

物理光学

张洪欣 高宁 车树良 编著

清华大学出版社

张洪欣 高宁 车树良 编著

物理光学

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书以光的波动性为基础,研究和阐述光的本性、光学基本原理及其应用,注重展现最新光学科技成果及其成就。主要内容安排如下。

第1章介绍光的电磁理论,阐述光的基本性质,分析光在各向同性介质中的传播规律和介质分界面上的能量分配特性;第2章从波的叠加原理出发研究光的干涉规律,讨论光的相干性,介绍光的干涉装置及其典型应用;第3章围绕衍射阐述光的波动性,说明衍射是光在空间或物质中传播的一种基本方式,进一步基于基尔霍夫衍射公式和菲涅耳半波带法研究衍射的处理方法及其应用;第4章讨论光的偏振特性及其应用,研究光在晶体中的传播特性和偏振元件对光的作用,以及偏振元件的设计和应用,并介绍处理偏振的琼斯矩阵法;第5章通过对光的吸收、散射和色散现象的论述,从光波场作用的观点出发讨论光与物质的相互作用;第6章以黑体辐射、光电效应和康普顿效应等现象为基础建立起量子的概念,并阐述光的波粒二象性;第7章介绍激光原理、傅里叶光学等现代光学基础知识及其应用。

本书可以作为高等院校光信息科学与技术、光电信息工程、光学工程、光电子技术及光电控制等专业的本科教材,对于从事光通信、激光、红外、光电检测与计量的专业人员也有重要参考价值。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

物理光学/张洪欣,高宁,车树良编著.--北京:清华大学出版社,2010.8

ISBN 978-7-302-23179-0

I. ①物… II. ①张… ②高… ③车… III. ①物理光学 IV. ①O436

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 122506 号

责任编辑:朱红莲 赵从棉

责任校对:刘玉霞

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

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

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京四季青印刷厂

装 订 者:三河市兴旺装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×230 印 张:15.25 字 数:330 千字

版 次:2010年8月第1版 印 次:2010年8月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:28.00 元

前言

FOREWORD

光信息科学与技术是近年来新发展的专业,《物理光学》作为其必修专业基础课程之一,在教学内容和组织结构上需要认真研究与部署。在《大学物理》中,已经宽泛地讲授了干涉、衍射和偏振等物理光学的主要内容,这个阶段的主要任务是加强对光学现象及规律的认识和理解。后续课程,例如《光电子学》、《光学信息处理》、《光电仪器与系统》、《光纤通信技术》等均是在物理光学的理论基础上研究更为深入的课题。因此,《物理光学》在专业课程设置中起着承前启后的作用。为贯彻教育部教高[2007]1号文件精神,推进高等教育“质量工程”的实施,将教学改革的成果和教学实践的积累体现到教材建设中,本书结合工科院校新修订培养计划的教学要求,以信息技术为主导、以应用能力的培养为目标,针对光信息科学与技术、光电子技术、电子科学与技术等专业的特点而编写。本书可以作为高等院校相关专业的本科生教材或者教学参考用书,也可以作为职业技术学院相关专业的教材和教学参考用书。总教学时数为40学时左右。

通信、计算机及微电子等技术的迅猛发展对专业课程的设置提出了严峻的挑战,尤其是实行学分制后,各专业的课程在教学部署上都作了相应改变,比如物理光学由原来的68学时调整到36学时。从目前来看,物理光学的内容编排与其前后课程的连贯性不好,或存在数学推导繁琐艰深、内容庞杂,不能突出物理原理;或存在与前后课程内容重复过多,不能突出应用性等问题。为了落实新修订培养计划的要求,有必要在教学大纲、内容结构和知识层次上结合专业特点进行整合。如何组织物理光学的教学体系,既避免繁杂的数学推导,又阐明物理光学的基本规律和实践应用,构建独立的知识结构体系,为后续课程打下坚实的理论基础,以及培养学生的抽象思维能力、总结归纳能力及自主创新的意识和能力是本课程亟待解决的问题。物理光学要从光的本性、光与物质作用机理的高度出发,把握光学现象的本质,阐明光学的基本理论与基本分析方法,着重运用光学原理解决实际工程问题,为信息的获取、传递、处理及应用等奠定理论基础。

在该书的编写过程中,我们对物理光学的教学内容、层次结构、知识的系统性与连贯性等均作了认真的研究与探讨。本书主要研究和阐述光的本性和光学基本原理及其应用,探

讨论运用波的叠加和传播的关系分析干涉、衍射、偏振、旋光等现象,并注重介绍最新光学科技成果及其应用。在知识结构上,以“波的叠加和传播”为主线,以“相位差”为纽带分析光波叠加的共性,阐明物理光学基本原理。以主线为纲抓事物本质,主线贯穿于课程主要内容。各章节内容按主线展开,在叙述上由浅入深、循序渐进,强调数学与物理规律的结合,保持共性、突出个性、融会贯通,形成一个统一的整体;既保持了物理光学知识结构的完整性和独立性,又体现了知识的连贯性,并突出其在光信息科学中的特色。本书还选编了部分例题和习题,并在书后附有参考答案,便于学生自学和复习。

本书由张洪欣、高宁、车树良编写。在编写过程中得到了北京邮电大学电子工程学院领导和全体教师的大力支持,在此表示诚挚的感谢。

由于编者学识有限,加之时间仓促,书中难免存在疏漏和不足之处,恳请广大读者不吝斧正。

编 者

2010年7月

于北京邮电大学

目 录

CONTENTS

绪论	1
第 1 章 光的电磁理论	3
1.1 电磁波谱及电磁场基本方程	3
1.2 光波在各向同性介质中的传播	7
1.3 光波在介质界面上的反射和折射	14
1.4 光波场的频率谱	24
例题	31
习题	33
第 2 章 光的干涉	35
2.1 光干涉的条件	35
2.2 双光束干涉	38
2.3 多光束干涉	47
2.4 光学薄膜	53
2.5 典型的干涉仪及其应用	59
2.6 光的相干性	64
例题	69
习题	73
第 3 章 光的衍射	78
3.1 光的衍射现象	78
3.2 光的衍射原理	78
3.3 典型孔径的夫琅禾费衍射	82

3.4	光学成像系统的衍射和分辨本领	89
3.5	夫琅禾费多缝衍射	92
3.6	衍射光栅	98
3.7	菲涅耳衍射	101
3.8	全息照相	109
	例题	111
	习题	113
第4章	光的偏振和晶体光学基础	117
4.1	光波的偏振特性	117
4.2	光通过单轴晶体时的双折射现象	124
4.3	光在晶体中的波面	126
4.4	光在晶体中的传播方向	127
4.5	偏振元件	130
4.6	偏振的矩阵表示	138
4.7	偏振态的获得及实验检定	145
4.8	偏振光的干涉	149
4.9	光弹效应和电光效应	157
4.10	声光效应	165
4.11	旋光现象	168
	例题	170
	习题	173
第5章	光的吸收、散射和色散	176
5.1	光与物质相互作用的经典理论	176
5.2	光的吸收	178
5.3	光的散射	181
5.4	光的色散	185
	例题	188
	习题	189
第6章	光的量子性	191
6.1	热辐射、基尔霍夫定律	191
6.2	黑体辐射	192
6.3	普朗克公式和能量子假说	195

6.4	光电效应	197
6.5	光电效应的量子解释	197
6.6	康普顿效应	199
6.7	德布罗意波	201
6.8	波粒二象性	202
	例题	204
	习题	205
第7章	现代光学基础	208
7.1	原子发光原理	208
7.2	光与原子相互作用	210
7.3	粒子数反转	212
7.4	光振荡	215
7.5	激光的单色性	218
7.6	激光的相干性	221
7.7	傅里叶光学简介	223
7.8	非线性光学基础	225
	例题	227
	习题	228
	习题答案	230
	参考文献	235

绪论

光学的任务是研究光的本性,揭示光的辐射、传播和接收规律,明确光和其他物质的相互作用,以及开展光学在科学技术方面的应用。物理光学可以分为波动光学和量子光学两部分。波动光学将光看作是一种波动,能够说明光的干涉、衍射和偏振等现象;量子光学则是以光和物质相互作用时显示出的粒子性为基础来研究光学。光学是物理学中最古老的一门基础学科,又是当前科学领域中最活跃的研究前沿阵地之一,在光通信、光学材料与器件、先进光学系统设计、光学制造与检测技术等领域具有强大的生命力和不可估量的发展前途。

在公元前4世纪,我国就对光学有了比较深刻的认识,例如《墨经》就总结出了一些光学规律,并论述了针孔成像、平面镜成像和投影规律。17世纪末,英国科学家牛顿倡立了“光的微粒说”,可以解释观察到的许多光学现象,如光的直线性传播、反射与折射等。笛卡儿也是17世纪支持微粒说的自然科学家之一,折射定律最早就是由笛卡儿于1637年公布于世的。他认为光是一种粒子,并且在光密媒质中的传播速度比在光疏媒质中要快。在同一年代,荷兰科学家惠更斯创建了“光的波动说”,并假定光振动是在“以太”中传播的。但当时由于人们受牛顿学术威望的影响,波动说历时一个多世纪都未被重视。当时的波动说,只认识到光线在遇到棱角之处会发生弯曲,而并不能说明光的本质。1801年,英国科学家杨格用双缝实验(杨氏双缝干涉实验)证实了光的干涉现象,说明了惠更斯波动说的正确性,也奠定了光的波动性的基础。同样,有关光线绕射现象的发现,也支持了波动说的真实性。

1808年,法国科学家马吕斯发现了光在反射时的偏振现象;1809年,英国科学家阿喇戈又发现了光偏振面的旋转现象。这些现象虽然能够支持波动说,但却与光是弹性纵波的假设相矛盾。1817年,杨格提出了光是横波的假设,这与关于偏振现象的解释相吻合。1846年,英国科学家法拉第发现了光的偏振面能够在磁场中偏转,进一步指出了光学现象和磁学现象的联系;1865年,英国物理学家麦克斯韦提出光是电磁波的概念,首次把光纳入电磁波的一个频段。1887年,美国科学家迈克耳孙在干涉仪测量实验中否定了以太的存在,也即否定了弹性波动学说。1888年,德国科学家赫兹用实验证实了电磁波的存在,并测

定出电磁波的速度与光的速度相同,进一步证实了光是电磁波的论断,并验证了麦克斯韦的电磁理论。同时,物理光学也能在这个基础上解释光在传播过程中与物质发生相互作用时的部分现象,如吸收、散射和色散等,而且获得了一定的成功。20世纪初,人们又发现当光线投射到某些金属表面时,会使金属表面释放出电子的现象,称为“光电效应”,但实验结果却违反波动说的解释。这说明,光的电磁理论并不能解释光和物质相互作用的一些现象,如光电效应、康普顿效应及各种原子和分子发射的特征光谱的规律等。在这些现象中,光表现出粒子性。1900年,德国科学家普朗克提出了“量子论”。1905年,瑞士籍德国科学家爱因斯坦用量子论解释了光电效应,并通过光电效应建立了光子学说,他认为光波的能量应该是“量子化”的。辐射能量是由许许多多分立能量元组成,这种能量元被称为“光子”。光电效应和康普顿效应,使人们不得不承认光的量子性质;而干涉和衍射现象又使人们不能放弃光的波动性。1909年,爱因斯坦首次提出光的“波粒二象性”,把光的两重性质,即波动性和微粒性联系起来。

1925年,玻恩提出了对波粒二象性的统计解释,在理论上将光的波动性和粒子性联系起来。这种统计的观点,统一了粒子和波动的概念。后来进一步的实验表明,电子、质子、中子、原子等物质粒子都具有波动性。1926年,奥地利物理学家薛定谔创立了波动力学理论,与1925年德国物理学家海森伯、波恩创立的矩阵力学理论异曲同工,都描述了电子的运动规律,称为量子力学。建立在量子力学基础之上,将波粒二象性统一地反映出来的理论是量子电动力学。

1948年全息术的提出,1955年光学传递函数的建立,1960年激光的诞生是现代光学发展史中的三件大事。尤其是以激光的问世为标志,古老的光学又重新青春焕发,与许多科学技术领域紧密结合,相继建立起了一批新的分支学科。光学薄膜的研究和薄膜技术的发展形成了薄膜光学;将集成电路的概念和方法引入光学领域形成了集成光学;随着激光技术的发展,出现了非线性光学、现代光学仪器等研究领域,光学和加工技术相结合出现了现代光学制造工程;数学、通信理论和光的衍射相结合形成了傅里叶光学,并由此出现了光学信息处理、光学传递函数、光学全息术等热点研究领域;对光导纤维的研究,出现了纤维光学或导波光学,导致了光纤通信的飞速发展。进入20世纪80年代以来,光信息科学技术与通信、计算机、集成电路、微电子、光电控制与检测技术等相互促进、迅猛发展。非线性光学、信息光学及集成光学等理论与技术的结合可能会导致新一代计算机——光计算机的诞生。光计算机的信息处理能力十分强大,据预测它将部分实现人脑的功能,如学习和联想等。2008年,基于光芯片的CPU已经在实验室诞生,基于光计算的光子计算机在不久的将来也将会逐渐投入商用。

光的电磁理论

19世纪60年代,麦克斯韦建立了著名的电磁理论,预言了电磁波的存在,并指出光是一种电磁波,即波长较短的电磁波。1888年,赫兹通过实验证实了电磁波的存在,并测定出电磁波的速度与光速相同,进一步证实了光是电磁波的论断。后来的实践又证明,红外线、紫外线和X射线等也都是电磁波,其区别只是波长不同而已。光的电磁理论描述了光在传播过程中的波动特性。本章基于光的电磁理论,介绍光波的基本特性、光在各向同性介质中的传播特性、光在介质分界面上的反射和折射特性,以及对光波的数学描述。

1.1 电磁波谱及电磁场基本方程

1.1.1 电磁波谱

从波动观点出发,光可以被看作特定波段的电磁波。将电磁波按其频率或波长排列成谱,则构成电磁波谱,如图1-1所示,它覆盖了从 γ 射线到无线电波的一个相当广阔的频率范围。光学波段波长范围约为 $1\text{nm}\sim 1\text{mm}$ (频率范围约为 $10^{12}\sim 4\times 10^{16}\text{Hz}$, $1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$)。但是可见光只占电磁波谱中一个很窄的谱带,在真空中的波长范围约为 $390\sim 760\text{nm}$,相应

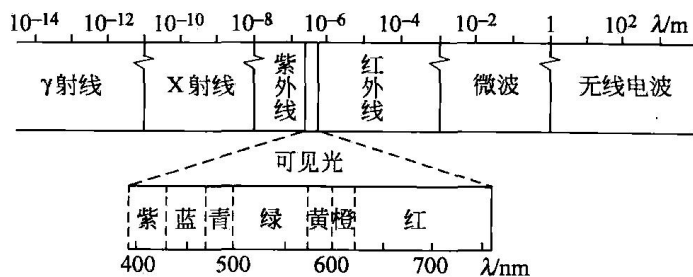


图 1-1 电磁波谱

的频率范围约为 $8 \times 10^{14} \sim 4 \times 10^{14}$ Hz。

一般所谓的光学波段,除可见光外,还包括波长小于紫光波的紫外线和波长大于红光波长的红外线。

红外线、可见光和紫外线通常又可以分为下列波段:

红外线($1\text{mm} \sim 0.76\mu\text{m}$)

- 远红外($1\text{mm} \sim 20\mu\text{m}$)
- 中红外($20 \sim 1.5\mu\text{m}$)
- 近红外($1.5 \sim 0.76\mu\text{m}$)

可见光($760 \sim 380\text{nm}$)

- 红色($760 \sim 650\text{nm}$)
- 橙色($650 \sim 590\text{nm}$)
- 黄色($590 \sim 570\text{nm}$)
- 绿色($570 \sim 490\text{nm}$)
- 青色($490 \sim 460\text{nm}$)
- 蓝色($460 \sim 430\text{nm}$)
- 紫色($430 \sim 380\text{nm}$)

紫外线($380 \sim 10\text{nm}$)

- 近紫外($380 \sim 300\text{nm}$)
- 中紫外($300 \sim 200\text{nm}$)
- 远紫外($200 \sim 10\text{nm}$)

不同波段电磁波的产生机制、特征和应用范围各不相同。光源中的原子或分子从高能级向低能级跃迁时会发出光波,在各种加速器中被加速的电子也能辐射光波。整个光学波段的电磁波可以用同一种理论和同类的实验方法进行研究;其特点是波长比周围的物体尺寸小得多,而又比组成物体的原子尺寸大得多,从而可以采取一些合理的近似处理。电磁波在长波端表现出显著的波动性,而在短波端则表现出极强的粒子性。对于光波来说,其波粒二象性的特征表现得更为突出。

光子的能量 E 和动量 p 为: $E = h\nu$, $p = \frac{h}{\lambda}$, 其中 h 为普朗克常数, $h = 6.62559 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$, ν 为频率, λ 为波长。当 $h \rightarrow 0$, $\lambda \rightarrow 0$ 时,光波表现为几何光学;当 $h \rightarrow 0$, $\lambda \neq 0$ 时,光波表现为波动光学;而当 $h \neq 0$, $\lambda \neq 0$ 时,光波表现为量子光学。

光的频率太高,而每个光子的能量又太小,目前无线电技术的响应速度尚达不到这么快,而核物理技术的灵敏度又达不到这么高,所以一般只能用光敏探测器检测光辐射的平均强度(又称光强)。

光波也可以作为信息的载体远距离传输信息,即光通信。光通信的优点是传输的信息量极大而噪声极低。有人提出利用“光的压缩态”,把噪声降低到量子极限以下,从而可以大大提高光通信的效率,并有可能检测到引力波的信号,这在物理学界是十分引人注目的设想。另外,尤其值得一提的是,太赫兹(THz 频段, $1\text{T} = 10^{12}$) 技术是近年来的一个研究热点,其所处的频段位置正好处于宏观经典理论向微观量子理论的过渡区($0.1 \sim 10\text{THz}$),具

有很好的穿透性,它能以很小的衰减穿透物质,如烟尘、墙壁、布料及陶瓷等,在通信、环境控制与安全检测等领域有很大的发展潜力。

虽然光波在整个电磁波谱中仅占有很窄的波段,它却对人类的生存、生活进程和发展,有着巨大的作用和影响。还由于光在发射、传播和接收方面具有独特的性质,因此很久以来光学作为物理学的一个主要分支一直持续地发展着,尤其是激光问世后,光学领域的研究获得了蓬勃的发展。

1.1.2 电磁场基本方程

1. 麦克斯韦方程组

光波是一种时变电磁场,表征时变电磁场的基本方程是麦克斯韦方程组,其积分形式为

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_V \rho dV \quad (1-1)$$

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (1-2)$$

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \quad (1-3)$$

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \left(\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S} \quad (1-4)$$

其中, \mathbf{E} 、 \mathbf{D} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{H} 分别表示电场强度、电位移矢量、磁感应强度、磁场强度; ρ 是电荷体密度; \mathbf{J} 是电流密度。以上各式中,式(1-1)表示高斯定律;式(1-2)表示磁通连续性定律;式(1-3)表示法拉第电磁感应定律;式(1-4)表示广义安培环路定律。

与麦克斯韦方程组积分形式相对应的微分形式为

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

其中, $\nabla = \mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial z}$ 为哈密顿(Hamilton)算符,它具有微分和矢量的双重性质。在电磁场工程数值计算中,积分方程往往用以定量描述、讨论局部范围内的场量,不能计算场中一点及其邻域的情况;为了能够描述场中任一点及其邻近的场,必须使用场量的微分方程即麦克斯韦方程的微分形式。

由上述麦克斯韦方程组可知:不仅电荷和电流是产生电磁场的源,而且时变电场和时变磁场互相激励。因此,时变电场和时变磁场构成了不可分割的统一整体——时变电磁场。

麦克斯韦方程组是电磁理论的核心,是研究各种宏观电磁现象的理论基础。从麦克斯

韦方程组出发,结合具体的边界条件及初始条件,可以定量地研究光的各种传输特性。

2. 物质方程

在研究光与媒质的相互作用时,必须考虑媒质的属性。描述媒质对电磁场量相应的介质特性方程(又称物质本构方程)为

$$\begin{cases} \mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \\ \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \\ \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \end{cases}$$

其中, ϵ 为媒质的介电常数; μ 为媒质的磁导率; σ 为媒质的电导率。对于理想导体 $\sigma = \infty$;对于理想介质 $\sigma = 0$ 。对于非铁磁物质,相对磁导率 $\mu_r \approx 1$ 。根据媒质的电磁特性,可以分为均匀与非均匀媒质、各向同性与各向异性媒质、线性与非线性媒质等。对于各向同性的介质, ϵ 为一标量;对于各向异性的介质,例如晶体中, ϵ 为一张量。

3. 边界条件

为了表征电磁场量在媒质分界面上的关系,可以由积分形式的麦克斯韦方程组导出时变电磁场在两种媒质分界面上的边界条件:

$$\begin{aligned} \mathbf{n} \cdot (\mathbf{D}_1 - \mathbf{D}_2) &= \rho_s \\ \mathbf{n} \cdot (\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2) &= 0 \\ \mathbf{n} \times (\mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2) &= \mathbf{0} \\ \mathbf{n} \times (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) &= \mathbf{J}_s \end{aligned}$$

其中, \mathbf{n} 为在分界面上由第二媒质指向第一媒质的单位法向矢量; ρ_s 和 \mathbf{J}_s 分别是分界面上的电荷密度和电流密度。

光学中,通常是在两种电介质,或者电导率有限的分界面上研究边界条件的特性,此时在无源的情况下有 $\mathbf{J}_s = \mathbf{0}, \rho_s = 0$ 。因此,其边界条件为

$$\begin{aligned} \mathbf{n} \cdot (\mathbf{D}_1 - \mathbf{D}_2) &= 0 \\ \mathbf{n} \cdot (\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2) &= 0 \\ \mathbf{n} \times (\mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_2) &= \mathbf{0} \\ \mathbf{n} \times (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) &= \mathbf{0} \end{aligned}$$

可见,在无源的情况下,电介质或者电导率有限的分界面上, \mathbf{H} 和 \mathbf{E} 的切向分量以及 \mathbf{B} 和 \mathbf{D} 的法向分量连续。

4. 电磁场的能量密度和光强度

电磁场的能量密度为

$$w = w_e + w_m = \frac{1}{2} \mathbf{E} \cdot \mathbf{D} + \frac{1}{2} \mathbf{H} \cdot \mathbf{B}$$

其中, w_e 和 w_m 分别为电场能量密度和磁场能量密度。对于一种沿 z 方向传播的平面光波,光场可以表示为

$$\mathbf{E} = e_x E_0 \cos(\omega t - kz) \quad (1-5)$$

$$\mathbf{H} = e_y H_0 \cos(\omega t - kz) \quad (1-6)$$

其中, e_x 、 e_y 分别表示电场、磁场振动方向上的单位矢量。

在电磁场的传播过程中有能量在空间流动。为了描述电磁能量流动的大小和方向,引入电磁能流密度矢量——坡印廷(Poynting)矢量 \mathbf{S} 。 \mathbf{S} 的大小表示在任一点处垂直于传播方向上的单位面积在单位时间内流过的能量。 \mathbf{S} 的方向就是该点处电磁波能量流动的方向。

根据麦克斯韦方程组,并运用能量守恒原理可以得到 \mathbf{S} 与场量 \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 之间的关系为

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (1-7)$$

其中, \mathbf{E} 、 \mathbf{H} 和 \mathbf{S} 之间满足右手螺旋关系。

由于光的频率太高,而光敏探测器的响应时间相对较慢,只能用光敏探测器检测光辐射的平均强度。在实际应用中都是用能流密度的时间平均值表征光波的能量传播,这个时间平均值称为光强度,以 I 表示。假设光探测器的响应时间为 τ ,则有

$$I = \left| \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \mathbf{S} dt \right| = \left| \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \mathbf{E} \times \mathbf{H} dt \right| \quad (1-8)$$

光波作为信息的载体有其特殊的灵活性,然而对于光波中所包含的信息(光波的强度、偏振态、相位、频率等,其变化都反映了一定的信息)的检测只能通过对光强的测量来实现。这是目前进行光学研究和光学测量中最具有特殊性的。光强是光学中的一个重要的物理量。

光波的电场矢量和磁场矢量相互激励,不能分离。但是从光与物质的相互作用来看,磁场的作用远比电场弱,甚至不起作用。例如,使照相底片感光的是电场而不是磁场,引起人眼视觉作用的也是电场。因此,通常称电场矢量 \mathbf{E} 为光矢量,电场的振动称为光振动。

1.2 光波在各向同性介质中的传播

1.2.1 波动方程

麦克斯韦方程组描述了电磁现象的变化规律,指出随时间变化的电场将在周围空间产生变化的磁场,随时间变化的磁场将在周围空间产生变化的电场;变化的电场和磁场之间相互转化,相互激发,并且以一定的速度向周围空间传播。因此,时变电磁场就是在空间以一定速度由近及远传播的电磁波。

从麦克斯韦方程出发,可以证明电磁场的传播具有波动性。设在无界的均匀透明线性介质中(ϵ 、 μ 为常数, σ 为零),并且在远离辐射源的无源区域(ρ 、 J 为零),结合物质本构方程,可将麦克斯韦方程组简化为

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (1-9)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (1-10)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (1-11)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (1-12)$$

将式(1-11)两边取旋度,并将式(1-12)代入得

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\epsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}$$

利用矢量恒等式

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

则有

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \mathbf{0} \quad (1-13)$$

同理可得

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = \mathbf{0} \quad (1-14)$$

式(1-13)和式(1-14)分别称为电场和磁场的波动方程,它们描述了电磁波的传播,表明时变电场是以速度 v 传播的电磁振动。其中 ∇^2 为拉普拉斯算符, $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$ 为电磁波的传播速度。在真空中,光波的传播速度为

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2.997\,92 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (1-15)$$

这个数值与实验中测出的在真空中光速的数值非常接近,可以作为光是一种电磁波的重要依据。波速与传输介质有关,在同一介质中,波速随波长(或频率)变化的现象叫做色散。

由线性微分方程描述的系统称为线性系统。线性齐次微分方程的一个重要特性就是它的解满足叠加原理。显然,在各向同性介质中,电磁场满足叠加原理。

光波在真空中的速度与在介质中的速度之比称为介质的折射率,记为 n ,即

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (1-16)$$

上式将描述介质光学性质的常数和描述介质电磁学性质的常数联系起来。

对于一般的非铁磁物质, $\mu_r \approx 1$, 因此有

$$n = \sqrt{\epsilon_r}$$

1.2.2 平面波的特性及参量

振动在空间的传播称为波动。电磁场是由波源激发的电磁波在空间传播的分布。振动同时到达空间点的集合(振动相位相同)组成等相位面,又称波面。等相位面在空间随时间

移动,它的速度称为相速度。按照波面的形状呈球面、柱面或者平面,电磁波又分为球面波、柱面波及平面波三种基本波型。

在观察时间内,光源作持续稳定振动,波场中各点以同一频率、同一振幅作稳定振动,称为定态波;在观察时间内,光源振动短暂,产生的波包在空间移动,称为脉冲波。脉冲波可视为大量不同频率的定态波的叠加。超短脉冲(飞秒量级)常用于宽带谱研究、瞬态谱研究和非线性光学研究。

1. 时谐平面波

波面上的场矢量都相等的平面波称为均匀平面波。如果均匀平面波的空间各点的电磁振动都是以同一频率随时间作正弦或余弦变化(简谐振动),这样的光波就叫做时谐均匀平面波,简称时谐平面波,如图 1-2 所示。其中电场和磁场的关系将在下节介绍。

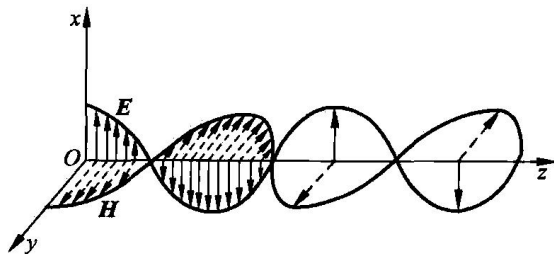


图 1-2 时谐平面波

假设均匀平面波沿 $+z$ 方向传播,即 E 和 H 仅是 z 和 t 的函数,波动方程式(1-13)和式(1-14)简化为

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1-17)$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (1-18)$$

考虑到平面波是沿 z 方向的行波,则其解的形式为

$$\mathbf{E}(z, t) = \mathbf{E}\left(t - \frac{z}{v}\right)$$

$$\mathbf{H}(z, t) = \mathbf{H}\left(t - \frac{z}{v}\right)$$

这表示源点的振动经过一定的时间延迟后才传播到场点。对应频率为 ω 的时谐均匀平面波的特解为

$$\mathbf{E}(z, t) = \mathbf{E}_0 \cos\left[\omega\left(t - \frac{z}{v}\right) + \varphi_0\right] \quad (1-19)$$

$$\mathbf{H}(z, t) = \mathbf{H}_0 \cos\left[\omega\left(t - \frac{z}{v}\right) + \varphi_0\right] \quad (1-20)$$

式中,矢量 \mathbf{E}_0 和 \mathbf{H}_0 的模分别是时谐电场和时谐磁场的振幅, \mathbf{E}_0 和 \mathbf{H}_0 的方向分别表示时