

Nonlinear and
Quantum Optics

(3rd Edition)

非线性与量子光学

(第三版)

谭维翰 著



科学出版社

非线性与量子光学

(第三版)

谭维翰 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书从光与物质相互作用的非线性与量子性出发,对多年来在非线性与量子光学领域中的最新研究成果给予从实验到理论的系统介绍.第1~5章主要偏重基础,包括非线性介质中的波,光与非线性介质相互作用的经典与量子理论,二能级、三能级系统的密度矩阵求解,原子缀饰态,激光振荡理论等;第6~10章主要介绍最新发展,包括辐射的相干统计性质,原子的共振荧光与吸收,激光偏转原子束,超短光脉冲的传输与锁定,以及光学噪声、分岔与混沌。

本书可供高等学校物理与激光专业的研究生阅读,也可供从事物理基础理论研究和应用的科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

非线性与量子光学/谭维翰著. —3版. —北京:科学出版社, 2018.5
ISBN 978-7-03-057370-4

I. ①非… II. ①谭… III. ①非线性光学 ②量子光学
IV. ①O437②O431.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018) 第 094279 号

责任编辑:刘凤娟/责任校对:彭 涛
责任印制:张 伟/封面设计:无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年5月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018年5月第一次印刷 印张:40 1/2

字数:800 000

定价:268.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

第三版前言

本书第三版对第二版内容有更多的修订和充实。但总的框架没有变。内容增添之处主要有 3.7 节光脉冲自聚的多焦点现象, 3.8 节光束传输的 ABCD 定理, 3.9 节光脉冲的“超光速传输”, 6.7.6 节违背 Bell 不等式的几何推导, 6.11 节简并四波混频实验, 7.12 节薛定谔 (Schrödinger) 猫态的实验观测, 8.8 节激光冷却原子与原子的玻色-爱因斯坦凝聚, 9.13 节光脉冲在光纤波导与光微环中的传输与相互作用等。

在第三版的写作过程中, 得到上海大学物理系领导、老师和同学多方面帮助与支持 (含国家自然科学基金 (项目编号 61271163) 资助)。对此作者表示衷心的感谢。

上海大学物理系 谭维翰

2017 年 5 月

第二版前言

本书再版对第一版内容进行了修订、充实，个别处有删节，但总的框架没有变。如增加了第 2 章的单原子与多原子辐射理论，第 5 章的微 maser 理论，第 6 章的原子纠缠态及 Bell 不等式、相位算符，第 7 章的不取旋波近似的共进荧光、有阻尼情形的 JC 模型解，第 8 章的中性原子的玻色-爱因斯坦凝聚，第 9 章的超短脉冲的小尺度自聚，第 10 章的光折变晶体环形腔的时空混沌等。

最后作者十分感谢共同工作并对本书作出贡献的刘仁红等同志。

谭维翰

2000 年 5 月

第一版前言

自从 1960 年第一台激光器在实验室诞生以来, 激光技术已经历了一个迅猛的发展时期, 对非热平衡辐射量子统计、非线性光学、光与原子相互作用等一些基本物理问题的研究带来了一次次的冲击并促进了它们的发展, 使我们在实验室里观察到激光具有的非热平衡辐射的 Poisson 分布, 并用强光通过非线性介质, 观察到二次与高次谐波等; 使我们认识到原子的自发辐射跃迁概率会随微腔的尺寸而变化。自 1960 年到现在的 30 多年间, 这种对基本物理问题研究的冲击并未随着时间的增长而逐渐减弱, 相反却越来越频繁。例如, 压缩态光和群聚、反群聚光等非经典光场的产生与应用, 激光冷却原子技术与原子光学, 微微秒、飞秒脉冲和光孤子的产生与应用, 激光的不稳定性、光学双稳态、光学混沌、时间及空间分岔与混沌现象等。早期 Sargent 等的《激光物理》、Louisell 的《辐射的量子统计性质》、Haken 的《激光理论》, 还有 Bloembergen 的《非线性光学》、沈元壤的《非线性光学原理》等著作对非线性光学与量子光学的研究起了很大的促进与推动作用, 但如何从包括非线性与量子光学在内更为广泛而基础的角度去概括与论述上述各种物理现象, 并从方法上予以统一的描述, 将是一个很有趣的问题。本书就是这样一种尝试。全书分为两部分, 前五章偏重基础, 后五章主要阐述最新的发展。第 1 章主要从数学方面讨论非线性介质波传播的性质、几种典型的非线性方程以及孤立波理论等。第 2 章讨论光与物质相互作用的经典与量子理论, 包括光学波相互作用、非线性极化展开、量子力学微扰论及密度矩阵等。第 1、2 章给出必要的数学准备和物理基础, 也包含了非线性光学中光谐波的主要内容。第 3、4 章为二能级、三能级密度矩阵方程的解, 是第 2 章理论的发展与应用, 包含了二能级原子矢量模型、面积演化定理, 以及近年无反转激光最新研究成果。第 4 章为原子的缀饰态, 在介绍评述已有的原子缀饰模型的基础上, 主要叙述原子的部分缀饰态及其在强场微扰论中的应用。第 5 章为激光振荡理论, 包括激光振荡半经典理论、热库模型理论、全量子理论等内容。第 6 章为光的相干统计性质, 包括相干态、群聚、反群聚态和压缩态等实验物理背景、理论处理及其在物理测量中的应用。第 7 章为共振荧光与微腔的量子电动力学实验与理论。第 8 章为激光偏转原子束, 包括激光冷却与原子光学等内容。第 9 章为超短光脉冲的传播与锁定, 包括染料锁模激光、碰撞锁模、啁啾效应及快饱和吸收锁模激光。第 10 章为激光噪声、分岔与混沌, 包括激光噪声的随机过程理论、决定性混沌理论、光学双稳态、分岔混沌和时空混沌等。在叙述这些内容的同时, 每章后面均附有大量参考文献。包括非线性与量子效应在内的

光学现象,是一个内容丰富,但又交错在一起的物理现象,非经典光场的产生离不开光学参量或四波混频等非线性相互作用。将这些内容放在一起叙述,可能会有些好处,但难度大为增加了。由于作者水平有限,书中疏漏之处在所难免,请广大读者批评指正。

作者在写完初稿后,承蒙曹昌棋教授审阅了全书,并对修改提出宝贵意见,对此作者表示衷心的感谢。还有李青宁、许文沧、刘仁红、马国彬等同志在书稿的打印方面花费了很多精力,作者也在此表示感谢。

谭维翰

1994 年 12 月

目 录

第 1 章 非线性介质中的波	1
1.1 波的传播与波追赶	1
1.2 线性波	2
1.3 非线性波	5
1.4 耗散波、激波与色散波	9
1.5 波的自聚与非线性 Schrödinger 方程	10
1.6 自感透明现象与 sine-Gordon 方程	12
1.7 三波相互作用	13
1.8 非线性相互作用中的孤立波理论	15
1.8.1 关于孤立波的记载	15
1.8.2 逆散射方法	17
1.8.3 二分量孤立波方程	21
1.8.4 直接解孤立波方程法	23
1.9 非线性 Schrödinger 方程的逆散射解	23
1.10 非线性 Schrödinger 方程逆散射解的初值问题	27
1.11 周期的孤立波解的初期问题	31
附录 1A GLM 方程的证明	36
参考文献	38
第 2 章 光与非线性介质相互作用的经典与量子理论	40
2.1 非线性相互作用的经典理论	40
2.1.1 电磁波在非线性介质中的传播	40
2.1.2 极化率张量的对称性	43
2.2 光学中的波波相互作用	46
2.2.1 三波耦合	46
2.2.2 四波耦合	51
2.3 光与非线性介质相互作用的量子理论	56
2.4 弱场微扰法解 Schrödinger 方程	57
2.5 密度矩阵方程及其微扰解法	62
2.5.1 密度矩阵方程	62
2.5.2 用微扰法解密度矩阵方程	65

2.6	波场 $\psi(\mathbf{r}, t)$ 的量子化	68
2.7	电磁场的量子化	72
2.7.1	电磁场的模式展开	72
2.7.2	电磁场的量子化	73
2.7.3	光子数态 (Fock 态)	75
2.8	原子辐射的线宽与能级移位	76
2.8.1	单原子辐射	76
2.8.2	N 原子辐射	80
2.8.3	单原子与 N 原子的受激辐射与吸收	85
2.9	自离化共振态	86
2.9.1	自离化共振态	86
2.9.2	Fano 的自离化 (AI) 态理论	87
2.10	绝热定理与 Berry 相位	90
2.10.1	绝热定理与 Berry 相位	90
2.10.2	“准二能级”系统的 Berry 相位	93
2.11	Bohm-Aharonov 效应	95
附录 2A	(2.2.27) 式的解析求解	98
附录 2B	(2.9.13) 式的证明	99
	参考文献	100
第 3 章	二能级系统的密度矩阵求解	102
3.1	二能级原子密度矩阵的矢量模型	102
3.2	Bloch 方程及其解	105
3.3	线性吸收与饱和吸收	108
3.4	光学章动与自由感生衰变	110
3.5	浸渐近似	112
3.6	光脉冲传播的面积定理	114
3.6.1	光脉冲传播面积定理的证明	114
3.6.2	相干光脉冲的合并、分裂和面积演化	120
3.7	光脉冲自聚的多焦点现象	127
3.7.1	光脉冲自聚的准稳态理论	128
3.7.2	光脉冲自聚的不稳定性分析	130
3.7.3	光脉冲自聚的数值计算	133
3.8	光束传输的 $ABCD$ 定理	135
3.8.1	近轴光束传输的 $ABCD$ 定理	135
3.8.2	普适的光束传输 $ABCD$ 定理的证明	136

3.8.3 光束传输的衍射积分计算	140
3.9 光脉冲的“超光速传输”	148
3.9.1 终端波在增益型反常色散介质中的传播	148
3.9.2 矩形脉冲在增益型反常色散介质中的传播	150
3.9.3 高斯光脉冲在增益型反常色散介质中的传播	154
附录 3A (3.6.24) 式的推导	157
附录 3B (3.7.26) 式的解析求解	157
参考文献	158
第 4 章 原子的缀饰态	162
4.1 二能级原子 Schrödinger 方程的解	162
4.2 原子缀饰态	163
4.3 Cohen-Tannoudji 的缀饰原子	166
4.4 原子部分缀饰态及其展开	167
4.5 集居数、介质增益与无反转激光	174
4.6 自离化共振态干涉	179
4.7 简并态的量子拍激光	181
4.8 电磁感应透明	182
参考文献	183
第 5 章 激光振荡理论	185
5.1 激光振荡的半经典理论	185
5.1.1 没有激活离子 (或原子) 情形	187
5.1.2 线性极化 $P \propto E$	187
5.1.3 一级近似	188
5.1.4 气体激光的烧孔效应与 Lamb 凹陷	189
5.1.5 多模振荡	193
5.2 激光振荡的全量子理论	194
5.3 热库模型与激光输出的统计分布	196
5.3.1 热库模型	196
5.3.2 激光场与热库相互作用的 Langevin 方程	198
5.3.3 原子体系与热库相互作用的 Langevin 方程	200
5.3.4 辐射场的密度矩阵方程	203
5.3.5 激光输出的统计分布	204
5.4 降低激光泵浦的量子噪声	209
5.4.1 规则泵浦抽运	209
5.4.2 一般泵浦抽运	214

5.5	微 maser 的量子模式理论	219
5.5.1	maser 情形密度矩阵主方程的稳态解	219
5.5.2	微腔的量子模理论	222
5.5.3	在阈值附近微腔量子模主方程解与分步模式解的偏差	224
5.6	单原子与双原子微激光	224
5.6.1	双原子与激光场的相互作用方程	225
5.6.2	单原子、双原子微激光的稳态输出比较	227
	参考文献	229
第 6 章	辐射的相干统计性质	232
6.1	平衡辐射的统计热力学	232
6.2	光的相干性	236
6.2.1	相干条件	236
6.2.2	“光子自干涉”与“同态光子干涉”	239
6.3	光探测	239
6.3.1	理想探测器	239
6.3.2	量子跃迁	240
6.4	场的相关函数与场的相干性	241
6.5	相干态	244
6.5.1	相干态定义	244
6.5.2	阻尼相干态	248
6.5.3	相干态叠加	249
6.6	用相干态展开	256
6.6.1	相干态的 P 表示	256
6.6.2	在 P 表象中参量下转换所满足的 Fokker-Planck 方程	259
6.6.3	W 、 Q 与 P 分布函数	261
6.7	光子的二阶相关函数、群聚与反群聚效应、鬼态干涉与粒子的纠缠态	265
6.7.1	光场分布的二阶相关测量	265
6.7.2	经典光场与非经典光场	270
6.7.3	原子共振荧光场的二阶相关函数分析	273
6.7.4	双光子“鬼态干涉”与 EPR 悖论	277
6.7.5	Bell 不等式与粒子的纠缠态	283
6.7.6	违背 Bell 不等式的几何推导	288
6.8	压缩态光场	290
6.8.1	光子起伏给光学精密测量带来的限制	290

6.8.2	正交压缩态	292
6.8.3	振幅压缩态	298
6.9	非经典光场的探测	300
6.9.1	强度差的零拍探测技术	300
6.9.2	当探测效率 $\eta \neq 1$ 的零拍探测	301
6.10	压缩态光的产生和放大	303
6.10.1	简并参量放大产生压缩态光的原理与实验结果	303
6.10.2	简并参量放大与简并四波混频满足的 Langevin 方程与 Fokker-Planck 方程	306
6.10.3	简并参量放大的 Fokker-Planck 方程的解	307
6.10.4	简并四波混频的 Fokker-Planck 方程的解	312
6.11	简并四波混频实验	315
6.12	相位算符及其本征态	320
6.12.1	Dirac 与 Heitler 相位算符理论及其困难	320
6.12.2	Susskind 与 Glowgower 相位算符	321
6.12.3	Loudon 与 Pegg-Branett 的相位态	323
6.12.4	能量有限系统的相位本征态 $ \varphi_c\rangle_N$	324
6.12.5	能量有限系统的厄米相位算符	330
附录 6A	Boson 算子代数	334
附录 6B	最小测不准态	336
附录 6C	关于 (6.7.59), (6.7.70) 式的证明	337
	参考文献	339
第 7 章	原子的共振荧光与吸收	344
7.1	二能级原子与单色光强相互作用的实验研究	344
7.1.1	二能级原子在强光作用下的共振荧光	344
7.1.2	在强场作用下的原子吸收线型	345
7.1.3	二能级原子吸收谱的功率增宽与饱和	347
7.2	二能级原子的共振荧光理论	347
7.2.1	二能级原子与辐射场相互作用方程及其解	348
7.2.2	二能级原子的共振荧光计算	349
7.2.3	共振吸收	353
7.3	共振荧光场的态函数与多光子跃迁共振荧光光谱	354
7.3.1	单光子跃迁模型	355
7.3.2	单光子共振荧光场的态函数	358
7.3.3	双光子跃迁模型	359

7.3.4	数值结果与讨论	360
7.4	二能级原子系统的瞬态共振荧光	361
7.4.1	含无规力的 Bloch 方程的解析解	361
7.4.2	二能级原子系统的瞬态共振荧光谱	366
7.5	呈指数衰变驱动场作用下二能级原子的瞬态共振荧光光谱	369
7.5.1	驱动场可变情况下 Langevin 方程的形式解	369
7.5.2	驱动场呈指数衰变情形的瞬态共振荧光	371
7.5.3	含阻尼和稳态项的三维衰变运动	373
7.5.4	计算结果与分析	376
7.6	考虑到自作用后二能级原子的共振荧光谱	379
7.6.1	考虑到自作用后二能级原子与辐射场系统的 Langevin 方程及其解	379
7.6.2	二能级原子系统的共振荧光谱	385
7.6.3	计算结果与讨论	386
7.7	原子在压缩态光场中的共振荧光	387
7.7.1	原子在压缩态光场中的密度矩阵方程	387
7.7.2	原子在压缩态光场中的共振荧光谱	390
7.8	含原子腔的 Q.E.D.	391
7.8.1	自发辐射的增强与抑制	391
7.8.2	单模场与二能级原子相互作用的 J-C 模型	396
7.8.3	有阻尼情况下单模场与二能级原子相互作用的解析解	400
7.8.4	关于新经典理论的实验检验	404
7.9	含二能级原子腔的透过率谱	405
7.9.1	共振腔中原子的极化率计算	405
7.9.2	含二能级原子腔的透过率谱	407
7.10	多原子体系的共振荧光	409
7.10.1	多原子体系的再耦合波函数	410
7.10.2	多原子体系的动力学方程	411
7.10.3	原子的受激辐射对原子间 (合作) 相互作用的影响	413
7.10.4	两原子的共振荧光谱	415
7.11	不取旋波近似情形二能级原子的共振荧光谱	418
7.11.1	Mollow 的共振荧光理论 (RFS) 与积分的初值条件	418
7.11.2	不采用 RWA 二能级原子系统的 RFS 理论	420
7.11.3	数值计算与讨论	423
7.12	Schrödinger 猫态的实验观测	424
附录 7A		430

参考文献	431
第 8 章 激光偏转原子束	436
8.1 激光偏转原子束	436
8.1.1 早期的激光偏转原子束方案	436
8.1.2 激光作用于原子上的力	439
8.1.3 原子在速度空间的扩散	441
8.2 激光冷却原子与光学黏胶	449
8.3 激光偏振梯度冷却原子	453
8.4 光学黏胶温度测量	458
8.5 电磁衰波场对原子的作用力与原子镜	460
8.6 原子镜面对原子量子态选择反射实验	462
8.7 二能级原子在激光衰波场中反射的准确解	464
8.7.1 二能级原子在激光衰波场中满足的 Schrödinger 方程及其解	464
8.7.2 二能级原子波函数的边值条件及反射率计算	469
8.7.3 数值计算与讨论	470
8.8 激光冷却原子与原子的 Bose-Einstein 凝聚	472
8.8.1 由“光子服从 Bose 统计”到“理想气体的 Bose 统计”	472
8.8.2 简谐势阱中的中性原子的 Bose-Einstein 凝聚	473
8.8.3 排斥相互作用对 Bose-Einstein 凝聚的影响	475
8.8.4 吸引相互作用对 Bose-Einstein 凝聚的影响	480
8.8.5 中性原子的 Bose-Einstein 凝聚	487
附录 8A I_1, I_2, I_3, I_4 的计算	489
附录 8B 当 y 很小时 $u_g(y)$ 的极限解	491
参考文献	491
第 9 章 超短光脉冲的传播与锁定	495
9.1 光脉冲波包	495
9.2 光纤中孤子的形成	498
9.3 孤子的 Ramann 放大	501
9.4 暗孤子	503
9.5 调制不稳	506
9.6 强超短脉冲传输引起的超加宽	508
9.7 超短光脉冲的小尺度自聚	511
9.8 超短脉冲的模式锁定与染料被动锁模激光	513
9.9 准连续被动锁模激光	518
9.10 碰撞锁模	519

9.11	啁啾光脉冲的放大与压缩	521
9.12	快饱和吸收锁模激光	522
9.13	光脉冲在光纤波导与光微环中的传输与相互作用	527
9.13.1	光脉冲通过光纤单波导与微环谐振相互作用的透过率计算	527
9.13.2	光脉冲通过光纤单波导与双微环谐振相互作用的透过率计算	528
9.13.3	光纤单波导-双微环系统与后向四波混频原子系统的对应关系	531
9.13.4	光波导-微环系统参数计算	534
	参考文献	535
第 10 章	光学噪声、分岔和混沌	540
10.1	随机过程理论	540
10.1.1	历史的回顾	540
10.1.2	Markov 过程	542
10.1.3	Ito 积分与随机微分方程	549
10.2	决定性混沌	551
10.2.1	决定性混沌的表现及判定	552
10.2.2	一维二次迭代映象	559
10.2.3	二分岔理论的抛物线近似	563
10.2.4	阵发混沌	568
10.2.5	二维映象与奇异吸引子	570
10.2.6	由准周期向混沌过渡, Ruelle-Takens-Newhouse 方案	574
10.2.7	奇异吸引子图像与分形边界	576
10.2.8	一维迭代的功率谱与外界噪声的影响	578
10.2.9	保守系统的无规运动	579
10.3	激光单模振荡的 Lorenz 模型与实验验证	583
10.3.1	激光单模振荡的 Lorenz 模型	583
10.3.2	Lorenz 模型的激光实验验证	586
10.3.3	模式分裂与非均匀加宽	587
10.3.4	失谐对激光振荡第二阈值的影响	590
10.4	光学双稳态中的混沌现象	591
10.4.1	吸收型光学双稳态	591
10.4.2	含色散吸收介质的环形腔系统	594
10.4.3	增益介质的分岔与混沌	598
10.5	含非线性介质 Fabry-Perot 腔的分岔与混沌	600
10.5.1	含非线性介质 Fabry-Perot 腔	600

10.5.2	当 $T_c \frac{d\phi}{dt}$ 不略去时的相位 ϕ 与透过强度 I 的微分差分方程解	603
10.6	NFP 腔 $B_3 \sim B_5$ 点邻近混沌性分析	604
10.6.1	不具有倍周期分岔的抛物线近似	604
10.6.2	B_3 右邻的迭代输出, Fourier 谱与 Lyapunov 指数	605
10.6.3	B_3 右邻的切分岔混沌性质	606
10.6.4	$B_4 \sim B_5$ 亚稳区, B_5 后的亚稳混沌区	607
10.7	光学传输横向效应	608
10.7.1	模式对称的自发破缺	609
10.7.2	光场中的相位奇异点	613
10.7.3	光学中的混沌遨游与时间混沌现象的实验观察	618
10.8	含光折变晶体环行腔的时空混沌	620
10.8.1	含光折变晶体环行腔振荡器的分岔与混沌	620
10.8.2	光折变振荡器中光场的横向分布及时空不稳	622
10.8.3	光折变振荡器中的模式遨游	623
	参考文献	625

第1章 非线性介质中的波

光学中的非线性相互作用,主要表现为波波相互作用或波粒相互作用。作为描述光学非线性相互作用的准备与基础,我们在本章中将一般性地讨论非线性介质中的波^[1],包括波的传播、波追赶、线性波、非线性波、耗散波、激波与色散波、波的自聚与非线性 Schrödinger 方程、自感透明现象与 sine-Gordon 方程、三波相互作用、非线性相互作用中的孤立波理论。

1.1 波的传播与波追赶

波动现象给人的直观感觉是一特定波形 w 随时间 t 的推移沿空间 x 方向的传播,波形函数 w 为

$$w = w(x - vt) \quad (1.1.1)$$

波的传播方程为

$$\frac{dw}{dt} = \left(\frac{\partial}{\partial t} + v \frac{\partial}{\partial x} \right) w = 0 \quad (1.1.2)$$

式中 v 为传播速度。如果一个观察者以 v 的速度向前运动,则他观察到的波幅将是不变的。这就是 (1.1.1) 和 (1.1.2) 式的含义。引进路径参量 ξ :

$$\xi = x - vt, \quad x = \xi + vt \quad (1.1.3)$$

实际上 ξ 确定了 w 上每一点的运动路径。参见图 1.1, ξ 即 $t = 0$ 时的 x 值。注意到将波的传播表述为 (1.1.1)~(1.1.3) 式是有条件的,即波的传播速度 v 是一与 (x, t) 无关的常数;如果不是这样,则路径参量应写为

$$\xi = \xi(x, t), \quad v = v(\xi, t) \quad (1.1.4)$$

波及波的传播方程为

$$w = w(\xi) \quad (1.1.5)$$

$$\frac{dw}{dt} = \left(\frac{\partial \xi}{\partial t} + v \frac{\partial \xi}{\partial x} \right) \frac{dw}{d\xi} = 0 \quad (1.1.6)$$

(1.1.5) 与 (1.1.6) 式表明波上某固定点的波幅是不随时间而变的,因 $\frac{dw}{d\xi} \neq 0$, 这就要求

$$\frac{\partial}{\partial t} \xi + v \frac{\partial \xi}{\partial x} = 0 \quad (1.1.7)$$