

微环芯腔与锥形纳米光纤耦合过程的实验研究

成凡^{1,2}, 张鹏飞^{1,2†}, 王鑫^{1,2}, 张天才^{1,2†}

(1. 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 光电研究所, 山西大学, 山西 太原 030006;

2. 极端光学协同创新中心, 山西大学, 山西 太原 030006)

摘要: 在实验上研究了共振于铯原子跃迁线附近的微环芯腔与锥形纳米光纤的耦合特性。通过精密控制微环芯腔与锥形纳米光纤的相对位置, 实现了两者的欠耦合、临界耦合和过耦合的精确控制。当微环芯腔与锥形纳米光纤间距为 $0.6\mu\text{m}$ 时, 系统达到临界耦合, 透射率为 $0.3\% \pm 0.3\%$, 耦合效率为 $99.7\% \pm 0.3\%$ 。由微环芯腔透射光谱得到微环芯腔的自由光谱区为 $1067 \pm 5\text{ GHz}$, 等效腔长为 $223 \pm 1\mu\text{m}$, 线宽为 $2.9 \pm 0.1\text{ GHz}$, 本征品质因数为 $(6.2 \pm 0.6) \times 10^4$ 。随着微环芯腔与锥形纳米光纤间距的减小, 微环芯腔的线宽逐渐增大, 共振频率发生红移, 频率移动为 $19.2 \pm 0.1\text{ GHz}$ 。该研究找到了有效控制微环芯腔与锥形纳米光纤耦合状态的方法, 为下一步实现微环芯腔与原子间强耦合奠定了实验基础。同时该研究加深了人们对微环芯腔不同耦合状态的认识, 为研究欠耦合和过耦合状态提供了实验基础。

关键词: 微环芯腔; 锥形纳米光纤; 临界耦合

中图分类号: O431

文献标识码: A

文章编号: 1007-6654(2017)01-0074-08

0 引言

光学谐振腔作为一种重要的光学器件在激光器^[1]、光谱测量^[2]、精密测量^[3]、量子光学^[4]等领域都有着重要的应用。在量子光学实验研究中, 由于光与物质的相互作用非常微弱, 所以人们通常利用高品质光学谐振腔的增强效应来实现光与物质之间相互作用的增强, 此类研究被称为腔量子电动力学。腔量子电动力学主要研究物质与特定边界条件下场之间相互作用的量子现象^[5]。

常见的光学谐振腔有传统的法布里-珀罗(Fabry-Perot)腔^[6]、回音壁模式微光学腔^[7], 如微球腔(microsphere)^[8]、微环芯腔(microtoroidal

resonator)^[9]等, 以及光子晶体(photonic crystals)微腔^[10]等。基于传统的法布里-珀罗腔的腔量子电动力学系统不仅证实了量子光学、量子物理中大量的理论预言^[11], 而且演示了诸如量子态制备^[12]、单原子测量^[13-16]、单光子源制备^[17-19]、量子纠缠^[20, 21]、量子存储^[22-24]及量子网络^[25]等量子信息处理过程中的重要环节。然而, 由于法布里-珀罗腔的尺寸大、光学介入困难、控制技术要求高等条件限制, 不易实现多腔模式的量子网络方案, 故其在操控性和集成化方面存在显著不足。

基于以上原因, 人们不断追求更易操控、可集

收稿日期: 2016-10-30; 修回日期: 2016-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(11574187; 11204165; 11634008)

作者简介: 成凡(1991-), 男, 山西阳泉人, 硕士研究生, 主要从事量子光学、腔量子电动力学方面的研究。E-mail: phdphy@163.com

† 通信作者: 张天才, E-mail: tczhang@sxu.edu.cn;

张鹏飞, E-mail: zhangpengfei@sxu.edu.cn

成的、具有更高耦合强度的腔量子电动力学系统。其中基于半导体微纳加工技术的微环芯腔不仅拥有更小的腔模体积,而且具有极低的损耗。微环芯腔品质因数可以达到 10^8 以上。由于腔的增强效应,微环芯腔表面的倏逝场与原子^[26]、量子点^[27]等物质的相互作用更容易达到强耦合。同时,微环芯腔的制作基于硅基芯片并且尺寸为数十微米,这使得这种光学谐振腔在光学器件集成应用中具有巨大的潜力。微环芯腔首先由加州理工学院 Vahala 教授实验小组提出并在实验上实现,其主要通过匀胶、曝光、显影、湿刻、清洗、干刻和回流七个步骤制作完成^[9]。微环芯腔具有封闭的回音壁模式,可以建立稳定的环状结构倏逝波。实验中通常使用外部耦合器件打破微环芯腔的旋转对称性从而将光引入和导出微环芯腔。耦合器件通常有经腐蚀的光纤头^[28]、高折射率棱镜^[29]、锥形纳米光纤(tapered nanofiber)^[30]和半圆柱光纤波导^[31]等。其中,微环芯腔与锥形纳米光纤^[32]的结合使得激光可以由光纤耦合出入微环芯腔,因此其更易于与现有成熟的光纤通讯系统相结合,与传统的法布里-珀罗腔系统相比更加简单可靠、效率更高,这样就成功地解决了光学介入、集成化等技术难题。在腔量子电动力学研究中实现微环芯腔与原子强耦合的前提是在实验上实现微环芯腔与锥形纳米光纤的临界耦合,即光纤中全部光耦合进入微环芯腔。微环芯腔的本征品质因数 Q_0 只由其自身的固有损耗决定,因此在腔制作完成后就已确定。锥形纳米光纤与微环芯腔耦合会引入损耗,这一损耗引起的品质因数 Q_{ex} 与微环芯腔与锥形纳米光纤的间距、锥形纳米光纤直径、锥形纳米光纤中激光模式等因素有关。当 $Q_0 < Q_{ex}$ 时,微环芯腔与锥形纳米光纤组成的系统处于欠耦合状态。此时锥形纳米光纤的倏逝场与微环芯腔的腔场交叠部分很少,大部分光没有耦合进入微环芯腔。由品质因数的叠加公式 $1/Q = 1/Q_0 + 1/Q_{ex}$ 可知,当 $Q_0 \ll Q_{ex}$ 时,欠耦合状态下测量得到的品质因数 Q 非常接近微环芯腔的本征品质因数 Q_0 。这里定义耦合效率为 η , 其与归一化最小透射率 T_{min} 的关系是

$\eta = (1 - T_{min}) \times 100\%$ 。微环芯腔的透射率会随着微环芯腔与锥形纳米光纤间距的减小而减小,耦合效率逐渐增大。当 $Q_0 = Q_{ex}$ 时,锥形纳米光纤中所有的光都耦合进入微环芯腔,透射率为零,耦合效率为 100% ,系统处于临界耦合状态^[9]。由 $1/Q = 1/Q_0 + 1/Q_{ex} = 2/Q_0$ 可知,此时测量得到的品质因数 Q 为微环芯腔的本征品质因数 Q_0 的 $1/2$,进而得到微环芯腔的本征品质因数 Q_0 。当 $Q_0 > Q_{ex}$ 时,系统处于过耦合状态。锥形纳米光纤的倏逝场与微环芯腔的腔场重叠部分很大,锥形纳米光纤中的光容易耦合进微环芯腔,同时微环芯腔中的光也容易耦合进锥形纳米光纤。随着二者间距的减小, Q 值减小,线宽变宽,共振时腔透射率增加,耦合效率降低。本文在实验上通过精确控制微环芯腔与锥形纳米光纤的相对位置实现了两者的临界耦合,同时研究微环芯腔与锥形纳米光纤分别处于欠耦合、临界耦合和过耦合状态时腔的透射率、腔模线宽和共振频率的特性并实现三种耦合状态的精确控制。当微环芯腔与锥形纳米光纤处于临界耦合时,测量得到微环芯腔的自由光谱区、线宽、品质因数、共振频率、等效腔长等参数。该研究为下一步实现微环芯腔与原子间强耦合的实现奠定了实验基础。

1 实验装置

微环芯腔与锥形纳米光纤耦合的实验装置示意图如图 1 所示。实验中使用宽调谐激光器(Newport 公司,型号:TLB-6716-P)作为光源。其输出波长范围为 $830\text{ nm} - 853\text{ nm}$ 。激光由光纤耦合输出并通过偏振控制器(Thorlabs 公司,型号:FPC030)以调节微环芯腔与锥形纳米光纤耦合处锥形纳米光纤中激光的偏振状态。锥形纳米光纤的输出光(即微环芯腔透射光)由光电探测器(Thorlabs 公司,型号:PDA10A-EC)探测。信号发生器产生的三角波对激光器进行频率扫描并获得微环芯腔的透射光谱。实验中使用的锥形纳米光纤利用自制的氢氧火焰加热拉伸系统拉伸而成,其锥区直径小于 600 nm ,透射率大于 93% 。

波长 852 nm 的激光在锥腰处为单模传输,这也是实现临界耦合的一个基本条件。

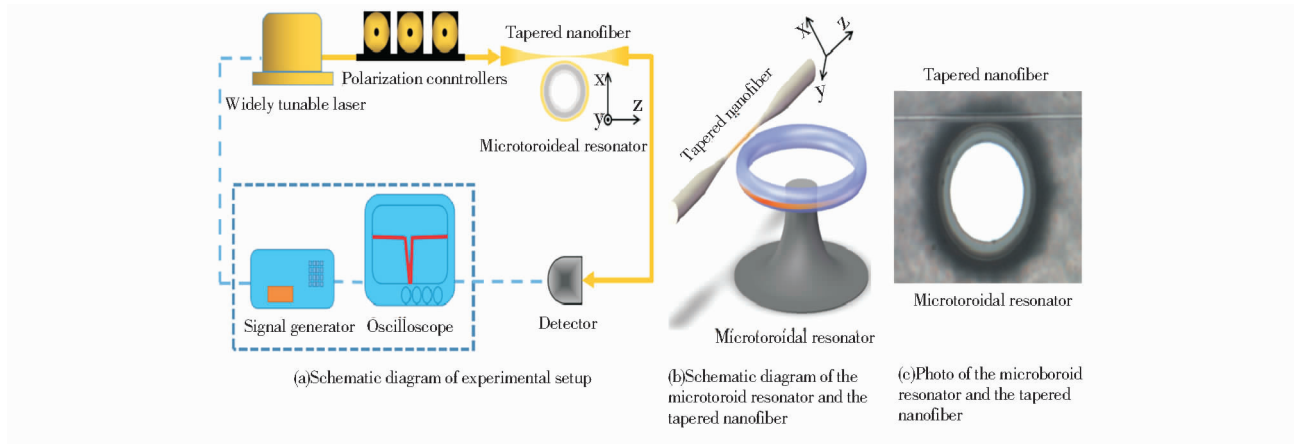


Fig. 1 (a) Schematic diagram of experimental setup for the coupling between the microtoroidal resonator and the tapered nanofiber (b) and (c) Schematic description and a micrograph of the microtoroid resonator and the tapered nanofiber

图 1 (a) 微环芯腔与锥形纳米光纤耦合的实验装置示意图。

图 (b) 和图 (c) 分别为微环芯腔与锥形纳米光纤的耦合示意图和实物图

图 1 中插图 (b) 和 (c) 分别为微环芯腔与锥形纳米光纤的耦合示意图和实物图。当锥形纳米光纤引入的损耗与微环芯腔内在损耗相等时,微环芯腔与锥形纳米光纤达到临界耦合。在实验中两者相对位置对耦合状态影响很大。因此我们将微环芯腔放置在一个 x、y、z 三个维度精密平移台 (Newport 公司, 型号: M-562-XYZ-LH) 上, 将压电陶瓷 (PI 公司, 型号: P-010.00H) 和压电促动器 (Newport 公司, 型号: PZA12) 安装在精密平移台上, 利用压电促动器可以将微环芯腔的位置精度控制在 30 nm。最终使用压电陶瓷对微环芯腔与锥形纳米光纤的耦合进行精细调节, 精度可以达到亚纳米量级。同时我们将锥形纳米光纤固定于微调镜架上 (Newport 公司, 型号: 8807) 以实现锥形纳米光纤相对于微环芯腔圆环平面的俯仰调节, 角度分辨率可达 0.7 μrad。在调节过程中首先调节锥形纳米光纤的俯仰, 使其与微环芯腔圆环所在平面平行。然后调节微环芯腔靠近锥形纳米光纤 (x 轴), 当两者间距小于 3 μm 时即进入耦合区域。利用压电陶瓷精密调节微环芯腔与锥形纳米光纤的间距, 同时大范围扫描激光器频率。当激光器频率与微环芯腔共振时锥形纳米光内激光耦合进入微环芯腔, 从而导致透射率减少, 见图 2。y 轴方向调节锥形

纳米光纤与微环芯腔圆环赤道平面重合。另外锥形纳米光纤直径对耦合状态有着非常重要的影响。锥形纳米光纤由加热拉伸装置加工, 这导致在锥形纳米光纤轴向 (z 轴) 上的不同位置, 锥形纳米光纤的直径不同。因此需要精密调节微环芯腔在锥形纳米光纤轴向位置以达到透射率最低, 从而实现临界耦合。最后, 在以上调节的同时, 利用偏振控制器调节锥形纳米光纤中激光的偏振以实现微环芯腔基模与锥形纳米光纤的临界耦合。

2 实验结果

图 2 为大范围扫描激光波长并调节微环芯腔与锥形纳米光纤的相对位置后得到的微环芯腔的透射谱线。测量得到的透射谱线只与腔的本征品质因数 Q₀ 和锥形纳米光纤耦合引入的损耗有关^[33]。由图可知, 在激光波长为 845.61 nm (图 2 中谱线②)、848.15 nm (图 2 中谱线⑦)、850.71 nm (图 2 中谱线⑬) 处, 出现 3 个大的共振谱线, 为微环芯腔的共振基模。相邻基模之间能量较低的模式为微环芯腔的高阶模式 (图 2 中谱线①、③、④、⑤、⑥、⑧、⑨、⑩、⑪、⑫和⑭)。此时微环芯腔在波长 850.71 nm 处 (图 2 中谱线⑬) 共振, 实现

临界耦合。但是图中微环芯腔透射率并未减小至 0,这是因为在激光波长扫描过程中扫描速度超过探测器响应带宽所致。而激光波长为 845.61 nm(图 2 中谱线②)和 848.15 nm(图 2 中谱线⑦)谱线未能达到临界耦合。原因是不同共振波长时,实现临界耦合的微环芯腔与锥形纳米光纤相对位置存在细微差别,因此实验中很难在数个共振波长处同时实现临界耦合。由此可以得到微环芯腔的自由光谱区 FSR 为 1067 ± 5 GHz。微环芯腔有效折射率 n_{eff} 为 1.26,从而得到微腔等效腔长为 $223 \pm 1 \mu\text{m}$ 。

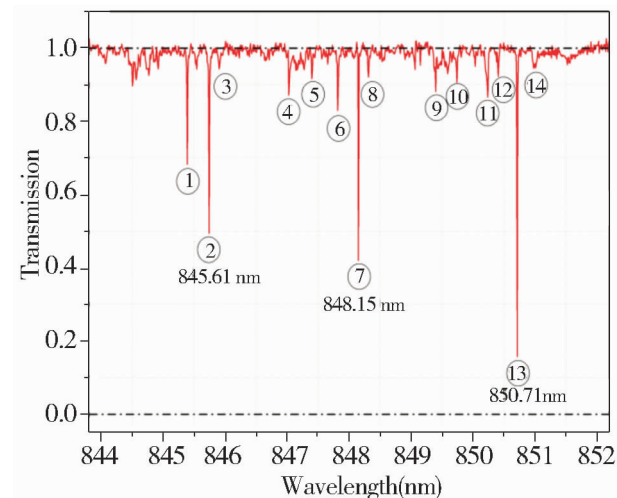


Fig. 2 Transmission spectrum of the microtoroid resonator for sweeping the laser wavelength from 843.8 nm to 852.2 nm

图 2 宽调谐激光器大范围波长扫描时 (843.8 nm—852.2 nm)微环芯腔的透射谱线

精细扫描激光器频率时,我们可以得到微环芯腔在共振波长 λ_0 为 848.15 nm 处的共振谱线,见图 3。图中红色实线表示微环芯腔与锥形纳米光纤处于临界耦合时的透射谱线,蓝色虚线表示激光器频率扫描信号。当微环芯腔与锥形纳米光纤未发生耦合时,定义微环芯腔的透射率为 100%。由图可知,在激光与微环芯腔共振时,透射率为 $0.3\% \pm 0.3\%$,微环芯腔与锥形纳米光纤耦合效率可达 $99.7\% \pm 0.3\%$ 。由图可得微环芯腔线宽 $\Delta\nu$

$$\left(\frac{c}{n_{eff}} \right)$$

为 $2.9 \pm 0.1 \text{GHz}$ 。由公式 $Q_0 = \frac{1}{2} \frac{\nu}{\Delta\nu} = \frac{1}{2} \frac{\lambda_0}{\Delta\lambda}$ 可

得(其中 ν 为共振频率, c 为真空中的光速),本征品质因数 Q_0 为 $(6.2 \pm 0.6) \times 10^4$ 。

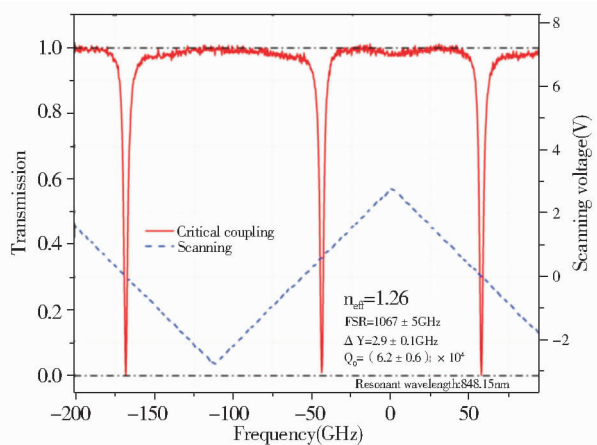


Fig. 3 Transmission spectrum of critical coupling between the microtoroid resonator and the tapered nanofiber for a wavelength of 848.15 nm. The red solid line indicates the transmission spectrum when the microtoroid resonator and the tapered nanofiber are in critical coupling; the blue dotted line indicates the laser frequency scanning signal

图 3 微环芯腔与锥形纳米光纤临界耦合时的透射光谱。共振波长为 848.15nm。红色实线表示微环芯腔与锥形纳米光纤处于临界耦合时的透射光谱;蓝色虚线表示激光器频率扫描信号

微环芯腔与锥形纳米光纤的耦合状态可以通过改变微环芯腔与锥形纳米光纤的间距(x 轴)来精确控制。图 4 为微环芯腔与激光共振时其透射率、线宽以及共振频率随微环芯腔与锥形纳米光纤间距的变化曲线。当微环芯腔与锥形纳米光纤的间距处于 $0.6 \mu\text{m}$ 时,系统处于临界耦合状态(对应图 4 中红色斜线阴影②)。由图可见,随着微环芯腔与锥形纳米光纤间距的减小,透射率由 100% 逐渐减少至最低点 ($0.3\% \pm 0.3\%$) 后逐渐增大,当微环芯腔与锥形纳米光纤接触时(间距为 0),透射率为 $57.0\% \pm 0.4\%$ 。当微环芯腔与锥形纳米光纤的间距较大时,共振谱线的频率和线宽均保持一个恒定值,当间距逐渐减小时共振峰的线宽逐渐增大,当光纤碰到微腔上时,共振谱线的最大线宽为 $14.8 \pm 1.1 \text{GHz}$ 。同时我们还可以看到,随着间距的减小共振峰对应的中心频率发生红移,共移动 $19.2 \pm 0.1 \text{GHz}$ 。当微环芯腔

远离锥形纳米光纤时,锥形纳米光纤引入损耗很小并且对有效腔长的影响很小,因此共振谱线的频率和线宽均保持一个恒定值。而当两者逐渐靠近时,锥形纳米光纤引入的外部损耗增加,使得谱线展宽,有效腔长增大导致共振频率产生红移。这样我们就

通过改变微环芯腔与锥形纳米光纤的间距来精密调节两者的耦合状态,从而最终实现临界耦合。图4中插图给出微环芯腔与锥形纳米光纤不同间距时腔的透射光谱。

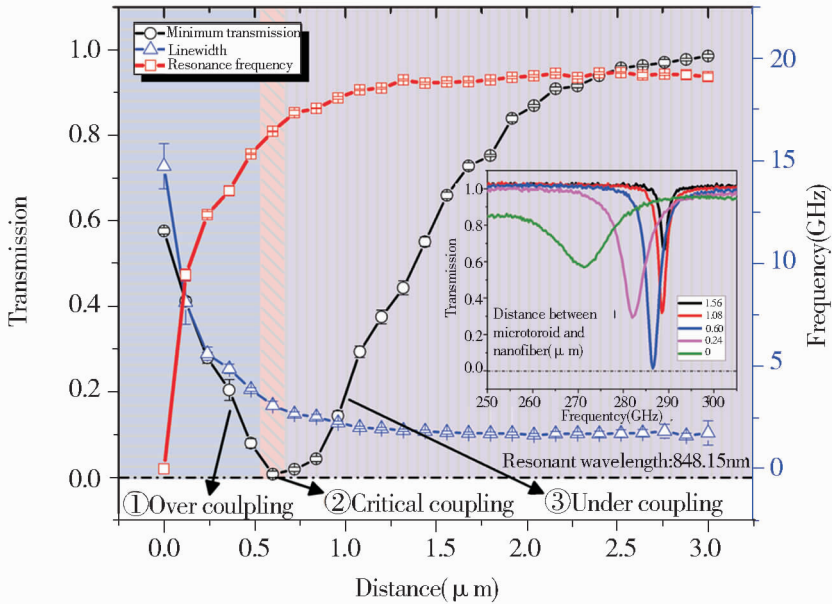


Fig. 4 The minimum transmission, the linewidth, and the resonant frequency of the microtoroid resonator versus the gap distance between the microtoroid resonator and the tapered nanofiber. The black hollow circular dots are the minimum transmission of the microtoroid resonator. The blue hollow triangular points indicate the linewidth of the microtoroid resonator. The red hollow square points are the resonant frequency of the microtoroid resonator. The blue horizontal line shading (①) is the over-coupling region. The red slash shadow (②) is the critical coupling region, and the purple vertical line shadow (③) is the under-coupling region. The inset shows the transmission spectra of the microtoroid resonator with different gap distances

图4 腔最小透射率、腔模线宽和共振频率随微环芯腔与锥形纳米光纤间距变化曲线。黑色空心圆为微环芯腔的最小透射率;蓝色空心三角为微环芯腔的线宽;红色空心方块为微环芯腔的共振频率。蓝色横线阴影(①)为过耦合区域,红色斜线阴影(②)为临界耦合区域,紫色竖线阴影(③)为欠耦合区域。插图表示不同间距时微环芯腔的透射谱线

3 结论

实验上我们通过精密控制微环芯腔与锥形纳米光纤的相对位置实现了两者的临界耦合。临界耦合时,微环芯腔与锥形纳米光纤的间距为 $0.6 \mu\text{m}$,其耦合效率为 $99.7\% \pm 0.3\%$,测量得到实验所用的微环芯腔的自由光谱区 FSR 为 $1067 \pm 5 \text{ GHz}$,等效腔长为 $223 \pm 1 \mu\text{m}$,线宽 $\Delta\nu$ 为 $2.9 \pm 0.1 \text{ GHz}$,本征品质因数 Q_0 为 $(6.2 \pm 0.6) \times 10^4$ 。另外我们实现了通过改变微环芯腔与锥形纳米光纤的间距来对欠耦

合、临界耦合和过耦合状态的精确控制,并探究了微环芯腔的透射率、线宽和共振频率随耦合状态的变化规律,为我们进一步了解和控制微环芯腔提供了实验支持,同时为下一步实现微环芯腔与原子间强耦合的实现奠定了实验基础。

感谢南京大学肖敏教授实验组提供微环芯腔样品。感谢中北大学闫树斌教授和中国科学技术大学董春华研究员关于锥形纳米光纤制作和微环芯腔耦合实验和理论方面的有益讨论。

参考文献:

- [1] Ludeke R, Harris E P. Tunable GaAs Laser in an External Dispersive Cavity[J]. *Appl Phys Lett*, 1972, **20**:499-500. DOI:10.1063/1.1654033.
- [2] Wieman C E, Hollberg L. Using Diode Lasers for Atomic Physics[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1991, **62**: 1-20. DOI: 10.1063/1.1142305.
- [3] Rempe G, Thompson R J, Kimble H J, *et al.* Measurement of Ultralow Losses in an Optical Interferometer[J]. *Opt Lett*, 1992, **17**:363-365. DOI:10.1364/OL.17.000363.
- [4] Kitching J, Yariv A, Shevy Y. Room Temperature Generation of Amplitude Squeezed Light from a Semiconductor Laser with Weak Optical Feedback[J]. *Phys Rev Lett*, 1995, **74**:3372. DOI:10.1103/PhysRevLett.74.3372.
- [5] 张卫平,等. 量子光学研究前沿[M]. 上海:上海交通大学出版社,2014. ISBN: 978-7-313-11815-8/O.
- [6] Mabuchi H, Turchette Q A, Chapman M S, *et al.* Real-Time Detection of Individual Atoms Falling Through a High-Finesse Optical Cavity[J]. *Opt Lett*, 1996, **21**:1393-1395. DOI:10.1364/OL.21.001393.
- [7] Vahala K J. Optical Microcavities[J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 839-846. DOI: 10.1038/nature01939.
- [8] Braginsky V B, Gorodetsky M L, Ilchenko V S. Quality Factor and Nonlinear Properties of Optical Whispering-Gallery Modes[J]. *Phys Lett A*, 1989, **137**:393-397. DOI:10.1016/0375-9601(89)90912-2.
- [9] 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. DOI: 10.1038/nature01371.
- [10] Srinivasan K, Barclay P E, Painter O, *et al.* Experimental Demonstration of a High Quality Factor Photonic Crystal Microcavity[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **83**:1915-1917. DOI: 10.1063/1.1606866.
- [11] Walther H, Varcoe B T H, Englert B G, *et al.* Cavity Quantum Electrodynamics[J]. *Rep Prog Phys*, 2006, **69**: 1325-1382, DOI:10.1088/0034-4885/69/5/R02.
- [12] Brattke S, Varcoe B T H, Walther H. Generation of Photon Number States on Demand via Cavity Quantum Electrodynamics[J]. *Phys Rev Lett*, 2001, **86**:3534. DOI:10.1103/PhysRevLett.86.3534.
- [13] ZHANG Peng-fei, GUO Yan-qiang, LI Zhuo-heng, *et al.* Elimination of Degenerate Trajectory of Single Atom Strongly Coupled to the Tilted Cavity TEM₁₀ Mode[J]. *Phys Rev A*, 2011, **83**: 031804 (R). DOI: 10.1103/PhysRevA.83.031804.
- [14] ZHANG Peng-fei, LI Gang, ZHANG Yu-chi, *et al.* Light-Induced Atom Desorption for Cesium Loading of a Magneto-Optical Trap Analysis and Experimental Investigations [J]. *Phys Rev A*, 2009, **80**: 053420. DOI: 10.1103/PhysRevA.80.053420.
- [15] DU Jin-jin, LI Wen-fang, WEN Rui-juan, *et al.* Precision Measurement of Single Atoms Strongly Coupled to the Higher Order Transverse Modes of a High-Finesse Optical Cavity[J]. *Appl Phys Lett*, 2013, **103**:083117. DOI:10.1063/1.4819228.
- [16] LI Wen-fang, DU Jin-jin, WEN Rui-juan, *et al.* Temperature Measurement of Cold Atoms Using Single-Atom Transits and Monte Carlo Simulation in a Strongly Coupled Atom-cavity System[J]. *Appl Phys Lett*, 2014, **104**: 113102. DOI:10.1063/1.4869031.
- [17] Hijlkema M, Weber B, Specht H P, *et al.* A Single-Photon Server with Just One Atom[J]. *Nature Physics*, 2007, **3**: 253-255. DOI:10.1038/nphys569.
- [18] Kuhn A, Hennrich M, Rempe G. Deterministic Single-Photon Source for Distributed Quantum Networking[J]. *Phys Rev Lett*, 2002, **89**:067901. DOI: 10.1103/PhysRevLett.89.067901.
- [19] 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**:1992-1994. DOI: 10.1126/Science.1095232.
- [20] Wilk T, Webster S C, Kuhn A, *et al.* Single-Atom Single Photon Quantum Interface[J]. *Science*, 2007, **317**:488-490. DOI: 10.1126/science.1143835.

- [21] Weber B, Specht H P, Müller T, *et al.* Photon-Photon Entanglement with a Single Trapped Atom[J]. *Phys Rev Lett*, 2009, **102**:030501. DOI:10.1103/PhysRevLett.102.030501.
- [22] Bochmann J, Mücke M, Guhl C, *et al.* Lossless State Detection of Single Neutral Atoms[J]. *Phys Rev Lett*, 2010, **104**:203601. DOI: 10.1103/PhysRevLett.104.203601.
- [23] Gehr R, Volz J, Dubois G, *et al.* Cavity-Based Single Atom Preparation and High-Fidelity Hyperfine State Readout[J]. *Phys Rev Lett*, 2010, **104**:203602. DOI:10.1103/PhysRevLett.104.203602.
- [24] Specht H P, Nölleke C, Reiserer A, *et al.* A Single-atom Quantum Memory[J]. *Nature*, 2011, **473**:190-193. DOI: 10.1038/nature09997.
- [25] Ritter S, Nölleke C, Hahn C, *et al.* An Elementary Quantum Network of Single Atoms in Optical Cavities[J]. *Nature*, 2012, **484**(7393):195-200. DOI:10.1038/nature11023.
- [26] Aoki T, Dayan B, Wilcut E, *et al.* Observation of Strong Coupling Between one Atom and a Monolithic Microresonator [J]. *Nature*, 2006, **443**:671-674. DOI:10.1038/nature05147.
- [27] Srinivasan K, Painter O. Linear and Nonlinear Optical Spectroscopy of a Strongly Coupled Microdisk-Quantum Dot System[J]. *Nature*, 2007, **450**(7171): 862-865. DOI:10.1038/nature06274.
- [28] Ilchenko V S, Yao X S, Maleki L. Pigtailling the High-Q Microsphere Cavity: a Simple Fiber Coupler for Optical Whispering-Gallery Modes[J]. *Opt Lett*, 1999, **24**:723. DOI: 10.1364/OL.24.000723.
- [29] Gorodetsky M L, Ilchenko V S. High-Q Optical Whispering-Gallery Microresonators: Precession Approach for Spherical Mode Analysis and Emission Patterns with Prism Couplers[J]. *Opt Comm*, 1994, **113**:113. DOI: 10.1016/0030-4018(94)90603-3.
- [30] Laine J P, Little B E, Lim D R, *et al.* Microsphere Resonator Mode Characterization By Pedestal Anti-Resonant Reflecting Waveguide Coupler[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2000, **12**:1004-1006. DOI:10.1109/68.867989.
- [31] Griffel G, Connolly J, Morris N, *et al.* Morphology-Dependent Resonances of a Microsphere-Optical Fiber System[J]. *Opt Lett*, 1996, **21**:695-697. DOI:10.1364/OL.21.000695.
- [32] Tong L M, Gattass R R, Ashcom J B, *et al.* Subwavelength-Diameter Silica Wires for Low-Loss Optical Waveguiding [J]. *Nature*, 2003, **426**:816-819. DOI:10.1038/nature02193.
- [33] 邹长铃,董春华,崔金明,等. 回音壁模式光学微腔:基础与应用[J]. *中国科学:物理学 力学 天文学*, 2012, **42**:1155-1175. DOI:10.1360/132012-602.

Experimental Investigation on the Coupling Process between Microtoroidal Resonators and Tapered Nanofibers

CHENG Fan^{1,2}, ZHANG Peng-fei^{1,2}, WANG Xin^{1,2}, ZHANG Tian-cai^{1,2}

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

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

Abstract: The coupling properties between microtoroidal resonators and tapered nanofibers in the vicinity of cesium transition lines were studied experimentally in this paper. We could control the under-coupling, the critical coupling and the over-coupling precisely by controlling the corresponding position of the microtoroidal resonator and the tapered nanofiber. The critical coupling was achieved when the gap distance between the microtoroidal resonator and the tapered nanofiber was 0.6 μm . The minimum transmission

was $0.3\% \pm 0.3\%$. The coupling efficiency was $99.7\% \pm 0.3\%$. The free spectral range of the microtoroidal resonator was 1067 ± 5 GHz. The effective cavity length of the microtoroidal resonator was 223 ± 1 μm . The linewidth was 2.9 ± 0.1 GHz, and the intrinsic quality factor was $(6.2 \pm 0.6) \times 10^4$. With the decrease of the gap distance, the linewidth gradually increased, and the resonant frequency of the microtoroidal resonator lay at a redshift of 19.2 ± 0.1 GHz. The investigation not only gives a way to control the coupling of microtoroidal resonators and tapered nanofibers effectively, but also lays the experimental foundation for realizing the strong coupling between microtoroidal resonators and atoms. At the same time, this study deepens the understanding of the different coupling states of the microtoroidal resonator, and provides the experimental basis for the study of the under-coupling state and over-coupling state.

Key words: microtoroidal resonator; tapered nanofiber; critical coupling