

“十二五”重点图书

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

非线性光学(第二版)

Nonlinear Optics

石顺祥 陈国夫 编著
赵 卫 刘继芳



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

内 容 简 介

本书基于极化理论,采用半经典理论体系,详尽地讲解了非线性光学的理论基础,讨论了一些重要的非线性光学学科分支,其内容包括光与物质相互作用的稳态过程、动态过程和瞬态过程。全书共分10章;前3章为基础理论,在简述非线性光学经典理论的基础上,利用量子力学理论和光的电磁理论讨论了物质对光的响应特性和辐射特性;第4、5章讨论了各种稳态二阶与三阶非线性光学效应;第6章讨论了瞬态相干光学;后4章分别较系统地讨论了非线性光学领域中的4个分支内容:非线性光学相位共轭与光学双稳态技术,光折变非线性光学,超短光脉冲非线性光学,光纤非线性光学。

本书可作为光学、光学工程、物理电子学、物理等专业“非线性光学”课程的研究生教材,亦可作为其他相关专业师生及科技人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

非线性光学/石顺祥等编著. —2版.

—西安:西安电子科技大学出版社,2012.10

研究生教学用书

ISBN 978-7-5606-2779-3

I. ①非… II. ①石… III. ①非线性光学—研究生—教材 IV. ①O437

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 054505 号

责任编辑 阎 彬 李惠萍

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 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2012年10月第2版 2012年10月第5次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 张数 32.5

字 数 794千字

印 数 8001~10 000册

定 价 67.00元

ISBN 978-7-5606-2779-3/O·0130

XDUP 3071002-5

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。

第二版序

非线性光学是随着激光技术的出现而发展形成的一门新兴的学科分支，是近代科学前沿最为活跃的学科领域之一。非线性光学研究光和物质相互作用过程中出现的一系列新现象，探索光和物质相互作用的本质和规律，为一系列具有重要应用价值的科学技术提供新的物理基础。近数十年来非线性光学研究取得了极其丰硕的成果，极大地推动着科学技术的发展，而非线性光学本身在此过程中也在不断提高、发展与完善。“非线性光学”课程已经成为光学和光学工程研究生的必修课。另外，从事非线性光学研究的人数还在不断增加，了解和认识各种新的光学现象，也必须具有关于光的非线性的基础知识。

2003年3月，西安电子科技大学石顺祥教授、西安光学精密机械研究所陈国夫研究员及其研究集体，在长期从事非线性光学、超短光脉冲技术的研究工作和多年的研究生教学工作的基础上，编著出版了《非线性光学》一书，我曾有幸为该书作序。我很欣慰地看到，这本书在2004年已经被教育部列为全国研究生推荐教材，被广泛采用。

《非线性光学》一书出版已近十年，在这期间非线性光学学科又有长足的进展，取得了丰硕的成果，作者适时地根据非线性光学的发展，结合自己在非线性光学领域中的科研工作，认真总结了该书在教学使用中的情况，进行了修订和扩编，拟出版《非线性光学(第二版)》。新版的《非线性光学》保持了科学的严谨性，理论与实验结合，而且条理更清晰，逻辑性更强，更加适合作为研究生教学用书，对于从事近代光学研究的人员，也是一本很好的参考用书。

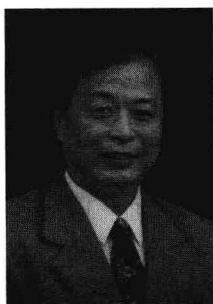
新版增加的非线性光学材料、光学双稳态、准相位匹配技术等内容很重要，应视为非线性光学发展必不可少的组成部分。作者的执着追求和严谨学风为这本书带来了崭新的面貌。这本书将会对我国研究生教育和相关科学的发展做出新的贡献。

中国科学院院士

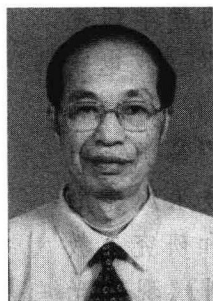
刘歆豪

2012年6月18日

作者简介



石顺祥，1965年毕业于西安军事电信工程学院，现任西安电子科技大学教授、博士生导师、学科带头人、校教学名师，享受政府特殊津贴。长期以来，为本科生和研究生主讲了20余门课程，获陕西省优秀教学成果一等奖、二等奖各1项。主要研究领域为非线性光学与技术、光电子技术及应用、超短脉冲技术。多项研究成果达到国际先进水平，获省部级科技进步三等奖5项，国家发明专利10项，已在国内外刊物上发表学术论文120余篇。已出版《非线性光学》《光的电磁理论——光波的传播与控制》《物理光学与应用光学》《光电子技术及其应用》《光纤技术及应用》等10部著作，获电子部优秀教材二等奖2项。



陈国夫，研究员，博士生导师。中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室原主任，是我国著名瞬态光学专家和超短脉冲激光技术研究领域的开创者之一，曾取得多项国际国内领先水平的研究成果，获国家和省部级科技奖二等奖以上10项，在国内外刊物上发表学术论文200余篇。曾任第七届陕西省政协常委、第八届全国人大代表，荣获“陕西省劳动模范”、“国家级有突出贡献专家”等多项荣誉称号。



赵卫，博士，研究员，博士生导师，任中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室主任。曾在英国卢瑟福实验室激光中心、英国巴斯大学物理学院及英国帝国理工学院物理系进行合作研究。主要从事超快光学、高能光纤激光、超高速光子网络等研究。在国内外刊物上发表学术论文 200 多篇，授权国内外发明专利 30 多项。曾获得中国科学院王宽诚西部学者突出贡献奖、国际高速成像和光子学研究领域的最高奖“高速成像金奖 (High - Speed - Imaging Gold Award)”、国家新世纪百千万工程国家级人选、陕西省有突出贡献专家等荣誉。同时兼任国家 863 专家、中国光学学会常务理事、国际高速成像与光子学专业委员会中国国家代表等。



刘继芳，教授，理学博士，陕西富平人。中国物理学会会员，中国光学学会会员。现在西安电子科技大学从事非线性光学及光学信息处理等领域的教学研究工作。讲授“普通物理”、“激光原理与技术”、“光电子技术”、“傅立叶光学”和“概率论与数理统计”等本科生课程以及“现代光学”和“激光技术实验”等硕士研究生课程。合作出版本科生教材《光电子技术》《光电子技术及其应用》《激光原理与技术》《光纤技术及应用》和研究生教材《非线性光学》《光的电磁理论——光波的传播与控制》《现代光学》等。

前 言

本书第一版于2003年3月在西安电子科技大学研究生院和中国科学院西安光学精密机械研究所的支持下,由西安电子科技大学出版社出版,并得到了国内同行的厚爱,已被许多高校选作研究生“非线性光学”课程的教材或参考书。2004年,本书被教育部列为全国研究生推荐教材。

本书第一版已出版近十年,先后印刷了四次,这期间有不少读者以各种方式对本书第一版的定位、体系和撰写给予了肯定,并与作者就本书的教学进行了交流。作者结合自己在非线性光学领域中的科研工作,认真地总结了本书第一版在教学中的使用情况,并根据非线性光学的发展状况,修订、编写了本书。

本书保留了第一版的基本结构,对内容作了以下修改和补充:对第1章至第6章有关非线性光学的基础理论部分,进行了某些顺序的调整,加强了概念叙述的严密性,并增加了非线性光学材料、准相位匹配技术等部分内容;第7章对非线性光学相位共轭技术等内容进行了调整,增加了光学双稳态的内容;第8章根据作者的科研工作,增加了一些光折变效应的应用内容;第9章、第10章根据超短脉冲技术和光纤应用技术的发展,结合作者的科研工作,增加了一些新的技术内容。

非常感谢关心和帮助本书出版的同行和读者。

期望本书的出版有助于推进国内研究生“非线性光学”课程的教学工作。

衷心期望并热忱欢迎专家、同行和读者多提宝贵意见。

作 者

2012年4月

第一版前言

非线性光学是激光问世后发展起来的一门新兴的学科分支，并已成为近代科学前沿最为活跃的学科领域之一。数十年来，我国的非线性光学研究得到了飞速的发展，取得了丰硕的成果。为适应我国非线性光学发展的形势，为培养该领域及相关专业研究生，我们在长期从事科学研究、研究生培养以及为研究生开设“非线性光学”课程和编写教材的基础上，编著了这本《非线性光学》教科书。

本书采用半经典理论体系讨论非线性光学现象，详尽地讲解了非线性光学的理论基础，讨论了一些当前重要的非线性光学的学科分支，其内容包括光与物质相互作用的稳态过程、动态过程和瞬态过程。全书共分为10章：前三章为基本概念与原理，在简述非线性光学经典理论之后，利用量子力学理论和光的电磁理论讨论了物质对光的响应特性和辐射特性；第四、五章讨论了各种稳态二阶与三阶非线性光学效应；第六章讨论了瞬态相干光学效应；后面四章分别较系统地讨论了非线性光学领域中的四个分支内容：非线性光学相位共轭技术，光折变非线性光学，超短光脉冲非线性光学，光纤非线性光学。在内容选取上，既注意非线性光学学科的理论系统性，又注意取材的先进性，特别注重物理概念及理论与实验的结合。在内容编写中，特别注意科学性、逻辑性及符合由浅入深的认识规律。为便于教学和读者自学，每一章都选编了部分习题，并给出了主要的参考文献。

本书由石顺祥主编，石顺祥编写第一至六章，刘继芳编写第七、八章，陈国夫编写第九章，赵卫编写第十章。

在本书的定稿过程中，西北大学张纪岳教授审阅了全部书稿并提出了许多宝贵意见，在此表示感谢。在本书的编写过程中，得到了西安电子科技大学研究生院、中科院西安光学精密机械研究所研究生部、瞬态光学技术国家重点实验室及西安电子科技大学激光教研室的支持和帮助，在此也一并表示感谢。

由于作者水平有限，不妥或错误之处在所难免，恳望读者批评指正。

此书的出版得到了西安电子科技大学研究生教材建设基金的资助。

作者

2002年10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，由于读者用手书写矢量时无法表示黑体，故采用字母上面带一条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，用手书写二阶张量时，可采用字母上面带两条箭线的白体斜体字母表示，如 $\vec{\vec{T}}$ 、 $\vec{\vec{\varepsilon}}$ ；三阶张量可采用字母上面带有三条箭线的白体斜体字母表示，如 $\vec{\vec{\vec{T}}}$ 、 $\vec{\vec{\vec{\varepsilon}}}$ ；
以此类推。用手书写张量时，也可采用字母上面带有两条箭线或双向箭线的白体斜体字母表示，如 $\vec{\vec{T}}$ 、 $\vec{\vec{\varepsilon}}$ 或 \overleftrightarrow{T} 、 $\overleftrightarrow{\varepsilon}$ 。

目 录

绪论	1
参考文献	4
第 1 章 非线性介质响应特性的经典描述	5
1.1 极化率的色散特性	5
1.2 非线性光学极化率的经典描述	11
1.3 极化率的一般性质	16
习题	20
参考文献	20
第 2 章 非线性介质响应特性的量子力学描述	21
2.1 密度算符及其运动方程	21
2.2 非线性极化率的微扰理论	27
2.3 近独立分子体系的极化率	35
2.4 分子间有弱相互作用介质的极化率张量	48
2.5 共振增强介质的极化率	52
2.6 带电粒子可自由移动介质的极化率	60
2.7 有效场极化率	66
2.8 准单色波的非线性极化	68
2.9 二能级原子系统的极化率	72
2.10 非线性光学材料	76
习题	80
参考文献	80
第 3 章 光波在非线性介质中传播的电磁理论	82
3.1 光波在各向异性晶体中的传播特性	82
3.2 介质损耗对光波传播的影响	94
3.3 非线性光学耦合波方程	96
3.4 非线性介质中的场能量	100
3.5 非线性光学相位匹配和准相位匹配	102
习题	121
参考文献	122
第 4 章 二阶非线性光学效应	124
4.1 线性电光效应	124
4.2 光整流效应和亚皮秒光整流效应	134
4.3 三波混频及和频、差频产生	136
4.4 二次谐波产生(SHG)	143

4.5 参量转换	155
4.6 参量放大与参量振荡	158
习题	170
参考文献	171
第 5 章 三阶非线性光学效应	172
5.1 光致非线性折射率效应	172
5.2 三次谐波产生	191
5.3 四波混频	195
5.4 双光子吸收	211
5.5 受激喇曼散射(SRS)	217
5.6 受激布里渊散射(SBS)	230
5.7 受激光散射现象的一般考虑	238
习题	239
参考文献	239
第 6 章 瞬态相干光学效应	242
6.1 瞬态相干光学作用概述	242
6.2 光与二能级原子系统相互作用的矢量描述	243
6.3 光学章动效应	257
6.4 光学自由感应衰减效应	261
6.5 光子回波效应	264
6.6 自感应透明效应	270
习题	282
参考文献	283
第 7 章 非线性光学相位共轭与光学双稳态	284
7.1 非线性光学相位共轭技术	284
7.2 三波混频、四波混频相位共轭技术	288
7.3 受激布里渊散射(SBS)光学相位共轭技术	301
7.4 光学相位共轭技术的应用	305
7.5 非线性光学双稳态概述	316
7.6 光学双稳态的基本原理	318
7.7 光学双稳态的基本形式	322
习题	335
参考文献	335
第 8 章 光折变非线性光学	337
8.1 光折变效应动力学基础	337
8.2 光折变晶体中的二波混频和简并四波混频	349
8.3 自泵浦与互泵浦相位共轭	370
8.4 光折变空间孤子	378
8.5 光折变材料	389

8.6 光折变的非线性光学应用	399
习题	405
参考文献	406
第9章 超短光脉冲非线性光学	407
9.1 超短光脉冲的传播方程	407
9.2 超短光脉冲的二次谐波产生(SHG)	413
9.3 超短光脉冲的参量作用与放大	419
9.4 非线性相位调制	430
9.5 飞秒脉冲的自聚焦	436
9.6 超短光脉冲的产生	439
9.7 飞秒激光器中的孤子	447
习题	452
参考文献	453
第10章 光纤非线性光学	455
10.1 光纤的线性特性	455
10.2 光纤传输的基本方程	458
10.3 光信号在色散光纤中的传输	462
10.4 光纤中的光克尔效应	465
10.5 光纤中的自相位调制和交叉相位调制	467
10.6 光纤中的四波混频(FWM)效应	475
10.7 光纤中的受激非弹性散射	480
10.8 光纤中的光孤子	486
10.9 超短超强光纤激光的产生及非线性效应	497
习题	511
参考文献	513
附录 各类晶体的极化率张量形式	515
附录 A 七类晶体和各向同性介质的线性极化率张量 $\chi^{(1)}(\omega)$ 形式	515
附录 B 七类晶体和各向同性介质的二阶极化率张量 $\chi^{(2)}(\omega_1, \omega_2)$ 形式	516
附录 C 32种晶类和各向同性介质的三阶极化率张量 $\chi^{(3)}(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$ 形式	519

绪 论

混沌初开，世界就是非线性的。光学现象与其它任何物理现象一样，从根本上来讲也是非线性的。

1. 非线性光学概述

众所周知，光在介质中的传播过程就是光与介质相互作用的过程，对于这个动态过程，可以按照介质对光的响应和辐射过程进行描述。如果采用极化理论，可以认为光在介质中传播时，将感应极化，所产生的极化强度作为激励源又将产生光辐射，这个光辐射就是在介质中传播的光波。如果介质对光的响应呈线性关系，所产生的光学现象就属于线性光学范畴，光在介质中的传播规律遵从独立传播原理和线性叠加原理；如果介质对光的响应呈非线性关系，所产生的光学现象就属于非线性光学范畴，光在介质中的传播会产生新的频率，不同频率的光波之间会产生耦合，独立传播原理和线性叠加原理不再成立。表 0-1 列出了线性光学和非线性光学之间的主要区别。

表 0-1 线性光学和非线性光学之间的主要区别

线性光学	非线性光学
一束光在介质中传播，可以通过干涉、衍射、折射来改变其传播方向和空间分布，但光的频率不变，与介质无能量交换	一束频率确定的光，可以通过介质的非线性作用转换成其他频率的光(倍频等)，或产生一系列光谱周期分布的不同频率和光强的光(受激散射等)
多束光在介质中传播，不改变各自的频率，不发生能量相互交换，各光束的相位信息不能相互传递	多束光在介质中传播，可能产生新的频率，发生能量的相互转移，光束间可以传递相位信息，两束光的相位可以互相共轭(三波、四波混频，光学相位共轭等)
光与介质相互作用，不改变介质的物理参量，介质物理参量是频率的函数，与光场强度变化无关	光与介质相互作用，介质的物理参量是光场强度的函数(非线性吸收和色散、光克尔效应、自聚焦等)
光束通过光学系统，其入射光强与透射光强之间一般呈线性关系	光束通过光学系统，入射光强与透射光强之间呈非线性关系(光限制、光学双稳、光开关等)

2. 非线性光学的发展

光在介质中传播时，介质对光的作用可以表现为热响应、电致伸缩响应、电子轨道畸变响应、光折变响应、光极化响应等不同的物理机制，不同的响应过程应采用不同的物理参量和方法描述，但就其非线性光学的作用过程而言，可以采用极化理论描述，即认为光

与介质的相互作用产生了非线性极化, 光电场 E 在介质中将感应产生非线性极化强度 P , 介质的响应特性可以利用极化率张量 χ 表征(注: 本书中将所有张量用黑正体表示, 以区别于矢量)。对于线性光学现象, 极化强度 P 与光电场 E 的关系为

$$P = \epsilon_0 \chi \cdot E$$

式中, 极化率张量 χ 是与光电场 E 无关的常量; 对于非线性光学现象, 极化强度 P 与光电场 E 的关系为

$$P = \epsilon_0 \chi(E) \cdot E$$

式中, 表征介质极化响应特性的极化率张量 $\chi(E)$ 与光电场 E 有关。

对于非线性光学过程, 如果入射光频率远离介质共振区或者入射光场比较弱, 则产生的极化强度与光电场的关系可以采用下面的级数形式表示:

$$\begin{aligned} P &= \epsilon_0 \chi^{(1)} \cdot E + \epsilon_0 \chi^{(2)} : EE + \epsilon_0 \chi^{(3)} \vdots EEE + \dots \\ &= P^{(1)} + P^{(2)} + P^{(3)} + \dots \end{aligned}$$

式中, $\chi^{(1)}$ 、 $\chi^{(2)}$ 、 $\chi^{(3)}$ 、 \dots 分别是介质的线性极化率、二阶极化率、三阶极化率、 \dots , 它们分别是二阶张量、三阶张量、四阶张量、 \dots ; $P^{(1)}$ 、 $P^{(2)}$ 、 $P^{(3)}$ 、 \dots 分别是线性极化强度、二阶极化强度、三阶极化强度、 \dots 。由非线性光学理论可以证明^[1], 上式中相邻两项之比为

$$\left| \frac{P^{(r+1)}}{P^{(r)}} \right| \sim \left| \frac{E}{E_{\text{原子}}} \right|$$

式中, $E_{\text{原子}}$ 是介质中的原子内场, 典型值为 3×10^{10} V/m。在激光出现之前, 一般光源所产生的光电场即使经过聚焦也远小于 $E_{\text{原子}}$, 因此, 很难观察到非线性光学现象。1960 年激光器诞生, 所产生的激光很容易达到这样强的光电场。1961 年, 美国密执安大学的夫朗肯(Franken)等人^[2]利用红宝石激光器首次进行了二次谐波产生的非线性光学实验; 之后, 布卢姆伯根(Bloembergen)等人^[3]在 1962 年对光学混频等非线性光学现象进行了开创性的理论研究工作。这些工作标志着非线性光学的诞生。从那时起, 非线性光学逐渐发展成为现代光学的一门重要学科分支。经过人们五十多年的研究, 非线性光学得到了飞速的发展, 并使古老的光学焕发了青春。

非线性光学的发展经历了几个阶段^{[4][5]}: 20 世纪 60 年代是非线性光学发展的早期阶段, 在这一阶段主要进行了二次谐波产生(倍频)、和频、差频、受激喇曼散射、受激布里渊散射、饱和吸收、双光子吸收、光参量振荡器、自聚焦、光子回波、自感应透明等非线性光学现象的观察和研究; 20 世纪 70 年代后, 非线性光学进入深入发展的阶段, 相继发现了许多重要的非线性光学效应, 进行了自旋反转受激喇曼散射、光学悬浮、消多普勒加宽、双光子吸收光谱技术、相干反斯托克斯喇曼光谱学、非线性光学相位共轭技术、光学双稳效应等非线性光学现象的研究; 20 世纪 80 年代, 备受人们关注的非线性光学新研究课题是光学分叉和混沌、光学压缩态、多光子原子电离现象、光纤孤子等, 并且对非线性光学材料的研究也取得了重大进展, 在以往大量使用 KDP、LiNbO₃ 等非线性光学晶体的基础上, 相继发现了 KTP、BBO、LBO 等新型非线性光学晶体, 并开展了有机非线性晶体材料的研究以及非线性光子晶体理论和器件的研究; 20 世纪 90 年代以来, 最引人注目的非线性光学进展是利用新型非线性晶体研制出宽波段可调谐连续或脉冲光参量振荡器、光参量放大器, 开展了飞秒非线性光学的研究, 推动了飞秒激光在多学科研究领域内的应用, 并且基于光学压缩态的成功产生, 开展了压缩态光学在高精度原子光谱、低噪声光通信、高

精度测量等方面的应用研究。目前,非线性光学已逐渐由基础研究阶段进入到应用基础研究和应用研究阶段。

非线性光学研究的发展趋势^[6]:研究对象从稳态转向动态;从连续、宽脉冲转向纳秒、皮秒和飞秒,甚至阿秒超短脉冲;从强光非线性研究转向弱光非线性研究;从基态—激发态跃迁非线性光学研究转向激发态—更高激发态跃迁非线性光学研究;从共振峰处现象研究转向非共振区现象研究;从二能级系统研究转向多能级系统研究;研究介质从宏观尺度到介观尺度、再到微观尺度。非线性光学材料研究的发展趋势是:从晶体材料到非晶体材料;从无机材料到有机材料;从对称材料到非对称材料(手性材料);从单一材料到复合材料;从高维材料到低维材料;从宏观材料到纳米材料。

3. 研究非线性光学的意义

研究非线性光学的意义在于以下几点。首先,可以开拓新的相干光波段,提供从远红外($8\ \mu\text{m}\sim 14\ \mu\text{m}$)到亚毫米波、从真空紫外到 X 射线的各种波段的相干光源。其次,可以解决诸如激光放大中的自聚焦、激光打靶中的受激散射损耗等影响激光发展的激光技术问题。第三,可以提供一些新技术,并向其它学科渗透,促进这些学科的发展。例如,伴随非线性光学的发展,出现了非线性激光光谱学,大大提高了光谱分辨率;通过非线性光学相位共轭效应的研究,产生了非线性光学相位共轭技术,促进了自适应光学的发展;在光纤和光波导非线性光学中,研究了光纤光孤子的产生和传输,推动了光孤子通信的发展;在超高速光纤通信的全光信息处理技术中,尽管器件的功能庞杂,种类繁多,但基本思想均基于各种非线性光学效应;对于表面、界面与多量子阱非线性过程的研究,已成为探测表面物理和化学的工具。第四,由于非线性光学现象是光与物质相互作用的体现,因而可以利用非线性光学研究物质结构,并且对于许多非线性光学现象的研究已经成为获取原子、分子微观性质信息的一种手段。

现在,人们对于非线性光学研究,正逐渐从认识光和物质相互作用过程的现象、本质和规律性转向利用非线性光学原理产生极端物质条件所需的非线性光学过程,这些过程的实现孕育着科学技术上的重大突破,对未来科学技术的发展将产生深远的影响。

4. 非线性光学理论

从光与物质相互作用的基本观点出发,非线性光学有三种理论研究体系: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,认为光场是经典电磁波场,用麦克斯韦理论描述;介质由经典振子组成,用经典力学描述。在半经典理论体系中,认为光场是经典电磁波场,用麦克斯韦理论描述;介质是由具有量子性的粒子组成的,用量子力学描述。在全量子理论体系中,认为光场是量子的场,用量子光学描述;介质是由具有量子性的粒子组成的,用量子力学描述。在现阶段,利用经典理论、半经典理论已经能够处理实际应用中的大部分非线性光学问题。

为了推动非线性光学在我国的发展,作者在长期为研究生讲授“非线性光学”课程、编著《非线性光学》(过巴吉主编)教材和进行非线性光学技术研究的基础上,2003年编著出版了《非线性光学》一书,此书在2004年被教育部遴选列为全国研究生推荐教材。经过近十年的使用,作者根据教学需求和非线性光学的发展,修订出版了这本《非线性光学(第二版)》。

根据研究生教学大纲的要求,《非线性光学(第二版)》仍定位于半经典理论体系,利用极化理论研究非线性光学问题。全书共有10章,前6章为非线性光学的理论基础,后4章讨论了当前非线性光学研究领域的几个重要分支内容。为了便于理解用量子力学处理非线性光学响应特性的理论,第1章简单介绍了非线性光学响应特性的经典描述,给出了相应的非线性光学极化率的表示式和性质。第2章至第6章重点讲授了光与介质相互作用的半经典理论,利用量子力学微扰理论、二能级原子系统与光场相互作用的稳态理论和瞬态相干光学的矢量描述理论,求解了密度算符运动方程,讨论了介质对光场作用的响应特性,并进一步利用光的电磁理论描述了非线性介质中光波的传播特性,介绍了光在非线性介质中的稳态二阶、三阶非线性光学效应和瞬态相干光学效应,论述了非线性光学相位匹配和准相位匹配技术,简单介绍了常用的非线性光学材料。第7章至第10章讨论了非线性光学相位共轭技术和光学双稳态、光折变非线性光学、超短光脉冲非线性光学和光纤非线性光学,这些章节可以看做是非线性光学理论的具体应用,也可以说是人们在非线性光学领域内所进行的研究工作的总结。

在这里,作者特别推荐几本非线性光学领域的经典著作,即非线性光学创始人、诺贝尔物理学奖获得者 N. Bloembergen 在 1965 年出版的《Nonlinear Optical》^[3], P. N. Butcher 教授在 1965 年出版的《Nonlinear Optical Phenomena》^[7], 非线性光学权威专家 Y. R. Shen (沈元壤)在 1984 年出版的《The Principles of Nonlinear Optics》^[1]。

参 考 文 献

- [1] Shen Y R. The Principles of Nonlinear Optics. John Wiley & Sons, Inc., 1984
- [2] Franken P A, et al. Phys. Rev. Lett., 1961, 7:118
- [3] Bloembergen N. Nonlinear Optics. New York: Benjamin, 1965
- [4] 石顺祥, 陈国夫, 赵卫, 等. 非线性光学. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003
- [5] 钱士雄, 王恭明. 非线性光学. 上海: 复旦大学出版社, 2001
- [6] 李淳飞. 非线性光学. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005
- [7] Butcher P N. Nonlinear Optical Phenomena. Columbus: Ohio State Uni. Press, 1965

第 1 章 非线性介质响应特性的经典描述

基于极化理论,本章简单地介绍非线性介质响应特性的经典描述,从经典电偶极振子模型出发,导出非线性光学极化率的表示式,并讨论极化率张量的若干基本性质。

1.1 极化率的色散特性

1.1.1 介质中的麦克斯韦方程

由光的电磁理论已知,光波是光频电磁波,它在介质中的传播规律遵从麦克斯韦方程:

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.1-1)$$

及物质方程:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{D} &= \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \\ \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M} \\ \mathbf{J} &= \sigma \mathbf{E} \end{aligned} \right\} \quad (1.1-2)$$

上面两式中的 \mathbf{J} 和 ρ 分别为介质中的自由电流密度和自由电荷密度, ϵ_0 为真空介电常数, μ_0 为真空磁导率, σ 为介质的电导率, \mathbf{P} 为介质的极化强度, \mathbf{M} 为介质的磁化强度。由于我们研究的光与物质的相互作用主要是电作用,因此可以假定介质是非磁性的,而且无自由电荷,即 $\mathbf{M}=0$, $\mathbf{J}=0$, $\rho=0$ 。所以,上述方程可简化为

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1.1-3)$$

$$\left. \begin{aligned} D &= \epsilon_0 E + P = \epsilon \cdot E \\ B &= \mu_0 H \end{aligned} \right\} \quad (1.1-4)$$

式中, ϵ 是介质的介电常数张量。在本书中, 我们均采用国际单位制。

光在介质中传播时, 由于光电场的作用, 将产生极化强度。一般情况下, 极化强度应包含线性极化强度和非线性极化强度, 即

$$P = P_L + P_{NL} \quad (1.1-5)$$

当光电场强度很弱时, 可以忽略 P_{NL} , 仅保留 P_L , 这就是通常的线性光学问题。当光电场强度较强时, 必须考虑 P_{NL} , 并可以将其表示成级数形式:

$$P_{NL} = P^{(2)} + P^{(3)} + \dots + P^{(r)} + \dots \quad (1.1-6)$$

其中, $P^{(r)}$ 是与光电场 E 的 r 次方有关的非线性极化强度分量, 称为 r 阶非线性极化强度。在这里, 只考虑电偶极矩近似, 完全忽略电四极矩及多极矩的影响。当光电场强度很强时, 上述非线性极化强度的级数表示形式不再成立。特别是, 当光电场强度非常强时, 光作用于介质将会产生许多新的光学现象, 例如激光产生和加热等离子体, 激光感生粒子发射, 激光产生气体击穿等, 此时的光学现象可归于强光光学的研究范畴。

在本书中, 除了特别指明外, 光电场和极化强度均采用通常的复数表示法。对于实光电场 $E(r, t)$, 其表示式为

$$E(r, t) = E_0(r) \cos(\omega t + \varphi) \quad (1.1-7)$$

或

$$E(r, t) = E(\omega)e^{-i\omega t} + E^*(\omega)e^{i\omega t} \quad (1.1-8)$$

式中的 $E(\omega)$ 为频域复振幅, 且有

$$E(\omega) = \frac{1}{2} E_0(r) e^{-i\varphi(r)} \quad (1.1-9)$$

$E_0(r)$ 是光电场中的实振幅大小。对于极化强度, 其表示式为

$$P(r, t) = P(\omega)e^{-i\omega t} + P^*(\omega)e^{i\omega t} \quad (1.1-10)$$

式中的 $P(\omega)$ 为频域复振幅。

考虑到光电场强度 $E(r, t)$ 和极化强度 $P(r, t)$ 的真实性, 应有

$$E^*(\omega) = E(-\omega) \quad (1.1-11)$$

$$P^*(\omega) = P(-\omega) \quad (1.1-12)$$

1.1.2 极化率的色散特性

1. 介质极化的响应函数

1) 线性响应函数

众所周知, 因果性原理是物理学中的普遍规律。当光在介质中传播时, t 时刻介质所感应的线性极化强度 $P(t)$ 不仅与 t 时刻的光电场 $E(t)$ 有关, 还与 t 时刻前所有的光电场有关, 也就是说, t 时刻的感应极化强度与产生极化的光电场的历史有关。

现假定在时刻 t 以前任一时刻 τ 的光电场为 $E(\tau)$, 它对在时间间隔 $t - \tau$ 后的极化强度的贡献为 $dP(t)$, 且有

$$dP(t) = \epsilon_0 \mathbf{R}(t - \tau) \cdot E(\tau) d\tau \quad (1.1-13)$$