



光学前沿研究与应用丛书

总主编
王之江

非线性光学 与光子学

Nonlinear Optics and Photonics

赫光生
著



上海科学技术出版社
SHANGHAI SCIENTIFIC & TECHNICAL PUBLISHERS

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

光学前沿研究与应用丛书

总主编 王之江

非线性光学与光子学

赫光生 著

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

非线性光学与光子学 / 赫光生著. —上海: 上海
科学技术出版社, 2018. 12

(光学前沿研究与应用丛书)

ISBN 978 - 7 - 5478 - 4196 - 9

I. ①非… II. ①赫… III. ①非线性光学②光子—研
究 IV. ①O437②O572. 31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 217386 号

本书出版受“上海科技专著出版资金”资助

非线性光学与光子学

赫光生 著

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上 海 科 学 技 术 出 版 社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235 www. sstp. cn)

印刷

开本 787×1092 1/16 印张 45

字数 800 千字

2018 年 12 月第 1 版 2018 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5478 - 4196 - 9/O · 63

定价: 298.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题, 请向工厂联系调换

内 容 提 要

本书作为一本关于非线性光学与光子学的学术著作,全面总结介绍了半个世纪以来非线性光学领域的主要研究课题和发展成就,着重介绍了 20 世纪 90 年代以后的一系列新型研究课题以及它们在光子学领域的独特应用,同时客观反映了作者及其所领导的研究团队多年来做出的一些新发现和相关贡献。

本书可供物理、光学、光电子学、光化学等相关专业学生、教师和科研人员阅读参考。

丛书编委会

总主编

王之江(中国科学院院士)

副总主编

楼祺洪 (中国科学院上海光学精密机械研究所研究员)

刘立人 (中国科学院上海光学精密机械研究所研究员)

编 委(以拼音为序)

陈良尧 (复旦大学教授)

陈险峰 (上海交通大学教授)

李育林 (中国科学院西安光学精密机械研究所研究员)

刘 旭 (浙江大学教授)

饶瑞中 (中国科学院安徽光学精密机械研究所所长、研究员)

王清月 (天津大学教授)

徐剑秋 (上海交通大学教授)

翟宏琛 (南开大学教授)

Ting-Chung Poon (美国 维珍尼亚理工州立大学教授
Virginia Polytechnic Institute and State University)

丛 书 序

光学是物理学的一部分,是物理学的一个分支,也是当前科学研究中最活跃的学科之一,光学的发展是人类认识客观世界的进程中一个重要的组成部分。光学从产生开始就具有强烈的应用性,并形成了光学工程这一独特技术领域,在人类改造客观世界的进程中发挥了重要作用。光学实验的结果曾经推动了近代相对论和量子论的发展。光学为多个学科提供了重要工具,如望远镜对于天文学与大地测量学、显微镜对于生物医学与金相学、光谱仪对于化学和材料科学。光学的发展还为生产技术提供了许多重要的观察和测量工具。

从爱因斯坦辐射理论可以预见到激光存在。20 世纪中叶,激光问世对光学及相关科学和技术影响很大。激光的本质是受激辐射形成的高亮度、高功率密度,从而派生出种种前所未有的非线性物理现象;形成非线性光学、激光光谱学等新学科分支;开拓了远紫外到太赫兹等新辐射波段;提供了超快过程研究的工具。激光作为新光源已应用于多个科研领域,并很快被运用到材料加工、精密测量、信号传感、生物医学、农业等极为广泛的技术领域。产生了光通讯、光盘等新产业。此外,激光还为同位素分离、受控核聚变以及军事上的应用,展现了光辉的前景,成为现代物理学和现代科学技术前沿的重要组成部分。

信息科学原先以电子学为基础,如电报、电话、雷达等领域。现代科技的发展使图像信息日益重要,光信息的获取、传输、存储、处理、接收、显示等技术在近代都有非常大的进步。光信息科学已是信息科学的重要组成部分。

总之,现代光学和其他学科、技术的结合,在人们的生产和生活中发挥着日益重大的作用和影响,成为人们认识自然、改造自然以及提高劳动生产率

的越来越强有力的武器。学术的力量是科技进步的基础,上海科学技术出版社在这个时候策划出版一套“光学前沿研究与应用丛书”,是一件非常合乎时宜的事情。将许多专家、学者广博的学识见解和丰富的实践经验总结继承下来,对促进我国光学事业的发展具有十分重要的现实意义。

本套丛书的内容涵盖光学领域先进的理论方法和科研成果。图书类别主要以专著、教材为主。旨在从系统性、完整性、实用性和技术前瞻性角度出发,把理论知识与实践经验结合起来,更好地促进光学领域的学术交流与合作,让更多的学者了解该领域的科研成果和研究趋势,为促进我国光学领域科研成果的转化、加速光学技术的发展提供参考和支持。

可以说,本套丛书承担着记载与弘扬科技成就、积累和传播科技知识的使命,凝结了众多国内外光学专家、学者的智慧和成果。期望这套丛书能有益于光学专业人才的培养、有益于光学事业的进一步发展,同时能吸引更多的仁人志士投身于祖国的光学事业。

王之江

中国科学院院士,物理学家
中国科学院上海光学精密机械研究所研究员

前 言

众所周知,激光正式诞生于 1960 年,第一个非线性光学效应(光学二次谐波)发现于 1961 年。从这种意义上来说,非线性光学是随同激光技术一起发展起来的一门新兴分支学科,它专门研究强相干光(激光)辐射与介质相互作用过程中出现的一系列光学新现象与新效应(相对于激光出现前的传统光学而言),以及它们在当代科学技术中的各种科学与技术应用。

纵观非线性光学这一学科的发展历程,可粗略分为三个大的阶段。① 早期阶段(约为 20 世纪整个 60 年代),主要以发现和报道大量新效应为主,研究大多集中在二阶与三阶非线性混频、受激拉曼与受激布里渊散射、激光束自聚焦以及几种瞬态相干光学效应等过程。② 中期发展阶段(约为 20 世纪七八十年代),除了继续上述的课题研究外,还出现了一些新的重点课题,其中包括消多普勒加宽非线性光谱学、光学相位共轭技术、光学时间孤子以及光纤中的非线性效应等基础研究。③ 近期发展阶段(从 20 世纪 90 年代至本世纪初),它的标志性研究进展和成果包括多光子技术、纳米光子学、在共振介质中的快光与慢光传输、光学空间孤子、新型受激散射效应、太赫兹光子学等。

从有关激光物理与非线性光学两个学科的理论基础的角度来看,至今存在着平行而又互补的两大理论体系:一种是有关光辐射的半经典理论,另一种则是量子电动力学理论(全量子理论)。前者的特点是将光辐射看成经典电磁场(满足麦克斯韦方程组),而将与其发生作用的光学介质看成由量子力学描述的分子或原子的集合。后者的特点则是将光辐射看成一群光子的集合,然后再把给定光子的集合与组成介质的分子集合作为一个统一的体系加以量子力学式的处理。

在描述有关光与物质相互作用的课题时,半经典理论所引入的关键物理量是介质的感应电极化强度矢量,它同时决定于外加入射光场的强弱以及介

质对光场反作用能力(各阶电极化率)的大小。而全量子理论所依赖的则是引入所谓(瞬时)中间能态的概念与相应的虚能级图示,用于表征光子场的变化与同时发生的分子在其不同本征能级间的量子跃迁行为。

以上两种理论体系均有各自的优缺点与适用范围。例如,在描述大多数已知的非线性光学效应的物理本质时,全量子理论能给出更为严密与简明的概念式解释。而基于半经典理论导出的已为人们所熟悉的有关介质各阶非线性电极化强度表示式,则可方便地用来定量描述各种非线性混频过程,以及与介质感应折射率变化有关的非线性光学过程等。

自 21 世纪初,“光子学”这一术语开始逐渐频繁地出现于学术会议、刊物论文与一些书籍中。尽管学术界没有对其给出公认的权威性定义,但“光子学”应该至少包含两方面的学科内涵。一方面,是专指基于激光(不是普通光)的各种当代光学应用技术,特别指激光在诸如光电子学、高速率远距离光通信、三维光信息存储与微制造、纳米光学材料以及三维与高分辨特种成像技术等领域的应用;另一方面,则专指那些必须强调光场之光子特性(如多光子吸收、原子多光子电离、分子多光子离解、多光子化学聚合、多光子光电效应等)的基础与应用研究。一般说来,量子化辐射场的“光子”特性,只有在涉及光场与组成介质的微观粒子(分子、原子、电子等)相互作用并伴随有能量与动量交换时,才能充分显示出来。基于上述两方面的原因,似乎不应把传统光学中的几何光学部分与物理光学中有关经典光频电磁波场的干涉、衍射、色散、偏振、传播等理论和技术也归属在“光子学”的学科范畴内。

目前已经出版的有关非线性光学的中外书籍,大多数都以阐述非线性光学发展早期(或加上部分中期)的成果为主,中心课题多是有关二阶非线性(三波)混频,三阶非线性(四波)混频,与非线性介质折射率变化有关的自聚焦、自相位调制与自光谱加宽以及早期发现的受激拉曼与受激布里渊散射等内容。书中所采用的理论描述,也仅仅是基于有关介质非线性电极化的半经典理论体系。

本书是在拙著 *Nonlinear Optics and Photonics* (Guang S. He, Oxford University Press, 2015) 英文版一书的基础上,结合现今国情经过适当改写与补充后而完成的。与其他已有的非线性光学著作相比,本书具有如下两个

主要特点: 首先, 力求比较全面地总结和介绍非线性光学在(早期、中期、近期)三个发展阶段的主要课题与研究成果; 其次, 以互补的方式, 采用两种理论体系对不同的效应给出清晰的概念与物理机制上的解释, 然后再采用尽可能简洁的数学方式进行定量描述。从具体内容上来说, 光学相位共轭效应(第 8 章)、光学时间与空间孤子(第 12~13 章)、多光子非线性光子学技术(第 14 章)、非线性光电效应(第 15 章)、快光与慢光传输(第 16 章)、太赫兹光子学技术(第 17 章)以及几种新型受激散射效应(第 7 章后半部)等内容, 在已有同类书中均很少被深入介绍或详细讨论过。其中相当一部分新内容, 或者必须借助全量子理论加以解释, 或者是以在光子学技术领域内的最新应用为取向, 因此亦可称为非线性光子学。基于以上这些考虑, 本书既包含了非线性光学的常规内容, 也更加注重反映较新的非线性光子学的内容, 所以简化取名为《非线性光学与光子学》。

笔者首先要感谢中国科学院上海光学精密机械研究所王之江院士, 是他首先建议与鼓励笔者写成此部中文版著作的。同时笔者也感谢半个世纪以来对笔者多有支持与长期合作过的刘颂豪院士(华南师范大学)、美国的 P. N. Prasad 教授(纽约州立大学布法罗分校, 激光、光子学与生物光子学研究所所长), 以及不同时期的众多其他研究合作者们, 因为构成本书部分内容的一些研究成果, 都是笔者与这些合作者们长期共同努力的结果。另外需要指出的是, 本书第 17 章(太赫兹非线性光学)英文初稿是由时为美国布鲁克海文国家实验室物理学家沈宇震博士撰写, 本书第 14 章第 2 节(多光子吸收材料)初稿是由中国科学院福建物质结构研究所郑庆东研究员撰写, 笔者对他们对本书的贡献谨致深切的谢意。

笔者也要特别感谢崔一平教授(东南大学)、王慧田教授(南京大学)、郑庆东研究员, 承蒙他们审读本书写作大纲与部分书稿, 并感谢国家科学技术学术著作出版基金和上海科技专著出版资金的资助。最后, 笔者也感谢上海科学技术出版社王体辉编辑在本书选题立项与最后定稿方面的贡献。

赫光生(G. S. He)

2018 年 7 月

目 录

丛书序

前言

第1章 引论 1

1.1 非线性光学与非线性光子学的学科定义	1
1.1.1 线性光学的定义与特点	1
1.1.2 非线性光学的定义与特点	2
1.1.3 非线性光子学的学科含义	4
1.2 描述光辐射场的主要物理参量	4
1.2.1 光辐射的强度与亮度	5
1.2.2 光束的空间与时间相干性	6
1.2.3 光子波型数与光子简并度	7
1.3 强相干光辐射与物质作用的特点	9
1.4 描述强相干光与物质作用的两种理论体系	11
1.4.1 半经典理论	11
1.4.2 量子电动力学理论	12
1.4.3 两种理论体系的适用范围	15
1.5 非线性光学与光子学的应用和科学意义	16
参考文献	18

第2章 非线性电极化过程 20

2.1 光学介质的非线性感应电极化效应	20
---------------------------	----

2.2 介质产生感应电极化的物理机制	24
2.3 非线性电极化率的张量表现形式	25
2.4 非线性电极化率的基本性质	27
2.5 非线性电极化作用下的耦合波动方程	30
2.6 单色光场的复数表示形式	33
参考文献	35

第3章 二阶非线性(三波)混频效应 36

3.1 光学二次谐波效应	36
3.1.1 二次谐波产生的量子图像描述	36
3.1.2 二次谐波的半经典理论定量描述	38
3.1.3 产生二次谐波的工作物质	42
3.1.4 产生二次谐波的实验装置	46
3.2 光学和频与差频效应	48
3.2.1 光学和频效应	48
3.2.2 光学差频效应	49
3.2.3 光学和频与差频产生的实验装置	50
3.3 光学参量放大与振荡效应	51
3.3.1 光学参量效应	51
3.3.2 光学参量放大和振荡条件的推导	52
3.3.3 光学参量放大器和振荡器实验系统	55
3.4 特殊光学二次谐波产生	59
3.4.1 产生二次谐波的特殊材料	59
3.4.2 在表面和交界面产生二次谐波	60
参考文献	61

第4章 三阶非线性(四波)混频效应 65

4.1 四波混频(四光子参量作用)的几种方式	65
4.2 光学三次谐波的产生	68
4.2.1 三次谐波效应的非线性电极化理论描述	68
4.2.2 实现三次谐波相位匹配的方法	70

4.2.3	三次谐波产生的共振增强	72
4.2.4	产生三次谐波及和频辐射的介质和装置	74
4.3	拉曼共振增强的四波混频	76
4.3.1	相干斯托克斯与反斯托克斯环状辐射的产生	76
4.3.2	两拉曼差频光束成微小角度入射的情况	78
4.4	非共振四光子参量作用	79
4.4.1	部分简并四光子参量作用	79
4.4.2	简并四光子参量作用	82
4.5	通过三阶非线性过程产生二次谐波	83
4.5.1	直流电场导致的二次谐波产生	83
4.5.2	光纤中的二次谐波产生	84
	参考文献	86

第5章 强光引起的折射率变化 90

5.1	线性光学中对折射率的描述	90
5.2	非线性光学中对折射率的描述	92
5.3	双光束入射引起的折射率变化	94
5.4	双光子共振引起的折射率增强变化	95
5.5	拉曼共振引起的折射率增强变化	98
5.6	折射率感应变化的物理机制	99
5.6.1	引起折射率变化的不同物理机制	99
5.6.2	分子再取向克尔效应引起折射率变化的表达式	101
5.6.3	电致伸缩效应导致的折射率变化表达式	103
5.6.4	感应折射率变化的时间特性	104
5.7	二阶非线性电极化过程导致的折射率耦合变化(光频泡克耳斯效应)	107
	参考文献	112

第6章 强光自聚焦、自相位调制与光谱自加宽 114

6.1	强光自聚焦的基本理论	114
6.1.1	自聚焦现象概述	114

6.1.2	光束自陷的感应波导模型	117
6.1.3	稳态自聚焦解析理论	118
6.1.4	稳态自聚焦焦距的半经验公式	123
6.1.5	动态自聚焦描述	124
6.2	自聚焦的直接观测实验	125
6.2.1	自聚焦光束多焦点结构的直接观测	125
6.2.2	对超短脉冲产生多焦点自聚焦行为的模拟数值计算	131
6.3	强光脉冲的自相位调制和频率啁啾效应	134
6.4	强光脉冲的光谱自加宽效应	137
6.4.1	准单色强光脉冲自调制导致的光谱自加宽	137
6.4.2	多频率组分脉冲拍频调制导致的光谱自加宽	139
6.5	相干连续谱白光辐射	142
6.5.1	超短强光脉冲产生相干连续谱白光辐射	142
6.5.2	用纳秒激光脉冲产生相干连续谱白光辐射	147
6.5.3	相干连续谱白光辐射的应用	151
	参考文献	151

第7章 强相干光受激散射效应 155

7.1	光的散射现象	155
7.1.1	光的散射现象的起因	155
7.1.2	光的散射现象的分类	156
7.1.3	光的受激散射与普通(自发)散射间的区别	159
7.2	受激拉曼散射	161
7.2.1	拉曼散射过程的量子理论图像	161
7.2.2	拉曼散射过程的量子理论定量描述	163
7.2.3	自发和受激拉曼散射概率表达式	169
7.2.4	受激拉曼散射增益系数和阈值条件	171
7.2.5	受激拉曼散射增益系数的半经典理论推导	174
7.3	受激拉曼散射实验规律	177
7.3.1	实验装置和散射介质	177
7.3.2	受激拉曼散射过程中的四波混频	179
7.3.3	拉曼共振增强的自聚焦效应	185

7.4	自旋反转、电子、纯转动跃迁受激拉曼散射	189
7.4.1	自旋反转受激拉曼散射	189
7.4.2	电子跃迁受激拉曼散射	193
7.4.3	纯转动跃迁受激拉曼散射	196
7.5	受激布里渊散射效应	197
7.5.1	自发和受激布里渊散射的物理图像	197
7.5.2	强光与介质感应声波场的相互作用	199
7.5.3	受激布里渊散射的增益与阈值	202
7.5.4	受激布里渊散射的实验研究	207
7.6	受激克尔散射效应	214
7.6.1	有关液体中光频再取向克尔效应的背景知识	214
7.6.2	受激瑞利翼散射	215
7.6.3	超宽带受激散射现象的发现	216
7.6.4	克尔散射的物理模型	218
7.6.5	克尔散射的截面	220
7.6.6	受激克尔散射的增益和阈值条件	224
7.6.7	实验结果与理论比较	225
7.7	受激瑞利-布拉格散射效应	231
7.7.1	效应发现的背景	231
7.7.2	受激瑞利-布拉格散射的物理模型	231
7.7.3	SRBS 产生的阈值条件	233
7.7.4	SRBS 的实验特性	235
7.7.5	SRBS 对泵浦光谱线宽度的要求	239
7.8	受激米氏散射效应	241
7.8.1	效应发现的背景和产生机理	241
7.8.2	半导体纳米颗粒悬浮液中 SMS 实验	242
7.8.3	金属纳米颗粒悬浮液中 SMS 实验	244
	参考文献	248

第8章 光学相位共轭效应 256

8.1	相位共轭波的定义和功用	256
8.1.1	光学相位共轭技术的产生背景	256

8.1.2	相位共轭波的定义	257
8.1.3	相位共轭波的特殊功用	258
8.2	利用四波和三波混频产生相位共轭波	260
8.2.1	利用简并四波混频产生后向共轭波	260
8.2.2	简并四波混频产生后向共轭波的两种物理解释	263
8.2.3	利用部分简并四波混频产生后向共轭波	265
8.2.4	利用四波混频产生前向共轭波	266
8.2.5	利用三波混频产生前向共轭波	268
8.3	利用四波混频产生相位共轭波的实验研究	270
8.3.1	简并四波混频产生后向共轭波	270
8.3.2	部分简并四波混频产生后向共轭波	274
8.4	利用后向受激散射产生相位共轭波	276
8.4.1	后向受激散射相位共轭特性的实验发现	276
8.4.2	后向受激散射相位共轭特性的实验表征	277
8.4.3	后向受激散射具有相位共轭特性的物理解释	282
8.4.4	后向受激散射相位共轭特性的数学描述	284
8.5	利用后向激光发射产生相位共轭波	287
8.5.1	后向激光发射相位共轭特性的发现和物理解释	287
8.5.2	后向激光发射相位共轭特性的实验特征	289
8.6	光学相位共轭技术的应用	293
8.6.1	相位共轭技术的多种应用	293
8.6.2	相位共轭技术在高速率和远距离光纤通信系统中的 应用	296
	参考文献	304

第9章 非线性与超高分辨光谱学 312

9.1	限制光谱分辨率的因素	312
9.1.1	传统光谱术与新型激光非线性光谱术	312
9.1.2	影响光谱分辨率的各种因素	313
9.2	饱和吸收光谱学效应	318
9.2.1	效应概述	318
9.2.2	基本理论考虑	321

9.2.3	实验研究简述	323
9.2.4	交叉耦合饱和吸收光谱效应	328
9.3	消多普勒加宽双光子吸收光谱学效应	330
9.3.1	效应概述	330
9.3.2	有关 2PA 的半经典理论描述	332
9.3.3	有关实验结果	334
9.4	相干拉曼和四波混频光谱学效应	337
9.4.1	效应概述	337
9.4.2	相干反斯托克斯拉曼光谱学效应	338
9.4.3	拉曼感应克尔效应光谱学效应	344
9.4.4	拉曼增益光谱学和反拉曼光谱学效应	346
9.5	激光偏振光谱学效应	349
9.5.1	效应概述	349
9.5.2	消多普勒加宽饱和吸收偏振光谱学效应	349
9.5.3	偏振 CARS 光谱学效应	352
9.5.4	偏振标定分子光谱学效应	354
9.6	激光冷却与陷阱光谱术	356
9.6.1	激光冷却与陷阱的原理	356
9.6.2	激光冷却与陷阱的技术	358
9.6.3	获得超高光谱分辨率的实验结果	360
	参考文献	363

第10章 瞬态相干光学效应 370

10.1	瞬态相干作用的定义和特点	370
10.2	自感透明效应	372
10.2.1	2π 脉冲的定义和自感透明	372
10.2.2	2π 脉冲的形状和速度	375
10.2.3	自感透明的实验	378
10.3	光子回波效应	381
10.3.1	光子回波现象	381
10.3.2	光子回波的理论描述	383
10.3.3	光子回波的实验	388