

现代光电信息 技术及应用

主 编 张记龙
副主编 王志斌 李晓

XIANDAI GUANGDIAN XINXI JISHU JI YINGYON



国防工业出版社

National Defense Industry Press

普通高等学校光电信息系统专业教材

现代光电信息技术及应用

主编	张记龙
副主编	王志斌 李晓
参编	李仰军 桂志国

国防工业出版社

• 北京 •

内 容 介 绍

本书以编者多年从事光电信息技术相关专业的本科、研究生的教学讲义为基础,结合编者在光电信息技术与系统的研究成果,参考近年来光电信息技术的最新进展,基于光波载体,以光电信息的产生、传播、调制、控制、处理、存储与显示为主线,从光、电、信息和光电混合信息的角度,阐述光电信息技术所涉及的光的特性与度量、光的产生和传播、光的调制与控制、光电探测、光电信息存储、光电信息的电光转换即显示以及光学信息处理系统的理论和方法,最后介绍了光电信息技术的典型应用。

全书以信息为主线,力图阐明光、电、光电混合信息系统的理论、技术、方法和应用。本书可为光电信息系统专业本科、研究生和工程技术人员提供光电信息系统分析、设计的基本理论、技术和方法。

图书在版本编目(CIP)数据

现代光电信息技术及应用/张记龙主编. —北京:
国防工业出版社, 2005.2

ISBE 7-118-04113-7

I. 现... II. 张... III. 现代光电—信
息技术—教材 IV. TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 023676 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 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 19 3/4 字数 480 千字

2005 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1 — 5000 册 定价 30.00 元 (含光盘)

(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

光具有极快的速度、极大的频宽、极高的信息容量，在现代信息技术中得到了广泛的应用。光电信息技术是光电子技术、微电子技术，信息技术、光信息技术、图像处理等学科相互交叉、相互渗透和相互结合的产物，它已成为世界上发达国家的主导产业，其应用日益广泛和深入。

编写《现代光电信息技术与应用》是编者梦寐以求的愿望。编者酷爱光电信息技术，大学毕业后的几年从事了与信息处理相关的教学和科研工作，利用俄罗斯攻读光电仪器与系统博士学位和在英国做高级访问学者的便利条件收集了有关资料和信息，回国后承担光电信息技术的教学和科学研究工作，多年的经历和体会，使编者对光电信息技术有了较深刻的理解，这些均对本书的完成奠定了基础。

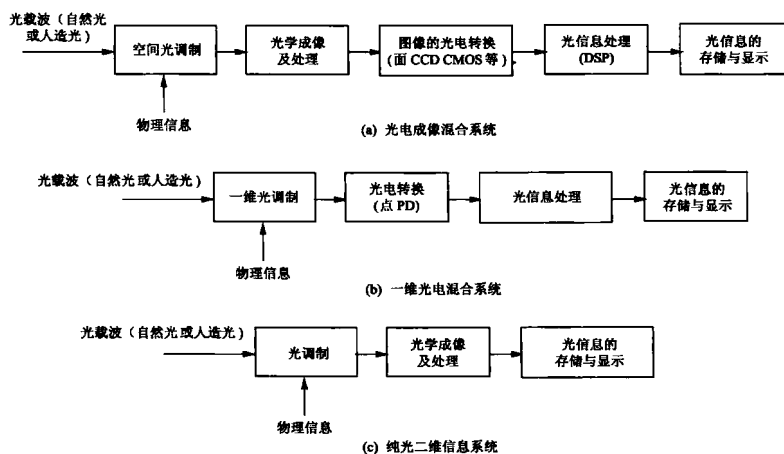


图 1 光电信息系统的分类

光电信息技术是研究以光为信息载体的光电信息系统中光信息的调制、转换、光电信息的处理存储和显示的有关理论、方法、器件等。编者认为，光电信息系统大体上可分为光电成像混合系统、一维光电系统和纯光二维信息系统（如图 1）。

本书以编者多年从事光电信息技术相关的本科、研究生的教学讲义和体会为基础，结合编者在光电信息技术与系统的研究成果，参考近年来光电信息技术的最新进展，以光为信息的载体，以光电信息的产生、传播、调制、控制、处理、存储与显示为主线，从光、电、信息和光电混合信息技术的角度，阐述光电信息技术所涉及的光的特性与度量、光的产生和传播、光的调制与控制、光电探测、光电信息存储、光电信息的显示以及光学信息处理系统的理论和方法，并介绍了编者及其课题组在光电信息技术领域的研究成果。全书以信息为主线，以具有优异特性的光为研究对象，介绍光、电、光电混合信息系统的理论、技术及应用。本书可供光电信息技术专业的本科、研究生和工程技术

人员提供光电信息系统分析、设计的基本理论、技术和方法。

围绕光电信息系统的构成和分类,全书共分为9章,第1章为光信息源及其特性、光辐射的度量,主要介绍光的特性、光的度量、常见的光源及其特性和光传播的几个基本定理,为后续章节奠定物理基础;第2章为二维线性时、空不变系统分析基础,介绍线性时、空系统的理论,常见的时空信号以及其傅立叶变换,图像信号的采集,为光电信息系统的研究奠定数学基础;第3章为光波在自由空间和波导中的传播,首先介绍平面波角谱的概念,并从角谱的传播导出光在自由空间传播的规律;同时利用光的直线传播和波动理论,介绍光在波导中的传播行为,以解决光信息在光电器件之间的传播问题;第4章为光电信息转换原理及器件,首先介绍光电信息转换的能带理论,然后介绍半导体的三个光电效应,即光电发射效应、光电导效应、光伏效应,最后介绍常用光电信息转换器件;第5章是光信息的调制,讲述信息加载于光波的技术,本章首先介绍光调制的基本原理和手段,最后介绍常用的光调制技术以及空间光调制器等方面的内容;第6章为光学成像系统的传递函数,讲述光学成像系统的分析,介绍相干传递函数、互强度传递函数,光学传递函数;第7章为光信息处理技术,介绍空间滤波和光学信息处理基本的理论和典型的处理方法;第8章介绍光电信息的存储与显示,重点介绍光盘存储技术、全息存储技术、液晶显示器(LCD)、LCOS和等离子体显示器(PDP)的原理和结构;第9章为典型光电信息系统,是编者在光电信息技术领域的科研成果的总结,包括人眼屈光度光电测试系统、高能X-射线数字成像和计算机层析光电成像系统、被动激光波长和入射方向探测系统、光电信息处理技术在测速领域的应用、基于黑体辐射的瞬态高温测量及校准、基于气体特征光谱吸收的瓦斯浓度光电测试系统和光电混合实时指纹识别系统。

为方便读者检索,附录A给出了国内外有关期刊、网站和学会的信息;为方便读者阅读英文文献,附录B提供了光电信息技术的有关专业词汇。

参与本书主要编写工作的有张记龙教授、王志斌教授、李晓博士、桂志国副教授、李仰军教授、杨述平博士等,郝晓剑博士、赵冬娥博士,王明泉教授、赵俊奇高级工程师提供了光电信息技术应用方面的宝贵资料,山西省光电信息与仪器工程技术研究中心的研究生张悦、田二明、王明、王鹏、薛尚峰等收集了部分资料,本书由张记龙教授主编,杨述平博士编写了第1章,李仰军教授编写了第3章,王志斌教授编写了第6章、李晓博士编写了第2章、第5章、第8章,桂志国副教授编写了第7章,张记龙教授编写了其余章节,并系统地设计、组织了本书的篇章结构、并审读了全书。

编者衷心感谢山西大学、中北大学,俄罗斯圣·彼得堡精密机械与光学大学、英国University of Strathclyde的培养,感谢本书的全体编撰人员付出的辛勤劳动,特别要感谢长期为编者在教学和科研提供后勤支持的家庭成员。

限于编者的水平、本书定有许多不妥和错误之处,敬请读者提出宝贵意见。

编者

中北大学

目 录

第 1 章 光信息源及其特性、光辐射的度量	1
1.1 光的特性	1
1.1.1 光的波动性	1
1.1.2 光的粒子性	3
1.1.3 平面光波的能量与能流密度矢量	4
1.1.4 光的波粒二象性	4
1.2 光辐射的度量	5
1.2.1 光谱光视效率	5
1.2.2 常用的光度量和辐射度量	5
1.3 辐射传播的几个基本定律	7
1.3.1 照度的余弦定律和朗伯辐射表面辐射强度的余弦定律	8
1.3.2 亮度守恒定律	9
1.3.3 照度的距离平方反比定律	10
1.4 光信息源及其特性	11
1.4.1 光源的基本特性参数	11
1.4.2 热辐射与黑体辐射定律	14
1.4.3 自然辐射源——太阳、天空	16
1.4.4 激光光源及其特点	18
参考文献	24
习题	25
第 2 章 二维线性时、空不变系统分析	26
2.1 二维线性时、空不变系统	26
2.1.1 二维线性系统的定义	26
2.1.2 脉冲响应和叠加积分	26
2.2 二维傅里叶变换	27
2.2.1 二维傅里叶变换的定义及存在条件	27
2.2.2 可分离变量函数的傅立叶变换	28
2.2.3 具有圆对称函数的二维傅里叶变换——傅里叶-贝塞尔变换	28
2.2.4 二维傅里叶变换定理	29
2.2.5 常用函数和二维傅里叶变换	31
2.3 二维线性空不变系统：传递函数	34
2.4 二维抽样理论	35
2.4.1 函数的抽样	35
2.4.2 从抽样信号中恢复原函数	36

2.4.3	空间-带宽积	38
	参考文献	38
	习题	39
第 3 章	光波在自由空间和波导中的传播	41
3.1	球面波和平面波的复振幅表示	41
3.1.1	球面波的复振幅表示	41
3.1.2	平面波的复振幅表示	43
3.2	平面波的角谱及角谱的传播	44
3.2.1	平面波的空间频率	44
3.2.2	平面波的角谱及其物理解释	45
3.2.3	平面波角谱的传播	46
3.2.4	衍射孔径对角谱的效应	49
3.3	用角谱理论推导光在自由空间的传播	49
3.3.1	标量衍射的推导及直观解释	49
3.3.2	菲涅耳衍射公式	50
3.3.3	夫琅禾费衍射与傅里叶变换	51
3.4	光波在光波导中的传播	51
3.4.1	基于几何光学的光纤维导光原理	52
3.4.2	基于光的波动光学的波导导光理论	54
3.4.3	光纤中的衰减	59
3.4.4	单模光纤的横模	59
3.4.5	单模光纤的色散	61
	参考文献	64
	习题	64
第 4 章	光电信息转换原理及器件	66
4.1	光电信息转换的物理基础—能带理论	66
4.1.1	晶体中电子的共有化运动导致原子的能级分离, 形成能带	66
4.1.2	能带结构	67
4.1.3	本征半导体、掺杂半导体的能带	67
4.2	半导体中的载流子浓度	69
4.2.1	能级密度	69
4.2.2	费米能级和电子占据率	70
4.2.3	平衡载流子浓度	70
4.2.4	本征半导体中的载流子浓度	72
4.2.5	掺杂半导体的载流子浓度	72
4.2.6	半导体中的非平衡载流子	73
4.3	半导体光电效应	77
4.3.1	光电导效应	78
4.3.2	p-n 结光生伏特效应	81

4.3.3 光电子发射效应	83
4.4 常用光电信息转换器件	85
4.4.1 光电信息转换器件的主要参数	85
4.4.2 光电发射器件	87
4.4.3 光电导器件	89
4.4.4 半导体结型器件	90
4.4.5 电荷耦合器件 (CCD)	98
4.4.6 光电信息转换器件的部分性能比较	102
参考文献	103
习题	103
第 5 章 光信息调制技术	104
5.1 光调制的概念和基本原理	104
5.1.1 光调制的概念及其分类	104
5.1.2 光信号的调制原理	104
5.1.3 实现光调制的几种效应	109
5.2 光信号的调制常用技术	111
5.2.1 直接调制和间接调制	111
5.2.2 光强度调制技术	112
5.2.3 光相位调制技术	114
5.2.4 频率和波长的调制技术	117
5.2.5 光偏振调制	119
5.3 空间光调制技术	121
5.4 基于光栅衍射的光的调制	129
参考文献	132
习题	132
第 6 章 光学成像系统的传递函数	133
6.1 透镜的傅里叶变换	133
6.1.1 透镜的相位变换作用	133
6.1.2 透镜的傅里叶变换性质	134
6.2 光的时、空相干性理论	138
6.2.1 互相干函数与复相干度, 交叉谱密度函数	138
6.2.2 光场自相干函数 () 和复自相干度	142
6.2.3 准单色条件下光场的互强度 J 和复相干因子	143
6.2.4 相干时间、相干长度、相干面积	143
6.3 成像系统的一般分析	145
6.3.1 透镜的点扩散函数 PSF (Point Spread Function)	145
6.3.2 衍射受限成像系统的点扩散函数-用光瞳函数代替透镜的孔径函数	148
6.4 衍射受限系统的相干传递函数 (CTF)	151
6.4.1 相干照明衍射受限系统的物像关系	151

6.4.2	衍射受限系统相干传递函数	152
6.5	衍射受限成像非相干系统的传递函数	153
6.5.1	非相干成像系统的光学传递函数 (OTF)	153
6.5.2	光学传递函数 (OTF) 与相干传递函数 CTF 的关系	156
6.5.3	衍射受限的成像系统 OTF	156
6.6	准单色光照明下衍射受限光学系统的部分相干传递函数	159
6.6.1	准单色光的传播和衍射	159
6.6.2	薄透明物体对互强度的调制	160
6.6.3	部分相干光的衍射	160
6.6.4	范西特-策尼克定理(VanCittert-Zernike)	162
6.6.5	部分相干场中透镜的傅里叶变换性质	165
6.6.6	准单色光照明的光学成像系统的传递函数	166
6.7	像差对传递函数的修正	169
	参考文献	171
	习题	171
第 7 章	光信息处理技术	174
7.1	空间滤波	174
7.1.1	阿贝 (Abbe) 成像理论	174
7.1.2	阿贝-波特(Abbe-Porter)实验	175
7.1.3	空间滤波系统	175
7.2	相干光学信息处理	178
7.2.1	相干光学滤波系统	179
7.2.2	空间滤波的傅里叶分析	180
7.2.3	空间光学滤波器的类型	183
7.2.4	光学系统补偿滤波器	186
7.2.5	几种相干处理技术	187
7.3	非相干光学处理及其应用	189
7.3.1	相干与非相干光学处理主要差异	190
7.3.2	图像的相乘和积分	192
7.3.3	非相干光学相关与卷积处理	193
7.3.4	基于衍射的非相干光学处理	196
7.3.5	基于非相干的多通道并行处理	198
	参考文献	199
	习题	199
第 8 章	光电信息的存储与显示	201
8.1	磁存储技术	201
8.1.1	磁存储的特点	201
8.1.2	磁存储原理	202
8.1.3	磁存储系统的基本结构	202

8.1.4	磁存储的存储方式	205
8.1.5	硬盘的存储原理	205
8.2	光存储技术	206
8.2.1	光盘存储	206
8.2.2	光全息存储	213
8.3	半导体存储技术	218
8.3.1	半导体存储器特点	218
8.3.2	半导体存储器的分类	219
8.3.3	半导体存储器的基本结构和组成	221
8.3.4	快闪存储器(Flash Memory)	223
8.4	显示器的结构、分类及其性能比较	225
8.4.1	显示器的功能、性能、基本结构和分类	226
8.4.2	显示器件基本特性的比较	229
8.5	典型显示器的工作原理和基本技术	229
8.5.1	液晶显示器(LCD)	229
8.5.2	单晶硅反射式液晶(LCOS)技术	236
8.5.3	等离子体显示器(PDP)	239
	参考文献	243
	习题	244
第9章	典型光电信息系统	245
9.1	人眼屈光度光电测试系统	245
9.1.1	屈光度光学测量原理	245
9.1.2	眼底图像信息的采集与处理	246
9.1.3	眼底图像信息的采集与处理结果	247
9.2	高能X—射线计算机层析光电成像系统	247
9.2.1	X射线的计算层析(CT)原理	247
9.2.2	高能X—射线CT光电成像系统的构成	249
9.2.3	疵病检测实例	251
9.3	基于光栅衍射的窄脉冲激光光电告警系统	252
9.3.1	激光光电告警系统的总体结构	252
9.3.2	基于光栅衍射的窄脉冲激光波长和方向探测原理	253
9.3.3	干涉条纹的实时采集与处理	254
9.3.4	样机及其技术指标	255
9.4	弹丸飞行速度的光电测试技术	256
9.4.1	光电测速靶的基本原理及组成	256
9.4.2	光电靶的类型	257
9.5	基于黑体辐射的瞬态高温测量及校准技术	259
9.5.1	蓝宝石光纤瞬态表面高温技术	259
9.5.2	瞬态表面温度动态校准仪	264

9.6 基于气体特征光谱吸收的瓦斯浓度光电监测系统.....267

9.6.1 瓦斯浓度光谱检测的基本原理267

9.6.2 差分吸收检测系统.....269

9.6.3 波长调制检测系统.....270

参考文献.....277

习题.....279

附录 A 现代光电信息技术与应用信息源280

附录 B 光电信息技术汉英名词术语对照282

附录 C 缩略词.....289

第 1 章 光信息源及其特性、光辐射的度量

内容提要:

光是电磁波波谱中波长为 $1\text{ nm}\sim 1\text{ mm}$ 范围或者频率为 $3\times 10^{17}\text{ Hz}\sim 3\times 10^{11}\text{ Hz}$ 范围的电磁辐射,是能量与信息的载体,可见光是波长为 $380\text{ nm}\sim 780\text{ nm}$ 的电磁辐射,可见光刺激人眼产生人眼的视觉效应,同时光也产生热效应,可以用主观和客观两种度量体制即辐射度学和光度学来度量光;光具有波动性和粒子性,光的波动性可以解决光在介质和自由空间以及光电系统的传播规律;光的粒子性和材料的光电特性是光电信息转换器件的物理基础。本章主要介绍光的特性、光的度量、常见的光源及其特性和光传播的几个基本定理,为后续章节奠定基础。

1.1 光的特性

1.1.1 光的波动性

在图 1.1 所示的从无线电波到 γ 射线的整个电磁波谱中, 光辐射只是波长从 $1\text{ nm}\sim 1\text{ mm}$ (频率为 $3\times 10^{17}\text{ Hz}\sim 3\times 10^{11}\text{ Hz}$) 范围的电磁辐射,它包括真空紫外辐射、紫外辐射、可见辐射和红外辐射等部分。可见光是波长为 $380\text{ nm}\sim 780\text{ nm}$ 的光辐射,这一频段范围的电磁波能被人眼所感知。

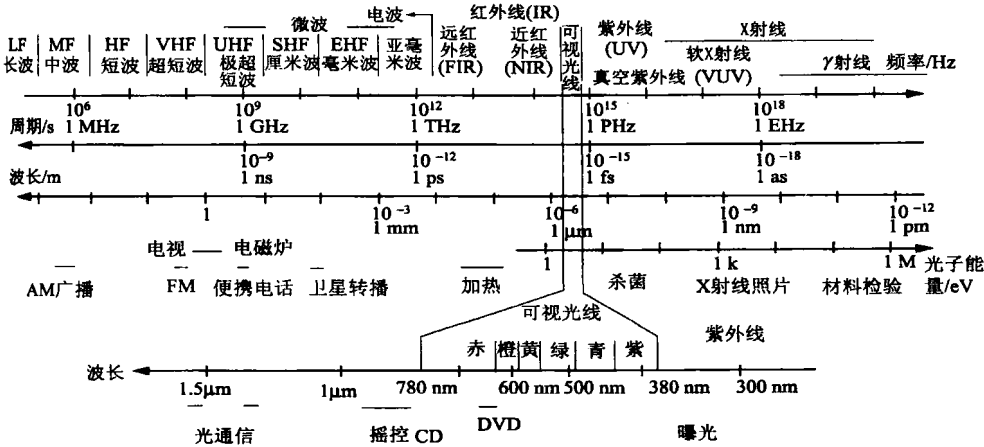


图 1.1 光在电磁波谱中的分布

麦克斯韦方程组(1.1a)~(1.4a)和 (1.1b)~(1.4b)给出了电场 E 、磁场 H 、电位移 D 、磁

通密度 $\mathbf{B}$ 、电流密度 $\mathbf{J}$ 以及电荷密度 ρ 之间的关系:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.1a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1.2a)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1.3a)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.4a)$$

$$\oint_{\Gamma} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \iint_A \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \quad (1.1b)$$

$$\oint_{\Gamma} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu\epsilon \iint_A \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \quad (1.2b)$$

$$\oiint_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (1.3b)$$

$$\oiint_a \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (1.4b)$$

表达式(1.1a)、(1.1b)为法拉第电磁感应定律, 式(1.2a)、(1.2b)为安培环路定律, 式(1.3a)、(1.3b)和(1.4a)、(1.4b)为高斯电磁定律, (1.1a)~(1.4a)四个方程为微分形式, (1.1b)~(1.4b)四个为积分形式。 μ 为介质磁导率, ϵ 为介质电导率, 在真空中 $\mu_0=1.256 \times 10^{-6} \text{ Ns}^2$, $\epsilon_0=8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2\text{N}^{-2}\text{m}^{-2}$ 。当电磁波在真空中或电介质(绝缘体)中传播, 电导率 $\sigma=0$, 电流密度 $\mathbf{J}=0$ 。同时, 在非磁性体中磁导率近似等于真空中的磁导率 $\mu=\mu_0$, 根据上述条件, 式(1.1a)、式(1.4a)可改写成

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (1.5)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (1.6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (1.7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (1.8)$$

应用公式

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \nabla \cdot (\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} = -\nabla^2 \mathbf{E} \quad (1.9)$$

可以导出电场和磁场的波动方程:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \epsilon\mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.10)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \epsilon\mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.11)$$

在适当的边界条件下对上述波动方程求通解, 便可得到各种各样的传播波。其中, $\mathbf{E}, \mathbf{H}$ 的关系可用图 1.2 所示。

比较波动方程的普遍形式

$$\nabla^2 \Psi - \frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0 \quad (1.12)$$

其中, V 为波传播速度。可得到光在自由空间的传播速度为

$$c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

光在介质中的传播速度 $c = 1/\sqrt{\epsilon\mu}$, 介质的折射率 $n = c/V = \sqrt{\epsilon/\epsilon_0}$ 。

平面波和球面波均是波动方程的解。由于对人眼睛起作用的是电场矢量, 因此本书主要研究电场强度, 将空间传播的单色平面波的表达式 $E = A \exp[j(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})]$ (其中, $\mathbf{k}$ 是波矢量, 其方向为波的传播方向, 模是传播参数 $k = 2\pi/\lambda$, 即波数) 代入波动方程式 (1.10) 可以得到:

$$k = 2\pi/\lambda = 2\pi/(V \cdot T) = \omega/V = \omega \cdot \sqrt{\mu\epsilon} \quad (1.13)$$

这就是波在电容率 (介电参数) 为 ϵ 的均匀介质中传播的平面波的传播常数。由于真空中电容率为 ϵ_0 , 所以平面波在真空中的传播常数 k_0 为

$$k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0\mu_0} \quad (1.14)$$

介质中与真空中的波长、波矢量的关系为 $\lambda = \lambda_0/n$, $k = k_0 \cdot n$ 。

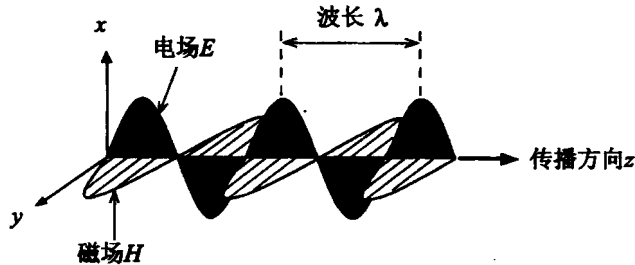


图 1.2 光的传播

1.1.2 光的粒子性

光的波动性可以解释光的干涉、衍射、偏振等现象, 但涉及光和物质的相互作用问题, 如光的发射和吸收, 光的波动理论就出了问题, 光的粒子性的一面便凸显出来。在历史上, 这个问题是 20 世纪初从黑体辐射和光电效应的实际事实与经典理论无法调和的矛盾中提出的。1900 年普朗克(M. Planck)提出量子假说, 认为各种频率的电磁波 (包括光), 只能像微粒似的以一定最小份额的能量 (称为能量子) 发生, 粒子说解释了黑体辐射的频谱分布, 这是一个光的发射问题。光照射在金属表面上可使电子逸出, 逸出电子的能量与光的强度无关, 但与光的频率有关, 这是一个光的吸收问题。1905 年爱因斯坦(A. Einstein)发展了光的量子理论, 成功地解释了光电效应。光的量子理论认为, 光在和物质 (原子) 发生作用时, 它以一定份额的能量 ϵ 被发生和吸收, 该能量正比于光的频率 ν :

$$\epsilon = h\nu \quad (1.15)$$

式中, h 称为普朗克常量, 其数值为 $h = 6.6260755 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, 是物理学中最基本的常量之一。这份能量的携带者表现得像一个静质量为零的粒子, 称为光子。光电发射效应是光的粒子性的有力证明:

$$\frac{1}{2}m_e V_{\max}^2 = h\nu - W \quad (1.16)$$

从光电发射效应可以得到如下结论：

- (1) 从光束传输给每个电子的能量正比于光的频率；
- (2) 每个电子必须克服被称为逸出功 W 的最小能量的约束，才能从金属表面逸出；
- (3) 光电子的最大动能与光的频率成线性关系，与光强度和光的照射时间无关。

1.1.3 平面光波的能量与能流密度矢量

由电磁场理论可知，在电磁场中单位体积所存储的能量为

$$s = \frac{\mathbf{E} \cdot \mathbf{D} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{H}}{2} \quad (1.17)$$

并伴随着能流密度矢量 $\mathbf{S}$ 方向上的能流

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (1.18)$$

其密度为 $|s|$ ，单位为 W/m^2 。

定义能流密度矢量 $\mathbf{S}$ 的模 $|s|$ 为单位时间流过单位面积的能量，其方向为光的传播方向。

能流密度矢量 $\mathbf{S} = v^2 \epsilon \mathbf{E} \times \mathbf{B}$ ，其单位为流过单位面积的功率，下面我们会看到其大小即是辐射照度。

定义强度为在一个周期的平均照度，即

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T s \cdot dt = \frac{1}{2} v \epsilon E_0^2 = 1.33 \times 10^{-3} n E_0^2 \quad (1.19)$$

由于光的振荡频率极高，而所有光电探测器对光频的响应速率比光波的频率低得多，因此探测器响应的是平均照度，即光波的电振动的模。

1.1.4 光的波粒二象性

从光的衍射、干涉等现象可以看出光具有波动性，但为了解释光的吸收、光与物质的相互作用如光电效应等现象又必须将光看作具有离散能量包的粒子，因此光具有波动和粒子两重性。具体表现在：

- (1) 光是由离散能量包的粒子即光子组成，一束光就是一束光子流；
- (2) 每个光子是具有有限长度的电磁波，大量的光子构成的光束的宏观效果可用波动方程来描述。

在涉及能量交换时，如光的发射和光在材料中的吸收以及光电探测器的原理时，仅需考虑光的粒子性；然而，当相互作用没有发生能量交换时，如光的干涉、衍射、反射、折射，我们只需考虑光的波动性。

由上可知：

- (1) 光是横波，其电场和磁场矢量相互垂直，它们的方向与传播方向符合右手螺旋；
- (2) 光波仅仅是全部电磁波谱的一部分；

(3) 光具有波动性和粒子性。

1.2 光辐射的度量

在光电信息技术中，研究光的产生、传输、转换、探测和处理都涉及光的计量，因此有必要了解与光的计量科学的有关量的定义以及量之间的关系。一方面，光是电磁辐射，因此描述电磁辐射的辐射度学的有关量可以全部用来描述光的计量；同时可见光能引起人眼的视觉效应，因此在可见光波的范围，可以用光度学计量光。

辐射度学是研究电磁辐射能定量评价的一门科学，它用能量单位客观描述电磁辐射；辐射作用于人眼所引起的“光”感觉，是一种生理效应，它与辐射的组成、强弱及人的视觉器官的生理特性和人的心理活动都有关系。光度学是根据人类视觉器官的生理特性和某些约定的规范来评价可见光辐射所产生的视觉效应，具有主、客观性。

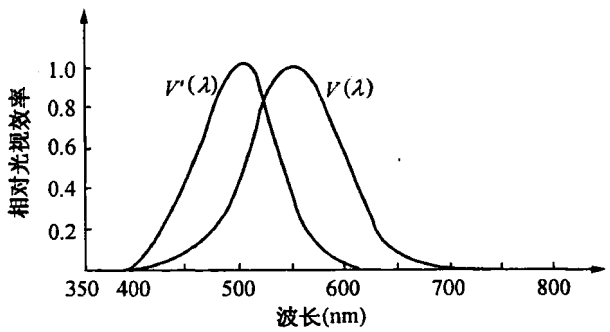


图 1.3 相对光谱光视效率曲线 $V(\lambda)$ (明视) $V'(\lambda)$ (暗视)

1.2.1 光谱光视效率

由于光度测量依赖于人的视觉器官的生理特性，对同样的光辐射，不同人具有不同的亮度感觉；在不同的环境亮度下，同一个人眼对相同的光辐射也有不同的亮度感觉。为了统一评价标准，国际照明委员会（CIE）分别在 1924 年和 1951 公布了在明视觉（亮度大于 3cd/m^2 ）和暗视觉（亮度小于 0.001cd/m^2 ）下，人眼的平均相对光谱光视效率值 $V(\lambda)$ 和 $V'(\lambda)$ （即视见函数），见图 1.3。这两个归一化函数的最大值分别位于 555nm 和 507nm 处。

1979 年第 16 届国际计量大会定义坎德拉：坎德拉是发出频率为 $540 \times 10^{12}\text{Hz}$ 辐射的光源在给定方向的发光强度，此光源在该方向的辐射强度为 $1/683\text{W}$ 每球面度。

1.2.2 常用的光度和辐射度量

在光度学和辐射度学中，测量对象都是光学辐射，仅仅是所依据的评价标准不同。

常用的光度和辐射度量如表 1.1 所示。光度和辐射度量之间的关系可以表示为：

$$X_v = K_m \int X_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \tag{1.20a}$$

$$X'_v = K'_m \int X_{e,\lambda} V'(\lambda) d\lambda \tag{1.20b}$$

式中， X_v 和 X'_v 分别为与 $X_{e,\lambda}$ 相对应的明视觉和暗视觉光度量， $K_m=683 \text{ lm/W}$ ， $K'_m=1700 \text{ lm/W}$ 分别为明视觉和暗视觉的最大光谱光视效率。

表 1.1 常用的光度和辐射度量

辐射度量				光度量			
名称	符号	定义	单位	名称	符号	定义	单位
辐射功率 辐射通量	P Φ_e	以辐射的形式发射、传播或接收的功率	瓦	光通量	Φ_v	根据辐射作用于人眼所产生的视觉效应来评价的辐射功率	流明
辐射强度 (点辐射源在给定方向的)	I_e	$I_e=d\Phi_e/d\Omega$, $d\Omega$ 为包含 $d\Omega_e$ 的立体角	瓦/球面度	发光强度(点光源在给定方向的)	I_v	$I_v = d\Phi_v / d\Omega$, $d\Omega$ 为包含 $d\Omega_v$ 的立体角元	坎德拉
辐射亮度 (面辐射源表面一点在给定方向的)	L_e	$L_e = \frac{dI_e}{dS \cdot \cos \theta}$ dS 为发出辐射的面元	瓦/球面度/米 ²	光亮度(面光源表面一点在给定方向的)	L_v	$L_v = \frac{dI_v}{dS \cdot \cos \theta}$ dS 为发光面元, θ 为面元法线与给定方向间的夹角	坎德拉/米 ²
辐射出射度	M_e	$M_e = d\Phi_e / dS$, dS 为 $d\Phi_e$ 离开处的面元	瓦/米 ²	光出射度	M_v	$M_v = d\Phi_v / dS$, dS 为 $d\Phi_v$ 离开处的面元	流明/米 ²
辐射照度	E_e	$E_e = d\Phi_e / dS$, dS 为 $d\Phi_e$ 所照射的面元	瓦/米 ²	光照度	E_v	$E_v = d\Phi_v / dS$, dS 为 $d\Phi_v$ 所照射的面元	流明/米 ² 勒克斯