

光学学报

高精度法布里-珀罗光学微腔及其在强耦合腔量子电动力学中的应用

张天才^{1,2*}, 毋伟^{1,2}, 杨鹏飞^{1,2,3}, 李刚^{1,2**}, 张鹏飞^{1,2}

¹ 山西大学光电研究所量子光学与量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006;

² 山西大学极端光学协同创新中心, 山西 太原 030006;

³ 山西大学大数据科学与产业研究院, 山西 太原 030006

摘要 强耦合腔量子电动力学(cavity quantum electrodynamics, 简称 C-QED)系统主要用于研究受限于空间中的光与物质相互作用的物理现象。该系统为深入认识原子与光子间相互作用的动力学行为提供了有力工具。高精度法布里-珀罗光学微腔(Fabry-Perot cavity, F-P 腔)作为强耦合 C-QED 系统的核心部分,是实现光与物质间的强耦合、探索极端条件下光与物质间的相互作用、精确操控原子以及灵敏探测相关过程等的基础。简要介绍了高精度 F-P 腔及其在强耦合 C-QED 中的应用,包括研究背景、现状及发展动态,并就未来的发展和应用进行了展望。

关键词 量子光学; 腔量子电动力学; 光学微腔; 光与物质相互作用

中图分类号 O4-1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0127001

High-Finesse Micro-Optical Fabry-Perot Cavity and Its Applications in Strongly Coupled Cavity Quantum Electrodynamics

Zhang Tiancai^{1,2*}, Wu Wei^{1,2}, Yang Pengfei^{1,2,3}, Li Gang^{1,2**}, Zhang Pengfei^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

² Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

³ Institute of Big Data Science and Industry, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

Abstract The main goal of strongly coupled cavity quantum electrodynamics (C-QED) is to study physical phenomena occurring during the interaction between light field and matter confined in a finite space. The C-QED system provides an effective tool for the deep understanding of the dynamic behaviors of atoms interacting with photons. As the core of the C-QED system, the high-finesse Fabry-Perot (F-P) optical cavity plays the basic roles in the realization of strong coupling between light and matter, in the exploring of the interaction between light and matter under the extreme conditions, in the precision control of atoms, and in the sensitive detection of the related processes. We briefly introduce the high-finesse F-P cavity and its applications in strongly coupled C-QED system, including its research background, status and development trend. In addition, the future development and potential applications are prospected.

Key words quantum optics; cavity quantum electrodynamics; optical microcavity; interaction between light and matter

OCIS codes 270.5580; 020.1335; 120.2230

收稿日期: 2020-08-20; 修回日期: 2020-09-05; 录用日期: 2020-09-15

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0304502)、国家自然科学基金(11634008, 11674203, 11574187, 11974223, 11974225)、山西省“1331 工程”重点学科建设计划

* E-mail: tczhang@sxu.edu.cn; ** E-mail: gangli@sxu.edu.cn

1 引言

法布里-珀罗腔(Fabry-Perot cavity, F-P 腔)又称 F-P 干涉仪或 F-P 共振器,自 1897 年由法国人 Fabry 和 Perot 发明以来^[1],作为一种重要的基础光学器件和高精度测量工具,已经被广泛地应用于激光技术^[2-4]、精密光谱学^[5-6]、光学传感^[7-8]、光学标准具^[9-10]、光学天线^[11-12]、光学精密测量^[13]、光学计量^[14-15]及光与物质相互作用^[16-17]等领域。随着现代科技的快速发展,各种特性的 F-P 腔在不同研究领域展现出独特的作用。

F-P 腔是一种特殊的光学腔,广义上是指可以提供模式体积比较小的电磁辐射受限于空间的具有高品质因子的微型 F-P 腔^[18]。当电磁场被限制在腔内时,通过腔内多次往返,光子在腔内的寿命得到大幅度提高,物质与光子间相互作用的时间得到了显著增加。微腔凭借其很小的模体积,能大幅度提高腔内的电场强度或能量密度,从而有效提升物质与电磁场间相互作用的强度,实现物质与光学微腔内电磁场之间的强耦合,在很少的腔内光子数下产生极强的非线性效应;同时,利用光学腔内特定的光场分布可以有效规整原子辐射场的空间模式,为输出的光子提供了良好的模式和定向辐射的特性。凭借其优异的性能,高精度 F-P 腔具备以极高精度(单粒子水平)感知光子和原子等粒子的能力,在弱光非线性效应和强耦合腔量子电动力学(cavity quantum electrodynamics, 简称 C-QED)^[19-20]等研究领域具有重要意义。

传统 F-P 光学微腔的腔镜损耗很低,其结构相对简单,具有低损耗、高品质因子和高可控性等特点^[18],多年来被广泛应用于各种基础实验研究和应用技术中。在研究光与物质间的相互作用方面,随着原子分子和光物理学学科不断发展以及镀膜技术和制作工艺的不断进步,F-P 光学微腔的精细度和光学介入性等不断得到提高。相较其他类型的光学微腔,由超低损耗光学镜片(也称“超镜”,super-mirror)组成的 F-P 微腔凭借其超低光学损耗、超高精细度、高介入性、高可控性及易于与原子系统结合等突出的特点,成为研究强耦合条件下原子-光子相互作用的重要工具,在基础科学研究、光学测量与传感等方面具有重要的应用价值。本文主要介绍了高精度 F-P 光学微腔,特别是 F-P 光学微腔的构建、操控和测量,以及其在微腔-原子强耦合相互作用中的应用,包括相关的背景、发展现状和技术路径

等,并就未来的发展和应用进行了展望。

2 发展历史及现状概述

从 20 世纪 80 年代开始,随着冷原子物理和量子光学的快速发展,实验对光与原子间相互作用的量子操控提出了越来越高的要求,以期实现对原子外态和内态的同时控制,即所谓“全控制(full control)”。这对光与原子间的耦合提出了更高的要求。人们发现,通过把冷原子放置于光学腔中,可以大幅度提高光与原子间作用的强度^[21-22]。在此背景下,高精度 F-P 光学微腔为研究光频区强耦合条件下光子(包括真空)与原子间的相互作用及其在基础物理研究、精密测量和量子信息等领域的应用提供了有力工具。20 世纪 90 年代,随着激光冷却技术在原子物理中的广泛应用,人们首次观察到由光频区少原子与高精度光学微腔耦合导致的模式分裂,实现了光场与少原子的强耦合相互作用^[23],并通过在腔内俘获单个原子,获得了确定性单光子源^[24]。随着超冷原子操控手段的不断进步,人们进一步实现了超冷原子团与高品质光学微腔的强耦合,开辟了探索强耦合环境下多体相互作用的新途径^[25]。经过三十多年的发展,高精度 F-P 光学微腔已经成为研究单个或多个原子与光场间的相互作用、揭示若干量子效应、实现量子调控及演示量子信息处理等的重要器件^[26]。利用光学微腔系统,人们在多原子纠缠^[27]、超冷玻色-爱因斯坦凝聚体与腔的强耦合^[25]、基于腔的量子逻辑操控^[28]及腔增强的精密测量^[29-30]等方面取得了一系列重要进展。

随着光场与原子的耦合强度和原子操控技术要求的不断提高,实验对 F-P 光学微腔性能的要求也越来越高。随着光学加工和镀膜技术的发展,超低损耗超高反射镜片的研制取得了长足的进步,极低损耗的“超镜”得以实现。美国 REO 公司研发出了超镜磨制与镀膜技术,可在 850 nm 波段获得低至 1.6×10^{-6} 的超低损耗镜片,其反射率高达 99.99984%^[31],为构建高精度 F-P 光学微腔提供了可能。在构建基于 F-P 光学微腔的 C-QED 实验系统的过程中,人们通常为了保证适度大小的模体积而不得不牺牲某些性能,以获得综合优势,诸如良好的光学介入性、操控性和整体稳定性。2000 年,加州理工学院的 Kimble 研究组构建了精细度为 4.8×10^5 、长度为 11 μm 左右的高精细度光学微腔,实现了单个原子轨道的测量^[32];此后他们进一步构建了精细度为 4.2×10^5 、长度为 42.2 μm 的光

学微腔,实现了单原子激光^[33]和可控单光子源^[34]的制备。德国马克斯-普朗克研究所的 Rempe 研究组多年来也一直开展 C-QED 研究,他们利用精细度为 $4.3 \times 10^5 \sim 4.4 \times 10^5$ 、长度在 $100 \mu\text{m}$ 左右的高精细度光学微腔,相继完成了基于单个原子的确定性单光子源^[35]、单原子的腔致冷却^[36]、单光子水平的非线性效应^[37]、单原子轨道的反馈控制^[38]、基于单原子的压缩光辐射^[39]以及原子之间纠缠的产生^[40]等一系列工作。2009 年,美国马里兰大学 Orozco 小组利用精细度为 1.1×10^4 、长度为 2.2 mm 的光学腔,实现了腔内单原子的光子突发探测(photon burst detection)^[41]。2010 年,瑞士苏黎世理工的 Esslinger 小组利用精细度为 3.4×10^5 、长度为 $178 \mu\text{m}$ 的微腔,研究了超流气体相变^[42];同年,美国加州伯克利的 Kurn 小组利用精细度为 1.7×10^5 、长度为 $250 \mu\text{m}$ 的微腔,实现了基于超冷原子的可调谐腔光力学系统^[43]。2012 年,奥地利因斯布鲁克大学 Blatt 小组利用精细度为 7.7×10^4 、长度为 2 cm 的光学腔,实现了离子-光子纠缠^[44]等。2020 年,英国 Sussex 大学 Keller 研究组利用基于光纤系统的 F-P 光学微腔,首次实现了单个离子与光学微腔的强耦合^[45]。

国内在各种光学腔的制作和应用研究方面也取得了长足的进步,包括 F-P 光学微腔。北京大学、清华大学、中国科学技术大学、浙江大学、南京大学、南开大学、武汉大学及中国科学院半导体所等国内大学和科研院所,基于不同材料和器件,包括光纤、

铌酸锂晶体和等离子体等,相继实现了多种不同类型的量子微腔,例如光纤环形腔(ring cavity 和 knot cavity)^[46-48]、光纤腔(fiber cavity)^[49-50]、光纤微球腔^[51-53]、微环芯腔(microtoroidal cavity)^[54-57]、铌酸锂微盘腔^[58-59]、平面六边形光学腔(hexagonal cavity)^[60]及等离子腔(plasma cavity)^[61]等。山西大学 C-QED 研究小组多年来一直从事基于高精度 F-P 光学微腔与中性原子的强耦合 C-QED 的实验和理论工作,相继设计和构建了腔长(精细度)分别为 $48 \mu\text{m}$ (213000)^[62]、 $43.9 \mu\text{m}$ (71400)^[63]、 $86 \mu\text{m}$ (330000)^[64]、 3.5 mm (57000)^[65]、 $752.90 \mu\text{m}$ (60330)^[66]和 $335.27 \mu\text{m}$ (60995)^[67]的 F-P 光学微腔系统,开展了包括微腔参数测量及优化、微腔对冷原子的灵敏度探测^[68]、原子与高阶腔模的强耦合相互作用^[64, 69]及基于 C-QED 的光学非互易效应^[67]等方面的研究。下面我们围绕相关方面的关键技术作简要介绍。

3 关键技术

基于高精度 F-P 光学微腔的强耦合 C-QED 系统主要包括三大部分:1) 超低损耗及超稳 F-P 光学微腔的构建及测量系统;2) 基于频率链的 F-P 光学微腔的高精度控制系统;3) 微腔与原子的强耦合系统。整个系统的总体结构如图 1 所示,其中激光的相关参数是以铯原子为例的,PBS 为偏振分光棱镜,D1 和 D2 为探测器,HP 为半波片,TGG 为旋光晶体,MOT 为磁光阱,FORT 为远失谐光学偶极

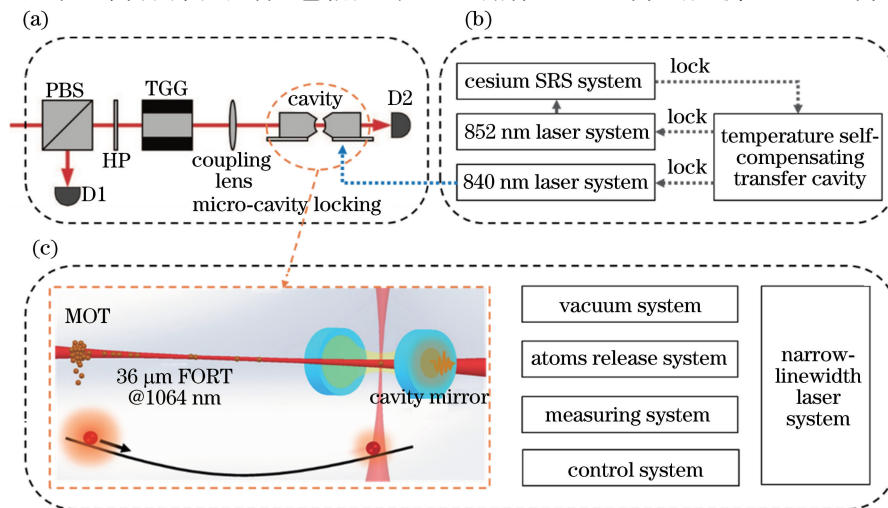


图 1 高精度 F-P 光学微腔以及 C-QED 的总体结构。(a)超镜测量及超稳微腔系统^[63];
(b)基于频率链的微腔高精度控制系统;(c)原子与光学微腔的强耦合系统

Fig. 1 Overall configurations of high-finesse F-P optical micro-cavity and C-QED. (a) Super-mirror test and ultra-stable micro-cavity system^[63]; (b) micro-cavity high-precision control system based on frequency chain; (c) atom-micro-cavity strong coupling system

阱。冷原子与 F-P 光学微腔的结合及整个系统的控制与测量涉及光机电等多方面的有机组合和优化。下面我们将围绕这三个系统,介绍相关的基本原理和关键技术。

3.1 超低损耗及超稳 F-P 光学微腔的构建与测量

衡量超低损耗及超稳 F-P 光学微腔的主要指标是腔的损耗、模体积以及微腔在实验室环境下的控制和锁定精度。以下我们将围绕这三个主要指标分别进行介绍。

由于材料以及加工技术的限制,实际上不可能获得反射率为 100%、无任何吸收和散射损耗的完美腔镜。当单模光场在腔内振荡时,一部分光场会被腔镜吸收和散射,产生无用损耗或者额外损耗,同时,由于透射的存在,腔内光场通过腔镜与外界耦合进而发生能量交换,引起腔场的损耗,即有用损耗或者耦合输出。在 C-QED 实验中,人们通常根据光学微腔的输出光场来确定腔内光场的性质,从而获知腔内光场与物质相互作用的动力学过程。在 C-QED 系统中,应尽可能降低由腔镜吸收和散射引起的无用损耗,同时合理设计有用损耗,这是一个重要的课题。

实验上测量腔镜损耗常用腔衰荡技术(cavity ring down technology, CRDT),其原理如图 2 所示,其中 τ 为透射光衰荡到 $1/e$ 所需的时间, R_1 和 R_2 为两片待测镜片的反射率。将一束初始光强为 I_0 的激光脉冲注入腔中,在不考虑衍射等损耗的情况下,光子在腔中形成衰荡,经过时间 t 后,透射光强 I_t 满足

$$I_t = I_0 \exp\left(-\frac{tcL}{2d}\right), \quad (1)$$

式中: L 为腔的总损耗; c 为真空中的光速; d 为有效腔长。通过测量 τ ,可确定总损耗。若已知一端腔镜的损耗为 L_1 ,待测镜片的反射率可表示为 $R = 1 - L + L_1$;对于由两个对称腔镜组成的光学腔,待测镜片的反射率为 $R_1 = R_2 = 1 - L/2$ ^[62,70]。利用腔衰荡确定的总损耗以及镜片的有用损耗即可获得腔镜的额外损耗。2001 年,Hood 等^[71]利用 F-P 光学微腔一端腔镜的透射和反射信号,直接测量了超镜的有用损耗和额外损耗,测量得到 C-QED 系统的微腔腔镜的透射率和其他额外损耗分别为 4.3×10^{-6} 和 2.9×10^{-6} 。这种测量方法与腔衰荡技术存在的问题是,在不知道两片超镜反射率的情况下,必须假定两片腔镜完全相同,从而可将测量得到的总透射率和总损耗平均到每一片镜片上,进而得到腔镜的有用损耗和额外损耗,因此这种方法无法获得非对称

腔中每片腔镜的有用损耗和无用损耗。考虑到这个问题,我们在两端腔镜分别注入光场,通过同时测量两个方向上的透射和反射信号,确定由每片腔镜的反射率和吸收散射引起的内腔损耗^[63],如图 3 所示。空腔的透射率 T 和两片腔镜的反射率分别满足

$$T = \frac{4T_1T_2\kappa^2}{(\Delta^2 + \kappa^2)L^2}, \quad (2)$$

$$R_i = 1 + \frac{4(T_i^2 - T_i \cdot L)}{L^2}, \quad (3)$$

式中: κ 为腔衰减; Δ 为激光与腔的失谐; R_i 和 T_i ($i=1,2$)分别为两片腔镜的反射率和透射率。功率分别为 P_i^1 和 P_i^2 的两束光从腔的两端入射后,通过测量两束光的透射功率 P_t^1, P_t^2 和反射功率 P_r^1, P_r^2 ,利用(2)、(3)式即可获得两端腔镜的透射率、腔的总损耗及额外损耗。

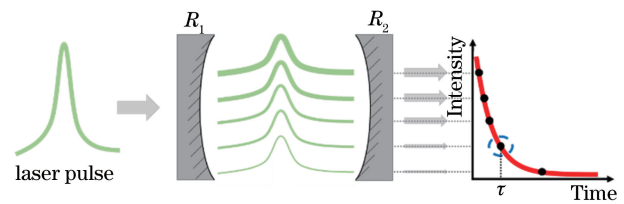


图 2 利用腔衰荡技术测量腔镜损耗的原理图

Fig. 2 Principle diagram of cavity mirror loss measurement using cavity ring-down technology

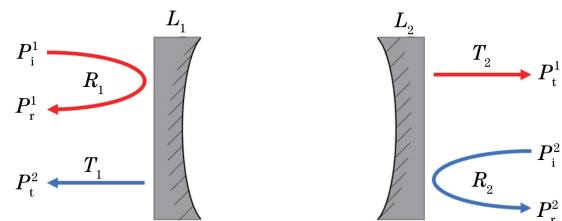


图 3 双向透射反射测量腔参数示意图^[63]

Fig. 3 Schematic of cavity parameters for bidirectional transition-reflection measurement^[63]

F-P 光学微腔中的“微”主要指微小的模体积。腔长为 d 、腰斑半径为 w 的腔模体积可以表示为

$$V_m = \frac{\pi}{4} w^2 d. \quad (4)$$

以实验室现有的有效腔长为 $752.90 \mu\text{m}$ 的微腔为例,其腔镜曲率半径为 100 mm ,对应的模体积为 $1.9 \times 10^{-13} \text{ m}^3$,相当于 $1.6 \times 10^4 \lambda^3$ (这里 λ 对应铯原子 D_2 线波长 852 nm)。腔内平均光子数与模体积的平方成正比,因此微小的模体积意味着可以在腔内产生平均光子数很小的局域化的电磁场分布,达到宏观光学腔难以实现的腔增强效果。通过减小腔长和腔镜的曲率半径,原则上可以减小腔的模体积,但同时

会降低腔的介入性,给腔内原子操控带来困难。

由于微腔的自由光谱区非常宽,光学微腔与特定原子的强耦合对腔长的稳定有非常高的要求。对于原子与单模光场的相互作用,原子线宽通常在 MHz 量级,腔的稳定度需要控制在很高的水平以使腔长偏移带来的共振频率变化远低于原子线宽。这就需要将腔长在百微米量级的光学腔的长度起伏控制在 10^{-13} m 的量级。因此,需要采取被动和主动控制相结合的方法,对腔长进行精确控制。这对外部振动噪声的隔离、反馈控制系统的响应以及各个环节的电子噪声等提出了严苛的要求。

影响腔长稳定性的因素主要包括机械振动、压电陶瓷(PZT)控制电压起伏、电子电路噪声和环境温度波动等。在实验上,我们采用被动隔振和主动反馈控制相结合的方法来稳定腔长^[70, 72]:在被动隔振方法中,利用特种隔振真空橡胶将整个腔底支撑在真空系统玻璃壁上,实现了振动噪声的有效隔离;在主动反馈方法中,我们将一束频率稳定的参考激光(又称为锁定激光)注入腔中,采用自制低噪声 Pound-Drever-Hall (PDH)系统将腔锁定到特定频率上^[73]。

3.2 基于频率链的 F-P 光学微腔的高精度控制

在强耦合 C-QED 系统中,作用于原子的光场强度一般都在单光子量级,对应的腔出射光场功率在 pW 量级。如此微弱的光对探测器和锁定系统提出了严峻的挑战。实际上,由于光的量子散粒噪声的制约,在低平均光子数下,很难获得信噪比足够好的误差信号以锁定光学腔。同时,在研究光学微腔内的光与原子间的相互作用时,必须将微腔的共振频率精确控制在原子特定谱线对应的谐振频率附近,并实现可控调谐。如上所述,由于微腔的自由光谱区非常大,很难直接将微腔的频率精确锁定在原子共振频率附近并将腔的失谐控制在原子线宽量级。20 世纪 90 年代,Lindsay 等^[74]建立了一套基于频率链的锁定方法。其主要思想是建立一个长度足够长(通常在数十厘米,对应的自由光谱区足够小)且对温度等不敏感的超稳传导腔(transfer cavity),一束功率较大且几乎不与原子发生作用的激光被锁定在传导腔上,以传导腔作为桥梁,构成一个频率链系统,实现光学微腔的高精度控制和锁定,并与原子相互作用^[75]。

频率链的主体结构如图 4 所示,其中 ECDL 为外腔反馈式半导体激光器。实验中,我们首先将波长为 852 nm 的 ECDL 激光通过铯原子饱和和吸收谱

(saturated absorption spectroscopy, SRS)系统锁定到铯原子的跃迁线上,然后将自主设计的温度自补偿传导腔^[76]锁定到该激光器频率上。该传导腔的主体由热膨胀系数较小的石英制成,两个腔镜底座由热膨胀系数较大的黄铜制成,当温度变化时,石英腔体的热膨胀与两个黄铜镜座和 PZT 的热膨胀相互补偿,整体腔长随外界温度的变化得到有效抑制,可确保传导腔共振频率的稳定性。随后将用于锁定微腔的 840 nm 激光器锁定到传导腔的另一个纵模上。以腔长 $752.90 \mu\text{m}$ 为例,该纵模与 852 nm 对应的纵模相差一个自由光谱区,从而基于一束远离原子共振线的激光可实现对微腔的锁定,并进一步通过声光调制器(AOM)来调节微腔锁定光场的频率,实现微腔共振频率相对铯原子跃迁频率失谐量的控制。整个频率链系统构成了一个闭环系统。锁定后的微腔共振频率起伏为 ± 200 kHz^[75]。

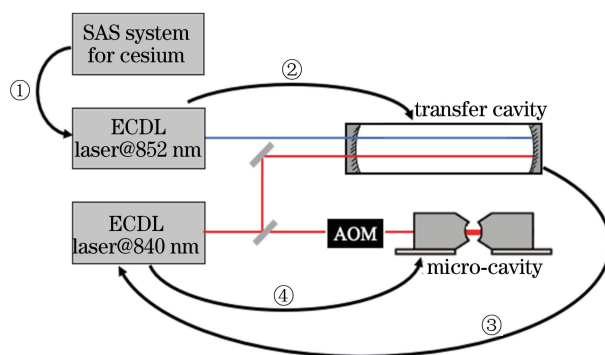


图 4 频率链系统结构示意图

Fig. 4 Structural diagram of frequency chain system

3.3 冷原子操控及与 F-P 光学微腔强耦合的实现及测量

基于上述过程建立的高精细度 F-P 光学微腔及其控制系统,可以结合不同的对象来研究光与物质的相互作用。这里主要介绍光学微腔与中性碱金属原子的耦合过程。该过程主要包括冷原子的制备与输运及强耦合相互作用过程的实现与测量。

3.3.1 冷原子的制备与输运

原子的控制是 C-QED 实验系统中非常关键的一环。在强耦合微腔系统中,单原子的确定性操控是重要的环节。常见的微腔中原子的输运和耦合方式有热原子束、冷原子下落或上抛、原子传送带^[68-69, 77]以及光学偶极俘获输运原子^[66]。其中原子传送带和光学偶极俘获输运原子均能够实现确定性原子的控制。图 5 展示了光学偶极俘获输运方式,其中 σ^+ 和 σ^- 分别为左旋圆偏光和右旋圆偏光,

I 为线圈内的电流。实验上我们首先利用两套窄线宽激光器构建冷却光 (cooling beam) 和再泵浦光 (repumping beam) 光路系统, 结合反亥姆霍兹线圈和地磁场补偿线圈建立传统的冷原子磁光阱, 在真

空系统中俘获中性原子团^[78]。然后利用原子传输技术, 通过控制远失谐光学偶极阱, 将冷原子输送到光学微腔中, 并结合腔内偶极俘获, 实现原子与 F-P 光学微腔的强耦合。

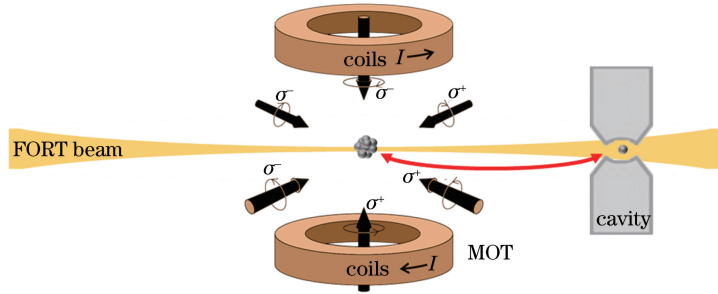


图 5 冷原子制备、输运及与光学微腔的耦合示意图

Fig. 5 Schematic of preparation and transport of cold atoms as well as their coupling with optical micro-cavity

在上述实验中, 我们使用由腰斑半径为 $20 \mu\text{m}$ 的强聚焦 1064 nm 激光形成的远失谐光学偶极阱来构建原子输运系统^[66-67], 并利用精密气浮平移台, 通过移动 FORT 的位置, 将冷原子从 MOT 处输送到光学微腔的中心, 如图 5 所示。也可以采用“荡秋千”的方式, 利用冷原子在大尺度光学阱中的运动将原子荡到微腔中^[66]。在对原子进行偏振梯度冷却 (polarization gradient cooling, PGC)^[79] 后, 通过优化传送原子输运的参数, 我们在实验上实现了 83% 的原子输送效率, 并将一定数目的原子输送到了微腔中。原子数目可以通过测量由强耦合引起的拉比分裂的大小来确定。

3.3.2 强耦合相互作用过程实现和测量

由于强耦合 C-QED 系统是一个少量子系统或者小系统 (small system), 光子和原子的相互作用是发生在单个原子和光子之间的行为, 因此, 相互作用中的能量交换是非常微小的, 强耦合相互作用的实现和该过程的测量成为一个重要的问题。图 6 展示了原子与光学微腔耦合的实现与测量过程。实验上通过锁定光 (locking) 锁定微腔长度, 利用 1064 nm 光偶极阱将 MOT 处的原子装载到腔中, 用探针光 (probe) 探测原子并通过单光子计数模块 (single photon counting module, SPCM) 收集单原子辐射的荧光信号。单个原子与光学腔的耦合强度可以表示为

$$g_0 = \left(\frac{\mu_{12}^2 \omega}{2\epsilon_0 \hbar V_m} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

式中: μ_{12} 为原子跃迁偶极矩; ω 为单模腔场的共振频率; ϵ_0 为真空介电常数; \hbar 为普朗克常数除以 2π 。这里假定原子被俘获在腔内波腹处。处于运动中的

原子在腔内存在一定的分布范围, 对单一原子而言, 其耦合强度随着原子在腔内的位置变化而变化, 从而存在一个平均耦合强度。利用不同位置具有不同耦合强度, 可以测得原子在腔内的位置, 从而实现原子质心位置的探测。因此, 要实现原子与腔的耦合强度的可控, 必须尽可能控制好原子的位置。建立介入性足够好、空间尺度适当且便于构建的腔内光学耦合俘获系统, 包括多原子光学偶极俘获阵列, 实现从单个到多个原子位置的精确操控, 这是实现确定性原子-光学腔强耦合的重要任务。

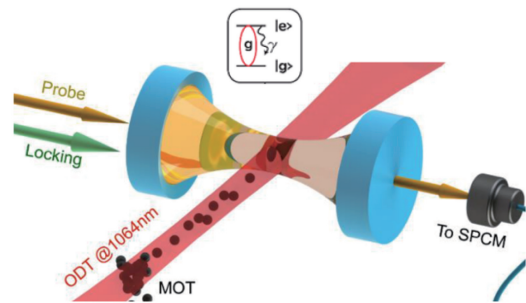


图 6 C-QED 系统强耦合相互作用的实现和测量^[67]

Fig. 6 Realization and measurement of strongly coupled interaction for C-QED system^[67]

在封闭的微腔中, 通过测量光学微腔微弱的透射光子来观测原子与光子的相互作用行为。光学微腔的透射输出是整个 C-QED 实验系统信息输出的通道, 基于微腔输出光场 (光子) 的测量和分析可定量刻画光学微腔内光子与原子的作用过程, 并控制腔内光子与原子相互作用的动力学过程。由于测量对象不同, 可以利用光学平衡零拍或者差拍技术测量光场的振幅^[80], 也可以利用高灵敏的单光子探测技术直接测量输出光子的数目随时间的变化。在将

原子通过 FORT 输送到微腔后,经过一系列的态制备和态操控,我们利用探针光对原子的状态进行探测,用高效单光子探测器测量微腔出射光子的行为,由此实现对强耦合 C-QED 系统中原子-光子相互作用过程的测量甚至反馈控制。

4 我们工作的特点

本研究组多年来一直从事高精度光学微腔及其与原子强耦合方面的研究,先后实现了高精度、高可控性、高介入性光学微腔的设计和构建,并在与中性冷原子强耦合 C-QED 方面进行了探索。图 7 所示是一个典型的高精度光学微腔的俯视结构剖视图。该微腔由两片分别被粘接在压电陶瓷(PZT)上的超镜组成,腔镜座基于无胶压技术被铜制压片固定在底座上,其中一个 PZT 与压片之间安装有聚四氟乙烯(PTFE)垫圈,可对腔镜的倾斜度进行微调。整个腔体被固定在无氧铜腔体上,通过控制 PZT 来精细调节腔长。整个腔体置于超高真空玻璃气室内,并利用高温隔振橡胶进行承载。考虑到系统中原子冷却需要多路激光(包含探测光和 FORT),我们在腔体周围设计了一些开放的小孔,以实现高介入性和整体稳定性的平衡。

我们先后利用精细度为 3.3×10^5 、长度为 $86 \mu\text{m}$ 的光学微腔,实现了原子轨道和冷原子温度的精密测量^[81],获得了单个原子与微腔高阶模式

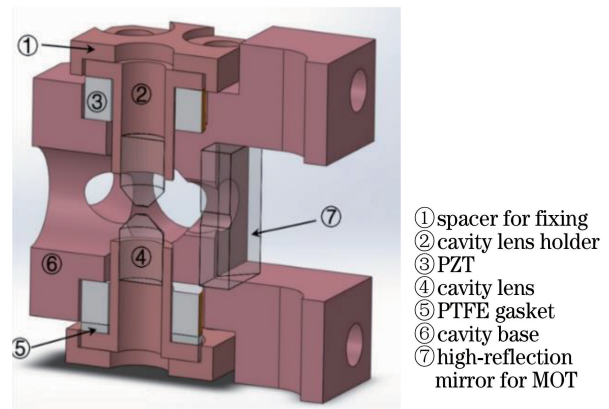


图 7 用于 C-QED 实验的高精度光学微腔的俯视结构剖视图

Fig. 7 Top view of sectional structure of high-finesse optical micro-cavity used for C-QED experiment

的强耦合。图 8 所示是单原子穿越腔内不同模式后获得的腔的透射谱,此时腔内的平均光子数约等于 1。其中,图 8(a)是单原子与 TEM_{10} 模式的强耦合结果^[64],可以清楚地看到,单个原子穿越腔内波腹和高阶模的节点,耦合强度的剧烈变化导致透射谱发生变化。通过单原子与高阶模式的强耦合过程,可以灵敏地测得单原子质心的位置,从而实现单个原子轨道的测量。实验还实现了与高阶模式包括 TEM_{20} 模式[图 8(b)]以及 TEM_{30} 模式[图 8(c)]的强耦合^[69],从而把单个原子轨道的测量精度提高了一个数量级。光学微腔此时扮演了一个单原子探

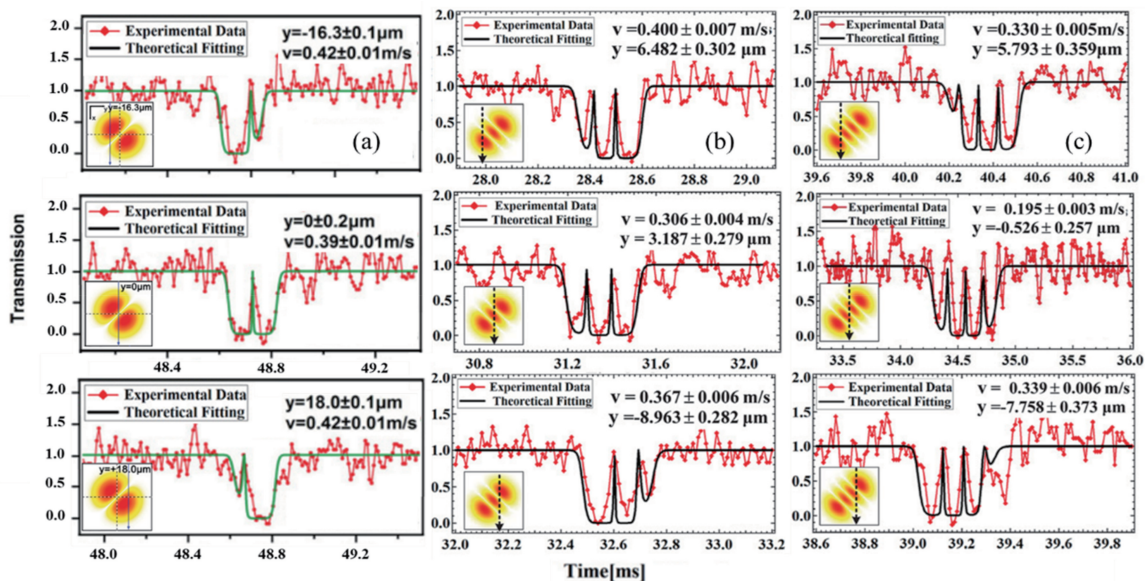


图 8 高精度光学微腔中单原子与高阶模式的强耦合及单原子腔透射光谱^[64, 69]。

(a) TEM_{10} 模; (b) TEM_{20} 模; (c) TEM_{30} 模

Fig. 8 Cavity transmission spectra of single atom as well as single atom coupling with high-order modes of high-finesse optical micro-cavity^[64, 69]. (a) TEM_{10} mode; (b) TEM_{20} mode; (c) TEM_{30} mode

测器的角色,因此可以用于单原子计数测量,从而实现原子的统计测量,进而测得原子的温度及聚束现象等,实现原子的精确测量^[81-82]。

微腔的高精细度和小的模体积对于提高原子与腔的耦合是非常重要的,但是太高的精细度制约了腔内光子的输出逃逸率,进而在测量腔与原子耦合的量子效应时限制了探测信号的信噪比。太小的模体积或者太短的腔长虽然对于增加耦合强度是有利的,但是在这种情况下很难从侧向入射用于操控腔内原子的光束,从而为确定性操控腔内原子带来困难。因此适当增加腔的长度并提高腔的光学介入性,将有利于实现腔内多原子控制以及建立腔内原子阵列。鉴于这些因素,寻求适当的模体积以及精细度,平衡耦合强度、输出效率以及光学介入性之间的关系是非常重要的。经过多年的探索,我们建立了精细度在数万量级、长度从数百微米级到毫米级的非对称光学微腔。表 1 所示为用于强耦合 C-QED 实验的 F-P 光学微腔的性能参数,该 F-P 光学微腔的精细度是 6.1×10^4 ,长度为 $335 \mu\text{m}$ 。这套微腔采用非对称腔设计,主要是希望在不牺牲耦合强度和高精细度的前提下,尽量提高输出效率,进而提高测量信噪比。该套腔体采用无胶压技术及 PZT 和聚四氟乙烯垫圈相结合的微腔调节方案设计,减少了真空紫外胶的使用,获得了更好的真空度。我们利用温度自补偿传导腔来控制腔长,腔长控制精度可达 $3.8 \times 10^{-13} \text{ m}$,实现了微腔的高稳定性、高可控性和足够的光学介入性。

表 1 用于强耦合 C-QED 实验的光学 F-P 微腔参数
Table 1 Parameters for optical F-P micro-cavity used for strongly coupled C-QED experiments

| Parameter | Value |
|--|----------------|
| Effective length / μm | 335.27 |
| Mode volume / (10^{-13} m^3) | 2.92 |
| Transmittance / 10^{-6} | 5.06 and 88.94 |
| Total loss / 10^{-6} | 104.84 |
| Additional loss / 10^{-6} | 10.84 |
| Coupling strength / MHz | 8.6 |
| Critical number of photons | 0.155 |
| Critical number of atoms | 0.392 |
| Controlling precision / (10^{-13} m) | 3.8 |

利用该非对称光学微腔系统,我们成功观测到少光子的光学非互易现象,实现了少光子水平的光二极管^[67],实验结果如图 9(a)所示。实验通过光学偶极俘获将少数原子控制在腔内,实现了几个到几十个原子与光学微腔的强耦合。该系统对原子和光

子极度敏感,能探测到平均不到 1 个原子和 1 个光子的变化。利用其强烈的非线性效应和非对称腔的特点,实验获得了低至 3.8 个腔内平均光子的光学非互易传输。通过控制原子的数目,还可以调节光学非互易传输的工作窗口,实验上获得了最高达 30 dB 的阻塞率^[83]。这是目前国际上报道的具有最小工作功率和最大阻塞率的基于光学非线性的光学非互易系统。该系统为实现极弱光的无磁非线性光学非互易传输提供了新的途径。当腔内平均光子数在个位数量级(约为 8 个,对应入射功率为 385.5 pW)时,在腔内原子数增加(IP)和减少(DP)的过程中,腔透射均呈现出强烈的非线性效应,表现为这两个过程的透射都呈现出显著的双稳行为,如图 9(b)所示。该系统在少原子少光子水平下呈现的显著非线性效应为其在量子态的产生、量子感知和精密测量方面的应用带来了可能。

为了进一步提高光学二极管的工作效率,我们通过制备非互易的准粒子即腔极子(腔场与原子态的杂化态),实现了真正意义上的单光子二极管^[83]。通过操控原子的内态实现时间反演对称性破缺,腔极子在外场偏置的情况下表现出非互易光子辐射行为。实现了光学隔离度可与商用器件相比拟的无磁光隔离器和非互易的量子统计行为。该系统可以作为量子网络中的量子路由器和隔离器,同时其量子非互易极子态可以应用于声子和微波光子领域。

总之,经过多年的探索,我们设计构建的工作在强耦合范围同时处于介观尺度的非对称光学微腔,有效地调和了耦合强度、操控性、介入性、稳定性及高输出效率等多种因素之间的矛盾。围绕光学微腔的主要问题可以归结为“四高”,即高精细度、高稳定性、高可控性和高介入性。概括起来,相关的关键核心技术包括:1)基于腔衰荡及双向四端测量方案的超镜损耗精密探测技术^[62-63, 70]; 2)基于主动反馈和被动隔振技术的高介入性超稳光学微腔整体结构的设计和测试方法^[71-72]; 3)基于温度自补偿的频率链微腔控制技术^[75-76]。利用这些技术,我们解决了 F-P 光学微腔中的设计、构建、控制和测量等关键问题,最终实现了 10^{-13} m 精度的腔长控制及精细度在数万到数十万量级的高精细度光学微腔的制作和精密控制,并完成了与原子的强耦合相互作用及其精密测量。

将该光学微腔系统与冷原子相干操控相结合^[84-86],极大地推进了腔内原子的确定性操控^[87-88],解决了多原子阵列与光学微腔强耦合的关

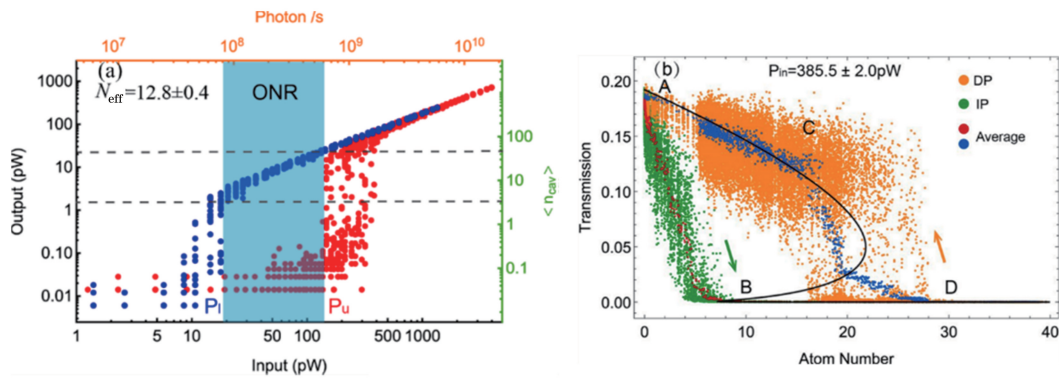


图 9 基于 C-QED 系统的光学非互易效应^[67]。(a)不同光场传输方向下非对称强耦合 C-QED 系统中的双稳现象,其中阴影部分为非线性光学非互易窗口;(b)不同原子数下正向传输光的透射效率和反向光的阻塞效率
Fig. 9 Optical non-reciprocal effect based on C-QED system^[67]. (a) Optical bistability occurring in asymmetric strongly coupled C-QED system under different light transmission directions, in which shaded part is nonlinear optical non-reciprocal window; (b) transmission efficiency of forward transmitted light and blocking efficiency of backward light under different atom numbers

键问题,为基于中性原子的强耦合 C-QED 研究提供了良好的平台。

5 结束语

三十多年来,作为一种重要的光学器件,F-P 光学微腔的性能得到了很大的提升。基于 F-P 光学微腔构建的强耦合 C-QED 系统,人们开展了大量研究,在量子光学、量子信息和光与物质作用的量子效应等方面取得了卓有成效的研究成果。随着原子操控能力的不断提升,光学腔的综合要求也越来越高。比如,为了实现量子模拟及多原子与腔的可控相互作用,需要在腔内构建原子阵列,实现对多原子阵列中每一个原子的独立控制,这是目前 C-QED 研究面临的巨大挑战。这对光学微腔的介入性、稳定性和可控性提出了前所未有的要求。目前,研究者在 F-P 光学微腔内仅仅实现了两个原子的确定性装载^[87],要进一步实现从一维到二维甚至到三维阵列腔内原子的确定性控制,首先要考虑光学微腔的介入性。这就要求适度增大腔的长度和模体积,同时为了保持强耦合,超镜的额外损耗需达到 1×10^{-6} 甚至更低。这对整个系统的长期稳定性和控制精度提出了很高的要求,必须结合一些新的控制手段,如超稳腔技术、低噪声抗干扰设计及基于现场可编程门阵列(FPGA)的超宽带反馈控制技术^[89]。

对于多原子与腔耦合所产生的量子资源,还需要发展大数目量子态探测手段,如多 HBT (Hanbury-Brown and Twiss)探测技术^[90]和多探测器关联测量技术^[91-92]。长远来看,必须发展腔内确

定性装载和操控原子阵列的技术,这对于研究强耦合多体物理问题、量子网络、量子模拟及基于多原子强耦合 C-QED 的量子资源制备等具有重要的科学意义。随着单个原子操控能力的不断提高和中性原子相干时间的不断延长^[86],相关手段可以考虑应用到多原子系统中,从而使多原子 C-QED 系统成为制备多种量子资源并展示若干量子现象的重要平台,如多光子 Fock 态的制备^[93]、NOON 态的制备^[94]、原子纠缠^[95]及多量子位纠缠^[96]等。基于多原子的 C-QED 系统为拓展光学微腔在精密测量和量子感知等方面的应用提供了新的途径^[97]。

当然,基于 F-P 光学微腔的 C-QED 系统只是目前腔量子电动力学研究中的一个典型系统。随着微纳加工技术的进步,一些基于新型微腔的 C-QED 系统也取得了快速发展^[98],如采用回音壁模式的微球腔 (micro-sphere)^[99-100]、微盘腔 (micro-disk)^[101-103]、微环腔 (micro-ring) 和微环芯腔 (microtoroidal resonator)^[104],基于光子晶体缺陷的微腔 (photonic crystal)^[105] 及表面等离激元 (surface plasmon polaritons)^[106-108] 等。这些不同结构的腔构成了多种形式的受限空间,具有各自的特点,有的模体积非常小,有的 Q 值很高,有的耦合方式便捷高效,有的可扩展性能好,均受到了广泛关注并取得了很大的进展。我们实验室也建立了基于微纳米光纤的 C-QED 系统,实现了磁光阱系统的优化^[109],提出了一种无损测量微球直径的方法^[110] 和利用微型光纤探针测量拉锥光纤散射损耗的方案^[111]。这些新型微纳米 C-QED 系统与传统基于 F-P 光学微腔的 C-QED 系统相比具有某些优势,但

在相干性和操控性方面还有待改进,在工艺制作难度以及与原子或者特定物质单元耦合方面还存在问题,比如,都面临如何通过确定性地控制单个原子来实现与特定微腔特定模式强耦合的问题。传统 F-P 光学腔因其综合优势和长期的技术积累,继续作为主流原子-光学微腔强耦合系统,在研究光与原子相互作用方面发挥着不可取代的作用。作为一个重要的包含着丰富物理现象的量子光学系统,F-P 光学微腔在 C-QED 发展中扮演了重要角色,它将在高精度、高稳定性、高可控性和高介入性等多个方面获得进一步发展,从而使基于 F-P 光学微腔的强耦合 C-QED 系统成为展示更多量子物理效应并具有更多应用前景的奇妙舞台。

参 考 文 献

- [1] Hernández G. Fabry-Perot interferometers [M]. New York: Cambridge University Press, 1988.
- [2] Day T, Gustafson E K, Byer R L. Sub-hertz relative frequency stabilization of two-diode laser-pumped Nd:YAG lasers locked to a Fabry-Perot interferometer [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1992, 28(4): 1106-1117.
- [3] Wei T, Han Y K, Tsai H L, et al. Miniaturized fiber inline Fabry-Perot interferometer fabricated with a femtosecond laser[J]. Optics Letters, 2008, 33(6): 536-538.
- [4] Wei F, Yang F, Zhang X, et al. Subkilohertz linewidth reduction of a DFB diode laser using self-injection locking with a fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity [J]. Optics Express, 2016, 24(15): 17406-17415.
- [5] Guo Y S, Jiang S, Chen X, et al. Using a Fabry-Perot cavity to augment the enhancement factor for surface-enhanced Raman spectroscopy and tip-enhanced Raman spectroscopy [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2018, 122(26): 14865-14871.
- [6] Drouin B J, Tang A, Schlecht E, et al. A CMOS millimeter-wave transceiver embedded in a semi-confocal Fabry-Perot cavity for molecular spectroscopy [J]. The Journal of Chemical Physics, 2016, 145(7): 074201.
- [7] Monteiro C, Silva S, Frazão O. Hollow microsphere Fabry-Perot cavity for sensing applications [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(15): 1229-1232.
- [8] Bitarafan M H, DeCorby R G. On-chip high-finesse Fabry-Perot microcavities for optical sensing and quantum information [J]. Sensors, 2017, 17(8): 1748.
- [9] Jewell S A, Hendry E, Isaac T H, et al. Tuneable Fabry-Perot etalon for terahertz radiation [J]. New Journal of Physics, 2008, 10(3): 033012.
- [10] Jewell J L, Rushford M C, Gibbs H M. Use of a single nonlinear Fabry-Perot etalon as optical logic gates [J]. Applied Physics Letters, 1984, 44(2): 172-174.
- [11] Guérin N, Enoch S, Tayeb G, et al. A metallic Fabry-Perot directive antenna [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2006, 54(1): 220-224.
- [12] Ju J, Choi J. Broadband high-gain Fabry-Perot cavity antenna with back radiation reduction [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2013, 55(5): 975-978.
- [13] Corbitt T, Ottaway D, Innerhofer E, et al. Measurement of radiation-pressure-induced optomechanical dynamics in a suspended Fabry-Perot cavity [J]. Physical Review A, 2006, 74(2): 021802.
- [14] Lawall J R. Fabry-Perot metrology for displacements up to 50 mm [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2005, 22(12): 2786-2798.
- [15] Jones R J, Diels J C. Stabilization of femtosecond lasers for optical frequency metrology and direct optical to radio frequency synthesis [J]. Physical Review Letters, 2001, 86(15): 3288.
- [16] Aoki T, Dayan B, Wilcut E, et al. Observation of strong coupling between one atom and a monolithic microresonator [J]. Nature, 2006, 443(7112): 671-674.
- [17] Gröblacher S, Hammerer K, Vanner M R, et al. Observation of strong coupling between a micromechanical resonator and an optical cavity field [J]. Nature, 2009, 460(7256): 724-727.
- [18] Yokoyama H. Physics and device applications of optical microcavities [J]. Science, 1992, 256(5053): 66-70.
- [19] Raimond J M, Haroche S. Exploring the quantum: atoms, cavities, and photons [M]. New York: Oxford University Press, 2006: 231-278.
- [20] van Enk S J, Cirac J I, Zoller P. Photonic channels for quantum communication [J]. Science, 1998, 279(5348): 205-208.
- [21] Mabuchi H, Doherty A C. Cavity quantum electrodynamics: coherence in context [J]. Science, 2002, 298(5597): 1372-1377.
- [22] Kimble H J. The quantum internet [J]. Nature, 2008, 453(7198): 1023-1030.

- [23] Thompson R J, Rempe G, Kimble H J, et al. Observation of normal-mode splitting for an atom in an optical cavity [J]. *Physical Review Letters*, 1992, 68(8): 1132-1135.
- [24] Mckeever J, Boca A, Boozer A D, et al. Deterministic generation of single photons from one atom trapped in a cavity [J]. *Science*, 2004, 303 (5666): 1992-1994.
- [25] Brennecke F, Donner T, Ritter S, et al. Cavity QED with a Bose-Einstein condensate [J]. *Nature*, 2007, 450(7167): 268-271.
- [26] Zoller P, Beth T, Binosi D, et al. Quantum information processing and communication: strategic report on current status, visions and goals for research in Europe [J]. *European Physical Journal D*, 2005, 36(2): 203-228.
- [27] Weber B, Specht H P, Müller T, et al. Photon-photon entanglement with a single trapped atom [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(3): 030501.
- [28] Rauschenbeutel A, Nogues G, Osnaghi S, et al. Coherent operation of a tunable quantum phase gate in cavity QED [J]. *Physical Review Letters*, 1999, 83(24): 5166-5169.
- [29] Banaszek K, Demkowicz-Dobrzański R, Walmsley I A. Quantum states made to measure [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(12): 673-676.
- [30] Chen Z L, Bohnet J G, Sankar S R, et al. Conditional spin squeezing of a large ensemble via the vacuum Rabi splitting [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(13): 133601.
- [31] Rempe G, Thompson R J, Kimble H J, et al. Measurement of ultralow losses in an optical interferometer [J]. *Optics Letters*, 1992, 17(5): 363-365.
- [32] Hood C J. The atom-cavity microscope: single atoms bound in orbit by single photons [J]. *Science*, 2000, 287(5457): 1447-1453.
- [33] McKeever J, Boca A, Boozer A D, et al. Experimental realization of a one-atom laser in the regime of strong coupling [J]. *Nature*, 2003, 425 (6955): 268-271.
- [34] Keller M, Lange B, Hayasaka K, et al. Continuous generation of single photons with controlled waveform in an ion-trap cavity system [J]. *Nature*, 2004, 431(7012): 1075-1078.
- [35] Pinkse P W, Fischer T, Maunz P, et al. Trapping an atom with single photons [J]. *Nature*, 2000, 404 (6776): 365-368.
- [36] Maunz P, Puppe T, Schuster I, et al. Cavity cooling of a single atom [J]. *Nature*, 2004, 428 (6978): 50-52.
- [37] Schuster I, Kubanek A, Fuhrmanek A, et al. Nonlinear spectroscopy of photons bound to one atom [J]. *Nature Physics*, 2008, 4(5): 382-385.
- [38] Kubanek A, Koch M, Sames C, et al. Photon-by-photon feedback control of a single-atom trajectory [J]. *Nature*, 2009, 462(7275): 898-901.
- [39] Ourjoumtsev A, Kubanek A, Koch M, et al. Observation of squeezed light from one atom excited with two photons [J]. *Nature*, 2011, 474(7353): 623-626.
- [40] Hamsen C, Tolazzi K N, Wilk T, et al. Strong coupling between photons of two light fields mediated by one atom [J]. *Nature Physics*, 2018, 14(9): 885-889.
- [41] Terraciano M L, Olson Knell R, Norris D G, et al. Photon burst detection of single atoms in an optical cavity [J]. *Nature Physics*, 2009, 5(7): 480-484.
- [42] Baumann K, Guerlin C, Brennecke F, et al. Dicke quantum phase transition with a superfluid gas in an optical cavity [J]. *Nature*, 2010, 464(7293): 1301-1306.
- [43] Purdy T P, Brooks D W, Botter T, et al. Tunable cavity optomechanics with ultracold atoms [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(13): 133602.
- [44] Stute A, Casabone B, Schindler P, et al. Tunable ion-photon entanglement in an optical cavity [J]. *Nature*, 2012, 485(7399): 482-485.
- [45] Takahashi H, Kassa E, Christoforou C, et al. Strong coupling of a single ion to an optical cavity [J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124(1): 013602.
- [46] Tong L M, Zi F, Guo X, et al. Optical microfibers and nanofibers: a tutorial [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(23): 4641-4647.
- [47] Tong L M, Gattass R R, Ashcom J B, et al. Subwavelength-diameter silica wires for low-loss optical wave guiding [J]. *Nature*, 2003, 426(6968): 816-819.
- [48] Zhang L, Lou J Y, Tong L M. Micro/nanofiber optical sensors [J]. *Photonic Sensors*, 2011, 1(1): 31-42.
- [49] Cui J M, Zhou K, Zhao M S, et al. Polarization nondegenerate fiber Fabry-Perot cavities with large tunable splittings [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(17): 171105.
- [50] Zhang T T, Zhou C H, Wang W J, et al. Generation of low-threshold optofluidic lasers in a stable Fabry-Pérot microcavity [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 91: 108-111.
- [51] Dong C H, Shen Z, Zou C L, et al. Brillouin-scattering-induced transparency and non-reciprocal

- light storage[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6193.
- [52] Shen Z, Zhang Y L, Chen Y, et al. Experimental realization of optomechanically induced non-reciprocity[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(10): 657-661.
- [53] Shen Z, Zhang Y L, Chen Y, et al. Reconfigurable optomechanical circulator and directional amplifier[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 1797.
- [54] Wu X W, Zou C L, Wei W, et al. Photoluminescence from site-selected coupling between quantum dots and microtoroid cavities[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(7): 709-712.
- [55] Chang L, Jiang X S, Hua S Y, et al. Parity-time symmetry and variable optical isolation in active-passive-coupled microresonators [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(7): 524-529.
- [56] Tang S J, Li B B, Xiao Y F. Optical sensing with whispering-gallery microcavities[J]. *Physics*, 2019, 48(3): 137-147.
唐水晶, 李贝贝, 肖云峰. 回音壁模式光学微腔传感[J]. *物理*, 2019, 48(3): 137-147.
- [57] Peng B, Özdemir Ş K, Lei F, et al. Parity-time-symmetric whispering-gallery microcavities [J]. *Nature Physics*, 2014, 10(5): 394-398.
- [58] Lin J T, Yao N, Hao Z Z, et al. Broadband quasi-phase-matched harmonic generation in an on-chip monocrystalline lithium niobate microdisk resonator [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(17): 173903.
- [59] Kong Y F, Bo F, Wang W W, et al. Recent progress in lithium niobate: optical damage, defect simulation, and on-chip devices [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(3): 1806452.
- [60] Yang Y D, Tang M, Wang F L, et al. Whispering-gallery mode hexagonal micro-/nanocavity lasers [J]. *Photonics Research*, 2019, 7(5): 594-607.
- [61] Chen W, Zhang S P, Deng Q, et al. Probing of sub-picometer vertical differential resolutions using cavity plasmons [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 801.
- [62] Li L P, Liu T, Li G, et al. Measurement of ultra-low losses in optical supercavity[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(5): 1401-1405.
李利平, 刘涛, 李刚, 等. 超高精细度光学腔中低损耗的测量[J]. *物理学报*, 2004, 53(5): 1401-1405.
- [63] Li G, Zhang Y, Li Y, et al. Precision measurement of ultralow losses of an asymmetric optical microcavity[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(29): 7628-7631.
- [64] Zhang P F, Guo Y Q, Li Z H, et al. Elimination of the degenerate trajectory of a single atom strongly coupled to a tilted TEM₁₀ cavity mode[J]. *Physical Review A*, 2011, 83(3): 031804.
- [65] Wen R J, Du J J, Li W F, et al. Construction of a strongly coupled cavity quantum electrodynamics system with easy accessibility of single or multiple intra-cavity atoms[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(24): 244203.
文瑞娟, 杜金锦, 李文芳, 等. 内腔多原子直接俘获的强耦合腔量子力学系统的构建[J]. *物理学报*, 2014, 63(24): 244203.
- [66] Yang P F, He H, Wang Z H, et al. Cavity enhanced measurement of trap frequency in an optical dipole trap[J]. *Chinese Physics B*, 2019, 28(4): 043701.
- [67] Yang P F, Xia X W, He H, et al. Realization of nonlinear optical nonreciprocity on a few-photon level based on atoms strongly coupled to an asymmetric cavity [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(23): 233604.
- [68] Zhang P F, Zhang Y C, Li G, et al. Sensitive detection of individual neutral atoms in a strong coupling cavity QED system [J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, 28(4): 044203.
- [69] Du J J, Li W F, Wen R J, et al. Precision measurement of single atoms strongly coupled to the higher-order transverse modes of a high-finesse optical cavity[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(8): 083117.
- [70] Li Z G, Zhang Y C, Li G, et al. Method for quickly and accurately measuring ultra-high reflectivity lens: CN100573082C[P]. 2009-12-23.
李志刚, 张玉驰, 李刚, 等. 快速精确测定超高反射率镜片的方法: CN100573082C[P]. 2009-12-23.
- [71] Hood C J, Kimble H J, Ye J. Characterization of high-finesse mirrors: loss, phase shifts, and mode structure in an optical cavity [J]. *Physical Review A*, 2001, 64(3): 033804.
- [72] Zhang P F, Li G, Zhang T C. Method for manufacturing ultra-stable ultra-high-finesse micro-optical cavity: CN102427200A[P]. 2012-11-21.
张鹏飞, 李刚, 张天才. 一种超稳定超高精细度微光学腔的制作方法: CN102427200A[P]. 2012-11-21.
- [73] Drever R W P, Hall J L, Kowalski F V, et al. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator[J]. *Applied Physics B*, 1983, 31(2): 97-105.
- [74] Lindsay B G, Smith K A, Dunning F B. Control of long-term output frequency drift in commercial dye

- lasers[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1991, 62(6): 1656-1657.
- [75] Du J J, Li G, Li W F, et al. Locking device of micro-optical cavity with high fineness and locking method:CN102520516B[P]. 2013-06-26.
杜金锦, 李刚, 李文芳, 等. 一种高精细度微光学腔的锁定装置及其锁定方法:CN102520516B[P]. 2013-06-26.
- [76] Li G, Zhang P F, Zhang T C. An optical reference cavity with self-compensation for temperature drift: CN109888609[P]. 2019-06-14.
李刚, 张鹏飞, 张天才. 一种温漂自补偿的光学参考腔:CN109888609[P]. 2019-06-14.
- [77] Zhang P F, Li G, Zhang Y C, et al. Light-induced atom desorption for cesium loading of a magneto-optical trap: analysis and experimental investigations [J]. *Physical Review A*, 2009, 80(5): 053420.
- [78] Phillips W D. Nobel Lecture: laser cooling and trapping of neutral atoms [J]. *Reviews of Modern Physics*, 1998, 70(3): 721.
- [79] Dalibard J, Cohen-Tannoudji C. Laser cooling below the Doppler limit by polarization gradients: simple theoretical models [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1989, 6(11): 2023-2045.
- [80] Li G, Li L P, Du Z J, et al. Ultra-low mean-photon-number measurement with balanced optical heterodyne detection [J]. *Chinese Physics Letters*, 2004, 21(4): 671-674.
- [81] Li W F, Du J J, Wen R J, et al. Temperature measurement of cold atoms using single-atom transits and Monte Carlo simulation in a strongly coupled atom-cavity system [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(11): 113102.
- [82] Du J J, Li W F, Wen R J, et al. Experimental investigation of the statistical distribution of single atoms in cavity quantum electrodynamics [J]. *Laser Physics Letters*, 2015, 12(6): 065501.
- [83] Yang P F, Li M, Han X, et al. Non-reciprocal cavity polariton [EB/OL]. (2019-11-23) [2020-03-15]. <https://arxiv.org/abs/1911.10300>.
- [84] Wang Z H, Tian Y L, Yang C, et al. Experimental test of Bohr's complementarity principle with single neutral atoms [J]. *Physical Review A*, 2016, 94(6): 062124.
- [85] Tian Y L, Wang Z H, Zhang P F, et al. Measurement of complete and continuous Wigner functions for discrete atomic systems [J]. *Physical Review A*, 2018, 97(1): 013840.
- [86] Li G, Tian Y L, Wu W, et al. Triply magic conditions for microwave transition of optically trapped alkali-metal atoms [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(25): 253602.
- [87] Nölleke C, Neuzner A, Reiserer A, et al. Efficient teleportation between remote single-atom quantum memories [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(14): 140403.
- [88] Kato S, Némethy N, Senga K, et al. Observation of dressed states of distant atoms with delocalized photons in coupled-cavities quantum electrodynamics [J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 1160.
- [89] Okada M, Serikawa T, Dannatt J, et al. Extending the piezoelectric transducer bandwidth of an optical interferometer by suppressing resonance using a high dimensional IIR filter implemented on an FPGA [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(5): 055102.
- [90] Guo Y Q, Wang L J, Wang Y, et al. High-order photon correlations through double Hanbury Brown-Twiss measurements [J]. *Journal of Optics*, 2020, 22(9): 095202.
- [91] Guo Y Q, Yang R C, Li G, et al. Nonclassicality characterization in photon statistics based on binary-response single-photon detection [J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2011, 44(20): 205502.
- [92] Cao J K, Yang P F, Tian Y L, et al. Measurement of high-order coherence of light field based on intensified charge-coupled device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(7): 0712008.
曹晋凯, 杨鹏飞, 田亚莉, 等. 基于增强型 CCD 光场高阶相干度的测量 [J]. *光学学报*, 2019, 39(7): 0712008.
- [93] Brown K R, Dani K M, Stamper-Kurn D M, et al. Deterministic optical Fock-state generation [J]. *Physical Review A*, 2003, 67(4): 043818.
- [94] Yang R C, Li G, Li J, et al. Atomic $N00N$ state generation in distant cavities by virtual excitations [J]. *Chinese Physics B*, 2011, 20(6): 060302.
- [95] Yang R C, Li G, Zhang T C. Robust atomic entanglement in two coupled cavities via virtual excitations and quantum Zeno dynamics [J]. *Quantum Information Processing*, 2013, 12(1): 493-504.
- [96] Li G, Zhang P F, Zhang T C. Entanglement of remote material qubits through nonexciting interaction with single photons [J]. *Physical Review A*, 2018, 97(5): 053808.
- [97] Yang B, Chen Y Y, Zheng Y G, et al. Quantum criticality and the Tomonaga-Luttinger liquid in one-dimensional Bose gases [J]. *Physical Review Letters*, 2017, 119(16): 165701.

- [98] Vahala K J. Optical microcavities [J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 839-846.
- [99] Gorodetsky M L, Savchenkov A A, Ilchenko V S. Ultimate Q of optical microsphere resonators [J]. *Optics Letters*, 1996, 21(7): 453-455.
- [100] Dong C H, He L, Xiao Y F, et al. Fabrication of high-Q polydimethylsiloxane optical microspheres for thermal sensing [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(23): 231119.
- [101] Kiraz A, Michler P, Becher C, et al. Cavity-quantum electrodynamics using a single InAs quantum dot in a microdisk structure [J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 78(25): 3932-3934.
- [102] Peng B, Özdemir Ş K, Chen W, et al. What is and what is not electromagnetically induced transparency in whispering-gallery microcavities [J]. *Nature communications*, 2014, 5: 5082.
- [103] Zhu J G, Ozdemir S K, Xiao Y F, et al. On-chip single nanoparticle detection and sizing by mode splitting in an ultrahigh-Q microresonator [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(1): 46-49.
- [104] Armani D K, Kippenberg T J, Spillane S M, et al. Ultra-high-Q toroid microcavity on a chip [J]. *Nature*, 2003, 421(6926): 925-928.
- [105] Vučković J, Lončar M, Mabuchi H, et al. Design of photonic crystal microcavities for cavity QED [J]. *Physical Review E*, 2001, 65(1): 016608.
- [106] Gu Y, Wang L, Ren P, et al. Intrinsic quantum beats of atomic populations and their nanoscale realization through resonant plasmonic antenna [J]. *Plasmonics*, 2012, 7(1): 33-38.
- [107] Ren J J, Gu Y, Zhao D X, et al. Evanescent-vacuum-enhanced photon-exciton coupling and fluorescence collection [J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(7): 073604.
- [108] Zhang F, Ren J, Shan L, et al. Chiral cavity quantum electrodynamics with coupled nanophotonic structures [J]. *Physical Review A*, 2019, 100(5): 053841.
- [109] Wang X, Song L J, Wang C X, et al. Optimization of a magneto-optic trap using nanofibers [J]. *Chinese Physics B*, 2019, 28(7): 073701.
- [110] Song L J, Zhang P F, Li G, et al. Measurement apparatus and method for nondestructively measuring microsphere diameter uniformity: CN110333170A [P]. 2020-03-25.
宋丽军, 张鹏飞, 李刚, 等. 一种无损测量微球直径均匀度的测量装置及方法: CN110333170A [P]. 2020-03-25.
- [111] Zhang P F, Wang X, Song L J, et al. Characterization of scattering losses in tapered optical fibers perturbed by a microfiber tip [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2020, 37(5): 1401-1405.