

超高 Q 值光学微腔光谱信号采集系统设计与分析

蔡瑞涛¹, 王梦宇^{1*}, 李雅婷¹, 郭状¹, 张海林¹, 谢成峰^{1**}, 张磊², 吴涛¹, 伏燕军¹¹南昌航空大学江西省光电信息科学技术重点实验室, 江西 南昌 330063;²中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 安徽 合肥 230026

摘要 针对超高品质因子 Q 值光学微腔实验系统的光谱数据采集难题, 设计了一款针对光学微腔的光谱信号采集系统。对光谱信号采集系统进行了基本功能验证, 证明了系统的稳定性和实用性; 分别测试了基于电弧放电法制备的光纤微球腔与基于超精密抛光法制备的氧化硅晶体微盘腔。采集了光纤微球腔和氧化硅晶体微盘腔的透射谱, 并对其模式谱线进行追踪。结果表明: 光纤微球腔的 Q 值达到 2.26×10^6 , 氧化硅晶体微盘腔的 Q 值达到 10^9 ; 采集系统具有很好的消噪功能, 模式谱线能长时间保持稳定。针对超高 Q 值光学微腔开发的光谱信号采集系统具有很高的可靠性, 可用于微腔光子学系统以及后续微腔传感应用开发。

关键词 集成光学; 光学微腔; 光谱采集; 微腔传感; 品质因子

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221453

1 引言

回音壁模式(WGM)光学微腔^[1]将光波限制在腔体内部,使其不断发生全内反射,从而使光波在腔体内以极小的损耗连续传播。近年来,回音壁模式微腔引起了越来越多科学家的兴趣,其小模式体积和超高品质因子(Q)等特性使其在窄线宽滤波器^[2]、生物传感器^[3]、非线性光学^[4]以及腔量子动力学^[5]等领域都得到广泛的研究。在对光学微腔的研究中,要实时检测其模式谱线,数据采集对实验过程管控与指标检测至关重要。光学微腔光谱信号常用的检测方案有两种:第一种方案是利用宽带光源激发微腔的回音壁模式^[6],通过光谱分析仪检测并分析光谱信号,目前常用的商业化光谱分析仪为AQ6370系列,但其价格昂贵,最小分辨率只能达到0.02 nm,且此方案并不适用于超高Q值光学微腔,只适用于Q值在 10^6 以下的光学微腔^[7];另一种检测光谱信号的方案是利用窄线宽激光器扫描光学微腔并进行频率调谐,以激发回音壁模式^[8],激发出的光谱信号通过光电探测器的光电转换后,被传送至示波器进行观察^[9],此方案适用于超高Q值的光学微腔,但不能够实时分析光谱信号。此外,微腔在高灵敏度传感领域的广泛应用需要一款具有采样速率高、响应速度快且能实时监测与分析光谱信号的

采集系统。2018年Xu等^[10]设计开发了一款基于光学微腔温度传感的无线物联网设备,这一成果标志着光学微腔将会为物联网在高精度温度测量领域的应用带来广阔的前景。

本文设计了一款针对超高Q值光学微腔的光谱信号采集系统,系统集成数据采集、存储、数据分析和数据显示等模块为一体,能够实时显示与分析光学微腔的光谱信号,并且具有快速采集的优点,可根据不同传感系统对采集速率的要求设置任意采样间隔和采样时间,从而实现信号数据的快速采集和实时保存,这解决了光学微腔中光谱信号的捕获、分析以及显示等难题。对此采集系统分别进行了基本功能测试、稳定性测试、光谱采集测试以及可靠性测试等4个实验,在可靠性测试实验中,使用此系统对光纤微球腔和氧化硅晶体微盘腔进行光谱采集,并对采集到的光谱进行分析。氧化硅晶体微盘腔Q值高达 10^9 ,证明了此套采集系统可适用于超高Q值光学微腔,这对光学微腔在高灵敏度传感上的应用有着巨大的推动作用。

2 系统设计

2.1 光谱信号采集系统的设计

图1展示了光学微腔光谱信号采集系统的总体方案设计。实验系统中任意信号发生器为激光器和调理

收稿日期: 2022-07-11; 修回日期: 2022-09-01; 录用日期: 2022-09-26; 网络首发日期: 2022-10-06

基金项目: 国家自然科学基金(62101230, 42175130, 51865040)、江西省自然科学基金(20202BABL212011, 20202BABL211010, 20202BABL212013, 20203BBG73039, 20224BAB202006)、江西省教育厅基金(GJJ190508)、南昌航空大学研究生创新专项资金(YC2022-081)

通信作者: *mengyu@nchu.edu.cn; **xcf@nchu.edu.cn

电路提供一个同步信号。激光器发出的光经微腔耦合系统后在微腔内部发生谐振,产生谐振信号,谐振信号经光电探测器转换成电信号传入信号采集系统。信号采集系统分为采集模块和软件模块两个部分。采集模块采用的是凌华科技(中国)有限公司的DAQ-2204采集卡。实验系统传入的光谱信号经此采集卡中的可编

程增益放大(PGA)和运放编程放大,再经ADC转换器的模数转换后进入FPGA,信号发生器产生的同步信号经调理电路也进入FPGA,同步信号对光谱信号进行锁频,经PCI总线传入上位机软件模块。最终对采集模块传送的信号进行采集,并通过 Wave_dispDel 函数完成波形显示。

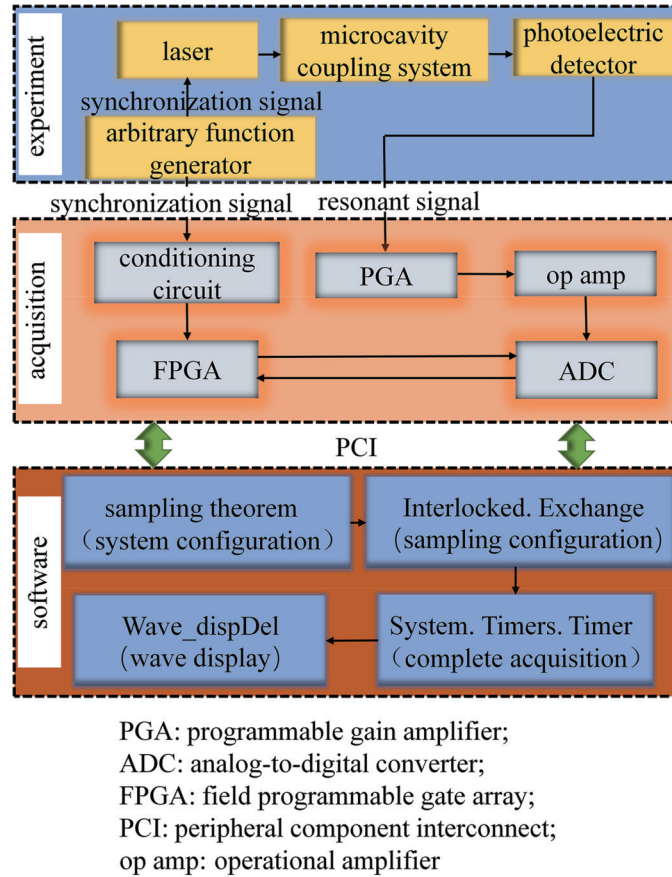


图 1 光学微腔光谱信号采集系统的总体方案设计

Fig. 1 Overall program design of optical micro-cavity spectral signal acquisition system

此信号采集系统以静态显示方法在 NI Measurement Studio 控件中显示多形状波形。静态显示方法是将采集到的点一次性全部显示到可视化界面上,如果后面要继续显示,就必须将此前显示的点全部擦除。这个方法的缺点是采集到的信号只能显示一次,此系统采用 System. Timers. Timer 定时执行方法弥补静态显示方法的缺点。定时器 Timer 的间隔时间可以任意设置,采集的数据也将随设定的 Timer 及时刷新。另外,本光谱采集系统中的程序涉及到多线程编

程序,为了防止多个线程调用重入情况,这里的采样配置采用 Interlocked. Exchange 方法,在 Interlocked. Exchange 中通过调用不同的库函数避免多线程重入。

2.2 DAQ 基本架构

采集卡 DAQ-2204 的基本架构如图 2 所示。系统接收模拟信号,通过调理电路对信号进行放大滤波整理,通过 ADC 转换器将模拟信号转换为数字信号,然后将转换好的数据流传送到处理器进行信号处理,再由 PCI 总线与上位机软件进行数据通信,在上位机软

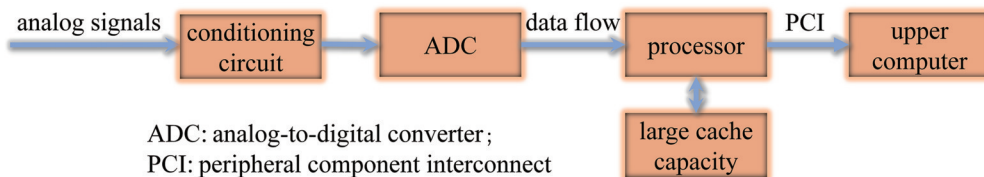


图 2 DAQ-2204 的基本架构

Fig. 2 Architecture of DAQ-2204

件完成显示操作。处理器的数据可视情况传送到大容量缓存中,以提高处理器进行读写工作状态的访问速度^[11]。此采集卡的优点是将调理电路、ADC转换器、中央处理器以及大容量缓存高度集成于一块板卡上,其采样速率高达 3 MSa/s,实现了高速采集。

2.3 软件整体架构

图 3 展示了此光谱采集系统的软件整体架构。根据采集系统的功能需求进行分析设计,采集系统的上位机软件可以分成以下 5 个部分:采集系统触发边沿设置、采集系统配置、数据采集配置、主菜单以及数据显示。采集系统触发边沿设置部分可选择在波形上升沿或者下降沿触发采集操作,二者唯一的不同在于外部数字触发器的极性选择,上升沿触发选择正边沿有效。采集系统配置部分可以完成对时间间隔、采样频率、触发频率以及参考电压的任意值设定,设置完成后可通过系统配置中的参数锁定功能进行参数锁定,这可确保采集操作的顺利进行,参数锁定后即便改变上

述设定值,系统调用的数值仍是参数锁定前的设定数值,若需要改变系统调用数值,可在参数解锁后进行修改。数据采集配置部分的功能主要是完成对采集次数、采集平均次数进行实验所需任意值设定,并完成对采集进度的控制。主菜单部分完成启动采集和停止采集的操作,可以将传输到上位机的光谱采集数据及时保存,退出采集系统的功能也在主菜单部分实现。数据显示部分是运用 NI Measurement Studio 控件显示传输到上位机软件的实时波形。对采集系统上位机软件的开发设计采用 Visual Studio 软件,其中配有 NI Measurement Studio 集成式套件,并采用 C# 编程语言进行编程。NI Measurement Studio 集成式套件为 Microsoft Visual Studio.NET 环境提供了一系列紧密结合的 .NET 控件,该套件为用户建立虚拟仪器系统提供了极大的便利。使用此集成式套件的优点是既可以实现光谱的精确采集,又能够在采集时实时、直观地观察到采集到的波形。

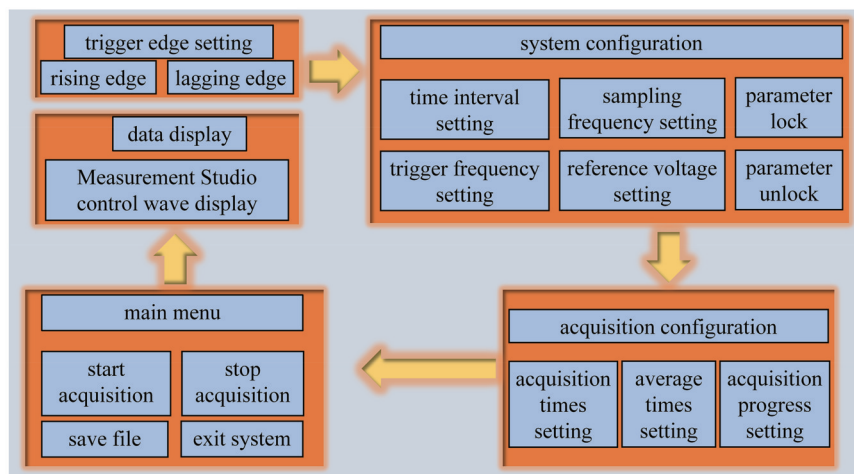


图 3 光学微腔光谱信号采集系统的软件整体架构

Fig. 3 Overall software architecture of optical micro-cavity spectral signal acquisition system

2.4 软件主要功能的实现

图 4 展示了采集工作的流程图,上位机软件的整体工作主要由主菜单的启动采集按钮、停止采集按钮、保存文件按钮以及退出系统按钮控制。先在上位机采集软件的可视化界面中进行触发边沿配置选择;然后自定义系统配置和采样配置,再启动采集,通过判断库函数中的采集时间间隔来控制是否绘制波形图,通过判断库函数中的采集次数来控制是否需要绘制频率偏移图;在上位机软件可视化界面的主菜单模块中的文件保存按钮会对当前的采集数据进行保存,可以根据用户自己的需求选择路径,也可自定义文件名;通过判断是否有多线程乱入功能来控制采集进程。同时控制上位机软件主菜单模块中的停止采集按钮可以让当前被注册的采集卡 DAQ-2204 停止工作并且释放采集,同时让定时器 Timer 停止触发 Enabled 事件,最终终止采集。

3 软件测试

3.1 光谱信号采集系统的基本采集功能测试

数据采集卡的信号输入连接方式可以分为单端连接方式和差分连接方式。单端连接方式有两种类型:一种是 RSE 连接,另一种是 NRSE 连接。为测试光谱信号采集系统的基本功能,使此光谱信号采集系统分别在这三种连接方式下对信号发生器产生的基本信号进行采集。在信号发生器中选择幅度为 500 mV、原始偏移和原始相位均为 0 的三角波波形。在上位机软件中设置触发频率为 20 Hz,采样频率设为 240000 Hz,即采样点数设为 12000,参考电压设为 2 V,设置参数锁定,选择上升沿触发,然后通过操作软件保存波形。图 5 为三种连接方式下采集的三角波,图 5(a)为 RSE 连接下采集到的三角波,图 5(b)为 NRSE 连接下采集到的三角波,图 5(c)为差分连接方式下采集到的三角波。

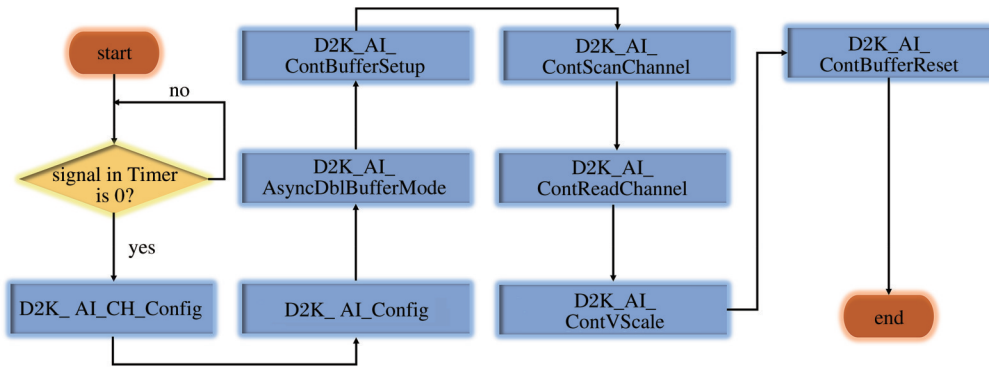


图 4 光学微腔光谱信号采集系统的采集工作流程图

Fig. 4 Acquisition workflow chart of optical micro-cavity spectral signal acquisition system

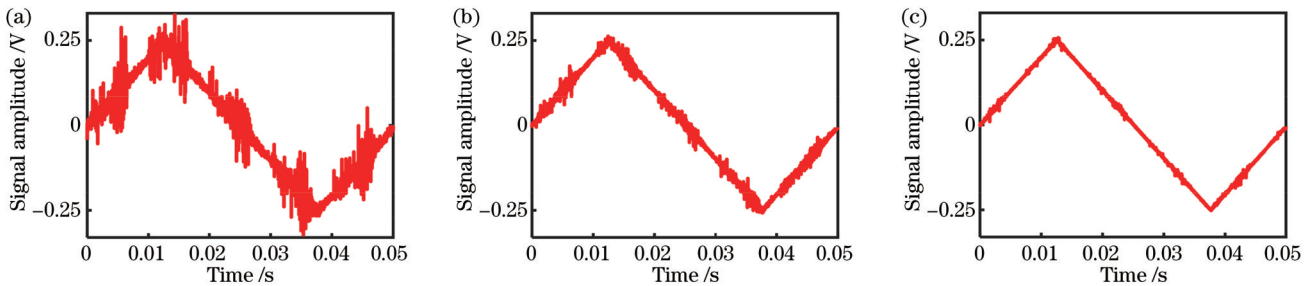


图 5 光学微腔光谱信号采集系统的基本功能测试结果。(a) RSE下采集的三角波;(b) NRSE下采集的三角波;(c)差分下采集的三角波

Fig. 5 Basic function test results of optical micro-cavity spectral signal acquisition system. (a) Triangular wave acquired under RSE; (b) triangular wave acquired under NRSE; (c) triangular wave acquired under differential

通过分析采集的三角波波形,可以知道 RSE 连接方式下的波形噪声很大,波形的幅值与一些重要数据无法被精确观察到,这说明 RSE 连接方式适合浮动信号而非地面参考信号;NRSE 连接方式下的波形展现较为完整,但仍存在噪声,这对波形的数据读取会产生影响;差分连接方式下虽然存在少量噪声,但波形相对清晰,这是由于在采集时信号发生器提供的信号并未经过任何信号整形电路而被直接采集。通过数据对比可以发现,差分连接方式对电子噪声等一些干扰因素有着明显的抑制作用,这也证明此光谱信号采集系统可实现基本的采集功能。

3.2 光谱信号采集系统的稳定性测试

使用上述实验参数,将输入信号设置为正弦信号。信号采集系统的采样时间间隔设为 1 s,采集工作进行 1800 s,在所设定时间范围内采集到了 1800 组正弦波

信号。对采集到波形的峰值进行追踪,并计算其 Allan 方差。图 6(a)为所采集波形峰值的波动范围,图 6(a) 右上角的插图为采集到的一组正弦波信号。图 6(b) 为数据峰值随时间变化的 Allan 方差。图 6(a)表明信号采集系统从信号发生器采集到的正弦信号峰值在 0.26 左右上下波动,图 6(b)显示采集软件采集数据误差的数量级逐渐下降,且在时间长达 700 s 内平均误差都处在 0.0014 以下,这表明该采集系统的中长期稳定度较好。已报道的光学微腔封装稳定性分析^[12]中,误差在 200 s 内维持在同一个数量级,显然此采集系统已完全满足光学微腔所需要采集稳定性的要求。实验结果表明,此采集系统具有较好的稳定性,可以用于光学微腔实验的光谱采集,同时也证明此系统具有快速采集、可存储以及可处理的优点。

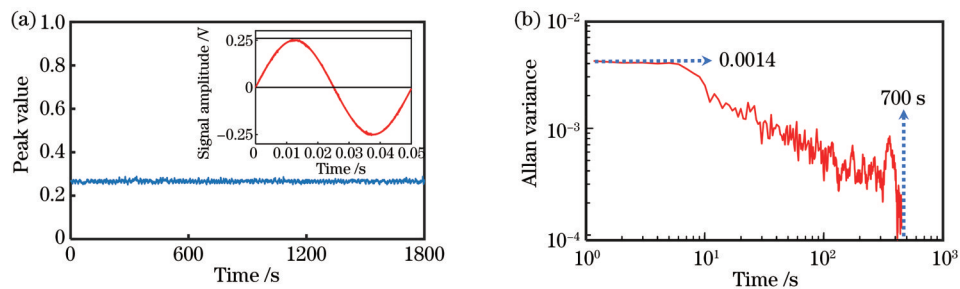


图 6 采集系统稳定性测试结果。(a) 波形峰值随时间的变化曲线;(b) 波形峰值随时间变化的 Allan 方差

Fig. 6 Stability test results of acquisition system. (a) Wave peak value as a function of time; (b) Allan variance of wave peak value varying with time

3.3 光纤微球腔光谱采集测试

为测试此系统采集光学微腔光谱信号的稳定性,针对由电弧放电法^[6]制备得到的光纤微球腔进行光谱采集测试,图 7 为此次实验所使用的系统图。用可调谐激光器作为光源,用信号发生器提供一个频率为 20 Hz 的三角波作为激光器和示波器的同步信号。可调谐激光器发出的光经单模光纤传输至耦合系统,本文采用波导耦合

法^[13]使激光器发出的光耦合进微腔,谐振信号经光电探测器后被转换为电信号,将其发送到示波器,示波器与采集卡相连,采集卡收集到模拟信号并对其完成转换后传输到上位机软件,并在计算机上显示,即完成采集。

图 8(a)为此次实验使用的光纤微球腔透射谱。图 8(b)为光纤微球腔与光纤锥耦合时的俯视图,其直径约为 190 μm ,图 8(c)、(d)为其内部子午面所对应的

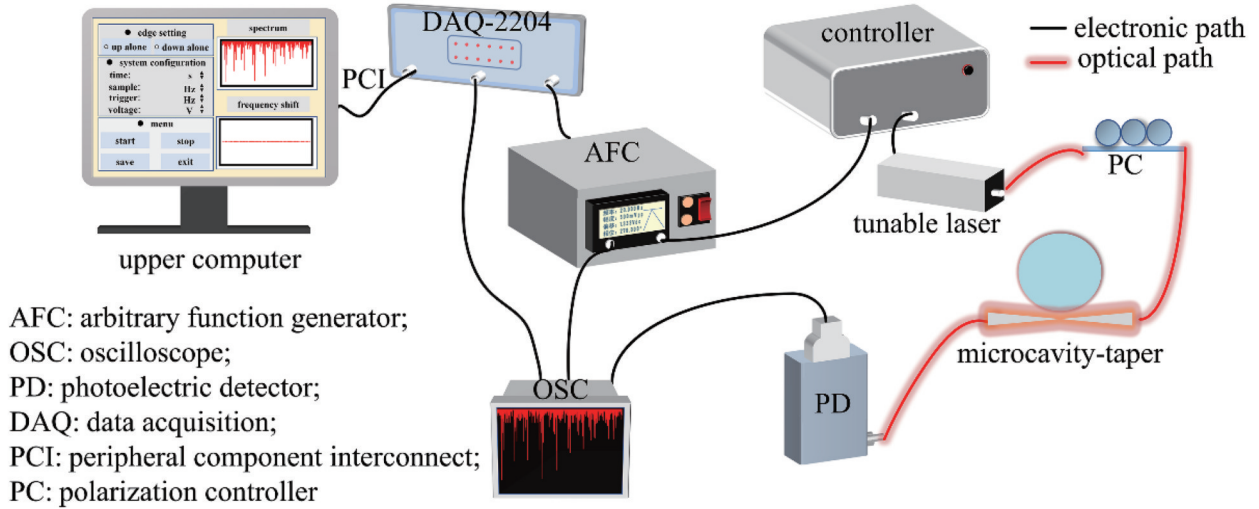


图 7 光学微腔光谱采集实验系统

Fig. 7 Experimental system of optical micro-cavity spectral signal acquisition

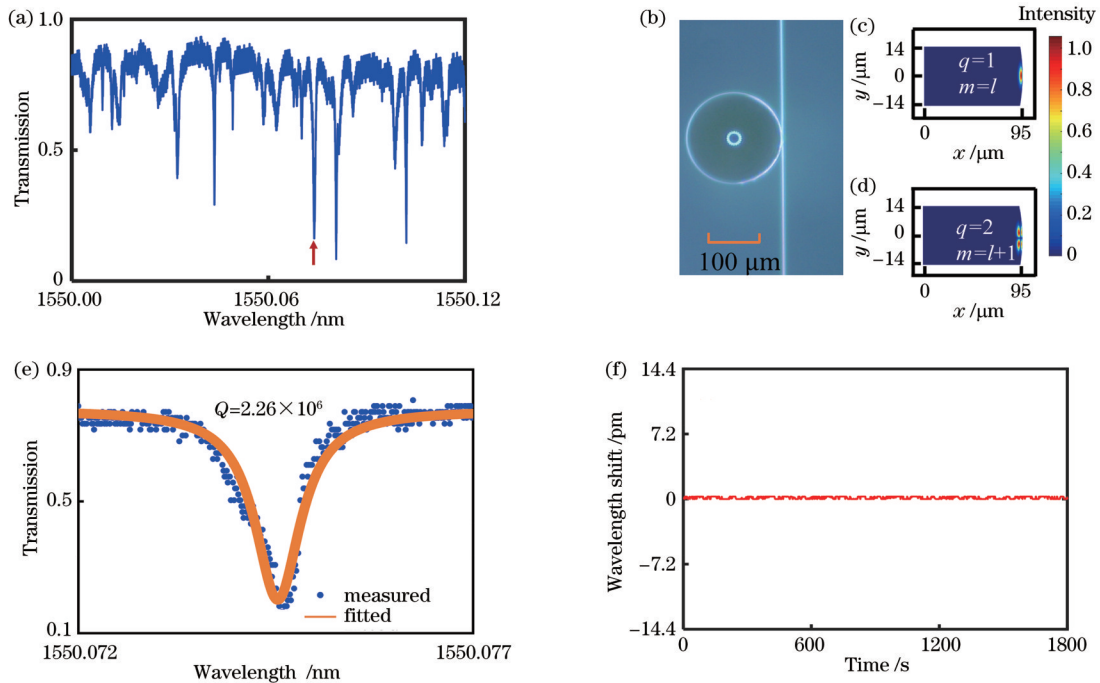


图 8 光纤微球腔的光谱信号采集结果。(a)微球腔透射谱;(b)微球腔耦合时俯视图;(c)微球腔子午面一阶径向、一阶角向电场模式;(d)微球腔子午面二阶径向、二阶角向电场模式;(e)图 8(a)中箭头指向模式的洛伦兹拟合;(f)图 8(e)中模式最低点波形频率漂移曲线

Fig. 8 Results of spectral signal acquisition of fiber microsphere cavity. (a) Transmission spectrum of microsphere cavity; (b) top view of microsphere cavity when it is coupled; (c) first-order radial and first-order angular electric field pattern in meridional plane of microsphere cavity; (d) second-order radial and second-order angular electric field pattern in meridional plane of microsphere cavity; (e) Lorenz fit of mode which is pointed to with arrow in Fig. 8(a); (f) waveform frequency drift curve at lowest point of mode in Fig. 8(e)

一阶径向一阶角向(基模 $q=1, m=l$, 其中 q 代表在微腔中电场的径向分布, m 代表电场的角向分布, l 代表电磁场的方位角分布)、二阶径向二阶角向($q=2, m=l+1$)的电场模式分布。使用系统采集光纤微球腔的透射谱线, 启动上位机系统的数据采集功能, 图 8(e) 为图 8(a) 中所选取的其中一组透射谱线图(箭头指向模式)及洛伦兹拟合图, 其半峰全宽为 6.85×10^{-4} nm, 经计算可得 Q 值为 2.26×10^6 , 图 8(f) 为该模式下谐振波长最低点随时间变化的漂移量, 其偏移量在 2.725×10^{-4} nm 内波动, 且相对于第一组谱线, 后面发生了漂移的谱线模式均为红移, 这是由于波长稳定性受微腔热效应的影响, 实验结果证明了本文设计开发

的光谱采集系统可实现对系统和采样的灵活配置。

3.4 采集系统与示波器信号采集的对比

为进一步证明此采集系统采集得到的光谱信号的可靠性, 分别用光谱信号采集系统和示波器对由超精密抛光法^[14]制备得到的氧化硅晶体微盘腔进行透射谱采集, 并将二者采集到的透射谱进行比较, 由此分析此采集系统的可靠性, 图 9 为此实验对比结果图。图 9(a) 为微盘腔侧视图, 氧化硅晶体微腔的直径约为 3.0 mm, 图 9(b) 为图 9(a) 中虚线框内部分在高倍显微镜下放大了 8 倍的微腔表面图, 可看出抛光后的氧化硅晶体腔表面极度光滑, 图 9(c) 为使用有限元算法仿真得到的微腔内部基模电场分布。

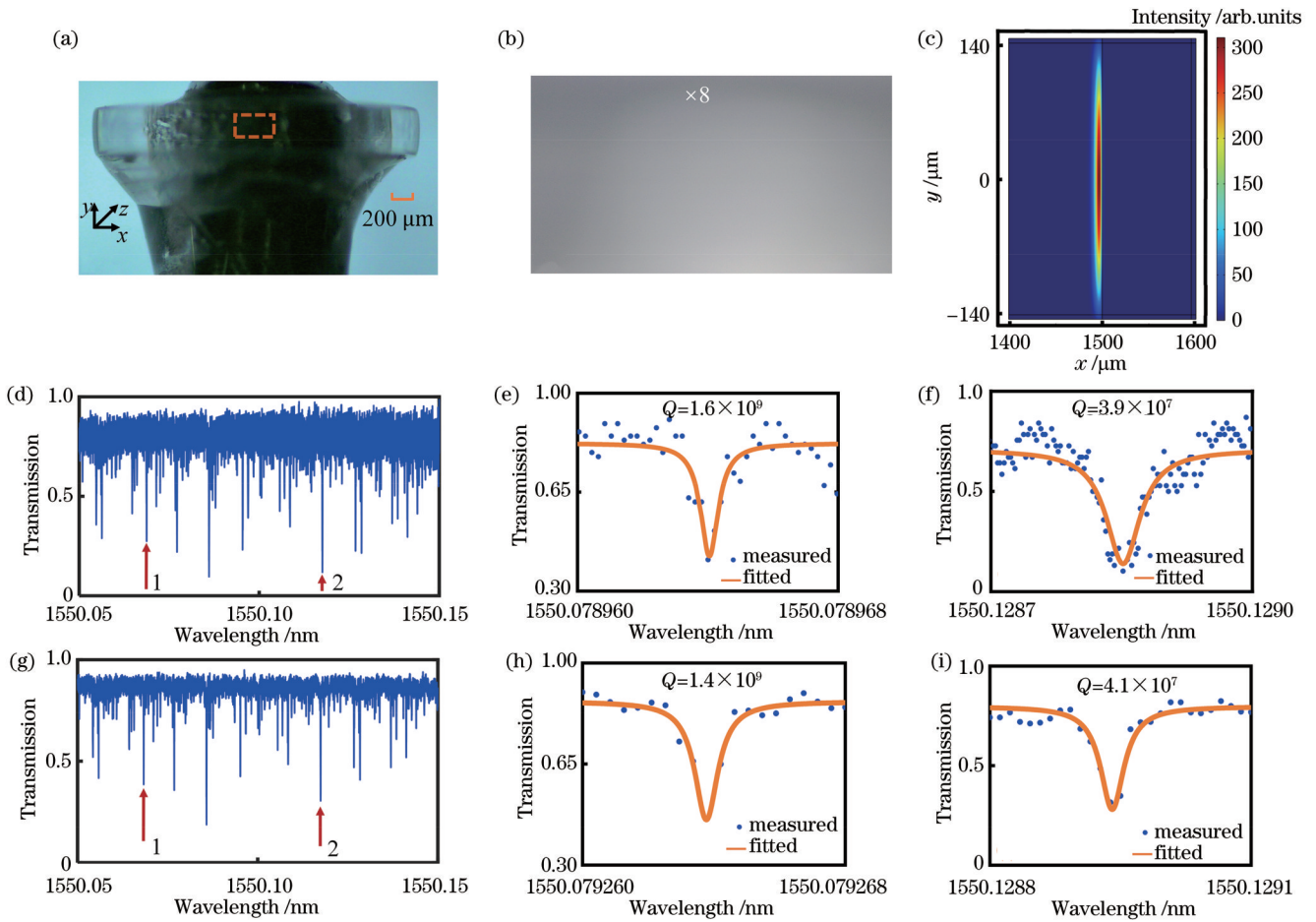


图 9 实验对比结果。(a)氧化硅微盘腔侧面图;(b)高倍显微镜下微盘腔表面图;(c)微盘腔内部模式分布;(d)示波器采集到的透射谱;(e)(f)示波器采集到透射谱的 Q 值分析;(g)采集系统采集到的透射谱;(h)(i)采集系统采集到透射谱的 Q 值分析

Fig. 9 Results of experimental comparison. (a) Side view of silica microdisk cavity; (b) surface view of microdisk cavity under high magnification microscope; (c) internal mode distribution of microdisk cavity; (d) transmittance spectrum acquired by oscilloscope; (e)(f) Q -value analysis of transmission spectra acquired by oscilloscope; (g) transmission spectrum acquired by acquisition system; (h)(i) Q -factor analysis of transmission spectra collected by acquisition system

首先使用光谱信号采集系统对微腔进行透射谱采集, 采集后保持耦合位置不变, 移除采集系统, 直接用示波器采集透射谱信号, 图 9(d)~(i) 为二者采集到的透射谱线的对比图。图 9(d) 为示波器采集到的透射谱线, 图 9(g) 为采集卡采集到的透射谱线, 可以看出

氧化硅微盘腔中较多的模式被激发出来, 说明微腔与光纤锥具有比较好的相位匹配^[15]。对两种采集方式得到的透射谱选取两个模式进行分析(图中箭头指向 1 和 2), 二者采集到模式 1 的波长差为 0.0003 nm, 模式 2 的波长差为 0.0001 nm, 通过对比结果得到二者采集

到的透射谱基本上是一致的,且采集卡采集到的透射谱杂波小,这证明此光谱信号采集系统具有一定的消噪功能。对所选两个模式进行洛伦兹拟合并对其 Q 值进行分析。其中图9(e)、(f)分别为示波器采集到的模式1和模式2的洛伦兹拟合结果,图9(h)、(i)分别为采集系统采集到的模式1和模式2的洛伦兹拟合结果,模式1的 Q 值高达 10^9 ,模式2的 Q 值的数量级达到了 10^7 。二者采集到的透射谱线具有相同数量级的 Q 值,非常接近,二者存在略微差别的原因可能是采样点不同。

由上述实验结果可知,本文设计的光谱信号采集系统在差分连接下更适合微腔实验系统的光谱采集,在长时间内具有很好的稳定性,为光学微腔提供了一个很好的光谱信号采集工具。采集到的光纤微球腔和氧化硅微盘腔的透射谱证明了此光谱信号采集系统可针对不同类型光学微腔进行透射谱采集。通过比较二者采集到的透射谱,可知此采集系统具有一定的消噪功能,并且可采集不同 Q 值光学微腔的透射谱。经分析可得,此光学微腔具有 10^9 的超高 Q 值,这证明此采集系统可采集超高 Q 值光学微腔的光谱信号,这为基于超高 Q 值光学微腔的科学研究提供了一个比较完备的信号采集工具。

4 结 论

针对超高 Q 值光学微腔实验系统,有针对性地设计了一款光谱信号采集系统。为测试此光谱采集系统的性能,使用该采集系统对信号发生器产生的三角波信号进行采集,证明了该采集系统可实现基本的采集功能,并具有长时间稳定性。利用该系统测试了高 Q 值光纤微球腔的光谱信号,证明了此系统可实现对微腔系统进行采样的灵活配置。利用该系统测试了超高 Q 值氧化硅晶体微盘腔,证明了此系统具有很好的消噪功能。由所得结果可知,开发的光谱信号采集系统不仅具有可靠性高、采样速率高、响应速度快等优点,而且可以采集超高 Q 值微腔的光谱信号,并可实时对模式进行分析,这为微腔研究中的光谱采集提供了很大的便利,可扩展光学微腔器件的潜在应用。

参 考 文 献

- [1] Vahala K J. Optical microcavities[J]. Nature, 2003, 424(6950): 839-846.
- [2] Savchenkov A A, Ilchenko V S, Matsko A B, et al. High-order

- tunable filters based on a chain of coupled crystalline whispering gallery-mode resonators[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(1): 136-138.
- [3] Santiago-Cordoba M A, Boriskina S V, Vollmer F, et al. Nanoparticle-based protein detection by optical shift of a resonant microcavity[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(7): 073701.
- [4] Lin G P, Yu N. Continuous tuning of double resonance-enhanced second harmonic generation in a dispersive dielectric resonator[J]. Optics Express, 2014, 22(1): 557-562.
- [5] Alton D J, Stern N P, Aoki T, et al. Strong interactions of single atoms and photons near a dielectric boundary[J]. Nature Physics, 2011, 7(2): 159-165.
- [6] Zhang Y N, Zhu N S, Zhou T M, et al. Research on fabrication and sensing properties of fiber-coupled whispering gallery mode microsphere resonator[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(2): 833-841.
- [7] Sumetsky M, Windeler R S, Dulashko Y, et al. Optical liquid ring resonator sensor[J]. Optics Express, 2007, 15(22): 14376-14381.
- [8] 林晓黎, 林德泉, 廖廷伟, 等. 光学微球腔的热光效应应用于温度传感器研究[J]. 光子学报, 2020, 49(3): 0314004.
- Lin X J, Lin D Q, Liao T D, et al. Thermo-optic effect of optical microsphere cavity for temperature sensor research[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(3): 0314004.
- [9] Dong Y C, Wang K Y, Jin X Y. Packaged microsphere-taper coupling system with a high Q factor[J]. Applied Optics, 2015, 54(2): 277-284.
- [10] Xu X Y, Chen W J, Zhao G M, et al. Wireless whispering-gallery-mode sensor for thermal sensing and aerial mapping[J]. Light: Science & Applications, 2018, 7: 62.
- [11] 吴永亮, 邱成, 朱衡君, 等. 基于DAQ-2204的微弱信号数据采集与分析系统[J]. 测控技术, 2011, 30(3): 26-28, 32.
- Wu Y L, Qiu C, Zhu H J, et al. Design of the weak signal data acquisition and analysis system based on the DAQ-2204[J]. Measurement & Control Technology, 2011, 30(3): 26-28, 32.
- [12] 王梦宇, 刘霁阳, 李远松, 等. 封装型回音壁模式光学微腔器件稳定性研究[J]. 中国激光, 2022, 49(17): 1713002.
- Wang M Y, Liu J Y, Li Y S, et al. Research on stability of packaged optical microresonator device based on whispering-gallery mode[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(17): 1713002.
- [13] Wang M Y, Jin X Y, Li F, et al. Analysis for coupling characteristics of optical microsphere cavity in waveguide coupled whispering gallery mode[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2018, 37(3): 284-289.
- [14] 王梦宇, 杨煜, 吴涛, 等. 回音壁球体氟化钙毫米晶体微腔制备与谐振特性分析[J]. 光学学报, 2021, 41(8): 0823019.
- Wang M Y, Yang Y, Wu T, et al. Fabrication and resonance characteristic analysis of spheroid calcium fluoride millimeter crystalline microcavity[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(8): 0823019.
- [15] 温钦, 秦晋辉, 周恒, 等. 回音壁模式光学微腔的激发模式控制[J]. 光学学报, 2020, 40(19): 1919001.
- Wen Q, Qin J H, Zhou H, et al. Controllable excitation of whispering gallery mode micro-rod resonator[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(19): 1919001.

Design and Analysis of Spectral Signal Acquisition System Based on Ultra-High Q Factor Optical Microcavity

Cai Ruitao¹, Wang Mengyu^{1*}, Li Yating¹, Guo Zhuang¹, Zhang Hailin¹, Xie Chengfeng^{1**},
Zhang Lei², Wu Tao¹, Fu Yanjun¹

¹Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology of Jiangxi Province, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China;

²Department of Precision Machinery and Precision Instruments, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China

Abstract

Objective Whispering-gallery-mode optical micro-cavities have been extensively researched in narrow linewidth filters, biosensors, and nonlinear optics due to their small mode volume and ultra-high Q factor. Data acquisition and identification of mode spectral lines in real time are critical for experimental process control and index detection in research on optical micro-cavities. There are two typical detection strategies for spectral signals of optical micro-cavities. The first scheme uses a broadband light source to excite the whispering gallery modes of the optical micro-cavities, and the spectral signals are detected and evaluated by a spectrometer. It is costly, however, and thus this approach is only suitable for optical micro-cavities with a Q factor of less than 10^6 . The other method for detecting spectral signals is to stimulate the whispering gallery modes by scanning the optical micro-cavity with a narrow linewidth laser. The stimulated spectral signal is then transformed by a photoelectric detector and sent to an oscilloscope for analysis. This approach is appropriate for ultra-high- Q optical micro-cavities, but it is incapable of analyzing the spectral signal in real time. In addition, there is an urgent need for an acquisition system with a high sampling rate, a rapid reaction time, and the capacity to monitor and analyze spectral data in real time for applications in high-sensitivity sensing of micro-cavities. Hence, a spectral signal acquisition system for optical micro-cavities is explored and constructed in this study to solve these issues. The system consists of an acquisition module, a data storage module, a data analysis module, and a data display module, which can show and analyze the spectral signals of optical micro-cavities in real time and has the benefit of quick acquisition. Moreover, it can set an arbitrary sampling interval and sampling time according to the requirements of different sensing systems, which solves the problems of capturing, analyzing, and displaying spectral signals in optical micro-cavities.

Methods This signal acquisition system is separated into acquisition and software modules (Fig. 1). The analog signal is amplified and filtered by the conditioning circuit in the acquisition module (Fig. 2) before being transformed into a digital signal by the analog-to-digital converter (ADC). The transformed data stream is then transmitted to the processor for signal processing before the peripheral component interface (PCI) communicates with the upper computer software for data transmission, and the display operation is finished in the upper computer software. The acquisition system's software module is separated into five sections: trigger edge setting, system configuration, acquisition configuration, main menu, and data display. The trigger acquisition operation can be specified as a rising or trailing edge of the waveform in the trigger edge setting, and the rising edge trigger is valid at the positive edge. The time interval, sampling frequency, trigger frequency, and reference voltage can all be adjusted flexibly in the system configuration. After the parameters are set, they could be locked by the parameter lock feature in the system configuration to ensure the smooth execution of the acquisition procedure. The function of the acquisition configuration section is primarily to finish the setup of arbitrary parameters necessary for the number of acquisitions and the average number of acquisition experiments and control the acquisition process. The procedure of initiating and terminating the acquisition is completed via the main menu. The data display section shows the real-time waveform that is delivered to the upper computer software via NI Measurement Studio control. The development and design of the upper computer software for the acquisition system make use of Visual Studio software, which is equipped with the NI Measurement Studio integrated suite and is written in the C# programming language. The integrated suite provides a set of tightly integrated .NET controls for the Microsoft Visual Studio .NET environment, which allows the user to build virtual instrumentation systems.

Results and Discussions First, the fundamental function of the spectral signal acquisition system is validated (Fig. 5), and the system's feasible basic acquisition function is proven. Then, the stability of the acquisition system is examined (Fig. 6), and the experimental findings reveal that the acquisition system fully fulfills the stability criteria of optical micro-acquisition cavities. After that, a fiber microsphere cavity created by arc discharge (Fig. 8) and a silica crystalline

micro-disk cavity prepared by ultra-precision polishing (Fig. 9) are examined separately. The transmission spectra of the fiber microsphere cavity and the silica crystal micro-disk cavity are measured and traced, with the Q factor of the former being 2.26×10^6 and that of the latter being 10^9 . The acquisition system can excellently suppress noise and maintain steady mode spectral lines over extended periods. The optical micro-cavity system with an ultra-high Q factor has high reliability and could be utilized to create future micro-cavity sensing applications.

Conclusions A spectral signal acquisition system is designed for experimental systems of optical micro-cavities with an ultra-high Q factor. First, the triangle wave signal generated by the arbitrary function generator is acquired to evaluate the performance of this spectral acquisition system. It is demonstrated that this acquisition system can perform the fundamental acquisition function and has long-term stability. Second, this system is used to examine the spectral signal of a high- Q fiber microsphere cavity. The results indicate that this system is capable of realizing the flexible configuration of sampling of the micro-cavity system. Finally, the denoising feature of the ultra-high- Q silica crystal micro-disk cavity is shown by this system. The results show that the developed spectral signal acquisition system has the advantages of high reliability, a high sampling rate, and fast response, and it can acquire the spectral signals of ultra-high- Q micro-cavities and analyze the modes in real time. It provides great convenience for spectrum acquisition in micro-cavity research and can greatly broaden the potential applications of optical micro-cavity devices.

Key words integrated optics; optical micro-cavity; spectrum acquisition; micro-cavity sensing; quality factor