



The Series of Advanced Physics of Peking University

北京大学物理学丛书

信息光子学物理

宋菲君 羊国光 余金中 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



The Series of Advanced Physics of Peking University

北京大学物理学丛书

信息光子学物理

宋菲君 羊国光 余金中 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

信息光子学物理/宋菲君,羊国光,余金中编著. —北京:北京大学出版社,2006.10

(北京大学物理学丛书)

ISBN 7-301-10653-X

I. 信… II. ①宋… ②羊… ③余… III. 光子-研究生-教材
N. O572.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 037807 号

书 名: 信息光子学物理

著作责任者: 宋菲君 羊国光 余金中 编著

责任编辑: 顾卫宇 聂一民

标准书号: ISBN 7-301-10653-X/O · 0690

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> **电子邮箱:** zpup@pup.pku.edu.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 理科编辑部 62752021
出版部 62754962

印 刷 者: 北京宏伟双华印刷有限公司

经 销 者: 新华书店

850mm×1168mm 32 开本 22.625 印张 620 千字

2006 年 10 月第 1 版 2006 年 10 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 元

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

举报电话: 010-62752024 **电子邮箱:** fd@pup.pku.edu.cn

内 容 简 介

光子学(photonics)是研究光子作为信息和能量载体的科学,光子学与信息科学的交叉形成信息光子学(information photonics),它既是传统波动光学的提高和发展,又是近代光学和微电子学的综合和升华。本书共分十五章,内容涉及信息光子学中经典、近代和前沿的大部分重要分支学科,系统地论述光子(光波)的激发和产生,光波在各向异性介质、光波导和光纤中的传播,光波的振幅、相位调制和空间光调制,光的滤波、开关、放大、探测,光纤中的色散及其补偿,光纤中的非线性效应,以及近年来引起科学技术界广泛注意的前沿课题——光子晶体光纤。作为信息光子学的重要应用领域,本书又系统介绍了光信息显示(投影显示)和光通信的主要课题。

本书既全面讲述物理原理,又兼顾前沿应用,可作为高校光电信息、光电子、光学工程、应用物理等专业研究生和大学本科高年级学生的教材,也可供光电信息领域(应当正确地称为信息光子学领域)从事研发、生产和经营的科技和业务人员参考。

前 言

物理学是自然科学的基础,是探讨物质结构和运动基本规律的前沿学科。几十年来,在生产技术发展的要求和推动下,人们对物理现象和物理学规律的探索研究不断取得新的突破。物理学的各分支学科有着突飞猛进的发展,丰富了人们对物质世界物理运动基本规律的认识和掌握,促进了许多和物理学紧密相关的交叉学科和技术学科的进步。物理学的发展是许多新兴学科、交叉学科和新技术学科产生、成长和发展的基础和前导。

为适应现代化建设的需要,为推动国内物理学的研究、提高物理教学水平,我们决定推出《北京大学物理学丛书》,请在物理学前沿进行科学研究和教学工作的著名物理学家和教授对现代物理学各分支领域的前沿发展做系统、全面的介绍,为广大物理学工作者和物理系的学生进一步开展物理学各分支领域的探索研究和学习,开展与物理学紧密相关的交叉学科和技术学科的研究和学习提供研究参考书、教学参考书和教材。

本丛书分两个层次。第一个层次是物理系本科生的基础课教材,这一教材系列,将几十年来几代教师,特别是在北京大学教师的教学实践和教学经验积累的基础上,力求深入浅出、删繁就简,以适于全国大多数院校的物理系使用。它既吸收以往经典的物理教材的精华,尽可

能系统地、完整地、准确地讲解有关的物理学基本知识、基本概念、基本规律、基本方法;同时又注入科技发展的新观点和方法,介绍物理学的现代发展,使学生不仅能掌握物理学的基础知识,还能了解本学科的前沿课题和研究动向,提高学生的科学素质。第二个层次是研究生教材、研究生教学参考书和专题学术著作。这一系列将集中于一些发展迅速、已有开拓性进展、国际上活跃的学科方向和专题,介绍该学科方向的基本内容,力求充分反映该学科方向国内外前沿最新进展和研究成果。学术专著首先着眼于物理学的各分支学科,然后再扩展到与物理学紧密相关的交叉学科。

愿这套丛书的出版既能使国内著名物理学家和教授有机会将他们的累累硕果奉献给广大读者,又能对物理的教学和科学研究起到促进和推动作用。

《北京大学物理学丛书》编辑委员会

1997年3月

序

刚刚过去的 20 世纪是人类社会发展中取得辉煌成就的黄金时代。电磁学理论、量子力学和相对论的创建使人们对物质世界的内涵有了深刻的理解和认识,从而人类对物质世界的利用和改造从“必然王国”阔步迈入“自由王国”,引发了能源技术、电子技术和自动化技术等领域划时代的革命性飞跃。集成电路、激光器、计算机与光通信的发展把社会物质文明推进到前所未有的高度,为新世纪的持续发展奠定了坚实雄厚的根基。电子作为信息与能量的载体在其发展中作出了历史性的巨大贡献,科学家、工程师们常把这一黄金时代喻之为“电子时代”。

刚刚迎来的 21 世纪,将会是一个更加绚丽灿烂的新时代,许多科学家和工程师们对此又有过各种描述。无疑,随着社会物质文明和精神文明的高度发达,人们对社会信息的需求正呈现“千变万化”、“急不可待”的态势,“信息”正成为社会成员不可或缺的“三餐食粮”,因此可以说 21 世纪必将是一个“信息化时代”。

当今“信息”的内涵与功能已经超越了社会成员之间的联络、通信和文化、娱乐,而阔步地迈入了对生产过程的远程自动化操控和经贸、金融活动、社会安全的智能化处理,“信息化”的发展正成为高度发达社会先进生产力的关键要素。

未来的时代社会信息量必将呈现指数式的爆炸性增长,计量时间的概念将由纳秒(10^{-9} s)迈入皮秒(10^{-12} s),而信息的传输容量则高达太比特每秒(10^3 Gb/s,即 Tb/s)。

电子技术由于受到 RC 延迟经典物理效应的限制,难以突破纳秒的门槛,成为制约超高速电子学发展的“瓶颈”。人们需要寻求一种新的信息载体。光子,当仁不让是科学家和工程师们首选的对

象。光子(或光波)不具荷电性,不存在 RC 瓶颈效应的制约,光波有最快的传播速度,通过 1 微米距离的时间不到 10^{-2} 皮秒,光波又兼具抗电磁干扰、定向传输特性,它所携带的信息有很高的安全度。

由此可见,在新世纪中光子必将大显身手,为信息化时代的发展作出历史性的重大贡献。有人说“光子将取代电子”,未来的世纪是“光子的时代”,此说难免有夸大之嫌,但至少可以肯定“光子与电子”将携手合作,和谐共建绚丽灿烂的 21 世纪,光子独特功能的运用对电子载体的局限性将会带来历史性的重大突破。

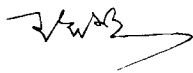
宋菲君、羊国光、余金中同志编著的《信息光子学物理》一书,“雪中送炭”地迎合了新时代发展的需求,作者立足于多年来长期在光电子领域科研、教学中的丰厚积累和精心推敲,提炼出科学内涵的逻辑关联性,通过多达十五章的分类,以准确流畅的文字表述,系统、全面、深入地介绍了信息光子学的基础科学知识和光电子技术应用中的各类关键性器件成就,既有原理性的概念描述,又有可供设计、分析时运用的定量物理关系,以及至今最新取得的前沿发展,有相当的系统性和深入度。

对光电子领域的广大读者,尤其是在读研究生和从事研发的高级科学工程人员,本书会是一本有很长时效性的可持续参阅的范本读物。

本人诚挚地推荐和深切地期望,通过《信息光子学物理》一书的出版发行,将有助于使光电子学领域的广大科技工作者和学生更快更好地迈入光子学科技研发的“自由王国”,起到“投石问路”和“摸石过河”的引导作用。

值此辞旧迎新之时,谨以此作序,不当之处,请不吝指正。

中国科学院院士 王启明



2005 年 12 月 31 日

作者前言

光子学是研究光子作为信息和能量载体的科学,包括光子的产生、运动和转化。光子学的应用范围包括从光能量的发生到光通信、光信息处理。它曾被冠以光电子学(optical electronics)的名字,近年来,国际上比较倾向于称它为光子学,英文 photonics 已被文献、国际会议广泛应用。光子学与信息科学的交叉形成信息光子学(information photonics),它既是经典波动光学的提高和发展,又是近代光学和微电子学的结合与升华。

近年来,我国各高等院校普遍设立光信息科学、光电信息科学、物理电子学等学科和专业,许多相近专业也开设了这方面的课程,而系统讲述本学科物理原理、比较全面地覆盖各分支领域的书籍尚不多见。特别是许多信息科学的专业是从原来的物理、应用物理、光学工程、电子学和计算机系转来的,教师希望本专业的大学毕业生,特别是研究生打好理论基础,希望有一本既全面讲述物理原理,又兼顾应用的教材。我国珠三角、长三角、武汉光谷、环渤海湾、京津唐等高新技术开发区信息产业发展很快,许多从事光电信息领域(其实应当正确地称为信息光子学领域)研发、生产和经营的科技和业务人员也强烈要求加强理论基础。我们撰写此书的目的,正是为了向高校光电信息科学、光学工程、应用物理学等专业研究生提供一本较为全面、系统的教材,经过摘选,也可作为大学本科生教材;同时又为产业界的科技人员提供一本既讨论基本原理、又接近前沿应用的参考书。

本书内容涉及信息光子学中经典、近代和前沿的大部分重要分支,系统地论述半导体中的发光,光波的传播、调制、滤波、开关、放大、探测,空间光调制,光纤中的色散及其补偿,光纤中的非线性

效应以及近年来引起科学技术界广泛注意的前沿课题——光子晶体光纤。作为信息光子学的重要应用领域,本书又介绍了光信息显示(投影显示)和光通信的有关内容。我们力求把物理原理、图像讲解清楚,建立明确、清晰的物理模型,在有关章节还引入了一些物理工作者常用的数学处理方法,掌握这些方法,无疑有益于加深对物理概念的理解,对于科研人员解决实际问题也会有所帮助。

本书三位作者长期在本领域的科研、教学以及高科技企业的经营管理、技术开发第一线工作。在本书编著的过程中作者参考了国外经典著作和讲义;本书的大部分内容曾在国内外学术会议上报告过或作为论文、技术咨询、综述报告在学术刊物发表过。其中六、七、八三章在中国科学院研究生院由作者讲授达十次以上;部分内容曾在英国北安普顿大学、北京大学、北京理工大学、北京邮电大学、北京工业大学、首都师范大学、厦门大学、华侨大学、暨南大学、福建师范大学等做过讲演;有些章节则是作者的科研成果或由作者主持开发产品的基本原理。

在信息光子学和相关技术日新月异的进展过程中,产生和应用了许多新的专业词汇,例如“垂直腔面发射激光器”(vertical cavity surface emitting laser, 缩写为 VCSEL),“波分复用”(wavelength division multiplexing, 缩写为 WDM),“光电子集成回路”(optoelectronic integrated circuit, 缩写为 OEIC),等等。在国外文献中英文缩写词大量使用,而中文书刊中这些词汇的译名不一致或欠规范,使读者感到困惑。为了方便查阅,我们对于本书用到的专业词汇,特别是一些新的或生僻的词汇,除在首次出现时加注英文原文、缩写外,还在书末编写了中、英文(包括英文缩写)词汇相互对照表,注明引用章节。其中一些词汇因国内尚没有标准的译名,我们使用了学术界和技术界通用的或约定俗成的译法。

宋菲君撰写了一至五章以及十、十二章,羊国光撰写了九、十一以及十三至十五章,余金中撰写了六、七、八章,李曼博士撰写了 5.7 节。九、十一以及十三至十五章的英文原稿(羊国光撰写)由

北京交通大学范玲副教授和大恒新纪元科技股份有限公司俞蕾高级工程师译成中文。全书由宋菲君统稿。胡芳小姐承担了大部分录入、制图、资料查阅、整理等工作,北京电影机械研究所赵福庭研究员审查修改了 10.4 节,中国科学院长春光学精密机械研究所郑琪副研究员提供了 10.4 节的设计曲线,美国 Scramtech 公司 J. Shanley 博士就 etendue 分析部分(3.9 节)与作者进行了有益的讨论,在此深表谢忱!最后感谢中国科学院计量测试高技术联合实验室和大恒新纪元科技股份有限公司对本书出版给予的资助。

目 录

第一章 光波在各向异性介质中的传播	(1)
1.1 各向异性介质中的介电张量	(1)
1.2 平面波在各向异性介质中的传播	(5)
1.3 几何表象	(11)
1.4 相速度、群速度和能流速度	(17)
1.5 单轴晶体和双轴晶体中光波的传播	(20)
1.6 双折射现象和晶体偏振器件	(27)
1.7 自然旋光性	(35)
1.8 运用耦合模理论分析光波在周期变化 折射率介质中的传播	(46)
1.9 光波在渐变折射率介质中的传播和自聚焦效应	(55)
附录 A1 光波偏振态的琼斯矩阵表象	(59)
参考文献	(64)
第二章 光波的调制	(66)
2.1 线性电光效应	(66)
2.2 电光调制器	(73)
2.3 调制偏振光空间正交方位信息传递	(82)
2.4 二次电光效应	(84)
2.5 磁光效应	(86)
2.6 声光效应	(93)
2.7 布拉格衍射	(103)
2.8 用耦合模理论来分析布拉格衍射	(106)
2.9 拉曼-纳斯衍射	(116)

2.10	声光器件及其应用	(118)
2.11	声光频移激光多普勒测速仪	(124)
2.12	声光可调滤波器和可调相移多光谱照相机	(126)
	参考文献	(129)
第三章	光波的空间调制	(133)
3.1	概论	(133)
3.2	磁光空间光调制器	(143)
3.3	液晶的扭曲效应及薄膜晶体管驱动液晶显示器	(146)
3.4	铁电液晶和电光开关	(154)
3.5	液晶投影机 and 液晶背投电视	(157)
3.6	混合场效应和液晶光阀	(159)
3.7	PROM 器件	(163)
3.8	数字微反射镜器件(DMD)和数字化投影	(166)
3.9	光信息显示系统的物理模型和 etendue 分析	(175)
	附录 A3 偏振光在线性扭曲介质中的传播	(182)
	参考文献	(185)
第四章	光波在波导中的传播	(195)
4.1	引言	(195)
4.2	平面光波导	(197)
4.3	能流和模间的正交性	(207)
4.4	几何光学处理和全反射相移修正	(211)
4.5	矩形光波导	(216)
4.6	用耦合模方法求解波导问题	(221)
4.7	导波光学的典型器件(I)	(226)
4.8	导波光学的典型器件(II)	(230)
4.9	具有渐变折射率分布的平面波导	(237)
4.10	光波与光波导的耦合机构	(244)
4.11	光电子集成回路简介	(246)

附录 A4 厄米方程和厄米多项式	(255)
参考文献	(256)
第五章 光波在光纤中的传播	(260)
5.1 引言	(260)
5.2 阶跃光纤	(269)
5.3 模荷载的光功率	(280)
5.4 弱导近似和线偏振模(LP 模)	(282)
5.5 单模光纤和基模 HE_{11}	(293)
5.6 平方折射率介质光纤	(297)
5.7 光纤的输入耦合和输出整形	(300)
附录 A5.1 柱函数的递推公式和渐近展开	(305)
附录 A5.2 光纤传输的光功率计算中用到的 柱函数积分公式	(306)
参考文献	(307)
第六章 半导体发光二极管	(309)
6.1 半导体能带图	(310)
6.2 发光二极管的分类	(321)
6.3 发光二极管的工作原理	(322)
6.4 半导体发光二极管材料	(325)
6.5 发光二极管器件结构	(329)
6.6 超辐射发光二极管	(333)
6.7 发光二极管的特性	(338)
参考文献	(344)
第七章 半导体激光器	(345)
7.1 半导体异质结	(346)
7.2 激光二极管的基本结构	(352)
7.3 激光器的阈值条件和光增益谱	(360)
7.4 DFB 激光器和 DBR 激光器	(366)

7.5 垂直腔面发射激光器	(372)
7.6 量子阱激光器	(376)
7.7 半导体激光二极管的特性	(383)
7.8 结语	(393)
参考文献	(394)
第八章 半导体光电探测器	(396)
8.1 光吸收	(396)
8.2 光电探测器的分类	(403)
8.3 光电探测器的结构	(404)
8.4 光电探测器的工作原理	(411)
8.5 半导体光电探测器的性能	(420)
8.6 结语	(430)
参考文献	(431)
第九章 光学网络引论	(432)
9.1 光纤通信的发展	(432)
9.2 复用技术	(437)
9.3 信号传输的一些概念	(441)
9.4 密集波分复用系统	(445)
参考文献	(452)
第十章 滤波器和波分复用	(453)
10.1 平面光栅及光栅类波分复用器	(454)
10.2 Littrow 反射光栅波分复用	(463)
10.3 法布里-珀罗干涉滤波器	(467)
10.4 介质膜干涉滤光片原理和波分复用	(473)
10.5 光纤光栅工作原理的傅里叶分析	(481)
10.6 光纤布拉格光栅在光通信中的应用	(486)
10.7 阵列波导光栅	(492)
10.8 声光偏振转换滤波和可调路由器	(506)

参考文献	(510)
第十一章 无源光纤器件	(515)
11.1 光纤耦合器	(516)
11.2 衰减器,隔离器,环行器和偏振器	(522)
11.3 光交叉连接	(530)
11.4 光交换(开关)	(534)
参考文献	(540)
第十二章 光纤放大器	(542)
12.1 前言	(542)
12.2 介质对光的增益作用和光放大	(544)
12.3 掺铒光纤放大器	(554)
12.4 其他掺稀土光纤放大器	(562)
12.5 掺铒光纤放大器在长距离光纤通信系统中的应用	(564)
附录 A12.1 光谱线的自然增宽和弛豫增宽	(567)
附录 A12.2 爱因斯坦系数的关系	(568)
参考文献	(569)
第十三章 光纤中的色散和偏振补偿	(572)
13.1 色散	(572)
13.2 色散和比特率	(583)
13.3 色散位移光纤、非零色散位移光纤和 色散平坦光纤	(587)
13.4 色散补偿光纤和色散补偿光栅	(590)
13.5 用于色散补偿的虚像相位列阵部件	(596)
13.6 偏振模色散	(602)
13.7 偏振模色散补偿和偏振保持光纤	(610)
参考文献	(616)
第十四章 光纤的非线性效应	(620)
14.1 光纤的非线性	(620)

14.2 受激布里渊散射和受激拉曼散射	(626)
14.3 自相位调制	(631)
14.4 交叉相位调制	(633)
14.5 四波混频	(635)
参考文献	(640)
第十五章 光子晶体光纤	(641)
15.1 光子晶体光纤引论	(641)
15.2 光子晶体光纤的制作	(646)
15.3 光子晶体光纤特性	(649)
15.4 折射率导波型光子晶体光纤的理论和模型	(660)
15.5 光子带隙型光子晶体光纤中光的传播	(664)
参考文献	(667)
中文词汇索引	(670)
英文及英文缩写词汇索引	(687)