

CAMBRIDGE

量子光学导论

Introductory Quantum Optics

[美] 克里斯托弗·格里 (Christopher C. Gerry)

[英] 彼得·奈特 (Peter L. Knight)

著

景俊 译

清华大学出版社



量子光学导论
Introductory Quantum Optics

 **CAMBRIDGE**
UNIVERSITY PRESS
www.cambridge.org

清华社官方微信号



扫 我 有 惊 喜

ISBN 978-7-302-53518-8



9 787302 535188 >

定价: 69.00元

量子光学导论

Introductory Quantum Optics

[美]克里斯托弗·格里 (Christopher C. Gerry)

著

[英]彼得·奈特 (Peter L. Knight)

景俊 译

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书对量子光学领域包括光的量子本质以及光与物质的相互作用作了初步介绍。

本书内容几乎完全与量子的电磁场相关。涵盖的主题包括空腔中单模场量子化、多模场量子化、量子相位、相干态、相空间几率分布、原子与场的相互作用、J-C 模型、量子相干理论、分束器和干涉仪、非经典场压缩态、纠缠光子局域实在论（涉及下转换、腔量子电动力学的实验实现、囚禁离子、退相干及其应用、量子信息处理和量子密码术）的检验。本书提供了大量课后习题以及综述文献目录。

本书专为那些已经学过量子力学的高年级本科生以及低年级研究生开设量子光学课程而设计。

This is a simplified Chinese edition of the following title(s) published by Cambridge University Press:

Introductory Quantum Optics ISBN 9780521527354

© Phyllis Tharenou, Ross Donohue, Brian Cooper 2007

This book is in copyright. Subject to statutory exception and to the provisions of relevant collective licensing agreements, no reproduction of any part may take place without the written permission of Cambridge University Press.

This simplified Chinese edition for the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press and Tsinghua University Press 2019

This simplified Chinese edition is authorized for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) only. Unauthorised export of this simplified Chinese edition is a violation of the Copyright Act. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of Cambridge University Press and Tsinghua University Press.

此版本仅限在中华人民共和国境内（不包括香港、澳门特别行政区及台湾省）销售。

北京市版权局著作权合同登记号 图字：01-2019-1267

本书封面贴有剑桥大学出版社防伪标签，无标签者不得销售。

版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

量子光学导论 / (美) 克里斯托弗·格里, (英) 彼得·奈特著; 景俊译. —北京: 清华大学出版社, 2019

书名原文: *Introductory Quantum Optics*

ISBN 978-7-302-53518-8

I. ①量… II. ①克… ②彼… ③景… III. ①量子光学 IV. ①O431.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 180086 号

责任编辑: 鲁永芳

封面设计: 常雪影

责任校对: 赵丽敏

责任印制: 刘海龙

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175

邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者: 清华大学印刷厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 185mm×260mm

印 张: 17.5

字 数: 403 千字

版 次: 2019 年 11 月第 1 版

印 次: 2019 年 11 月第 1 次印刷

定 价: 69.00 元

产品编号: 081547-01

译者序

克里斯托弗·格里 (Christopher C. Gerry) 和彼得·奈特 (Peter L. Knight) 的这本讲义是一本可读性较强的量子光学入门书。它的理论推导非常详细、同时广征博引, 比较适合用来作为量子光学、量子信息、量子开放系统方向的一年级研究生或科研工作者的参考书或教科书。译者本来并无翻译这本书的计划, 只是机缘巧合, 同时觉得原书结构精巧、逻辑严密、娓娓道来, 再加上原书有不少出版错误, 所以才决定将其整理、翻译出来。供自己和国内广大同行参考。

在翻译过程中, 译者基本上把所有推导过程重新演算过一遍, 同时注意了符号标记的前后自洽。原书中的所有表述、计算、结果、图形也重新给出或加以描绘, 因此对照原文可能有视角、比例、字体上的稍许差距。译文中的所有示意图与原书保持一致。这些均不会影响阅读。

翻译不是一件讨巧的事情, 既不符合“经济人”假设, 也会占据作为高校老师“升级打怪刷文章”的时间和精力。然而作为读书人, 译者还残存一些“王杨卢骆当时体, 轻薄为文晒未休。尔曹身与名俱灭, 不废江河万古流”的情怀; 作为普通科研工作者, 译者也甚为自己工作的原创性和影响力不足而叹。译书工作或可在教书育人的过程中稍补心中缺憾。

译者想致谢研究生闫家舜同学, 他在译者翻译过程中绘制了不少图形。同时一并感谢清华大学出版社鲁永芳博士以及在编辑过程中付出努力工作的其他编辑人员。

浙江大学物理学系

景俊

2019年7月

致 谢

本书内容是根据作者多年来在帝国理工学院和纽约城市大学研究生院的课程讲义整理而来的。我们因此感谢那些全程听课的同学们，他们充当了我们在讲座中所呈现内容的“实验品”。

我们想感谢那些多年来给予我们建议、想法和支持的同事们。尤其要致谢剑桥大学出版社的西蒙·卡佩林 (Simon Capelin) 博士，他比我们更加确信这本书能够完成。过去多年和同行们的许多次讨论让我们获益匪浅，这些人包括：莱斯·阿伦 (Les Allen)、加布里埃尔·巴顿 (Gabriel Barton)、加诺斯·伯格 (Janos Bergou)、凯斯·伯内特 (Keith Burnett)、弗拉迪米尔·布泽克 (Vladimir Buzek)、李察·坎波斯 (Richard Campos)、布莱恩·达尔顿 (Bryan Dalton)、约瑟夫·埃伯利 (Joseph Eberly)、雷纳·格罗布 (Rainer Grobe)、埃德文·哈希 (Edwin Hach) 三世、罗伯特·希尔伯恩 (Robert Hilborn)、马克·希利里 (Mark Hillery)、艾德·海因兹 (Ed Hinds)、罗德尼·娄登 (Rodney Loudon)、皮特·米兰妮 (Peter Milonni)、比尔·蒙罗 (Bill Munro)、杰弗里·纽 (Geoffrey New)、埃德文·鲍尔 (Edwin Power)、乔治·希尔瑞 (George Series)、沃尔夫冈·施莱奇 (Wolfgang Schleich)、布鲁斯·肖尔 (Bruce Shore)、老卡洛斯·斯特鲁 (Carlos Stroud Jr)、斯图亚特·斯旺 (Stuart Swain)、丹·沃尔斯 (Dan Walls) 和克日什托夫·活基域斯 (Krzysztof Wodkiewicz)。我们特别要感谢阿迪力·本穆萨 (Adil Benmoussa)，他不仅利用自己在 Mathematica、Corel Draw 和 Origin Graphics 等软件上的专业才能为本书绘制了所有的图、解决了课后习题，而且在这本书成文过程中的各个版本里都找出了许多错误。我们还要谢谢艾伦·卡尔金斯 (Ellen Calkins) 女士打字输入了本书部分章节的初稿。

我们过去的学生和博士后都曾经在工作中教过我们许多东西，他们也由此成为这个激动人心领域的领导者。这些人包括：斯蒂芬·巴奈特 (Stephen Barnett)、阿尔米特·贝热 (Almut Beige)、阿图尔·埃克特 (Artur Ekert)、巴里·加拉威 (Barry Garraway)、克里斯托夫·凯特尔 (Christoph Keitel)、金明湜 (Myungshik Kim)、杰拉德·米尔本 (Gerard Milburn)、马丁·普莱纽 (Martin Plenio)、巴里·桑德斯 (Barry Sanders)、斯特凡·谢尔 (Stefan Scheel) 和弗拉特科·维德勒 (Vlatko Vedral)。在本书中他们会发现许多属于自己的贡献！

我们打算把这本书作为量子光学导论，因此并不试图在引用文献方面做到面面俱到。我们对那些没有被引用到的作者们深为抱歉。

克里斯托弗·格里(Christopher C. Gerry)(作者之一)希望致谢雷曼大学物理与天文系的所有成员以及雷曼大学的其他教职员工，感谢他们在自己撰写这本书时给予的鼓励。

彼得·奈特(Peter L. Knight)(作者之一)想要特别致谢克里斯·奈特(Chris Knight)在自己撰写这本书时提供的全力帮助(包括耐心支持、车接车送、端茶倒水)。

过去40年来我们两人在量子光学方面的工作得到了许多渠道的资助。Peter L. Knight 特别感谢英国科学与工程研究基金会、英国工程及物理科学研究基金会、英国王家协会、欧洲联盟、纳菲尔德(Nuffield)基金会和美国军方等方面的支持；Christopher C. Gerry 感谢美国自然科学基金会、美国科学促进发展基金会和纽约城市大学专业人员协会等方面的支持。

目 录

第 1 章	引言	1
1.1	本书的范围和目标	1
1.2	历史	1
1.3	本书内容	5
	参考文献	6
	更多阅读的建议	6
第 2 章	场量子化	8
2.1	单模场的量子化	8
2.2	单模场的量子涨落	13
2.3	单模场的正交算符	14
2.4	多模场	15
2.5	热平衡场	21
2.6	真空涨落和零点能	25
2.7	量子相位	29
	习题	34
	参考文献	36
	参考书目	36
第 3 章	相干态	37
3.1	湮灭算符的本征态和最小不确定态	37
3.2	位移真空态	41
3.3	波包和时间演化	43
3.4	相干态的产生	44
3.5	相干态的更多性质	45
3.6	相干态的相空间图像	48

3.7 密度算符和相空间几率分布	50
3.8 特征函数	55
习题	60
参考文献	61
参考书目	62
第 4 章 原子辐射的发射和吸收	63
4.1 原子-场相互作用	63
4.2 原子与经典场的相互作用	65
4.3 原子与量子场的相互作用	69
4.4 拉比模型	73
4.5 全量子模型与 J-C 模型	76
4.6 缀饰态	83
4.7 密度算符方法: 在热态上的应用	86
4.8 大失谐下的 J-C 模型: 色散相互作用	89
4.9 J-C 模型的推广	91
4.10 J-C 模型的施密特分解和冯 · 诺伊曼熵	91
习题	93
参考文献	95
参考书目	96
第 5 章 量子相干函数	97
5.1 经典相干函数	97
5.2 量子相干函数	101
5.3 杨氏干涉	104
5.4 高阶相干函数	106
习题	111
参考文献	112
参考书目	112
第 6 章 分束器与干涉仪	113
6.1 单光子实验	113
6.2 分束器的量子力学描述	114

6.3 单光子干涉仪	120
6.4 无相互作用测量	121
6.5 相干光的干涉测量	123
习题	124
参考文献	125
参考书目	125
第 7 章 非经典光	127
7.1 正交压缩	127
7.2 正交压缩光的产生	141
7.3 正交压缩光的探测	142
7.4 振幅(或光子布居数)压缩态	143
7.5 光子反聚束	145
7.6 薛定谔猫态	147
7.7 双模压缩真空态	154
7.8 高阶压缩	160
7.9 宽带压缩光	161
习题	162
参考文献	164
参考书目	165
第 8 章 耗散相互作用和退相干	167
8.1 导引	167
8.2 单系统实现或系综实现	168
8.3 单个量子系统的实现	170
8.4 三能级原子的亚稳态和传输动力学	173
8.5 退相干	175
8.6 从退相干中生成相干态: 光平衡	178
8.7 总结	178
习题	178
参考文献	179
参考书目	180
第 9 章 量子力学的光学验证	181
9.1 光子源: 自发参量下转换	182

9.2	HOM 干涉仪	185
9.3	量子擦除器	187
9.4	诱导的量子相干	189
9.5	光子的超光速隧穿	191
9.6	局域实在论和贝尔理论的光学验证	192
9.7	弗朗松实验	197
9.8	下转换光在无绝对标准度量学方面的应用	199
	习题	200
	参考文献	201
	参考书目	202
第 10 章	腔量子电动力学以及离子阱的实验	203
10.1	里德伯原子	203
10.2	与腔场进行相互作用的里德伯原子	205
10.3	J-C 模型在实验中的实现	209
10.4	在腔 QED 中制备纠缠原子对	212
10.5	用大失谐条件下的原子-场相互作用实现薛定谔猫态以及 从量子到经典的退相干	213
10.6	光子数的量子非破坏测量	217
10.7	J-C 型相互作用在囚禁离子运动中的实现	217
10.8	结束语	220
	习题	221
	参考文献	221
	参考书目	223
第 11 章	量子纠缠的应用 —— 海森伯极限下的量子干涉和量子信息处理	224
11.1	量子纠缠优势	225
11.2	纠缠和干涉测量	226
11.3	量子隐形传态	228
11.4	密码术	230
11.5	私钥密码系统	230
11.6	公钥密码系统	232
11.7	量子随机数产生器	233
11.8	量子密码术	234

11.8.1 量子密钥分发	234
11.8.2 BB84 协议	234
11.8.3 B92 协议	237
11.8.4 埃克特协议	238
11.9 量子通信的前景	239
11.10 量子计算逻辑门	239
11.11 一些量子门的光学实现	243
11.12 退相干和量子纠错	247
习题	247
参考文献	248
参考书目	250
附录 A 密度算符、纠缠态、施密特分解和冯·诺伊曼熵	251
A.1 密度算符	251
A.2 两态系统和布洛赫球	254
A.3 纠缠态	255
A.4 施密特分解	256
A.5 冯·诺伊曼熵	258
A.6 密度算符的动力学	259
参考文献	259
重要文献	259
附录 B 果壳里的量子测量理论	261
参考文献	263
附录 C 推导大失谐（远离共振）相互作用下的有效哈密顿量	264
参考文献	266
附录 D 非线性光学和自发参量下转换	267
参考文献	268

第 1 章 引 言

1.1 本书的范围和目标

量子光学是当下活跃发展的物理领域之一。尽管作为一个主要研究领域它已经至少存在了 20 年，不少研究生从事其中，但在过去几年间它也开始影响本科生的教学课程。这本书来源于我们在帝国理工学院和纽约城市大学教授四年级本科生和一年级研究生的课程教材。在量子光学中有众多非常好的专业研究方向可供介绍，但我们觉得应从强调基本概念的角度考虑到高年级本科生和低年级研究生的根本需求。当下这是一个吸引了最聪明学生的领域，部分是因为领域本身的非凡发展（诸如量子隐形传态、量子密码术、薛定谔猫态、贝尔不等式对局域实在论的违背等）。我们希望本书能为这个激动人心的学科提供一个容易理解的导论。

我们的目标是为假定已经选修过量子力学课程的高年级本科生或那些有兴趣将来从事这方面研究的一二年级研究生写一本涵盖量子光学本质的入门级教科书。我们所介绍的内容并不简单，对本科生以及低年级研究生而言将会是挑战，但我们试图采用最为直接的方式。尽管如此，本书中仍然会有部分内容会让读者觉得比其他部分更难一些。在每章最后安排的习题同样也难度不一。我们所讲述的几乎都是关于量子化的电磁场和它们对原子的作用，以及非经典光场的行为。本书的目标是把量子光学和近年来发展的量子信息处理联系在一起。

本书涵盖的课题包括：谐振腔中单模场的量子化、多模场的量子化、量子相位问题、相干态、相空间几率分布、原子-场相互作用、杰恩斯-卡明斯 (Jaynes-Cummings, J-C) 模型、量子相干理论、分束器和干涉仪、非经典场（压缩态等）、下转换获得的纠缠光子对局域实在论的检验、腔量子电动力学的实验实现、囚禁离子（或原子）、退相干问题，以及量子信息处理的某些应用，特别是量子密码术。本书的每一章都留有许多课后习题以及进一步阅读的参考文献。许多习题涉及数值计算，其中有些较为烦琐。

1.2 历史

本节用来简要回顾光学和光子学的物理思想的历史沿革。更多的细节可在玻恩 (Born) 和沃尔夫 (Wolf) 的第六版《光学原理》的“历史介绍”一章中找到。有关量子力学思想的发展史可在惠特克 (Whitaker) 最近的一本书^[1] 中找到，它的可读性很强。

阿鲁塞范 (A. Muthukrishnan)、斯库利 (M. O. Scully) 和祖贝里 (M. S. Zubairy) 近期的一篇文章^[2] 以最容易阅读的方式详细地检阅了光和光子的概念发展。

远古世纪的人们已经对光和光束的本性着迷不已。在 17 世纪之前, 人们已经很好地建立起两个重要的概念: 波和粒子。在 19 世纪上半叶, 麦克斯韦在对作为电磁波的光仔细研究之后为现代场论打下根基。那时经典物理除了在少许诸如黑体辐射和光电效应等方面有点令人担心以外, 似乎无往不胜。这些当然就是量子力学革命的种子。作为一位骨子里保守的理论物理学家, 普朗克为了解释发热物体的光谱, 似乎是相当不情愿地提出热辐射以分立的量子化单元进行发射和吸收。正是爱因斯坦推广了他的思想, 提出这种新的量子代表了光本身而不仅仅是吸收和发射的过程, 这样就能够描述物质与辐射如何建立热平衡 (引入受激辐射的想法), 同时也能解释光电效应。到了 1913 年, 玻尔将量子化的基本思想运用到原子动力学中去, 从而能够预言原子光谱谱线的位置。

在光量子的想法被引入很久以后, 化学家吉尔伯特·列维斯 (Gilbert Lewis) 创造了光子这个新名词。在 1926 年, Lewis 写道:

如果我们设想某个假设的实体, 它仅在极短时间内作为辐射能量的载体, 而在其余时间内作为原子内的一个重要结构元素而存在, 似乎应该把它称为光的粒子、光的微粒、光的量子或光量子……我因此冒昧地提议命名这个假设的新粒子为光子, 它不是光但在每个辐射过程中扮演了重要角色^[3]。

很清楚 Lewis 和我们现在的想法差距相当大!

德布罗意在一次异想天开中产生了关于光量子的想法, 展示出它在波动和粒子方面的双面性。在 1925—1926 年令人惊讶的短时间内, 海森伯、薛定谔和狄拉克为量子力学奠定了基础。他们提供给我们所有至今还在使用的理论工具: 表象、量子态演化、么正变换、微扰论等。量子力学内在的几率特性是马克斯·玻恩发掘的, 他提出了几率幅的思想, 从而能够对干涉进行全量子化的处理。

费米和狄拉克是量子力学的开拓者, 他们同时也是首批考虑量子化的光如何与原子相互作用以及如何传播的专家。20 世纪 30 年代费米把自己在安娜堡发表演说内容发表在《现代物理评论》上。这篇文章总结了在那个年代人们所了解的有关库仑规范下非相对论量子力学的知识。他对干涉 (特别是李普曼条纹) 的处理方法至今仍然值得阅读。关于这一点有必要引用威利斯·兰姆 (Willis Lamb) 的一段话:

在开始讨论 (问题) 前要决定需要从全宇宙中引入多少自由度, 决定需要什么简正模式才能足够处理, 决定如何对光源进行建模并推导它们如何驱动系统^[4]。

这段表述总结了本书贯穿始终的方法。

魏斯科普夫 (Weisskopf) 和维格纳 (Wigner) 把非相对论量子力学的新方法运用到自发辐射和共振荧光的动力学中, 预测了稳态跃迁的指数衰减率。他们的工作中已经出现了接下来困扰量子电动力学长达 20 年的自能问题, 直到施温格 (Schwinger)、

费恩曼 (Feynman)、朝永振一郎 (Tomonaga) 和戴森 (Dyson) 发展出重整化的方案才得以解决。在此时最为突出的工作是库施 (Kusch) 对电子反常磁矩以及兰姆 (Lamb) 与卢瑟福 (Rutherford) 对原子辐射能级偏离的观察。对此感兴趣的读者可以在施韦伯 (Schweber) 那本关于量子电动力学的权威著作^[5] 中发现对这段历史的详细描述。这期间研究体现了把真空作为一种有观察效应的场进行考虑的重要性。在 20 世纪 40 年代晚期的一个重要工作中, 开西米尔 (Casimir) 受胶体比原先仅考虑范德瓦尔斯作用要稳定得多的观测事实启发, 阐述了原子间长程力的量子电动力学本质。并且他把原子间长程力与场的零点振动关联在一起, 指出真空中的金属平板之间由于这样的零点振动而相互吸引。

爱因斯坦继续他在量子力学基本原理方面的研究, 并在 1935 年与波多尔斯基 (Podolsky) 和罗森 (Rosen) 合作的著名文章中指出量子关联的怪异。这篇文章的想法经由玻姆 (Bohm) 和贝尔关于量子关联本性的具体预言而引爆了现代物理中最为活跃的领域之一, 并成为量子信息处理新课题的基础。

基于振幅干涉即一阶关联的光学相干已经被研究了多年。20 世纪 50 年代, 汉伯里·布朗 (Hanbury Brown) 和特维斯 (Twiss) 以光强度干涉作为星光干涉仪的研究工具, 并指出热光子的探测时间如何集束化。这些工作引导了光子统计和光子计数理论的发展, 并导致量子光学作为一门独立学科的开端。在光子统计思想发展的同时, 研究者们开始探索光与物质相互作用中的相干性。随着拉比 (Rabi)、拉姆塞 (Ramsey) 以及其他人的工作开展, 射频光谱学已经在原子光束的研究中初露端倪。在 20 世纪 50 年代到 60 年代, 卡斯特勒 (Kastler)、布罗塞尔 (Brossel)、希尔瑞 (Series)、多德 (Dodd) 和其他人发展了光与原子相互作用的灵敏光泵浦探测器。

20 世纪 50 年代早期, 汤斯 (Townes) 和他的小组以及巴索夫 (Basov) 和普罗霍罗夫 (Prokhorov) 已经基于初态精确制备、粒子数布居反转和受激辐射开发出分子微波辐射源, 即新的微波激光器。50 年代, 艾德·杰尼斯 (Ed Jaynes) 在研究量子化是否在微波激光器运行中起到作用方面扮演了重要角色 (并以此为后期全量子模型的原子-场耦合方面的工作做好了准备, 其中出现了后来被称为 J-C 模型的工作)。把微波激光器推广到光频段, 从而开发出的激光革新了现代物理和技术。

格劳伯 (Glauber)、沃尔夫 (Wolf)、苏达香 (Sudarshan)、曼德尔 (Mandel)、克劳德 (Klauder) 及其他许多人发展了基于相干态和光电探测的量子相干理论。相干态允许我们在相空间中描述光的行为并使用早期由维格纳和其他一些人发展的几率概念。

在激光被开发出来的前几年并没有出现可调光源, 这使得对原子和光或者分子和光相互作用的细节感兴趣的研究者们不得不依赖于分子内偶然的共振。尽管如此, 这还是导致了人们开始研究相干作用和相干瞬态, 如光子回波、自感应透明、光学章动以及其他现象 (具体的描述可参见已成为标准的艾伦 (Allen) 和埃伯利 (Eberly) 的专著)。可调激光器在 70 年代初期出现, 特别是染料激光器使得量子光学和激光光谱学的研究在精度上焕然一新。共振相互作用、相干瞬态和其他方面的研究变得越发简单明了, 而

且导致量子光学变得接近人们当下理解的样子：我们首次能够以非微扰的方式研究单个原子与光相互作用的动力学。斯特鲁（Stroud）及其小组发起了凭借观测共振荧光分裂对共振荧光的研究。早期莫勒（Mollow）曾预言相干驱动会导致共振荧光谱线分裂成块。曼德尔（Mandel）、金布尔（Kimble）以及其他一些人展示了共振荧光如何反集束，这一特征曾被许多理论学者包括沃尔斯（Walls）、卡迈克尔（Carmichael）、科昂-塔努吉（Cohen-Tannoudji）、Mandel 和 Kimble 研究过。反集束现象以及它所关联的（但并非等价的）光子统计的亚泊松分布为“非经典光”的研究奠定基础。20 世纪 70 年代的几个实验探索了光子的本性：它们的可分辨性以及单光子水平上干涉的建立。激光冷却迅速在 80 年代和 90 年代得到发展，从而允许在精确调控的基础上制备物质状态。实际上激光冷却自身已经成为一个主流研究学科，因此我们决定在本书中不讨论它。

随着从激光到高强度脉冲光的发展，从安娜堡的弗兰肯（Franken）及其合作者的开创性工作开始，一系列的非线性光学现象得到研究。谐波发生、参量下转换以及其他一些现象被展现出来。在非线性光学很大部分领域内的早期工作没有一篇需要场量子化，也不需要合理描述的量子光学。但早期也有迹象表明可以做到这些。事实上量子非线性光学是由伯纳姆（Burnham）和温伯格（Weinberg）对下转换中不同寻常的非经典关联的研究（第 9 章）开端的。在 Mandel 和其他许多人的手里，下转换中的这些关联成为揭示量子光学基本观念的基础工具。

直到 80 年代，人们研究的所有光场噪声本质上都与相位无关。这种状况随着带有相位相关噪声的压缩光源的产生而改变。压缩光源使得人们能够研究光场的海森伯不确定关系；再次证明参量下转换是产生这些非寻常光场的最为有效的工具。

量子光学领域的人们很早就意识到如果能将原子禁闭在谐振腔中，那么就能极大地改变原子辐射跃迁动力学。珀塞尔（Purcell）在其 1946 年发表的以核磁共振为背景的著名文章中，已经预言通常认为不会变化的自发辐射率事实上会因为把作为光源的原子封闭在谐振腔内而得到改变。这是因为谐振腔内的模式结构和密度与自由空间中的截然不同。在 60 年代晚期，将原子放到谐振腔内或放到靠近腔镜的位置成为可能。到 80 年代，理论学者梦想的研究单个原子与单模电磁场的相互作用成为可能。此时因为原子与场的相干激发交换，所以跃迁动力学变得完全可逆，直到相干性通过一个耗散的“退相干”过程最终消失。这个梦想就是曾提出的 J-C 模型，它构成了量子光学的一个基本构成单元（本书会对此进行详细讨论）。

信息处理中的新基本概念引导费恩曼、贝尼奥夫（Benioff）、多依奇（Deutsch）、乔萨（Jozsa）、贝内特（Bennett）、埃克特（Ekert）等在近年来发展出了量子密码术和量子计算机等领域。与使用 0 和 1 表示经典比特不同的是，量子计算机的基本单元是受量子力学规律支配的二能级系统（量子比特），它可以存在于逻辑值 0 和 1 的相干叠加态上。那么由 n 个比特构成的集合就可以处在至多由 2^n 个不同态（它们中的每个都代表一个二进制数字）构成的叠加态上。一旦我们能够控制和操控比如 1500 个量子比特，那么我们能够进行存取的状态数就超过了可观察宇宙中所有粒子数的总和。计算则由同时对所

有叠加态作用的幺正变换执行。这些建构的幺正变换基础构成了量子门的基本单元。与之相关的加密技术的绝对安全可以通过使用量子光源来保证。

使用量子叠加与量子纠缠的结果是高度的并行性，它能够指数级地提高计算速度。大量在经典计算机上不具有可行性的问题在量子计算机上能够被有效解决。皮特·肖尔 (Peter Shor) 在 1994 年开发的量子算法就有这样的指数级速度提高。这个算法用来解决一个重要的实际问题，即质因子分解问题。随后人们提出可能实现量子计算机的实验系统，比如线性离子阱和核磁共振。目前我们处在这两个体系都已发展出量子门的阶段。量子计算与量子密码术和量子通信密切相关。不少实验室已经开展了演示这些原则上可能实现的想法的基础实验。

线性离子阱是最有可能实现量子计算，也是我们在本书中详细讨论的平台之一。在这个系统中制备量子态（用激光冷却加上光学泵浦）以及对电子亚稳态和荧光的状态测量都是较为成熟的技术。在线性离子阱中，每个禁闭的带电离子（其原子是钙或铍）被激光冷却到微开尔文级的温度，它们沿着线性射频保罗型离子阱的对称轴分开排列成一串。任何一个离子的内态都能与整个串振动的量子态发生交换。将照射离子的激光辐射脉冲的频率调整到等于离子内态共振频率减去离子串振动的某个简正模式频率，就可以做到这一点。它使得单声子能够进出振动模式。如果用类似的激光脉冲对准另一个离子，则振动态就与该离子的内态耦合起来。用此方法可以产生所有离子量子态的一般的幺正变换。离子阱有若干特征受到人们欢迎。它在不需要任何新技术突破的前提下就能对量子比特进行操作。它可以用来测量任何离子的状态，并重复多次而毫无问题，这是量子纠错协议得以执行的重要特征。

在谐振腔内禁闭的原子或离子可以和电磁场模式发生强耦合，从而允许量子态处理以及量子长程通信之间强强联合的发生。这也提示了量子存储器可能建构的方式。原则上用这些量子系统可以实现经典计算不能完全模拟的更强大的量子处理器，但因退相位和自发辐射引起的消相干是一个难以克服的障碍。

量子纠缠态是特定形式的量子密码术和量子隐形传态的关键资源。纠缠同时也是量子计算强大的原因。在理想情况下，量子计算能比任何经典计算机以指数级加速完成特定任务。更深入的认识量子纠缠在量子信息论中所扮演的角色将使我们改进现有应用并发展出量子信息处理的新方法。这些都是后面章节要讲述的内容。

那么量子光学的未来是什么？它为激光科学和新的原子物理提供支撑。它甚至可能成为我们能够实现全新技术的载体。凭借量子光学，量子力学允许我们以一种全新的方式对信息进行处理和传输。当然我们现在所预言可能出现的技术也许会和意料之外的事情混淆在一起，整个领域因为不断出现的意外而继续充满冒险。

1.3 本书内容

本书布局如下。第 2 章展示如何把电磁场量子化为简谐振子模型，其中振子所代表的电磁场模式的状态描述了每个简正模式上的光子数布居。第 3 章引入相干态概念，它