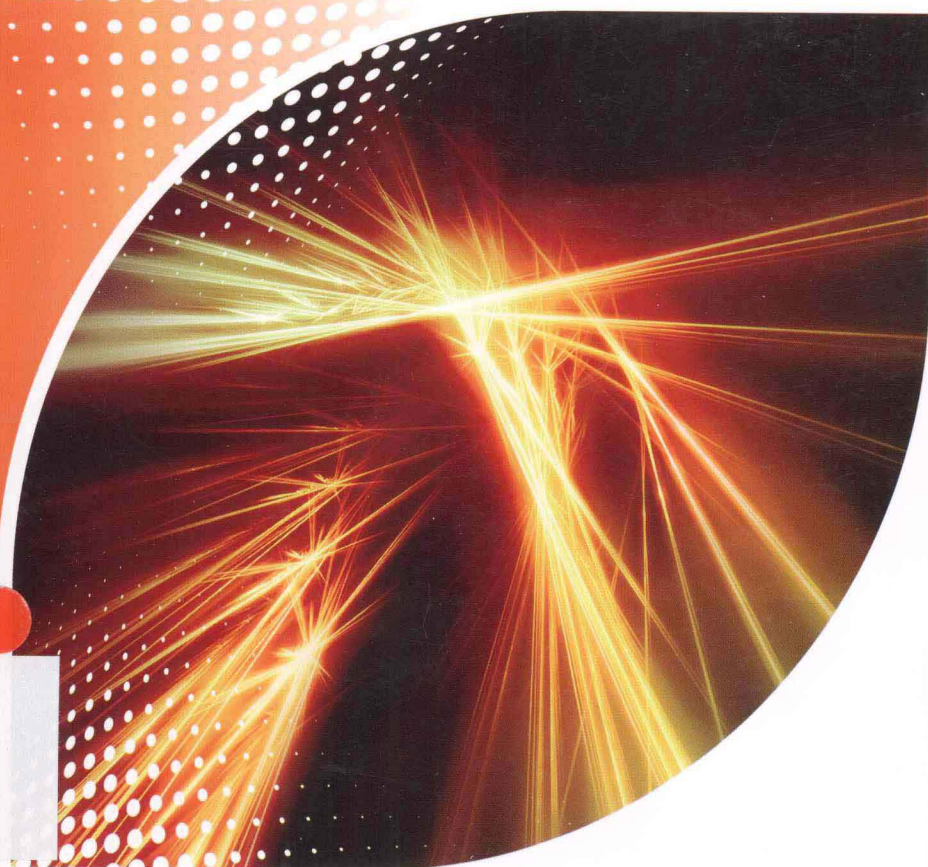




全国高等院校仪器仪表及自动化类“十二五”规划教材

光电子技术基础

◎ 谭保华 主编



图文并茂，体现光电子技术的全貌

基本光学理论与实际光电应用的桥梁

习题形式多样，增强知识的理解与应用



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

全国高等院校仪器仪表及自动化类“十二五”规划教材

光电子技术基础

主 编 谭保华
副主编 吕清花 姚育成
参 编 朱进容 李文兵
邓 罡 刘 婷 张金业

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry

内 容 简 介

本书从光电子技术的概念与特点出发,系统全面地介绍了光电子系统信息传递与处理各个环节的基本概念、基本原理与应用基础。一方面注重光电子技术的基础内容,体现光电子技术的全貌;另一方面适当加入了一些相关领域近年的研究、应用成果,使其更符合光电子技术迅速发展的要求。

第1章介绍光辐射的基本定律和光电子技术中常用的光源。第2章、第3章介绍激光的产生原理,以及光束的调制方法、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典型光辐射探测器的性能。第5章介绍光纤通信技术及器件。第6章介绍光电成像原理与器件、显示技术及相关器件。第7章介绍电光转换现象与发光及图像显示器件。第8章介绍光电子技术在国民经济、国防等方面的应用。

本书内容广泛,涉及光学、光电子学、图像处理、信号与数据处理、通信技术及计算机技术等诸多学科领域,但其作为一门基础教材,即使不具备光电专业的相关知识背景,也可以自成体系地进行学习。本书可作为高等院校光学工程、测控技术、光机电一体化、机电工程等专业本科生或研究生教材,也可作为相关专业科研人员和工程技术人员的参考用书。

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

光电子技术基础 / 谭保华主编. —北京:电子工业出版社, 2014. 1
全国高等院校仪器仪表及自动化专业“十二五”规划教材
ISBN 978-7-121-21782-1

I. ①光… II. ①谭… III. ①光电子技术-高等学校-教材 IV. ①TN2

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第258652号

策划编辑:郭穗娟

责任编辑:刘真平

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:19.5 字数:499.2千字

印 次:2014年1月第1次印刷

定 价:45.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。



前 言

光是一种电磁波，激光的产生则是通过把受激放大技术从电磁波谱的微波波段推广到光学波段而实现的。因此，光电子技术实质上是电子技术在光频波段的延续与扩展。自 20 世纪 60 年代激光诞生以来，光电子技术在理论及应用方面都取得了巨大进展，是现代信息技术的核心，已被广泛应用于各行各业。

光电子技术基础是光信息科学与技术必修的专业基础课程之一，在大学物理和工程光学课程的基础上，结合激光原理与技术的讲解，对整个光电子技术的理论和应用进行全面的介绍，是基本的光学理论与实际光电应用相结合的桥梁。

本书从光电子技术的概念与特点出发，系统全面地介绍了光电子系统信息传递与处理各个环节的基本概念、基本原理与应用基础。一方面，注重光电子技术的基础内容，体现光电子技术的全貌；另一方面，适当加入了一些相关领域的近年研究、应用成果，使其更符合光电子技术迅速发展的要求。本书力争以图文并茂的方式对理论内容进行阐述和说明，并配合一定量的习题进一步启发读者对知识的理解与应用。

本书共 8 章，第 1 章由朱进容编写，第 2 章由李文兵编写，第 3 章由姚育成编写，第 4 章由谭保华编写，第 5 章由邓罡编写，第 6 章由吕清花编写，第 7 章由刘婷编写，第 8 章由张金业编写。全书由谭保华统稿。

本书以教研组多年来从事本科生与硕士生教学工作的积累以及相关科研工作为主要依据，在编写过程中借鉴并引用了相关国内外优秀教材、重要学术期刊刊载的最新研究成果以及同行研究人员的学位论文资料，在此对所引用的文献资料的作者或机构表示衷心感谢！

尽管我们为编写本书付出了心血和努力，但因知识水平和能力有限，且撰写时间较仓促，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2013 年 10 月

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为，歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路173信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第 1 章 光学基础知识与光辐射	1	2.3.1 自激振荡概念	30
1.1 光的波粒二象性	2	2.3.2 激光振荡条件	31
1.1.1 光子的波动性	2	2.4 光学谐振腔和高斯光束	32
1.1.2 光子的粒子性	3	2.4.1 光学谐振腔及其分类	32
1.2 光的电磁理论	3	2.4.2 光学谐振腔稳定条件	33
1.2.1 电磁波的性质	3	2.4.3 高斯光束的基本性质	38
1.2.2 电磁波谱	5	2.4.4 基模高斯光束的特征参数	42
1.2.3 麦克斯韦方程组	6	2.4.5 高斯光束的变换规律	43
1.3 光的传播规律	8	2.5 不同工作物质的激光器	48
1.3.1 光的反射和折射	8	2.5.1 固体激光器	48
1.3.2 光的干涉	8	2.5.2 气体和液体激光器	49
1.3.3 光的衍射	10	2.5.3 半导体激光器	54
1.3.4 光的偏振	11	2.5.4 自由电子激光器	54
1.4 辐射度学和光度学基础	12	习题	56
1.4.1 辐射量	12	第 3 章 光束的调制和扫描	58
1.4.2 光度量	15	3.1 光束调制原理	59
1.5 黑体热辐射的基本定律	16	3.1.1 振幅调制	59
1.5.1 平衡热辐射	16	3.1.2 频率调制和相位调制	59
1.5.2 基尔霍夫定律	16	3.1.3 强度调制	60
1.5.3 绝对黑体(黑体)	16	3.1.4 脉冲调制	61
1.5.4 斯忒潘-玻尔兹曼定律 ..	17	3.1.5 脉冲编码调制	61
1.5.5 维恩位移定律	18	3.2 电光调制	62
1.5.6 瑞利-金斯公式	18	3.2.1 晶体光学基础	62
1.5.7 普朗克定律	18	3.2.2 光在电光晶体中的传播	63
习题	20	3.2.3 电光调制	66
第 2 章 激光基本原理	21	3.2.4 电光波导调制	70
2.1 相干性的光子描述	22	3.2.5 设计电光调制器应该考虑 的问题	70
2.1.1 光子的基本性质	22	3.3 声光调制	71
2.1.2 光子的相干性和光子简 并度	22	3.3.1 光波在声光晶体中的传播	71
2.1.3 光子的相干性和光子简 光度	25	3.3.2 声光调制的工作原理	72
2.2 激光的形成和基本特征	26	3.3.3 声光波导调制器	73
2.2.1 光的受激辐射基本概念	26	3.3.4 设计声光调制器应考虑 的问题	74
2.2.2 光的受激辐射放大	29		
2.3 光的自激振荡	30		

3.4	磁光调制	74	4.6.2	光电倍增管	111
3.4.1	磁光体调制器	75	4.6.3	PIN管	112
3.4.2	磁光波导调制器	75	4.6.4	雪崩光电二极管	113
3.5	直接调制	76	4.6.5	光电三极管	115
3.6	光束扫描技术	77	4.6.6	常见半导体光电器件的 应用选择	117
3.6.1	机械扫描	77	4.7	热释电探测器	118
3.6.2	电光扫描	78	4.7.1	热释电探测器的工作 原理和结构	118
3.6.3	声光扫描	79	4.7.2	热释电探测器的特性	123
3.7	空间光调制器	80	4.7.3	热释电器件的类型	125
3.7.1	泡克耳读出光调制器	80	4.7.4	热释电探测器的应用	127
3.7.2	液晶空间光调制器	82	4.8	直接探测系统的性能分析	127
习题		84	4.8.1	光电探测器的平方律 特性	128
第4章	光辐射探测原理和器件	85	4.8.2	信噪比性能分析	129
4.1	光电探测的基本物理效应	86	4.8.3	直接探测系统的探测 极限	130
4.1.1	外光电效应	86	4.8.4	其他参数	132
4.1.2	内光电效应	87	4.9	光频外差探测的基本原理	132
4.1.3	光热效应的一般规律	89	4.9.1	光外差原理	132
4.1.4	光电转换定律	92	4.9.2	基本特性	133
4.2	光电探测器的性能参数	93	4.9.3	光频外差探测的相位 条件	135
4.2.1	光电探测器的响应特性	93	习题		139
4.2.2	光电探测器的噪声特性	95	第5章	光纤通信技术	141
4.2.3	光电探测器的量子效率	96	5.1	光纤基本知识	142
4.2.4	光电探测器的其他参数	97	5.1.1	光纤的发明和发展	142
4.3	光敏电阻	97	5.1.2	光纤的基本工作原理和 结构	143
4.3.1	光敏电阻的结构与原理	97	5.1.3	光纤的分类	143
4.3.2	光敏电阻的应用	100	5.1.4	光纤的制造	145
4.4	光电池	100	5.1.5	光纤通信系统	147
4.4.1	光电池的结构与特性	100	5.2	光在光纤波导中的传播	148
4.4.2	光电池的应用	103	5.2.1	光纤原理的几何光学 描述	148
4.5	光电二极管	105	5.2.2	光纤中的电磁波	150
4.5.1	光电二极管的结构和特性	105	5.2.3	阶跃折射率光纤中的 传导模式	153
4.5.2	光电二极管的应用	109	5.2.4	渐变折射率光纤中的	
4.6	其他光电管	109			
4.6.1	光电管	109			

传导模式	158	第 7 章 电光转换现象与发光及图像显示器件	223
5.3 光纤的损耗与色散	160	7.1 发光二极管	224
5.3.1 光纤中的损耗	160	7.1.1 发光二极管的工作原理及结构	224
5.3.2 吸收损耗	161	7.1.2 发光二极管的特性及技术	225
5.3.3 散射损耗	162	7.1.3 LED 的应用领域	229
5.3.4 外部损耗	162	7.2 液晶显示器(LCD)	230
5.3.5 光纤通信波段	163	7.2.1 液晶显示器的分类和特性	230
5.3.6 光纤中损耗的测量	163	7.2.2 TFT 液晶显示器的物理结构和工作原理	233
5.3.7 光纤中的色散	164	7.2.3 TFT 液晶显示器的制造工艺	234
5.3.8 常用单模光纤	166	7.2.4 液晶显示器的性能及光学特性	240
5.4 光通信器件	168	7.3 等离子体显示器 (PDP)	242
5.4.1 光源	168	7.3.1 等离子体的产生及等离子体显示器的发展历史	242
5.4.2 光探测器	172	7.3.2 等离子体显示器的分类及 AC-PDP 的工作原理	243
5.4.3 光放大器	172	7.3.3 等离子体显示器的特性和应用	247
5.4.4 光纤连接器和光纤耦合器	175	7.4 有机电致发光显示器	248
5.4.5 其他光通信器件	177	7.4.1 有机电致发光显示器的发展历史	248
习题	178	7.4.2 有机电致发光显示器的发光原理	250
第 6 章 光电成像系统	181	7.4.3 有机电致发光显示器的材料	252
6.1 光电成像系统概述	182	7.4.4 有机电致发光显示器的性能参数	254
6.2 固体摄像器件的分类及性能	183	7.4.5 有机电致发光显示器的制备过程	256
6.2.1 电荷耦合摄像器件	183	7.5 其他显示技术	259
6.2.2 电荷耦合摄像器件的特性参数	191	7.5.1 场致发射平板显示器	259
6.2.3 互补金属氧化物半导体图像传感器 CMOS	196	7.5.2 立体显示技术	267
6.2.4 红外焦平面器件	200	习题	271
6.3 红外成像技术	202		
6.3.1 红外成像的基本原理	203		
6.3.2 红外成像器件的参数	207		
6.3.3 典型的红外光学系统	209		
6.4 光学成像系统和光学传递函数	211		
6.4.1 光学传递函数 (OTF)	212		
6.4.2 调制传递函数 (MTF)	215		
6.4.3 光学成像系统总体性能评价和分析	217		
习题	221		

第 8 章 光电子技术应用举例	272	8.6 激光印刷	286
8.1 光电成像系统的应用	273	8.6.1 激光照排系统	286
8.1.1 线阵 CCD 的应用	273	8.6.2 激光打印机和复印机	286
8.1.2 面阵 CCD 和 CMOS 的 应用	273	8.7 激光加工	288
8.1.3 红外成像系统的应用	274	8.7.1 激光切割	288
8.2 CCD 摄像机和数码相机	274	8.7.2 激光打孔	288
8.2.1 CCD 摄像机	274	8.7.3 激光焊接	289
8.2.2 数码相机	275	8.7.4 激光热处理	289
8.3 光盘存储	276	8.8 激光雷达	290
8.3.1 分类与信息存储	277	8.8.1 激光大气遥感	290
8.3.2 DVD 与 CD 的区别	278	8.8.2 激光测距	293
8.4 全息技术应用	279	8.9 激光武器	293
8.4.1 全息干涉测量	279	8.9.1 激光武器的关键技术	293
8.4.2 全息存储	280	8.9.2 机载和星载激光武器	294
8.4.3 全息三维显示	281	8.10 激光医学应用	294
8.4.4 全息光学元件	282	8.10.1 激光美容	294
8.5 光纤通信	283	8.10.2 激光近视治疗	294
8.5.1 光纤通信系统结构	283	8.10.3 激光碎石	295
8.5.2 光纤到户	285	习题	296
		参考文献	297

第 1 章

光学基础知识与光辐射

【学习目标】

通过本章学习，掌握光的本性、电磁波的特性、麦克斯韦方程组和黑体辐射基本定律等相关知识，了解辐射度学和光度学基础知识，为后续章节的学习打下基础。

【学习要求】

- 掌握光的波粒二象性及其典型现象
- 掌握电磁波的产生、传播及在空间传播的电磁波的一些普遍特性
- 掌握麦克斯韦方程组的积分形式和微分形式
- 掌握光的传播规律
- 了解辐射度学和光度学基础知识
- 掌握黑体热辐射的一些基本定律

【引例】

光学的基本任务是研究光的基本属性、光的传播和接收以及辐射等的基本规律；光和其他物质相互作用、光的控制和探测以及光在科学技术等方面的应用。本章主要介绍光电子技术必备的一些光学基础知识和光辐射的基本定律，如光的波粒二象性、光的电磁理论、光传播规律、光辐射的探测和计量，以及光辐射的基本定律等。

如图 1.1 所示，就是在沙漠中，由于光的折射和全反射而产生的海市蜃楼现象。

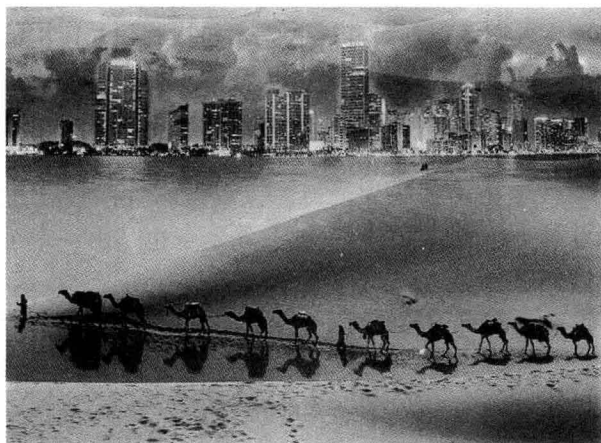


图 1.1 海市蜃楼

1.1 光的波粒二象性

在人们对物理学的研究过程中，光的本性和光的颜色问题一直是研究的热点。17世纪西方对于光的本质的认识有两种主要的学说：一是以牛顿为代表的微粒说，他们认为光是直线传播的微粒流；另一种是以惠更斯为代表的波动说，他们认为光是在弹性介质中传播的波动。

惠更斯认为，光是一种机械波，光波是一种靠物质载体来传播的纵向波，传播它的物质载体是“以太”；波面上的各点本身就是引起媒质振动的波源。根据这一理论，惠更斯证明了光的反射定律和折射定律，也比较好地解释了光的衍射、双折射现象和著名的“牛顿环”实验。如果说这些理论不易理解，惠更斯又举出了一个生活中的例子来反驳微粒说。如果光是由粒子组成的，那么在光的传播过程中各粒子必然互相碰撞，这样一定会导致光的传播方向的改变。而事实并非如此。但是牛顿提出了两点反驳惠更斯的理由。一是光如果是一种波，它应该同声波一样可以绕过障碍物；二是方解石的双折射现象说明光在不同的边上有不同的性质，而波动说是无法解释其原因的。由于牛顿的权威，微粒说占了上风，致使很长时间波动说观点被忽略。

到了19世纪，杨氏（T. Young）和非涅尔（A. J. Fresnel）等人发现了光的干涉、衍射和偏振等现象。这些现象都是光的波动性的基本特征。1850年，佛科（J. B. Foucault）利用实验测出了光在水中的速度，证实光在水中的速度要小于在空气中的速度，这些事实都为波动说提供了重要的实验依据。

19世纪中期，麦克斯韦（J. C. Maxwell）建立了电磁场理论，确认光是一种电磁波，否定了惠更斯的机械波动说。随后赫兹在实验室证明了电磁波的存在，并进一步证明了电磁波和光波一样能发生反射、折射、干涉和偏振等现象。19世纪末，迈克尔逊干涉实验进一步摒弃了有关“以太”的假设，从而为波动说建立了更为坚实的理论基础。

但是，从19世纪末开始，人们发现了一些不能用波动说解释的现象，如黑体辐射、光电效应和原子的线状光谱等，人们认识到要解释这些光和物质相互作用的现象，光必须具有粒子性。20世纪初普朗克提出了光辐射的量子理论。1905年爱因斯坦发表了题为《关于光的产生和转化的一个推测性观点》的论文。他认为对于时间的平均值，光表现为波动；而对于时间的瞬时值，光表现为粒子性。这是历史上第一次揭示波粒二象性，这一理论得到了学术界的广泛接受。1921年，爱因斯坦因为“光的波粒二象性”这一成就而获得了诺贝尔物理学奖。他提出光在吸收和发射时能量是一份一份的，光本身也是由一个个不可分割的能量子组成的，这些能量子就叫做光子。

综上所述，光具有波动性和粒子性的双重性质，所以通常称光具有波粒二象性。光的波粒二象性在20世纪初得到了科学家们的公认。

1.1.1 光子的波动性

光子能够表现出经典电磁波的干涉、折射和衍射等性质。描述光子波动特征的物理量是频率 ν 和波长 λ 。光子具有波动性表现为它在空间运动轨迹的不确定性，即在考察每个光子的运动时，光子没有确定的轨迹。但是在考察光子束的全部光子的运动时，光子的运动就表现出与经典电磁波理论计算结果一致的规律性。

1.1.2 光子的粒子性

光子的粒子性表现为和物质相互作用时不像经典电磁波那样可以传递任意值的能量，而只能传递量子化的能量。描述光子粒子性特征的物理量是能量 ε 和动量 P 。光是以光速运动的粒子（或光子）流，每一个光子的能量是

$$\varepsilon = h\nu = \hbar\omega \quad (1-1)$$

式中， h 为普朗克常量， $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ ， ν 为光的频率， ω 为光的圆频率。

光的能量密度或光强 I （单位时间内垂直通过单位面积的光能）取决于单位时间内通过的光子数 N ，其表示式为

$$I = N h \nu \quad (1-2)$$

光子除了具有能量外，还具有质量 m 和动量 P 。根据爱因斯坦狭义相对论，每个光子的质量为

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} \quad (1-3)$$

式中， c 为真空中的光速。由相对论的能量和动量关系：

$$\varepsilon = Pc + m_0 c^2 \quad (1-4)$$

光子的静止质量为零，所以光子的动量大小为

$$P = \frac{\varepsilon}{c} = \frac{h\nu}{c} \quad (1-5)$$

描述光子的粒子性物理量能量 ε 和动量 P 与波动性物理量频率 ν 和波长 λ 之间，存在式 (1-1) 和下式关系：

$$P = \frac{h}{\lambda} \quad (1-6)$$

由式 (1-1) 和式 (1-6) 可知，表示光子粒子性的能量和动量的计算式中都含有表示波动性特征的物理量——频率 ν 和波长 λ 。利用统计的观点，可以将光子的波动性与粒子性统一起来：一方面光子具有集中的能量、质量和动量，也就是具有微粒性；另一方面，它们在空间各处出现，各有一定的概率，由这个概率可以计算出它们的空间分布，而这种空间分布与波动的概念一致。这就是光子的波粒二象性。

1.2 光的电磁理论

1.2.1 电磁波的性质

1864年，麦克斯韦建立了描述电磁场变化规律的麦克斯韦方程组，从理论上预见电磁波的存在。因为电磁波方程预测的电磁波速度与光速的测量值相等，麦克斯韦推论光波也是电磁波。1888年，赫兹测定了电磁波的波速，其数值与麦克斯韦预料的完全相同。同时赫兹用实验验证了电磁波具有光波的一切性质，能产生反射、折射、衍射和干涉等现象。电磁波是一种物质，也具有能量。

电磁场理论认为，光是一定频率范围内的电磁波，而电磁波就是变化电磁场的传播。如图 1.2 所示，变化的电场 E 会产生磁场 B ，变化的磁场 B 会产生电场 E ，变化的电场和变化

的磁场构成了一个不可分离的统一的场，这就是电磁场。而变化的电磁场在空间的传播形成了电磁波。

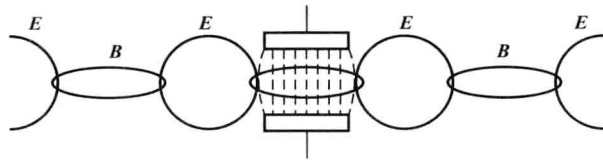


图 1.2 电磁波的产生

所以电磁波是由相互垂直的电场 E 和磁场 B 在空间以波的形式移动，如图 1.3 所示，电磁波的传播方向垂直于由电场 E 和磁场 B 组成的平面，有效地传递动量和能量等。

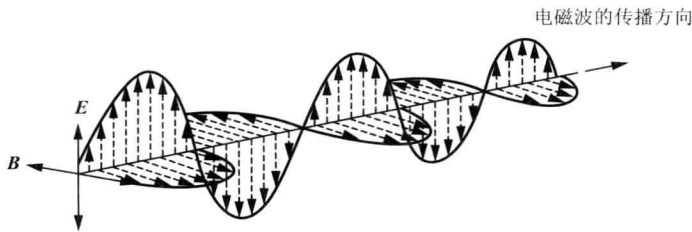


图 1.3 电磁波传播方向

电磁波的传播不需要介质。同频率的电磁波，在不同介质中的速度不同。不同频率的电磁波，在同一种介质中传播时，频率越大折射率越大，速度越小。电磁波只有在同种均匀介质中才能沿直线传播。通过不同介质时，会发生反射、折射、散射和吸收等。

电磁波具有如下基本性质：

(1) 电磁波是横波，所以电场矢量 E 和磁场矢量 H 所组成的平面垂直于传播方向 K ，电场矢量 E 和磁场矢量 H 与传播方向 K 构成右手螺旋关系。

(2) 沿给定方向传播的电磁波， E 和 H 的振动方向均在垂直于传播方向 K 的平面内，这种特性即为偏振性。

(3) 空间各点 E 和 H 都做周期性变化，而且相位相同。

(4) 在任意时刻空间任一点， E 和 H 在量值上的关系为

$$\sqrt{\varepsilon} E = \sqrt{\mu} H \quad (1-7)$$

式中， ε 为介质中的介电常数； H 为介质中的磁导率。

(5) 电磁波在真空中的传播速度为

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \quad (1-8)$$

式中， ε_0 为真空中的介电常数； μ_0 为真空中的磁导率。其中， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ ， $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$ ，所以推得 $c \approx 3.0 \times 10^8 \text{m/s}$ 。由于光是电磁波，所以 c 即为光在真空中的传播速度。

电磁波在介质中的传播速度为

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu}} \quad (1-9)$$

一般情况下， ε 和 μ 是电磁波频率 ν 的函数。所以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。

1.2.2 电磁波谱

电磁波的波谱范围很广，无线电波、光波（红外光、可见光、紫外线）、X射线、 γ 射线都是电磁波。真空中电磁波的波长 λ 和频率 ν 的关系为

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (1-10)$$

式中， c 为真空中的光速，其值为常数 $3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，所以频率不同的电磁波在真空中具有不同的波长。频率越高，对应的波长就越短。按电磁波的波长或频率大小的顺序把它们排列成谱，就形成了如图1.4所示的电磁波谱。

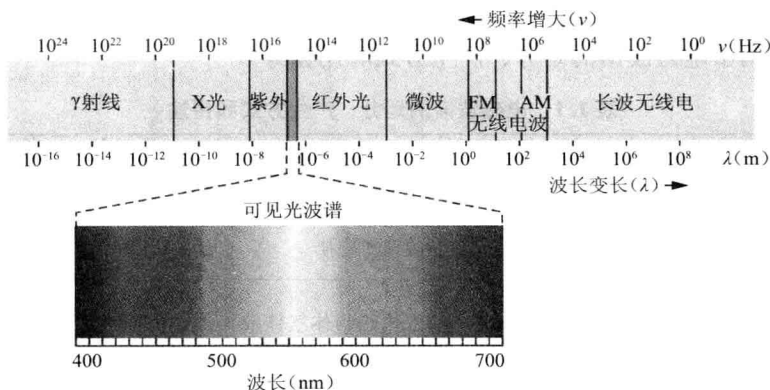


图 1.4 电磁波谱

不同的电磁波由于具有不同的波长或频率而具有不同的特性，由于光的频率都很高，一般为 $10^{12} \sim 10^{16} \text{ Hz}$ ，数字很大，使用起来不方便，所以一般采用波长来表征。电磁波谱可大致分为以下几种：

(1) 无线电波。波长大于 1 mm 的电磁波。通常无线电波是由晶体管等元器件制作的电子线路中产生的，因此频率纯度很高；并通过对电子线路进行调制，可用来传递各种信息。一般的电视、无线电广播、卫星转播、雷达、移动电话和微波炉等就是用的这种波。

(2) 红外线。波长从 $0.76 \mu\text{m} \sim 1 \text{ mm}$ ，红外线的热效应很显著。所有物体都辐射红外线，这个特性对于观察和测定肉眼看不见的对象具有特殊的意义。利用目标和背景以及物体发射能力的差异可做成各种红外仪器，对目标进行探测、跟踪和搜索等。红外技术已广泛应用于科学研究、工农业生产、医疗和军事等方面。

(3) 可见光。人眼可接收到的电磁辐射，波长范围在 $0.40 \sim 0.76 \mu\text{m}$ 之间，称为可见光，可见光在整个电磁波谱中只占很小的一部分。只要是温度大于热力学零度的物体都可以发射电磁辐射，而世界上目前还没有发现温度低于或等于热力学零度的物体，所以人们周边所有的物体时刻都在进行电磁辐射。尽管如此，只有处于可见光范围内的电磁波，才是可以被人们看到的，人们日常感受到的白光是各种颜色的可见光的混合。

(4) 紫外线。波长比可见光短，波长范围为 $0.03 \sim 0.40 \mu\text{m}$ ，具有显著的化学效应和荧光效应，可用于灭菌消毒、照相制版和设计防伪措施等。

通常所说的光学区域（或光学频谱）包括紫外线、可见光和红外线。红外线和紫外线都是人类看不见的，只能利用特殊的仪器来探测。无论是紫外线、可见光还是红外线，它们都是由原子或分子等微观客体激发的。近年来，一方面由于超短波无线电技术的发展，无线电

波的范围不断朝波长更短的方向发展；另一方面由于红外技术的发展，红外线的范围不断朝波长更长的方向扩展。目前超短波和红外线的分界已不存在，其范围有一定的重叠。

(5) X 射线（伦琴射线）。波长范围为 $0.1\text{nm} \sim 0.03\mu\text{m}$ 。X 射线是由原子的内层电子从一个能态跳至另一个能态时或电子在原子核电场内减速时所发出的。X 射线具有很强的穿透力，能使胶片感光，使荧光屏发光。利用这些性质可以透视人体内部的病变，检查金属内部的损伤情况等。

(6) γ 射线。波长范围为 $1.0\text{pm} \sim 0.1\text{nm}$ 。 γ 射线是从原子核内发出的，放射性物质或原子核反应中常有这种辐射伴随着发出。 γ 射线的穿透力很强，对生物体的破坏力很大，常作为一种放射线使用，可用于金属探伤和研究原子核结构。

目前已经发现并得到广泛利用的电磁波有波长短到 10^{-5}nm 以下的，也有波长长达 10^4m 以上的，表 1.1 列出了电磁波谱的划分、产生方式和用途等。

表 1.1 电磁波谱的划分、产生方式和用途

电磁波谱	真空中的波长	频率 (MHz)	主要产生方式	本质	用途
无线电波	$>1\text{mm}$	$<3 \times 10^5$	由振荡电路所产生的电磁辐射		无线电技术
红外线	$0.76\mu\text{m} \sim 1\text{mm}$	$3 \times 10^5 \sim 4 \times 10^8$	由炽热物体气体放电或其他光源激发分子或原子等所产生的电磁辐射	外层电子跃迁	红外线遥感
可见光	$0.40 \sim 0.76\mu\text{m}$	$4 \times 10^8 \sim 7.5 \times 10^8$			照明、摄影
紫外线	$0.03 \sim 0.40\mu\text{m}$	$7.5 \times 10^8 \sim 10^{10}$			医用消毒、防伪、照相制版
X 射线	$0.1\text{nm} \sim 0.03\mu\text{m}$	$10^{10} \sim 3 \times 10^{12}$	用高速电子流轰击原子中的内层电子而产生的电磁辐射	内层电子跃迁	检查、医用透视
γ 射线	$1.0\text{pm} \sim 0.1\text{nm}$	$3 \times 10^{12} \sim 3 \times 10^{14}$	放射性原子衰变所发出的电磁辐射	原子核衰变或裂变	金属探伤、医用治疗

1.2.3 麦克斯韦方程组

麦克斯韦将电场和磁场的所有规律综合起来，建立了完整的电磁场理论体系，这个电磁场理论体系的核心就是麦克斯韦方程组。麦克斯韦方程组在电磁学中的地位，如同牛顿运动定律在力学中的地位一样，这个理论被广泛应用于各个技术领域。

在连续介质中，电位移矢量 \mathbf{D} 、磁感应强度矢量 \mathbf{B} 、电场强度矢量 \mathbf{E} 和磁场强度矢量 \mathbf{H} 均为位置 r 和时间 t 的函数，它们之间的关系满足麦克斯韦方程组。

麦克斯韦方程组的积分形式为

$$\oiint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = q \quad (1-11)$$

$$\oiint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad (1-12)$$

$$\oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \iint_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} \quad (1-13)$$

$$\oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_s \left(\mathbf{j}_c + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{s} \quad (1-14)$$

式(1-11)描述了电场的性质。在一般情况下,电场可以是库仑电场也可以是变化磁场激发的感应电场,而感应电场是涡旋场,它的电位移线是闭合的,对封闭曲面的通量无贡献。

式(1-12)描述了磁场的性质。磁场可以由传导电流激发,也可以由变化电场的位移电流所激发,它们的磁场都是涡旋场,磁感应线都是闭合线,对封闭曲面的通量无贡献。

式(1-13)描述了变化的磁场激发电场的规律。

式(1-14)描述了变化的电场激发磁场的规律。

当

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = 0$$

方程组就还原为静电场和稳恒磁场的方程:

$$\oiint_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = q \quad (1-15)$$

$$\oiint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad (1-16)$$

$$\oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0 \quad (1-17)$$

$$\oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I \quad (1-18)$$

麦克斯韦方程组的积分形式反映了空间某区域的电磁场量 (\mathbf{D} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{E} 和 \mathbf{H}) 和场源 (电荷 q 和电流 I) 之间的关系。

在电磁场的实际应用中,经常要知道空间逐点的电磁场量和电荷 q 、电流 I 之间的关系。从数学形式上,就是将麦克斯韦方程组的积分形式转化为微分形式。

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1-19)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1-20)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1-21)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1-22)$$

式中, ρ 为自由电荷体密度; \mathbf{j} 为传导电流密度。这种微分形式的麦克斯韦方程组概括了静电场和稳恒电流磁场的性质,以及变场情况下电场和磁场之间的关系。由于把空间任意点的电磁场联系在一起,从而可以确定空间任意点的电磁场。麦克斯韦方程组是宏观电磁现象的基本规律,电磁场的计算都可归结为求麦克斯韦方程组的解。静电场、恒定电场和恒定磁场的方程都可以由麦克斯韦方程导出。

在不同的惯性参考系中,麦克斯韦方程都有同样的形式。应用麦克斯韦方程组解决实际问题时还要考虑电介质和磁介质对电磁场的影响。

麦克斯韦方程组涉及的方程包括:



- (1) 安培环路定理。即磁场强度沿任意回路的环量等于环路所包围电流的代数和。
- (2) 法拉第电磁感应定律。即电磁场互相转化，电场强度的旋度等于磁感应强度对时间的负偏导。
- (3) 磁通连续性定理。即磁力线永远是闭合的，磁场是没有标量的源。
- (4) 高斯定理。即穿过任意闭合面的电位移通量，等于该闭合面内部的总电荷量。

1.3 光的传播规律

1.3.1 光的反射和折射

由光的电磁理论可知，光在介质界面上的反射和折射，实质上是光与介质相互作用的结果，因而进行一般的理论分析非常复杂，所以进行简化处理。不考虑光与介质的微观作用，根据麦克斯韦方程组和电磁场的边界条件进行讨论。

当光波由一种介质入射到另一种介质时，在界面上会发生反射和折射。假设两种介质为均匀、透明、各向同性的，分界面为无穷大平面，入射、反射和折射光均为平面光波，其电场表示式为

$$\mathbf{E}_l = E_{0l} e^{-i(\omega_l t - \mathbf{k}_l \cdot \mathbf{r})} \quad l = i, r, t \quad (1-23)$$

式中，下标 l 为 i, r, t ，分别代表入射光、反射光和折射光。 \mathbf{r} 为界面上任意点的矢径，按图 1.5 所示的坐标情况有

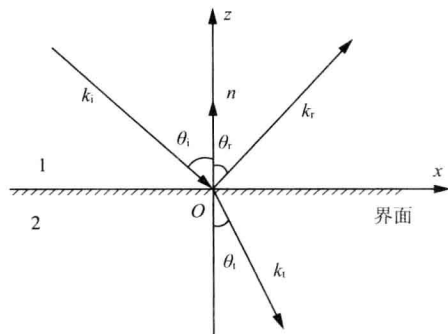


图 1.5 光的反射和折射

$$\mathbf{r} = ix + jy \quad (1-24)$$

根据电磁场的边界条件，可得

$$\omega_i = \omega_r = \omega_t \quad (1-25)$$

$$(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_r) \cdot \mathbf{r} = 0 \quad (1-26)$$

$$(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_t) \cdot \mathbf{r} = 0 \quad (1-27)$$

由式 (1-25) ~ 式 (1-27) 可知，入射光、反射光和折射光具有相同的频率；入射光、反射光和折射光均在入射平面内。

根据图 1.5 所示的几何关系，由式 (1-26) 和式 (1-27) 可得

$$k_i \sin \theta_i = k_r \sin \theta_r \quad (1-28)$$

$$k_i \sin \theta_i = k_t \sin \theta_t \quad (1-29)$$

因为 $k = n\omega/c$ ，式 (1-28) 和式 (1-29) 可改写为

$$n_i \sin \theta_i = n_r \sin \theta_r \quad (1-30)$$

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (1-31)$$

式 (1-30) 和式 (1-31) 即为光在介质界面上的反射定律和折射定律，其中折射定律又称为斯涅耳 (Snell) 定律。

1.3.2 光的干涉

光波并不像机械波那样容易产生干涉。例如，两个独立的光源发出的光波相互叠加时却观察不到干涉现象，这是因为光源的发光过程是光源内部微观粒子运动的一种随机性和非连