

研究生教育书系
光信息科学与工程学科

非线性光学

Nonlinear Optics (第二版)

李淳飞 著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

研究生教育书系
光信息科学与工程学科

非线性光学

(第二版)

李淳飞 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 提 要

本书用简明的经典极化理论方法,扼要地讲述了非线性光学的基本原理和概念,内容包括了主要的二阶和三阶的各种非线性光学现象,并介绍了激发态非线性光学、光学双稳性、光学混沌、光孤子和全光开关等的原理、最新发展与主要应用。

本书可作为物理类、电子类和仪器类光学专业的研究生的非线性光学课程教材,以及非光学专业研究生和物理专业高年级本科生的选修教材,也可以作为从事激光、光电子和光通信技术工作的科技人员的自学参考书。

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。

图书在版编目(CIP)数据

非线性光学/李淳飞著. —2版. —北京:电子工业出版社,2009.8
(研究生教育书系. 光信息科学与工程学科)
ISBN 978-7-121-09229-9

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 114726 号

策划编辑:陈晓莉

责任编辑:陈晓莉 特约编辑:李双庆 杨晓红

印 刷:北京市天竺颖华印刷厂

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:720×1000 1/16 印张:15.25 字数:338 千字

印 次:2009 年 8 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定价:26.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

第二版前言

这本“非线性光学”，作为研究生的一本简明教材，第一版于 2005 年出版，受到很多师生们的欢迎。在电子工业出版社陈晓莉编审等人的热心支持下，现在第二版已与大家见面。我在使用第一版书的教学过程中发现了许多错误，因此在第二版中做了认真的修正。在保持原来风格的基础上，补充了部分内容，如第 10 章更全面地介绍了非线性全光开关，增加了一些新的研究进展；第 7 章 7.3 节增加了半导体中的光吸收，在第 2 章的附录中增加了 K-K 关系的推导，并讨论了 K-K 关系在非线性光学中的适用性问题。此外，在各章的后面添加了一些参考文献。

非线性光学的发展速度很快，应用范围很广。我本想再增加一些非线性光学的其他内容，如原子、分子非线性光学、半导体非线性光学、有机材料非线性光学，光折变非线性光学，手性非线性光学，纳米材料非线性光学，超快、强场非线性光学，局域场和非局域场非线性光学，以及光速变慢效应等。但是由于目前的工作太忙，没有时间去做。待以后空闲一些，身体条件许可时，希望能在第三版中适当增加上述有科学意义又有实用价值的内容。

这里我要特别感谢为撰写和修改这本书给过我热诚鼓励和帮助的人们。他们是哈工大我过去的博士研究生们，如刘树田教授、宋瑛林教授、张学如教授、王玉晓教授、李俊庆教授、方光宇副教授、辛丽副教授、王晓欧副教授、郑仰东副教授、陈明副教授、徐光明副研究员等，以及兄弟院校的教师们，如华南师范大学的梁瑞生教授、燕山的李曙光教授等。

李淳飞

2009 年 6 月 10 日

第一版前言

“非线性光学”是激光产生以后发展起来的“现代光学”的一个分支学科,它是研究激光与物质相互作用产生各种非线性效应的科学。所谓非线性效应是指物质的物理参量(如极化率、折射率、吸收系数等)与入射光场振幅呈非线性的函数关系。非线性光学有许多应用,如它可用于开辟激光新波段;压缩激光的脉宽;研制光开关、光放大器等光子器件;发展全光通信、光孤子通信和量子通信;提高光谱的分辨率;消除传光介质的畸变;研究表面、界面、低维、纳米结构的工具等。随着光学和物质结构研究的发展,非线性光学的研究也与时俱进,当前它已成为发展微米光子学和纳米光子学的基础之一。它是在各种物质尺度下实现“以光控光”(光子调控)的基本手段。

现在已出版的论述“非线性光学”的书较多,但是有的书中数学比较繁杂,一般读者难于掌握其物理内涵;有的书内容比较陈旧,没有反映非线性光学的最新发展。目前尚缺乏教学时数 60 学时左右的研究生教材。本人多年来为哈工大物理系光学专业研究生讲授“非线性光学”课程,此书是在原有讲稿的基础上整理完成的。本书的宗旨是本着少而精的原则,以经典理论和标量表述为主要方法,采用一阶非线性波动方程和速率方程等较为简单的数学工具,尽量深入浅出、系统、精简地讲解二阶和三阶非线性光学的宏观规律和物理图像(重点讨论三阶非线性光学效应),使初学者在较短时间内能够掌握非线性光学的基本原理、最新发展和主要应用。

在本书的内容中包含了作者的研究组从 1979 年开始 30 年来的一些主要研究成果,如光学双稳性与光学不稳定性(第 8 章),激发态非线性光学(第 7 章)、非线性全光开关(第 10 章)、还有自聚焦(第 5 章)等方面的内容。

本书可作为物理类、电子类和仪器类的光学专业研究生的必修课教材,也可以作为非光学专业研究生以及物理专业高年级本科生的选修教材。此外,从事激光、光电子和光通信技术工作的科技人员也可以将此书作为自学的参考。作者希望这本书有

较为广泛的读者,并能够对普及非线性光学知识起到一定的作用。

由于本书出版较为匆忙,不妥与错误之处仍然难免,恳请读者批评指正,以便今后改进。

李淳飞

2005年8月16日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 非线性光学的意义	1
1.1.1 非线性光学与物理学和光学的关系	1
1.1.2 非线性光学是研究激光与物质相互作用的学科	2
1.2 非线性光学的发展	6
1.2.1 非线性光学的发展简史	6
1.2.2 非线性光学研究的发展趋势	7
1.3 非线性光学的应用	8
1.3.1 非线性光学是光子学的基础	8
1.3.2 非线性光学的广泛应用	9
参考文献	10
第 2 章 介质的非线性极化	13
2.1 非线性介质的波方程	13
2.1.1 非线性介质的麦克斯韦方程	13
2.1.2 各向异性介质的时域波方程	14
2.1.3 各向异性非线性介质的频域波方程	15
2.1.4 各向同性非线性介质频域波方程	16
2.1.5 各向同性非线性介质时域波方程	17
2.2 非线性极化率	18
2.2.1 极化强度的频域表达式	18
2.2.2 极化率的对称性	20
2.2.3 简并因子	21
2.3 Kramers-Kronig 色散关系	22
2.3.1 极化率实部与虚部的关系	22
2.3.2 极化率实部和虚部的物理意义	23
2.3.3 非线性折射率与非线性吸收系数间的关系	26
附录 A K-K 关系推导	26
附录 B: 两种单位制	29

参考文献	30
第 3 章 光学三波耦合过程	31
3.1 三波耦合方程	31
3.1.1 各向同性介质中的二阶非线性光学效应	31
3.1.2 各向异性晶体介质中二阶非线性效应的近似描述	32
3.2 光学二次谐波	35
3.2.1 小信号近似情况	36
3.2.2 基波光高消耗情况	38
3.2.3 相位匹配技术	40
3.3 光学和频、差频和参量过程	44
3.3.1 光学和频与频率上转换	44
3.3.2 光学差频与频率下转换	47
3.3.3 光学参量放大与振荡	48
参考文献	54
第 4 章 光学四波耦合过程	55
4.1 三次谐波与四波混频	55
4.1.1 三次谐波	55
4.1.2 四波混频	57
4.2 光学相位共轭	59
4.2.1 光学相位共轭的定义	59
4.2.2 四波混频过程的光学相位共轭	60
参考文献	65
第 5 章 光致折射率变化	66
5.1 光学克尔效应	66
5.1.1 自相位调制光克尔效应	67
5.1.2 交叉相位调制光克尔效应	70
5.2 光束的自聚焦	72
5.2.1 稳态自聚焦	72
5.2.2 动态自聚焦	78
5.2.3 自相位调制	82
5.2.4 三阶非线性极化率的 Z 扫描测量法	84
参考文献	89
第 6 章 非线性光散射	91
6.1 自发辐射与受激辐射光散射	91

6.1.1	自发辐射光散射分类	91
6.1.2	受激散射与自发散射的区别	92
6.2	受激拉曼散射	93
6.2.1	受激拉曼散射的物理图像	93
6.2.2	受激拉曼散射的经典理论	96
6.3	受激布里渊散射	101
6.3.1	受激布里渊散射的物理图像	101
6.3.2	受激布里渊散射的经典理论	102
	参考文献	105
第7章	非线性光吸收与光折射	106
7.1	饱和吸收与反饱和吸收	106
7.1.1	饱和吸收	106
7.1.2	反饱和吸收	112
7.2	饱和折射与反饱和折射	118
7.2.1	饱和折射与反饱和折射	118
7.2.2	非线性折射系数的物理意义	122
7.3	双光子吸收	123
7.3.1	双光子吸收的基本概念	123
7.3.2	半导体中的光吸收	125
	参考文献	129
第8章	光学双稳性及其不稳定性	131
8.1	光学双稳性	131
8.1.1	光学双稳性的基本概念	131
8.1.2	全光型光学双稳性原理	133
8.1.3	光电混合型光学双稳性原理	140
8.2	光学双稳性的不稳定性	144
8.2.1	光学双稳性的稳定性	144
8.2.2	光学双稳性的不稳定性	147
	参考文献	154
第9章	光脉冲在光纤中的传输	155
9.1	非线性薛定谔方程	155
9.1.1	亥姆赫兹方程推导	155
9.1.2	非线性薛定谔方程推导	156
9.2	群速色散与自相位调制	161

9.2.1	不计色散和非线性的脉冲传输	161
9.2.2	色散对脉冲传输的影响	161
9.2.3	自相位调制对脉冲传输的影响	164
9.2.4	色散和自相位调制共同作用	167
9.3	光孤子的形成与特性	169
9.3.1	时间光孤子	169
9.3.2	空间光孤子	172
	参考文献	173
第 10 章	非线性全光开关	174
10.1	光开关综述	174
10.1.1	光开关的重要性	174
10.1.2	光开关的分类与参量	177
10.2	非线性耦合器全光开关	180
10.2.1	对称光耦合器	180
10.2.2	对称耦合器及自相位调制全光开关	182
10.2.3	非对称耦合器及交叉相位调制全光开关	185
10.2.4	具有共振非线性的非线性耦合器全光开关	188
10.3	非线性 M-Z 干涉仪全光开关	192
10.3.1	两臂非线性折射率不同的 M-Z 干涉仪光开关	193
10.3.2	两臂长度不同的 M-Z 干涉仪光开关	194
10.4	非线性环共振器全光开关	195
10.4.1	与 M-Z 干涉仪一臂耦合的非线性环腔全光开关	196
10.4.2	与两直波导耦合的环腔全光开关	200
10.4.3	含光放大器的环腔全光开关	203
10.5	非线性 Sagnac 干涉仪全光开关	205
10.5.1	非线性 Sagnac 干涉仪理论	205
10.5.2	含非对称耦合器的 Sagnac 干涉仪光开关	208
10.5.3	采用不同频率泵浦光的 Sagnac 干涉仪光开关	210
10.5.4	在光纤环中非对称放置光放大器的 Sagnac 干涉仪光开关	212
10.5.5	采用非线性耦合器的 Sagnac 干涉仪光开关	214
10.6	纳米波导非线性干涉仪全光开关	218
10.6.1	纳米波导环共振器全光开关	218
10.6.2	光子晶体全光开关	225
	参考文献	229

第 1 章 绪 论

本章论述非线性光学的意义和研究对象,非线性光学的发展历史和发展趋势,以及非线性光学的可能应用领域,并阐述非线性光学对现代光学和光子学的贡献。

1.1 非线性光学的意义

1.1.1 非线性光学与物理学和光学的关系

1. 非线性光学是非线性物理学的分支学科

众所周知,现代物理学是建立在 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。量子物理学是研究分子、原子、核子、基本粒子等微观世界规律的理论;相对论物理学是研究接近光速的高速运动规律与大质量物体的引力相互作用规律的理论。光学在建立量子论和相对论的过程中曾起着重要的作用:量子论建立在光的粒子性的基础上;相对论建立在光速不变原理的基础上。

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。非线性物理是研究在物质间宏观强相互作用下普遍存在着的非线性现象,也就是作用和响应之间的关系是非线性的现象。非线性物理现象包含在物理学的各个领域,形成了非线性力学,非线性声学,非线性热学,非线性电子学和非线性光学等相对独立的学科领域。非线性光学是非线性物理学的一个分支,它是描述强光与物质发生相互作用的规律。非线性光学在激光发明之后迅速发展起来,它所揭示的大量新现象极大地丰富了非线性物理学的内容。

2. 非线性光学是现代光学的分支学科

20 世纪 60 年代初人类发明了激光,从此使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迅速形成了若干分支学科,并且很快获得了广泛的应用。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。其中非线性光学是现代光学的一个重要分支学科。它是研究激光与各种物质相互作用所产生的各种非线性效应的学科。非线性光学在激光的强度控制(全光开关、光限制)、光脉冲压缩(调Q与锁模)、光频率转换(倍频、和频、四波混频)、超精细物质结构分析(激光光谱学)、消畸变光传输(光学相位共轭)、数字光计算(光双稳性)、非线性光存储(光折变光存储、双光子光存储),以及非线性光通信(光孤子通信、混沌光通信)等方面有重要的应用^[1]。

表 1.1 现代光学分支学科及其研究对象和主要应用

分支学科	研究对象	主要应用
激光物理学	激光器理论以及提高激光品质的方法	各种工作物质、腔结构和输出频率和脉宽的激光器系统设计;激光的模式、频率、相位、偏振、脉宽、群速度的控制技术;激光产生强场、高温、高压等极端物理环境的技术;激光控制电子、原子、分子、细胞、纳米粒子等的技术;激光照明、显示、遥测、传感、热加工技术等
非线性光学	激光与物质相互作用产生非线性效应	光脉宽压缩;光频率转换;全光开关;消畸变光传输;光孤子通信;数字光计算;数字光存储,激光光谱分析等
傅里叶光学	傅里叶光学理论及光学信息处理应用	全息照相,全息商标,全息存储;光学图像处理;特征识别、边沿增强等;模拟光学计算,光学信息安全技术等
导波光学	光在光纤和平面波导中的传播与控制	光纤、光子晶体光纤、平面光波导的制备;有源与无源波导器件、光子晶体器件的制备与应用;光纤之间、光纤与光器件间的耦合;光纤与平面波导中的色散、损耗、偏振的控制
量子光学	非经典光学现象与原子发光量子理论	利用压缩态抑制光通信噪声;利用量子纠缠态实现量子保密通信;量子信息处理,量子计算,量子存储等

1.1.2 非线性光学是研究激光与物质相互作用的学科

1. 非线性光学与线性光学的区别

非线性光学(激光为光源)与线性光学(普通光为光源)有本质的区别,两种情况下,在光与物质相互作用或光波之间的相互作用中所表现的特性不同,主要区别列于表 1.2 中。

表 1.2 非线性光学与线性光学的主要区别

线性光学	非线性光学
光在介质中传播,通过干涉、衍射、折射可以改变光能量的空间分布和传播方向,但不能改变光的频率	一定频率的光入射介质,可能通过与介质的相互作用转换成二次谐波和三次谐波。还可以在光谱上产生频率周期分布的光

(续表)

线性光学	非线性光学
多束光在介质中交叉传播, 不发生能量交换, 不改变各自的频率	多束光在介质中交叉传播, 可能发生能量相互转移, 改变各自频率或产生新频率
光作用于介质, 不改变介质的物理量, 介质物理量与光场强度无关	光与介质相互作用, 介质的物理量如极化率、吸收系数、折射率等是光场强度的函数
光束通过光学系统, 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可能呈现非线性关系和双稳回线关系
多光束在介质中交叉传播, 各光束的相位信息彼此不能相互传递	在介质中传播的光束之间可以相互传递相位信息, 而且两束光的相位可以互成共轭关系

2. 被动非线性光学与主动非线性光学

按照激光与介质的相互作用的方式不同, 可以把非线性光学效应分为以下两类:

(1) 被动非线性光学效应

被动非线性光学效应的特点是: 光与介质之间无能量交换; 而在不同频率的光波间发生能量交换。例如, 倍频、三波混频、参量过程、四波混频、相位共轭, 等等。图 1.1.1 以倍频与四波混频为例说明被动非线性光学效应。

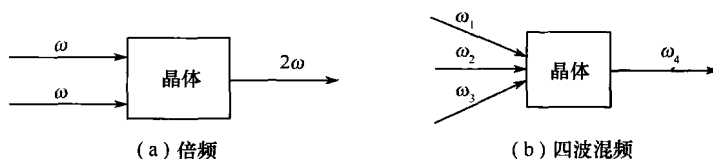


图 1.1.1 被动非线性光学效应举例

(2) 主动非线性光学效应

主动非线性光学效应的特点是: 光与介质之间会发生能量交换; 介质的光学参量与光场强度有关。例如, 非线性吸收——饱和吸收、反饱和吸收、双光子吸收等; 非线性折射——光克尔效应、自聚焦与自散焦、折射率饱和与反饱和等; 非线性散射——受激拉曼散射、受激布里渊散射等, 光学双稳性、光限制等。图 1.1.2 以饱和吸收与光克尔效应引起的自聚焦效应为例说明主动非线性光学效应。

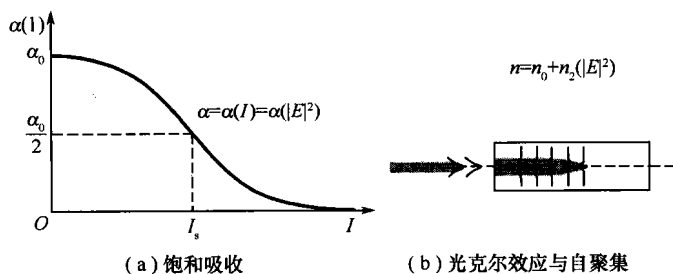


图 1.1.2 主动非线性光学效应举例

3. 非线性光学材料与非线性机制

具有非线性光学性质的材料有许多种,不同材料的非线性机制各不相同,表 1.3 给出非线性光学材料及其非线性机制。

表 1.3 非线性光学材料及其非线性机制

非线性光学材料	非线性机制
半导体材料	电子机制、激子机制
有机、高分子材料	电子、分子极化,分子取向极化
电光晶体	外电光效应
光折变材料	内电光效应
液晶材料	分子取向极化
团簇材料(C_{60} 等)	分子极化
手性分子材料	分子电极矩、磁极矩
等离子体	电子、离子机制
半导体周期性带隙结构	量子限制(量子阱、量子线、量子点)
电介质周期性折射率结构	非线性光子晶体
金属—电介质薄膜结构	表面等离子体激元

4. 非线性光学现象是高级极化现象

当光入射介质时,在光电场 $E(r, t)$ 作用下,组成介质的激性分子、原子、电子的电荷发生整体或相对位移,感生次级电场,称为电极化强度 $P(r, t)$ 。在普通光情况下 $P(r, t)$ 和 $E(r, t)$ 的关系是正比线性关系,则

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi \cdot \mathbf{E} \quad (1.1.1)$$

式中 ϵ_0 是真空介电系数; χ 是线性极化率, 对各向异性介质它是复数张量。

若入射光是激光, 光强比普通光高几个数量级, 极化强度展开为光场的幂级数, 要考虑高幂次项的作用, 即

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi^{(1)} \cdot \mathbf{E} + \epsilon_0 \chi^{(2)} : \mathbf{E}\mathbf{E} + \epsilon_0 \chi^{(3)} \vdots \mathbf{E}\mathbf{E}\mathbf{E} + \dots \quad (1.1.2)$$

式中 $\chi^{(1)}$ 是线性极化率; $\chi^{(2)}$ 和 $\chi^{(3)}$ 是二阶和三阶非线性极化率, 它们分别是二阶、三阶和四阶张量。左边第一项为线性极化项, 第二项、第三项等为二阶、三阶等高阶非线性极化项。可以把式(1.1.2)中的极化强度表示为

$$\mathbf{P}_{\text{NL}} = \mathbf{P}^{(1)} + \mathbf{P}^{(2)} + \dots + \mathbf{P}^{(n)} + \dots \quad (1.1.3)$$

再把极化强度分为线性和非线性两部分, 即

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_L + \mathbf{P}_{\text{NL}} \quad (1.1.4)$$

式中 $\mathbf{P}_L = \mathbf{P}^{(1)}$, $\mathbf{P}_{\text{NL}} = \mathbf{P}^{(2)} + \mathbf{P}^{(3)} + \dots$ 。

总之, 非线性光学现象是与高阶极化有关的现象。

5. 非线性光学现象是介质的参量与光场有关的现象

对于各向同性介质, 可将式(1.1.2)改写为标量形式, 即

$$\begin{aligned} \mathbf{P} &= \epsilon_0 \chi^{(1)} \mathbf{E} + \epsilon_0 \chi^{(2)} \mathbf{E}\mathbf{E} + \epsilon_0 \chi^{(3)} \mathbf{E}\mathbf{E}\mathbf{E} + \dots \\ &= \epsilon_0 (\chi^{(1)} + \chi^{(2)} \mathbf{E} + \chi^{(3)} \mathbf{E}^2 + \dots) \mathbf{E} \\ &= \epsilon_0 \chi \mathbf{E} \end{aligned} \quad (1.1.5)$$

式中 $\chi = \chi^{(1)} + \chi^{(2)} \mathbf{E} + \chi^{(3)} \mathbf{E}^2 + \dots$ 为介质的总极化率。可见, 非线性介质的总极化率是光场振幅的函数。对于三阶非线性光学效应, 介质的总极化率 $\chi = \chi^{(1)} + \chi^{(3)} \mathbf{E}^2$ 是光电场振幅平方的函数, 也就是光强的函数 ($I \propto \mathbf{E}^2$)。

三阶非线性极化率可写成实部和虚部两部分, 即

$$\chi^{(3)} = \chi^{(3)'} + i\chi^{(3)''} \quad (1.1.6)$$

第2章我们将证明, 非线性介质的吸收系数和折射率可以分为线性和非线性两部分, 即

$$\alpha = \alpha_0 + \Delta\alpha \quad (1.1.7)$$

$$n = n_0 + \Delta n \quad (1.1.8)$$

对于三阶非线性效应, 非线性吸收系数与极化率的虚部有关; 非线性折射率与

极化率的实部有关,二者都与光强成正比,即

$$\Delta\alpha \propto (\chi^{(3)})'' I \quad (1.1.9)$$

$$\Delta n \propto (\chi^{(3)})' I \quad (1.1.10)$$

因此,对于三阶非线性效应,介质的极化率、吸收系数和折射率皆为光强的函数。一般可以说,非线性光学现象是介质的物理参量与光场振幅有关的现象。正如非线性光学的权威学者、诺贝尔奖得主 N. Bloembergen 对非线性光学的定义:“凡是物质对于外加电磁场的响应,并非外加电磁场振幅的线性函数的光学现象,均属非线性光学的范畴”。^[2]

1.2 非线性光学的发展

1.2.1 非线性光学的发展简史

非线性光学的研究从 1960 年发明激光后开始,1961 年—1965 年经历了初期创立阶段。为总结这个阶段的研究成果,1965 年非线性光学的创始人 N. Bloembergen 撰写了“Nonlinear Optical Phenomena”一书^[3]。1965—1985 年是非线性光学的发展成熟阶段。1984 年非线性光学权威专家 Y. R. Shen 出版了“The Principles of Nonlinear Optics”一书^[4],总结了这个阶段的研究成果。1985—2000 年是非线性光学的初步应用阶段。迄今为止非线性光学的理论已经比较成熟,但它在光学与光子技术上的应用还在进一步研究发展。下面列出非线性光学的发展简史。

1. 非线性光学初期创立阶段

- 1961 年, Franken 实验发现红宝石激光的倍频^[5];
- 1962—1964 年,发现受激拉曼散射、受激布里渊散射^[6~8];
- 1962—1965 年,发现和频、差频、参量振荡、四波混频^[9~11];
- 1963—1966 年,发现饱和吸收、双光子吸收^[12,13];
- 1962—1964 年,发现自聚焦和自相位调制^[14,15];
- 1965 年, N. Bloembergen 发表专著“Nonlinear Optical Phenomena”^[3]。

2. 非线性光学发展成熟阶段

- 1962—1975 年,相干瞬态光学效应(光子回波、光学章动、自感透明等)^[16];

1963—1983 年,发现简并四波混频和光学相位共轭^[17~19];
1964—1974 年,光学克尔效应提出,并得到实验证实^[20,21];
1975—1985 年,发现光学双稳态和光学混沌^[22,23];
1972—1987 年,光纤中的非线性光学性质和光孤子^[24~26];
1984 年,沈元壤发表专著“The Principles of Nonlinear Optics”^[4]。

3. 非线性光学初步应用阶段

1982—1998 年,半导体量子限制材料的非线性光学性质研究^[27,28];
1985—1989 年,发现高效非线性光学晶体材料 BBO 和 LBO^[29,30];
1985—1991 年,有机材料和聚合物材料的非线性光学性质研究^[31,32];
1987—1995 年,发现反饱和吸收,研究光学限制效应^[33~35];
1979—1993 年,光折变效应及其非线性光学理论^[36,37];
1985—1997 年,非线性光学在量子光学中的应用(压缩态,量子纠缠等)^[38,39];
1985—1999 年,非线性光学在干涉型全光开关中的应用^[40~42];
1984—2001 年,非线性光学在光纤通信中的应用(孤子通信等)^[43,44];
1979—2002 年,非线性光学在非线性光子晶体中的应用^[45,46];
1995—2005 年,非线性光学在手性分子材料中的应用^[47,48]。

1.2.2 非线性光学研究的发展趋势

非线性光学研究的发展趋势是:所用光源从连续、宽脉冲转向纳秒、皮秒和飞秒超短脉冲;研究对象从稳态转向动态;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;从研究共振峰处的现象转向研究非共振区的现象;从二能级模型的研究转向多能级模型的研究;被研究物质的尺度从宏观尺度(衍射光学),到介观(纳米)尺度(近场光学),再到微观尺度(量子光学)。

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,如从三维的体块材料到二维的表面、薄膜材料;从宏观材料到介观(纳米)材料,纳米材料如半导体量子线和量子点、光子晶体、金属—电介质薄膜、纳米复合材料以及纳米管、纳米颗粒和团簇材料等。