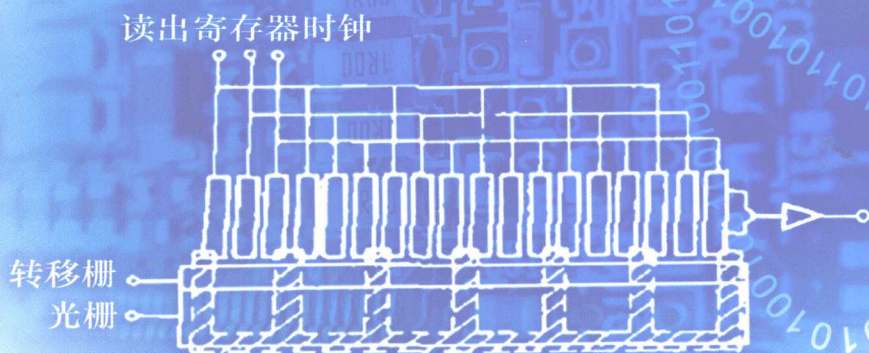


高等学校电子信息类系列教材

光电检测技术

(第2版)

曾光宇 张志伟 张存林 主编



清华大学出版社
<http://www.tup.com.cn>



北京交通大学出版社
<http://press.bjtu.edu.cn>

高等学校电子信息类系列教材

光电检测技术

(第2版)

曾光宇 张志伟 张存林 主编

清华大学出版社
北京交通大学出版社

• 北京 •

内 容 简 介

本书介绍了光电检测系统的构成和应用基础知识。重点叙述了光电检测过程中常用的光源和各种性能的探测器,并对目前光电子学的前沿内容 THz 技术作了简单介绍。

本书内容全面,叙述简明扼要,既重视理论性,也讲究实用性。可供信息工程类等非光电类专业的理工科本科生、研究生作教材选用,也可作为相关科技工作者的参考用书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

光电检测技术/曾光宇,张志伟,张存林主编. —2版. —北京:清华大学出版社;北京交通大学出版社,2009.9

(高等学校电子信息类系列教材)

ISBN 978-7-81123-748-1

I. 光… II. ①曾… ②张… ③张… III. 光电检测-高等学校-教材 IV. TN206

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 129579 号

责任编辑:吴嫦娥

出版发行:清华大学出版社 邮编:100084 电话:010-62776969

北京交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686414

印刷者:北京交大印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印张:18 字数:450 千字

版 次:2005年9月第1版 2009年9月第2版 2009年9月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-81123-748-1/TN·67

印 数:1~4 000 册 定价:29.00 元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。

投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

高等学校电子信息类系列教材 编审委员会成员名单

主 任 谈振辉

副主任 张思东 赵尔沅

委 员 (以姓氏笔画为序)

王志刚 邓忠礼 冯玉珉 冯锡生 卢先河

刘 云 齐立心 朱定华 严国萍 李承恕

汪希时 沙 斐 张有根 张林昌 陈常嘉

郑光信 屈 波 钟章队 徐佩霞 薛 质

“林姓派系类感耐于申好字等高”

升主会员委审编

新林新

11 01 丁 2008

总 序

近年来,我国高等教育经历了重大的改革,已经在教育思想和观念上、教育方法和手段上有了长足的进步,在较大范围和较深层次上取得了成果。为了推进课程改革、加快我国大学教育国际化的进程,教学内容和课程体系改革已经是势在必行。特别在通信与信息领域,随着微电子、光电子技术、计算机技术及光纤等相关技术的发展,尤其是计算机技术与通信技术相结合,使得现代通信正经历着一场变革,各种新技术、新业务、新系统和新应用层出不穷,传统的教学内容和课程体系已不能满足要求,同时教材内容也需要更新。在此背景下,我们决定编写一套紧跟国际科技发展又适合我国国情的“高等学校电子信息类系列教材”,以适应我国高等教育改革的新形势。

“高等学校电子信息类系列教材”涉及传输技术、交换技术、IP技术、接入技术、通信网络技术及各种新业务等。我们在取得教学改革成果的基础上,组织了一批具有多年教学经验、从事科研工作的教师参与编写这套专业课程系列教材。

本系列专业课程教材具有以下特色:

- 在编写指导思想上,突出实用性、基础性、先进性和时代特征,强调核心知识,结合实际应用,理论与实践相结合。

- 在教材体系上,强调知识结构的系统性和完整性,强调课程间的有机联系,注重学生知识运用能力和创新意识的培养。

- 在教材内容上,重点阐述系统的基本概念和原理、基本组成、基本功能及基本应用,对一些新技术和新应用做较系统的介绍。内容丰富,层次分明,重点突出,叙述简洁,通俗易懂。

本系列专业课程教材包括:

《现代通信概论》、《通信系统原理》、《通信系统学习指南》、《数字通信》、《现代交换技术》、《光纤通信理论基础》、《光纤通信系统及其应用》、《光接入网技术及其应用》、《现代移动通信系统》、《数字微波通信》、《卫星通信》、《现代通信网》、《自动控制原理》、《单片机原理与应用》、《蓝牙技术原理与协议》、《计算机通信网基础》、《多媒体通信》、《数字图像处理学》、《网络信息安全技术》、《光电检测技术》等。

本系列教材的出版得到北方交通大学教务处的的大力支持,同时也得到北方交通大学出版社、清华大学出版社有关同志的精心指导和全力帮助。

本系列教材适合于高等院校通信及相关专业本科生教育,也可作为从事电信工作的技术人员自学教材及培训教材。

“高等学校电子信息类系列教材”

编审委员会主任

谈振辉

2003年10月

第2版前言

本书自2005年9月出版以来,被国内数十所大学所使用,受到较多的好评;同时也得到一些好的修改建议。为了更好地发挥本教材的教学作用,我们对全书内容进行了修订和补充。

这次再版所作的修订约近百处,修改了一些错误和论述不太准确和不够严谨的地方,如与单色辐出度和辐射出射度量有关的描述、二次电子发射系数表达式以及亮电流、暗电流与光电流之间的关系;补充和更新的内容涉及光电探测器的特性参数、真空成像器件中的像管和摄像管内容、固体成像器件中的电荷耦合原理与电极结构、电荷耦合器件的组成及其工作原理、CCD摄像机分类中的微光CCD以及固体摄像器件的发展和应用、光导纤维与光纤传感器中的光纤面板和光纤液体折射率传感器。其他修订和补充的内容此处不一一列举说明。

“光电检测技术”是一门实用性较强的技术应用基础课,根据本书出版以来国内数十所大学四年的使用所反馈回来的修改建议,这次再版增加了光电检测技术的基础性实验内容。实验内容主要包括:光电探测器光谱响应度、响应时间、探测度的测量实验和光敏电阻、光电二极管、三极管、PSD和CCD的基本特性测量实验。

本版修订工作中,第1、2、4、8章由曾光宇完成,第3、5、6、7、9和11章由张志伟完成,第10章由张存林完成。

本书配有教学课件,如有需求请从北京交通大学出版社网站下载,或发邮件至 cbswce@jg.bjtu.edu.cn 联系索取。

本次再版工作坚持原版的指导思想和编写原则,面向培养工程应用型人才的一般高等院校,以满足一般高等院校师生掌握应用光电检测技术的教学需要。对学习、修订工作中参考过的文献资料的作者表示感谢。

新版中存在的问题,诚恳希望广大专家、同行和读者给予批评指正,同时诚恳希望广大专家、同行和读者支持我们把本书修改得更加适应光电检测技术发展的需要。

编 者

2009年8月

第1版前言

21世纪是信息社会,计算机技术、通信技术和传感器技术是信息社会的三大技术支柱。20世纪60年代的激光技术和70年代的光纤技术的迅速发展更加促进了传感器技术和通信技术的快速发展。目前光导纤维和光电器件已成为传感器技术的一个重要方面,它们已广泛应用于科研、生产和社会生活的各个方面。大学生作为现代化建设的后备力量,了解、学习和掌握光电检测技术方面的有关知识是相当必要的。

但是,目前有关光电检测技术或介绍光电器件的课程大都设置在光电类专业,内容较深,学时较多。非光电类理工科专业由于光学基础知识比较薄弱,学时限制,大都不能开设这门课程。为了满足非光电类专业学生学习光电检测知识的愿望,本教材集作者多年来在信息工程专业讲授光电技术课程的经验,参阅国内外有关教材和资料编写而成。学时控制在48学时以内,内容易学易懂,基本上可以满足非光电类专业大学生的要求。对于学时更少的也可以选学其中感兴趣的章节。

作为一本非光电专业的光电检测技术课程教材,既要阐明原理,又要具有实用价值。本书编写遵循了这个原则。

全书共分10章。第1章介绍光电检测过程中涉及的基础知识和基本定律;第2章介绍光电检测系统中常用光源的工作原理和性能特征,并对激光的产生原理作了叙述;第3章和第4章主要介绍以光电导效应和结型光伏效应为基础的光敏电阻、光电二极管、光电三极管、特殊光电二极管等器件的工作原理和特性参数、典型应用等内容。第5章、第6章介绍了主要的真空光电器件和真空摄像器件;第7章对固体成像器件CCD和SSPD作了简单介绍;第8章介绍了红外辐射与红外探测器件;第9章叙述了光导纤维的结构特征和传光原理,并介绍了不同调制状态下的光纤传感器的结构和应用;第10章介绍了太赫兹波的产生、检测和应用技术及其发展现状。THz技术是近年来光电子学研究中的前沿热点之一,了解和学习一些基本知识很有必要。

本书第1、2、9章由曾光宇编写,第3、5、6、7、8章由张志伟编写,第4章由牟静竹编写;第10章由张存林编写。全书由曾光宇统稿。对学习、写作过程中参考的文献资料的作者表示感谢。

本书配有教学课件及其实验指导书,如有需求请从北京交通大学出版社网站下载,或发邮件至 cbswce@jg.bjtu.edu.cn 联系索取。

因水平有限,书中难免有不足或错误之处,诚恳希望读者给予批评和指正。

编 者
2005年8月

目 录

第1章 光电检测应用中的基础知识	(1)
1.1 辐射度学和光度学基本概念	(1)
1.1.1 辐射度学基本物理量	(1)
1.1.2 光度学基本物理量	(3)
1.1.3 其他基本概念	(5)
1.2 半导体基础知识	(7)
1.2.1 固体的能带结构	(7)
1.2.2 热平衡下的载流子浓度	(10)
1.2.3 半导体中的非平衡载流子	(11)
1.2.4 载流子的扩散与漂移	(12)
1.3 基本定律	(14)
1.3.1 黑体辐射定律	(14)
1.3.2 光电效应	(16)
1.4 光电探测器的噪声和特性参数	(19)
1.4.1 光电探测器中的噪声	(20)
1.4.2 光电探测器的特性参数	(24)
1.4.3 光电探测器的合理选择	(27)
练习题	(27)
第2章 光电检测中的常用光源	(28)
2.1 光源的特性参数	(28)
2.1.1 辐射效率和发光效率	(28)
2.1.2 光谱功率分布	(29)
2.1.3 空间光强分布	(30)
2.1.4 光源的颜色	(30)
2.1.5 光源的色温	(31)
2.2 热辐射源	(31)
2.2.1 太阳	(31)
2.2.2 黑体模拟器	(32)
2.2.3 白炽灯	(33)
2.3 气体放电光源	(34)

2.3.1 脉冲灯	(34)
2.3.2 原子光谱灯	(36)
2.3.3 汞灯	(36)
2.4 固体发光光源	(37)
2.4.1 场致发光光源	(37)
2.4.2 其他平板显示器件	(39)
2.4.3 结型发光光源——发光二极管和激光二极管	(42)
2.5 激光器	(46)
2.5.1 激光原理	(46)
2.5.2 激光器的结构和工作过程	(49)
2.5.3 激光器的类型	(50)
2.5.4 激光的特性	(53)
练习题	(54)
第3章 结型光电器件	(55)
3.1 结型光电器件工作原理	(55)
3.1.1 热平衡状态下的 PN 结	(55)
3.1.2 光照下的 PN 结	(56)
3.2 硅光电池	(58)
3.2.1 硅光电池的基本结构和工作原理	(58)
3.2.2 硅光电池的特性参数	(59)
3.3 硅光电二极管和硅光电三极管	(62)
3.3.1 硅光电二极管	(62)
3.3.2 硅光电三极管	(63)
3.3.3 硅光电三极管与硅光电二极管特性比较	(64)
3.4 结型光电器件的放大电路	(67)
3.4.1 结型光电器件与放大三极管的连接	(67)
3.4.2 光电器件与集成运算放大器的连接	(67)
3.5 特殊结型光电二极管	(68)
3.5.1 象限探测器	(68)
3.5.2 PIN 型光电二极管	(69)
3.5.3 雪崩光电二极管	(75)
3.5.4 紫外光电二极管	(76)
3.5.5 半导体色敏器件	(76)
3.6 结型光电器件的应用实例——光电耦合器件	(78)
3.6.1 光电耦合器件的分类、结构和用途	(79)
3.6.2 光电耦合器件的基本电路	(80)
练习题	(81)

第4章 光电导器件	(83)
4.1 光敏电阻的工作原理	(83)
4.1.1 光敏电阻的结构和分类	(83)
4.1.2 光敏电阻的工作原理	(84)
4.2 光敏电阻的主要特性参数	(85)
4.2.1 光电导灵敏度	(86)
4.2.2 光电导增益	(86)
4.2.3 量子效率	(87)
4.2.4 光谱响应率与光谱响应曲线	(87)
4.2.5 响应时间和频率特性	(89)
4.2.6 光电特性和 γ 值	(91)
4.2.7 前历效应	(91)
4.2.8 温度特性	(92)
4.3 光敏电阻的偏置电路和噪声	(93)
4.3.1 偏置电路	(93)
4.3.2 噪声等效电路	(95)
4.4 光敏电阻的特点和应用	(96)
4.4.1 光敏电阻的特点	(96)
4.4.2 光敏电阻使用时的注意事项	(96)
4.4.3 常见光敏电阻	(97)
4.4.4 光敏电阻的应用	(97)
练习题	(98)
第5章 真空光电器件	(99)
5.1 光电阴极	(99)
5.1.1 光电阴极的主要参数	(99)
5.1.2 光电阴极的分类	(100)
5.1.3 常用光电阴极材料	(101)
5.2 光电管与光电倍增管	(103)
5.2.1 光电管	(103)
5.2.2 光电倍增管	(104)
5.3 光电倍增管的主要特性参数	(108)
5.4 光电倍增管的供电和信号输出电路	(113)
5.4.1 高压电源	(114)
5.4.2 高压分压电路	(115)
5.4.3 分压电流与输出线性的关系	(115)
5.4.4 信号输出方式	(117)
5.5 微通道板光电倍增管	(118)
5.6 光电倍增管的应用	(120)

5.6.1	光谱测量	(120)
5.6.2	极微弱光信号的探测——光子计数	(120)
5.6.3	射线的探测	(121)
	练习题	(122)
第6章	真空成像器件	(124)
6.1	像管	(124)
6.1.1	像管结构和工作原理	(125)
6.1.2	像管的特性参量	(127)
6.2	常见像管	(128)
6.2.1	常见变像管	(128)
6.2.2	常见像增强器	(129)
6.2.3	特殊变像管	(132)
6.3	摄像管	(134)
6.3.1	摄像管的作用及分类	(134)
6.3.2	摄像管的结构和工作原理	(135)
6.4	光导靶和存储靶	(136)
6.4.1	视像管靶	(136)
6.4.2	光电发射型摄像管靶——存储靶	(139)
6.5	摄像管的特性参数	(140)
6.5.1	摄像管的特性参数	(140)
6.5.2	不同视像管的特性参数比较	(143)
6.6	摄像管的发展方向	(144)
	练习题	(144)
第7章	固体成像器件	(145)
7.1	电荷耦合器件	(145)
7.1.1	电荷耦合器件的结构	(145)
7.1.2	电荷耦合原理与电极结构	(146)
7.1.3	电荷耦合器件的组成及其工作原理	(147)
7.1.4	电荷转移沟道类型	(150)
7.2	电荷耦合器件的分类	(151)
7.2.1	线阵 CCD	(151)
7.2.2	面阵 CCD	(152)
7.3	CCD 摄像机分类	(154)
7.3.1	可见光 CCD	(154)
7.3.2	IRCCD	(156)
7.3.3	X 射线 CCD	(156)
7.3.4	紫外 CCD	(157)

7.4	CCD 的性能参数	(157)
7.4.1	电荷转移效率和转移损失率	(157)
7.4.2	光谱响应率和干涉效应	(158)
7.4.3	分辨率和调制传递函数	(158)
7.4.4	动态范围	(159)
7.4.5	暗电流和噪声	(159)
7.5	自扫描光电二极管阵列	(160)
7.5.1	光电二极管阵列的结构形式和工作原理	(160)
7.5.2	SSPD 线阵	(162)
7.5.3	SSPD 面阵	(163)
7.5.4	SSPD 的主要特性参数	(164)
7.5.5	SSPD 器件的信号读出及放大电路	(166)
7.6	固体摄像器件的发展现状和应用	(166)
	练习题	(169)
第 8 章	红外辐射与红外探测器	(170)
8.1	红外辐射的基本知识	(170)
8.1.1	红外辐射	(170)
8.1.2	红外辐射源	(171)
8.2	红外探测器	(171)
8.2.1	热探测器	(172)
8.2.2	光子探测器	(175)
8.3	红外探测器的性能参数及使用中应注意的事项	(176)
8.3.1	红外探测器的性能参数	(176)
8.3.2	红外探测器使用中应注意的问题	(176)
8.4	红外测温	(178)
8.4.1	红外测温原理	(178)
8.4.2	红外测温的特点	(178)
8.4.3	热辐射传感器	(178)
8.5	红外成像	(181)
8.5.1	红外成像器件	(181)
8.5.2	红外热像仪	(182)
8.5.3	红外分析仪	(184)
8.6	红外无损检测	(185)
8.6.1	焊接缺陷的无损检测	(185)
8.6.2	铸件内部缺陷探测	(186)
8.6.3	疲劳裂纹探测	(186)
8.7	红外探测技术在军事上的应用	(187)
8.7.1	红外侦察	(187)

8.7.2 红外雷达	(187)
练习题	(188)
第9章 光导纤维与光纤传感器	(189)
9.1 光导纤维基础知识	(189)
9.1.1 光纤的结构	(189)
9.1.2 光纤的种类	(189)
9.1.3 光纤的传输模式	(190)
9.1.4 光纤的传光原理	(190)
9.1.5 光纤的传输特性	(192)
9.1.6 光纤的耦合	(194)
9.2 光导纤维的应用	(195)
9.2.1 光纤在直接导光方面的应用	(195)
9.2.2 光纤制品在传像方面的应用	(197)
9.3 光纤传感器的分类及构成	(199)
9.3.1 光纤传感器的分类	(199)
9.3.2 光纤传感器的基本构成	(200)
9.3.3 光纤传感器的优点	(201)
9.4 功能型光纤传感器	(201)
9.4.1 相位调制型光纤传感器	(201)
9.4.2 光强调制型光纤传感器	(203)
9.4.3 偏振态调制型光纤传感器	(204)
9.5 非功能型光纤传感器	(205)
9.5.1 传输光强调制型光纤传感器	(205)
9.5.2 反射光强调制型光纤传感器	(206)
9.5.3 频率调制型光纤传感器	(207)
9.5.4 光纤液体折射率传感器	(209)
练习题	(211)
第10章 太赫兹波的产生与检测	(212)
10.1 概述	(212)
10.1.1 光电导天线	(213)
10.1.2 光整流	(214)
10.1.3 太赫兹的探测	(216)
10.2 THz 辐射光谱学	(220)
10.2.1 透射型 THz 时域光谱系统	(221)
10.2.2 反射型 THz 时域光谱系统	(225)
10.3 THz 辐射成像	(226)
10.3.1 THz 射线成像的基本原理	(226)

10.3.2 THz 扫描成像	(226)
10.3.3 THz 实时成像	(227)
10.3.4 THz 层析成像	(228)
10.3.5 THz 近场成像	(230)
10.3.6 THz 射线成像技术的应用	(231)
练习题	(233)
第 11 章 光电探测器实验	(234)
实验 1 光电探测器光谱响应度的测量	(234)
实验 2 光电探测器响应时间的测试	(237)
实验 3 光电探测器探测度的测量	(240)
实验 4 光敏电阻特性测量实验	(243)
实验 5 光敏二极管特性测试	(246)
实验 6 光敏三极管特性测试	(248)
实验 7 光电位置传感器 (PSD) 实验	(250)
实验 8 光电位置传感器 (PSD) 光电特性实验	(253)
实验 9 线阵 CCD 原理及驱动实验	(254)
实验 10 线阵 CCD 基本特性的测量实验	(257)
实验 11 利用线阵 CCD 进行物体角度的测量	(259)
实验 12 光纤位移测试传感器实验	(262)
附录 A 实验 1 装置中器件说明	(264)
附录 B CS-1022 型示波器测量上升响应时间的方法介绍	(266)
附录 C 彩色线阵 CCD 图像传感器 TCD 2252D 简介	(267)
习题参考答案	(270)
参考文献	(271)

第 1 章 光电检测应用中的基础知识

光电检测系统的典型配置见图 1-1, 包括辐射源(或光源)、信息载体、光电探测器及信息处理装置。在大部分情况下, 探测器前要加光学系统。本书将重点介绍常用的辐射源和光电探测器, 讨论它们的结构、工作原理、性能及用途。本章将介绍一些相关的基础理论知识。

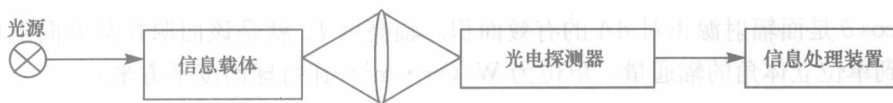


图 1-1 光电检测系统

1.1 辐射度学和光度学基本概念

辐射度学研究各种电磁辐射的传播和量度, 包括可见光区域。辐射度学单位是纯粹物理量的单位, 例如, 熟悉的物理学单位焦耳(J)和瓦特(W)就是辐射能和辐射功率的单位。光度学所讨论的内容仅是可见光波的传播和量度, 因此光度学的单位必须考虑人眼的响应, 包含了生理因素。例如, 光度学中光功率的单位不用瓦特(W)而用流明(lm)。虽然光度学采用另一套单位制, 但是各物理量的定义及其物理意义和辐射度学是一致的。为了区分, 辐射度学和光度学各物理量分别加脚标“e”和“v”表示。

1.1.1 辐射度学基本物理量

1. 辐[射]功率(或称辐[射能]通量) Φ_e 。

对辐射源来说, 其辐功率定义为单位时间内向所有方向发射的能量, 对于电磁波的传播来说, 辐功率 Φ_e (e 为辐射 emission 的第一个字母)的定义是单位时间通过某一截面的辐射能。单位为 W(瓦[特])。

2. 辐[射]强度 I_e 。

点状辐射体在不同方向上的辐射特性用辐强度 I_e 表示。若在某方向上, 一个小立体角 $d\Omega$ 内的辐通量为 $d\Phi_e$, 则点光源在该方向的辐强度 I_e 为

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \quad (1-1)$$

辐强度 I_e 的单位为 W/sr(瓦每球面度)。对于均匀辐射的点光源, 若辐通量为 Φ_e , 则其辐强

度为

$$I_e = \frac{\Phi_e}{4\pi} \quad (1-2)$$

3. 辐[射]亮度(或称辐射度) L_e 。

对于小面积的面辐射源, 以辐亮度 L_e 来表示其表面不同位置在不同方向上的辐射特性。如图 1-2 所示, 一小平面辐射源的面积为 dS , 与 dS 的法线夹角 θ 的方向上有一面元 dA 。若 dA 所对应的立体角 $d\Omega$ 内的辐通量为 $d\Phi_e$, 则面源在此方向上的辐亮度为

$$L_e = \frac{d^2\Phi_e}{dS \cos\theta d\Omega} \quad (1-3)$$

式中, $dS \cos\theta$ 是面辐射源正对 dA 的有效面积。辐亮度 L_e 就是该面源在某方向上单位投影面积辐射到单位立体角的辐通量。单位为 $W/(sr \cdot m^2)$ (瓦每球面度平方米)。

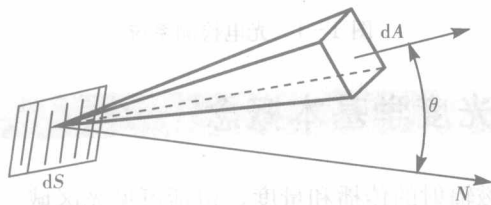


图 1-2 辐射源的辐亮度

4. 辐[射]出[射]度 M_e 。

辐出度只表示面辐射源表面不同位置的辐射特性, 而不考虑辐射方向。其定义为: 面辐射源的单位面积上辐射的辐通量, 即把辐亮度 L_e 对所有可能方向的角积分, 即

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS} = \int_{\Omega} L_e d\Omega \quad (1-4)$$

其单位为 W/m^2 (瓦每平方米)。

5. 辐[射]照度 E_e 。

辐照度表示每单位受照面接受的辐通量, 即

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad (1-5)$$

这里, 无需考虑面元 dA 所接受的辐通量来自何方, 故与该面的取向无关。辐照度的单位为 W/m^2 (瓦每平方米)。

此外, 还有一些物理量, 如辐射能 Q (单位是 J), 辐射能密度 ω (单位是 J/m^3), 等等。

如果辐亮度和辐强度与辐射方向有关, 可用带下标的 $L_{e\lambda}$ 和 $I_{e\lambda}$ 表示。如果仅仅考虑在波长 λ 附近的辐射情况, 则可用 $L_{e\lambda}$ 和 $I_{e\lambda}$ 表示。例如 $I_{e\lambda}$ 称为光谱辐强度, 表示在波长 λ 附近每单位波长间隔的辐强度。辐强度与光谱辐强度的关系为

$$I_e = \int_0^\infty I_{e\lambda} d\lambda$$

光电检测技术(1-6)

其余物理量，如 $M_{e\lambda}$ ， $L_{e\lambda}$ 等意义与 $I_{e\lambda}$ 相仿，在此不一一叙述。

1.1.2 光度学基本物理量

人眼是最常用也是最重要的可见光接受器。它对不同波长的电磁辐射有不同的灵敏度，而且不同人的眼睛，其灵敏度也有差异。为了从数量上描述人眼对各种波长辐射能的相对敏感度，引入视见函数 V_λ 。国际照明委员会从许多人的大量观察结果中取其平均值，得出视见函数 $V_\lambda-\lambda$ 的曲线(见图 1-3)，图中虚线是暗视觉视见函数，实线是明视觉视见函数。人眼对于波长为 555 nm 的绿色光最敏感，取其视见函数值为 1。其他的波长 $V_\lambda < 1$ ，而在可见光谱以外的波段 $V_\lambda = 0$ 。在 380~780 nm 的区域里，各种波长处的视见函数值如表 1-1 所示。从表 1-1 所列数值可见，波长为 740 nm 的红光，其功率必须大于波长为 555 nm 的绿光的 4×10^3 倍，才能引起相同强度的视觉感受。

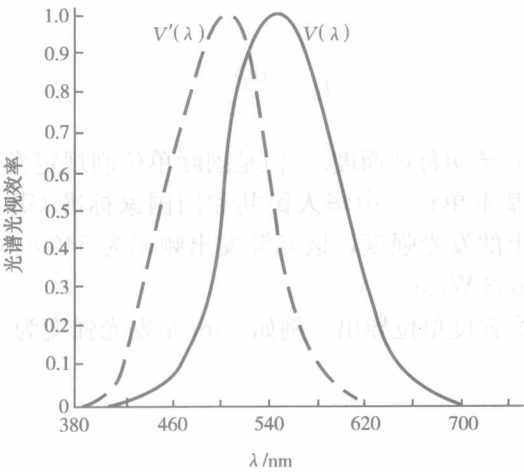


图 1-3 视见函数 $V_\lambda-\lambda$ 的曲线

表 1-1 各种波长处的视见函数值

光 色	λ/nm	V_λ	光 色	λ/nm	V_λ	光 色	λ/nm	V_λ
紫	380	4×10^{-5}	绿	530	0.862	橙	620	0.381
紫	390	1.2×10^{-4}	绿	540	0.954	红	640	0.175
紫	400	4×10^{-4}	绿	550	0.995	红	660	0.061
紫	420	4×10^{-3}	绿	555	1.000	红	680	0.017
蓝	440	2.3×10^{-2}	绿	560	0.995	红	700	4×10^{-3}
青	460	6×10^{-2}	黄	570	0.952	红	720	1×10^{-3}
青	480	0.139	黄	580	0.870	红	740	2.5×10^{-4}
绿	500	0.323	黄	590	0.757	红	760	6×10^{-5}
绿	520	0.710	橙	600	0.631	红	780	1.5×10^{-5}