



高等院校电子信息类规划教材



非线性光学与 非线性光纤光学贯通教程

NONLINEAR OPTICS INCLUDING NONLINEAR FIBER OPTICS

张晓光 唐先锋 肖晓晟 编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



北京邮电大学电子信息类规划教材

非线性光学与非线性光纤光学 贯通教程

张晓光 唐先锋 肖晓晟 编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

非线性光学与非线性光纤光学一般是两门独立的课程,学习起来都有一定难度。然而实际上非线性光纤光学是非线性光学非常重要的应用领域,非线性光学是非线性光纤光学的基础,两者是不能完全割裂的。本书尝试将两者融会贯通起来,在非线性光学与非线性光纤光学之间建立一个自然进阶的“桥梁”,作为一个整体展现给读者。

本书可以作为光电子学、光纤通信、光纤传感等相关专业的研究生课程教材,也可以供相关领域的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

非线性光学与非线性光纤光学贯通教程 / 张晓光, 唐先锋, 肖晓晟编著. -- 北京: 北京邮电大学出版社, 2021. 8

ISBN 978-7-5635-6391-3

I. ①非… II. ①张… ②唐… ③肖… III. ①光纤通信—非线性光学—教材 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2021) 第 112057 号

策划编辑: 马晓仟

责任编辑: 满志文

封面设计: 七星博纳

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号

邮政编码: 100876

发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 唐山玺诚印务有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 17.5

字 数: 456 千字

版 次: 2021 年 8 月第 1 版

印 次: 2021 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-6391-3

定价: 46.00 元

· 如有印装质量问题, 请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

前 言

自 1960 年激光器发明以来,非线性光学是现代光学发展最强劲的领域之一,而非线性光纤光学又是非线性光学在光纤通信领域最重要的应用。1961 年弗兰肯(Franken)发现二次谐波效应被认为是非线性光学研究正式开始的标记。1965 年布鲁姆伯格(Bloembergen)出版了史上第一本《非线性光学》(*Nonlinear Optics*)专著。1984 年美籍华裔学者沈元壤(Yuan Rang Shen)出版了权威专著《非线性光学原理》(*The Principles of Nonlinear Optics*),全面总结了当时已发现的非线性光学现象以及解释它们的原理框架。至此,非线性光学教材的理论框架基本搭建成功,后来各位学者撰写的非线性光学书基本上延续了这一框架。沈元壤教授的《非线性光学原理》在目前看来有一些陈旧,当前国际上最流行的非线性光学书是博伊德(Boyd)教授的《非线性光学》(*Nonlinear Optics*),已出版到第 4 版了。

非线性光纤光学是非线性光学的重大应用,也是非线性光学研究的重要分支。1980 年,世界上第一个 45 Mbit/s 商用光纤通信系统出现,40 多年来发展的速度太惊人了。目前作为互联网通信主要承载体的光纤通信骨干网,单波长的传输码率达到 800 Gbit/s,一根光纤在 C+L 波段可以承载 160 Tbit/s 的通信容量(传输大约 200 个波长的信号)。早期的光纤通信系统中,只有单波长信号传输,光纤中的光功率不高,属于线性极化范畴,是线性的光纤通信系统。光信号在光纤中传输,呈现的是线性光学响应,光纤通信领域的工程师根本不用关心光纤中的非线性光学效应。到了 20 世纪 90 年代,随着光孤子技术和波分复用技术的应用,光纤通信的速率大幅度提高,单波长码率达到 10 Gbit/s,一根光纤能传输 40~80 个波长信号,光纤中的激光功率大幅度提高,光信号在光纤中传输,人们再也不能忽视非线性响应的存在。这激起了科学家对于光纤中的非线性光学效应的大量研究,从那以后的光纤通信工程师也必须了解光纤非线性效应,自此,学习非线性光纤光学成为热潮。在这个学习热潮中,阿戈沃(Agrawal)教授 1989 年出版了《非线性光纤光学》(*Nonlinear Fiber Optics*),为非线性光纤光学建立了教材的原理框架。到 2019 年,该书已经出版到了第 6 版。

实际上,目前被大家广泛认可的非线性光学的教材不算太多,但也不算太少。而非线性光纤光学教材并不多,除了广泛认可的阿戈沃教授的《非线性光纤光学》以外,还有施耐德(Schneider)教授的《远程通信中的非线性光学》(*Nonlinear Optics in Telecommunications*)和费雷拉(Ferreira)教授的《光纤中的非线性效应》(*Nonlinear Effects in Optical Fibers*)。非线性光学原理本身的学习是有一定难度的,需要下足够的功夫。而学习非线性光纤光学是需要以学好非线性光学为前提的。各个高校,为物理学学科和光学学科的理科研究生往往只开设非线性光学课程,为光学工程学科和电子科学与技术学科等工科研究生往往只开设非线性光纤光学课程,两门课程相互割裂。另外,以阿戈沃所著《非线性光纤光学》为代表的非线性光纤光学教材,推导非线性薛定谔方程的过程不尽如人意,其中的非线性自相位调制项出现得还比较自然,而其他非线性效应项的来源,比如四波混频、受激拉曼散射、受激布里渊散射的非线性项出现时并不顺畅,原理并不清晰。学生学习时应该对非线性机制有深入的了解,非线性光纤光学中的非线性公式应该从非线性光学的光场复振幅非线性传输方程中过渡过来,即学习非线性光纤光学的学生应该首先学好非线性光学的理论框架,然后自然而然地过渡到非线性光纤光学的学习中。只有这样学习到的非线性光纤光学才根基扎实,对今后研究光纤非线性效应才是有益的。

因此本书尝试把非线性光学与非线性光纤光学写成一本“贯通教程”,在非线性光学与非线性光纤光学之间建立一个自然进阶的“桥梁”,作为一个整体展现给读者。本书用7章建立非线性光学的理论框架以及阐述基本的非线性光学效应,用最后3章介绍光纤中的主要非线性效应,特别关注了与光纤通信系统相关的光纤非线性效应,如自相位调制效应、交叉相位调制效应、四波混频与参量放大、受激拉曼散射与光纤拉曼放大器、受激布里渊散射与光纤布里渊放大器以及光纤布里渊传感器。

本书是为光学工程学科、电子科学与技术学科的电磁场与微波技术二级学科和物理电子学二级学科的研究生课程编写的教材,授课对象是工科学生。因此本书舍弃了非线性光学现象的量子理论解释,在解释受激拉曼散射机制时也只是提到了非常简单的量子解释。另外学习非线性光学必然涉及张量、晶体对称性的知识。本书以附录的形式,以够用为准则进行介绍。比如本书以各向异性介质中推动钢球的例子进行张量的引入,介绍二阶张量的物理意义。此外,本书需要用到的高斯光束、非线性晶体的选择、变分法等知识也是以附录形式引入。

非线性光学书的符号约定是一个让初学读者非常头痛的事。学好非线性光学需要同时参考多本教材,而不同的非线性光学书中的各种符号约定却使人无所适从,形成了悖论。比如量纲的不同、光场复数表示正负频选择的不同、振幅有无 $1/2$ 因子的不同,使非线性光学中的公式出现不同的形式,而且形式有时差别很大,使读者陷入混乱。鉴于此,本书用附录 A 对非线性光学中的符号约定问题进行了较详细的说明。

本书作者在研究生阶段学习的是非线性激光光谱学,从教后长期致力于光纤通信系统研究,并于 20 世纪 90 年代末接手主讲研究生的非线性光学课程,至今主讲这门课程已经 20 余年。2004 年,又为北京邮电大学理学院应用物理专业开设了非线性光学导论课,并编写了《非线性光学》(上册)的铅印讲义作为课程教材。本书的大部分章节内容均来自作者多年来主讲非线性光学与非线性光学导论课的讲义,以及上述的铅印讲义。本书作者于 1993 年至 2000 年在理学院主任杨伯君教授的引领下,曾经一度研究光孤子通信,并于 1999 年获得信息产业部科技进步三等奖,后来又研究了光纤中非线性损伤的机理与均衡方法,算是对非线性光纤光学有一定的理解。由于编写本书需要一定的专业背景,而深入掌握非线性光学与非线性光纤光学本身有难度,以及本书作者对于自身能否胜任存在疑虑,使得没有能早一些完成本书的编写。近年来周围的同事不断地鼓励和催促本书作者尽快完成本书的编写,在两位青年教师的帮助下,终于使这本书与读者见面了。

限于作者的水平,书中存在的不妥之处,恳请广大读者批评指正。

作者

2021 年 1 月于北京

目 录

绪论	1
0.1 研究非线性光学与非线性光纤光学的意义	1
0.2 非线性光学与非线性光纤光学的发展简史	2
0.3 描述非线性光学的理论体系概述与本书的理论框架	4
本章参考文献	5
第 1 章 晶体光学简介 电光效应	9
1.1 介电张量 光在各向异性线性介质中的传播	9
1.2 晶体电光效应	18
1.3 电光效应的应用——电光调制	26
本章参考文献	32
习题	32
第 2 章 光波在非线性介质中的传播	34
2.1 非线性极化的经典理论	34
2.2 非线性极化率的宏观描述	41
2.3 非线性相互作用的耦合波方程	45
本章参考文献	48
习题	48
第 3 章 二次谐波	49
3.1 二次谐波的产生	49
3.2 相位匹配	54
3.3 有效倍频极化系数	62
3.4 用高斯光束产生二次谐波	69
本章参考文献	71
习题	71

第 4 章 光学参量放大和光学参量振荡 73

4.1 引言 73

4.2 光学参量放大 74

4.3 光学参量振荡器 76

本章参考文献 82

习题 82

第 5 章 三阶非线性效应概述与四波混频 84

5.1 三阶非线性效应概述 84

5.2 四波混频概述 89

5.3 相位共轭波 93

5.4 利用简并四波混频产生相位共轭波 97

本章参考文献 103

习题 103

第 6 章 受激光散射 105

6.1 光散射现象概述 105

6.2 受激拉曼散射的经典模型 109

6.3 受激拉曼散射的量子解释 113

6.4 反斯托克斯拉曼散射 116

6.5 稳态受激拉曼散射的耦合波理论 118

6.6 受激布里渊散射概述 120

6.7 受激布里渊散射的耦合波理论 126

6.8 受激拉曼散射与受激布里渊散射的比较 130

本章参考文献 131

习题 131

第 7 章 非线性折射率效应 133

7.1 光克尔效应 133

7.2 非线性相移与非线性吸收 135

7.3 自聚焦现象 空间光孤子简介 138

7.4 非线性折射率的测量—— z -扫描技术 144

7.5 光学双稳态 149

本章参考文献 151

习题 151

第 8 章 非线性光纤光学 I :基础知识	153
8.1 光纤基本特性和非线性光纤光学概述	153
8.2 单模光纤中光脉冲的非线性传输方程	165
8.3 群速度色散对光脉冲传输的影响	170
本章参考文献	179
习题	180
第 9 章 非线性光纤光学 II :光纤非线性折射率效应	181
9.1 自相位调制与交叉相位调制	181
9.2 光纤中的光孤子	193
9.3 光纤中的四波混频	202
本章参考文献	214
习题	215
第 10 章 非线性光纤光学 III :光纤受激散射效应	217
10.1 光纤中的受激拉曼散射	217
10.2 光纤中的受激布里渊散射	226
本章参考文献	234
习题	235
附录 A 关于非线性光学中的符号约定问题	237
A.1 单位制选择的不同	237
A.2 光场复振幅的正负频选择以及有无因子 $1/2$ 的表示	238
本章参考文献	240
附录 B 张量的基本概念	241
B.1 一个各向异性的例子与张量的引入	241
B.2 各阶张量及其在空间的正交变换	243
B.3 张量运算的简单介绍	244
附录 C 晶体的基本概念	246
C.1 晶体结构的周期性与对称性	246
C.2 七大晶系与 14 种布拉菲格子	247
C.3 晶向与晶面	249
C.4 晶体的对称操作	250
C.5 对晶体所有对称性集合的表示	253

附录 D 高斯光束简介 254

 D.1 平面波和球面波 254

 D.2 高斯光束以及高斯光束的基本性质 256

 D.3 高斯光束的传输——ABCD 律 258

附录 E 非线性晶体的选择 262

 E.1 非线性晶体选择通常考虑的因素 262

 E.2 常用非线性晶体举例 262

附录 F 变分法初步 266

 F.1 变分问题 266

 F.2 变分问题的里兹优化法 268

绪 论

0.1 研究非线性光学与非线性光纤光学的意义

光学分线性光学与非线性光学,其区分在于光在其中传输的介质对于光场是线性的响应还是非线性的响应,这个响应主要在于介质对于光场是线性极化还是非线性极化。一般来说,当光场的光强较弱时,介质表现出线性极化,对其采用传统的“线性光学”来研究;当光场光强大到一定程度时,特别是光场既强且为相干光时,研究介质对光场产生的响应需要用到本书论述的“非线性光学”。

人类在发现激光之前,能够采用的普通光源其相干性很差,在传输中由于衍射的作用一般也不能聚集起足够大的光强与传输介质产生非线性相互作用,因此当时并没有总结出像今天这样的相对完整的非线性光学理论框架。直到 1960 年梅曼发明了激光器^[1],对传统光学造成了巨大的冲击。激光作为时间相干性与空间相干性好、方向性也好的强光束,为发现和产生非线性光学现象提供了必要的光源,以激光作为光源后,各种非线性光学现象逐一被发现。不断涌现的非线性光学现象无法融入人们以前熟知的线性光学的框架之中,促使人们去不断探究介质中的各种非线性光学现象到底是一种什么样的新机制。经过 60 多年的研究、发展,一套与线性光学理论不同的非线性光学理论已经相对成熟起来,非线性光学已成为现代光学的一个重要分支。

目前互联网已经是人们生活不可分割的一部分,是当前经济发展的一个超强引擎,而光纤通信是构建这张互联网的重要手段之一。高锟在 1966 年预言光纤可以有很低的损耗^[2],因此可以作为光通信的重要传输载体,在之后的 1970 年,美国康宁公司的几位科学家拉制出如高锟所预言的那样的低损耗光纤。很快在 1980 年,世界第一个 45 Mbit/s 的商用光纤通信系统建立^[3]。在光纤通信的早期,作为光纤通信的工程人员,他们更关注的是光纤的损耗而不是光纤的非线性光学现象。人们对光纤中的非线性现象开始有兴趣是 20 世纪 70 年代的事,比开始研究晶体中的非线性光学现象整整晚了大约十年。这是因为光纤的非线性系数并不高,在低功率情况下,很难产生非线性光学现象。那时关注光纤中非线性现象的只是科学家,他们在研究块状介质里的非线性光学现象之余,想看一看将强激光耦合入光纤会发生什么?

直到 20 世纪 90 年代,随着人们对于光纤通信的容量需求大幅度提高,并且跨洋的海底光缆通信是编织国际互联网的关键,另外色散管理、波分复用、光孤子技术等不断涌现,光纤中的非线性光学现象已经不能被光纤通信工程师所忽略,因为此时的光纤通信商业系统容量与传输距离需要进一步提高,光纤非线性造成的损伤成为了重要的技术瓶颈。从那以后,无论是研究光纤通信技术的科学家、还是具体实施光纤通信系统的工程师,都需要懂得光纤中的非线性光学效应,掀起了学习非线性光纤光学的热潮。为上述热潮提供佐证的是阿戈沃教授在 1989 年出版了他的《非线性光纤光学》^[4],1995 年又出版了该书的第 2 版^[5]。随后随着人们发现光纤中的非线性光学现象越来越多,以及光纤通信业界对于了解光纤非线性现象的需求越来越旺盛,到 2019 年该书已经出到了第 6 版^[6]。

综上所述,研究非线性光学已经不仅是学术界所关注的事情,也是光纤通信、光纤传感与光纤激光器等工业界所需要关注的事情。

0.2 非线性光学与非线性光纤光学的发展简史^[7,8]

前面提到,正是由于 1960 年激光器的诞生,提供了合适的光源,为非线性光学现象的发现与研究打下了良好的基础,第二年就引发弗兰肯(Franken)发现了二次谐波现象^[9],这一工作可以当作人们对非线性光学研究的正式开始。从那以后,人们对于非线性光学研究经历了 1961—1965 年的初创时期、1963—1984 年逐渐成熟阶段以及 1985 年至今的进一步成熟与大面积应用的几个阶段(其中有重叠的年份)。下面将逐个阶段分别阐述。

0.2.1 非线性光学的史前史与初创时期(1961—1965 年)

前面提到弗兰肯发现二次谐波现象是非线性光学研究正式开始的标志,而大家一提到非线性光学发展史,必然要问在这个作为开始标志的事件以前,人们为这一领域研究的开始做了哪些准备工作? 这些研究工作可以看成是非线性光学的史前史。

图 0-2-1(a)给出了非线性光学的史前史的几大重要事件。1865 年麦克斯韦创立了以四个麦克斯韦方程组为代表的电磁理论,为研究非线性光学建立了牢固的经典电磁学数理框架。那以后人们对于光在晶体中的传输行为的研究,建立了电光效应的理论,其中以发现克尔效应^[10]和泡克尔斯效应^[11,12]为代表,本书将在第 1 章中讨论电光效应。现在我们知道电光效应实际上是一种二阶非线性光学效应,可以纳入二阶非线性光学的理论框架。而人们当时研究电光效应时,是在晶体光学的框架中加以讨论的。这一点需要加以说明。20 世纪 20 年代布里渊与拉曼相继发现了布里渊散射^[13]与拉曼散射^[14],这是不同于瑞利散射的特殊散射现象。虽然这两种散射现象仍然属于线性光学的范畴,但是为后来发现受激布里渊散射与受激拉曼散射打下了基础。1960 年梅曼发明激光器可以看成是在贝尔实验室的汤斯领导的小组发明的微波激射器(Maser)基础上向光频的延拓结果^[15],1958 年肖洛与汤斯提出光频的激射器的谐振腔不应该像微波激射器一样是封闭腔,而是由一对镜面组成的开腔^[16]。1960 年梅曼接受了肖洛与汤斯的开腔理论,利用红宝石棒两端镀膜形成法布里-珀罗型的开腔,以闪光灯与椭圆镜面作为光泵浦系统,实现了波长为 694.3 nm 的红光激射,这为研究非线性光学现象提供了性能优良的光源。

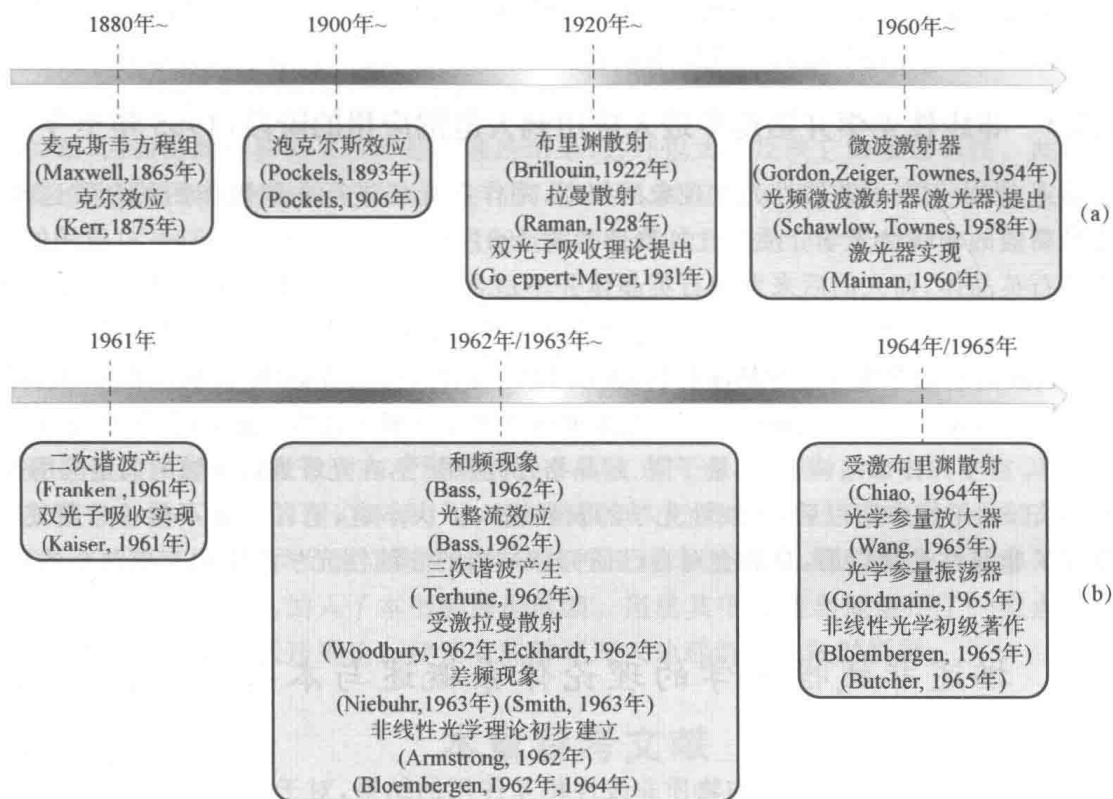


图 0-2-1 非线性光学的史前史与初创时期大事件

图 0-2-1(b) 给出了非线性光学初创时期的大事件, 这一时期以弗兰肯 (Franken) 1961 年发现二次谐波为起始^[9], 以布鲁姆伯格 (Bloembergen) 1965 年出版史上第一本《非线性光学 (Nonlinear Optics)》^[17] 以及同年布彻出版《非线性光学现象 (Nonlinear Optical Phenomena)》^[18] 作为结束, 期间人们逐一发现了双光子吸收^[19]、和频差频^[20,21]、光整流^[22]、三次谐波^[23]、受激拉曼散射^[24,25] 和受激布里渊散射^[26]、光学参量放大与光学参量振荡等非线性光学现象^[27,28], 另外阿姆斯特朗 (Armstrong)^[29]、布鲁姆伯格^[30,31] 等发表了几篇重要论文, 使非线性极化率等相关理论初步建立。

0.2.2 非线性光学发展逐渐成熟定型阶段(1963—1984 年)

在这一时期, 更多的非线性光学现象被发现。相对于前面发现的稳态非线性光学现象, 从 1964 年到 1972 年人们陆续发现一些介质对于短激光脉冲的瞬态相干光学现象, 比如光子回波^[32]、自感应透明^[33]、光学章动^[34] 和光学自由感应衰减效应^[35]。这些瞬态相干的非线性光学现象要用光学布洛赫方程来描述。1963 年到 1983 年围绕光学相位共轭现象的研究, 发现了简并与近简并四波混频效应可以产生恢复大畸变的相位共轭光波^[36,37,38]。1964 年到 1974 年在一些介质中发现了光学克尔效应以及由此产生的自聚焦现象^[39,40,41]。1974 年到 1979 年发现光学双稳态现象^[42,43,44]。1973 年在光纤中提出光孤子概念, 随后应用于光纤通信系统。在这一阶段, 不仅发现了上述的非线性光学现象, 非线性光学理论也逐步开始定型, 这以美籍华裔学者沈元壤发表著名专著《非线性光学原理 (The Principles of Nonlinear Optics)》为标志^[45]。1973 年贝尔实验室的长谷川 (Hasegawa) 与塔波特 (Tappert) 提出光纤中可以形成光孤子^[46,47], 用以克服单模光纤中的色度色散效应。1980 年同样在贝尔实验室工作的莫勒

纳(Mollenauer)实验验证了光孤子可以长距离地传输^[48],开启了人们对于光孤子通信系统的研究,此时非线性光学逐步进入工程应用领域。

0.2.3 非线性光学开始逐步进入应用到大范围应用的阶段(1985 年至今)

实际上,当人们发现非线性光学现象的初期,用作与光场进行非线性作用的介质选择,并不见得是高效的非线性光学介质。比如当弗兰肯 1961 年发现二次谐波效应时^[9],所用的非线性介质是石英晶体,而人们后来发现石英晶体并不适合进行二次谐波实验。因此在非线性光学发展的这一阶段,为了将非线性光学效应体现得更充分,以便应用到各个领域,人们发现和制备了一系列更高效的非线性光学晶体材料,比如 BBO 晶体^[49]、LBO 晶体^[50]等。其次,人们开发了非线性光学效应在更广泛领域的应用。比如非线性光学在量子光学中的应用(压缩态、量子纠缠态等)^[51],在半导体微结构材料(量子阱、超晶格)的应用^[52],在光纤通信领域的大量应用等。

20 世纪 80 年代中期以后,非线性光学的发展进入了快车道,笔者在此不再一一赘述。读者在学习了非线性光学以后,自然会对自己研究领域内的非线性光学的应用有更深刻的了解。

0.3 描述非线性光学的理论体系概述与本书的理论框架^[53]

非线性光学现象是强光光场与物质非线性相互作用的结果,对于非线性光学现象的描述包括对于光场的描述、对于介质极化的描述、介质对于光场响应的描述这三个要素,这样描述非线性光学大致有三种理论体系,它们分别适合于描述不同的非线性光学现象。

第一种是全经典的非线性电极化理论,其中对于光场的描述采用以麦克斯韦方程组为代表的经典电磁理论,介质中原子或分子在经典光场作用下的响应用基于洛伦兹电子论的非线性谐振子模型描述,并由非谐振子模型得到介质宏观的各阶非线性极化率 $\chi^{(n)}$,最后用非线性极化介质中的波动方程导出各个光波之间的耦合波方程,来分析各个光波之间幅度、相位、偏振的相互转化。这种理论可以成功地描述各种二阶、三阶的非线性混频效应,以及与介质感应非线性折射率变化有关的多种非线性光学效应。本书在描述非线性光学以及非线性光纤光学的内容时基本都是采用这种全经典的理论框架来分析的。

第二种是半经典的非线性电极化理论,其中光场还是用经典的电磁理论描述,只是介质中的原子或分子对光场的响应采用了量子力学的描述。鉴于此,介质的各阶非线性极化率 $\chi^{(n)}$ 也是基于量子力学的量子跃迁理论计算给出。此时介质中各个光场之间的相互转化仍然应用耦合波方程描述。

即使在第二种半经典理论引入了量子力学理论,但是由于光场本身是按照经典电磁理论处理的,无法引入“光子”的概念以及与光子统计相关的诸如“光子简并度”的其他概念,因此不能从本质上解释自发辐射与受激辐射、自发散射与受激散射、多光子吸收与多光子激发过程之间的区别。这样就需要第三种全量子的理论。

这第三种全量子理论就是基于光辐射与物质相互作用的量子电动力学理论,这个理论把光场看成是分布在相关的不同量子态内的一群光子的统计集合,同时把介质处理为处于不同量子态的原子或分子的集合,随后把两者作为一个统一的量子系统进行整体量子态处理。

由于本书的定位,假定本书的读者大多是非物理专业的光信息或者光通信领域的学生、科

研工作者以及工程师,所以采用了第一种全经典的理论,其体系逻辑是:介质的原子或分子在经典光场下作非谐振子振荡(此部分以洛伦兹电子论为基础),由此得到的各阶宏观非线性极化率 $\chi^{(n)}$ 。由于该理论只是显示了微观原子或分子极化与宏观非线性极化强度 $P^{(n)}$ 之间如何建立关系,因而由此计算的 $\chi^{(n)}$ 不是精确的结果,另外也无法反映它的张量属性。此时本书只是强调了非线性极化张量的宏观对称性与简化表示,对应的 $\chi^{(n)}$ 张量元素的具体取值可以参阅相关的晶体光学手册。最后利用描述介质中的光场的非线性、非齐次波动方程导出各阶非线性现象下各个光波之间的耦合波方程。

在这个框架下,本书对于二阶、三阶混频现象,非线性折射率变化引发的现象,以及光纤中的混频与非线性折射率变化现象都进行了顺畅的解释,理论的运用贯穿始终。至于本书第 6 章与第 10 章牵涉的受激拉曼散射与受激布里渊散射,根据上面的论述,本来应该采用全量子理论进行处理才能将自发散射与受激散射的本质区别开来,但是基于本书的定位,我们仍然希望把受激散射纳入本书的理论体系。本书参照雅里夫处理拉曼散射时应用经典的分子非线性极化的方法^[54, 55],给出了受激拉曼散射的非线性极化率表达式,最后给出了泵浦光与斯托克斯光之间的耦合波方程,纳入了本书的理论框架。当然其中也适当地运用了一点点量子跃迁的概念(注意不是量子跃迁理论),使读者能够更深入地理解受激散射机制。

本章参考文献

- [1] Maiman T H, Stimulated optical radiation in ruby [J]. Nature, 1960, 187: 493-494.
- [2] Kao C K, Hockham G A, Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies [J]. Pro. IEE, 1966, 113(7): 1151-1158.
- [3] Sanferrare R J, Terrestrial lightwave systems [J]. AT&T Tech. J., 1987, 66(1): 95-107.
- [4] Agrawal G P, Nonlinear fiber optics [M]. San Diego: Academic Press, 1989.
- [5] Agrawal G P, Nonlinear fiber optics (formerly Quantum Electronics) [M]. 2nd ed. San Diego: Academic Press, 1995.
- [6] Agrawal G P, Nonlinear fiber optics [M]. 6th ed. San Diego: Academic Press, 2019.
- [7] Power P E, Fundamentals of nonlinear optics [M]. Boca Raton: CRC Press, 2011.
- [8] 李淳飞,非线性光学[M].2 版.北京:电子工业出版社,2009.
- [9] Franken P, Hill A E, Peters C W, Weinreich G, Generation of optical harmonics [J]. Phys. Rev. Lett., 1961, 7(4): 118-119.
- [10] Kerr J, A new relation between electricity and light: dielectrified media birefringent [J]. Philosophical Mag. Series 4, 1875, 50, 337-348.
- [11] Pockels F, Abhandlungen der gesellschaft der wissenschaften zu Gottingen (Treatises of the society of sciences in Gottingen) [J]. 1893, 39: 1.
- [12] Pockels F, Lehrbuch der kristallographie (Textbook of crystal) [M]. Leipzig: Teubners, 1906.
- [13] Brillouin L, Diffusion de la Lumière et des rayons X par un corps transparent homogène; influence de l'agitation thermique (Diffusion of light and X-rays by a transparent homogeneous medium; influence of thermal agitation) [J]. Annales des Physique, 1922, 17: 88.

- [14] Raman V V, Krishnan K S. A new type of secondary radiation [J]. Nature, 1928, 121: 501-502.
- [15] Gordon J P, Zeiger H J, Townes C H. Molecular microwave oscillator and new hyperfine structure in microwave spectrum of NH_3 [J]. Phys. Rev., 1954, 95: 282-284.
- [16] Schawlow A L, Townes C H. Infrared and optical masers [J]. Phys. Rev., 1954, 112: 1940-1949.
- [17] Bloembergen N. Nonlinear optics: a lecture note and reprint volume [M]. New York: W. A. Benjamin, Inc., 1965.
- [18] Butcher P N. Nonlinear optical phenomena [M]. Columbus: Ohio State-University, 1965.
- [19] Kaiser W, Garret C G B. Two-photon excitation in $\text{CaF}_2: \text{Eu}^{2+}$ [J]. Phys. Rev. Lett., 1961, 7: 229-231.
- [20] Bass M, Franken P A, Hill A E, et al. Optical mixing [J]. Phys. Rev. Lett., 1962, 8: 18.
- [21] Niebuhr K E. Generation of laser axial mode difference frequencies in nonlinear dielectric [J]. Appl. Phys. Lett., 1963, 2: 136-137.
- [22] Bass M, Franken P A, Ward J F, et al. Optical rectification [J]. Phys. Rev. Lett., 1962, 9: 446-448.
- [23] Terhune R W, Maker P D, Savage C M. Optical harmonic generation in calcite [J]. Phys. Rev. Lett., 1962, 8: 404-406.
- [24] Woodbury E J, Ng W K. Ruby laser operation in near-IR [J]. Proc. Inst. Radio Eng., 1962, 50: 2367.
- [25] Eckhardt G, Hellwarth R W, McClung F J, et al. Stimulated Raman scattering from organic liquids [J]. Phys. Rev. Lett., 1962, 9: 455-457.
- [26] Chiao R Y, Townes C H, Stoicheff B P. Stimulated Brillouin scattering and coherent generation of intense hypersonic waves [J]. Phys. Rev. Lett., 1964, 12: 592-595.
- [27] Wang C C, Racette G W. Measurement of parametric gain accompanying optical difference frequency generation [J]. Appl. Phys. Lett., 1965, 6: 169-171.
- [28] Giodmaine J A, Miller. Tunable coherent parametric oscillation in LiNbO_3 at optical frequencies [J]. Phys. Rev. Lett., 1965, 14: 973-976.
- [29] Armstrong J A, Bloembergen N, Ducuing J, et al. Interactions between light waves and a nonlinear dielectric [J]. Phys. Rev., 1962, 127: 1918-1939.
- [30] Bloembergen N, Pershan P S. Light waves at the boundary of a nonlinear media [J]. Phys. Rev., 1962, 128: 606-622.
- [31] Bloembergen N, Shen Y R. Quantum-theoretical comparison of nonlinear susceptibilities in parametric media, lasers, and Raman lasers [J]. Phys. Rev., 1964, 133: A37-A49.
- [32] Kernit N A, Abella I D, Hartmann S R. Observation of a photon echo [J]. Phys. Rev. Lett., 1964, 13: 567-569.

- [33] McCall S L, Hahn E L. Self-induced transparency by pulsed coherent light [J]. Phys. Rev. Lett., 1967, 18: 908-912.
- [34] Hocker G B, Tang C L. Observation of the optical transient nutation effect [J]. Phys. Rev. Lett., 1968, 21: 591-595.
- [35] Richard G B, Shoemaker R L. Optical free induction decay [J]. Phys. Rev. A, 1972, 6: 2001-2007.
- [36] Yariv A, Pepper D M. Amplified reflection, phase conjugation, and oscillation in degenerate four-wave mixing [J]. Opt. Lett., 1977, 1: 16-18.
- [37] Abrams R L, Lind R C. Degenerate four-wave mixing in absorbing media [J]. Opt. Lett., 1978, 2: 94-96.
- [38] Fisher R A, et al. Optical phase conjugation [M]. New York: Academic Press, 1983.
- [39] Maker P D, Terhune R W, Savage C M. Intensity-dependent changes in the refractive index of liquids [J]. Phys. Rev. Lett., 1964, 12: 507-509.
- [40] Wong G K L, Shen Y R. Optical-field-induced ordering in the isotropic phase of a Nematic Liquid Crystal [J]. Phys. Rev. Lett., 1973, 30: 895-897.
- [41] Wong G K L, Shen Y R. Transient self-focusing in a Nematic Liquid Crystal in the isotropic phase [J]. Phys. Rev. Lett., 1974, 32: 527-530.
- [42] McCall S L. Instabilities in continuous-wave light propagation in absorbing media [J]. Phys. Rev. A, 1974, 9: 1515-1523.
- [43] McCall S L. Instability and regenerative pulsation phenomena in Fabry-Perot nonlinear optic media devices [J]. Appl. Phys. Lett., 1978, 32: 284-286.
- [44] Gibbs H M, McCall S L, Venkatesan T N C. Optical bistability [J]. Opt. News, 1979, 5: 6-12.
- [45] Shen Y R. The principles of nonlinear optics, [M]. New York: John Wiley & Sons, 1984.
- [46] Hasegawa A, Tappert F. Transmission of stationary nonlinear optical pulses in dispersive dielectric fibers. I. Anomalous dispersion [J]. Appl. Phys. Lett., 1973, 23: 142-144.
- [47] Hasegawa A, Tappert F. Transmission of stationary nonlinear optical pulses in dispersive dielectric fibers. II. Normal dispersion [J]. Appl. Phys. Lett., 1973, 23: 171-173.
- [48] Mollenauer L F, Stolen R H, Gordon J P. Experimental observation of picosecond pulse narrowing and solitons in optical fibers [J]. Phys. Rev. Lett., 1980, 45: 1095-1098.
- [49] Chen C T, Wu B C, Jiang A D, et al. A new-type ultraviolet SHG crystal— β -BaB₂O₄ [J]. Sci. Sin. Ser. B, 1985, 28: 235-243.
- [50] Chen C T, Wu Y C, Jiang A D, et al. New nonlinear-optical crystal: LiB₃O₅ [J]. J. Opt. Soc. Am. B, 1989, 6: 616-621.