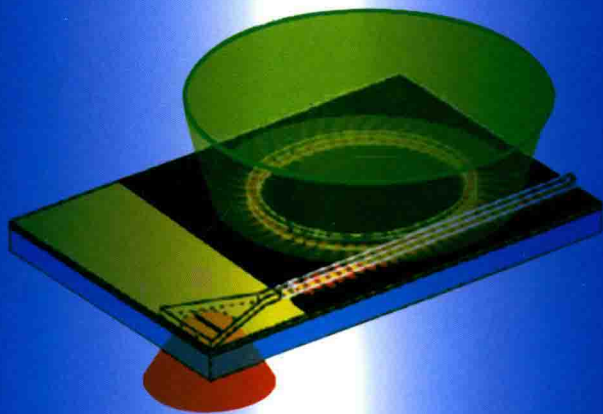


光科学与应用系列

总主编 王之江

非线性光学 原理和应用

李淳飞 著



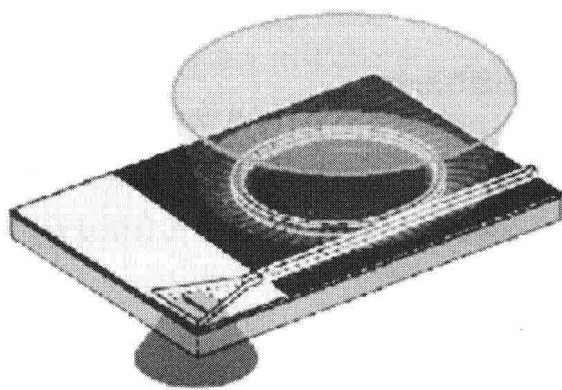
上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

光科学与应用系列

总主编 王之江

非线性光学 ——原理和应用

李淳飞 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书用简明的经典极化理论和光子的物理图像,系统讲解非线性光学的基本原理。扼要阐述二阶非线性光学效应,重点讨论三阶非线性光学效应,并介绍了非线性光学近期研究和应用的新进展,包括激发态非线性光学、光学双稳性、光学混沌、光学孤子、全光开关、非线性光限幅、Z 扫描技术等,这些内容也反映了作者研究工作的主要成果。

本书可以作为物理类、电子类和仪器类的光学专业研究生的必修课教材和非光学专业研究生的选修课教材,也可作为从事激光、光电子技术、光通信技术、光计算技术和光学材料技术工作的科技人员的自学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

非线性光学:原理和应用 / 李淳飞著. —上海:
上海交通大学出版社, 2015
ISBN 978-7-313-12406-7

I. ①非… II. ①李… III. ①非线性光学—研究
IV. ①0437

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 288694 号

非线性光学

——原理和应用

著 者: 李淳飞

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 韩建民

印 制: 上海天地海设计印刷有限公司

开 本: 787 mm×960 mm 1/16

字 数: 439 千字

版 次: 2015 年 2 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-12406-7/O

定 价: 98.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 23, 25

印 次: 2015 年 2 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 021-64835344

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(复旦大学信息科学与工程学院教授)

陈险峰(上海交通大学物理系常务副系主任、光科学与工程研究中心主任、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(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室主任、教授)

饶瑞中(中国科学院安徽光学精密机械研究所副所长、研究员)

王清月(天津大学超快激光研究室教授)

徐剑秋(上海交通大学物理系教授)

翟宏琛(南开大学现代光学研究所教授)

Ting-Chung Poon(美国 维珍尼亚理工州立大学电子与计算机工程系教授
Department of Electrical and Computer Engineering, Virginia Polytechnic
Institute and State University)

作者简介

李淳飞, 1961年毕业于哈尔滨工业大学物理专业。1962—1965年在吉林大学物理系理论物理专业进修。1985年被聘为哈尔滨工业大学教授, 1986年被评为博士生导师, 担任哈工大“光学重点学科”带头人。1987—1989年被聘为首届国家高技术(863)计划信息领域专家。1984—2006年被选为中国光学学会理事, 担任教育部物理教学指导委员会委员。1985—1998年被任命为哈工大物理系系主任。1989—2008年担任哈尔滨工业大学“现代光学技术研究所”所长, 教育部“非线性光学信息处理重点专业实验室”主任。1992年, 被评为国家对高等教育有特殊贡献的专家, 获得政府特殊津贴。长期担任“光学学报”、“光子学报”以及国际杂志“非线性光学物理与材料”的编委。自2004年至今兼任华南师范大学特聘教授。



李淳飞教授主要研究方向是光学物理, 主攻非线性光学与光子器件物理。他在国内首先开辟全光开关、光学双稳性、光学混沌、激发态非线性光学、手性非线性光学、纳米光子学等研究领域。在国内外光学、物理学和化学的著名刊物上发表论文300余篇, 其中SCI检录论文约100篇。曾先后获得4项科学技术奖: “光学双稳态及其不稳定性”(1979年国家教委科技进步奖)、“激光防护用C60材料与器件”(1965年航天部科技进步奖)、“激发态非线性光学及其应用”(2000年中国高校自然科学奖)、“非线性光学新效应与光开关器件物理”(2007年高校自然科学奖)。完成或参编3本著作: 《全光开关原理》(科学出版社)、《非线性光学》(电子工业出版社)以及《光子学技术与应用》(副主编, 广东科技出版社)。培养了博士35名, 硕士45名。

李淳飞教授多次参加或主持国际学术会议, 1988年在法国举行的国际光学双稳性会议上作“中国的光学双稳性研究”的邀请报告; 1990年被选为首届在美国举行的“非线性光学会议”的国际主席之一; 1994年作为程序委员会委员参加在英国举行的“国际光计算会议”; 1991年、1993年、1995年曾分别在广州、南京、哈尔滨举行的国际“非线性光学会议”上担任主席; 2005年在“美国光学学会年会”上作学术报告; 2007年在韩国举行的亚太地区CLEO会议上作邀请报告。多次应邀出国讲学和合作研究。1982—1996年曾3次赴美国亚利桑那大学“光学科学中心”参加合作研究; 1997—2000年在美国4所著名高校参加合作研究; 1992年受邀在意大利举行的国际“非线性光学物理”讲习班讲学; 1994年应日本JSPS计划邀请去东京大学等高校讲学。此外, 他还去过德国、俄国、加拿大、澳大利亚、泰国、新加坡等国出席会议、讲学或合作研究。

总 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,上海交通大学出版社在这个时候策划出版一套“光科学与应用”系列丛书,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。同时能为祖国吸引更多的愿投身于光学事业的仁人志士。

王之江

前 言

非线性光学是现代光学与光子技术的重要基础之一,它与激光物理学相比,研究内容有所不同,但具有同等重要的学术地位。激光物理学主要研究激光器的原理和激光的特性,其内容包括受激辐射理论、光学谐振腔理论、激光传输理论、激光的相干性、激光的空间模式、光谱特性、功率特性等。非线性光学则研究激光与物质相互作用的规律,其内容包括两方面:一方面研究激光如何改变介质的极化率、折射率、吸收系数、介电系数等宏观参量,或介质的微观分子结构,从而实现激光对物质的物理、化学和生物的宏观性质或物质的微观结构、状态和形体的控制;另一方面研究介质参量的变化反过来对在介质中传输的激光的各种参量的影响,这些参量包括激光的频率、功率、波矢、相位、偏振、脉宽、频谱、群速度、传播方向等,从而利用这些规律对激光本身进行控制,实现“以光控光”。简单地说,激光物理学研究激光的产生方法;而非线性光学则研究激光的控制方法,这两门姐妹学科都是激光应用的基础。因此,激光物理学已经是光学专业本科生的必修课程;非线性光学则应该是光学专业研究生的必修课程。

非线性光学在激光发明以后不久(20世纪60年代)就建立起来,已有半个世纪的发展历史,它的研究领域不断向深度和广度发展,目前非线性光学已经获得了广泛的应用。例如,非线性光学已广泛用于激光技术,用以改变激光的频率、压缩激光的脉宽、实现激光功率和频率可调等;非线性光学已广泛用于研制各种光电子器件,如激光器、光放大器、光调制器、光存储器、光显示器、光开关器件、光触发器等;非线性光学为发展光纤通信、相干光通信、空间光通信,特别是非线性光通信(光孤子通信、光混沌通信、光量子通信等)做出了重要贡献;非线性光学已用于研究光逻辑、光互连、光路由、光交换、波长转换、波分复用、时分复用等技术,将促进数字光信息处理、全光计算机和全光网络技术的发展;此外,非线性光学还用于研

制非线性光纤传感器,推动新型光传感技术的发展;利用相位共轭原理,补偿传光介质的波面畸变,用于自适应光学技术;研制非线性光限制技术,用于保护人眼免受激光损伤,用于对抗激光致盲武器等;利用非线性光学原理,形成高空间分辨率和高时间分辨率的非线性光谱分析技术,用于分析物质的成分,原子、分子的超精细能级结构;利用多光子吸收和离化效应,实现纳米尺寸材料和器件的高精度激光加工。而且非线性光学是研究表面、界面、低维材料、纳米材料、手性材料等新型材料的有力手段,是测量材料的非线性光学参数的必要工具。因此,对于工作在光电电子技术、光子技术和新兴信息技术领域的科技人员,掌握非线性光学的基本知识是非常必要的。

反映非线性光学研究成果的著作在国内、外已有多种版本,这些书为非线性光学的研究与相关的教学工作做出了重要的贡献。但是目前看来,由于历史原因,现有的多数非线性光学书都不同程度存在内容陈旧、理论太深、数学公式繁多、实际应用较少、单位和符号混乱、可读性差等问题,不太适合直接用作教材。

本书试图用“光波”和“光子”两种物理图像,深入浅出、系统地阐述非线性光学的基本原理。一方面,采用“振幅慢变近似”的、频域的一阶非线性波方程以及描述光波与电偶极子共振相互作用的经典极化模型;另一方面,采用光子激发原子、分子系统进行能级跃迁的速率方程以及光子的能量守恒和动量守恒原理,解释各种非线性光学效应。全书采用普遍应用的实用制单位,实现了物理符号和单位的统一。本书对非线性光学的基本理论给出了较为严格的数学推导,同时注重实验验证和实际应用的论述,力图反映非线性光学研究的最新进展。为了使本书更为精炼,作者在处理二阶非线性光学效应时,将各向异性介质的问题,用近似方法转化为各向同性介质的问题,避免了繁琐的晶体光学和张量运算,将全部二阶非线性光学效应浓缩于一章中介绍,以便有较多的篇幅重点讲述三阶非线性光学效应及其应用。这样,任课教师可以在 60 学时以内的时间内完成课程的讲授,而且使得掌握一定光学和数学基础知识的读者有可能进行自学。

本书作者 30 多年来一直从事“非线性光学”理论与应用的研究,在该学科领域发表过 300 多篇学术论文(其中被 SCI 检索的论文约 100 篇);出版相关著作 3 本;获得相关研究领域的部级科技奖 4 项。作者曾被聘为 1990 年在美国举行的首届

“国际非线性光学会议”的国际主席之一。曾亲自发起和主持 1991 年(广州)、1993 年(南京)和 1995 年(哈尔滨)的三次国际非线性光学研讨会。还担任过国际杂志“非线性光学物理与材料杂志”(J. Non. Opt. Phys. & Mater.)的编委。

本书内容包含了作者多年来从事非线性光学研究的成果,例如第 8 章的光学双稳性与光学不稳定性、第 7 章的激发态非线性光学与光限幅技术、第 10 章的全光开关研究、第 5 章的空间自相位调制、第 9 章的空间光孤子以及与多章有关非线性光学材料的参数测量技术(如 Z 扫描)等。

多年来作者一直从事“非线性光学”研究生课程的教学,在编写教材的基础上撰写过《非线性光学》一书,该书 2005 年由哈尔滨工业大学出版社出第一版,2009 年由电子工业出版社出第二版。自 2013 年初至 2014 年末的两年时间中,作者对原书进行了精心修改、订正,并扩充了实验和应用方面的内容,在此基础上写成了这本书。

作者希望本书能够成为一本值得推广的光学专业研究生的教材,同时也能作为工作在光电子技术、光信息技术、非线性光学材料领域的广大科技人员的一本自学参考书。

作者诚挚地感谢为这本书的完成做出过贡献的各位专家以及本人的原博士和硕士研究生们,也衷心希望讲授“非线性光学”课程的老师能够对本书提出宝贵的修改意见。



2014 年 11 月 14 日于广州

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 非线性光学的重要性	1
1.1.1 非线性光学在现代物理学中的地位	1
1.1.2 非线性光学在现代光学中的地位	1
1.1.3 非线性光学是光子学技术的基础	2
1.2 非线性光学的物理含义	4
1.2.1 非线性光学是与介质的高阶极化有关的现象	4
1.2.2 非线性光学是介质对光场非线性响应的现象	5
1.2.3 非线性光学是介质的光学参量与光场有关的现象	6
1.3 非线性光学的研究内容	7
1.3.1 典型的非线性光学效应	7
1.3.2 两类非线性光学效应	12
1.3.3 非线性光学材料	12
1.4 非线性光学的发展	13
1.4.1 非线性光学的发展简史	13
1.4.2 非线性光学的发展趋势	15
1.5 非线性光学的应用	16
1.5.1 非线性光学在激光技术中的应用	16
1.5.2 非线性光学在信息技术中的应用	17
1.5.3 非线性光学在材料技术中的应用	17
第 2 章 非线性介质的极化理论	22
2.1 非线性介质的波动方程	22
2.1.1 非线性介质的麦克斯韦方程	22
2.1.2 各向异性非线性介质的时域波方程	24

2.1.3	各向同性非线性介质的时域波方程	24
2.1.4	各向异性非线性介质的频域波方程	25
2.1.5	各向同性非线性介质的频域波方程	26
2.2	非线性介质的极化强度与极化率	28
2.2.1	极化强度与极化率的频域表达式	28
2.2.2	极化强度的简并因子	31
2.2.3	极化率张量的对称性	33
2.3	非线性极化率的实部与虚部	36
2.3.1	极化率的实部与虚部间的关系(K-K关系)	36
2.3.2	极化率实部和虚部的物理意义	37
2.3.3	非线性折射率与非线性吸收系数间的关系	40
附录 A	K-K关系的推导	40
附录 B	两种单位制	42
第 3 章	光学三波耦合过程	45
3.1	三波耦合方程	45
3.1.1	二阶非线性光学效应综述	45
3.1.2	各向异性介质二阶非线性光学效应的近似描述	46
3.2	光学二次谐波	50
3.2.1	基波小信号近似	51
3.2.2	基波高消耗情况	53
3.2.3	相位匹配技术	55
3.2.4	产生二次谐波的实验装置	60
3.3	光学和频、差频和参量放大	61
3.3.1	光学和频与频率上转换	61
3.3.2	光学差频与频率下转换	65
3.3.3	光学参量放大	68
3.3.4	4 种三波混频过程比较与实验装置	69
3.4	光学参量振荡器	71
3.4.1	光学参量振荡的阈值方程	71
3.4.2	双共振光学参量振荡器	73
3.4.3	单共振光学参量振荡器	75

第 4 章 光学四波耦合过程	78
4.1 三阶非线性光学效应综述	78
4.2 光学三次谐波与光学四波混频	79
4.2.1 光学三次谐波	79
4.2.2 光学四波混频	81
4.2.3 简并光学四波混频	83
4.3 光学相位共轭	84
4.3.1 光学相位共轭的定义与特性	84
4.3.2 四波混频过程的光学相位共轭	86
4.3.3 光学相位共轭的应用	91
第 5 章 光克尔效应与自聚焦	95
5.1 光克尔效应	95
5.1.1 自相位调制光克尔效应	96
5.1.2 交叉相位调制光克尔效应	99
5.1.3 光克尔效应的光致双折射作用	101
5.2 光束的自聚焦	104
5.2.1 稳态自聚焦	104
5.2.2 动态自聚焦	111
5.2.3 基于自聚焦的自相位调制	116
5.3 非线性参量的 Z 扫描测量法	119
5.3.1 Z 扫描测量的实验方法	119
5.3.2 Z 扫描测量的理论计算	121
5.3.3 其他 Z 扫描技术	126
第 6 章 受激辐射光散射	131
6.1 光散射概述	131
6.1.1 光散射的分类	131
6.1.2 受激辐射光散射的特性	133
6.2 受激拉曼散射	134
6.2.1 受激拉曼散射的物理图像	134
6.2.2 受激拉曼散射的经典理论	137

6.2.3	受激拉曼散射的实验	143
6.3	受激布里渊散射	144
6.3.1	受激布里渊散射的物理图像	144
6.3.2	受激布里渊散射的经典理论	146
6.3.3	受激布里渊散射的实验	150
第 7 章	非线性光吸收与光折射	155
7.1	单光子吸收与双光子吸收	155
7.1.1	单光子吸收与双光子吸收概述	155
7.1.2	单光子非线性光吸收	157
7.1.3	双光子非线性光吸收	159
7.1.4	半导体的双光子吸收与折射率变化	162
7.2	饱和吸收和反饱和吸收	167
7.2.1	饱和吸收的能级模型	167
7.2.2	饱和吸收与三阶非线性吸收的关系	172
7.2.3	反饱和吸收能级模型	173
7.2.4	反饱和吸收在光限制器中的应用	179
7.3	饱和折射与反饱和折射	180
7.3.1	饱和折射与反饱和折射的描述	180
7.3.2	非线性折射系数正负的物理意义	183
第 8 章	光学双稳性及其不稳定性	187
8.1	光学双稳性概述	187
8.1.1	光学双稳性的基本概念	187
8.1.2	光学双稳器件的分类	189
8.2	光学双稳器件	191
8.2.1	全光型光学双稳器件原理	191
8.2.2	电光混合型光学双稳器件原理	201
8.2.3	光学双稳器件的应用	207
8.3	光学双稳性的不稳定性	210
8.3.1	光学双稳性的稳定性判据	210
8.3.2	光学双稳性的不稳定性	214

第 9 章 光脉冲在光纤中的传播与光孤子	223
9.1 非线性薛定谔方程	223
9.1.1 亥姆赫兹方程的建立	223
9.1.2 推导光纤中的频域波方程	226
9.1.3 推导非线性薛定谔方程	228
附录 光纤的色散	229
9.2 群速色散与自相位调制	231
9.2.1 不计色散和非线性的脉冲传输	232
9.2.2 色散对脉冲传输的影响	232
9.2.3 自相位调制对脉冲传输的影响	236
9.2.4 色散和自相位调制的共同作用	238
9.3 时间光孤子与空间光孤子	241
9.3.1 时间光孤子	241
9.3.2 空间光孤子	244
第 10 章 基于非线性光学的全光开关	248
10.1 全光开关综述	248
10.1.1 全光开关的研究方向	248
10.1.2 全光开关的分类	252
10.2 非线性耦合器全光开关	257
10.2.1 低功率入射的对称光耦合器	258
10.2.2 自相位调制对称耦合器全光开关	261
10.2.3 交叉相位调制对称耦合器全光开关	263
10.3 非线性 Sagnac 干涉仪全光开关	267
10.3.1 低功率下含 3 dB 耦合器的 Sagnac 干涉仪	267
10.3.2 自泵浦含非 3 dB 耦合器的 Sagnac 干涉仪全光开关	271
10.3.3 交叉泵浦含 3 dB 耦合器的 Sagnac 干涉仪全光开关	273
10.3.4 自泵浦含光放大器的 Sagnac 干涉仪全光开关	275
10.4 非线性 M-Z 干涉仪全光开关	276
10.4.1 两臂材料不同的 M-Z 干涉仪全光开关	277
10.4.2 两臂长度不同的 M-Z 干涉仪全光开关	279
10.5 非线性环共振腔全光开关	280

- 10.5.1 单臂耦合环共振腔的 M-Z 干涉仪全光开关 281
 - 10.5.2 具有双耦合器的环共振腔全光开关 286
- 10.6 非线性光纤光栅全光开关 289
 - 10.6.1 布拉格光纤光栅(FBG)全光开关 291
 - 10.6.2 长周期光纤光栅(LPFG)全光开关 298
 - 10.6.3 石英光纤连接的 LPFG 对全光开关..... 302
 - 10.6.4 非线性光纤连接的 LPFG 对全光开关..... 308
 - 10.6.5 非线性光纤连接的 FBG 对光双稳开关 311
- 10.7 非线性纳米全光开关 320
 - 10.7.1 非线性纳米波导全光开关 322
 - 10.7.2 非线性光子晶体全光开关 334
 - 10.7.3 表面等离子体激元全光开关 343
 - 10.7.4 纳米硅基波导微腔全光开关 351

第1章 绪 论

本章论述非线性光学在物理学、光学和光子技术中的重要性,非线性光学的物理含义、研究内容、研究简史和发展趋势以及非线性光学应用的现状和前景。

1.1 非线性光学的重要性

1.1.1 非线性光学在现代物理学中的地位

众所周知,现代物理学建立在 20 世纪初形成的量子物理学和相对论物理学两大基石之上。量子物理学是研究微观世界中分子、原子、核子、基本粒子等微观粒子运动的理论;相对论物理学是研究接近光速的物体的高速运动规律与大质量物体引力相互作用规律的理论。因为量子论建立在光的粒子性的基础上;而相对论建立在光速不变原理的基础上,因此光学是建立量子论和相对论的基础。

有人认为,20 世纪下半叶建立起来的非线性物理学,也是现代物理学的一块基石。非线性物理学是研究在强相互作用下,物质的作用和反作用(响应)之间存在着非线性关系的物理现象。这些现象包含在物理学的各个领域,分别形成了非线性力学、非线性声学、非线性热学、非线性电磁学等分支学科,非线性光学正是非线性物理学的一个分支学科。

1.1.2 非线性光学在现代光学中的地位

20 世纪 60 年代初人类发明了激光,从此古老的光学焕发了青春。我们把基于自发辐射的普通光源的光学称为“传统光学”,而基于受激辐射的激光光源的光学称为“现代光学”。20 世纪下半叶,现代光学发展极快,围绕激光的研究和应用形成了若干分支学科。

表 1-1 列出了几个较为成熟的现代光学分支学科以及它们的研究对象和主要应用^[1]。其中非线性光学是现代光学的一个重要分支学科,它是研究激光与物质相互作用产生各种非线性效应的学科。