

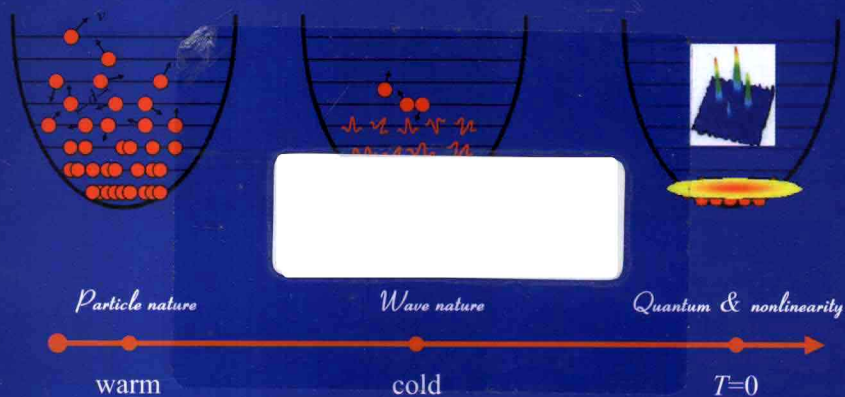


上海科技专著出版资金资助

原子光学

—— 基本概念、原理、技术及其应用

印建平◎编著



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

上海科技专著出版资金资助项目

原子光学

——基本概念、原理、技术及其应用

印建平 编著



上海交通大学出版社

内 容 提 要

原子光学是一门研究中性原子与电场、磁场和光场等物质相互作用(包括原子之间相互作用)及其激光冷却、囚禁、操控与应用的新兴学科。本书主要介绍原子光学的基本概念、基本原理、技术方案与实验结果及其最新进展。全书共分 14 章,包括原子光学概论、基础原子光学、冷原子导引技术、几何原子光学及其器件、波动原子光学及其器件、原子干涉仪、玻色-爱因斯坦凝聚实验、量子原子光学、非线性原子光学、晶格原子光学及其应用、集成原子光学及其原子芯片、空心光束与暗束原子光学、基于腔内 QED 效应的单原子光学和应用原子光学等。

本书可供从事激光冷却与囚禁、冷原子物理、原子光学、分子光学、精密光谱学、精密测量、量子频标、量子光学、非线性光学和量子信息科学等研究的科研人员、研究生和工程技术人员参考,也可用作科研院所、高等院校等相关专业的高年级本科生或研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

原子光学:基本概念、原理、技术及其应用/印建平编著. —上海:上海交通大学出版社, 2012
ISBN 978-7-313-08830-7

I. ①原… II. ①印… III. ①原子物理学—光学
IV. ①0562②043

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 172408 号

本书出版由上海科技专著出版资金资助

原子光学

——基本概念、原理、技术及其应用
印建平 编著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话: 64071208 出版人: 韩建民

常熟市华通印刷有限公司印刷 全国新华书店经销

开本: 710 mm×1000 mm 1/16 印张: 39 字数: 803 千字

2012 年 12 月第 1 版 2012 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-313-08830-7/O 定价: 80.00 元

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: 0512-52391383

出版说明

科学技术是第一生产力。21 世纪,科学技术和生产力必将发生新的革命性突破。

为贯彻落实“科教兴国”和“科教兴市”战略,上海市科学技术委员会和上海市新闻出版局于 2000 年设立“上海科技专著出版资金”,资助优秀科技著作在上海出版。

本书出版受“上海科技专著出版资金”资助。

上海科技专著出版资金管理委员会

序 一

虽然原子光学的研究可追溯到一百年前 L. Dunoyer 等人的原子束实验以及后来 O. Stern 和 V. R. Frisch 等人的原子束磁、光偏转与分束、原子束反射与衍射实验,但是原子光学的快速发展仅用 30 余年的时间就书写出了辉煌的历史新篇章。特别是 20 世纪 90 年代以来,激光冷却、囚禁与操控中性原子的理论与实验研究的快速发展,使得冷原子物理、量子光学、精密测量和量子频标等前沿学科发生了历史性的变革,开创了一个全新的涉及面广的研究领域,并相继诞生了以原子导引、原子束偏转(折射)、原子束准直、原子束反射与聚焦成像等为代表的几何原子光学;以原子波导、原子束衍射、原子束分束与干涉、原子全息术等为代表的波动原子光学;以微结构中的原子微波导、微囚禁、微阱玻色-爱因斯坦凝聚(BEC),甚至 BEC 列阵等为代表的集成原子光学及其原子芯片;以原子气体中的 BEC、费米量子简并、原子激光及其相干性、原子自旋压缩态、原子纠缠态和以 BEC 为研究对象的量子原子光学;以及以光速减慢、原子物质波中的四波混频、原子孤子和 BEC 中的超流、Vortex、超辐射等为代表的非线性原子光学等分支学科,从而形成了一门全新的类似于光子光学的“原子光学”学科。

原子光学发展到今天,不仅在原子激光冷却、囚禁与操控、原子 BEC 与原子激光、费米原子量子简并等基础研究领域取得了一系列重大的创新性研究成果和突破性进展,并分别于 1997 年(S. Chu, C. Cohen-Tannoudji, W. D. Phillips)和 2001 年(E. A. Cornell, W. Ketterle, C. E. Wieman)获得了两次诺贝尔物理学奖,而且在超冷原子物质波的干涉计量、精密测量、量子频标、量子计算与量子信息处理等应用研究领域也取得了一系列重大的实验进展。例如,人们相继研制成功了各种高精度($10^{-16} \sim 10^{-18}$)的冷原子(或离子)光钟和大面积($102 \text{ } \mu\text{m}^2$)原子干涉仪,精密测量了引力波红移和相对论时间扩张,实现了多粒子间的量子纠缠和量子远程传输,以及单原子运动轨迹的反馈控制与显微镜成像等。这些科技成果极大地丰富了原子光学的研究内容,并推动了原子光学的蓬勃发展。

本书作者印建平教授是我国最早进入原子光学研究领域的科技工作者之一,就激光冷却与囚禁、原子分子与光物理(AMO)、原子光学与分子光学、激光科学与量子光学等领域中的基本物理问题与相关技术及其应用开展了深入系统的理论与实验研究,

并取得了一系列的创新性研究成果。特别是在空心光束的产生与暗束原子光学、中性原子的强度梯度冷却、冷原子激光导引与磁导引、冷原子磁晶格与磁光晶格、全光型原子 BEC 的实现与研究等方面开展了一些重要的创新性研究工作。他应《Progress in Optics》主编和《Physics Report》编辑的邀请,撰写了两篇有关空心光束与暗束原子光学、全光型 BEC 和费米原子量子简并的长篇综述文章;同时为了让国内的广大物理科技工作者对原子光学有一个较为全面深入的认识,开展了有关《原子光学》的专题讲座和科普介绍工作,发表了一系列有关原子光学研究的综述文章。此外,印建平教授早在 2000 年就开设了“激光冷却与囚禁”和“原子分子光学”研究生课程,并于 2004 年和 2006 年分别编写了《原子分子光学》和《激光冷却与囚禁》两本研究生教学讲义。本专著是在《原子分子光学》讲义和 10 余年研究生教学实践的基础上编写而成的。

本书系统介绍了原子光学的基本概念、基本原理、技术方案和实验结果及其最新进展。本书的主要特点是略去了冗长烦琐的数学推导,尽量给出简单的理论模型、清晰的物理图像和学科发展的主线,并详尽介绍了原子光学实验的最新进展及其应用前景,是国内第一部系统介绍“原子光学”的学术专著。本书适合于冷原子物理、原子光学、分子光学、量子光学、量子信息科学、非线性物理、凝聚态物理和精密光谱学及精密测量物理等相关专业本科生、研究生和科研工作者用作参考书,也适合于冷原子物理、原子光学、分子光学、量子频标和激光光谱学及精密测量专业研究生或高年级本科生用作教材。

王育竹

2012 年 6 月 18 日

于中国科学院上海光学精密机械研究所

序 二

物质粒子(原子、分子、中子、电子和离子等)形成的粒子束和物质波也可以像光束和光波那样发生反射、折射(偏转)、准直和聚焦,以及衍射、散射、分束和干涉等现象,并实现几何光学和物理光学的操作。因此,在物理学中产生了原子(分子)光学、中子光学、电子光学、离子光学等分支学科。对于超冷原子,还可以引起孤子、四波混频、超辐射等非线性光学和量子光学的许多现象,其内涵要远比中子光学和电子、离子光学更为丰富和深远。

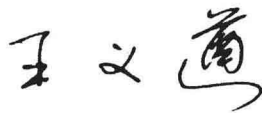
原子光学的发展可以追溯到一百年前 L. Dunoyer 的原子束实验。此后,斯特恩(O. Stern)等人实现了磁偏转和分束,弗里斯(V. R. Frisch)等人实现了光偏转和晶体表面的衍射。然而,它真正引起物理学界的重视,并且蓬勃发展起来却比中子与电子光学要晚,大约是在 20 世纪 80 年代激光冷却与陷俘原子取得重大进展以后,已是第一次原子束实验 70 年以后的事了。不是完全偶然,这个间隔恰好与稀薄气体玻色-爱因斯坦凝聚从预言到实现相吻合,而后者对原子光学研究领域的扩展与深化发挥了重要作用。原子光学发展相对滞后的原因或许是:原子的动量大,德布罗意波长一般很短,波动性质不明显,只有在冷却到低温,原子速度很小的时候才显出物质波的本性;其次是原子具有较大的质量和体积,难以穿透通常物体,而且原子内部有结构,易于受电、磁场与其他粒子的相互作用,其运行轨迹还受到地球重力场的作用,这样就不易对原子束进行光学操控。这就难怪原子光学的主要发展是在激光冷却和陷俘原子取得重要成就,对操控原子具有多种实用手段之后了。

目前,原子(分子)光学已经成为原子分子物理学,甚至整个物理学的一个十分丰富的分支。它的内容包括:几何原子光学、波动原子光学、非线性原子光学、量子原子光学、集成原子光学,以及它们的许多应用等。它涉及大量各不相同的物理现象,涵盖:原子束的偏转(折射)、反射、分束、聚束、散射、衍射、干涉,原子孤子、原子混沌、四波混频、玻色-爱因斯坦凝聚与原子激光(原子激光器)、超流态、涡旋等。应用这些现象,科学家们发明了各种各样的原子光学器件,诸如:原子准直器、分束器、导引器、原子漏斗、原子透镜、原子镊子、原子陀螺、原子开关、原子马达,等等。利用这些现象和许多原子光学单元器件,以及它们和电、磁场及激光冷却与陷俘等技术的协同与组合,

人们开发出来如冷原子喷泉钟、冷原子光钟、原子干涉仪等大型复杂的仪器设备,在精密物理测量中发挥着极大作用。另一方面,利用微细机械与电子加工技术,人们可以将原子光学单元器件小型化、微型化,集成原子芯片,以完成一系列原子光学的精细操作。因此,原子光学不仅具有深刻的基础物理意义,而且可以找到广泛的应用,是当今科学技术前沿的一个重要方向。

上面这些,以及其他许多没有提到的原子光学的基本概念、主要现象、基本原理与实验方法、重要应用,以及最新进展等都在本书中有深入浅出的介绍,给出了简明的理论模型和清晰的物理图像。

本书是国内本领域的第一本专门著作。对于物理学或相关专业的学生来说,只要具备基础物理学与理论物理学的基本知识,并有一定的原子激光冷却与囚禁(陷阱)的基本概念,就可读懂本书。对于从事本领域的基础研究和应用开发工作的工作者,本书是一本很有用的入门指导。当然,本书也可以当做研究生或高年级本科生教材或主要参考读物使用。



2012年6月22日

于北京大学(北京蓝旗营)

前 言

虽然第一个有关原子束在金属和晶格表面上反射与衍射的原子光学实验始于 20 世纪 30 年代初,但是原子光学的真正快速发展仅约 30 年的时间。特别是 20 世纪 90 年代以来,激光冷却、囚禁与操控中性原子的理论与实验研究取得了一系列重大进展,使得激光科学、冷原子物理、量子光学、精密测量、量子频标和量子信息科学等发生了历史性变革,开创了一个全新的研究领域,并相继诞生了以原子气体中的玻色-爱因斯坦凝聚(BEC)、费米量子简并、原子激光、原子压缩态、原子纠缠态和以 BEC 为研究对象的量子原子光学;以光速减慢、原子物质波中的四波混频、原子孤子和 BEC 中的超流、Vortex 等为代表的非线性原子光学;以及以微结构中的原子波导、微囚禁、微阱 BEC 及其 BEC 列阵等为代表的集成原子光学及其原子芯片等分支学科,从而形成了一门全新的类似于光子光学的“原子光学”学科。

原子光学发展到今天,已经取得了一系列重大的创新性研究成果和突破性实验进展,并于 1997 年和 2001 年获得了两次诺贝尔物理学奖。毫无疑问,在同一个“原子光学”研究领域内、在相隔四年的时间内连续获得两次诺贝尔物理学奖,这在诺贝尔物理学奖的百年历史上是绝无仅有的。另一方面,近年来人们发展了各种原子光学技术,开展了超冷原子在物质波干涉计量、精密测量、量子频标、量子计算与量子信息处理等领域中的应用研究,并取得了一系列重大的实验进展。例如,人们相继研制成功了各种高精度($10^{-16} \sim 10^{-18}$)的冷原子(或离子)光钟和大面积($10^2 \text{ } \mu\text{m}^2$)原子干涉仪,精密测量了引力波红移和相对论时间扩张,实现了多粒子间的量子纠缠和量子远程传输,以及单原子运动轨迹的反馈控制与显微镜成像等。这些研究成果表明原子光学至今仍然是一个充满活力、充满生机并且魅力无穷的新兴学科,并孕育着广阔的应用前景。

我国的原子光学研究以王育竹院士领衔始于 20 世纪 70 年代末,到 90 年代以后取得了快速的发展,目前已经形成了一支从事冷原子物理、原子光学、分子光学、量子频标、精密测量、量子计算与信息处理等理论与实验研究的强大队伍,特别是研究生队伍越来越壮大。在教学与科研实践中,他们迫切希望有一本系统介绍原子光学基本概念、基本原理、技术方案与实验结果及其最新进展的参考书。然而,目前国际上仅有两本与原子光学有关的专著。即由美国纽约州立大学 H. J. Metcalf 教授等人于 1999

年编著的《Laser Cooling and Trapping》和美国亚利桑那大学 P. Meystre 教授于 2001 年编著的《Atom Optics》。前者主要介绍了中性原子激光冷却与囚禁的基本原理、技术方案及其实验结果, 仅仅涉及几何原子光学、波动原子光学与 BEC 实验等少量有关“原子光学”的内容; 后者虽然名曰《原子光学》, 但是一本理论物理学家编写的理论专著, 几乎没有原子光学技术方案、实验结果及其最新进展的介绍, 而且仅仅叙述了线性原子光学(即几何与波动原子光学)、非线性原子光学和量子原子光学等内容, 缺乏有关“原子光学”研究内容的系统介绍。国内仅有北京大学王义道教授的《原子的激光冷却与陷俘》一本专著。这是一本系统介绍“原子激光冷却与囚禁”的专著, 既有深入浅出的理论描述, 又有详尽的实验介绍, 但是有关“原子光学”内容的介绍很少。因此, 为了适应国内原子光学及相关领域的快速发展, 并配合科研院所、高等院校物理系本科生、研究生教学的需要, 编写一本全面系统介绍“原子光学”基本概念、基本原理、技术方案、实验结果及其最新进展的专著是非常迫切的, 也是十分必要的。特别是对于那些刚刚进入该领域或向往进入该领域的年轻科技工作者或研究生, 写一本概念清晰、内容全面、理论浅出和实验详尽的专著, 更是十分必要的。

本人带着研究空心光束与暗束原子光学、实现全光型 BEC 的动机, 从 20 世纪 90 年代初开始关注、跟踪与调研原子光学领域的发展, 并于 1995 年进入该领域, 开展了有关空心光束的产生及其原子光学应用, 原子激光冷却、囚禁与操控等的理论与实验研究, 并取得了一些创新性研究成果。另一方面, 从 2000 年开始, 本人从事硕博研究生的教学工作, 开设了“激光冷却与囚禁”与“原子分子光学”课程, 并于 2004 年和 2006 年分别编写了《原子分子光学》和《激光冷却与囚禁》(上、下册) 两本研究生教学讲义。因此, 本专著是在《原子分子光学》讲义和 10 余年的研究生教学实践的基础上通过不断更新、不断补充、不断修改与完善编写而成的, 希望为更多的年轻学子进入该领域从事学习与科学研究提供一本入门参考书。

本书从理论与实验两个方面, 并从理论与实验相结合的角度根据原子光学学科与技术的发展主线和理论体系, 全面系统地介绍了“原子光学”的基本概念、基本原理、技术方案、实验结果及其最新进展。本书由 14 章组成: 第 1 章是原子光学概论, 主要论述原子光学的定义、学科分类与研究内容, 讨论原子光学与光子光学的异同, 复习原子物理的基础知识, 并简单介绍冷原子外场操控的基本原理; 第 2 章是基础原子光学, 主要介绍原子激光冷却与囚禁的基本原理、实验方案及相关技术, 冷原子束的实验产生等, 为开展原子光学的研究奠定实验基础; 第 3 章主要介绍了各种冷原子磁、光导引的技术方案及其实验结果; 第 4 章为几何原子光学及其器件, 主要介绍了原子束的反射、准直、偏转(折射)、导引和聚焦成像等; 第 5 章主要介绍了原子物质波的衍射、分束、干

涉、波导和原子全息术等波动原子光学及其器件;第6章详细介绍了各种原子外态和内态干涉仪的基本原理、物理构造、实验结果及其应用研究;第7章详细介绍了原子玻色-爱因斯坦凝聚(BEC)实验、分子BEC与费米原子对凝聚实验及其最新进展;第8章是量子原子光学,主要介绍了原子量子态的制备、原子激光及其相干性、费米原子量子简并和超冷量子简并气体的应用等内容;第9章是非线性原子光学,主要介绍了原子物质波中的孤子、光速减慢与超光速现象、四波混频、超流与涡流、量子混沌和Josephson效应等;第10章详细介绍了冷原子光学晶格、磁晶格、磁光晶格的形成、操控及其应用等晶格原子光学内容;第11章为集成原子光学及其原子芯片,主要介绍了原子微波导、微囚禁、原子芯片、微阱原子BEC及其列阵等内容及其相关技术;第12章主要介绍了空心光束的产生及其在原子光学中的应用;第13章详细介绍了腔内单原子的激光冷却、囚禁与操控及其应用等基于腔内QED效应的单原子光学;最后一章为应用原子光学,主要介绍了冷原子或超冷原子在原子干涉计量、精密测量、原子刻印、冷原子光钟、原子全息术和量子信息科学等领域中的应用及其研究成果。本书中大部分插图来自相应的引文,这里不作一一说明;部分插图来自国内外相关研究小组的私人通信。书末附录主要来自H. J. Metcalf等人的专著《Laser Cooling and Trapping》。

编写本书的主要目的是为从事冷原子物理、原子光学、分子光学、量子光学、量子频标、量子信息科学、精密光谱学与精密测量技术等方向的科技工作者、本科生、研究生提供一本基础参考书。考虑到初入原子光学领域的年轻学子的专业基础,本书的内容以介绍原子光学的基本概念、基本原理、实验方法及其最新进展为主,略去了冗长烦琐的理论推导,尽量给出简单的理论模型、清晰的物理图像和学科发展的主线,并简单介绍了原子光学的应用前景。只要具备热力学与统计物理学、电动力学和量子力学以及光学、电磁学、原子物理学等基础知识,即可阅读本书。然而,若要真正掌握原子光学研究的基本理论和实验技术,还需要阅读大量的原始文献和参考资料,勤于思考与实践,并在实验研究中加深理解、丰富知识。因此,本书只能起到抛砖引玉的作用。

在即将成书之际,作者首先十分感谢两位恩师:中科院上海光机所的王育竹院士和北京大学的王义道教授将我引进了令人向往的原子光学领域。他们渊博的学识、敏锐的科学洞察力、严谨的治学态度、广阔的研究视野、精湛的学术造诣、勤奋的科研精神,让我深深钦佩,终生受益。本人还要感谢中国科技大学物理系的郭光灿院士在我硕士学习期间所给予《量子光学》和《非线性光学》课程的教授,为我从事原子光学的研究及本书的写作打下了良好的基础。其次,我要感谢所有曾经一起工作过的和目前正在一起工作的合作者,在本书中大量引用了与他们合作的研究工作。他们包括韩国首

尔大学物理系的 W. H. Jhe 教授、美国佛罗里达国际大学物理系的朱一夫教授、南通大学物理系的纪宪明教授和沐仁旺教授、东华理工大学物理系的陆俊发教授、苏州大学物理系的高伟建副教授,以及华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室的各位同仁。接着,我需感谢本小组一起工作(过)的硕、博士研究生:刘南春、胡建军、夏勇、倪赞、郑萍、恽旻、邓联忠、代萌、王正岭、尹亚玲、陈丽雅、许雪艳、李会容、刘润琴、刘泱、钟标、周琦、侯顺永、吉翔、徐淑武、邓英超、顾振兴、王振霞、郭超修、李胜强、李兴佳、王琴、邓敏等。最后,我还要感谢本书申请出版基金时帮我推荐的王育竹院士、王义道教授和清华大学物理系的李师群教授,是他们的全力支持与热情鼓励使我坚持写作至今,并终于完稿;还要感谢国内外长期关心、支持和帮助我和本研究小组的所有老师、同仁和朋友们;感谢国家自然科学基金委(10174050, 10674047, 10434060, 11034002, 11274114)、科技部(2006CB921604, 2011CB921602)和上海市科委(07JC14017)对本小组研究工作的资助。感谢华东师范大学研究生院和精密光谱科学与技术国家重点实验室对本书出版的支持与资助。作者特别感谢夫人李旭辉女士的关心与支持。

由于时间仓促、本人精力与学识有限,在内容和编写方式等方面若存在不妥、错误之处,恳请广大读者以及有关专家批评指正(Email: jpyin@phy. ecnu. edu. cn),谢谢!

印建平

于华东师范大学丽娃河畔

精密光谱科学与技术国家重点实验室

2011 年 10 月

目 录

第 1 章 原子光学概论	001
1.1 引言	001
1.2 原子光学的分类及其研究内容	002
1.3 原子光学与光子光学的比较	003
1.4 中性原子在外场中的三个效应	004
1.4.1 中性原子的偶极矩	004
1.4.2 塞曼(Zeeman)效应	006
1.4.3 直流斯塔克(Stark)效应	007
1.4.4 交流斯塔克效应	008
1.5 原子能级的超精细分裂及其塞曼效应	008
1.5.1 考虑核自旋时原子的总磁矩	008
1.5.2 超精细能级的塞曼效应	010
1.5.3 选择定则与跃迁谱线的偏振	010
1.6 冷原子操控的基本原理	012
1.6.1 中性原子的激光操控原理	012
1.6.2 中性原子的静磁操控原理	013
1.6.3 中性原子的静电操控原理	013
1.6.4 中性原子的电、磁、光偶极相互作用力	013
参考文献	014
第 2 章 基础原子光学	016
2.1 引言	016
2.2 中性原子的激光冷却机制与技术	017
2.2.1 中性原子的多普勒冷却	017
2.2.2 中性原子的亚多普勒冷却	019
2.2.3 中性原子的亚反冲冷却	023
2.3 冷原子的磁、光囚禁与磁光阱技术	024
2.3.1 冷原子的光学囚禁	025
2.3.2 冷原子的静磁囚禁	030

2.3.3 冷原子的磁光囚禁	033
2.4 冷原子束或超冷原子束的产生及其实验研究	034
2.4.1 采用激光扫频冷却技术的冷原子束产生方案	034
2.4.2 采用塞曼减速器的冷原子束产生方案	035
2.4.3 采用预冷原子束和磁光阱的冷原子束产生方案	037
2.4.4 采用蒸气池磁光阱的冷原子束产生方案	038
2.4.5 采用亚反冲冷却技术的超冷原子束产生方案	041
2.5 冷原子束或超冷原子束的应用	042
参考文献	045
第3章 冷原子的磁、光导引及其应用	049
3.1 引言	049
3.2 中性原子的激光导引方案与技术	049
3.2.1 空心光纤中红失谐高斯模式的冷原子激光导引	050
3.2.2 空心光纤中蓝失谐消逝波光场的冷原子激光导引	052
3.2.3 空心金属波导中蓝失谐 TE_{01} 模式的冷原子激光导引	053
3.2.4 单模光纤束中蓝失谐消逝波光场的冷原子激光导引	056
3.2.5 采用红失谐高斯光束的冷原子激光导引	059
3.2.6 采用蓝失谐空心光束的冷原子激光导引	060
3.3 中性原子的静磁导引与技术	061
3.3.1 采用载流导线的磁导引	061
3.3.2 采用永久磁管的磁导引	066
3.3.3 采用载流螺线管的磁导引	067
3.3.4 采用载流导线的交流磁导引	068
3.3.5 采用载流导体的磁导引	070
3.4 冷原子导引技术的应用	070
参考文献	076
第4章 几何原子光学及其器件	080
4.1 引言	080
4.2 原子漏斗技术及其应用	080
4.2.1 原子漏斗的工作原理	081
4.2.2 原子漏斗方案与研究结果	081
4.2.3 原子漏斗的潜在应用	087
4.3 原子束的反射及原子反射镜	089
4.3.1 原子反射镜方案与研究结果	090

4.3.2 原子反射镜的应用·····	097
4.4 原子束的偏转(折射)、准直及其应用·····	098
4.5 原子束的聚焦成像及原子透镜·····	100
4.5.1 原子透镜方案与研究结果·····	100
4.5.2 原子透镜的应用·····	108
参考文献·····	109
第5章 波动原子光学及其器件 ·····	115
5.1 引言·····	115
5.2 原子束衍射与原子光栅·····	116
5.2.1 原子光栅·····	116
5.2.2 原子束的衍射原理·····	118
5.2.3 原子束的光栅衍射实验·····	119
5.2.4 最新研究进展·····	127
5.2.5 原子光栅的应用·····	128
5.3 原子波导及其原子分束器·····	129
5.3.1 原子物质波的波导·····	129
5.3.2 导引型原子分束器·····	130
5.4 原子束的分束与干涉实验·····	139
5.4.1 自由空间原子分束器·····	139
5.4.2 原子分束器的应用·····	142
5.4.3 原子束的干涉与杨氏干涉实验·····	143
5.5 原子全息学与技术·····	147
参考文献·····	149
第6章 原子干涉仪及其应用 ·····	154
6.1 引言·····	154
6.2 原子干涉仪的分类·····	155
6.3 原子质心运动(外态)干涉仪·····	156
6.3.1 机械分束原子干涉仪·····	156
6.3.2 驻波场原子干涉仪·····	161
6.3.3 静电场原子干涉仪·····	166
6.3.4 静磁场原子干涉仪·····	169
6.3.5 光偶极原子干涉仪·····	177
6.3.6 时域原子干涉仪·····	179
6.4 原子内态干涉仪·····	181

6.4.1	行波光场原子干涉仪的分束与合束原理	181
6.4.2	行波光场原子干涉仪的技术方案与结果	181
6.4.3	脉冲布拉格驻波衍射光栅干涉仪	187
6.4.4	微波-光脉冲 Ramsey 干涉仪	188
6.4.5	受激 Raman 跃迁型原子干涉仪	190
6.4.6	偏振光场原子干涉仪	192
6.5	原子干涉仪的应用	195
6.5.1	重力加速度的测量	195
6.5.2	微小转速的测量	195
6.5.3	气体介质折射率的测量	196
6.5.4	介质电极化率的测量	196
	参考文献	198
第7章	玻色-爱因斯坦凝聚实验及其最新进展	203
7.1	引言	203
7.2	玻色-爱因斯坦凝聚及其形成条件与途径	204
7.2.1	几个基本概念	204
7.2.2	形成 BEC 的条件与途径	206
7.2.3	制备 BEC 的实验过程	207
7.3	原子玻色-爱因斯坦凝聚的实验概况及其最新进展	208
7.3.1	具有正散射长度的碱金属原子 BEC	209
7.3.2	具有负散射长度的碱金属原子 BEC	216
7.3.3	其他原子(^1H , ^4He , ^{174}Yb , ^{52}Cr 和 ^{84}Sr)的 BEC 实验	220
7.3.4	全光型 BEC 实验	224
7.3.5	双阱和微阱 BEC	226
7.3.6	低维 BEC 的实现	229
7.4	分子 BEC 及费米原子对凝聚的实验研究及其最新进展	232
7.4.1	全光型 $^6\text{Li}_2$ 分子 BEC 的实现	232
7.4.2	全光型 $^{40}\text{K}_2$ 分子 BEC 的实现	233
7.4.3	费米原子对凝聚的实现	234
7.5	超冷 BEC 凝聚体的应用	235
7.5.1	BEC 凝聚体中超冷分子的产生	235
7.5.2	在量子信息科学中的应用	236
7.5.3	原子-分子系统相干性的实验研究	238
	参考文献	240

第 8 章 量子原子光学	249
8.1 引言	249
8.2 原子量子态的理论研究与实验制备	250
8.2.1 原子 EPR 态的制备	250
8.2.2 原子自旋压缩态的制备	251
8.2.3 原子纠缠态的制备	252
8.2.4 BEC 原子数压缩态的制备	253
8.2.5 原子量子态制备的最新进展	255
8.3 BEC 原子的光散射及其量子光学效应	255
8.3.1 BEC 原子的光散射及其应用	255
8.3.2 BEC 原子散射光的量子相干性	256
8.3.3 BEC 原子凝聚体的量子统计性质	258
8.3.4 BEC 凝聚体中的其他量子光学效应	259
8.4 原子激光的产生及其实验研究	264
8.4.1 原子激光的定义、构造及特征参数	264
8.4.2 原子激光的产生及其实验结果	264
8.4.3 原子激光的经典起伏	268
8.4.4 最新研究进展	269
8.5 BEC 凝聚体或原子激光的量子相干性及其实验测量	269
8.5.1 空间相干性的实验测量与研究	269
8.5.2 时间相干性的实验测量与研究	271
8.6 费米原子气体的量子简并	273
8.6.1 费米 ⁴⁰ K 原子气体的量子简并	273
8.6.2 费米 ⁶ Li 原子气体的量子简并	274
8.6.3 最新研究进展	275
参考文献	276
第 9 章 非线性原子光学	280
9.1 引言	280
9.2 BEC 凝聚体中的原子物质波孤子	281
9.2.1 原子孤子的产生机制及其分类	281
9.2.2 BEC 凝聚体中的暗孤子	281
9.2.3 BEC 凝聚体中的亮孤子	283
9.2.4 BEC 凝聚体中的孤子串: 孤子原子激光	284
9.2.5 BEC 中的晶格孤子和双分量 BEC 中的暗孤子	285
9.2.6 BEC 中原子物质波孤子研究的最新进展	286