

结构改进的厘米尺寸谐振腔的磁场传感特性

于长秋 马世昌 陈志远 项晨晨 李海 周铁军

Magnetic field sensing performance of centimeter-scale resonator with optimized structure

Yu Chang-Qiu Ma Shi-Chang Chen Zhi-Yuan Xiang Chen-Chen Li Hai Zhou Tie-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 160701 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210247

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210247>

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

扁长型微瓶腔中的回音壁模式选择及Fano谐振

Selection of whispering-gallery modes and Fano resonance of prolate microbottle resonators

物理学报. 2020, 69(23): 234203 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200817>

激光3D纳米打印温度敏感的微球激光器

Femtosecond laser 3D printing temperature sensitive microsphere lasers

物理学报. 2019, 68(19): 194204 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190298>

基于十字连通形环形谐振腔金属-介质-金属波导的折射率传感器和滤波器

Refractive index sensor and filter of metal-insulator-metal waveguide based on ring resonator embedded by cross structure

物理学报. 2018, 67(19): 197301 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180758>

具有内参考热补偿功能的三层膜结构微球腔折射率传感器

Triple-layer-coated microspheres for refractive index sensor with internally referenced self-compensated thermal effect

物理学报. 2020, 69(1): 014203 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191265>

型谐振腔结构的光学透射特性

Transmission characteristics of surface plasmon polaritons in π -shaped resonator

物理学报. 2017, 66(1): 017301 <https://doi.org/10.7498/aps.66.017301>

光纤环形谐振腔的频率锁定及其特性

Characteristics and control of fiber ring resonator

物理学报. 2019, 68(7): 074204 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182296>

结构改进的厘米尺寸谐振腔的磁场传感特性*

于长秋[†] 马世昌 陈志远 项晨晨 李海 周铁军[‡]

(杭州电子科技大学电子信息学院, 杭州 310018)

(2021 年 2 月 1 日收到; 2021 年 3 月 26 日收到修改稿)

基于光力谐振腔的磁力仪在应用时主要受限于灵敏度和检测带宽两个指标. 本文设计了一种厘米尺寸的回音壁模式谐振腔结构, 可探测 6 Hz 至 1 MHz 频率范围内的交变磁场, 在无磁屏蔽、室温环境下、无直流偏置磁场时, 其最佳灵敏度在 123.8 kHz 可达 $530 \text{ pT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, 探测带宽和最佳灵敏度分别为同尺寸谐振腔的 11 倍和 1.67 倍. 该磁场传感器仅需 $100 \mu\text{W}$ 的光功率, 功耗很低. 后续通过优化系统噪声、提升器件磁场响应能力等手段可进一步提升其传感性能, 有望在电力系统故障监测和医学诊断等领域发挥其应用潜力.

关键词: 磁场传感, 光学谐振腔, 回音壁模式

PACS: 07.07.Df, 42.79.Gn, 07.55.Ge

DOI: 10.7498/aps.70.20210247

1 引言

回音壁模式光学谐振腔可用于检测转速^[1]、温度^[2–5]、湿度^[6]、折射率^[7]、压强^[8–10]、力^[11,12]、位移^[13,14]、加速度^[15]、电场^[16,17]和磁场^[18–23]等物理量. 其中, 磁场传感器因其在医学、军事、地理勘测和物理等领域具有重要的应用价值^[24–28], 吸引了研究人员的广泛关注. 在磁力仪的诸多实现方式中^[28], 结构简单的搜索线圈磁力仪具有较宽的探测频带, 可探测 fT 量级的变化磁场, 但是无法探测直流磁场; 磁阻式磁场传感器的灵敏度高、加工时工艺比较复杂, 对加工设备和环境要求较高; 无自旋交换弛豫磁力仪和原子磁力仪一样, 较难集成且工作时需要磁屏蔽系统; 超导量子干涉磁力仪具有 fT 量级的高灵敏度, 应用范围覆盖生物磁场探测、材料性质表征、地磁测量和军事反潜等诸多领域, 但是低温的工作条件增加了系统的复杂度、成本、尺寸和功耗; 而光学系统与磁致伸缩介质相结

合构建的磁场传感器可探测直流磁场和 pT 量级的交流磁场, 同时还具有室温工作、低成本、易加工、低功耗、不受电磁干扰、易集成等优势, 是一种极具发展前景的磁场探测系统, 其中基于回音壁模式光学谐振腔的光力磁力仪利用腔的力学模式去增强其交变磁场探测性能^[18–21], 可以实现室温下的低功耗弱磁探测. 通过优化腔的结构, 该类磁力仪在几十兆赫兹频率附近的灵敏度得到了显著提高^[18–20], 而能够探测低频带磁场的厘米尺寸光力磁力仪的传感性能仍不理想^[21], 由于低频带磁场探测在医疗、军事等应用领域的重要应用, 因此, 本文通过改变厘米尺寸谐振腔内光学介质 (CaF_2) 和磁致伸缩介质 (Terfenol-D) 的分布, 获得在低频带内磁场传感性能改进的光力谐振腔磁力仪. 改进后光力磁力仪的探测频带覆盖 6 Hz 到 1 MHz, 为改进前厘米尺寸谐振腔的 1.67 倍. 在不引入直流偏置磁场时, 其最佳灵敏度在 123.8 kHz 达 $530 \text{ pT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, 是改进前厘米尺寸谐振腔的最佳灵敏度的 11 倍.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61805061, 11874135)、浙江省重点研发计划项目 (批准号: 2021C01039)、科技部项目 (引智基地编号: D20011) 和浙江省自然科学基金青年科学基金 (批准号: GK200904207023) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: cqyu@hdu.edu.cn

[‡] 通信作者. E-mail: tjzhou@hdu.edu.cn

2 谐振腔加工

改进型厘米尺寸光学谐振腔结构如图 1(a) 所示. 腔由陶瓷、磁致伸缩材料和 CaF_2 晶体三部分构成, 三者之间通过环氧树脂胶 (EPO TEX 353 ND) 粘结在一起. 热稳定良好的陶瓷是谐振腔的底座. 这里选用 CaF_2 晶体是因其具有高的光学品质因数, 有助于提升磁场传感的性能^[29]. CaF_2 晶体内部挖空形成空心圆柱, 在其内嵌入 Terfenol-D 圆柱 (直径和高度分别约为 12.3 mm 和 3 mm), 可用于感知外部磁场. 而后, 利用纳米尺度金刚石加工机床 (Moore Nanotech 250 UPL) 研磨 CaF_2 晶体表面, 得到表面光滑、直径为 16 mm、边缘曲率半径为 1.616 mm 的光学谐振腔, 通过腔与棱镜的耦合可在其内表面传输回音壁光学模式. 最终加工得到的腔的实物图和边缘局部放大图如图 1(b) 所示. 当待测交变磁场信号存在时, 腔内磁致伸缩介质会驱动腔发生周期性振荡, 当入射光波长被锁定在腔的谐振波长上时, 腔的透射光场会被磁场信号所调制, 因此可通过观测腔的透射特性解调待测磁场信息. 当腔的力学模式与交变磁场信号频率一致时, 二者发生谐振增强, 使得该系统能够探测到微弱的交变磁场信号.

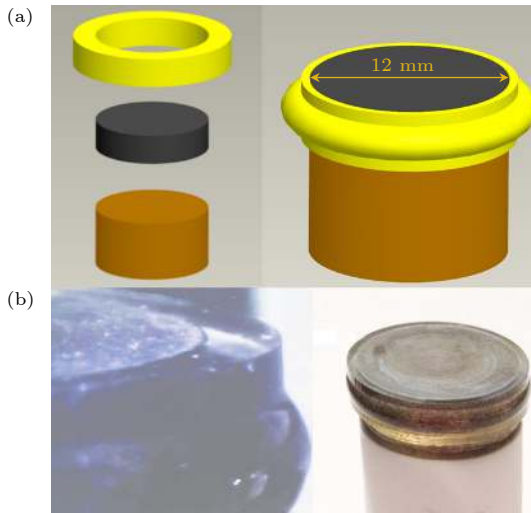


图 1 (a) 改进型谐振腔三维结构示意图, 亮黄色区域: CaF_2 , 黑色区域: Terfenol-D, 姜黄色区域: 陶瓷; (b) 谐振腔的局部放大图和实物图

Fig. 1. (a) Schematic diagram of the optimized resonator structure; Bright yellow area: CaF_2 ; Black area: Terfenol-D; Ginger area: ceramic; (b) local enlarged image and actual structure image of the resonator.

在进行腔结构设计时, 依据现有磁场传感理论进行了定性的预测^[30]: 为提升磁场传感的性能, 尽量保证磁场产生的力对光场传输区域处介质的作用最强, 同时也尽量保证腔力学模式的位移场位于光学模式传输的区域. 改进前 (图 2(a)) 和改进型 (图 2(b)) 谐振腔的截面图如图 2 所示. 图 2 中的红色箭头代表磁致伸缩介质对光学介质作用力的分布, 是利用有限元分析软件计算得到的. 结果显示对于改进型谐振腔, 磁场作用下磁致伸缩介质对光场传输区域的水平分量的作用力更大, 有利于提升器件的磁场响应能力. 此外, 利用有限元软件分析可知, 磁致伸缩介质和光学介质相对分布发生变化后的改进型谐振腔的力学模式分布如图 3(b) 所示, 与图 3(a) 所示的改进前谐振腔的几个相近频率处的力学模式相比, 改进型谐振腔结构的力学模式的位移场 (红色区域) 多数位于光场传输的区域, 因此也有望提升谐振腔磁场传感性能.

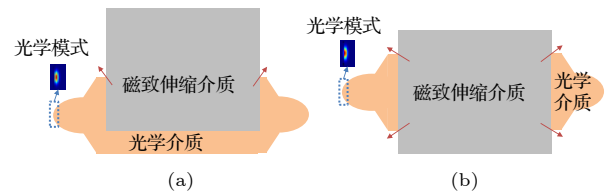


图 2 (a) 改进前谐振腔结构的截面图; (b) 改进型谐振腔结构的截面图

Fig. 2. (a) Cross section of unoptimized resonator structure; (b) cross section of optimized resonator structure.

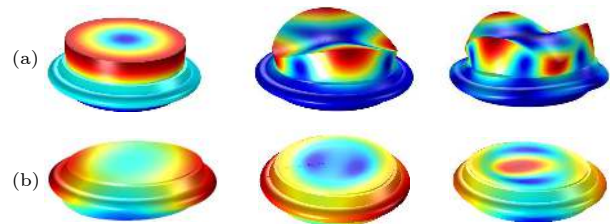


图 3 (a) 改进前谐振腔力学模式的有限元模拟结果, 从左至右, 频率依次为 69.2 kHz, 121.3 kHz, 和 138.4 kHz; (b) 改进型谐振腔力学模式的有限元模拟结果, 从左至右, 频率依次为 72.5 kHz, 123.8 kHz, 和 137.5 kHz

Fig. 3. (a) Finite element modelling (FEM) of mechanical eigenfrequency modes for unoptimized resonator; From left to right, the frequencies are 69.2 kHz, 121.3 kHz and 138.4 kHz, respectively; (b) FEM of mechanical eigenfrequency modes for optimized resonator. From left to right, the frequencies are 72.5 kHz, 123.8 kHz and 137.5 kHz, respectively.

3 光学特性测试

为标定光学谐振腔的光学品质因数并进行波长锁定, 首先利用图 4 所示实验装置测试改进型谐振腔的光学透射特性^[31]. 可调谐激光器输出 1550 nm 波长附近的光经隔离器、衰减器、偏振控制器、透镜、反射镜后, 通过棱镜耦合进出谐振腔, 虚线部分表示光在自由空间中传播. 棱镜与腔的耦合状态可以通过三维纳米位移台进行调节, 棱镜耦合角度可通过调节透镜的角度实现, 实验中仔细调节了棱镜耦合角度和耦合状态以使更多的光耦合进入谐振腔 (耦合效率约为 40%)、获得更高的光学品质因数. 经棱镜耦合出来的光被光电探测器检测并显示在示波器上. 信号发生器输出的三角波电压信号一路用于线性扫描激光器波长, 另一路送入示波器用于透射谱线测量. 实验测得腔的归一化透

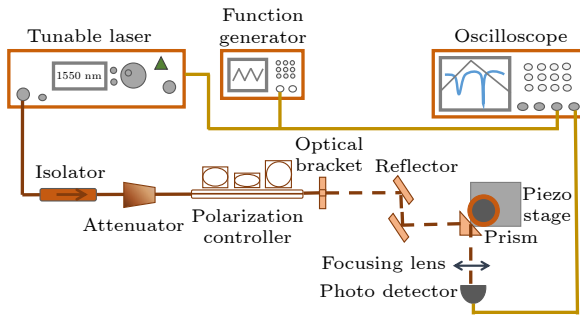


图 4 光学品质因数测量实验装置图

Fig. 4. Schematic of the experimental setup for the optical quality factor measurement.

射谱如图 5 所示, 其光学模式半高全宽 (full width at half maximum, FWHM) 约为 1.72 MHz, 对应的光学品质因数 $Q = c/\lambda/\text{FWHM} = 1.6 \times 10^8$, 其中 c 是真空中光速, λ 为入射光波长. 改进前谐振腔的光学品质因数为 2.8×10^8 , 二者光学品质因数接近^[21], 在同一个数量级上.

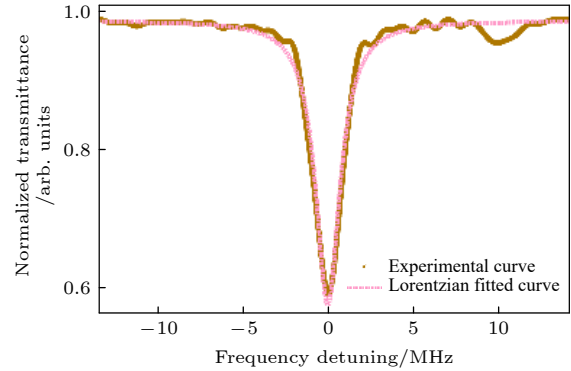


图 5 归一化的腔透射谱

Fig. 5. Normalized transmission spectrum of the resonator.

4 磁场传感特性测试

为对比改进型厘米尺寸谐振腔和改进前厘米尺寸谐振腔的磁传感性能, 采用图 6 所示实验装置进行测试, 测试过程中均没有引入直流偏置磁场. 实验中使用 Pound-Drever-Hall 频率锁定的方法, 通过引入电光调制器 (covega phase modulator)、偏置三通、混频器、分束器、伺服控制器 (New Focus LB1005)、电压放大器等器件将激光器 (Koh-eras Adjustik C15) 输出的入射光波长锁定到腔的

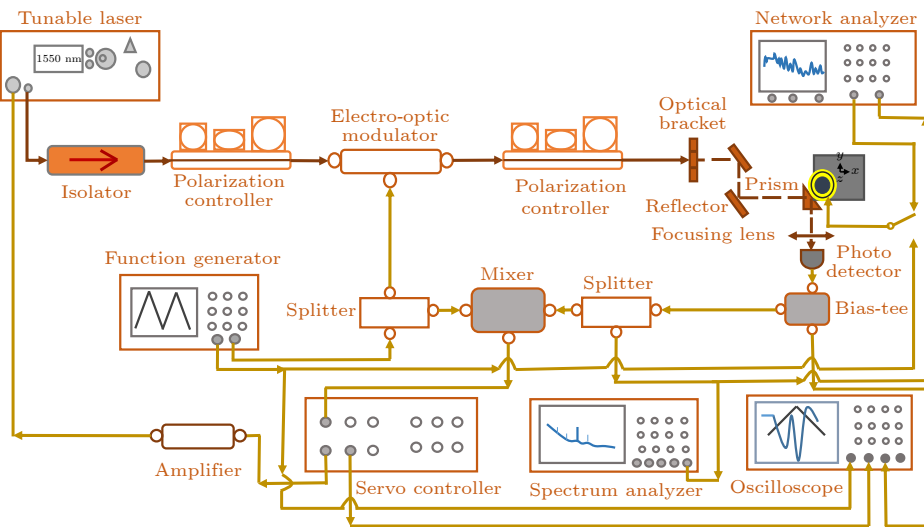


图 6 磁场传感实验装置图

Fig. 6. Schematic of the experimental setup for magnetic field sensing.

谐振波长. 锁定后系统输出的直流信号通过示波器观测, 交流信号通过谱仪 (Agilent N9010A) 和网络分析仪 (Keysight E5061B-3L5) 观测.

首先测试参考频率处系统对磁场信号的响应. 对改进型厘米尺寸谐振腔, 选取 15 MHz 的电光调制频率、保证大于腔光学模式的 FWHM. 参考频率 ($\omega_{\text{ref}} = 280 \text{ kHz}$) 处交变磁场 ($B_{\text{ref}} = 14.6 \mu\text{T}$) 由线圈 (直径 6.5 cm, 60 匝) 产生, 谱仪 (分辨率带宽 $\text{BW} = 36 \text{ Hz}$) 上测得参考磁场信号的信噪比 (signal noise ratio, SNR) 为 49.58 dB (如图 7(a) 中绿色峰所示). 由 (1) 式计算可知参考频率处最小可探测磁场为 $B_{\text{min}}(\omega_{\text{ref}}) = 8.07 \text{ nT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$.

$$B_{\text{min}}(\omega_{\text{ref}}) = \frac{B_{\text{ref}}}{\sqrt{\text{SNR} \times \text{BW}}}. \quad (1)$$

随后, 利用网络分析仪和线圈对腔施加一个频段的磁场信号, 并由谱仪和网络分析仪分别接收功率谱密度 $S(\omega)$ 和系统响应 $N(\omega)$. 图 7(a) 和图 7(b) 所示的是改进型厘米尺寸谐振腔的功率谱密度和系统响应, 图 7(a) 中插图 of SNR 随参考磁场强度变化的关系.

由 7(a) 中插图可知, 在 280 kHz 处, 参考磁场强度在 50 μT 范围内, 其 SNR 开方值随参考磁场

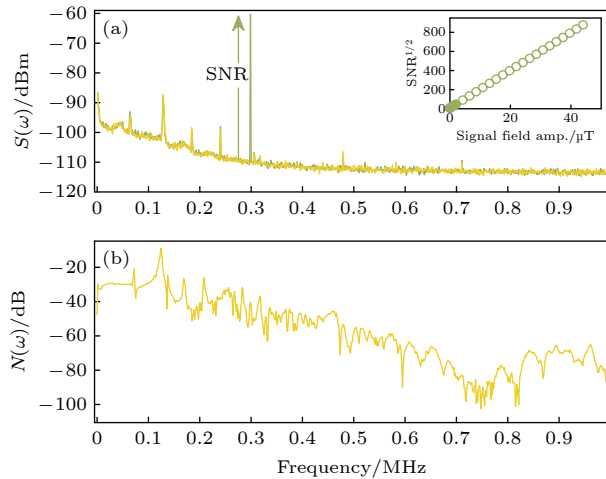


图 7 (a) 电光调制频率为 15 MHz 时的功率谱密度 $S(\omega)$; 绿色峰为 280 kHz 处的参考磁场信号; 插图: $\text{BW} = 330 \text{ Hz}$ 时 SNR 开方值随信号场强度变化关系; (b) 系统响应 $N(\omega)$

Fig. 7. (a) Power spectral density $S(\omega)$ with a 15 MHz electro-optic modulation frequency, and the highest green peak shows the response to the applied reference field at 280 kHz; Inset: response to the magnetic field as a function of signal field strength, with 330 Hz spectrum analyzer resolution bandwidth; (b) system response $N(\omega)$.

强度是线性变化的. 需要指出, 在其它频率处也可以测到相同的线性响应, 后续计算中认为探测频段内 SNR 开方值均随对应频率交流磁场强度发生线性变化. 相应灵敏度由 (2) 式计算, 其中 $N(\omega_{\text{ref}})$ 表示参考频率处的系统响应, $S(\omega_{\text{ref}})$ 表示参考频率处的功率谱密度.

$$B_{\text{min}}(\omega) = \sqrt{\frac{S(\omega) N(\omega_{\text{ref}})}{S(\omega_{\text{ref}}) N(\omega)}} B_{\text{min}}(\omega_{\text{ref}}). \quad (2)$$

采用同样的实验方案测量改进前厘米尺寸谐振腔的磁场传感性能, 所得功率谱密度、系统响应及 SNR 的线性响应结果如图 8 所示. 同一线圈在 280 kHz 处产生 $B_{\text{ref}} = 7.8 \mu\text{T}$ 的参考磁场, $\text{BW} = 330 \text{ Hz}$ 时相应的 SNR 为 19.4 dB. 因此, 由 (1) 式可知相应的 $B_{\text{min}}(\omega_{\text{ref}}) = 46.2 \text{ nT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$.

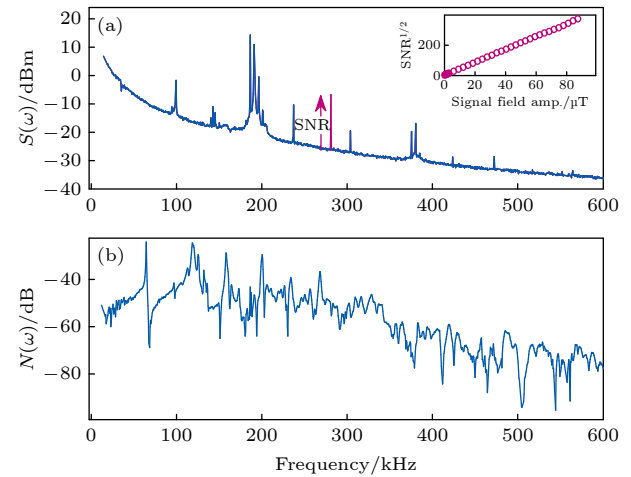


图 8 (a) 电光调制频率为 13.6 MHz 时的功率谱密度 $S(\omega)$, 280 kHz 参考磁场频率处有峰值响应; 插图: $\text{BW} = 10 \text{ Hz}$ 条件下, SNR 开方值随信号场强度变化关系; (b) 系统响应 $N(\omega)$

Fig. 8. (a) Power spectral density $S(\omega)$ with a 13.6 MHz electro-optic modulation frequency, and the highest peak shows the response to the applied reference field at 280 kHz; Inset: response to the magnetic field as a function of signal field strength, with 10 Hz spectrum analyzer resolution bandwidth; (b) system response $N(\omega)$.

改进型和改进前厘米尺寸谐振腔在无直流偏置磁场时的灵敏度曲线如图 9 所示. 改进型谐振腔在 123.8 kHz 处的最佳灵敏度约为 $530 \text{ pT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, 探测频带覆盖 6 Hz 到 1 MHz 的范围. 改进前谐振腔在 118.5 kHz 处的灵敏度为最佳灵敏度, 其值为 $5.93 \text{ nT} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, 可探测 10 Hz 到 600 kHz 的频率范围. 通过比较可知, 改进型谐振腔的最佳灵敏度为改进前谐振腔最佳灵敏度的 11 倍, 探测频带扩

大到了 1.67 倍. 在光学品质因数略低的情况下, 仍可以获得更好的磁场传感性能, 因此可以认为优化结构参数能够改进厘米尺寸光力磁力仪的磁场传感性能. 通过调整 CaF_2 的总质量、Terfenol-D 高度等结构参数, 使得改进型谐振腔的力学模式最大位移场更多位于光学模式传输的区域、增强磁场产生的力对光场传输区域处介质的作用力, 因而可以提升其磁场传感性能. 不考虑计算误差的情况下, 图 3(b) 中改进型谐振腔的三个力学模式的频率分别为 72.5 kHz, 123.8 kHz 和 137.5 kHz, 对应于图 9 黄色灵敏度曲线中的灵敏度分别为 $2.528 \text{ nT}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$, $530.1 \text{ nT}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$, 和 $2.534 \text{ nT}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$. 72.5 kHz 和 137.5 kHz 处力学模式位移场分布相近, 所以这两个频率处对应的灵敏度值也很接近. 123.8 kHz 处力学模式的最大位移场更多的分布于光学模式传输的区域, 因此在该频率处有最佳探测灵敏度. 需要说明的是, 不同频率位置处灵敏度不同是因为不同频率的力学模式的分布不同, 导致力学模式谐振增强磁场传感性能的效果不同.

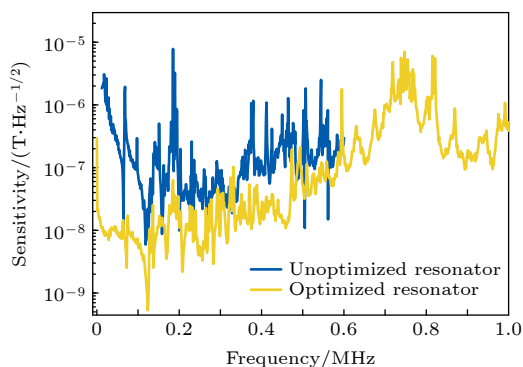


图 9 改进型谐振腔 (黄色曲线) 和改进前谐振腔 (蓝色曲线) 的磁场传感灵敏度

Fig. 9. Magnetic field sensitivities of optimized resonator and unoptimized resonator.

谐振腔磁场传感器的探测频带和灵敏度取决于系统噪声和谐振腔对磁场信号的响应能力. 通过使用相位压缩光抑制热噪声^[20]或利用平衡零差法减小激光器噪声^[32], 可以提升谐振腔的传感性能. 此外, 利用热退火工艺^[33]或引入直流偏置磁场^[18–21]改善 Terfenol-D 性能、或优化谐振腔结构亦可增强谐振腔的磁场响应能力. 腔结构优化的方法之一是将磁致伸缩材料置于谐振腔的外部、消除腔尺寸对磁致伸缩材料尺寸的限制^[23]; 腔结构优化的方法之二是使用更大内径的谐振腔, 腔内粘结

相应尺寸的 Terfenol-D 圆柱^[21]. 考虑到腔在实际应用时的稳定性, 可引入封装过程以解决腔的污染、耦合稳定性等问题^[34], 进而获得能够自由移动、稳定的传感系统. 封装时可以选择低折射率紫外胶将棱镜和谐振腔粘结在一起, 再调节其耦合状态至最佳, 而后利用紫外灯固化. 最后, 需要指出的是, 该谐振腔磁场传感单元不仅能够探测交流磁场, 亦可用于直流磁场探测, 这里虽然没有定量的测量, 但在测试腔的透射特性时, 在腔上方扫过了一个直流磁铁, 谱线发生了移动, 侧面确认了该器件具有探测直流磁场的能力. 只是, 利用谱线中特定波长的移动去标定直流磁场的传感方式很可能受到环境温度的影响, 需要排除温度的影响以便准确的测量直流磁场信号.

在谐振腔磁场传感系统的探测频带内, 它既可以探测单一频率交变磁场信号, 又可以探测覆盖一定频率范围的交变磁场信号. 该系统可以探测 50 Hz 或 60 Hz 的工频电流产生的单一频率的交变磁场信号, 用于电力系统工作状态监测. 若进一步提升该系统的灵敏度、拓展其探测频带, 则有可能用于探测瞬时放电电流产生的 1 kHz—10 MHz 磁场信号^[35]和 10 mHz—1 kHz 的极低频人体磁场信号^[36], 进而用于电力系统故障检测和生物医学诊断领域.

5 结 论

本文通过优化光学腔结构参数 (光学介质和磁致伸缩介质的分布) 改进了厘米尺寸谐振腔在低频带内磁场传感性能, 在同为 10^8 量级的光学品质因数、无直流偏置磁场的情况下, 其磁场探测最佳灵敏度在 123.8 kHz 达 $530 \text{ pT}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ 、较改进前厘米尺寸谐振腔提高了 11 倍, 且相应的探测频带扩大了 1.67 倍、从 10 Hz—600 kHz 拓展到 6 Hz—1 MHz. 后续可以通过降低系统噪声或提升谐振腔对磁场信号响应能力等手段进一步提升系统的磁场传感性能, 未来可能会在电力系统监测或生物医学等领域发挥重要作用.

参考文献

- [1] Li J, Suh M G, Vahala K 2017 *Optica* **4** 346
- [2] Liu S, Sun W Z, Wang Y J, Yu X Y, Xu K, Huang Y Z, Xiao S M, Song Q H 2018 *Optica* **5** 612
- [3] Weng W, Anstie J D, Stace T M, Campbell G, Baynes F N,

- Luiten A N 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 160801
- [4] Strekalov D V, Thompson R J, Baumgartel L M, Grudinin I S, Yu N 2011 *Opt. Express* **19** 14495
- [5] Li B B, Wang Q Y, Xiao Y F, Jiang X F, Li Y, Xiao L, Gong Q 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 251109
- [6] Ma Q, Huang L, Guo Z, Rossmann T 2010 *Meas. Sci. Technol.* **21** 115206
- [7] Lin N, Jiang L, Wang S, Xiao H, Lu Y, Tsai H 2011 *Appl. Opt.* **50** 992
- [8] Ioppolo T, Otugen M V 2007 *J. Opt. Soc. Am. B:Opt. Phys.* **24** 2721
- [9] Manzo M, Ioppolo T, Ayaz U K, Lapenna V, tgen M V 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 105003
- [10] Henze R, Seifert T, Ward J, Benson O 2011 *Opt. Lett.* **36** 4536
- [11] Harris G I, McAuslan D L, Stace T M, Doherty A C, Bowen W P 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 103603
- [12] Schliesser A, Anetsberger G, Riviere R, Arcizet O, Kippenberg T J 2008 *New. J. Phys.* **10** 095015
- [13] Tallur S, Bhav S A 2013 *Opt. Express* **21** 1
- [14] Anetsberger G, Gavartin E, Arcizet O, Unterreithmeier Q P, Weig E M, Gorodetsky M L, Kotthaus J P, Kippenberg T J 2010 *Phys. Rev. A* **82** 061804
- [15] Krause A G, Winger M, Blasius T D, Lin Q, Painter O 2012 *Nat. Photonics* **6** 768
- [16] Ioppolo T, Ayaz U, Otugen M V 2009 *Opt. Express* **17** 16465
- [17] Ali A R, Ioppolo T, tgen V, Christensen M, MacFarlane D 2014 *J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys.* **52** 276
- [18] Forstner S, Prams S, Knittel J, van Ooijen E D, Swaim J D, Harris G I, Szorkovszky A, Bowen W P, Dunlop H R 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 1
- [19] Forstner S, Sheridan E, Knittel J, Humphreys C L, Brawley G A, Dunlop H R, Bowen W P 2014 *Adv. Mater.* **26** 1
- [20] Li B B, Blek J, Hoff U B, Madsen L S, Forstner S, Prakash V, Schfermeier C, Gehring T, Bowen W P, Andersen U L 2018 *Optica* **5** 850
- [21] Yu C Q, Janousek J, Sheridan E, McAuslan D L, Dunlop H R, Lam P K, Zhang Y D, Bowen W P 2016 *Phys. Rev. Appl.* **5** 044007
- [22] Yu Y M, Forstner S, Rubinsztein-Dunlop H, Bowen W P 2018 *Sensors* **18** 1558
- [23] Zhu J G, Zhao G M, Savukor I, Yang L 2017 *Sci. Rep.* **7** 8896
- [24] Boto E, Holmes N, Leggett J, Roberts G, Shah V, Meyer S S, Muoz L D, Mullinger K J, Tierney T M, Bestmann S, Barnes G R, Bowtell R, Brookes M J 2018 *Nature* **555** 7698
- [25] Zhai J, Xing Z, Dong S, Li J, Viehland D 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 062510
- [26] Meyer H G, Stolz R, Chwala A, Schulz M 2005 *Phys. Status Solidi C* **2** 1504
- [27] Seidel P 2015 *Applied Superconductivity: Handbook on Devices and Applications* (Weinheim: Wiley-VCH) pp1020–1038
- [28] Grosz A, Haji-Sheikh M J, Mukhopadhyay S C, 2017 *High Sensitivity Magnetometers* (Switzerland: Springer) pp140–147
- [29] Savchenkov A A, Matsko A B, Ilchenko V S, Maleki L 2007 *Opt. Express* **15** 6768
- [30] Forstner S, Knittel J, Rubinsztein-Dunlop H, Bowen W P 2012 *Proceedings of SPIE* **8439** 84390U
- [31] Zhu J G, Ozdemir S K, Xiao Y F, Li L, He L, Chen D R, Yang L 2010 *Nat. Photonics* **4** 46
- [32] Yuen H P, Chan V M 1983 *Opt. Lett.* **8** 177
- [33] Engdahl G 2000 *Handbook of Giant Magnetostrictive Materials* (San Diego: Academic Press) pp257–264
- [34] Tang T, Wu X, Liu L Y, Xu L 2016 *Appl. Opt.* **55** 395
- [35] Hemmati E, Shahrtash S M 2013 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **62** 71
- [36] Vrba J, Robinson S E 2001 *Methods* **25** 249

Magnetic field sensing performance of centimeter-scale resonator with optimized structure^{*}

Yu Chang-Qiu[†] Ma Shi-Chang Chen Zhi-Yuan Xiang Chen-Chen
Li Hai Zhou Tie-Jun[‡]

(Information Engineering School, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

(Received 1 February 2021; revised manuscript received 26 March 2021)

Abstract

Applications of magnetometers are affected mainly by their sensitivities and detection bandwidths. Till now, the applications of the centimeter-scale optomechanical magnetometer have been still limited by those two factors. In order to improve its sensing performance in a low frequency regime of the alternating current (AC) magnetic field sensor based on centimeter-scale whispering gallery mode resonator, we design a new centimeter-scale crystalline whispering gallery mode resonator which has different relative distributions of the magnetostrictive material (Terfenol-D) and the optical material (CaF₂) from the unoptimized centimeter-scale whispering gallery mode resonator. Experimental results show that this new resonator is able to detect the AC magnetic field ranging from 6 Hz to 1 MHz, and a peak sensitivity of 530 pT·Hz^{-1/2} at 123.8 kHz is achieved without DC bias field in a magnetically unshielded non-cryogenic environment. On condition that the optical quality factor is at the same level of 10⁸ and there is no DC bias magnetic field, the best sensitivity of the optimized resonator is 11 times higher than that of the unoptimized resonator, and the corresponding detection frequency band is expanded by 1.67 times, switching from the frequency band of 10 Hz–600 kHz to 6 Hz–1 MHz. Besides, the device only needs 100 μW light intensity to operate, which offers us a low optical power consumption magnetometer. Within the detection frequency band, the proposed magnetometer can detect both a single frequency alternating magnetic field signal and an alternating magnetic field signal covering a certain frequency range. It can detect 50 or 60 Hz alternating magnetic field signal generated by current in the wire so that the working status of the power system can be monitored. If the sensing performance is further improved, it may be able to detect the magnetic field signal at frequency in a range of 1 kHz–10 MHz generated by the partial discharge current and the extremely low frequency human body magnetic field signal located in a frequency band of [10 mHz–1 kHz]. Further improvement in sensing performance is possible through optimizing the system noise and the magnetic field response capability of the device, which might allow the device to possess the applications in the fields of power system fault monitoring and medical diagnosis.

Keywords: magnetic field sensing, optical resonator, whispering gallery mode

PACS: 07.07.Df, 42.79.Gn, 07.55.Ge

DOI: 10.7498/aps.70.20210247

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61805061, 11874135), the Key Research and Development Program of Zhejiang Province (Grant No. 2021C01039), Project of Ministry of Science and Technology (Grant No. D20011), and the Young Scientists Fund of the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (Grant No. GK200904207023).

[†] Corresponding author. E-mail: cqyu@hdu.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: tjzhou@hdu.edu.cn