



109

高等学校电子信息技术专业教材

# 光电子技术

安毓英 刘继芳 李庆辉 编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了光电子技术的基本原理与应用基础。第1章、第2章介绍了光辐射的基本定律和光电子技术中常用的光源,讨论了光辐射传播理论及在不同介质中的传播特性。第3章介绍了光束的调制方法、扫描原理和几种典型的光调制器。第4章讨论光辐射探测原理及光辐射探测器的性能。第5章、第6章介绍了光电成像原理及器件、显示技术及相关器件。第7章介绍了光电子技术在国民经济、国防等方面的应用。

本书可作为电子科学与技术、光信息科学与技术专业本科限定选修课教材,也可供高校相关专业师生和有关科技人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

光电子技术/安毓英等编. —北京:电子工业出版社,2002.5

高等学校电子信息技术专业教材

ISBN 7-5053-7565-2

I.光... II.安... III.光电子技术—高等学校—教材 IV.TN2

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第021757号

责任编辑:陈晓莉

印 刷:北京李史山胶印厂

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:16.5 字数:422千字

版 次:2002年5月第1版 2002年5月第1次印刷

印 数:4000册 定价:24.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。  
联系电话:(010)68279077

## 前 言

本教材是为 1999 年教育部本科专业目录调整后的电子信息类、电子信息科学类电子科学与技术、光信息科学与技术本科专业编写的“光电子技术”课程教材。

激光器的发明,解决了光频载波的产生问题。从此电子技术的各种基本概念(如放大与振荡、调制与解调、直接探测与外差探测、倍频、和频与差频等等)几乎都移植到了光频段。电子学与光学之间的鸿沟在概念上消失了,产生了光频段的电子技术,习惯上简称为光电子技术。当然由于波段不同,电子学波段和光波段在相应器件的结构上完全不同了。尽管如此,从电子学频段扩展的意义上讲,光电子技术就是电子技术在光波段的开拓和发展;从光学发展的角度讲,光电子技术发展需求的牵引,大大促进了相干光学技术的信息化进步。所以,光电子技术也是电子技术与光学技术相结合的产物。

本教材比较全面系统地反映了光电子技术的理论和应用基础。主要内容分两大部分:一部分主要阐述光辐射特别是激光产生的机制、相干光辐射的调制原理、相干光辐射在各种介质中的传播理论以及光辐射探测机理;另一部分主要讲述光电成像原理、红外成像原理、光电显示原理以及各种成像器件和显示器件。

本教材还比较系统地介绍了光电子技术在国民经济、国防等方面的应用,如光纤通信、激光雷达、激光制导、红外跟踪、红外遥感等,并力图反映其中的新进展。

教材各章节的编排以及章节内容的安排既注重知识之间的有机联系,又考虑各自的独立性,并配有习题,以便于读者自学,也便于教师根据不同专业对光电子技术课程的不同要求、学时数的多寡选取适当的内容课内讲授。

本教材由西安电子科技大学安毓英主编,刘继芳编写第 1、2、3 章,安毓英编写第 4 章并统编全稿,李庆辉编写第 5、6、7 章。由于编者水平有限,书中存在缺点错误在所难免,希望广大读者不吝指正。

作 者

二〇〇二年四月

# 目 录

<b>第 1 章 光辐射与发光源</b> .....	( 1 )
1.1 电磁波谱与光辐射 .....	( 1 )
1.1.1 电磁波的性质与电磁波谱 .....	( 1 )
1.1.2 光辐射 .....	( 2 )
1.2 辐射度学与光度学基本知识 .....	( 3 )
1.2.1 辐射量 .....	( 3 )
1.2.2 光度量 .....	( 5 )
1.3 热辐射基本定律 .....	( 7 )
1.3.1 单色吸收比和单色反射比 .....	( 7 )
1.3.2 基尔霍夫辐射定律 .....	( 7 )
1.3.3 普朗克公式 .....	( 7 )
1.3.4 瑞利-琼斯公式 .....	( 8 )
1.3.5 维恩公式 .....	( 8 )
1.3.6 维恩位移定律 .....	( 8 )
1.3.7 斯忒藩-玻尔兹曼定律 .....	( 9 )
1.3.8 色温 .....	( 9 )
1.4 激光原理 .....	( 9 )
1.4.1 激光产生的物理基础 .....	( 9 )
1.4.2 激光(强相干光)产生的基本原理和方法 .....	( 14 )
1.4.3 开放式光学谐振腔和高斯光束 .....	( 18 )
1.5 典型激光器 .....	( 23 )
1.5.1 固体激光器 .....	( 23 )
1.5.2 气体激光器 .....	( 26 )
1.5.3 半导体二极管激光器 .....	( 31 )
练习及思考题 1 .....	( 34 )
<b>第 2 章 光辐射的传播</b> .....	( 36 )
2.1 光辐射的电磁理论 .....	( 36 )
2.1.1 光辐射的波动方程 .....	( 36 )
2.1.2 光辐射场的亥姆霍兹方程 .....	( 36 )
2.1.3 均匀介质中的平面波和球面波 .....	( 36 )
2.1.4 电磁场的边界条件 .....	( 37 )
2.2 光波在大气中的传播 .....	( 37 )
2.2.1 大气衰减 .....	( 37 )
2.2.2 大气湍流效应 .....	( 41 )
2.3 光波在电光晶体中的传播 .....	( 43 )
2.3.1 电致折射率变化 .....	( 44 )

2.3.2	电光相位延迟	(46)
2.4	光波在声光晶体中的传播	(50)
2.4.1	拉曼-纳斯衍射	(50)
2.4.2	布喇格(Bragg)衍射	(52)
2.5	光波在磁光介质中的传播	(55)
2.5.1	法拉第旋转效应	(55)
2.5.2	磁光相互作用的耦合波分析	(56)
2.6	光波在光纤波导中的传播	(57)
2.6.1	光纤波导的结构及弱导性	(57)
2.6.2	光束在光纤波导中的传播特性	(58)
2.6.3	光束在光纤波导中的衰减和色散特性	(63)
2.7	光波在非线性介质中的传播	(65)
2.7.1	非线性电极化率	(66)
2.7.2	光波在非线性介质中的传播	(67)
2.7.3	光混频及光倍频技术	(68)
2.8	光波在水中的传播	(70)
2.8.1	传播光束的衰减特性	(70)
2.8.2	前向散射	(71)
2.8.3	后向散射	(72)
	练习及思考题 2	(73)
<b>第 3 章</b>	<b>光束的调制和扫描</b>	<b>(74)</b>
3.1	光束调制原理	(74)
3.1.1	振幅调制	(74)
3.1.2	频率调制和相位调制	(75)
3.1.3	强度调制	(76)
3.1.4	脉冲调制	(76)
3.1.5	脉冲编码调制	(77)
3.2	电光调制	(77)
3.2.1	电光强度调制	(77)
3.2.2	电光相位调制	(81)
3.2.3	电光调制器的电学性能	(81)
3.2.4	电光波导调制器	(83)
3.3	声光调制	(86)
3.3.1	声光调制器的工作原理	(86)
3.3.2	调制带宽	(87)
3.3.3	声光调制器的衍射效率	(88)
3.3.4	声束和光束的匹配	(89)
3.3.5	声光波导调制器	(90)
3.4	磁光调制	(90)
3.4.1	磁光体调制器	(91)

3.4.2	磁光波导调制器	(91)
3.5	直接调制	(92)
3.6	光束扫描技术	(95)
3.6.1	机械扫描	(95)
3.6.2	电光扫描	(95)
3.6.3	声光扫描	(98)
3.7	空间光调制器	(100)
3.7.1	泡克耳读出光调制器	(100)
3.7.2	液晶空间光调制器	(102)
3.7.3	其他类型的空间光调制器	(103)
	练习及思考题 3	(105)
<b>第 4 章</b>	<b>光辐射的探测技术</b>	(106)
4.1	光电探测器的物理效应	(106)
4.1.1	光子效应和光热效应	(107)
4.1.2	光电发射效应	(107)
4.1.3	光电导效应	(108)
4.1.4	光伏效应	(110)
4.1.5	温差电效应	(111)
4.1.6	热释电效应	(111)
4.1.7	光电转换定律	(112)
4.2	光电探测器的性能参数	(113)
4.2.1	积分灵敏度 $R$	(113)
4.2.2	光谱灵敏度 $R_\lambda$	(113)
4.2.3	频率灵敏度 $R_f$	(114)
4.2.4	量子效率 $\eta$	(115)
4.2.5	通量阈 $P_{th}$ 和噪声等效功率 NEP	(115)
4.2.6	归一化探测度 $D^*$	(116)
4.2.7	其他参数	(117)
4.3	光电探测器的噪声	(117)
4.3.1	噪声概念	(117)
4.3.2	噪声描述	(118)
4.3.3	光电探测器的噪声	(119)
4.4	光电导探测器——光敏电阻	(121)
4.4.1	光电转换原理	(121)
4.4.2	工作特性	(122)
4.4.3	几种典型的光敏电阻	(126)
4.4.4	使用注意事项	(127)
4.5	pn 结光伏探测器的工作模式	(127)
4.5.1	光电转换原理	(127)
4.5.2	光伏探测器的工作模式	(128)

4.6	硅光电池——太阳电池	(130)
4.6.1	短路电流和开路电压	(130)
4.6.2	输出功率和最佳负载电阻	(131)
4.6.3	光谱、频率响应及温度特性	(132)
4.6.4	缓变化光电信号探测	(133)
4.6.5	交变光信号探测	(135)
4.7	光电二极管	(136)
4.7.1	Si 光电二极管	(137)
4.7.2	PIN 硅光电二极管	(144)
4.7.3	雪崩光电二极管(APD)	(145)
4.7.4	光电三极管	(146)
4.8	光热探测器	(147)
4.8.1	热探测器的一般概念	(147)
4.8.2	热敏电阻	(148)
4.8.3	热释电探测器	(149)
4.9	直接探测系统的性能分析	(151)
4.9.1	光电探测器的平方律特性	(151)
4.9.2	信噪比性能分析	(152)
4.9.3	直接探测系统的 NEP 分析	(152)
4.10	光频外差探测的基本原理	(154)
4.10.1	光频外差探测的实验装置	(154)
4.10.2	光外差原理	(155)
4.10.3	基本特性	(156)
4.10.4	光频外差探测的空间相位条件	(158)
	练习及思考题 4	(161)
<b>第 5 章</b>	<b>光电成像系统</b>	<b>(162)</b>
5.1	固体摄像器件	(162)
5.1.1	电荷耦合摄像器件	(162)
5.1.2	电荷耦合摄像器件的特性参数	(168)
5.1.3	CMOS 摄像器件	(171)
5.1.4	电荷注入器件(CID)	(173)
5.1.5	红外焦平面器件	(173)
5.2	光电成像原理	(177)
5.2.1	光电成像系统的基本结构	(177)
5.2.2	光电成像系统的基本技术参数	(179)
5.3	红外成像光学系统	(180)
5.3.1	理想光学系统模型	(180)
5.3.2	光学系统中的光阑	(182)
5.3.3	红外成像光学系统的主要参数	(183)
5.3.4	光学系统的像差	(184)



5.3.5	红外光学系统的特点	(185)
5.3.6	典型的红外光学系统	(186)
5.4	红外成像中的信号处理	(188)
5.4.1	前置放大器	(188)
5.4.2	直流恢复	(188)
5.4.3	多路转换技术	(190)
5.4.4	通频带选择	(190)
5.4.5	温度信号的线性化	(190)
5.4.6	中心温度与温度范围的选择	(191)
5.4.7	提高图像质量的计算机处理方法	(191)
5.5	红外成像系统的综合特性	(191)
5.5.1	调制传递函数(MTF)	(192)
5.5.2	噪声等效温差(NETD)	(196)
5.5.3	最小可分辨温差(MRTD)	(197)
5.5.4	最小可探测温差(MDTD)	(198)
5.6	微光像增强器件	(199)
5.6.1	微光像增强器	(199)
5.6.2	微光摄像 CCD 器件	(202)
5.7	纤维光学成像器件	(203)
	练习及思考题 5	(204)
<b>第 6 章</b>	<b>显示技术</b>	(206)
6.1	阴极射线管	(206)
6.1.1	黑白显像管	(206)
6.1.2	彩色显像管	(209)
6.2	液晶显示	(212)
6.2.1	液晶的基本知识	(213)
6.2.2	扭曲向列型液晶显示(TN-LCD)	(215)
6.2.3	超扭曲向列型液晶显示(STN-LCD)	(218)
6.2.4	有源矩阵液晶显示器件(AM-LCD)	(220)
6.3	等离子体显示	(222)
6.3.1	气体放电基本知识	(223)
6.3.2	单色等离子体显示	(224)
6.3.3	彩色等离子体显示	(226)
6.4	电致发光显示	(228)
6.4.1	注入电致发光显示	(228)
6.4.2	高场电致发光显示	(229)
6.5	其他显示技术	(230)
6.5.1	投影显示	(230)
6.5.2	真空荧光显示	(231)
6.5.3	电致变色显示	(231)

6.5.4 电泳显示 .....	(232)
练习及思考题 6 .....	(233)
<b>第 7 章 光电子技术应用实例</b> .....	(234)
7.1 光纤通信 .....	(234)
7.1.1 光纤通信的发展历史 .....	(234)
7.1.2 光纤通信的优点 .....	(235)
7.1.3 光纤通信系统的基本组成 .....	(235)
7.1.4 光纤通信新技术 .....	(237)
7.1.5 光纤通信局域网 .....	(238)
7.1.6 综合业务数字网 .....	(238)
7.2 激光雷达 .....	(238)
7.2.1 激光雷达的优点 .....	(238)
7.2.2 激光雷达原理 .....	(239)
7.2.3 激光雷达的应用 .....	(239)
7.3 激光制导 .....	(240)
7.3.1 激光目标指示器 .....	(241)
7.3.2 激光寻的器 .....	(241)
7.4 红外遥感 .....	(242)
7.4.1 红外遥感技术的发展及特点 .....	(242)
7.4.2 红外遥感仪 .....	(243)
7.5 红外跟踪制导 .....	(244)
7.5.1 红外点源制导系统 .....	(244)
7.5.2 红外成像制导系统 .....	(246)
7.6 光纤传感 .....	(247)
7.6.1 光纤温度传感器 .....	(247)
7.6.2 光纤位移传感器 .....	(248)
7.6.3 光纤陀螺 .....	(248)
7.6.4 光纤传感器阵列 .....	(250)
7.6.5 分布式光纤传感器 .....	(250)
练习及思考题 7 .....	(250)
<b>参考文献</b> .....	(251)

# 第 1 章 光辐射与发光源

任何一种光电系统或光电子器件的使用和评价都离不开特定的光辐射源与光辐射探测器,所以光辐射和光电转换的原理是光电子技术的基本研究内容之一。本章主要介绍光辐射的基本概念和原理,以及在光电子技术中应用比较普遍的典型光辐射源。

## 1.1 电磁波谱与光辐射

### 1.1.1 电磁波的性质与电磁波谱

根据麦克斯韦电磁场理论,若在空间某区域有变化电场  $E$  (或变化磁场  $H$ ),在邻近区域将产生变化的磁场  $H$  (或变化电场  $E$ ),这种变化的电场和变化的磁场不断地交替产生,由近及远以有限的速度在空间传播,形成电磁波。电磁波具有以下性质:

(1)电磁波的电场  $E$  和磁场  $H$  都垂直于波的传播方向,三者相互垂直,所以电磁波是横波。 $E$ 、和  $H$  传播方向构成右手螺旋系。

(2)沿给定方向传播的电磁波, $E$  和  $H$  分别在各自平面内振动,这种特性称为偏振。

(3)空间各点  $E$  和  $H$  都作周期性变化,而且相位相同,即同时达到最大,同时减到最小。

(4)任一时刻,在空间任一点, $E$  和  $H$  在量值上的关系为  $\sqrt{\epsilon}E = \sqrt{\mu}H$ 。

(5)电磁波在真空中传播的速度为  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}$ ,介质中的传播速度为  $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$ 。

$v$  决定于介质的介电系数  $\epsilon$  和磁导率  $\mu$ 。由于  $\epsilon$  和  $\mu$  与电磁波的频率有关,因此介质中不同频率的电磁波具有不同的传播速度,这就是电磁波在介质中的色散现象。

电磁波包括的范围很广,从无线电波到光波,从 X 射线到  $\gamma$  射线,都属于电磁波的范畴,只是波长不同而已。我们可以按照频率或波长的顺序把这些电磁波排列成图表,称为电磁波谱,如图 1-1 所示,光辐射仅占电磁波谱的一极小波段。图中还给出了各种波长范围

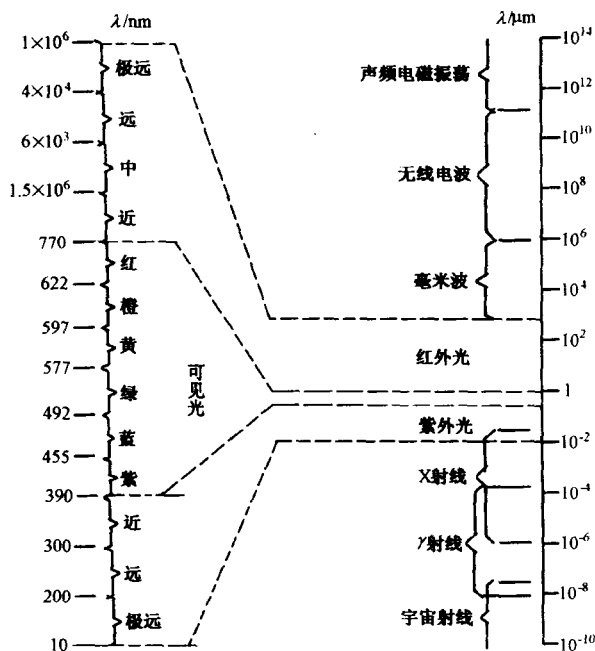


图 1-1 电磁辐射波谱

(波段)电磁波名称。

目前已经发现并得到广泛利用的电磁波有波长达  $10^4\text{m}$  以上的,也有波长短到  $10^{-5}\text{nm}$  以下的。表 1-1 示出了电磁波段的详细划分及用途。

表 1-1 电磁波段的详细划分及用途

波段/nm	名称	用途
$10^{-5}\sim 30$	$\gamma$ 射线	金属探伤、研究核结构
$10^{-4}\sim 100$	X射线	医用、探伤、分析晶体结构
$1\sim 390$	紫外线	医用、照相制版
$390\sim 770$	可见光	
$770\sim 10^6$	红外线	雷达、光纤通信、导航
$10^6\sim 10^9$	微波	电视、雷达、无线电导航
$10^9\sim 10^{10}$	米波	调频广播、电视、导航等
$10^{10}\sim 5\times 10^{10}$	短波	无线电广播、电报通讯
$5\times 10^{10}\sim 2\times 10^{11}$	中短波	电报通讯
$2\times 10^{11}\sim 3\times 10^{12}$	中波	无线电广播
$3\times 10^{12}\sim 3\times 10^{13}$	长波	越洋长距离通讯和导航

## 1.1.2 光辐射

以电磁波形式或粒子(光子)形式传播的能量,它们可以用光学元件反射、成像或色散,这种能量及其传播过程称为光辐射。一般认为其波长在  $10\text{nm}\sim 1\text{mm}$ ,或频率在  $3\times 10^{16}\text{Hz}\sim 3\times 10^{11}\text{Hz}$  范围内。一般按辐射波长及人眼的生理视觉效应将光辐射分成三部分:紫外辐射、可见光和红外辐射。表 1-2 为光辐射波谱的划分。光辐射光谱区的标尺通常采用波长,有时也用到频率和波数,它们之间的关系为

$$\lambda = \frac{v}{\bar{\nu}} = \frac{1}{\bar{\nu}}$$

式中  $\lambda$  为波长, $\nu$  和  $\bar{\nu}$  分别为频率和波数。一般在可见光到紫外波段波长用  $\text{nm}$ 、在红外波段波长用  $\mu\text{m}$  表示。波数的单位习惯用  $\text{cm}^{-1}$ 。

表 1-2 光辐射波谱的划分

波段/nm	辐射名称	波段/nm	辐射名称
100~280	紫外线-C <sup>①</sup>	540~600	可见光-黄色
280~315	紫外线-B	600~640	可见光-橙色
315~380	紫外线-A	640~770	可见光-红色
380~440	可见光-紫色	770~1400	红外线-A
440~460	可见光-蓝色	1400~3000	红外线-B
460~495	可见光-青色	3000~ $10^6$	红外线-C
495~540	可见光-绿色		

注:①表中 A、B、C 分别代表光辐射中近、中、远部分。

可见光。通常人们提到的“光”指的是可见光。可见光是波长在  $390\text{nm}\sim 770\text{nm}$  范围的光辐射,也是人视觉能感受到“光亮”的电磁波。当可见光进入人眼时,人眼的主观感觉依波长

从长到短表现为红色、橙色、黄色、绿色、青色、蓝色和紫色。

紫外辐射。紫外辐射比紫光的波长更短,人眼看不见,波长范围是  $1\text{nm}\sim 390\text{nm}$ 。它可细分为近紫外、远紫外和极远紫外。由于极远紫外在空气中几乎会被完全吸收,只能在真空中传播,所以又称为真空紫外辐射。在进行太阳紫外辐射的研究中,常将紫外辐射分为 A 波段、B 波段和 C 波段。

红外辐射。波长在  $0.77\mu\text{m}\sim 1000\mu\text{m}$  的是红外辐射。通常分为近红外、中红外和远红外三部分。

## 1.2 辐射度学与光度学基本知识

为了对光辐射进行定量描述,需要引入计量光辐射的物理量。而对于光辐射的探测和计量,存在着辐射度单位和光度单位两套不同的体系。在辐射度单位体系中,辐通量(又称为辐射功率)或者辐射能是基本量,是只与辐射客体有关的量。其基本单位是瓦特(W)或者焦耳(J)。辐射度学适用于整个电磁波段。光度单位体系是一套反映视觉亮暗特性的光辐射计量单位,被选作基本量的不是光通量而是发光强度,其基本单位是坎德拉。光度学只适用于可见光波段。以上两类单位体系中的物理量在物理概念上是不同的,但所用的物理符号一一对应。为了区别起见,在对应的物理量符号标角标“e”表示辐射度物理量,角标“v”表示光度物理量。下面分别介绍这两套单位体系中的物理量。

### 1.2.1 辐射量

#### 1. 辐射能

辐射能是以辐射形式发射或传输的电磁波(主要指紫外、可见光和红外辐射)能量。辐射能一般用符号  $Q_e$  表示,其单位是焦耳(J)。

#### 2. 辐射通量

辐射通量  $\Phi_e$  又称为辐射功率,定义为单位时间内流过的辐射能量,即

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

辐射通量的单位是瓦特(W)或焦耳/秒(J/s)。

#### 3. 辐射出射度

辐射出射度  $M_e$  是用来反映物体辐射能力的物理量。定义为辐射体单位面积向半空间发射的辐射通量,即

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \quad (1-2)$$

单位是  $\text{W}/\text{m}^2$ 。

#### 4. 辐射强度

辐射强度  $I_e$  定义为:点辐射源在给定方向上发射的在单位立体角内的辐射通量,用  $I_e$  表

示,即

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \quad (1-3)$$

辐射强度的单位是瓦特·球面度<sup>-1</sup>(W·sr<sup>-1</sup>)。

由辐射强度的定义可知,如果一个置于各向同性、均匀介质中的点辐射体向所有方向发射的总辐射通量是  $\Phi_e$ ,则该点辐射体在各个方向的辐射强度  $I_e$ 是常量,有

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

## 5. 辐射亮度

辐射亮度  $L_e$ 定义为面辐射源在某一给定方向上的辐射通量,如图 1-2 所示。

$$L_e = \frac{dI_e}{dS \cos\theta} = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega dS \cos\theta} \quad (1-5)$$

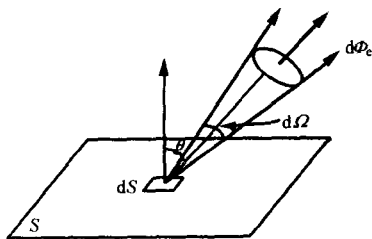


图 1-2 辐射亮度示意图

式中  $\theta$  是给定方向和辐射源面元法线间的夹角。辐射亮度的单位是瓦特/球面度·米<sup>2</sup>(W/sr·m<sup>2</sup>)。

显然一般辐射体的辐射强度与空间方向有关。但是有些辐射体的辐射强度在空间方向上的分布满足

$$dI_e = dI_{e0} \cos\theta \quad (1-6)$$

式中  $I_{e0}$ 是面元  $dS$  沿其法线方向的辐射强度。符合上式规律的辐射体称为余弦辐射体或朗伯体。将(1-6)式代入(1-5)式,得到余弦辐射体的辐射亮度为

$$L_e = \frac{dI_{e0}}{dS} = L_{e0} \quad (1-7)$$

可见余弦辐射体的辐射亮度是均匀的,与方向角  $\theta$  无关。将(1-7)式代入(1-5)式,得到余弦辐射体的面元  $dS$  向半空间的辐射通量为

$$d\Phi_e = L_{e0} dS \int \cos\theta d\Omega = L_{e0} \pi dS \quad (1-8)$$

计算上式积分时应用了立体角的定义  $d\Omega = \frac{dS}{r^2} = \frac{(r \sin\theta d\varphi)(r d\theta)}{r^2} = \sin\theta d\theta d\varphi$ 。余弦辐射体的辐射出射度为

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS} = L_{e0} \pi \quad (1-9)$$

## 6. 辐射照度

在辐射接收面上的辐射照度  $E_e$ 定义为照射在面元上的辐射通量  $d\Phi_e$  与该面元的面积  $dA$  之比。即

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad (1-10)$$

单位是 W/m<sup>2</sup>。

由辐射通量和辐射强度之间的关系式(1-4)我们知道,一个辐射强度为 1W·sr<sup>-1</sup>的点光源,总辐射通量等于 4πW。现在假如有一个以这个点光源为球心,半径为 1m 的球面包围这个

点光源,则该球面上的辐射照度恰好等于  $1\text{W}/\text{m}^2$ 。用这样的假想球面不难求得辐射强度为  $I_e$ 。在距离  $R$  处的辐射照度为  $E_e = \frac{I_e}{R^2}$ 。这一结果表明,一个均匀点光源在空间一点的辐射照度与该光源的辐射强度成正比,与距离平方成反比。

### 7. 单色辐射度量

对于单色光辐射,同样可以采用上述物理量表示,只不过均定义为单位波长间隔内对应的辐射度量,其名称及单位见表 1-3。并且对所有辐射量  $X$  来说单色辐射度量与辐射度量之间均满足

$$X_e = \int_0^\infty X_{e,\lambda} d\lambda \quad (1-11)$$

表 1-3 单色光辐射的名称、符号及单位

度量名称	符号	定义式	单位名称	单位符号
单色辐射通量	$\Phi_{e,\lambda}$	$d\Phi_e/d\lambda$	瓦特/微米	$\text{W}/\mu\text{m}$
单色辐射出射度	$M_{e,\lambda}$	$dM_e/d\lambda$	瓦特/(米 <sup>2</sup> ·微米)	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$
单色辐射强度	$I_{e,\lambda}$	$dI_e/d\lambda$	瓦特/(球面度·微米)	$\text{W}/(\text{sr} \cdot \mu\text{m})$
单色辐射亮度	$L_{e,\lambda}$	$dL_e/d\lambda$	瓦特/(米 <sup>2</sup> ·球面度·微米)	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$
单色辐射照度	$E_{e,\lambda}$	$dE_e/d\lambda$	瓦特/(米 <sup>2</sup> ·微米)	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$

## 1.2.2 光度量

由于人眼的视觉细胞对不同频率的辐射有不同响应,故用辐射度单位描述的光辐射不能正确反映人的亮暗感觉。光度单位体系是一套反映视觉亮暗特性的光辐射计量单位,在光频区域光度学的物理量可以用与辐射度学的基本物理量  $Q_e$ 、 $\Phi_e$ 、 $I_e$ 、 $M_e$ 、 $L_e$ 、 $E_e$  相对应的  $Q_v$ 、 $\Phi_v$ 、 $I_v$ 、 $M_v$ 、 $L_v$ 、 $E_v$  来表示,其定义完全一一对应,其关系如表 1-4 所示。

表 1-4 常用辐度量与光度量之间的对应关系

辐射度物理量				对应的光度量			
物理量名称	符号	定义或定义式	单位	物理量名称	符号	定义或定义式	单位
辐射能	$Q_e$		J	光量	$Q_v$	$Q_v = \int \Phi_v dt$	$\text{lm} \cdot \text{s}$
辐射通量	$\Phi_e$	$\Phi_e = dQ_e/dt$	W	光通量	$\Phi_v$	$\Phi_v = \int I_v d\Omega$	lm
辐射出射度	$M_e$	$M_e = d\Phi_e/dS$	$\text{W}/\text{m}^2$	光出射度	$M_v$	$M_v = d\Phi_v/dS$	$\text{lm}/\text{m}^2$
辐射强度	$I_e$	$I_e = d\Phi_e/d\Omega$	W/sr	发光强度	$I_v$	基本量	cd
辐射亮度	$L_e$	$L_e = dI_e/(dS \cos\theta)$	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$	(光)亮度	$L_v$	$L_v = dI_v/(dS \cos\theta)$	$\text{cd}/\text{m}^2$
辐射照度	$E_e$	$E_e = d\Phi_e/dA$	$\text{W}/\text{m}^2$	(光)照度	$E_v$	$E_v = d\Phi_v/dA$	lx

光度量的单位是国际计量委员会(CIPM)规定的。在光度单位体系中,被选作基本单位的不是相应的光量或光通量而是发光强度,其单位是坎德拉。坎德拉不仅是光度体系的基本单位,而且也是国际单位制(SI)的七个基本单位之一。它的定义是“一个光源发出频率为  $540 \times 10^{12}\text{Hz}$  的单色辐射,若在一给定方向上的辐射强度为  $1/683 \text{W}/\text{sr}$ ,则该光源在该方向上的发

光强度为 1cd”。

光度量与辐射度量之间的关系可以用光视效能与光视效率表示。光视效能描述某一波长的单色光辐射通量可以产生多少相应的单色光通量。即光视效能  $K_\lambda$  定义为同一波长下测得的光通量与辐射通量的比之,即

$$K_\lambda = \frac{\Phi_{v\lambda}}{\Phi_{e\lambda}} \quad (1-12)$$

单位是流明/瓦特(lm/W)。通过对标准光度观察者的实验测定,在辐射频率  $540 \times 10^{12}$ Hz(波长 555nm)处,  $K_\lambda$  有最大值,其数值为  $K_m = 683$  lm/W。单色光视效率是  $K_\lambda$  用  $K_m$  归一化的结果,其定义为

$$V_\lambda = \frac{K_\lambda}{K_m} = \frac{1}{K_m} \frac{\Phi_{v\lambda}}{\Phi_{e\lambda}} \quad (1-13)$$

图 1-3 给出了明视觉  $V_\lambda$  (日间视觉)和暗视觉  $V'_\lambda$  (夜间视觉)条件下单色光视效率曲线,表 1-5 则是人眼对一些典型波长的单色光视效率值。

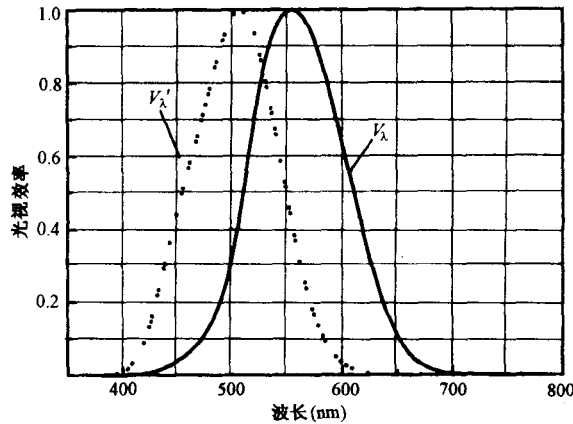


图 1-3 光谱光视效率曲线

表 1-5 单色光视效率数值

光的颜色	$\lambda$ /nm	$V_\lambda$	光的颜色	$\lambda$ /nm	$V_\lambda$
紫	360	0.00000	黄	570	0.95200
	380	0.00004		590	0.75700
	410	0.00121	橙	610	0.50300
	430	0.01160		630	0.26500
450	0.03800	650		0.10700	
蓝	450	0.03800	红	670	0.03200
青	470	0.09098		690	0.00821
	490	0.20802		710	0.00209
绿	510	0.50300		740	0.00025
	530	0.86200		770	0.00003
黄	550	0.99495	790	0.00000	
	555	1.00000			



## 1.3 热辐射基本定律

任何 0K 以上温度的物体都会发射各种波长的电磁波,这种由于物体中的分子、原子受到热激发而发射电磁波的现象称为热辐射。实验表明,热辐射具有连续的辐射谱,波长自远红外区延伸到紫外区,并且辐射能按波长的分布主要决定于物体的温度。本节介绍热辐射的一些基本定律。

### 1.3.1 单色吸收比和单色反射比

由 1.2 节的讨论可知,描述物体辐射规律的物理量是辐射出射度和单色辐射出射度,它们之间的关系是

$$M_e(T) = \int_0^{\infty} M_{e\lambda}(T) d\lambda \quad (1-14)$$

但是,任一物体向周围发射电磁波的同时,也吸收周围物体发射的辐射能。当辐射从外界入射到不透明的物体表面上时,一部分能量被吸收,另一部分能量从表面反射(如果物体是透明的,则还有一部分能量透射)。被物体吸收的能量与入射的能量之比称为该物体的吸收比,反射的能量与入射的能量之比称为该物体的反射比。在波长  $\lambda$  到  $\lambda + d\lambda$  范围内的吸收比称为单色吸收比,用  $\alpha_\lambda(T)$  表示;相应的反射比称为单色反射比,用  $\rho_\lambda(T)$  表示。对于不透明的物体,单色吸收比和单色反射比之和等于 1,即

$$\alpha_\lambda(T) + \rho_\lambda(T) = 1 \quad (1-15)$$

若物体在任何温度下,对任何波长的辐射能的吸收比都等于 1,即  $\alpha_\lambda(T) \equiv 1$ ,则称该物体为绝对黑体(简称黑体)。

### 1.3.2 基尔霍夫辐射定律

1869 年,基尔霍夫从理论上提出了关于物体辐射出射度与吸收比内在联系的重要定律:在同样的温度下,各种不同物体对相同波长的单色辐射出射度与单色吸收比之比值都相等,并等于该温度下黑体对同一波长的单色辐射出射度。即

$$\frac{M_{e\lambda 1}(T)}{\alpha_{e\lambda 1}(T)} = \frac{M_{e\lambda 2}(T)}{\alpha_{e\lambda 2}(T)} = \dots = M_{e\lambda b}(T) \quad (1-16)$$

式中  $M_{e\lambda b}$  为黑体的单色辐射出射度。

### 1.3.3 普朗克公式

黑体处于温度  $T$  时,在波长  $\lambda$  处的单色辐射出射度由普朗克公式给出

$$M_{e\lambda b}(T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda k_B T} - 1)} \quad (1-17)$$

式中  $h$  为普朗克常数, $c$  为真空中的光速, $k_B$  为波尔兹曼常数。令,  $C_1 = 2\pi hc^2$ ,  $C_2 = hc/k_B$ , 则(1-17)式可改写为