



“十二五”国家重点图书出版规划项目

光物理研究前沿系列

总主编 张杰

# 量子光学 研究前沿

张卫平等 编著

*Advances in  
Quantum Optics*



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



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点图书出版规划项目

光物理研究前沿系列

总主编 张杰

# 量子光学研究前沿

## Advances in Quantum Optics

张卫平 等 编著



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

## 内容提要

本书是“十二五”国家重点图书出版规划项目“光物理研究前沿系列”之一,包括光子计算、量子与原子光学新进展、腔量子电动力学与单原子操控、微腔光机械系统及其拓展应用等前沿专题。

本书可供光学及物理专业的本科生、研究生及相关研究人员阅读参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

量子光学研究前沿 / 张卫平等编著. —上海: 上海交通大学出版社, 2014

(光物理研究前沿系列 / 张杰主编)

ISBN 978-7-313-11815-8

I. ①量… II. ①张… III. ①量子光学—研究 IV. ①0431.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 169550 号

## 量子光学研究前沿

编 著: 张卫平 等

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: 山东鸿杰印务集团有限公司

开 本: 710 mm × 1000 mm 1/16

字 数: 465 千字

版 次: 2014 年 10 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-11815-8/O

定 价: 115.00 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: 26.75

印 次: 2014 年 10 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: 0533-8510898

# 光物理研究前沿系列 丛书编委会

总主编

张 杰

(上海交通大学, 院士)

编 委

(按姓氏笔画排序)

- |     |                       |
|-----|-----------------------|
| 刘伍明 | 中国科学院物理研究所, 研究员       |
| 许京军 | 南开大学, 教授              |
| 李儒新 | 中国科学院上海光学精密机械研究所, 研究员 |
| 张卫平 | 华东师范大学, 教授            |
| 陈良尧 | 复旦大学, 教授              |
| 陈险峰 | 上海交通大学, 教授            |
| 陈增兵 | 中国科学技术大学, 教授          |
| 金奎娟 | 中国科学院物理研究所, 研究员       |
| 骆清铭 | 华中科技大学, 教授            |
| 钱列加 | 上海交通大学, 教授            |
| 高克林 | 中国科学院武汉物理与数学研究所, 研究员  |
| 龚旗煌 | 北京大学, 院士              |
| 盛政明 | 上海交通大学, 教授            |
| 程 亚 | 中国科学院上海光学精密机械研究所, 研究员 |
| 童利民 | 浙江大学, 教授              |
| 曾和平 | 华东师范大学, 教授            |
| 曾绍群 | 华中科技大学, 教授            |
| 詹明生 | 中国科学院武汉物理与数学研究所, 研究员  |
| 潘建伟 | 中国科学技术大学, 院士          |
| 戴 宁 | 中国科学院上海技术物理研究所, 研究员   |
| 魏志义 | 中国科学院物理研究所, 研究员       |

## 分享光物理之美

经过三年时间的策划,在数十位活跃在光物理研究最前沿科学家的巨大努力和重量级资深科学家的倾情参与下,“光物理研究前沿系列”丛书中英文版终于同时面世了。

光物理是近代物理学中历史最悠久、同时也最具活力的领域之一,特别是激光问世以来,光学渗透到众多学科领域,光学自身的面貌不断发生着深刻的变化。与此同时,光物理的研究内容也从传统的光学与光谱学迅速扩展到光学与其他学科的交叉分支领域,逐渐形成了丰满的学科体系;层出不穷的光学诊断方法和技术发明推动了许多学科的快速发展,并进一步演化为新的科学前沿,这也是光物理研究中最美的景象。

近年来,随着我国科研实力的大幅增强,不少实验室都做出了国际水平的研究成果,我国科学家在 *Nature*, *Science*, *Physical Review Letters* 等国际顶级学术期刊上发表的论文数量已经在全世界占据了相当的份额,同时,国际顶级的综述类学术刊物也邀请我国科学家撰写了大批综述性论文。但是,令人遗憾的是,面向高年级大学生、研究生以及青年学者,介绍我国光物理科学前沿研究成果的专著还比较少,这也将成为制约我国光物理前沿研究未来发展的瓶颈。

出于这个原因,当上海交通大学出版社邀我作为主编,筹划组织编写一套“光物理研究前沿系列”丛书的时候,我欣然同意。我们的目标是编写一套给高年级大学生、研究生和青年学者阅读的中文入门读物,介绍国内外光物理前沿研究的最新进展。本丛书首批包括《强场激光物理研究前沿》《精密激光光谱学研究前沿》《非线性光学研究前沿》《纳米光子学研究前沿》《量子光学研究前沿》《超快光学研究前沿》《凝聚态光学研究前沿》《生物分子光子学研究前沿》等八个分册。每个分册包含了若干该领域的前沿研究专题,几十位活跃在光物理研究最前沿的作者均来自中国重要大学和科研院所。我们希望能以此为契机,汇集最有价值的研究资源,以供有建树的光物理科学家展示自身的研究成果;进而形成良好的学习和借鉴氛围,为高年级大学生、研究生以及青年学者提供学术交流的

平台。在每个分册的开始,我们都邀请了重量级资深科学家作序,介绍每个主题的精华,目的是想与大家一起分享光物理最前沿令人震撼的美。

强场激光物理对应的激光场强具有非常宽的范围,因而包含了极为丰富的非线性物理。强场激光物理及相关前沿新方向是现代物理学乃至现代科学中最重要的前沿之一,不仅有重大的科学意义,而且对国家战略高新技术与交叉学科领域也有重要的推动作用。

——摘自《强场激光物理研究前沿》的序

测量是物理学的基础。在物理学中,原子、分子和光学物理领域比其他任何学科都能更加有力地说明这一点。精密测量是原子、分子和光物理的一个重要分支:它提供了深入了解物理基本定律的重要方法,激励了科学技术前沿的发展,并且推动了许多社会意义重大的革命性应用。

——摘自叶军院士为《精密激光光谱学研究前沿》所作的序

激光的发明,引导出很多新的学科,对我们今天的科学技术以及日常生活都产生了重大影响。其中最重要的学科之一就是非线性光学,它对半个世纪以来科技的发展起了十分重要的作用。

——摘自沈元壤院士为《非线性光学研究前沿》所作的序

纳米光子学融合了光子学和当代纳米技术,研究纳米尺度下光与物质相互作用的机理和效应,在高速信息传输和处理、新能源以及生物医学等领域都有重要的应用。因此,纳米光子学既是国家层面的重点科技战略,又为科技产业发展注入了新的源动力。

——摘自张翔院士为《纳米光子学研究前沿》所作的序

量子信息科学的重大意义在于它的发展不仅仅具有诱人的应用前景,还在于它使得我们意识到:量子其实是信息的载体,而且对某些应用来说也许是最好的载体。我们再次发现,在量子信息科学的发展中,量子光学仍然扮演了重要的角色。这包括人们对光子纠缠操纵能力的逐步提升,光子系统在光量子计算、量子通信和量子精密测量等诸多方面的应用。

——摘自潘建伟院士为《量子光学研究前沿》所作的序

超快光学是随着超短脉冲激光的出现而诞生,并随着飞秒激光技术的迅猛发展而快速发展起来的。它始终与超快现象研究相互促进、共同发展。超快现象研究的需求带动了超快光学的发展,超快光学的进步又促进了超快现象研究范围的扩展和深度的提升。

——摘自侯洵院士为《超快光学研究前沿》所作的序

光与凝聚态物质相互作用是光物理学科的重要研究内容之一。一般说来,凝聚态光学研究包括两个方面。一方面激光作为一种性能优异的探针,可用于研究凝聚态物质的结构和运动规律。另一方面,通过凝聚态光学研究可以发现新的物质状态和新的运动规律,这些新发现可用于产生新的光源、新的探测器和多种其他器件。

——摘自杨国桢院士为《凝聚态光学研究前沿》所作的序

光物理的研究领域包罗万象,但丛书规模有限,不可能面面俱到。作者和出版社已经尽了最大的努力,希望能从浩瀚广阔的光物理成就的海洋中选取最漂亮的“前沿浪花”结集成册。目前八个分册的阵容中,既有光物理研究领域的经典方向,也有近十年来发展迅猛的前沿方向;既有主要介绍科学进展的内容,也有主要介绍新技术的章节。然而,本丛书远不能代表光物理发展前沿的全部,更何况光物理研究前沿也处在日新月异的快速变化中,所以出版本丛书的目的就是抛砖引玉,希望能够吸引更多的年轻人走入光物理的科学殿堂,领略光物理之美。

当我掩上厚厚的书稿,准备送出付印之际,感慨万千。转眼间三年时间过去了,许多在三年前还认为只是个美好梦想的事情,现在变成了现实。作为主要策划者及丛书主编的我,对这套书有特殊的感情。可以说,本丛书凝聚了两代中国光物理学家多年来对世界科学发展的贡献和感情!为此,我要特别感谢丛书的所有作者,他们都是活跃在光物理研究最前沿的科学家。尽管他们每天的时间分配都是以分秒来计算的,但是,他们仍然抽出了大量的时间,撰写了各自前沿领域的进展。作为一个在光物理领域从业多年的科学家,我对他们非常了解,也非常敬佩他们的责任感与使命感。正是出于对科研和教育的强烈责任感和使命感,促使他们从繁忙的研究工作中抽出宝贵时间,甚至牺牲了很多与家人团聚的时间,撰写了各分册,对本丛书作出了至关重要的贡献。我还要感谢丛书的全部编委,他们不仅承担了写作的任务,还承担了策划组稿、审校稿件的繁重任务,是

他们的努力,构架了本丛书的有机结构和宏大涉猎,保证了本丛书的质量。感谢美国科学院院士沈元壤先生为本丛书策划所作的努力,沈先生早年写就的《非线性光学》已经成为非线性光学研究的经典之作,他在“非线性光学五十年”的序言中,更是深入浅出地回顾和展望了非线性光学的发展脉络。感谢中国科学院院士杨国桢先生给予本丛书策划和出版的帮助,多年来,杨先生引领、见证了凝聚态光学研究的发展。他为《凝聚态光学研究前沿》所作的序言见解精辟,同时为凝聚态光学研究指出了未来的新前沿。感谢中国科学院院士侯洵先生为《超快光学研究前沿》作序,侯先生为中国超快光学的发展作出了奠基性的贡献,二十多年前,他访问英国时对超快光学领域进展的精辟点评,我至今犹在耳边。他们三位都是我老师辈的先生,从我还是学生的时候起,就从他们撰写的论文和学术专著中向他们学习,从他们的言传身教中向他们学习,多年来,我向他们学到了很多很多,至今他们也还是我的老师。

感谢美国科学院院士叶军先生为《精密激光光谱学研究前沿》作序,他是上海交通大学的校友,也是我交往多年的好朋友。他在精密测量、冷分子物理和冷原子光钟等方面的开拓性研究工作,至今都是光物理领域的重要里程碑。感谢美国国家工程院院士张翔先生为《纳米光子学研究前沿》作序,他在光学超材料方面的杰出成果在国际上引起了很大反响。感谢中国科学院院士潘建伟先生为《量子光学研究前沿》作序,作为我国最年轻的院士之一,他在量子通信前沿和应用方面所做出的杰出成果,让量子通信不再神秘。在本丛书中,我与他们联袂作序,用我们的共同努力,用我们各自对光物理前沿的理解和积淀,努力向读者介绍本丛书试图展现的光物理之美,希望能成为各自分册的点睛之笔。

最后,我想感谢上海交通大学出版社韩建民社长及编辑团队,他们付出了巨大的努力,使梦想成为现实。令人欣喜的是,在上海交通大学出版社和德古意特出版社的合力打造下,这套丛书前两册的英文版将作为“中国学术出版走出去”的第一波,同步在海外发行。在此,我祝愿这套丛书成为“中国学术出版走出去”第一波中最美的一朵“浪花”!让我们一起分享光物理之美!



2014年10月于飞越太平洋的飞机上



## 序

光学是人类最早发现、发展并应用的物理学之一。创造灿烂中华文明的先人们,在长期的生产实践中,陆续认识到了光的直线传播、光的反射、大气光学、成像理论等多种重要的光学现象。例如,早在春秋战国时期,《墨经》(《墨经》是《墨子》一书的重要部分,约完成于公元前 388 年,其中关于光学的记载,俗称“光学八条”)中就已记载了小孔成像的实验。因此,李约瑟在《中国科学技术史》物理卷中就承认墨子关于光学的发现比希腊和印度还早。所以说,光学是一门非常古老的物理学分支。

与此同时,光学也是一门在每一个时代都仍然勃发生机、充满发现的物理学分支。回顾光学发展历史,除了上述提到的萌芽时期(期间当然还有众多早期的国外学者的发现和贡献,如欧几里德、托勒密等),还有几何光学时期、波动光学时期和现代的量子光学时期。回顾这段光学发展史,可以发现科学史上有名的科学发现和认识都呈现螺旋式上升、深化的过程。

为此,让我们来列举一些光学发展史上的标志性事件和成果:

斯涅耳(1621 年)和笛卡儿(1630 年)相继提出折射定律的精确公式,随后,费马(1657 年)提出光在介质中传播的路程极值原理,进而自然推出光的反射和折射定律。上述发现奠定了几何光学的基础。基于几何光学,牛顿(《光学》,1704 年出版)提出了光的“微粒说”,即认为光是微粒,在真空或均匀介质中依据其惯性而做匀速直线运动,这确实可以解释光的反射和折射定律。

同样是牛顿(1672 年),他发现了三棱镜色散现象和牛顿圈,可是他的光的“微粒说”不能解释牛顿圈,更不能解释早先就发现的光衍射、干涉等光的波动现象。所以,与牛顿同时代的惠更斯反对光的微粒说,他假设了一种叫“以太”的充满宇宙的弹性介质作为光传播的媒介,利用他提出的波动理论中的次波原理,惠更斯成功地解释了反射、折射定律和部分波动现象。基本上,这个时期牛顿的光的微粒说处于主流,但同时也出现了波动学说。

19 世纪早期,“薄膜颜色”和双缝干涉现象的成功解释(托马斯·杨),以及惠更斯-菲涅耳原理的发现,终于使人们既能解释光的干涉和衍射等波动现象,

也能解释光的直线传播。19 世纪中叶,以法拉第和韦伯为代表的科学家相继发现了一些光学现象与电磁现象的内在关系,并直接导致了近代物理学上的真正伟大的发现之一,那就是麦克斯韦电磁方程组的提出,该方程组用数学明确表明,光其实就是一种电磁现象,正如后来被赫兹实验所证实的那样。

再随后,关于光的发生(如黑体辐射问题)、光和物质相互作用的微观机理的研究(洛伦兹电子论、赫兹发现的光电效应)以及迈克耳逊关于以太测量的否定性结果等,直接导致了现代物理学两个最重大的发现:狭义相对论和量子论,从而把物理学带入了迄今为止最异彩纷呈的一个时代。这个最伟大的现代物理学革命就发生在 20 世纪初那个短短的 5 年:首先是普朗克 1900 年提出辐射(即光)的量子论,由此爱因斯坦在 1905 年圆满地解释了光电效应;在同一个年度,爱因斯坦提出了全新的时空观,即狭义相对论,圆满地解释了运动物体的光学(电磁)现象。

自普朗克和爱因斯坦之后,在 20 世纪 20 年代,量子学研究群星璀璨,量子力学得以全面建立。终于,我们看到了科学发现的一个完整螺旋。我们意识到:光,乃至所有微观粒子,其实既是粒子也是波,它们具有波粒二象性。随后,一大批科学家又发展了量子场论,其中就包含了量子电动力学,它代表了人类迄今为止关于光及其与物质相互作用的最精确、最完备的全套理论描述。在这个过程中,我们进入了光学的现代时:量子光学时代。

这里,我们姑且抛开各种新奇的量子光学发现的罗列,进入一个看起来不相干的话题:EPR(Einstein-Podolsky-Rosen)佯谬,这是根据提出佯谬的三位物理学家爱因斯坦、波多尔斯基、罗森而命名的。简单地说,这个佯谬是指,如果我们基于两个“非常合理”的假设:局域性和实在性(局域性是基于狭义相对论一切能量和信息的传播速度不能超过光速的结论;而实在性是指一个物理量的测量值是这个物理量固有的属性,与是否进行测量无关),那么利用所谓的“纠缠态”,我们似乎可以同时精确测量微观粒子的位置和动量,而量子力学的“不确定性原理”告诉我们这是不可能的。这就是一个矛盾,自 1935 年提出之后,让几代物理学家纠结至今。如何面对这个矛盾?EPR 认为量子力学是不完备的,应该增加所谓“隐变量理论”,使量子论得以完备;而以玻尔为代表的量子论捍卫者坚持量子力学的完备性。可是,完全对立的两个说法到底孰是孰非?在随后的近 30 年,这个问题还是一个只能靠投票表决的问题,或者说是物理学家的个人信仰问题,没有人知道答案。终于,在 1964 年,爱尔兰物理学家贝尔提出了著名的贝尔不等式,使得这个问题的实验检验成为可能。于是,自 20 世纪 70 年代开始,尤其著名的是 80 年代初期法国物理学家阿斯佩特、90 年代末期奥地利物理学家

蔡林格等人完成的一系列实验,终于用实验回答了 EPR 佯谬带来的问题。直到今天,仍然不断地有关于贝尔不等式(贝尔定理)的各种版本的实验检验结果发表。

针对一个问题,如此多次地反复从不同角度加以检验,这种现象如果说不是物理学中绝无仅有的,也肯定是为数不多的。而关于贝尔定理的理论和实验研究恰恰就是这么一个问题。为什么?因为这是一个如此基本而深邃的问题,因为这是一个涉及我们物理学世界观的问题。遗憾的是,迄今为止,这个实验检验还存在技术上的漏洞。我们虽然基本相信,实验已经证明:EPR 的局域实在观念是错的,而量子力学是对的。可是,由于实验漏洞的存在,谁知道这里面会不会隐藏什么惊喜,就像物理学发展反复展现的那样?

可是,这些跟光和光学有什么关系?有关系,因为关于这个问题的研究,使得我们认识到量子世界的纠缠与非定域现象,它们是利用经典物理学无论如何也无法解释的、量子世界特有的定义性的奇特现象。而在关于量子纠缠和非定域性的实验发现中,光学(确切地说是量子光学)再次扮演了关键性角色:第一个发现纠缠现象并用于检验贝尔不等式的物理系统就是光子系统。今天,我们不但可以常规地产生两个光子的纠缠态,甚至可以纠缠 8 个独立的光子。

在这个量子光学时代,量子物理还有一条独立的发展线索,那就是量子信息科学的逐步发端与发展,至今仍然方兴未艾。量子信息科学一般认为是发端于天才物理学家费曼(他也是量子电动力学的奠基人之一)关于量子模拟的初步设想,这导致了后来量子计算机的提出。结合同时期本奈特等人关于量子通信的一系列奠基性工作,导致了量子信息科学的逐步建立。今天,不夸张地说,量子信息科学仍然是物理学的热门前沿之一。量子信息科学的重大意义在于它的发展不仅仅具有诱人的应用前景,还在于它使得我们意识到:量子其实是信息的载体,而且对某些应用来说也许是最好的载体。

我们再次发现,在量子信息科学的发展中,量子光学仍然扮演了重要的角色。这包括人们对光子纠缠操纵能力的逐步提升,光子系统在光量子计算、量子通信和量子精密测量等诸多方面的应用。

本书精心选择了若干量子光学的前沿课题,涉及光量子计算、量子与原子光学、腔量子电动力学与单原子操控、微腔光机械系统及其拓展应用等,由作者们各自给予了精彩的介绍。我相信作者们的努力不仅对量子光学的初学者极有价值,对本领域的研究人员同样极有价值。我也相信,读者不仅可以从本书领略到量子光学的前沿发展,也可以感受到我国学者在这个领域所付出的努力。

最后,我想说的是:我不知道我们对光的本质的认识什么时候会再进一步,

因为看起来我们现有的认识是完备的;但我相信,一旦我们真的再进一步,一定会带来新的物理学革命。我们对光乃至光量子应用的认识脚步从未停止,未来也将一如历史,光子会不停地给我们带来惊喜。

潘建伟

2014年9月

# 目 录

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| I 光量子计算/ 姚星灿 陈增兵 潘建伟 ..... | 1   |
| 1.1 引言 .....               | 3   |
| 1.2 量子算法 .....             | 6   |
| 1.2.1 Shor 量子算法 .....      | 6   |
| 1.2.2 Grover 搜索算法 .....    | 10  |
| 1.2.3 量子仿真算法 .....         | 10  |
| 1.3 光量子计算理论基础 .....        | 11  |
| 1.3.1 基本的量子门 .....         | 11  |
| 1.3.2 基于量子隐形传态的量子计算 .....  | 15  |
| 1.3.3 KLM 方案 .....         | 16  |
| 1.3.4 单向量子计算 .....         | 19  |
| 1.3.5 光量子计算中的错误 .....      | 24  |
| 1.4 光量子比特的制备和相干操纵 .....    | 27  |
| 1.4.1 光量子比特的制备 .....       | 28  |
| 1.4.2 光量子比特的相干操纵 .....     | 42  |
| 1.4.3 光量子态的测量 .....        | 62  |
| 1.5 光量子计算最新进展 .....        | 69  |
| 1.5.1 玻色采样实验 .....         | 69  |
| 1.5.2 拓扑量子纠错实验 .....       | 80  |
| 1.5.3 盲量子计算实验实现 .....      | 89  |
| 1.5.4 Shor 算法的光学实现 .....   | 93  |
| 1.5.5 基于簇态的单向量子计算实验 .....  | 97  |
| 1.5.6 基于“非簇态”的单向量子计算 ..... | 103 |
| 1.5.7 求解线性方程组实验 .....      | 111 |
| 参考文献 .....                 | 116 |

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| 2 量子与原子光学新进展/ 张卫平 等 .....               | 123 |
| 2.1 引言 .....                            | 125 |
| 2.2 腔光力学 .....                          | 127 |
| 2.2.1 光的力学效应 .....                      | 127 |
| 2.2.2 基于腔结构的光力学 .....                   | 129 |
| 2.2.3 腔光力学与弱力测量 .....                   | 131 |
| 2.2.4 量子区域的腔光力学 .....                   | 133 |
| 2.2.5 总结和展望 .....                       | 137 |
| 2.3 超冷里德伯原子与光相互作用 .....                 | 138 |
| 2.3.1 里德伯原子简介 .....                     | 138 |
| 2.3.2 光与原子的相互作用 .....                   | 143 |
| 2.3.3 里德伯原子的偶极阻塞效应 .....                | 149 |
| 2.3.4 里德伯原子的应用 .....                    | 151 |
| 2.4 自旋轨道量子气体与规范势 .....                  | 153 |
| 2.4.1 自旋轨道耦合 .....                      | 153 |
| 2.4.2 人造规范势 .....                       | 153 |
| 2.4.3 自旋轨道耦合量子气体 .....                  | 158 |
| 2.4.4 自旋轨道耦合与安德森局域化 .....               | 160 |
| 2.5 相位测量与量子噪声 .....                     | 163 |
| 2.5.1 相位测量 .....                        | 163 |
| 2.5.2 马赫-曾德(Mach-Zehnder)干涉仪的相位测量 ..... | 165 |
| 2.5.3 量子效应增强的相位测量 .....                 | 169 |
| 2.5.4 总结与展望 .....                       | 176 |
| 2.6 二维磁光阱与预报式单光子源 .....                 | 177 |
| 2.6.1 二维磁光阱 .....                       | 177 |
| 2.6.2 提高光学深度 .....                      | 180 |
| 2.6.3 可控预报式单光子源 .....                   | 182 |
| 2.6.4 窄线宽时域波函数可控的单光子 .....              | 184 |
| 2.6.5 应用 .....                          | 186 |
| 2.7 拉曼散射中的量子关联 .....                    | 187 |
| 2.7.1 原子系综中的拉曼散射 .....                  | 187 |
| 2.7.2 原子合作自旋激发 .....                    | 187 |
| 2.7.3 合作自旋激发-光子关联 .....                 | 188 |

|                                                            |            |
|------------------------------------------------------------|------------|
| 2.7.4 自旋激发-光子操控的应用 .....                                   | 190        |
| 2.8 光量子关联干涉仪 .....                                         | 193        |
| 参考文献 .....                                                 | 202        |
| <b>3 腔量子电动力学与单原子操控/ 张天才 李 刚 .....</b>                      | <b>211</b> |
| 3.1 腔量子电动力学: 真空及其与原子的作用 .....                              | 213        |
| 3.2 腔量子电动力学的基本原理和处理方法 .....                                | 221        |
| 3.2.1 箱子中的电磁场 .....                                        | 221        |
| 3.2.2 封闭箱子中光与原子的作用: 从半经典到全量子, 从封闭微小空间到无穷大自由空间(无穷大箱子) ..... | 225        |
| 3.2.3 开放腔系统中光与原子的作用 .....                                  | 237        |
| 3.2.4 真实的腔-原子系统: 从大系统到小系统, 从弱耦合到强耦合 .....                  | 242        |
| 3.2.5 小结 .....                                             | 252        |
| 3.3 腔量子电动力学的基本实验技术和方法 .....                                | 253        |
| 3.3.1 中性原子操控技术 .....                                       | 253        |
| 3.3.2 微光学腔的构建、测量与控制技术 .....                                | 262        |
| 3.3.3 单粒子测量技术 .....                                        | 275        |
| 3.3.4 小结 .....                                             | 284        |
| 3.4 腔量子电动力学的发展历史、现状和未来 .....                               | 284        |
| 3.4.1 历史回顾 .....                                           | 284        |
| 3.4.2 实验进展 .....                                           | 286        |
| 3.4.3 未来发展 .....                                           | 304        |
| 参考文献 .....                                                 | 308        |
| <b>4 微腔光机械系统及其拓展应用/ 朱卡的 李金金 何 炜 .....</b>                  | <b>323</b> |
| 4.1 绪论 .....                                               | 325        |
| 4.1.1 光学谐振腔的研究背景 .....                                     | 325        |
| 4.1.2 微米(纳米)机电系统的研究背景 .....                                | 327        |
| 4.1.3 腔光力学系统的研究背景 .....                                    | 329        |
| 4.2 微腔光机械系统 .....                                          | 331        |
| 4.2.1 理论模型 .....                                           | 332        |
| 4.2.2 微腔光机械系统中的常规模式分裂 .....                                | 334        |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 4.2.3 微腔光机械系统中的快慢光现象 .....   | 338 |
| 4.2.4 微腔光机械系统中的全光克尔开关 .....  | 347 |
| 4.2.5 微腔光机械系统中的存光现象 .....    | 351 |
| 4.3 广义腔光机械系统 .....           | 357 |
| 4.3.1 广义腔光机械系统模型 .....       | 357 |
| 4.3.2 最小的广义腔光机械系统——量子点 ..... | 365 |
| 4.3.3 基于碳纳米管的广义腔光机械系统 .....  | 371 |
| 4.3.4 其他广义腔光机械系统 .....       | 382 |
| 参考文献 .....                   | 397 |
| 索引 .....                     | 407 |





# 光量子计算

姚星灿 陈增兵 潘建伟