

基于纳米光纤的光学法布里-珀罗谐振腔 腔内模场的表征*

胡裕栋¹⁾ 宋丽军¹⁾ 王晨曦¹⁾ 张沛¹⁾ 周静¹⁾
李刚¹⁾²⁾ 张鹏飞^{1)2)†} 张天才¹⁾²⁾

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

2) (山西大学, 极端光学协同创新中心, 太原 030006)

(2022 年 7 月 29 日收到; 2022 年 8 月 24 日收到修改稿)

光学法布里-珀罗 (F-P) 谐振腔、粒子、微纳机械振子三者结合的复合腔光力学系统在基本物理问题、量子信息、精密测量等方面的研究和应用中越来越引起大家的重视. 本文将纳米光纤置于光学 F-P 谐振腔的腔模中, 探究了纳米光纤对光学 F-P 谐振腔精细度的影响, 并通过测量纳米光纤引起的光学 F-P 谐振腔内腔损耗随纳米光纤位置的关系直接获得光学 F-P 谐振腔的腰斑半径, 从而进一步实现了对光学 F-P 谐振腔腔内模场分布的无损表征. 此方法可以用于在纳米光纤表面装载的发光粒子与光学 F-P 谐振腔耦合的精确控制, 也为集合光子、粒子、声子的复合腔光力学研究提供了良好的平台.

关键词: 腔量子电动力学, 纳米光纤, 光学 F-P 谐振腔, 腰斑

PACS: 42.50.Pq, 42.50.-p, 42.60.Da, 42.81.Qb

DOI: 10.7498/aps.71.20221538

1 引言

光与原子的相互作用系统是基本物理问题、量子信息、精密测量等方面研究和应用的重要工具之一^[1]. 其中光与原子相互作用的强度, 称为耦合强度, 是各类研究关注的重要指标之一. 为了研究特定的物理现象, 如实现对单个原子的灵敏探测^[2], 研究单粒子水平上光与物质相互作用的量子行为^[3]等, 通常要在光和原子强耦合的条件下完成. 当光和原子的耦合强度大于原子和光场的损耗时, 即称为强耦合. 光学谐振腔的引入可以使得光子能够在受限空间中往返多次传输, 这极大地提升了光子在光学谐振腔内的寿命, 使得光场和原子实现强耦合^[4].

近年来随着研究的进展, 各种不同结构、不同材料的光学谐振腔被开发并应用于腔量子电动力学研究中^[3], 例如光学镜片法布里-珀罗 (F-P) 微腔^[5]、光纤环形谐振腔^[6]、微盘腔^[7]、微柱腔^[8]、纳米光纤环形腔^[9]、光纤 F-P 腔^[10,11]、微环芯腔^[12]、光子晶体微腔^[13]、领结腔^[14]等. 基于上述各类光学谐振腔的光与物质相互作用研究也得到了快速发展^[15–25]. 在上述各类系统中, 为了实现光与物质相互作用, 原子或固体粒子需要被放置于光学谐振腔的腔场中, 并且为了达到最大耦合强度, 对粒子的空间位置控制提出了更高要求. 对于模式开放的光学 F-P 谐振腔, 人们可以利用激光冷却与俘获技术^[26], 将原子、分子、离子等控制在腔模中, 如采用原子自由下落^[27]、原子喷泉^[28]、光学偶极阱^[29]、原子传

* 国家自然科学基金 (批准号: U21A6006, U21A20433, 11974223, 11974225, 12104277, 12104278) 和山西省“1331 工程”重点学科建设基金资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangpengfei@sxu.edu.cn

送带^[30]等方法. 其优点是可以悬空控制粒子, 无物理装置介入, 但是缺点是系统庞大、技术难度高^[31].

但是对于单个固体粒子, 如量子点, 色心等直接悬空放置在光学 F-P 谐振腔腔模中存在技术困难. 这通常需要借助载体将粒子放置于光学 F-P 谐振腔的腔模中, 以实现光场与粒子的相互作用. 固体粒子装载方式可以采用将粒子直接生长或者放置在微盘腔、微球腔表面^[32], 其优点是耦合强度大、系统稳定, 但缺点是粒子位置无法实时移动和控制.

近年来, 纳米光纤的发展为装载固体粒子提供了很好的接口^[33], 与此同时也为粒子的操控和探测提供了一种有效、便利的方法^[34]. 纳米光纤既可以装载原子^[35], 也可以装载固体粒子^[36]. 另外, 由于纳米光纤具有制作方法简单、成本低, 而且其表面具有强倏逝场并可与粒子直接相互作用等优点, 所以被广泛运用. 2003 年直径为亚波长量级的纳米光纤被提出, 其通常由普通光纤利用熔融拉伸技术制作而成. 纳米光纤由普通光纤区, 锥区, 腰区三部分组成, 腰区的光纤直径可达百纳米甚至更小^[37]. 当纳米光纤直径为百纳米量级时, 纳米光纤表面的光学倏逝场强度会被增强^[38]. 这为纳米光纤与原子、离子、粒子和色心等多种粒子发射器的耦合提供了良好的实验平台^[39]. 由此可见, 利用纳米光纤可以将固体粒子或者原子进行装载, 并将纳米光纤与粒子整体放置于光学 F-P 谐振腔中, 实现腔内模场与粒子的相互作用. 而且纳米光纤放置于光学 F-P 谐振腔的系统除了以上应用, 也可以作为腔光力学研究的实验平台, 进行腔光力学研究^[40–43].

当纳米光纤放置于光学 F-P 谐振腔的腔模中, 由于纳米光纤对腔内模场进行散射, 增加了光学 F-P 谐振腔的内腔损耗, 最终会影响光学 F-P 谐振腔的精细度^[44]. 这些效应将会影响光学 F-P 谐振腔内粒子与光场的耦合强度, 因此探究纳米光纤对光学 F-P 谐振腔的影响是十分必要的. 在光学 F-P 谐振腔中进行光与粒子的相互作用研究时, 光学 F-P 谐振腔的腰斑半径是实验中的重要参数之一. 因此, 对光学 F-P 谐振腔腰斑半径的测量是非常必要的. 现有测量光学谐振腔腰斑半径的方法有: 通过测量光学谐振腔不同模式之间的相位差计算光学谐振腔的腰斑半径^[45,46]、通过将狭缝置于光学谐振腔轴向不同位置测量光斑半径拟合获得光学谐振腔腰斑半径^[47]. 但是上述方法在面临实时表

征腔内模场和用于腔量子电动力学中粒子位置实时控制的应用要求存在一定技术困难.

基于纳米光纤的尺寸小、集成性好的特点, 我们提出利用纳米光纤测量光学 F-P 谐振腔的腰斑半径, 通过改变纳米光纤在光学 F-P 谐振腔腔模中的位置实现对光学 F-P 谐振腔腔内模场分布的表征. 此方法具有不影响腔内模场建立、直接测量获得光斑参数等优点. 本文将直径约为 440 nm 的纳米光纤置于光学 F-P 谐振腔中, 研究了纳米光纤对光学 F-P 谐振腔精细度的影响. 通过改变纳米光纤在光学 F-P 谐振腔腔模中的位置对光学 F-P 谐振腔腔内模场分布进行测量和表征, 确定了光学 F-P 谐振腔的腰斑半径尺寸和位置. 利用此方法可以最终确定纳米光纤装载固体粒子后置于光学 F-P 谐振腔的最佳耦合位置, 也为后续采用光学 F-P 谐振腔与 N-V 色心的相互作用研究打下坚实的基础, 同样也为纳米光纤、光学 F-P 谐振腔、固体粒子三者结合的复合腔光力学的研究提供良好的平台.

2 理论模拟

在实验中与腔内模场相互作用的粒子通常需要被放置于光学 F-P 谐振腔腔内模场的腰斑中心处, 以达到最大耦合强度. 拟将固体粒子装载于纳米光纤表面并与腔内模场耦合. 而纳米光纤直径 (440 nm) 远小于光学 F-P 谐振腔的腰斑半径 (70 μm), 因此纳米光纤对光学 F-P 谐振腔腔内模场传输仅造成微小的损耗, 但不会影响腔内模场的整体分布. 通过有限时域差分法 (FDTD) 对纳米光纤对光学 F-P 谐振腔内高斯光束的传输损耗进行了模拟. 图 1(a) 为纳米光纤置于高斯光束中的模型示意图. 高斯光束沿 z 轴传输, 纳米光纤轴向沿 x 轴放置. 当纳米光纤放置于光学 F-P 谐振腔腰斑处, 改变纳米光纤在 y 轴的位置, 根据 $F = 2\pi / (1 - R_1 + 1 - R_2 + L)$ 得到光学 F-P 谐振腔的精细度随纳米光纤在 y 轴不同位置的变化关系, 如图 1(b) 所示. 其中 F 是光学 F-P 谐振腔的精细度, $1 - R_1 = 1 - R_2 = 0.2\%$ 为实验中所用光学 F-P 谐振腔腔镜的透过率, R_1 、 R_2 为实验中所用光学 F-P 谐振腔腔镜的反射率, L 是理论模拟的纳米光纤置于光学 F-P 谐振腔中造成的内腔损耗. 模型中光学 F-P 谐振腔腔内的腰斑半径取为 70 μm ,

纳米光纤直径为 440 nm, 均对应后续实验的实测值. 图 1(b) 中蓝色实线为光学 F-P 谐振腔内高斯光束强度随 y 轴位置的变化曲线. 图 1(b) 中红色三角块是模拟得到的纳米光纤对光学 F-P 谐振腔引起的内腔损耗. 由图 1(b) 可以看出, 纳米光纤造成光学 F-P 谐振腔内腔损耗与光学 F-P 谐振腔场强度的分布一致, 因此可以测量纳米光纤引起的内腔损耗随空间位置的变化, 来获得光学 F-P 谐振腔内腰斑半径的数值. 图 1(b) 中橙色圆点为模拟计算得到的光学 F-P 谐振腔精细度随纳米光纤在不同 y 轴位置的值. 由图 1(b) 可知, 当纳米光纤置于光学 F-P 谐振腔腔场内, 由于纳米光纤造成的光学 F-P 谐振腔内腔损耗使得光学 F-P 谐振腔精细度有一个明显的下降, 由 1500 降至最低约

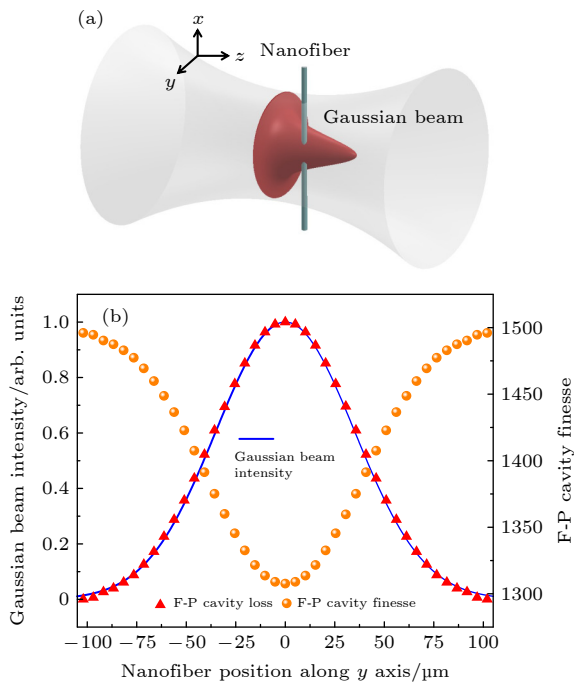


图 1 (a) 理论模型结构示意图, 灰色阴影表示高斯光束, 红色阴影表示高斯光束在径向光功率密度分布, 蓝色长棒表示纳米光纤; (b) 光学 F-P 谐振腔的精细度随纳米光纤在 y 轴位置的变化关系的模拟结果, 红色三角块为纳米光纤造成光学 F-P 谐振腔的内腔损耗, 蓝色实线为光学 F-P 谐振腔腔内高斯光束的强度分布, 橙色圆点为光学 F-P 谐振腔精细度

Fig. 1. (a) Schematic of the model for numerical simulations. Gray shaded areas represent the Gaussian beams, red shaded areas represent the intensity distribution of Gaussian beams and long blue bars represent the nanofiber. (b) F-P cavity finesse as a function of the nanofiber position along y -axis. The orange circles are the finesse of F-P cavity. The red triangular blocks are the F-P cavity losses and the blue solid line is the intensity distribution of the Gaussian beam in the F-P cavity.

为 1300. 而纳米光纤造成光学 F-P 谐振腔内腔损耗与腔内模场强度分布相关, 所以光学 F-P 谐振腔内腔损耗的变化曲线也呈高斯型. 两者细小的差别是由于纳米光纤具有一定尺寸和数值模拟误差造成的.

3 实验系统及测量结果

3.1 实验系统

实验中我们搭建了将纳米光纤放置于光学 F-P 谐振腔中的实验装置, 其示意图如图 2(a) 所示. 光学 F-P 谐振腔是由两片高反射率的腔镜相对放置而成. 两片腔镜的曲率半径为 $r_1 = r_2 = 50$ mm, 反射率为 $R_1 = R_2 \approx 99.8\%$. 其中一片腔镜由环状压电陶瓷 (PI, P-016.00 H) 固定, 通过改变施加在压电陶瓷上的电压可以实现对腔长的扫描. 激光由一台半导体激光器提供, 波长为 852 nm. 激光通过电光调制器 (EOM, 图 2 中未标出) 并施加相位调制信号, 调制频率为 $w = 38.9$ MHz. 光学 F-P 谐振腔的腔长为 (80 ± 4) mm, 空腔精细度约为 1500, 光学 F-P 谐振腔的腰斑半径为 (73 ± 3) μm . 光学 F-P 谐振腔的透射信号由光电探测器收集, 并将光电探测器连接至示波器, 在示波器中监视透射谱信息, 并从示波器中采集透射谱的信息进行分析.

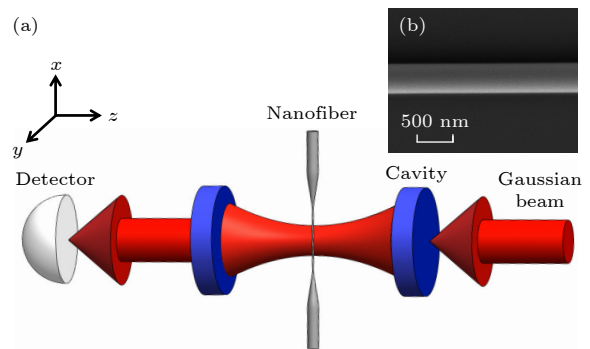


图 2 (a) 实验装置示意图; (b) 纳米光纤的电镜照片
Fig. 2. (a) Schematic of experimental setup; (b) SEM image of the nanofiber.

由于示波器采样率的限制, 对光学 F-P 谐振腔的精细度测量过程如下. 光学 F-P 谐振腔的精细度可以表示为 $F = \text{FSR}/\Delta w$, 式中 FSR 是光学 F-P 谐振腔的自由光谱区, Δw 是光学 F-P 谐振腔的线宽. 在实验中通过控制压电陶瓷 (PZT) 扫描光学 F-P 谐振腔腔长可以获取频率调制后的光学 F-P

谐振腔透射谱. 根据公式 $\text{FSR} = (T_{\text{FSR}} \times \Delta\Omega)/T_{\Delta\Omega}$ 计算得到 FSR, 式中 T_{FSR} 为光学 F-P 谐振腔相邻激光主频共振峰的扫描时间间隔, $\Delta\Omega$ 为边带调制频率, $T_{\Delta\Omega}$ 为在示波器采集的光学 F-P 谐振腔透射谱的边带与主频之间的扫描时间间隔. 同理, 根据公式 $\Delta w = (\Delta\Omega \times T_{\Delta w})/T_{\Delta\Omega}$ 计算得到 Δw , 式中 $\Delta\Omega$ 为边带调制频率, $T_{\Delta\Omega}$ 为在示波器采集的光学 F-P 谐振腔透射谱的边带与主频之间的扫描时间间隔, $T_{\Delta w}$ 是光学 F-P 谐振腔透射谱的半高全宽对应的时间间隔. 实验结果的误差来自多次测量的统计误差.

置于光学 F-P 谐振腔中的纳米光纤是通过对单模光纤进行熔融拉伸的技术加工而成, 其包括普通光纤、锥形结构和纳米光纤三个部分^[48]. 其中纳米光纤部分通过扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 拍照法测得最细直径为 (440 ± 3) nm. 图 2(b) 为纳米光纤的电镜照片. 我们制作的纳米光纤直径最细处的长度约为 4 mm, 两端锥区的长度均约为 17.5 mm. 拉制成功的纳米光纤采用“U 型支架固定于高精度三维平移台上 (Newport 461-XYZ-M). 实验中通过控制平移台来改变纳米光纤在光学 F-P 谐振腔中的相对位置. 为了避免外界环境气流对实验的影响, 将光学 F-P 谐振腔及纳米光纤整体装置放置于亚克力罩中.

3.2 实验过程、结果与分析

当纳米光纤被置于光学 F-P 谐振腔内时, 纳米光纤对腔场的散射损耗可以造成光学 F-P 谐振腔精细度的变化. 实验中将纳米光纤置于光学 F-P 谐振腔的腔模不同位置, 探究了纳米光纤对光学 F-P 谐振腔精细度的影响. 根据精细度可以获得内腔损耗, 通过内腔损耗随纳米光纤在腔径向位置的变化曲线, 采用高斯拟合可以得到腔内光斑的半径. 在此基础上, 将纳米光纤置于光学 F-P 谐振腔轴向的不同位置进行光斑半径测量, 从而可以实现对光学 F-P 谐振腔内腔内模场分布的表征.

3.2.1 纳米光纤对光学 F-P 谐振腔精细度的影响

实验中, 首先探究了将纳米光纤置于光学 F-P 谐振腔的腔模腰斑处光学 F-P 谐振腔的精细度, 随纳米光纤在光学 F-P 谐振腔径向 (图 2(a) 中 y 轴) 位置的变化情况. 利用与镜片连接的压电陶

瓷对光学 F-P 谐振腔腔长进行扫描, 并记录纳米光纤在腔模不同位置处的光学 F-P 谐振腔的透射谱. 为了测量获得的光学 F-P 谐振腔的自由光谱区和线宽, 采用激光相位调制产生的边带以标定光学 F-P 谐振腔透射谱的频率. 根据公式 $l = c/(2 \times \text{FSR})$, 实验中根据自由光谱区得到光学 F-P 谐振腔的腔长为 (80 ± 4) mm, 式中 FSR 为光学 F-P 谐振腔的自由光谱区. 实验中纳米光纤被置于光学 F-P 谐振腔腰斑处, 沿着垂直于光学 F-P 谐振腔轴向 (y 轴) 移动纳米光纤, 得到光学 F-P 谐振腔精细度随纳米光纤在 y 轴位置的变化关系, 如图 3 所示. 由图 3 可知, 纳米光纤穿过光学 F-P 谐振腔腰斑时, 光学 F-P 谐振腔精细度受到纳米光纤的影响而降低. 纳米光纤位置处于光强越大处, 其精细度越小.

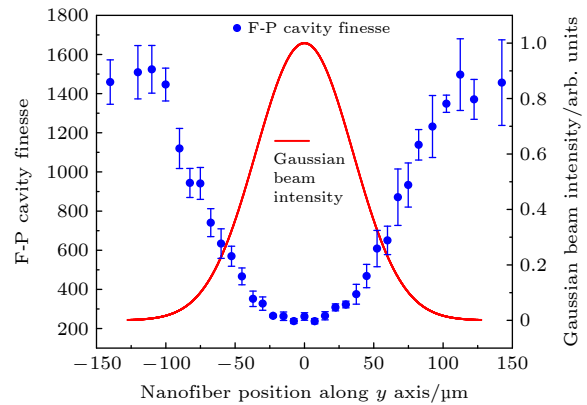


图 3 光学 F-P 谐振腔的精细度随纳米光纤在 y 轴位置的变化关系

Fig. 3. Finesse of the F-P cavity as a function of nanofiber position along y -axis.

由实验结果看到, 纳米光纤引入损耗造成最低精细度约为 240 (见图 3), 这个数值要小于理论预测的最小精细度 1300. 主要原因是附着在纳米光纤表面的灰尘引起的损耗. 在自由空间中, 空气的流动会将灰尘移动并附着在纳米光纤的表面. 当灰尘随着纳米光纤进入光学 F-P 谐振腔的腔模, 可以增加内腔损耗, 从而影响实验精度.

3.2.2 光学 F-P 谐振腔腰斑的表征

根据数值模拟的结果, 纳米光纤置于光学 F-P 谐振腔腰斑处对腔模引起的内腔损耗与纳米光纤在光学 F-P 谐振腔径向 (y 轴) 位置的关系, 通过高斯拟合得到光学 F-P 谐振腔的腰斑半径. 在实验中, 根据光学 F-P 谐振腔的腔模在其轴向分

布的关系曲线 (图 5) 得到光学 F-P 谐振腔的腰斑位置, 并将纳米光纤置于光学 F-P 谐振腔腰斑位置处测量光学 F-P 谐振腔的腰斑半径. 图 4 为实验得到的光学 F-P 谐振腔内腔损耗随纳米光纤在 y 轴位置的变化关系曲线, 紫色方块为实验测量所得的纳米光纤引起的光学 F-P 谐振腔内腔损耗, 灰色实线为高斯拟合. 拟合得到的腰斑半径为 $(72 \pm 1) \mu\text{m}$. 由实测自由光谱区方法测量腔长后计算得到的腰斑半径值为 $(73 \pm 3) \mu\text{m}$, 两者吻合得较好.

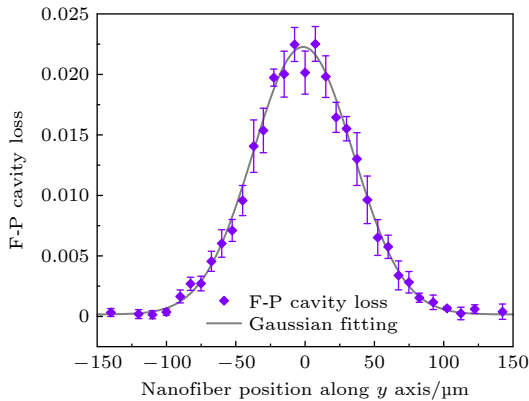


图 4 纳米光纤处于光学 F-P 谐振腔腔模腰斑处, 光学 F-P 谐振腔内腔损耗随纳米光纤在 y 轴位置的变化关系
Fig. 4. F-P cavity loss as a function of the position of the nanofiber in the y -axis when the nanofiber is at the waist of the cavity.

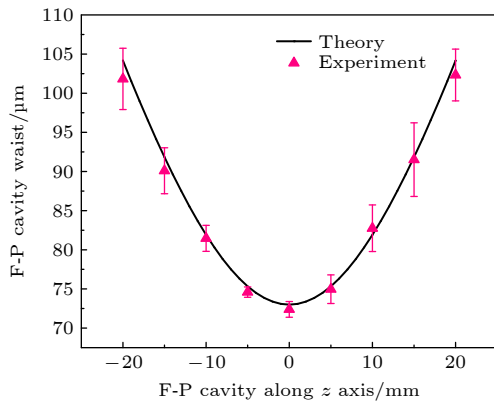


图 5 光学 F-P 谐振腔中轴向 (z 轴) 的腔内模场分布
Fig. 5. Mode distribution in the F-P cavity along z -axis.

3.2.3 光学 F-P 谐振腔腔内模场轴向分布的表征

在以上基础上, 将纳米光纤置于光学 F-P 谐振腔轴向 (z 轴) 的不同位置, 并测量光学 F-P 谐振腔轴向不同位置的光斑半径, 从而可以对光学 F-P

谐振腔腔内模场轴向分布进行表征. 实验中纳米光纤放置于光学 F-P 谐振腔轴向 (z 轴) 的不同位置, 进行与 3.2.2 节中相同的测量过程, 得到光学 F-P 谐振腔腔内光斑半径与光学 F-P 谐振腔轴向 (z 轴) 位置的变化关系图如图 5 所示. 粉色三角块为实验结果, 黑色实线为根据高斯光束的传输公式 $w(z) = w_0 \sqrt{1 + [z/(\pi w_0^2/\lambda)]^2}$ 理论预测的结果, 式中 w_0 是光学 F-P 谐振腔的腰斑半径大小, z 是光学 F-P 谐振腔光斑在腔轴方向的位置, λ 是高斯光束的波长, 可以看出, 实验结果与理论曲线符合得较好.

实验误差的主要来源主要包括两方面. 1) 光学 F-P 谐振腔的不稳定性: 为了后续实验要求, 其中一个腔镜是固定于一维平移台上以便大范围控制腔长. 但是平移台的机械结构会对光学 F-P 谐振腔的稳定性造成影响, 光学 F-P 谐振腔结构不稳定性导致光学 F-P 谐振腔透射谱的抖动, 进而引起光学 F-P 谐振腔精细度的误差. 2) 纳米光纤的本征机械振动: 纳米光纤最细部位的直径仅有百纳米量级, 所以其对外界环境的变化非常敏感, 周围实验环境会引起或激励纳米光纤的振动, 这会影响纳米光纤在光学 F-P 谐振腔中的相对位置, 从而对纳米光纤引起的光学 F-P 谐振腔内腔损耗产生影响.

4 结论与展望

综上所述, 在实验中通过将纳米光纤放置于光学 F-P 谐振腔中, 探究了纳米光纤对光学 F-P 谐振腔精细度的影响, 并通过将纳米光纤置于光学 F-P 谐振腔腰斑处, 根据纳米光纤引发的内腔损耗随着纳米光纤位置的变化曲线拟合得到光学 F-P 谐振腔的腰斑半径, 这与由自由光谱区计算得到的结果一致. 另外利用纳米光纤测量了光学 F-P 谐振腔轴向不同位置的光斑半径并对腔内模场的分布进行了表征. 针对实验中测量误差的问题, 可以进一步提高光学 F-P 谐振腔装置的稳定性, 例如采用光学 F-P 谐振腔腔体一体化设计, 以增加光学 F-P 谐振腔的稳定性. 针对纳米光纤本征振动, 可以优化纳米光纤制作过程, 尽量缩短纳米光纤的长度, 减小振动幅度对测量的影响. 另外可以改进实验装置的外部保护措施, 以避免空气流动和灰尘对纳米光纤产生影响. 本文所述研究内容为光学

F-P 谐振腔腔内模场的表征提供了一种有效、无损的测量方法. 利用此系统, 纳米光纤表面装载固体粒子后可以与光学 F-P 谐振腔耦合. 纳米光纤的引入可以为控制固体粒子在光学 F-P 谐振腔腔模中的位置提供便利. 另外通过优化制作过程减小纳米光纤的直径可以进一步减小其对内腔损耗的影响. 另外这种方法也为纳米光纤机械振子、光学 F-P 谐振腔、发光粒子三者结合的复合腔光力学研究提供良好的平台.

参考文献

- [1] Zhang Z M 2015 *Quantum Optics* (Beijing: Science Press) pp184–193 (in Chinese) [张智明 2015 量子光学 (北京: 科学出版社) 第184—193页]
- [2] Li G, Zhang P F, Yang P F, Wang Z H, Zhang T C 2022 *Acta Opt. Sin.* **42** 76 (in Chinese) [李刚, 张鹏飞, 杨鹏飞, 王志辉, 张天才 2022 光学学报 **42** 76]
- [3] Walther H, Varcoe B T H, Englert B-G, Becker T 2006 *Rep. Prog. Phys.* **69** 1325
- [4] Zhang T C, Wu W, Yang P F, Li G, Zhang P F 2021 *Acta Opt. Sin.* **41** 392 (in Chinese) [张天才, 毋伟, 杨鹏飞, 李刚, 张鹏飞 2021 光学学报 **41** 392]
- [5] Vahala K J 2003 *Nature* **424** 839
- [6] Song L J, Zhang P F, Wang X, Wang C X, Li G, Zhang T C 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 074204 (in Chinese) [宋丽军, 张鹏飞, 王鑫, 王晨曦, 李刚, 张天才 2019 物理学报 **68** 074204]
- [7] McCall S L, Levi A F J, Shusher R E, Pearton S J, Logan R A 1992 *Appl. Phys. Lett.* **60** 289
- [8] Kahl M, Thomay T, Kohnle V, Beha K, Merlein J, Hagner M, Halm A, Ziegler J, Nann T, Fedutik Y, Woggon U, Artemyev M, Pérez-Willard F, Leitenstorfer A, Bratschkitsch R 2007 *Nano Lett.* **7** 2897
- [9] Ruddell S K, Webb K E, Herrera I, Parkins A S, Hoogerland M D 2017 *Optica* **4** 576
- [10] Hunger D, Steinmetz T, Colombe Y, Deutsch C, Hänsch T W, Reichel J 2010 *New J. Phys.* **12** 065038
- [11] Zhang Q Q, Fan Z Y, Zhang J P, Zhang F B, Zhang Q, Li Y M 2020 *Appl. Opt.* **59** 8959
- [12] Cheng F, Zhang P F, Wang X, Zhang T C 2017 *J. Quantum Opt.* **23** 74 (in Chinese) [成凡, 张鹏飞, 王鑫, 张天才 2017 量子光学学报 **23** 74]
- [13] Vučković J, Lončar M, Mabuchi H, Scherer A 2001 *Phys. Rev. E* **65** 016608
- [14] Chen Y T, Szurek M, Hu B L, Hond J D, Braverman B, Vuletic V 2022 *Opt. Express* **30** 37426
- [15] Kuhn A, Hennrich M, Rempe G 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 067901
- [16] Yang P F, Xia X W, He H, Li S K, Han X, Zhang P, Li G, Zhang P F, Xu J P, Yang Y P, Zhang T C 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 233604
- [17] Yang P F, Li M, Han X, He H, Li G, Zou C L, Zhang P F, Zhang T C 2019 arXiv 1911.10300
- [18] Chen W L, Beck K M, Bücker R, Gullans M, Lukin M D, Tanji-Suzuki H, Vuletic V 2013 *Science* **341** 768
- [19] Colombe Y, Steinmetz T, Dubois G, Linke F, Hunger D, Reichel J 2007 *Nature* **450** 272
- [20] Haas F, Volz J, Gehr R, Reichel J, Estève J 2014 *Science* **344** 180
- [21] Albrecht R, Bommer A, Deutsch C, Reichel J, Becher C 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 243602
- [22] Takahashi H, Kassa E, Christoforou C, Keller M 2020 *Phys. Rev. Lett.* **124** 013602
- [23] Kobel P, Breyer M, Köhl M 2021 *npj Quantum Inf.* **7** 6
- [24] Kiraz A, Michler P, Becher C, Gayral B, Imamoğlu A, Zhang L D, Hu E 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 3932
- [25] Lodahl P, Mahmoodian S, Stobbe S 2015 *Rev. Mod. Phys.* **87** 347
- [26] Metcalf H J, Van der Straten P 2003 *J. Opt. Soc. Am. B: Opt. Phys.* **20** 887
- [27] Ye J, Vernoooy D W, Kimble H J 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 4987
- [28] Münstermann P, Fischer T, Pinkse P W H, Rempe G 1999 *Opt. Commun.* **159** 63
- [29] Fortier K M, Kim S Y, Gibbons M J, Ahmadi P, Chapman M S 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 233601
- [30] Kuhr S, Alt W, Schrader D, Dotsenko I, Miroshnychenko Y, Rosenfeld W, Khudaverdyan M, Gomer V, Rauschenbeutel A, Meschede D 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 213002
- [31] Zhang Y C, Li G, Zhang P F, Wang J M, Zhang T C 2009 *Front. Phys. Chin.* **4** 190
- [32] Zhu J G, Ozdemir S K, Xiao Y F, Li L, He L, Chen D R, Yang L 2010 *Nat. Photonics* **4** 46
- [33] Wang X, Song L J, Wang C X, Zhang P F, Li G, Zhang T C 2019 *Chin. Phys. B* **28** 073701
- [34] Nayak K P, Sadgrove M, Yalla R, Kien F L, Hakuta K 2018 *J. Opt.* **20** 073001
- [35] Vetsch E, Reitz D, Sague G, Schmidt R, Dawkins S T, Rauschenbeutel A 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 203603
- [36] Davanco M I, Srinivasan K A 2009 *Opt. Express* **17** 10542
- [37] Tong L M, Gattass R R, Ashcom J B, He S, Lou J Y, Shen M Y, Maxwell I, Mazur E 2003 *Nature* **426** 816
- [38] Zhang P F, Wang X, Song L J, Wang C X, Li G, Zhang T C 2020 *J. Opt. Soc. Am. B: Opt. Phys.* **37** 1401
- [39] Kien F L, Gupta S D, Balykin V I, Hakuta K 2005 *Phys. Rev. A* **72** 032509
- [40] Fenton E F, Khan A, Solano P, Orozco L A, Fatemi F K 2018 *Opt. Lett.* **43** 1534
- [41] Wuttke C, Cole G D, Rauschenbeutel A 2013 *Phys. Rev. A* **88** 061801
- [42] Fogliano F, Besga B, Reigue A, Heringlake P, Lépinay M de L, Vaneph C, Reichel J, Pigeau B, Arcizet O 2021 *Phys. Rev. X* **11** 021009
- [43] Pennetta R, Xie S, Russel P S 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 273901
- [44] Bernd W, Thorsten O, Sebastian S, Thomas H, Arno R 2021 *Phys. Rev. Appl.* **16** 064021
- [45] Sakai H, Honda Y, Sasao N, Araki S, Higashi Y, Okugi T, Taniguchi T, Urakawa J, Takano M 2002 *Jpn. J. Appl. Phys.* **41** 6398
- [46] You Y, Urakawa J J, Rawankar A, Aryshev A, Shimizu H, Honda Y, Yan L X, Huang W H, Tang C X 2012 *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. Sect. A* **694** 6
- [47] Sakaue K, Washio M, Araki S, Fukuda M, Higashi Y, Honda Y, Omori T, Taniguchi T, Terunuma N, Urakawa J, Sasao N 2009 *Rev. Sci. Instrum.* **80** 123304
- [48] Zhang P F, Cheng F, Wang X, Song L J, Zou C L, Li G, Zhang T C 2018 *Opt. Express* **26** 31500

Characterization of mode field distribution in optical Fabry-Perot cavity based on nanofiber^{*}

Hu Yu-Dong¹⁾ Song Li-Jun¹⁾ Wang Chen-Xi¹⁾ Zhang Pei¹⁾ Zhou Jing¹⁾
Li Gang¹⁾²⁾ Zhang Peng-Fei^{1)2)†} Zhang Tian-Cai¹⁾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)

(Received 29 July 2022; revised manuscript received 24 August 2022)

Abstract

The composite cavity optomechanical system combining optical Fabry-Perot (F-P) cavities, particles, and micro/nano mechanical oscillators is becoming more significant in the researches and applications of the fundamental physics, quantum information processing, and precision measurement. Characterizing the mode field distribution of optical F-P cavity is significant prior to the application of optical F-P cavity. In this paper, we propose and demonstrate a method to measure the waist of an optical F-P cavity and to characterize the mode field distribution of the optical F-P cavity by using a nanofiber nondestructively. In experiment, a nanofiber is placed in the mode of the optical F-P cavity with a fineness of around 1500. The optical F-P cavity is composed of two mirrors each with high reflectivity of 99.8%. The radius of curvature of the each mirror is 50 mm. The cavity length is (80 ± 4) mm. The nanofiber is fabricated from a single-mode fiber by the flame-brush method. The nanofiber diameter is around 440 nm. The transmission spectra of the optical F-P cavity are measured by scanning the cavity length. The free spectrum ranges and the inner cavity losses can be obtained from the transmission spectra. First, the influence of the nanofiber on the optical F-P cavity fineness is investigated. The fineness as a function of nanofiber position along the radial direction of the optical F-P cavity is measured. The fineness caused by the nanofiber decreases to a minimum value of about 240. Second, it is investigated that the optical F-P cavity inner loss caused by the nanofiber as a function of the nanofiber position along the radial direction of the optical F-P cavity when the nanofiber is placed at the waist of the optical F-P cavity. The inner loss of the optical F-P cavity caused by the nanofiber is related to the intensity distribution of the optical F-P cavity mode field, which is predicted theoretically. Thus, by making the Gaussian fitting of the optical F-P cavity inner loss as a function of the nanofiber position, we can obtain a waist radius of the optical F-P cavity to be (72 ± 1) μm . This is in good agreement with the theoretical calculation. Finally, the mode field distribution of the optical F-P cavity along the cavity axis is characterized. This method can be used for precisely controlling the coupling between the particles on the surface of nanofiber and optical F-P cavity. Besides, this method provides a good platform for studying the hybrid optomechanical system combining cavities, photons and quantum emitters.

Keywords: cavity quantum electrodynamics, nanofiber, optical Fabry-Perot cavity, waist

PACS: 42.50.Pq, 42.50.-p, 42.60.Da, 42.81.Qb

DOI: 10.7498/aps.71.20221538

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U21A6006, U21A20433, 11974223, 11974225, 12104277, 12104278) and the Fund for Shanxi “1331 Project” Key Subjects Construction, China.

[†] Corresponding author. E-mail: zhangpengfei@sxu.edu.cn



基于纳米光纤的光学法布里-珀罗谐振腔内模场的表征

胡裕栋 宋丽军 王晨曦 张沛 周静 李刚 张鹏飞 张天才

Characterization of mode field distribution in optical Fabry–Perot cavity based on nanofiber

Hu Yu-Dong Song Li-Jun Wang Chen-Xi Zhang Pei Zhou Jing Li Gang Zhang Peng-Fei Zhang Tian-Cai

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 234203 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20221538

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221538>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

开放式法布里-珀罗光学微腔中光与单量子系统的相互作用

Interaction between light and single quantum-emitter in open Fabry–Perot microcavity

物理学报. 2022, 71(6): 060201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211970>

铅卤钙钛矿法布里-珀罗谐振腔激光器

Lead halide perovskites Fabry–P é rot resonant cavity laser

物理学报. 2021, 70(5): 054205 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201302>

基于 α -MoO₃ 的可调谐法布里-珀罗谐振腔比色生物传感器

α -MoO₃ based tunable Fabry–P é rot cavity colorimetric biosensor

物理学报. 2021, 70(4): 048701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201548>

Fabry–Perot腔与光学参量放大复合系统中实现可调谐的非常规光子阻塞

Tunable unconventional phonon blockade in Fabry–Perot cavity and optical parametric amplifier composite system

物理学报. 2019, 68(12): 124203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190154>

等效零折射率材料微腔中均匀化腔场作用下的简正模劈裂现象

Normal-mode splitting induced by homogeneous electromagnetic fields in cavities filled with effective zero-index metamaterials

物理学报. 2018, 67(2): 024210 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171880>

芯内双微孔复合腔结构的光纤法布里-珀罗传感器研究

Dual micro-holes-based in-fiber Fabry–Perot interferometer sensor

物理学报. 2018, 67(20): 204203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180528>