

# 光纤环形谐振腔的频率锁定及其特性\*

宋丽军<sup>1)</sup> 张鹏飞<sup>1)2)†</sup> 王鑫<sup>1)</sup> 王晨曦<sup>1)</sup> 李刚<sup>1)2)</sup> 张天才<sup>1)2)‡</sup>

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)

(2018年12月29日收到; 2019年2月4日收到修改稿)

基于可调分束比的光纤分束器, 制作了光纤环形谐振腔并通过调节分束比实现了对光纤环形谐振腔的欠耦合、临界耦合和过耦合的状态控制. 实验测量了腔最小反射率与腔损耗之间的关系, 获得光纤环形谐振腔的腔内衰减率为  $\kappa_0 = 2\pi \times (1.60 \pm 0.03)$  MHz, 品质因子为  $Q = (1.10 \pm 0.02) \times 10.8$ . 在此基础上, 结合了压电陶瓷拉伸光纤以控制腔长和 Pound-Drever-Hall 锁频两大技术优势, 克服了之前温度反馈控制等方法的反馈带宽窄、噪声大和稳定性差等问题, 实现了对光纤环形谐振腔共振频率的快速、灵敏的控制和锁定. 结果表明, 锁频过程中相位调制功率与相位调制引起腔反射光的强度调制之间的关系为线性关系, 进而通过降低相位调制信号的功率以减小相位调制对腔反射光强度调制的影响. 当调制功率设定最低为 -9 dBm 时, 光纤环形谐振腔仍能被稳定锁定. 该光纤环形谐振腔为其与原子、金刚石色心等发光粒子相互作用的腔量子电动力学实验研究奠定了坚实的基础.

**关键词:** 光纤环形谐振腔, 临界耦合, Pound-Drever-Hall 锁频

**PACS:** 42.50.-p, 42.50.Pq, 42.60.Da, 42.60.Fc

**DOI:** 10.7498/aps.68.20182296

## 1 引言

光学谐振腔作为一种重要的光学器件, 具有高分辨率的频率响应特性和腔内光场增强效应<sup>[1,2]</sup>, 其在原子精细光谱分析<sup>[3]</sup>、激光产生<sup>[4]</sup>、精密测量<sup>[5]</sup>和量子信息<sup>[6]</sup>等领域均作为关键器件得以应用. 其中, 光纤环形谐振腔 (fiber ring resonator) 是利用光纤分束器将光纤围成封闭的环路形成光学谐振腔<sup>[7]</sup>, 因其结构简单、体积小、性能稳定和便于集成等优点被广泛应用于光纤激光器<sup>[2,8]</sup>、光通信器件<sup>[9]</sup>和光纤传感<sup>[10]</sup>等领域.

光纤环形谐振腔与纳米光纤的结合大大扩展了此类谐振腔的应用<sup>[11,12]</sup>. 近几年, 随着半导体微纳加工工艺迅速发展, 高透射率纳米光纤的制作得

以实现<sup>[13-15]</sup>. 光纤环形谐振腔与纳米光纤结合既可以提供光与粒子的耦合通道, 又可以利用腔增强效应增强光与粒子的相互作用强度. 2016年, Pittman 等<sup>[16]</sup>在实验上首次将纳米光纤接入一个较低精细度光纤环形谐振腔内, 称之为纳米光纤环形谐振腔, 并将其与热原子耦合, 同时预测了高精度纳米光纤环形谐振腔与原子实现强耦合的可能性. 2017年, Schneeweiss 等<sup>[17]</sup>利用商用可调光纤分束器结合纳米光纤制作了纳米光纤环形谐振腔, 并分析了此谐振腔用于手性腔量子电动力学和强耦合研究的应用前景. 2017年, Ruddell 等<sup>[18]</sup>将纳米光纤环形谐振腔的倏逝场与冷原子团重合实现了两者的强耦合相互作用, 并观察到真空拉比分裂. 在纳米光纤环形谐振腔与冷原子相互作用的实验研究中, 谐振腔的共振频率需要被严格锁定并与

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11574187, 11634008, 11674203, 61227902) 和山西省“1331 工程”重点学科建设计划资助的课题.

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

‡ 通信作者. E-mail: tczhang@sxu.edu.cn

原子跃迁线共振, 因此光纤环形谐振腔的共振频率控制成为一个重要的研究课题. 文献 [18] 报道的利用纳米光纤环形谐振腔与冷原子强耦合相互作用的实验中, 通过在纳米光纤中通入大功率激光, 利用谐振腔对温度的响应特性实现了对谐振腔共振频率的锁定. 当光纤环形谐振腔用于腔量子电动力学实验时, 外界温度、气流等因素的变化以及机械振动都会对光纤环形谐振腔的光学长度产生影响, 这对光纤环形谐振腔的频率锁定提出了更高的要求. 光纤长度对温度的响应带宽有限, 因此无法实现快速反馈控制腔长 [18,19]. 基于以上问题, 压电陶瓷 (piezoelectric transducer, PZT) 的快速反馈技术被应用于光纤干涉仪的光纤长度锁定中 [20], 消除了单模光纤干涉仪与零差探测相关的信号衰减问题 [21], 并在实验上产生了一个调制精度为  $\lambda/200$ 、调制范围为  $20\lambda$  的线性光学路径调制 [22]. 在上述实验中, 光纤被绕在一个柱形 PZT 上, 通过设计一个简单的反馈电路对 PZT 的横截面周长进行拉伸来改变光纤长度, 以补偿环境温度变化引起的相位漂移. 1998 年, Coen 等 [23] 同样通过此类办法控制腔长, 将光纤环形腔锁定在激光器上, 利用腔的偏振模式完成锁定. 上述实验中, 锁频方法通常采用温度反馈控制或与基准电压比较产生鉴频信号, 其存在锁定带宽窄、噪声大和锁定不稳定等问题, 因此快速稳定地锁定光纤环形谐振腔成为一个亟需解决的重点问题. 而基于相位调制的 PDH (Pound-Drever-Hall) 稳频技术 [24,25] 作为锁定光学谐振腔的有力工具, 具有伺服响应快、噪声低等优点, 是目前稳频技术中应用最广泛、稳频效果最好的技术之一. 基于以上原因, 本文结合 PDH 稳频技术与 PZT 拉伸光纤的两大技术优势, 利用 PZT 直接拉伸光纤以控制光纤环形谐振腔的腔长, 并结合 PDH 技术完成了实现了对光纤环形谐振腔的共振频率快速、灵敏的控制和锁定. 另外, 本文研究了激光相位调制功率对腔锁定后腔反射信号强度调制的影响.

## 2 实验装置

### 2.1 光纤环形谐振腔

光纤环形谐振腔及其光谱实验测试装置如图 1(a) 所示. 光纤环形谐振腔是利用可调谐光纤分束器 (tunable fiber beam splitter, F-CPL-830-

N-F/A, Newport) 制作而成. 可调谐光纤分束器有两个输入端口 (Input 1 和 Input 2) 和两个输出端口 (Output 1 和 Output 2). 激光由 Input 1 端口输入, 而后分成两束. 光纤分束器可以通过调节其旋钮将光功率进行任意比例分束. 利用光纤焊接机 (fusion splicer, 80 s, Fujikura) 将分束器 Output 2 端光纤与 Input 2 端光纤焊接形成光纤环形谐振腔, 直接测量环形腔内光纤长度为  $L = (2.20 \pm 0.02) \text{ m}$ , 即腔长. 激光由 Input 1 输入光纤环形谐振腔. 图 1(a) 中红色实线为光路, 蓝色背景红色实线的为光纤, 黄色虚线为实验电路. 光谱测试激光由宽调谐半导体激光器 (widely tunable laser, TLB-6716-P, New Focus) 提供, 激光器的线宽为 200 kHz, 中心波长为 852.30 nm. 信号发生器 (synthesized function generator, DS345, Stanford Research Systems) 产生三角波电信号扫描激光器的激光输出频率. 激光由自由空间耦合进入光纤分束器 Input 1, 光纤中激光偏振由光纤偏振控制器 (fiber polarization controllers, FPC030, Thorlabs) 调节. 调节可调谐分束器的分束比, 并配合光纤偏振控制器可以实现对光纤环形谐振腔耦合状态的精确控制. Output 1 为谐振腔输出口, 其输出激光被接入光电探测器 (optical detector, PDA-10A-EC, Thorlabs) 进行探测. 将探测器电信号接入示波器, 用于监视光纤环形谐振腔光谱. 通过拉伸谐振腔内光纤的长度来控制谐振腔的共振频率. 图 1(b) 为光纤拉伸支架示意图, 光纤锁定支架为铝制 U 型结构, U 型支架一臂加工为杠杆结构, PZT (PL055.31, PI) 被置于狭缝中点, PZT 工作电压为  $-20\text{--}100 \text{ V}$ , 行程为  $2 \mu\text{m}$ . 采用图 1(b) 的结构, PZT 被施加  $0\text{--}100 \text{ V}$  的扫描电压, 根据光纤环形谐振腔的频率扫描范围可以得到  $4 \pm 0.5$  个自由光谱区, 光纤被拉伸的最大长度为  $(1.2 \pm 0.2) \mu\text{m}$ . 光纤拉直后, 利用紫外胶将其固定在 U 型支架两臂顶端. 调节 PZT 长度以控制光纤 U 型支架两臂顶端距离, 从而实现对光纤长度的控制, PZT 长度是通过调节对 PZT 所施加电压来实现的. 相比于将光纤直接缠绕到 PZT 的方式, 本文中拉伸光纤结构的优点有: 第一, 与光纤直接缠绕到 PZT 的结构相比, 光纤支架拉伸光纤长度短, 所以拉伸相同的长度需要更高的电压, 因此光纤长度受电压起伏噪声等因素影响小, 在实现光纤长度精细拉伸的同时, 增加了系统的鲁棒性; 第二, 拉

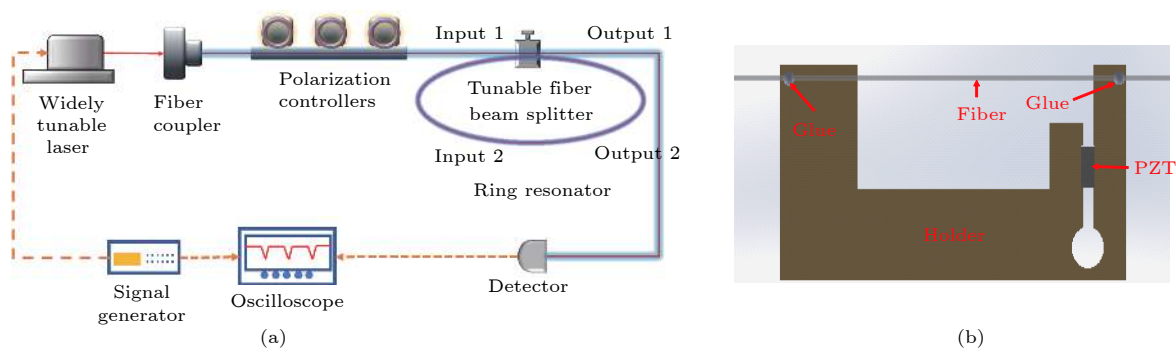


图 1 (a) 光纤环形谐振腔及其光谱测量实验装置; (b) 光纤拉伸支架  
 Fig. 1. (a) Fiber ring resonator and spectrum experiment device; (b) fiber tensile holder.

伸光纤时将光纤拉直固定在 U 型支架上, 避免光纤弯曲造成光纤中光偏振变化影响谐振腔反馈锁定; 第三, 将光纤拉直后进行拉伸, 可以实现腔长的线性变化, 有利于谐振腔反馈控制. 为减小外界温度、气流和机械振动等因素对光纤环形谐振腔光学长度的影响, 本文将光纤环形谐振腔固定于殷钢板上, 并将其整体放置于有机玻璃罩中与外界隔离.

## 2.2 谐振腔锁定装置

在获得上述稳定的光纤环形谐振腔的基础上, 运用 PDH 锁定技术实现谐振腔共振频率的反馈锁定, 光纤环形谐振腔的共振频率通过拉伸光纤长度来控制, 腔长控制装置已在图 1 中介绍. 整体锁定装置示意图如图 2 所示. 实线表示光路, 虚线表示电路. 本文利用自由空间光电调制器 (electro-optic phase modulators, EOM, 4002, New Focus) 对激光进行相位调制. 首先, 经过相位调制的激光被耦合进入光纤环形谐振腔. 然后, 调节可调谐分束器

和光纤偏振控制器使得光纤环形谐振腔达到临界耦合状态. 光纤环形谐振腔输出激光由光纤分束器分为两部分分别由交流探测器 1 (detector, C5331, Hamamatsu) 和直流探测器 2 (detector, PDA-10A-EC, Thorlabs) 探测. 交流探测器 1 测得信号为 PDH 锁定中产生误差信号所用. 直流探测器 2 测得信号为监测光纤环形谐振腔反射谱所用. 信号发生器 (synthesized function generator, DS345, Stanford Research Systems) 产生 EOM 调制信号 (频率为 14.125 MHz), 利用功分器 (power splitter, ZFSCJ-2-1, Mini-Circuits) 将其分为两路: 一路信号输入 EOM 对激光进行相位调制, 另一路信号通过相位延迟器 (delay box, YG-DB001, 山大宇光), 接入混频器 (mixer, ZLW-1, Mini-Circuits) 与交流探测器 1 测到的腔反射信号进行混频. 混频器输出信号经过低通滤波 (low pass filter, LPF, BLP-1.9+, Mini Circuits)、PID 控制器 (PID, SIM960, Stanford Research Systems) 和高压放大器 (HV amplifiers, SVR 350-3 bip, Piezomechanics

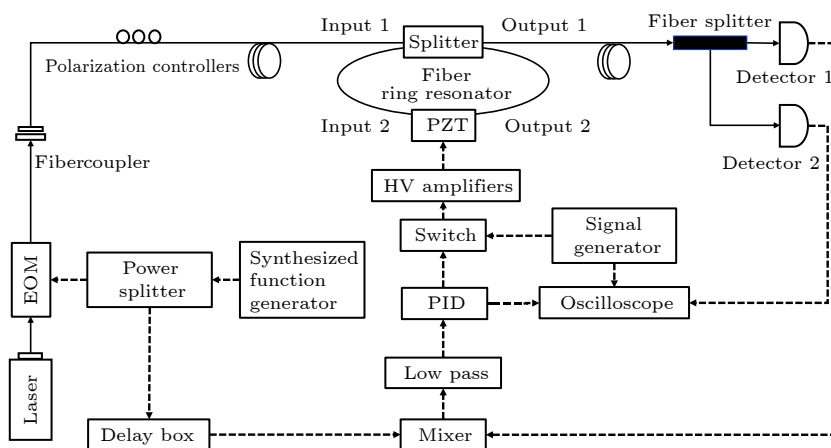


图 2 PDH 锁定实验装置示意图  
 Fig. 2. Schematic of PDH stabilization experiment device.

GmbH) 后反馈到如图 1(b) 所示的 PZT 上, 对光纤环形谐振腔腔长进行控制从而实现其共振频率的锁定. 利用示波器 (digital storage oscilloscope, DSO-X 2024A, Keysight) 监测 PZT 电压、误差信号及光纤环形谐振腔的反射谱.

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 可调谐分束器

调节可调谐分束器的分束比并配合光纤偏振控制器, 可以实现对光纤环形谐振腔耦合状态的精确控制. 图 3 为可调谐分束器的分束比与旋钮旋转角度关系的测量结果. 由图可见, 分束器 Output 1 功率先减小后增大, 分束器 Output 2 功率先增大后减小.

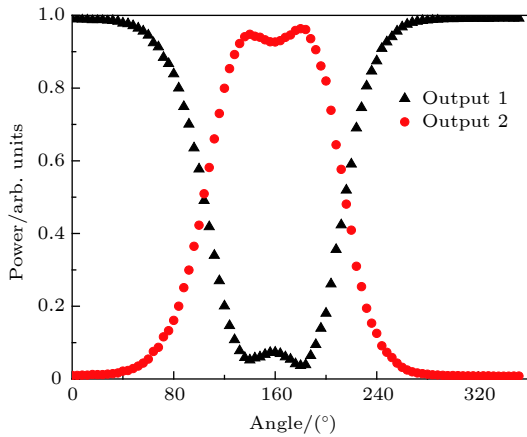


图 3 可调谐分束器的分束比与旋钮旋转角度关系

Fig. 3. Splitting ratio as a function of angle of knob of fiber splitter.

#### 3.2 光纤环形谐振腔的耦合状态

本文目的是获得光纤环形谐振腔的临界耦合状态, 通过扫描激光器波长得到光纤环形谐振腔的反射谱如图 4(a) 所示. 当分束器为不同分束比时, 获得不同的耦合状态: 红色、蓝色和绿色曲线分别为光纤环形谐振腔处于过耦合、临界耦合和欠耦合状态的反射谱. 通过对光纤环形谐振腔反射谱的共振峰进行洛伦兹拟合得到谐振腔的线宽为  $\Delta\nu$ , 从而根据  $\kappa = \Delta\nu/2$  可以得到总衰减率  $\kappa$ . 光纤环形谐振腔的总衰减率  $\kappa$  由谐振腔的腔内衰减率  $\kappa_0$  和耦合系数  $\kappa_{\text{ext}}$  共同决定, 其关系为  $\kappa = \kappa_0 + \kappa_{\text{ext}}$ .

谐振腔的反射率  $R$  的表达式为

$$R = \left( \frac{\kappa - 2\kappa_0}{\kappa} \right)^2, \quad (1)$$

其中  $R$  为激光频率与光纤环形谐振腔共振时的最低反射率. 不同耦合状态下耦合系数  $\kappa_{\text{ext}}$  在变化, 但是谐振腔本身的腔内衰减率  $\kappa_0$  是固定不变的. 当  $\kappa_{\text{ext}} < \kappa_0$  时, 为欠耦合状态; 当  $\kappa_{\text{ext}} = \kappa_0$  时, 为临界耦合状态; 当  $> \kappa_0$  时, 为过耦合状态<sup>[26]</sup>. 图 4(b) 为光纤环形谐振腔共振时最低反射率  $R$  随总衰减率  $\kappa$  变化图, 黑色方块为实验测量数据, 青色实线为利用 (1) 式对实验数据的拟合曲线. 随着光纤环形谐振腔总衰减率  $\kappa$  的增大, 谐振腔的最小反射率先减小, 达到最低点 (接近于零) 而后增大. 当光纤环形谐振腔反射率  $T$  达到最低时, 光纤环形谐振腔处于临界耦合状态, 此时,  $\kappa_{\text{ext}} = \kappa_0$ . 由图 4(b) 可以看出, 实验数据与理论拟合得很好. 通过拟合得到光纤环形谐振腔的腔内衰减率为  $\kappa_0 = 2\pi \times (1.60 \pm 0.03)$  MHz. 大范围扫描激光器频率获得光纤环形谐振腔反射谱, 如图 4(a) 插图所示. 通过计算光纤环形谐振腔相邻两个共振频率, 得到光纤环形谐振腔的自由光谱区为  $\text{FSR} = (94 \pm 1)$  MHz. 由光纤环形谐振腔的 FSR 与腔长  $L$  的关系式  $\text{FSR} = c/nL$  ( $c$  为真空中的光速,  $n$  为光纤有效折射率,  $n \approx 1.45$ ) 推算得到光纤环形谐振腔长度为  $L = (2.20 \pm 0.02)$  m, 与光纤长度实际测量结果相符合. 根据理论公式  $Q = \nu/\Delta\nu$  得到光纤环形谐振腔的品质因子为  $Q = (1.10 \pm 0.02) \times 10^8$ ,  $\nu$  为与光纤环形谐振腔共振时的光频率.

#### 3.3 光纤环形谐振腔锁定及分析

实验通过扫描 PZT 长度以改变光纤环形谐振腔的共振频率, 从而获得的光纤环形谐振腔反射光谱, 如图 5(a) 和 (b) 所示, 分别对应 EOM 调制信号功率为 12 dBm 和 -9 dBm 的结果. 图 5(a) 中, 青色曲线为光纤环形谐振腔直接输出的反射谱. 黑色曲线为光纤环形谐振腔输出信号通过截止频率为 1.9 MHz 的低通滤波器的反射谱. EOM 在光路中对激光光束进行了相位调制产生了两个边带, 由于光纤环形谐振腔对相位的敏感性, 使得谐振腔共振的主频和边带之间产生干涉效应并引起腔反射信号的强度调制. 红色曲线为 PID 控制器输出的鉴频信号, 蓝色曲线为锁定后光纤环形谐振腔共振时的反射信号. 图 5(b) 中, 黑色曲线为光纤环形谐振

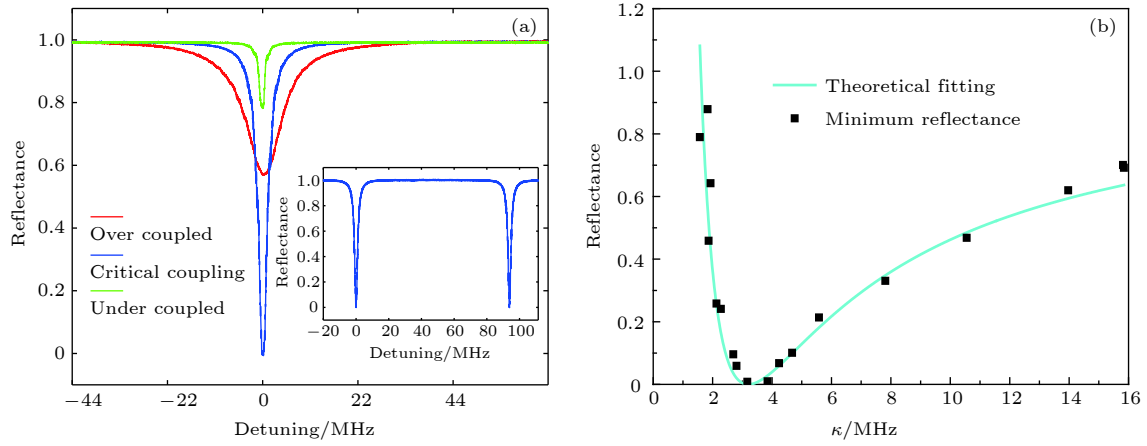


图 4 (a) 不同耦合态下的光纤环形谐振腔反射谱; (b) 最低反射率  $T$  随总衰减率  $\kappa$  的关系

Fig. 4. (a) Fiber ring resonator reflectance spectra with different coupling states; (b) minimum reflectance  $T$  as a function of  $\kappa$ .

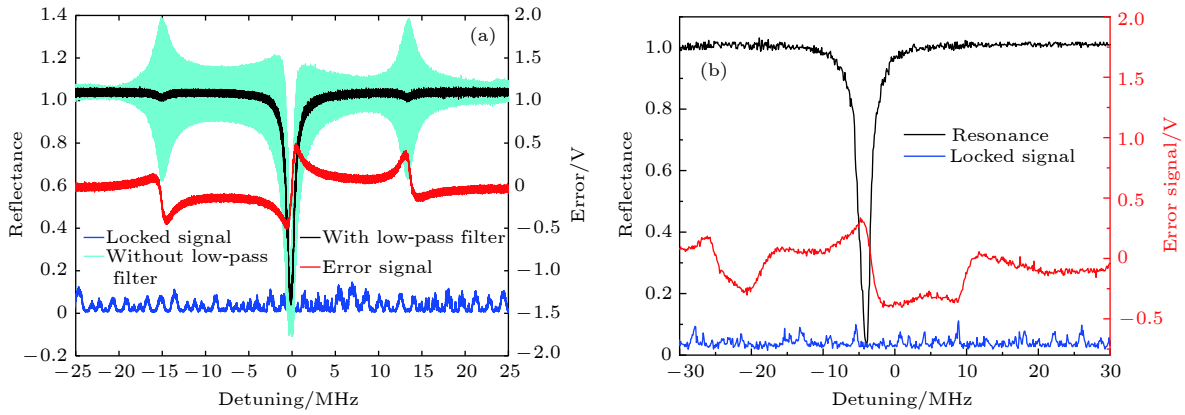


图 5 相位调制功率为 12 dBm (a) 和 -9 dBm (b) 的锁定结果

Fig. 5. Locking results when modulation power of phase is 12 dBm (a) and -9 dBm (b).

腔输出信号通过截止频率为 1.9 MHz 的低通滤波器的反射谱, 红色曲线为 PID 控制器输出的鉴频信号, 蓝色曲线为锁定后光纤环形谐振腔共振时的反射信号。

由图 5(a) 可以看出, 光纤环形谐振腔直接输出的反射光谱携带了与 EOM 调制信号同样频率的调制, 这对光纤环形谐振腔的后续使用是极为不利的. 因此, 对光纤环形谐振腔锁定后交流探测器 1 探测到的腔反射信号进行频谱分析, 测量结果如图 5(a) 所示. 由图可知, 在频率为 14.125 MHz 处腔反射信号存在一个强度调制信号, 调制频率与相位调制信号频率相等. 我们在实验中降低相位调制功率以减小此调制信号对腔反射信号强度调制的影响. 图 6(a) 红色曲线和蓝色曲线分别为相位调制功率为 -9 dBm 和 24 dBm 时腔反射信号的频谱; 黑色曲线为频谱分析仪本底噪声; 紫色曲线为探测器的电子学噪声. 由图 6(a) 可以看出, 相位调制器上

施加不同幅度的调制信号时, 调制后产生的频谱存在差异. 当相位调制功率为 -9 dBm 时, 在频率低于 3.6 MHz 的区域, 腔反射光强度起伏高于相位调制功率为 24 dBm 时的结果. 这是因为低的相位调制强度导致鉴频信号信噪比变差, 反馈效果变差, 锁定后腔反射光强度调制起伏增大. 而在频率高于 3.6 MHz 的区域, 当相位调制功率越大, 相位调制引起的腔反射光强度调制起伏越大, 因此相位调制功率为 24 dBm 时腔反射光强度调制大于相位调制功率为 -9 dBm 的腔反射光强度调制. 这是此光纤环形谐振腔在后续应用中极力避免的现象. 因此, 本文探究了不同相位调制功率与腔反射信号强度调制的关系, 测量结果如图 6(b) 所示. 图 6(b) 给出了相位调制频率为 14.125 MHz 时, 腔反射光强度调制与无调制时的比值随相位调制功率的变化关系. 由图分析可知, EOM 调制功率越大, 腔反射信号强度调制越大, 两者之间成正比关系. 当相位调

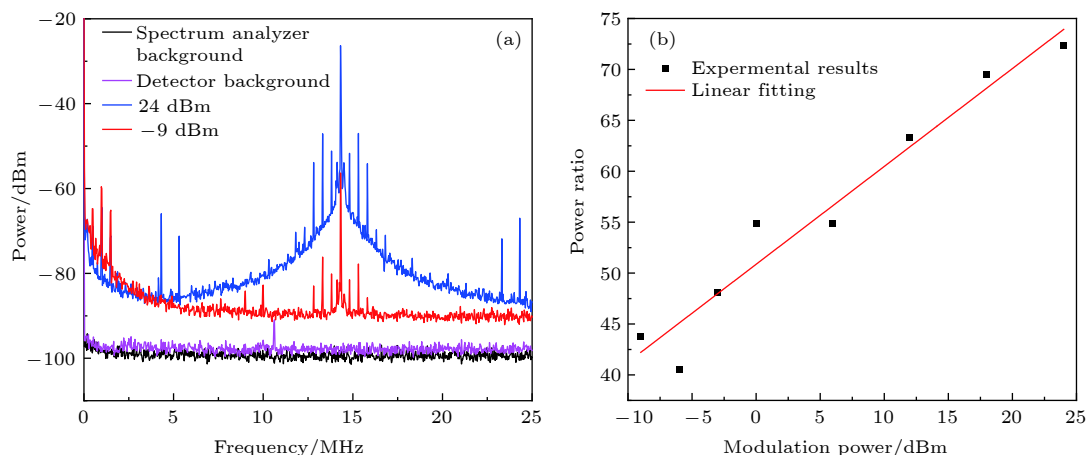


图 6 (a) 腔反射信号的频谱分析; (b) 腔反射最大调制强度与无调制时的比值随相位调制功率的变化

Fig. 6. (a) Frequency spectra analysis of resonator reflectance; (b) power ratio of resonator reflectance modulated at maximum intensity and without modulation as a function of phase modulation power.

制功率降至  $-9$  dBm 时, 仍然可以将光纤环形谐振腔锁定在其共振频率处, 具体结果见图 5(b).

## 4 结 论

本文利用可调分束比的光纤分束器构建了光纤环形谐振腔, 并通过调节分束比实现了对光纤环形谐振腔的欠耦合、临界耦合和过耦合的耦合状态控制; 测量了腔最小反射率与腔损耗之间的关系, 据此获得光纤环形谐振腔的腔内衰减率为  $\kappa_0 = 2\pi \times (1.60 \pm 0.03)$  MHz, 品质因子为  $Q = (1.10 \pm 0.02) \times 10^8$ . 在此基础上, 利用 PZT 拉伸光纤控制光纤环形谐振腔腔长的方法并结合 PDH 锁频技术, 实现了对光纤环形谐振腔共振频率的锁定. 另外, 本文探究了光纤环形谐振腔腔长锁定过程中相位调制功率与此相位调制信号引起腔反射信号的强度调制之间的关系, 通过降低相位调制信号的功率以减小腔反射信号强度调制的影响. 实验发现腔反射信号强度调制随相位调制功率线性增加. 当相位调制功率设定最低为  $-9$  dBm 时, 光纤环形谐振腔仍能被稳定锁定. 该光纤环形谐振腔为其与原子、金刚石色心等发光粒子相互作用的实验研究奠定了坚实的实验基础, 并且有望应用于光纤传感、精密测量等研究领域.

感谢中国科学技术大学中国科学院量子信息重点实验室邹长铃老师和山西大学物理电子工程学院孙丹丹老师的关于本工作的有益讨论.

## 参考文献

- [1] Kogelnik H, Li T 1966 *Proc. IEEE* **54** 1312
- [2] Liu T, Zhang T C, Wang J M, Peng K C 2002 *J. Quantum Opt.* **8** 30 (in Chinese) [刘涛, 张天才, 王军民, 彭堃堃 2002 量子光学学报 **8** 30]
- [3] Zhang G, Wang Z M 2007 *Principles and Techniques of Laser Spectroscopy* (Beijing: Beijing Institute of Technology Press) pp87–93 (in Chinese) [张国威, 王兆民 2007 激光光谱学原理与技术 (北京: 北京理工大学出版社) 第87–93页]
- [4] Zhou B Z, Gao Y Z, Chen W, Chen J Y, Huo L 2014 *Laser Principles (Seventh Edition)* (Beijing: National Defense Industry Press) pp14–18 (in Chinese) [周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 陈家骅, 霍力 2014 激光原理(第七版)(北京: 国防工业出版社) 第14–18页]
- [5] Coddington I, Swann W C, Nenadovic L, Newbury N R 2009 *Nat. Photonics* **3** 351
- [6] Li P B, Gu Y, Gong Q H, Guo G C 2009 *Phys. Rev. A* **79** 126
- [7] Stokes L F, Chodorow M, Shaw H J 1982 *Opt. Lett.* **7** 288
- [8] Gao L 2016 *Ph. D. Dissertation* (Chongqing: University of Chongqing) (in Chinese) [高磊 2016 博士学位论文 (重庆: 重庆大学)]
- [9] Pierre-Henri M, Olivier L, Gilles C 2008 *IEEE Photon. Tech. L* **20** 1399
- [10] Ma H, Zhang J, Wang L, Lu Y, Ying D, Jin Z 2015 *Opt. Lett.* **40** 5862
- [11] Tong L M, Gattass R R, Ashcomv J B, He S L, Lou J Y, Shen M Y, Maxwell I, Mazur E 2003 *Nature* **426** 816
- [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] Hoffman J E, Ravets S, Grover J A, Solano P, Kordell P R, Wong-Campos J D, Orozco L A, Rolston S L 2014 *Aip Adv.* **06** 124
- [14] Nagai R, Aoki T 2014 *Opt. Express* **22** 28427
- [15] Zhang P F, Cheng F, Wang X, Song L J, Zou C L, Li G, Zhang T C 2018 *Opt. Express* **26** 31500
- [16] Jones D, Hickman G, Franson J, Pittman T 2016 *Opt. Lett.* **41** 3683
- [17] Schneeweiss P, Zeiger S, Hoinkes T, Rauschenbeutel A, Volz J 2017 *Opt. Lett.* **42** 85
- [18] Ruddell S K, Webb K E, Herrera I, Parkins A S, Hoogerland

- M D 2017 *Optica* **4** 576
- [19] Wuttke C, Rauschenbeutel A 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 024301
- [20] Reynaud F, Boca J 1993 *Pure Appl. Opt.* **2** 677
- [21] Jackson D A, Priest R G, Dandridge A, Tveten A B 1980 *Appl. Opt.* **19** 2926
- [22] Reynaud F, Delaire E 1993 *Electron. Lett.* **29** 1718
- [23] Coen S, Haelterman M, Emplit P, Delage L, Simohamed L M, Reynaud F 1998 *J. Opt. Soc. Am. B* **15** 2283
- [24] Eric D, Black 2001 *Am. J. Phys.* **69** 79
- [25] Liu Z Q, Liu J L, Yan Z H 2018 *J. Quantum Opt.* **24** 228 (in Chinese) [刘志强, 刘建丽, 翟泽辉 2018 量子光学学报 **24** 228]
- [26] Spillane S M, Kippenberg T J, Painter O J, Vahala K J 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 043902

# Characteristics and control of fiber ring resonator\*

Song Li-Jun<sup>1)</sup> Zhang Peng-Fei<sup>1)2)†</sup> Wang Xin<sup>1)</sup> Wang Chen-Xi<sup>1)</sup>

Li Gang<sup>1)2)</sup> Zhang Tian-Cai<sup>1)2)‡</sup>

1) (*State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

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

( Received 29 December 2018; revised manuscript received 4 February 2019 )

## Abstract

Optical resonators play an active role in fundamental research and applications in atomic fine spectra, laser generation, precision measurements, and quantum information processing because of their high-resolution spectra and strong optical field enhancement. The fiber ring resonators, as a derivative of the resonant resonators, have the advantages of simple structure, small size, stable performance and easy integration. The fiber ring resonators are widely used in fiber lasers, optical communication devices, optical fiber sensing, etc. In this paper, we demonstrate the characteristics of a fiber ring resonator based on a tunable fiber beam splitter experimentally. Control of under-coupling, critical coupling and over-coupling state of the fiber ring resonator can be achieved by adjusting the splitting ratio of the tunable fiber beam splitter. The relationship between the minimum resonator reflectance and resonator loss is given. The intrinsic decay rate of the fiber ring resonator is  $\kappa_0 = 2\pi \times (1.60 \pm 0.03)$  MHz, and the quality factor is  $Q = (1.10 \pm 0.02) \times 10.8$ . The resonance frequency of the fiber ring resonator is controlled by stretching the fiber. The fiber resonator is kept straight and fixed on a self-made U-shaped holder by gluing two points. A piezoelectric transducer is used to change the distance between the two glued points. The fiber ring resonator length is changed and controlled when the fiber is stretched. The Pound-Drever-Hall technique is used to lock the resonator to resonance with the laser. The phase of the laser beam is modulated by using an electro-optical modulator, and two sidebands of the laser frequency are generated. Due to the phase sensitivity of the fiber resonator, the reflected light of the fiber resonator with an intensity modulation is observed when the fiber ring resonator is locked. The intensity modulation is caused by the interference between the resonance frequency and the sidebands of the fiber ring resonator. The reflected spectrum of the fiber ring resonator carries the same-frequency modulation as the phase modulation. This is a disadvantage for the usage of the fiber ring resonator. Thus, we reduce the phase modulation power to reduce the intensity modulation of the resonator reflectance. The linear relationship between the phase modulation power and the intensity modulation of the resonator reflectance caused by the phase modulation is obtained. The fiber ring resonator can be locked when the phase modulation power decreases to  $-9$  dBm. The fiber ring resonator has laid a solid experimental foundation for experimental research on the interaction between the fiber ring resonator and quantum emitters such as atoms and color centers in diamond.

**Keywords:** fiber ring resonator, critical coupling, Pound-Drever-Hall technique

**PACS:** 42.50.-p, 42.50.Pq, 42.60.Da, 42.60.Fc

**DOI:** 10.7498/aps.68.20182296

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grants Nos. 11574187, 11634008, 11674203, 61227902) and Shanxi Province "1331 Project" Key Discipline Construction Plan.

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

‡ Corresponding author. E-mail: tczhang@sxu.edu.cn