差法检测粗糙度原理	284	12.5.4 测量结果与分析	322
10.5 内表面疵病检测	286	12.6 管道直线度光电检测系统	323
10.5.1 管道内表面疵病检测 系统组成	286	12.6.1 直线度光电检测系统 的结构与工作原理	323
10.5.2 检测系统工作原理与特点	288	12.6.2 检测系统的组成	324
思考题与习题	288	思考题与习题	326
第 11 章 光纤传感测量	289	部分习题参考答案	328
11.1 光导纤维的基本知识	289	参考文献	335

上 篇

基础理论篇

第1章 绪 论

1. 学习光电检测技术的目的和意义

采用不同的手段和方法获取信息,运用光电技术的方法来检验和处理信息,从而实现各种几何量和物理量的测量,称为光电检测技术。光电检测技术具有系统性和综合性,涉及光学、电子学、计算机科学等多个领域。其中,光学理论包括几何光学理论、量子光学理论、干涉衍射理论、光栅理论、光电发射理论等;电子学理论包括电磁波理论、放大器理论、晶体管电路基础理论、集成电路理论、模拟电路和数字电路理论、噪声理论、电子元器件失效的浴盆效应理论等;计算机科学包含计算机硬件技术、软件(程序设计)技术、网络技术等。

随着科学技术和生产的发展,光电技术已深入到各行各业,在信息与信号提取和分析中起到重要作用。光电信息的检测和处理已成为十分重要的研究内容,国内对光电技术的发展日益重视,已形成现代高新技术的光电子产业。作为高等院校,从培养创新人才的角度出发,对光电检测技术尤为重视,几乎所有工科院校均设有光电技术方面的课程。光电检测相关的教材与各种论著也大量出现,但为了配合本科生教学,内容多侧重于元器件原理与特性介绍,对于光电检测技术总体设计与应用讲解较少。而近年来国内应用光电技术,针对不同的检测需求,开发了大量典型光电检测仪器与系统,形成许多光电检测新技术与新方法。鉴于这种情况需要对光电检测技术应用进行介绍,以供广大学生对现代光电检测的基本原理和有关新技术有所了解,达到抛砖引玉的目的。

2. 光电检测技术的特点和发展状况

光电检测技术有强大的生命力,并已得到广泛应用。它具有以下主要优点:

(1) 便于数字化和智能化 因为被测非电量经光电变换后成为电信号,可用电子技术进行处理,易于实现数字化和微型计算机处理;它与计算机结合,可形成各种智能检测仪器。

(2) 检测精度高、速度快 光电信息量的变换是以光为媒介,并以光子数、光的波长和速度为测量依据。因此,用于检测非电量时精度高、速度快。例如,以光的波长为基准的激光干涉测长仪,其分辨率为波长的 $1/8$,采用细分后甚至更小;光栅测长装置,其分辨率可小于 $1\mu\text{m}$;光电轴角编码器,其分辨率可达到 $0.05''$ 量级。

(3) 非接触式检测 被测对象和传感器之间是以光为媒介,进行光信息变换和传输。因此,克服了接触式传感器由于磨损而影响检测精度和寿命以及损坏被检测对象的缺点。另外,如果采用光导光纤传输光信息,被测量将不受方向和位置的限制,使用起来更为方便。因此,光电检测适于生产、计量过程中的自动检测和控制,特别是在线无损检测。

(4) 遥测遥控 利用光信息远距离传输的特点,便于实现遥测遥控。例如,激光测距、激光通信、光电制导和光电跟踪等。

总之,由于光电检测有上述优点,所以在工农业生产、科研和国防等方面得到广泛的重视和应用。尤其是在精密计量、生产过程中的自动检测、遥感及图像处理、光通信和军事等方面都卓有成效地应用光电检测技术。此外,在医疗卫生、环境保护、防火防盗等方面也得

到了较好的应用。

3. 光电检测系统的组成

光电检测系统组成框图如图 1-1 所示。包括辐射源、光学系统、光电系统、电子学系统和计算机系统 5 大部分。不管是何种光电检测系统，不管它多么简单或复杂，总离不开这 5 个关键核心部分，只是结构有些差异。



图 1-1 光电检测系统组成框图

辐射源一般由光源及其电源组成，是将电能转换成光能的系统，通过该系统得到符合后面光学系统所要求的波段范围和光强度（光通量）。辐射源类型各有差异，但它是一切光电检测系统不可缺少的部分，有些光电检测系统将待测物体本身作为检测对象，此时是将待测物体本身作为辐射源。如使用热释电检测器件做成的自动感应灯（见图 1-2），热释电晶片表面必须罩上一块由一组平行的棱柱形透镜所组成的菲涅尔透镜以提高

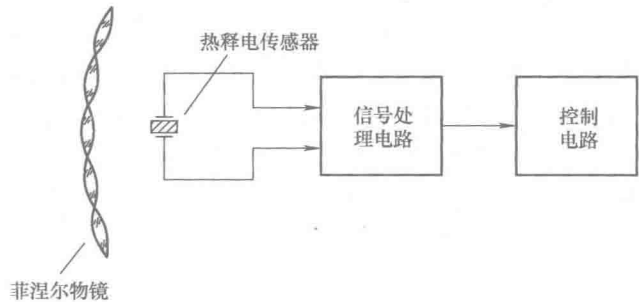


图 1-2 使用热释电检测器件做成的自动感应灯

其视场范围，当人体在透镜的监视视野范围中运动时，晶片上的两个反向串联的热释电单元将输出一列交变脉冲信号，再经过信号处理电路对获得的信息进行放大、鉴别处理后即可用于自动亮灯。也可以将该系统应用于其他领域，如在房间无人时会自动停机的空调机、饮水机；判断无人观看或观众已经睡觉后能够自动关机的电视机；能在有人进入时开启监视器或门铃的可视自动对讲系统；自动记录动物或人的活动的摄影机或数码照相机等。

光学系统是将辐射源发出的光进行光学色散、几何成像、分束和改变辐射流的传送方向等，目的是让光信号携带有待测物体信息的同时还便于进行后续的光电转换。光学系统一般都是由物镜、目镜、滤光镜（有些系统还有调制盘、光机扫描器、探测器辅助光学系统）等组成。如分光光度计、光度计以及色谱仪器里的单色器系统，简单的单色器可以直接用滤光片从复合光中得到单色光，复杂的单色器则由入射狭缝、出射狭缝、准直镜、光栅、物镜等元器件组成的光学系统得到单色光。

光电系统是将光信号转换成电信号的系统，是任何光电检测系统中不可替代的部分，只是光电系统的类型不同、结构不同而已。例如，有的用光电倍增管，有的用硅光电池，有的用光敏二极管阵列或 CCD 器件。光学信息必须转换为电信号才能进行电学处理、计算、输出显示等。光电器件的质量必须稳定可靠，必须有很高的转换效率并有相应的光谱响应范围，有的元件还要求有相应的电源供电电路，如光电倍增管必须加一个非常稳定的 300 ~ 1000V 的直流电源才能保证器件正常工作。

电子学系统是对光电系统传输过来的电信号进行放大，使之满足后续 A - D 变换系统和计算机系统的要求，从而保证计算机系统能够进行数据处理、计算和控制，它同样也是必备

的部分。电子学系统的噪声和漂移是非常重要的参数，是影响整个光电检测系统可靠性的主要性能指标。电子学系统主要由模拟电路和数字电路组成。进行电子学系统的设计除了需要掌握电子学理论之外，还需要对各种光电器件的光电特性有所了解，例如，设计光电倍增管电路时，一般将负载电阻取为 $10 \sim 100\text{k}\Omega$ ，最佳的选择是 $10\text{k}\Omega$ 左右，如果设计成几十兆欧，就会使得器件噪声很大，很不稳定。放大器的设计不能简化，一般采用两级或两级以上的放大器组成一个完整的放大器。在弱信号检测时，需要尽量降低光电器件和前置放大器的噪声，但即使这样仍不能解决来自背景和外部干扰的噪声，还必须采取有效办法来抑制或降低一切来自系统内部和外部的噪声，如取样积分器、锁相放大器、光子计数器等。电子学系统的任务就是从噪声中准确而不失真地将信号检取出来。

计算机系统包括自动控制、数据处理、显示输出等，可以采用单片机或微型计算机。计算机系统是现代智能仪器的重要组成部分，它直接决定所设计的光电检测系统的自动化程度。同时可以避免人为操作误差，保证系统工作安全运转并工作在最佳状态。计算机系统采用的计算方法的正确性、准确性将最终决定分析数据的可靠性。

这些组成部分是相互关联的，设计时需要了解各部件间的相互关系，性能技术指标对其前后部件的影响以及影响大小，对前后部件的要求等，在设计前都要用具体数据明确规定。如辐射源发出的光通量太小时，后续的光学系统接收的光信号也较小，从而影响光电系统的输出信号，使后续的电子学系统放大倍数增大，增加放大器的噪声，从而使光电检测系统的噪声增大而稳定性或精度下降。

要实现检测指标要求，采用一般的直接检测办法有时难以完成，必须采用新的检测技术，如激光位移检测技术、激光扫描检测技术、CCD 信号处理技术、光学相关检测技术、光外差探测技术、光纤检测技术、数字传感技术及由此技术组成的测量系统。本书在编写过程中尽量做到理论和实际相结合，为便于学习和理解，还编写了辐射信号检测、激光测距、公差尺寸检测和外观检测等，并介绍了计算机在相应检测中的应用。

总之，光电检测技术是一门交叉科学，涉及的知识面比较广泛。通过本课程学习，可以开拓视野、增长知识，并培养学生具有初步研究、分析和设计光电检测系统的能力，为今后从事电子技术、检测技术、精密仪器等方面的工作打下基础。

4. 光电检测技术的主要应用范围

光电检测技术已应用到各个科技领域中，它是近代科技发展中最重要方面之一。下面介绍光电检测技术在某些方面的应用。

(1) 辐射度量和光度量的检测 光度量是以平均人眼视觉为基础的量，利用人眼的观测，通过对比的方法可以确定光度量的大小。但由于人与人之间视觉上的差异，即使是同一个人，由于自身条件的变化，也会引起视觉上的主观误差，这都将影响光度学检测的结果。至于辐射度量的检测，特别是对不可见光辐射的测量，更是人眼所无能为力的。在光电方法没有发展起来之前，常利用照相底片感光法，根据感光底片的灰度来估计辐射量的大小。这些方法过程复杂，且局限于在一定光谱范围内，效率低、精度差。

目前大量采用光电检测的方法来测定光度量和辐射度量。这种方法十分方便，且能消除主观因素带来的误差。此外，光电检测仪器经计量标定，可以达到很高的精度。目前常用的这类仪器有光强度计、光亮度计、辐射计以及光测高温计和辐射测温计等。

(2) 光电器件及光电成像系统特性的检测 光电器件包括各种类型的光电、热电探测

器和各种光电成像器件。它们本身就是一个光电转换器件，其使用性能是由表征它们特性的参量决定的。例如光谱特性、灵敏度、亮度增益等。而这些参量的具体值必须通过检测来获得。实际上，每个特性参量的检测系统都是一个光电检测系统，只是被检测的对象就是光电元器件本身罢了。

光电成像系统包括各种方式的光电成像装置，如近红外成像仪、微光成像仪、微光电视、热释电电视、CCD 成像系统以及热成像系统等。在这些系统中，各自都有一个实现光电图像转换的核心器件。这些系统的性能也是由表征系统的若干特性参量来确定的，如系统的亮度增益、最小可分辨温差等。这些特性参量的检测也是由一个光电检测系统来完成的。

(3) 光学材料、元件及特性的检测 光学仪器及测量技术中所涉及的材料、元件和系统的测量，过去大多采用目视检测仪器来完成，它们是以手工操作和目视为基础的。这些方法有的仍有很大的作用，但大多存在效率低和精度差的问题。而且随着光学系统的发展，有一些特性检测已很难用手工和目视方法来完成了。例如，材料、元件的光谱特性，光学系统的调制传递函数，大倍率的减光计等。这些也都需要通过光电检测的方法来实现测量。

此外，随着光学系统光谱工作范围的拓宽，紫外、红外系统的广泛应用，对这些系统的性能及其元件、材料等的特性也不可能再用目视的方法来检测，而只能借助于光电检测系统来实现。

光电检测技术引入光学测量领域后，许多古典光学的测量仪器的性能得到提升，如光电自准直仪、光电瞄准器、激光导向仪等，使这一领域产生了深刻的变化。

(4) 非光学物理量的光电检测 这是光电检测技术当前应用最广、发展最快且最活跃的应用领域。

这类检测技术的核心是如何把非光学物理量转换为光信号。主要方法有两种：

1) 通过一定手段将非光学量转换为光学量，通过对光学量的检测，实现对非光学物理量的检测。

2) 使光束通过被检测对象，让其携带待测物理量的信息，通过对含有待测信息的光信号进行光电检测，实现对待测非光学物理量的检测。

这类光电检测所能完成的检测对象十分广泛。例如，各种射线及电子束强度的检测；各种几何量的检测，其中包括长、宽、高、面积等参量；各种物理量的检测，其中包括质量、应力、压强、位移、速度、加速度、转速、振动、流量，以及材料的硬度和强度等参量；各种电量与磁量的检测；对温度、湿度、材料浓度及成分等参量的检测。在上述的讨论中，涉及的应用范围只是光电检测的对象，而检测的目的并未涉及，因为这又是一个更为广泛的领域。有时对同一物理量的检测，由于目的不同，就有可能成为不同的光电检测系统。例如，对红外辐射的检测，在红外报警系统中，检测的作用是发现可疑目标并及时报警；在红外导引系统中，检测的作用是通过红外目标（如飞机喷口）的光电检测以控制导弹击中目标。在测温系统中，检测的作用是测定辐射体的温度。可见结合光电检测的应用目的，其内容将更加丰富。

以上讨论并未包括全部的光电检测技术的应用范围，有些技术还在迅速发展。

第2章 光电检测技术基础

现在许多光电器件都是由半导体材料制作的。本章首先介绍辐射度量与光度量的知识，然后着重介绍与半导体光电器件有关的基本概念和理论，如能带理论、PN结理论、光电效应等。此外，本章还将介绍各种光电器件中普遍存在的噪声和主要特性参数。这些内容都是后续章节所述具体光电器件的理论基础，对于正确理解和掌握各种光电器件的原理、性能和使用都是十分重要的。

2.1 辐射度量和光度量

2.1.1 光的基本概念

1. 电磁波谱

按波长顺序把全部电磁波排列起来称为电磁波谱，整个电磁波谱约覆盖24个数量级的波长范围，如图2-1所示。在电磁波谱中，人眼所能直接感受到的仅是可见光，它只占电磁波谱中的很小一部分，其余的波谱都不能直接被人眼看见。

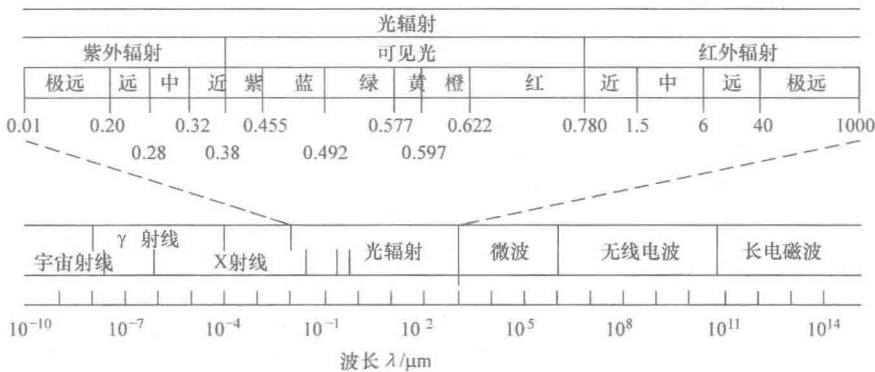


图2-1 电磁波谱

2. 光学谱区

为了研究方便，电磁波谱分为长波区、光学区和射线区三个大的谱区。光电技术所涉及的只是光学谱区，其波长范围为0.01~1000 μm 。它又可再分为红外辐射、可见光和紫外辐射三个波段，其中可见光的波长范围0.38~0.78 μm ，紫外辐射约从0.38 μm 向短波方向延伸到0.01 μm ，红外辐射约从0.78 μm 向长波方向延伸至1000 μm 。在红外辐射波段，又可进一步细分为近、中、远和极远4个区域；而在紫外辐射波段，也可细分为近、中、远和极远4个区域，如图2-1所示。

在光电技术中,远紫外、中紫外、近紫外、可见光、近红外、中红外和远红外等波段已有成熟的应用技术;极远红外波段处于开发研究阶段,例如,太赫兹波(频率 $0.01 \sim 10\text{THz}$,即波长 $0.03 \sim 3\text{mm}$)技术可使能够探测的辐射延伸到极远红外波段。

3. 光子能量公式

物理学指出,光既是电磁波(波动性)又是光子流(粒子性)。在研究光的传播问题时,常常把光作为电磁波处理;而在研究光的辐射与吸收问题时,则把光作为光子流处理。光电技术中也要用到光的这两种属性和概念。

爱因斯坦指出,每个光子的能量 ε 与频率 ν 成正比例,即

$$\varepsilon = h\nu \quad (2-1)$$

式中, h 为普朗克常量, $h = 6.626 \times 10^{-34}\text{J} \cdot \text{s}$; ν 为光的频率,它可表示为光速 c 与波长 λ 之比,即 $\nu = c/\lambda$, $c = 2.998 \times 10^8\text{m/s}$ 。因此,式(2-1)又可表示为

$$\varepsilon = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.24\text{J} \cdot \text{m}}{\lambda} \quad (2-2)$$

式中, λ 为波长(μm)。

按式(2-2),由可见光的波长范围即可得,可见光光子的能量范围为 $3.2 \sim 1.6\text{eV}$ 。

2.1.2 辐射度量

辐射度量学是一门研究电磁辐射能测量的科学。在光辐射能的测量中,为了既符合物理学对电磁辐射量度的规定,又符合人的视觉特性,建立了两套参量和单位。一套参量是与物理学中对电磁辐射量度的规定完全一致的,称为辐射度量,适用于整个电磁波谱(当然也包括可见光)。另一套参量是以人的视觉特性为基础而建立起来的,称为光度量,只适用于可见光波段。在进行光辐射能量的测量和计算时,可根据实际情况选用其中的一套参量。

两套参量的名称、符号、定义式彼此对应,基本意义都相同,只是单位不同。为了区别这两套参量,规定用下标 e (emission的首字母)和 v (visibility的首字母)表示。例如,某参量符号为 X ,则 X_e 表示该参量为辐射量; X_v 表示该参量为光度量。

辐射度量是用物理学中对电磁辐射测量的方法来描述光辐射的一套参量,对主要参量介绍如下:

1. 辐射能 Q_e

辐射能 Q_e 定义为以辐射的形式发射、传播或接收的能量,单位为 J 。

2. 辐射通量 Φ_e

辐射通量 Φ_e 定义为单位时间内通过某截面的所有波长的总电磁辐射能,又称辐射功率,单位为 W (或 J/s)。

3. 辐射强度 $I_e(\theta, \varphi)$

辐射强度 $I_e(\theta, \varphi)$ 描述点辐射源(或辐射源面元)的辐射功率在不同方向上的分布,定义为:在给定方向上的立体角元内,辐射源发出的辐射通量与立体角元之比,如图2-2和式(2-3)所示。

$$I_e(\theta, \varphi) = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \quad (2-3)$$

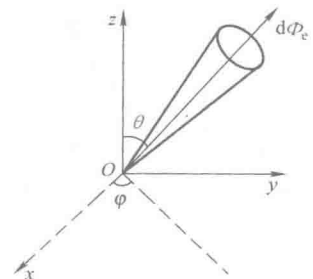


图2-2 点辐射源的辐射强度

式中, I_e 的单位为 W/sr ; $d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$ 。

如图 2-2 所示。一般的辐射源多为各向异性的, 即 I_e 随方向 (θ, φ) 而改变。

4. 辐射出射度 M_e 和辐射亮度 L_e

这是描述面辐射源上各面元辐射能力的物理量。 M_e 、 L_e 的定义如图 2-3 所示。

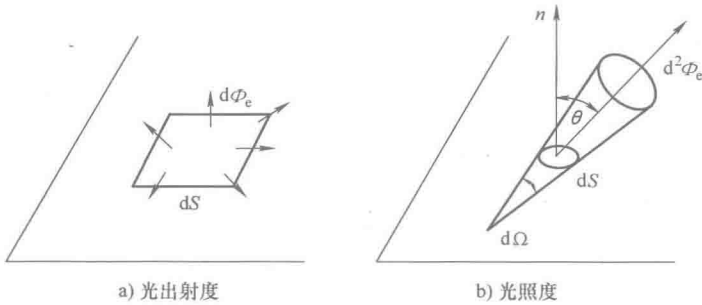


图 2-3 辐射出射度 M_e 和辐射亮度 L_e 的定义

辐射出射度 M_e 定义为通过单位面元发出的辐射通量, 即

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \quad (2-4)$$

式中, M_e 是面元位置的函数, 即面辐射源上不同点可以有不同的 M_e 值, M_e 的单位为 W/m^2 。

辐射亮度 L_e 定义为在垂直其辐射方向上单位表面积、单位立体角发出的辐射通量, 即

$$L_e(\theta, \varphi) = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega \cdot dS \cos\theta} = \frac{dI_e}{dS \cos\theta} \quad (2-5)$$

式中, L_e 的单位为 $\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$, 它是面元位置和辐射方向 (θ, φ) 的函数。

辐射亮度用来描述面辐射源沿不同方向的辐射能力的差异, 例如, 描述显示屏的每个局部在各个方向的辐射特性。

5. 辐射照度 E_e

辐射照度 E_e 定义为辐射接收面上单位面积接收的辐射通量, 即

$$E_e = \frac{d\Phi'_e}{dS'} \quad (2-6)$$

式中, E_e 也是面元的位置函数, E_e 的单位为 W/m^2 ; dS' 为接收面上的面元; $d\Phi'_e$ 是照射到该面元上的所有辐射通量。

6. 光谱辐射量 $\Phi_e(\lambda)$

辐射源所发射的能量一般由很多波长的单色辐射所组成。为了研究光源在各种波长上的辐射能力差别, 提出光谱辐射量的概念。

光谱辐射量是该辐射量在波长 λ 处、单位波长间隔内的大小, 又称为辐射量的光谱密度, 是辐射量随波长的变化率, 如图 2-4 所示。例如, 设光谱辐射量为

$$\Phi_e(\lambda) = \frac{d\Phi_e}{d\lambda} \quad (2-7)$$

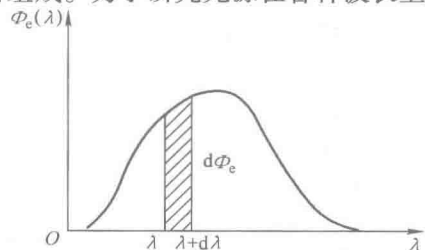


图 2-4 光谱辐射通量与波长的关系之和

则辐射源的总辐射通量 Φ_e 为各光谱辐射通量之和

$$\Phi_e = \int_0^{\infty} \Phi_e(\lambda) d\lambda \quad (2-8)$$

其他辐射度量也有类似的关系。用 X_e 代表其他辐射度量 (M_e 、 L_e 、 E_e)，则

$$X_e(\lambda) = \frac{dX_e}{d\lambda} \quad (2-9)$$

$$X_e = \int_0^{\infty} X_e(\lambda) d\lambda \quad (2-10)$$

2.1.3 光度量

除了特殊用途的光源，如红外光源和紫外光源，其他大量的光源是作为照明用的。照明光源的光学特性必须用基于人眼视觉的光学参量来描述，人眼只能感知波长在 $0.38 \sim 0.78 \mu\text{m}$ 的光辐射。光度量是人眼对相应辐射度量的视觉强度值。人的视神经对各种不同波长光的感光灵敏度不一样，能量相同而波长不同的光，在人眼中引起的视觉强度不相同，对绿光最灵敏，对红、蓝光的灵敏度较低，此外受视觉生理和心理作用的影响，不同的人对各种波长的感光灵敏度也是不同的。光度量和单位如表 2-1 所示。

表 2-1 光度量和单位

度量的名称	符号	定义式	单位	单位符号
光通量	Φ	$K_m \int_{\lambda} \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda$	流明	lm
光照射度	M	$d\Phi/dA$	流明/米 ²	lm/m ²
光照度	E	$d\Phi/dA$	勒克斯(流明/米 ²)	lx(lm/m ²)
发光强度	I	$d\Phi/d\omega$	坎德拉(流明/球面度)	cd(lm/sr)
光亮度	L	$dI/(dA \cdot \cos\theta)$	坎德拉/米 ²	cd/m ²
光量	Q	$\int \Phi dt$	流明·秒	lm·s

国际照明委员会(CIE)用平均值的方法，确定了人眼对各种波长的光的平均相对灵敏度，称为光谱光视效率或视见函数 $V(\lambda)$ ，如图 2-5 所示，图中实线为亮度大于 3cd/m^2 时的明视觉光谱光视效率 $V(\lambda)$ 。 $\lambda = 555 \text{nm}$ 时， $V(\lambda) = 1$ ，其他波长都小于 1。表 2-2 为各波长对应的明视觉光谱光视效率。图中虚线是亮度小于 0.001cd/m^2 时的暗视觉光谱光视效率 $V'(\lambda)$ ，应当指出，所有光度计量均以明视觉光谱光视效率为准。

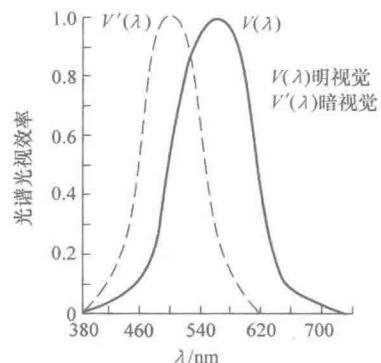


图 2-5 光谱光视效率曲线