



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



物理光学与应用光学

(第三版)

石顺祥 王学恩 马琳 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

物理光学与应用光学

(第三版)

石顺祥 王学恩 马琳 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书是在2000年出版的高等学校电子信息类规划教材《物理光学与应用光学》、2008年出版的普通高等教育“十一五”国家级规划教材《物理光学与应用光学(第二版)》的基础上修订而成的。

本书以光的电磁理论为理论基础,以物理光学和应用光学为主体内容。第1章到第4章讨论了光在各向同性介质、各向异性介质中的传播规律,以及光的干涉、衍射、偏振特性,突出了光学原理在光电子技术中的应用和进展,加强了光的相干性内容,介绍了傅里叶光学、近场光学和二元光学的基础。第5章讨论了在光波传播与控制中应用非常广泛的感应双折射效应。第6章介绍了光的吸收、色散和散射特性。第7章到第10章讲述了几何光学基础知识以及光在光学仪器中的传播和成像特性。

本书可作为光电子技术、电子科学与技术、光学工程、光信息科学与技术等专业本科生的专业基础课教材,也可作为有关专业师生和科技人员的参考书。

为了配合本教材的教与学,与本教材配套的学习指导书同期出版。

图书在版编目(CIP)数据

物理光学与应用光学/石顺祥,王学恩,马琳编著. 3版.

—西安:西安电子科技大学出版社,2014.7

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5606-3348-0

I. 物… II. ①石… ②王… ③马… III. ①物理光学—高等学校—教材 ②应用光学—高等学校—教材 IV. ①O436 ②O439

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 112417 号

责任编辑 云立实

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2014年7月第3版 2014年7月第10次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 32

字 数 761千字

印 数 34 001~37 000册

定 价 55.00元

ISBN 978-7-5606-3348-0/O

XDUP 3640003 - 10

* * * 如有印装问题可调换 * * *

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

《物理光学与应用光学》第一版于2000年作为高等学校电子信息类规划教材、第二版于2008年作为普通高等教育“十一五”国家级规划教材出版以来,受到国内同行的好评和厚爱,已被许多高校选作为本科生教材或参考书。为适应光学特别是光电子学、光电子技术的发展,根据相关专业本科生的知识结构定位和教学大纲要求,经过修改、充实内容,作者重新编写了《物理光学与应用光学》即第三版。

众所周知,基础光学是由物理光学和几何光学两大部分组成的。物理光学主要研究光的基本属性、光的传播规律和光与物质相互作用的基本特性,其内涵包含波动光学和量子光学,分别讨论光的波动性和光的量子性。目前在国内多数工科高等学校的本科生教学中,为适应光电子学和光电子技术的发展需求,物理光学主要讲授波动光学内容,故也称为波动光学。几何光学主要研究光在常规光学元件中的传播规律,它实际上可以认为是波动光学在忽略光的波动效应,即视光的波长趋于零时的特殊情况,并由此引入光线的概念,研究光的直线传播特性,而通常将利用光的直线传播理论研究光在光学仪器中的传播和成像特性的内容称为应用光学。

本书是为工科高等学校光电子技术、电子科学与技术、光学工程、光信息科学与技术等专业本科生的专业基础课程“物理光学与应用光学”(或“光学”“物理光学”“应用光学”)编写的教材,教学时数约为80~90学时,其先导课程是“普通物理(电磁学)”“电磁场理论”。本书基于光学科学是研究光与物质相互作用的基本观点,根据本科生光学教学定位于经典和半经典理论体系,以光的电磁理论为理论基础,以物理光学和应用光学为主体内容。其中,物理光学部分基于光的电磁理论着重讲授光波在各向同性介质、各向异性介质中的传播规律,光波的干涉、衍射、偏振、感应双折射特性,光的吸收、色散、散射现象;应用光学部分着重讲授几何光学基础知识和光在光学仪器中的传播、成像特性。在编写安排上,本书强调了光的电磁本性,将应用光学内容视为波动光学在光波长趋于零时的特殊情况。在编写内容上,本书既注意保持光学学科的理论完整性,又突出了它在光电子技术中的特色:考虑到激光技术的发展、光在实际应用中的要求,加强了有关光的相干性的内容;考虑到光电子技术的应用,加强了光波传播特性控制的感应双折射效应及应用的内容;考虑到目前光学学科的发展和在光电子技术中的应用,结合相关章节内容,有机地介绍了傅里叶光学、近场光学、二元光学等新分支学科基础知识;考虑到知识更新,增加了左手材料和负折射现象、单轴晶体的负折射和负反射、数字全息等内容;为适应目前光学系统设计的实际需求,加强了光学系统设计软件应用的基础知识内容。本书在编写中,特别注意全书的系统性、逻辑性和严谨性,概念阐述准确、清晰,遇到与先导课程内容重复时,本书只引用其主要结论,给出必要的说明,以方便阅读和保持整体内容的连续性。为便于学生自学,每一章都选编了适量的例题和习题,并在书末给出了绝大部分习题的参考答案。

石顺祥编写本书第1、2、4、5、6章和第3章部分内容,王学恩编写第7、8、9、10章,

马琳编写第 3 章大部分内容。全书由石顺祥统稿。

本书在编写过程中，得到了西安电子科技大学激光、红外教研室老师们热情帮助，在此谨向他们表示诚挚的感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在一些不足之处，殷切期望广大读者批评指正。

作 者

2014 年 2 月

于西安电子科技大学

第二版前言

本书系在 2000 年出版的高等学校电子信息类规划教材之一的《物理光学与应用光学》(石顺祥、张海兴、刘劲松编著)的基础上,根据普通高等教育“十一五”国家级规划教材的要求,重新编写的。

本书是为光电子技术、电子科学与技术、光信息科学与技术以及光学工程等专业本科生的专业基础课“物理光学与应用光学”(或“物理光学”、“应用光学”)编写的教材,教学时数为 80 学时。根据普通高等教育“十一五”国家级规划教材《物理光学与应用光学》编写大纲,本书以光的电磁理论为理论基础,以物理光学与应用光学为主体内容,着重讲授光在各向同性介质、各向异性介质中的传播规律,光的干涉、衍射、偏振特性,光的吸收、色散、散射现象,以及应用光学基础知识和光在光学仪器中的传播、成像特性。在编写内容上,既注意保持光学学科的理论完整性,又突出了它在光电子技术中的特色。考虑到光电子技术的发展、光电子技术实际应用中的要求,加强了有关光的相干性的内容,特别注意了光的电磁理论在光电子技术中的应用,并尽量反映光学学科的最新科技研究成果,介绍了傅里叶光学、近场光学、二元光学及与激光技术相关的基础知识。对于应用光学内容,本书是将其视为波动光学在不计光的波动效应,即认为光波长 $\lambda \rightarrow 0$ 时的特殊情况。考虑到目前光学设计的实际应用,增加了光学设计软件应用的基础知识内容。由于“物理光学与应用光学”课程是在“普通物理”和“电磁场理论”课程的基础上开设的,因而在遇到一些重复内容时,本书只引用其主要结论,给出必要的说明,以方便阅读和保持整体内容的连续性。本书在内容选取和编写上,特别注意适合于学生自学的需求,每一章都选编了例题和习题,并在最后给出了部分习题参考答案。

本书由石顺祥编写第 1、2、4、5、6 章和第 3 章部分内容,王学恩编写第 7、8、9、10 章,刘劲松编写第 3 章大部分内容,并由石顺祥统编全书。

本书在编写过程中,得到了西安电子科技大学激光教研室和红外教研室老师们的热情帮助,在此谨向他们表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在一些不足之处,殷切期望广大读者批评指正。

编者

2008 年 1 月

于西安电子科技大学

第一版前言

本书系按(原)电子工业部制定的 1996~2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划,由全国高校光电子技术专业教学指导委员会评审、确定出版的中标规划教材。责任编辑是西安电子科技大学安毓英教授,天津大学李昱教授担任主审。

本书是为光电子技术专业、电子科学与技术专业及光学工程专业等本科生的专业基础课“物理光学与应用光学”编写的教材,教学时数 72 学时。根据全国高校光电子技术专业教学指导委员会确定的编写大纲,本书以光的电磁理论为理论基础,以物理光学与应用光学为主体内容,着重讲授光在各向同性介质、各向异性介质中的传播规律,光的干涉、衍射、偏振特性,光的吸收、色散、散射现象,以及几何光学基础知识和光在光学仪器中的传播和成像特性。在编写内容上,既注意保持光学学科的理论完整性,又突出了它在光电子技术中的特色。考虑到激光技术的发展,光在实际应用中的要求,加深了有关光的相干性的内容,特别注意了光学原理在光电子技术中的应用,并尽量反映最新科技成果,介绍了傅里叶光学、近场光学、微光学及与激光技术相关的基础知识。由于“物理光学与应用光学”课程是在“普通物理”和“电磁场理论”基础上开设的,所以在遇到一些重复内容时,本书只引用其主要结论,给出必要的说明,以方便阅读和保持整体内容的连续性。本书在内容选取和编写上,特别注意适合于学生自学的需求,每一章都选编了例题和习题,并在最后给出了部分习题参考答案。

本书由石顺祥编写第 1、2、4、5、6 章和第 3 章部分内容,张海兴编写第 7、8、9 章,刘劲松编写第 3 章,并由石顺祥统编全稿。在编写过程中,得到了全国高校光电子技术专业教学指导委员会的关心和指导,也得到了西安电子科技大学激光教研室老师的热情帮助,责任编辑安毓英教授和主审李昱教授为书稿提出了许多宝贵的意见,在此谨向他们表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在一些缺点和错误,殷切期望广大读者批评指正。

编者

1999 年 9 月

本书符号特别说明

1. 按照国家标准，本书矢量用单字母表示时，采用黑体斜体，如 \mathbf{a} 、 \mathbf{M} 。

相应地，由于用手书写矢量时无法表现黑体，故老师版书和学生学习笔记时可采用顶上带有箭线的白体斜体字母表示矢量，如 \vec{a} 、 \vec{M} 。

2. 按照国家标准，张量也应用黑体斜体字母表示，但本书为了与矢量区别，张量采用黑体正体字母表示，如 \mathbf{T} 、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 。

相应地，手书写二阶张量时，可采用顶上带有两条箭线(或双向单条箭线)的白体斜体字母表示，如 $\vec{\vec{T}}$ 、 $\vec{\vec{\varepsilon}}$ 或 \overleftrightarrow{T} 、 $\overleftrightarrow{\varepsilon}$ ；三阶张量可采用顶上带有三条箭线的白体斜体字母表示，如 $\vec{\vec{\vec{T}}}$ 、 $\vec{\vec{\vec{\varepsilon}}}$ ，也可采用顶上带有两条箭线(或双向单条箭线)的白体斜体字母表示，如 $\overleftrightarrow{\vec{T}}$ 、 $\overleftrightarrow{\vec{\varepsilon}}$ 或 $\overleftrightarrow{\overleftrightarrow{T}}$ 、 $\overleftrightarrow{\overleftrightarrow{\varepsilon}}$ ；以此类推。

目 录

绪论	1	例题	119
第 1 章 光在各向同性介质中的传播特性	3	习题	125
1.1 光波的特性	3	第 3 章 光的衍射	131
1.1.1 光电磁波及麦克斯韦电磁方程	3	3.1 衍射的基本理论	131
1.1.2 几种特殊形式的光波	7	3.1.1 光的衍射现象	131
1.1.3 光波场的频率域表示	14	3.1.2 惠更斯-菲涅耳原理	132
1.1.4 光波的速度	20	3.1.3 基尔霍夫衍射公式	133
1.1.5 平面光波的横波性、偏振态及其表示	23	3.2 夫朗和费衍射	139
1.2 光波在介质界面上的反射和折射	28	3.2.1 夫朗和费衍射装置	139
1.2.1 反射定律和折射定律	29	3.2.2 夫朗和费矩形孔和圆孔衍射	140
1.2.2 菲涅耳公式、反射率和透射率	29	3.2.3 夫朗和费单缝和多缝衍射	149
1.2.3 反射和折射的相位特性	34	3.2.4 巴俾涅原理应用	155
1.2.4 反射和折射的偏振特性	36	3.3 菲涅耳衍射	155
1.2.5 全反射	40	3.3.1 菲涅耳衍射的菲涅耳波带法	155
1.2.6 左手材料和负折射现象	43	3.3.2 菲涅耳衍射的积分解法	164
1.3 光波在金属表面上的反射和折射	45	3.4 光栅和波带片	168
例题	49	3.4.1 衍射光栅	168
习题	54	3.4.2 波导光栅	175
第 2 章 光的干涉	60	3.4.3 全息光栅	178
2.1 双光束干涉	60	3.4.4 波带片	180
2.1.1 产生干涉的基本条件	60	3.5 全息照相	183
2.1.2 双光束干涉	63	3.5.1 全息照相原理	183
2.2 平行平板的多光束干涉	71	3.5.2 全息照相技术	188
2.3 光学薄膜	76	3.5.3 数字全息	192
2.3.1 光学薄膜的反射特性	77	3.6 傅里叶光学、二元光学、近场光学基础简介	194
2.3.2 薄膜波导	86	3.6.1 光衍射现象的傅里叶分析——傅里叶光学基础	194
2.4 典型干涉仪	91	3.6.2 二元光学——衍射光学	206
2.4.1 迈克尔逊干涉仪	91	3.6.3 近场光学简介	213
2.4.2 马赫-泽德干涉仪	94	例题	217
2.4.3 法布里-珀罗干涉仪	95	习题	224
2.5 光的相干性	104	第 4 章 光在各向异性介质中的传播特性	230
2.5.1 光的相干性	105	4.1 晶体的光学各向异性	230
2.5.2 相干性的定量描述	113	4.1.1 张量的基础知识	230
2.5.3 激光的相干性	117		

4.1.2 晶体的介电张量	232	6.4.1 光的散射现象	332
4.2 理想单色平面光波在晶体中的传播	233	6.4.2 瑞利散射	332
4.2.1 光在晶体中传播特性的 解析法描述	233	6.4.3 米氏散射	335
4.2.2 光在晶体中传播特性的 几何法描述	243	6.4.4 分子散射	335
4.3 平面光波在晶体界面上的反射和 折射	255	6.4.5 喇曼散射	336
4.3.1 光在晶体界面上的 双反射和双折射现象	255	例题	337
4.3.2 单轴晶体的负折射和 负反射现象	261	习题	339
4.4 晶体光学元件	262	第7章 几何光学基础	341
4.4.1 偏振器	262	7.1 几何光学的基本定律	341
4.4.2 波片和补偿器	268	7.1.1 波面、光线和光束	341
4.5 晶体的偏光干涉	271	7.1.2 基本定律	343
4.5.1 平行光的偏光干涉	272	7.1.3 光学系统及物像的基本概念	347
4.5.2 会聚光的偏光干涉	276	7.1.4 光学系统成完善像的条件	348
例题	281	7.2 单个折射球面的光路计算	350
习题	285	7.2.1 符号法则	350
第5章 晶体的感应双折射	290	7.2.2 单个折射球面的光路计算公式	351
5.1 电光效应	290	7.2.3 单个折射球面近轴区光路 计算公式	354
5.1.1 电光效应的描述	290	7.3 单个折射球面的近轴区成像	354
5.1.2 晶体的线性电光效应	291	7.3.1 物像公式	354
5.1.3 晶体的二次电光效应	303	7.3.2 焦距及光焦度	355
5.1.4 晶体电光效应的应用举例	305	7.3.3 高斯公式和牛顿公式	356
5.2 声光效应	307	7.3.4 放大率	357
5.2.1 弹光效应和弹光系数	307	7.3.5 拉亥不变量	359
5.2.2 声光衍射	310	7.4 球面反射镜成像	359
5.3 晶体的旋光效应与法拉第效应	313	7.4.1 焦点和焦距	359
5.3.1 晶体的旋光效应	313	7.4.2 物像公式	360
5.3.2 法拉第效应	316	7.4.3 放大率	360
例题	318	7.5 共轴球面光学系统	360
习题	320	7.5.1 转面公式	361
第6章 光的吸收、色散和散射	322	7.5.2 拉亥公式	362
6.1 光与介质相互作用的经典理论	322	7.5.3 放大率公式	362
6.2 光的吸收	325	7.6 薄透镜成像	363
6.2.1 光吸收定律	325	7.6.1 透镜的分类	363
6.2.2 吸收光谱	326	7.6.2 薄透镜成像	363
6.3 光的色散	328	7.6.3 薄透镜物像的几个特殊 位置关系	365
6.3.1 色散率	329	7.7 平面的折射成像	365
6.3.2 正常色散与反常色散	329	7.7.1 平面折射光路计算公式	365
6.4 光的散射	332	7.7.2 折射平面近轴区成像	366
		7.7.3 折射平行平板的光路计算	366
		7.7.4 折射平行平板的成像	367
		7.8 平面镜和棱镜系统	368

7.8.1 平面镜成像	368	8.6.4 基模高斯光束经过无焦系统的 变换	415
7.8.2 双平面镜系统成像	369	例题	416
7.8.3 反射棱镜	372	习题	419
7.8.4 反射棱镜的成像	373	第9章 光学系统像差基础和 光路计算	422
7.8.5 折射棱镜	376	9.1 光学系统中的光阑	422
例题	378	9.1.1 光阑及其分类	422
习题	382	9.1.2 孔径光阑和人/出瞳	423
第8章 理想光学系统	384	9.1.3 视场光阑和人/出窗	425
8.1 理想光学系统的基点和基面	384	9.2 光学系统光阑对成像的影响	426
8.1.1 理想光学系统的基本特性	384	9.2.1 渐晕	426
8.1.2 理想光学系统的基点和基面	385	9.2.2 景深和焦深	428
8.1.3 基本几何光学元件的基点和 基面	387	9.2.3 几个特殊光学系统的光阑的 作用	432
8.2 理想光学系统的物像关系	388	9.3 像差基本概念	434
8.2.1 图解法求像	388	9.3.1 像差的描述和分类	434
8.2.2 理想光学系统成像公式	389	9.3.2 球差	435
8.2.3 放大率	391	9.3.3 彗差	436
8.2.4 理想光学系统的基点位置关系	392	9.3.4 像散	437
8.2.5 光学系统基点的测量	392	9.3.5 场曲	439
8.3 理想光学系统的组合	394	9.3.6 畸变	440
8.3.1 双光组组合	394	9.3.7 位置色差(轴向色差)	441
8.3.2 正切法	396	9.3.8 倍率色差(垂轴色差)	442
8.3.3 截距法	398	9.4 光学系统中一般光路计算	443
8.3.4 无焦系统	398	9.4.1 光学系统计算光路的分类	443
8.4 厚透镜及其基点与基面	399	9.4.2 光学系统近轴光线的光路计算	443
8.4.1 厚透镜基点一般公式	400	9.4.3 光学系统子午面内光线的 光路计算	444
8.4.2 厚透镜基点	400	9.4.4 沿轴外物点主光线细光束的 光路计算	446
8.5 矩阵在近轴光学系统中的应用	403	9.5 光学系统设计软件——ZEMAX 简介	448
8.5.1 光线矢量的线性变换矩阵	403	9.5.1 ZEMAX 基本概况	449
8.5.2 基本光学元件的特征传递矩阵	404	9.5.2 ZEMAX 设计环境	450
8.5.3 光学系统的传递矩阵计算	406	9.5.3 光学系统结构的设定	451
8.5.4 高斯矩阵与光学系统主平面和 焦点的位置关系	408	9.5.4 光学系统成像的分析	454
8.5.5 传递矩阵在激光谐振腔 设计中的应用	409	9.5.5 光学系统结构的优化	455
8.6 ABCD 法则及其在激光束 传输中的应用	411	例题	456
8.6.1 ABCD 法则——光波面曲率半径在 传播介质中的变化规律	411	习题	458
8.6.2 ABCD 法则用于基模高斯光束的 传播	412	第10章 光学仪器的基本原理	459
8.6.3 基模高斯光束经过薄透镜的 变换	413	10.1 光辐射基本概念和规律	459

10.1.1	光辐射基本物理量	459	10.4.4	显微镜的聚光本领	475
10.1.2	光源直接照射表面时的光照度 (距离平方反比定律)	464	10.4.5	显微镜的光束限制	476
10.1.3	光亮度的传递规律	465	10.5	望远镜	476
10.2	眼睛	467	10.5.1	望远镜的结构	476
10.2.1	眼睛的结构	467	10.5.2	望远镜的分辨率	477
10.2.2	眼睛的调节和适应	468	10.5.3	望远镜的放大本领	478
10.2.3	眼睛的缺陷与校正	468	10.5.4	望远镜的聚光本领	479
10.2.4	眼睛的分辨率	469	10.6	物镜和目镜	480
10.3	放大镜	470	10.6.1	显微镜的物镜	480
10.3.1	视角放大率	470	10.6.2	望远镜的物镜	482
10.3.2	放大镜的视角放大率	471	10.6.3	目镜	484
10.3.3	放大镜的光束限制	472	例题	486	
10.4	显微镜	472	习题	491	
10.4.1	显微镜的结构及其成像	472	部分习题参考答案	492	
10.4.2	显微镜的分辨率	473	参考文献	500	
10.4.3	显微镜的视角放大率	474			

绪 论

我们生活在一个充满着光明的世界里，光是我们最熟悉的现象之一。没有光，就没有光合作用，就没有生命，也就没有人类。那么，光是什么？光的本性是什么？这个问题很早就引起了人们的关注，人们对光进行了各种各样的广泛研究，并且为此争论了若干个世纪。可以说，人们对于光的本性的认识过程，是认识论的最好印证。为此，在这里沿着光学历史发展的足迹，简单地回顾人们对于光的本性认识发展过程中的几个主要里程碑。

众所周知，早在我国春秋战国时期的墨翟及其弟子所著的《墨经》中，就已经记载了光的直线传播特性以及光在镜面上的反射现象。比《墨经》晚一百多年，在古希腊数学家欧几里德(Euclid)所著的《光学》中，也研究了平面镜成像问题。经过漫长的光学发展时期，到了17世纪下半叶，对光的认识有两派针锋相对的观点：一派是以牛顿(Newton)为首的微粒说，另一派是以惠更斯(Huygens)为首的波动说。微粒说认为，光是由光源飞出来的微粒流。这种观点可以解释光的直线传播特性，光的反射定律和折射定律，并预言光在密度较大的介质中的传播速度大于光在密度较小的介质中的传播速度；波动说则认为，光是类似于水波、声波在“以太”中传播的弹性波。这种观点成功地解释了光的反射定律、折射定律，以及光在方解石中产生的双折射现象，并且认为光在密度较大的介质中的传播速度小于光在密度较小的介质中的传播速度。对于这两种截然不同的观点，由于受到当时生产水平所限，尚不能证明哪个观点正确，特别是，由于那时候牛顿已经是威望很高的权威科学家，因而从17世纪到整个18世纪，微粒说占了主导地位。

到了19世纪，人们进行了几个重要的实验：杨氏(Young)干涉实验，光的衍射实验，测量光在水中传播速度的实验，并得到了光在水中的传播速度小于光在空气中传播速度的结论。这些实验结果动摇了牛顿微粒说的基础，人们记起了惠更斯的波动说，菲涅耳(Fresnel)等许多科学家对波动理论进行了研究，并在其后的数十年发展了“弹性以太”理论。但是，这种“弹性以太”理论也不能说明光的本性。19世纪中叶，麦克斯韦(Maxwell)在前人研究的基础上，建立了电磁理论，预言了电磁波的存在，特别是指出光也是一种电磁波。19世纪80年代，赫兹(Hertz)用实验证实了电磁波的存在，并测定了电磁波的速度恰好等于光的速度。尽管这时关于“以太”的问题尚未解决，但麦克斯韦理论已为光波特性的研究奠定了理论基础。后来，迈克尔逊(Michelson)实验否定了“以太”的存在，也就否定了弹性波性质的波动说，更加确立了光的电磁波理论学说。

随着科学技术的发展，特别是黑体辐射能量按波长分布的规律和光电效应的发现，光的微粒说向波动说提出了新的挑战。于是，光的波动说与微粒说又在一个新的层次上展开了争论。

20世纪初，由于爱因斯坦(Einstein)量子理论的提出和发展，人们对光的认识更加深

化。由光的干涉、衍射和偏振等现象所证实的光的波动性，以及由黑体辐射、光电效应及康普顿(Compton)效应所证实的光的量子性——粒子性，都客观地反映了光的特性，光实际上具有波粒二重性。这两种看起来完全不同的属性的统一，实际上是一切微观粒子的共同特性，这个观点使人们对光的本性有了更深刻的认识。正是在这个理论的推动下，20世纪60年代激光问世，一度沉寂的光学又焕发了青春，开始了一个新的发展时期，出现并发展了许多新兴光学学科，例如全息光学、傅里叶光学、薄膜光学、集成光学、纤维光学、非线性光学、统计光学，以及近场光学和衍射光学，等等。应当指出的是，人们对光的本性的认识还远远没有完结，对光的本性、传播规律及光与物质相互作用的研究，仍然是一个不断探索、不断深化的研究课题。

光学是人们研究光的本性，光的产生、传播、接收和应用的科学。从光与物质相互作用的基本观点出发，光学有三种基本理论研究体系：经典理论体系、半经典理论体系和全量子理论体系。在经典理论体系中，认为光是经典电磁波场，利用麦克斯韦电磁理论(电磁光学)描述；介质由经典粒子组成，利用经典(牛顿)力学描述。在半经典理论体系中，光仍被认为是经典电磁波场，利用麦克斯韦电磁理论(电磁光学)描述；介质则由具有量子性的粒子组成，利用量子力学描述。在全量子理论体系中，认为光是量子化的光场，利用量子光学描述；介质由具有量子性的粒子组成，利用量子力学描述。从目前光学的实际应用看，利用经典理论、半经典理论体系已经能够处理所遇到的大部分光学问题。因此，利用光的电磁理论可以较好地处理目前光电子学和光电子技术应用中的大部分光传播与控制问题。

在光学学科中，通常认为基础光学由物理光学和几何光学组成。物理光学研究的是光的基本属性、光的传播规律和光与物质的相互作用。物理光学的内涵有波动光学和量子光学两部分内容，前者主要研究光的波动性，后者主要研究光的量子性。目前国内大多数工科高等学校的本科生教学中，物理光学主要讲授波动光学内容，故也称为波动光学，并以光的电磁理论为理论基础，根据麦克斯韦基本方程，研究光在各种介质(线性、非线性，无限大、有限空间，均匀、非均匀，各向同性、各向异性)中的传播规律及光波传播的控制。几何光学研究的是光在常规光学元件中的传播规律，它实际上可以认为是波动光学在忽略光的波动效应，即视光波长趋于零时的特殊情况。在这种情况下，引入光线的概念，研究光传播的基本规律和光通过光学元件、系统的原理及应用，并不涉及光的波动性质。通常，将利用光的直线传播理论，研究光在光学仪器中的传播和成像特性的内容称做应用光学。

根据工科高等学校与光电子学、光电子技术相关专业的本科生教学大纲要求和知识结构定位，本书以光的电磁理论为理论基础，以物理光学和应用光学为主体内容，主要讲授光波在各向同性介质、各向异性介质中的传播规律，光波的干涉、衍射、偏振、感应双折射特性，光的吸收、色散、散射现象，几何光学基础知识和光在光学仪器中的传播、成像特性。

第 1 章 光在各向同性介质中的传播特性

19 世纪 60 年代, 麦克斯韦建立了经典电磁理论, 并把光学现象和电磁现象联系起来, 指出光也是一种电磁波, 从而产生了光的电磁理论。光的电磁理论是描述光波动现象的基本经典理论。

本章基于光的电磁理论, 简单地综述光波的基本特性, 着重讨论光在各向同性介质中的传播特性, 光在介质界面上的反射和折射特性。这些内容是全书讨论的基础。

1.1 光波的特性

1.1.1 光电磁波及麦克斯韦电磁方程

1. 电磁波谱

自从 19 世纪人们证实了光是一种电磁波后, 又经过大量的实验, 进一步证实了 X 射线、 γ 射线也都是电磁波, 它们的电磁特性相同, 只是频率(或波长)不同而已。按电磁波的频率(或波长)次序排列成谱, 称为电磁波谱, 如图 1-1 所示, 其中太赫兹波(0.1 THz~10 THz)是近年来兴起的一个研究热点。通常所说的光学频谱(或光波频谱)包括红外线、可见光和紫外线。由于光的频率极高(10^{12} Hz~ 10^{16} Hz), 数值极大, 使用起来很不方便, 因而更常采用波长表征, 光谱区域的波长范围约从 1 mm 到 10 nm。习惯上, 人们又将红外线、可见光和紫外线细分如下:

红外线(1 mm~0.78 μm)	{	远红外	1 mm~30 μm
		中红外	30 μm ~1.4 μm
		近红外	1.4 μm ~0.78 μm
可见光(780 nm~380 nm)	{	红 色	780 nm~620 nm
		橙 色	620 nm~600 nm
		黄 色	600 nm~580 nm
		绿 色	580 nm~490 nm
		蓝 色	490 nm~450 nm
		紫 色	450 nm~380 nm
紫外线(380 nm~10 nm)	{	近紫外	380 nm~315 nm
		远紫外	315 nm~280 nm
		极远(真空)紫外	280 nm~10 nm

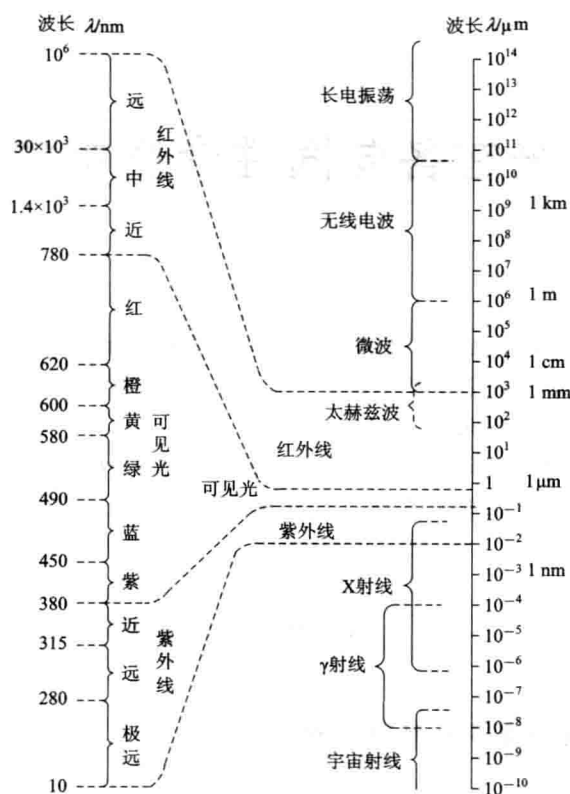


图 1-1 电磁波谱

2. 麦克斯韦电磁方程

根据光的电磁理论，光波具有电磁波的所有性质，并且可以从电磁场满足的基本方程——麦克斯韦方程组推导出来。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播特性。麦克斯韦方程组的微分形式为

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1.1-1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.1-2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.1-3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1.1-4)$$

式中， \mathbf{D} 、 \mathbf{E} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{H} 分别表示电感应强度(电位移矢量)、电场强度、磁感应强度、磁场强度； ρ 是自由电荷体密度； \mathbf{J} 是传导电流密度。这种微分形式的方程组将任意时刻、空间任一点上的电、磁场的时空关系与同一时空点的场源联系在一起。

3. 物质方程

光波在各种介质中的传播过程实际上就是光与介质相互作用的过程。因此，在运用麦克斯韦方程组处理光的传播特性时，必须考虑介质的属性，以及介质对电磁场量的影响。描述介质特性对电磁场量影响的方程，即是物质方程：

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (1.1-5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1.1-6)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (1.1-7)$$

式中, $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$, 为介电常数, 描述介质的电学性质, ϵ_0 是真空中介电常数, ϵ_r 是相对介电常数; $\mu = \mu_0 \mu_r$, 为介质磁导率, 描述介质的磁学性质, μ_0 是真空中磁导率, μ_r 是相对磁导率; σ 为电导率, 描述介质的导电特性。

应当指出的是, 在一般情况下, 介质的光学特性具有不均匀性, ϵ 、 μ 和 σ 应是空间位置的坐标函数, 即应当表示成 $\epsilon(x, y, z)$ 、 $\mu(x, y, z)$ 和 $\sigma(x, y, z)$; 若介质的光学特性是各向异性的, 则 ϵ 、 μ 和 σ 应当是张量 $\boldsymbol{\epsilon}$ 、 $\boldsymbol{\mu}$ 和 $\boldsymbol{\sigma}$, 因而物质方程应为如下形式:

$$\mathbf{D} = \boldsymbol{\epsilon} \cdot \mathbf{E} \quad (1.1-8)$$

$$\mathbf{B} = \boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{H} \quad (1.1-9)$$

$$\mathbf{J} = \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{E} \quad (1.1-10)$$

即 \mathbf{D} 与 \mathbf{E} 、 \mathbf{B} 与 \mathbf{H} 、 \mathbf{J} 与 \mathbf{E} 一般不再同向; 当光强度很强时, 光与介质的相互作用过程会表现出非线性光学特性, 因而描述介质光学特性的量不再是常数, 而应是与光场强 \mathbf{E} 有关系的量, 例如介电常数应为 $\boldsymbol{\epsilon}(\mathbf{E})$ 、电导率应为 $\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{E})$ 。对于均匀的各向同性介质, ϵ 、 μ 和 σ 是与空间位置和方向无关的常数; 在线性光学范畴内, ϵ 、 σ 与光场强无关; 在透明、无耗介质中, $\sigma=0$; 非铁磁性材料的 μ_r 可视为 1。

本书主要讨论光在无限大、均匀、各向同性和各向异性介质中的传播特性, 对于光在有限空间、非均匀介质中的传播和非线性光学等内容, 将在其它教科书中讨论。

4. 波动方程

麦克斯韦方程组描述了电磁现象的变化规律, 指出任何随时间变化的电场, 将在周围空间产生变化的磁场, 任何随时间变化的磁场, 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联系, 相互激发, 并且以一定速度向周围空间传播。因此, 交变电磁场就是在空间以一定速度由近及远传播的电磁波, 应当满足电磁波动方程。

下面, 我们从麦克斯韦方程组出发, 推导出电磁波动方程, 并且限定所讨论的区域远离辐射源, 不存在自由电荷和传导电流, 介质为各向同性的均匀介质。此时, 麦克斯韦方程组可简化为

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (1.1-11)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.1-12)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.1-13)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1.1-14)$$

对(1.1-13)式两边取旋度, 并将(1.1-14)式代入, 可得

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

利用矢量微分恒等式

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

并考虑到(1.1-11)式, 可得