

光纤腔衰荡谱系统设计与流体传感研究

张伟刚

(南开大学现代光学研究所光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要 主要对光纤腔衰荡谱(CRDS)系统设计与流体传感问题展开研究。介绍光纤腔衰荡谱技术的基本原理; 给出典型光纤衰荡腔的结构分类; 提出光纤腔衰荡谱系统的设计方法, 并简要介绍我们应用光纤衰荡谱技术进行流体传感研究的最新进展; 最后, 展望光纤腔衰荡谱技术的发展并提出研究新思路和建议。

关键词 光纤衰荡腔; 光纤腔衰荡谱; 系统设计; 流体传感

中图分类号 TN247;TN253 OCIS 060.2310 230.0250 文献标识码 A

Design on Fiber Cavity Ring-Down Spectroscopy System and Investigation on Liquid Sensing

Zhang Weigang

(Key Laboratory of Opto-Electronic Information and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract The system design in fiber cavity ring-down spectroscopy (CRDS) and liquid sensing are studied in general. Firstly, the technique principle of CRDS is introduced. Secondly, the typical fiber ring-down cavity structures are classified. Thirdly, the design methods of CRDS system are proposed and our recent progress of the liquid sensing study in application of CRDS technique is briefly introduced. Finally, the development of the CRDS technique is presented, and study idea and project suggestion are proposed.

Key words fiber ring-down cavity; fiber cavity ring-down spectroscopy; system design; liquid sensing

1 引言

吸收光谱作为一种重要的分析检测方法, 已被广泛应用于科学实验以及生产中的物质分析和微量成分检测。这种检测方法具有样品检测吸收光程长的特点, 但微弱吸收易被强背景光信号淹没, 而且光源不稳定性对检测信号会产生较大影响。腔衰荡谱(CRDS)方法及检测技术的出现, 及时弥补了吸收光谱的缺陷, 迅速成为一种新型、高精度微量检测技术^[1]。

CRDS 技术起源于 20 世纪 80 年代。1984 年, D. Z. Anderson 等^[2]首次利用 CRDS 技术成功测量了低损耗高反射膜的反射率。1988 年, A. O'Keefe 等^[3]用脉冲激光首次将 CRDS 技术应用于极弱吸收体系光谱研究。此后, CRDS 技术又应用于原子、分子体系的探测^[4], 压力、温度传感及损耗测量^[5], 实时化学反应动力学过程监测^[6], 大气环境测评^[7]、有害元素分析^[8]以及医学探测诊断^[9]等。

CRDS 技术作为一种新型的吸收探测技术, 具有如下优点:

收稿日期: 2009-07-06; 收到修改稿日期: 2009-09-18

基金项目: 国家自然科学基金(10674075, 10974100, 60577018)、天津市应用基础与前沿技术研究计划重点项目和光电信息技术科学教育部重点实验室开放课题(2005-06)资助课题。

作者简介: 张伟刚(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光子技术与现代光传感、新型光电子器件设计及应用技术等方面的研究。E-mail: zhangwg@nankai.edu.cn

- 1) 因系统本身对光源输出光强度的波动不敏感, 故对光源输出脉冲的稳定程度要求很低;
- 2) 稳定的光吸收腔可增大有效光程, 提高系统的灵敏度, 因此所需测量样品很小;
- 3) 系统可以应用脉冲、连续光作为光源, 这较其他直接吸收检测技术具有更高的灵敏度;
- 4) 与基于调制机制的技术相比, CRDS 技术具有绝对测量值的优点, 无需定标。

此外, 由于 CRDS 系统结构设计相对简单, 且实验装置测量易于实现, 因此 CRDS 技术吸引了研究人员的广泛关注, 并得到了迅速发展。传统 CRDS 系统中的衰荡腔一般由尺寸较大的光学体器件构成, 故其光学腔存在着天然的缺陷。具体表现在以下三个方面:

- 1) 光学腔为体器件, 对其尺寸、精度等制作要求非常苛刻, 实现很困难;
- 2) 光学腔两端镜与光纤之间需特殊透镜耦合, 易受外界干扰;
- 3) 光学腔两个端镜准直程度要求很高, 难以满足灵活多变的调节需要。

于是, 对 CRDS 系统的改进及技术创新就成为其应用之必然。由于高反射镜构成的衰荡腔对高反射率涂覆和腔镜对准要求很高, 因此采用传统的光源与腔镜之间耦合方式, 其效率不高也不便利, 应用时还会增加系统的复杂性。近年来, 利用光纤及光纤光栅改进 CRDS 系统的结构和性能, 已经取得了相当的成功, 这主要得益于光纤 CRDS 系统具有易于同光纤器件耦合、结构简便、传输损耗低、实用性强等诸多优势, 因此很受研究者的青睐。

2001 年, G. Steward 等^[10]首次提出光纤环衰荡腔系统, 并用于吸收测量研究。2002 年, R. S. Brown 等^[11]提出了一种基于法布里-珀罗(Fabry-Perot)谐振腔结构的无源光纤环衰荡腔系统, 对有机染料进行了液体吸收光谱的检测。2003 年, Z. Tong 等^[12]在光纤环中插入微流器件, 对微流量液体进行了测量。2004 年, Peter B. Tarsa 等^[13]在光纤环中引入双锥型光纤, 通过检泄漏倏逝场吸收来感测辛酸溶液的浓度。2006 年, Hans-Peter Loock^[14]将毛细十字管、光纤透镜等引入衰荡腔, 进行了液体吸收测量。2007 年, H. Sun 等^[15]应用飞秒激光加工技术在光波导上刻制微流腔, 对微流量液体感测; 同年, Liu Bo 等^[16]利用光纤布拉格光栅(FBG)作为腔镜, 利用光纤 CRDS 技术进行信号解调, 实现了解调 FBG 之间弱调制长周期光纤(LPG)光栅感测的外界信号。2008 年, 张绮等^[17]利用飞秒激光蚀刻光纤微腔, 实现了对微量流体的感测。

这些研究工作表明, 利用光纤技术对传统的 CRDS 系统进行改造, 在设计、制作及使用上都具有很大的优势。将腔衰荡谱技术与光纤传感技术相结合是一项具有里程碑意义的创新之举, 它极大地促进了 CRDS 技术的发展, 并逐渐成为国际上新型光纤检测技术研究的热点。

2 CRDS 技术原理

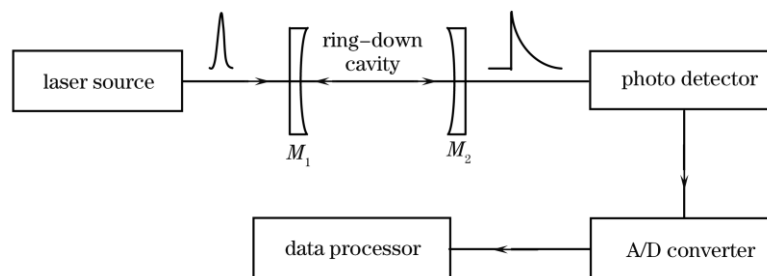


图1 典型 CRDS 系统结构示意图

Fig.1 Structure of typical CRDS system

典型的 CRDS 系统结构如图 1 所示, 主要由光源、衰荡腔、探测器、模/数(A/D)转换器及数据处理器构成。其技术原理是: 激光源发出的脉冲光被耦合进由两个高反射腔镜 M_1 和 M_2 组成的非共焦光学谐振腔, 光脉冲在两腔镜之间往复振荡。由于腔镜的高反射率特性, 因此只有一小部分光被耦合进光腔。光脉冲每

经过腔镜反射后,就会有少部分从腔内泄漏出去,导致腔内光脉冲会随时间而衰落。研究表明,空腔内的衰荡呈现出时间单 e 指数函数(即 CRDS)变化,并与腔镜的透射程度、腔内介质的吸收情况相关。于是,通过测量光脉冲的 CRDS,可获得衰荡腔内光强随时间的变化关系。

设光脉冲入射光强为 I_0 , 中心波长为 λ , 衰荡时间为 $\tau(\lambda)$, 则 t 时刻衰荡腔透射光强为

$$I(t, \lambda) = I_0 \exp[-t / \tau(\lambda)]. \quad (1)$$

定义衰荡时间 τ 为透射光强衰减到初始光强的 $1/e$ 所需时间,

$$\tau(\lambda) = \frac{nL}{cA}. \quad (2)$$

式中 n 为腔内介质折射率, L 为衰荡腔的腔长, c 为真空中光速, A 为腔内总的传输损耗(包括腔内吸收损耗、腔镜不完全损耗衍射损耗)。 τ 代表光强的衰减速率,并且只与衰荡腔自身物理参数 n , L , c 和 A 有关,而与 I_0 无关。腔衰荡谱(峰值曲线)如图 2 所示。

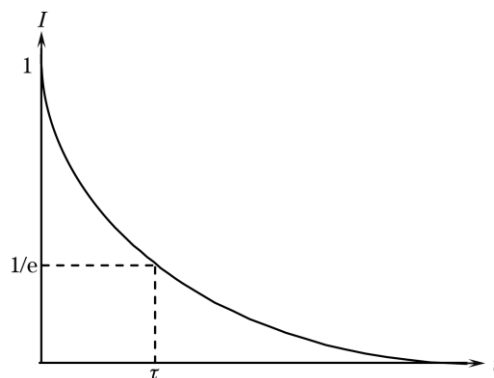


图 2 腔衰荡谱(峰值曲线)示意图
Fig.2 Cavity ring-down spectroscopy (peak value curve)

当腔内引入吸收体或弯曲等外加损耗时,腔内的光强衰荡时间变小。于是,通过测量引入外加损耗前后的衰荡时间,能够精确测量光脉冲在腔内的损耗,从而获得引起损耗的相关信息,实现相关参量的高灵敏度检测。若已知样本吸收截面、吸收谱线,可计算样本的浓度。 τ 的倒数为衰减率 $R(\lambda) = 1 / \tau(\lambda)$, 由分析可知 $R(\lambda)$ 测量技术只与腔本身的物理参数 n , L , A 及腔镜反射率有关,而与入射光强无关(只要保证满足接收端信噪比即可)。

CRDS 测量精度涉及到不同被测物质的吸收系数。对于不同的物质,在不同波段其吸收系数不同。因此,应用窄带宽谱光源,一般可达到较高的光谱分辨率(最低损耗为 10^{-5} dB 量级)。衰荡时间 τ 的测量一般采用光电探测器进行检测,根据其衰荡谱由(1), (2)式及图 2 拟合出衰荡时间。探测器有普通探测器和倍增管。将传统的体器件衰荡腔替换为光纤衰荡腔,只是结构上的改变(集成度、便携性增强),其技术原理是一致的,故可按照上述方法进行相应的分析。

3 典型光纤 CRDS 系统

在构成光纤 CRDS 系统的部件中,最重要的当属衰荡腔部分。从衰荡腔的结构考虑,目前典型的光纤 CRDS 可归纳为三类:基于光纤环 CRDS 系统、基于纤端镀膜 CRDS 系统和基于光纤光栅 CRDS 系统。

3.1 光纤环 CRDS 系统

该系统结构如图 3 所示,其中衰荡腔可利用单模光纤(如 SMF-28, Corning, Inc.)以及两个 2×1 高分光比(如 1:99)光纤耦合器(如 Lightcomm Technology Co., Ltd)进行设计和研制。光纤环 CRDS 系统最初由 G. Steward 等^[10]提出,并在光纤环内引入气体吸收池对示踪气体进行检测,获得的衰荡时间 τ 达微秒量级。

这种系统的优势在于构成衰荡腔材料是光纤，由于光纤价格低廉、传输损耗低且易于与标准光学器件连接，因此光纤环衰荡腔比传统衰荡腔更易于构建和应用。

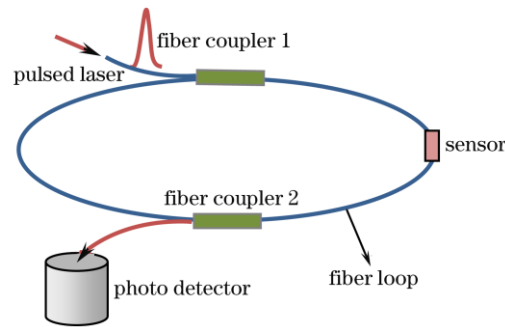


图3 基于光纤环 CRDS 系统结构图
Fig.3 Structure of CRDS system based on fiber-loop

3.2 纤端涂覆 CRDS 系统

该系统结构如图4(a)所示，其中的衰荡腔可利用一段光纤的两端面涂覆高反射率薄膜进行设计和研制，该腔类似于 Fabry-Perot 谐振腔结构。纤端涂覆 CRDS 系统最初由 T. von Lerber 等^[18]提出，并用于检测腔内光纤的弯曲、倏逝场吸收引起的损耗。这种系统的优点是结构简单、使用便捷，但缺点是高反射镀膜涂覆工艺要求高，应用受到一定限制。

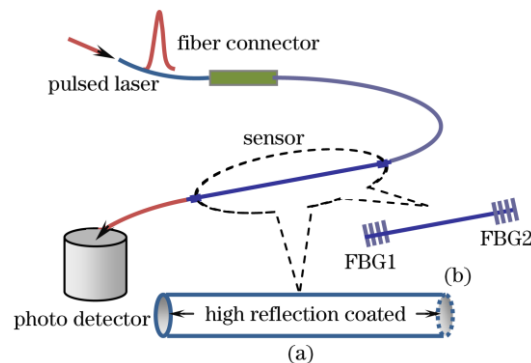


图4 典型光纤 CRDS 系统结构图。(a)纤端涂覆传感头；(b)光纤光栅对传感头
Fig.4 Structure of typical fiber CRDS system. (a) sensor for fiber cross section is coated; (b) sensor for FBG is twain

3.3 光纤光栅 CRDS 系统

将图4(a)中的纤端涂覆传感头用光纤光栅(如 FBG)替代，则成为光纤光栅 CRDS 系统，如图4(b)所示。其中的衰荡腔可在一段光敏光纤(如铈-硼共掺光纤)或载氢光纤上，通过写制高反射率(>99.9%)光纤光栅滋生对(即两个匹配的光纤光栅)进行设计和研制。光纤光栅 CRDS 系统最初由 M. Gupta 等^[19]采用，衰荡腔用两个反射谱基本重合的光纤布拉格光栅(反射率大于 99%)组成，通过将腔内一段光纤剥去包层以泄露倏逝波，实现了甘油与水混合液的折射率传感。光纤 CRDS 系统具有 4 个突出优点：

1) 衰荡腔可由普通光纤或特种光纤构成。通信光纤具有传输损耗低、易同其他光学器件耦合等优点；而特种光纤具有结构丰富、设计灵活等优势。基于光纤设计、研制的衰荡腔，与现有的光纤技术具有天然的兼容性，能够很方便地利用现有的光纤通信与传感系统。

2) 光纤衰荡腔长度可根据实际感测需要灵活设计。考虑到脉冲宽度需小于光在腔内的往返时间及光接受仪器的速度性能，可采用较长的光纤衰荡腔。这种长光纤腔很适于远场实时传感监测^[20, 21]。

3) 光纤 CRDS 具有测量精度高、系统体积小、集成性好等特点，在化学流体分离在线监测等方面具有很大潜力。若与微流体芯片集成，则有望应用于医学中血糖浓度、血清蛋白等的检测。

4) 光纤 CRDS 系统性价比高, 稳定性好, 易操作。与传统衰荡腔相比, 在调控准直、降低损耗、快速检测等方面具有很强优势, 有望用于高辐射、高腐蚀、强电磁场、微重力等特殊环境的监测。

4 光纤 CRDS 系统设计

CRDS 系统的设计主要涉及光源、衰荡腔、探测器、A/D 转换以及数据处理方式等方面。本文仅就前三个方面加以分析和研究, 同时根据作者的研究经验给出一些具体设计方法。

4.1 选择不同类光源

光纤 CRDS 系统中的光源既可选择脉冲激光器, 亦可使用连续激光器。其中, 连续光经过光强调制或斩波后可产生脉冲输出。因此, 根据光源性质的不同, 可将光纤 CRDS 系统分为脉冲型光纤 CRDS 系统和连续型光纤 CRDS 系统两大类。

1) 脉冲型光纤 CRDS 系统: 脉冲型光纤 CRDS 传感实验系统如图 3 所示, 该系统采用脉冲激光源, 直接用产生的脉冲光激发衰荡腔以实现衰荡信号输出。这种系统最突出的优点是结构简单, 容易实现。

2) 连续型光纤 CRDS 系统: 图 5 为作者设计并研制的一种连续型光纤 CRDS 系统。该系统主要包括 1530~1610 nm 连续可调谐激光器(Santec 2100)、脉冲发生器(SRS DG535)、声光调制器(AOM)、掺铒光纤放大器(EDFA)、光纤衰荡腔(光纤环或光纤光栅)、流体室(Sensor)、光电探测器(InGaAs, Thorlabs, Model PD 400)、A/D 转换器、高速示波器、电子控制电路以及信号处理输出等。该系统通过信号发生器与光强调制器联合将光源发出的连续光(CW laser)调制成一定频率和宽度的脉冲光, 用以激发光纤环或光纤光栅对形成的衰荡腔, 经过模式匹配后激发谐振腔来实现可调谐的光纤腔衰荡谱检测。在调制过程中, 需借助触发电路将探测器与调制器相关联, 其余信号接收途径与前者相同。

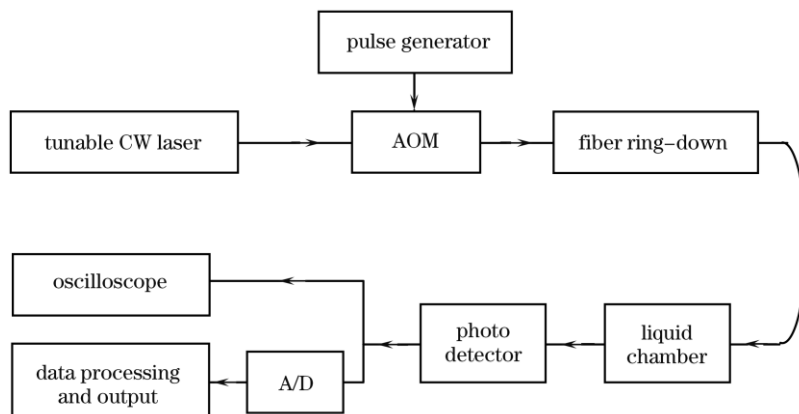


图 5 连续型光纤 CRDS 系统结构图

Fig.5 Structure of fiber CRDS system based on continuous wave laser

由于连续光源具有很窄的线宽(<50 MHz), 可在很小的光谱范围内(<50 MHz)进行调谐, 因此可实现很高的光谱分辨率和出色的波长再现性。此外, 由于线宽很窄, 光能够更有效地与高精度的衰荡腔耦合, 从而提高了衰荡信号的信噪比。通过对连续光源进行外部调制, 可实现比脉冲腔衰荡谱技术更高的衰荡重复率, 从而普遍性地提高检测灵敏度。

4.2 改变衰荡腔结构

在光纤 CRDS 系统设计中, 改变衰荡腔结构是一种最灵活、最便捷的设计方法。具体方法如下:

1) 改变腔镜构件: 即以新型、便捷的材料(如光纤环、纤端镀膜等)替代传统的腔镜。光纤环衰荡腔结构如图 6 所示。

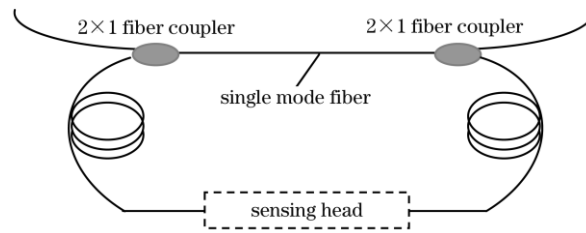


图6 光纤环衰荡腔示意图

Fig.6 Structure diagram of fiber-loop ring-down cavity

2) 改变传感结构: 即以抛磨、电熔、刻制、腐蚀等方式对光纤表面或内部加工, 形成新型传感结构。图7为两种典型的光纤衰荡腔传感结构(表面凹陷光纤^[22]、特种胶成腔^[12]等)设计与研制, 图8为对光纤端面进行特殊加工形成的平面或凸面^[23]微腔结构。

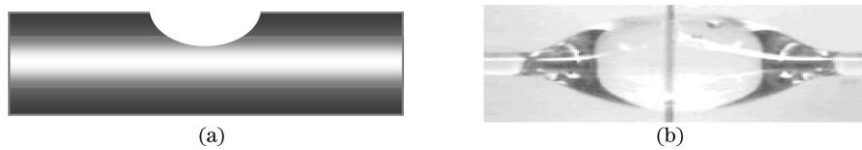


图7 两种典型光纤衰荡腔传感结构。(a)腐蚀后光纤; (b)特种胶成腔

Fig.7 Sensing structures of two typical fiber ring-down cavities. (a) fiber after etching; (b) cavity based on special polymer

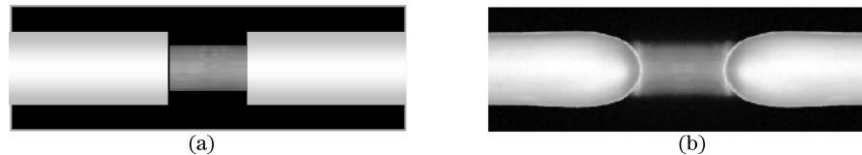


图8 具有不同光纤端面结构的衰荡腔。(a)纤端为平面; (b)纤端为凸面

Fig.8 Fiber ring-down cavities with different cross sections. (a) with a plane cross section; (b) with a convexity cross section

3) 引入新式结构: 即在衰荡腔中引入微腔或周期性结构(如光栅等), 改变衰荡腔对外界环境的敏感程度。图9为光纤内微腔^[24]与外微腔结构示意图。

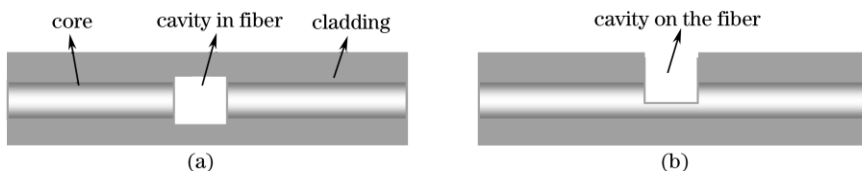


图9 光纤微腔结构示意图。(a)光纤内微腔; (b)光纤外微腔

Fig.9 Structure of fiber micro-cavity. (a) micro-cavity in fiber; (b) micro-cavity on the fiber surface

作者在载氢光纤或光敏光纤(如铯-硼共掺光纤)上写制高反射率(>99.9%)的FBG孪生对, 设计并研制的传感用光纤光栅衰荡腔如图10所示。需要指出的是: 若将光纤光栅作为光纤CRDS系统传感头的设计结构, 如长周期光纤光栅, 则选择光源发出的脉冲光要避开LPG损耗较大的波段, 以保证衰荡谱的有效测量。

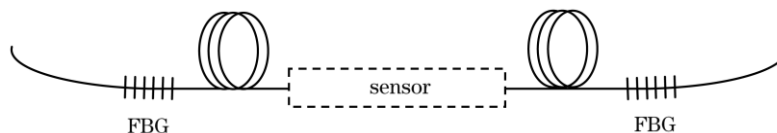


图10 光纤光栅衰荡腔示意图

Fig.10 Schematic diagram of fiber grating ring-down cavity

4.3 增益补偿腔损耗

光脉冲在光纤衰荡腔中往复振荡时, 其能量将不断衰减。为了补偿光损耗以保证衰荡谱测量, 需要对衰荡腔中的光信号进行增益补偿。根据是否需要衰荡腔进行增益补偿, 可进行无源与有源光纤CRDS系统设计和研制。

1) 无源光纤CRDS系统: 图11为一种无源型光纤CRDS系统^[11]。该系统采用一段多模光纤弯曲成环

形以光纤连接器连接, 用 Nd:YAG 脉冲激光对光纤弯曲处($r=3\text{ cm}$)进行照射, 将光脉冲耦合进光纤环并在另一弯曲处透射被光电倍增管(PMT)接收, 从而获得双指数衰荡信号。实验测得两个衰荡时间为 235 和 900 ns, 分别对应于耦合进光纤环的光信号在光纤包层与纤芯中的衰减速率。

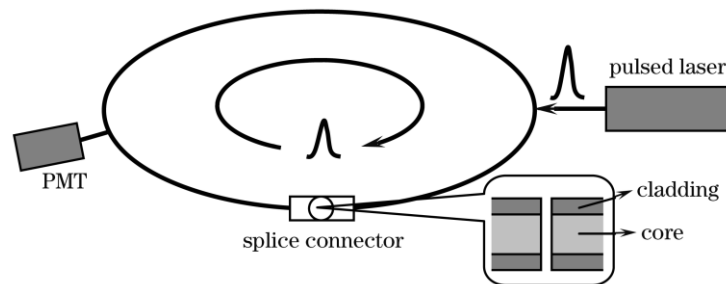


图 11 光纤无源 CRDS 系统结构图
Fig.11 System structure of passive fiber CRDS

2) 有源光纤 CRDS 系统: 图 12 为一种有源增益补偿型光纤 CRDS 系统^[25], 该系统用 30~60 m 单模光纤构成光纤环, 用 980 nm 光源抽运获得 1550 nm 波段的激光, 而 5~10 m 掺铒光纤则为腔内光脉冲信号提供增益。另外, 在环内接入了可调节衰减器以及可调带通滤波器, 通过测量确保掺铒光纤的增益能够补偿系统的插入损耗。系统中的两个光纤环均通过耦合器并经光纤放大, 其中一个光纤环用于 CRDS 系统传感, 另一个光纤环的作用是将增益稳定在阈值附近。这种结构的优点是在保证极低腔内损耗、足够长衰荡时间的同时, 提高光源的利用率, 增强系统的可操作性。其缺陷是很难实现稳定的增益^[26], 同时也增加了系统的复杂性。

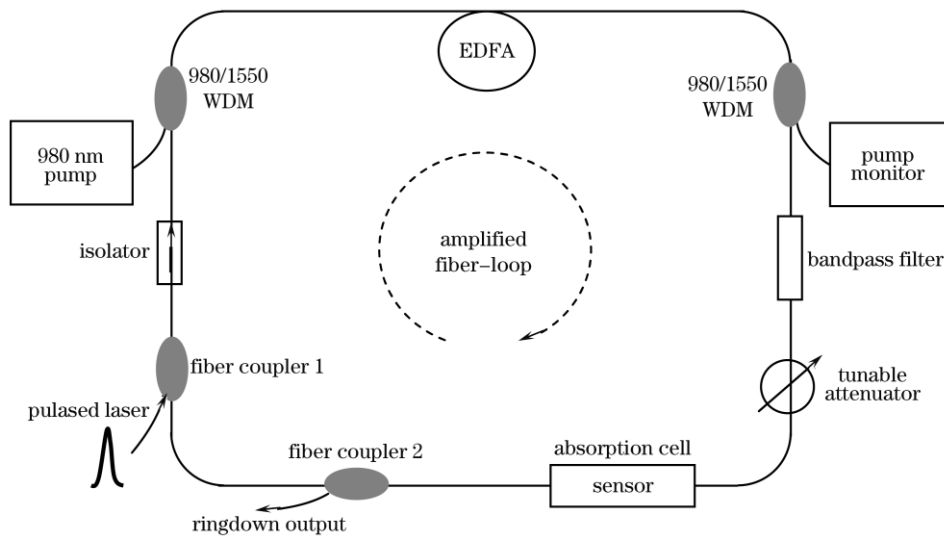


图 12 基于 EDFA 的有源光纤 CRDS 系统结构图
Fig.12 System structure of active fiber CRDS based on EDFA

4.4 特种光纤衰荡腔

常规光纤衰荡腔一般以单模光纤构成。从设计的角度考虑, 可以引入损耗较低、信号传输稳定的特种光纤对传感头进行改造, 以提高其感测灵敏度。可供选择的特种光纤有微结构光纤(MOF)、偏振光纤(PMF)、双层包层光纤(DCF)、空芯光纤(HCF)、塑料光纤(POF)等。以 MOF 为例加以说明。

MOF 亦称多孔光纤, 是近年来兴起的一种新型波导, 沿轴向延伸排列着微孔, 端面为周期性二维结构。与常规光纤相比, 由于引进了微结构, MOF 具有独特的光学特性, 如极宽单模传输、高非线性、大模场面积、可控色散等。改变微结构光纤中的微孔排列、大小以及占空比, 双芯或多芯设计, 或者将特殊介质载

入微孔, 均可改变其光学性质, 获得优于常规光纤的光学特性(如高双折射、强非线性等)。因此, 微结构光纤的出现, 为新型光纤光子器件的研制及应用提供了广阔的空间^[22]。

通过特殊的几何结构设计, MOF 可以形成光子禁带^[27]。改变微孔阵列排布、填充介质或注入特种流体, 可以极大地改变 MOF 的传输性质。MOF 既可用于新型传感器件(如气体、液体传感和多维参数感测等)的设计, 也可用于新型通信器件(如耦合器、滤波器、激光器、放大器等)的研制, 是一种很有前途的特种光纤。图 13 是几种典型的微结构光纤扫描电子显微镜(SEM)图^[28]。其中, 图 13(a)~(d)为不同空气孔填充率及排列分布的空气硅包层 MOF; 图 13 (e)为禁带型 MOF。值得一提的是, 作者将图 3 中的传感头以图 13 中的 MOF 代替, 设计出基于 MOF 传感机构的光纤 CRDS 系统。其中, MOF 可以是全内反型 MOF 或者光子带隙型 MOF。

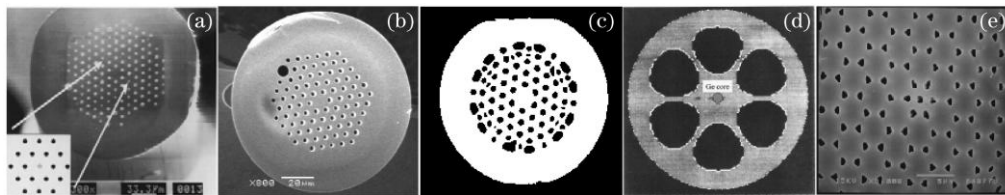


图 13 几种典型的微结构光纤端面电子扫描显微镜图

Fig.13 EMS image of some typical types of microstructured fiber cross section

4.5 参数型光纤衰荡腔

作者根据检测参数的性质, 提出 6 种光纤 CRDS 系统设计方法。这些方法可用于不同类型及应用方面的设计与研制。

1) 力学量感测: 针对应变、应力、压强、位移、曲率、扭矩、流量等力学量检测, 通过对 MOF(或其他特种光纤)进行抛磨、刻制、腐蚀等加工形成敏感结构, 可设计用于力学量感测的光纤 CRDS 系统;

2) 热学量感测: 针对温度、热容量等热学量检测, 通过在 MOF(或其他特种光纤)表面粘贴或者嵌入热敏介质等方式, 可设计用于热学量感测的光纤 CRDS 系统;

3) 电磁量感测: 针对电压、电流、磁场、电感、电容等电磁量检测, 通过在 MOF 表面镀金属膜或者使用磁敏光纤等方式, 可设计用于电磁量感测的光纤 CRDS 系统;

4) 生化量感测: 针对浓度、反应热、pH 值、酶活性等化学量和生物量的检测, 通过在 MOF 表面贴敷或者内容植入对某种化学或生物敏感的薄膜或芯片, 可设计用于化学量、生物量感测的光纤 CRDS 系统;

5) 特殊环境感测: 针对诸如高温、高压、强辐射、腐蚀、强电磁场以及危险场合等特殊环境下的光纤传感及预警, 通过对 MOF 进行特殊敏化处理研制的敏化 MOF, 可设计用于特殊场合监测的光纤 CRDS 系统。

6) 动态量感测: 针对速度、流速、角速度、加速度等参量的检测, 通过设计对动态量敏感的 MOF 传感机构, 亦可设计用于动态量感测的光纤 CRDS 系统。

此外, 针对检测的参数多少, 又可设计出单参数或多参数光纤 CRDS 系统。单参数光纤 CRDS 系统如上述所示, 多参数光纤 CRDS 系统又可细分为双参数(如应变与温度、压强与位移、浓度与成分等)及三参数(如应变、位移与振动等)光纤 CRDS 系统等。

5 我们的研究及进展

本课题组在光纤衰荡腔的理论研究、传感结构设计、系统研制与应用等方面开展了一系列的研究工作, 已取得了一些创新性的研究成果。本文主要从新型光纤衰荡腔设计和新型光纤 CRDS 系统设计两个方面加以阐述。

5.1 新型光纤衰荡腔设计及衰荡谱测量

通过对光纤表面涂敷或腐蚀、端面放电、刻制微腔以及引入特殊结构等方式, 设计并研制了新型光纤

衰荡腔，并应用于流体传感与检测。

5.1.1 光纤表面处理

对普通光纤的表面进行涂敷或腐蚀，可以设计并研制增敏光纤或锥形光纤，用于液体或气体浓度、湿度及成分感测。图14给出了两种典型的光纤表面处理SEM图片。其中，图14(a)是将聚乙烯醇(PVA)均匀涂敷在部分光纤表面的图片^[29]，图14(b)是将光纤衰荡腔内一段单模光纤用氢氟酸腐蚀掉一部分包层后的图片^[30]。把这种涂敷光纤与锥状光纤引入光纤CRDS系统，将其置于不同浓度的待测流体(液体或气体)中，实现了对浓度及折射率的传感实验。

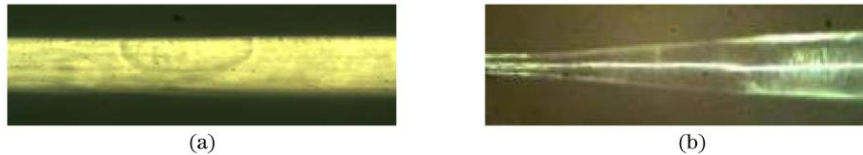


图 14 光纤表面处理图片。(a)表面涂敷光纤；(b)腐蚀后锥状光纤

Fig.14 Microgram of fiber surface processing. (a) fiber surface coating; (b) fiber tapering after etching

衰荡谱检测实验选用的待测液体为二甲基亚砷(DMSO, 折射率匹配液)。根据倏逝场吸收原理,当外界溶液的折射率接近包层折射率时,锥状光纤中传输的模式泄露引起衰荡腔内损耗增加,导致衰荡时间减小。通过对衰荡谱峰值进行指数函数拟合,得到每一时刻与DMSO浓度对应的衰荡时间,经分析计算即可得到光纤CRDS衰荡时间与DMSO浓度的对应关系。

图15给出了采用980 nm脉冲激光器作为光源在光纤腐蚀前后的衰荡谱。图16为腐蚀光纤置于DMSO中的衰荡谱和指数拟合曲线^[30]。

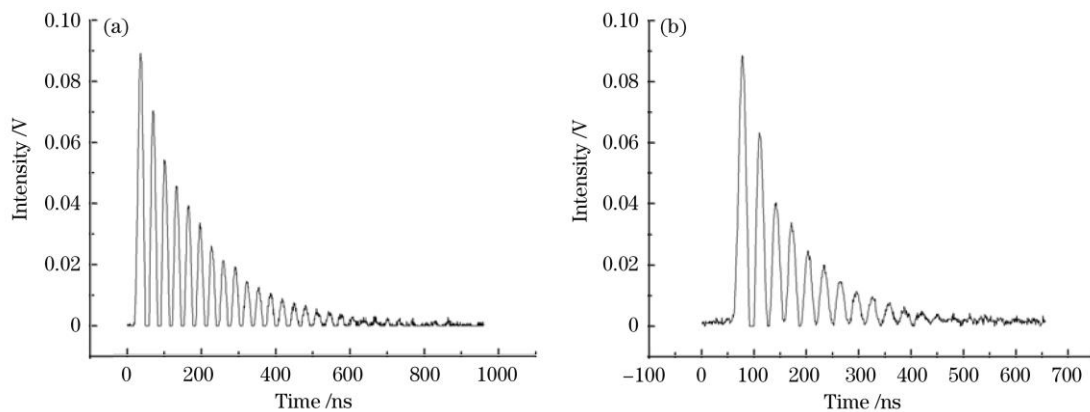


图 15 光纤 CRDS 衰荡谱。(a)光纤腐蚀前；(b)光纤腐蚀后

Fig.15 Fiber cavity ring-down spectroscopy. (a) before fiber is etched; (b) after fiber is etched

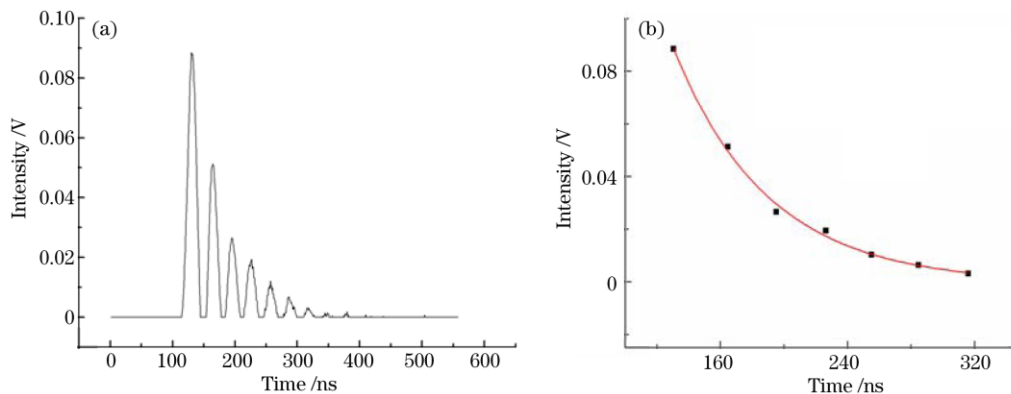


图 16 光纤表面处理图片。(a)表面涂敷光纤；(b)腐蚀后锥状光纤

Fig.16 Experimental results of the etched fiber in DMSO. (a) fiber cavity ring-down spectroscopy; (b) exponential decay curve fitting by the data

5.1.2 光纤端面处理

可以分别对 MOF 等特种光纤表面或者端面用放电或腐蚀等方式进行加工处理, 从而设计并研制表面凹陷或端面空孔放大的传感结构。研究表明: MOF 纤芯基模的有效折射率和包层的等效折射率不仅与波长有关, 还与包层空气孔结构有关。图 17 给出了当波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时, 空芯 MOF 相关参数变化关系曲线^[31]。由图可见, 空芯 MOF 泄露损耗随其半径增大而减小, 在 $4.0 \mu\text{m}$ 开始趋于稳定; 基模有效折射率随空气孔增大呈递减变化。同时, 包层的等效折射率亦随空气孔直径增大而减小, 但其非线性系数则增大。这是因为大空气孔直径导致更大空气填充率, 从而减小了包层等效折射率。

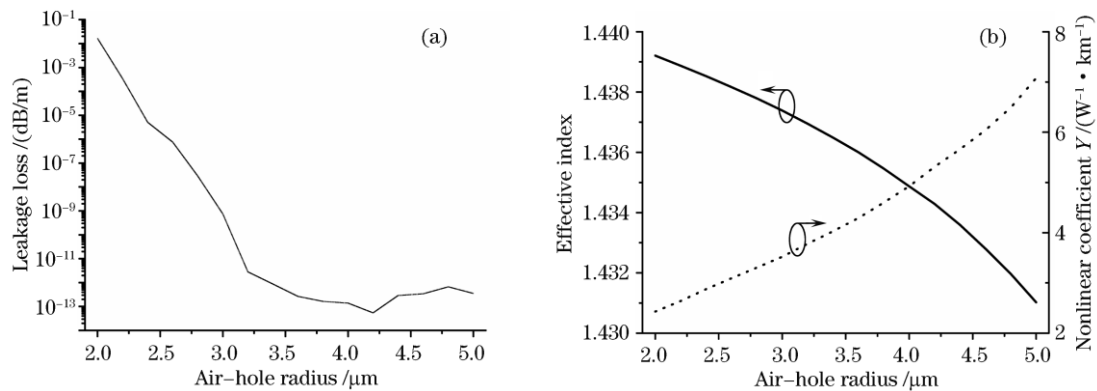


图 17 空芯 MOF 相关参数变化关系曲线。(a)泄露损耗与空气孔直径的变化关系曲线; (b)非线性系数和基模有效折射率与空气孔直径的变化关系曲线($\lambda=1.55 \mu\text{m}$)

Fig.17 Relationship of correlative parameters with air-hole MOF. (a) leakage loss variation curve when the air-holes' diameter changes; (b) variation curve of nonlinear coefficient and fundamental mode's effective refractive index when the air-holes' diameter changes, at wavelength $\lambda=1.55 \mu\text{m}$

值得指出的是: 如果在这种 MOF 上写制微结构光纤光栅(MOFG), 其折射率变化将导致谐振波长漂移, 故可采用腐蚀、放电或者填充等方式改变 MOFG 谐振波长, 设计并研制传感用新型 MOFG 光纤衰荡腔。图 18 是本课题组将氢氟酸填充 MOF 两个大空气孔经不同腐蚀时间的横截面实验图^[31]。其中, 从图 18(a)~(d) 腐蚀时间逐渐增加, 其腐蚀程度也逐渐加大。采用这种方法, 可以根据检测需要进行空孔腐蚀, 亦可研制更高双折射的 MOF。

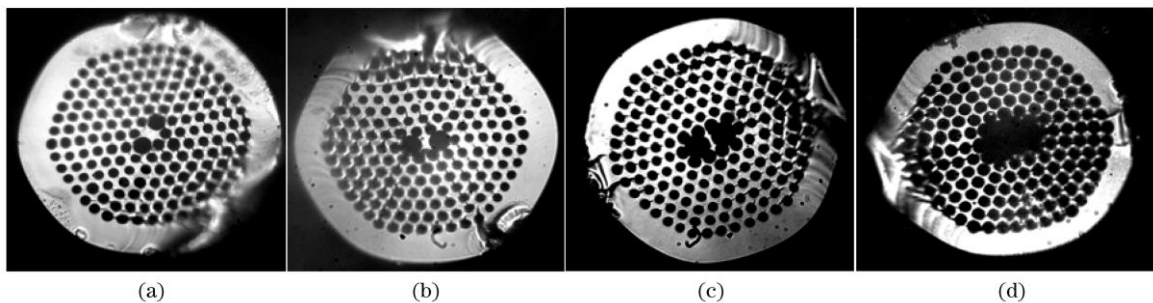


图 18 氢氟酸填充到 MOF 两个大空气孔经不同腐蚀时间的横截面实验图, 从(a~d)的腐蚀时间逐渐增加
Fig.18 Microgram of MOF cross section after filling the two big holes with hydrofluoric acid. Form (a~d) the corrosion time increases in turn

进一步研究表明, 通过对已拉制的 MOF 进行氢氟酸填充腐蚀, 不仅可以研制具有特定结构(采用传统方法不能实现)的 MOF, 而且还可以较精确地控制 MOF 的导光性能。与传统光纤拉制方法相比, 采用这种新方法可以研制更低损耗、更大非线性的 MOF。若对 MOF 及 MOFG 进行氢氟酸选择性填充腐蚀, 还可以改变其光谱谱形及谐振波长位置, 这将为新型光纤衰荡腔设计开辟更加广阔的途径。

5.1.3 刻制光纤微腔

飞秒激光出现以来, 人们利用其脉冲时间短, 功率密度高以及可实现冷加工等特点, 进行了飞秒激光

超微细加工的理论与技术研究, 实现了多种材料的亚微米级精度的精细加工和器件制备。应用飞秒激光加工技术在光波导上刻制微流体腔并进行微流体传感始于 2007 年^[15]。本课题组结合飞秒激光微加工技术, 提出在普通单模光纤上制作光纤微腔方法。该方法利用飞秒激光直写方法, 可制作腔长可控光纤微腔, 使用操作简便, 适于批量制作。飞秒激光加工光纤微腔装置结构如图 19 所示。

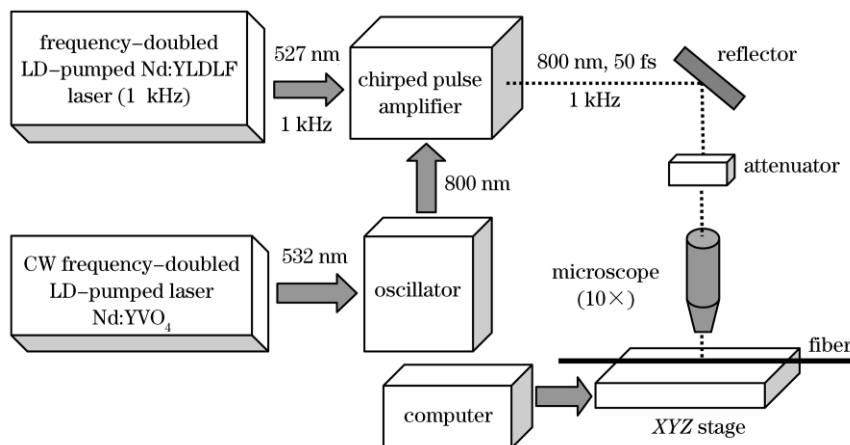


图 19 飞秒激光加工光纤微腔系统结构示意图

Fig.19 Schematic setup of the micro-cavity directly processed by femtosecond laser

图 20 为应用飞秒激光加工技术在 1550 nm 单模光纤上加工的微腔显微照片(显微镜下放大 100 倍)。图中黑色部分为光纤, 中间凹槽为刻蚀的微腔, 微腔烧蚀深度约 70 μm , 纤芯处宽度(腔长)约 3 μm 。我们对刻蚀的光纤微腔进行测量, 获得了类似的法布里-珀罗干涉谱, 但是这种干涉谱因其腔的非理想形变而现出新的性质。

利用上述制作的微腔, 我们进行了基于微腔的光纤 CRDS 感测 DMSO 实验, 其衰荡谱如图 21 所示^[32]。实验数据拟合分析表明: 微腔插入后的衰荡时间为 65.2 ns, 约为插入前衰荡时间的 45%。其原因在于: 微腔插入光纤 CRDS 系统中会增大衰荡腔内的损耗; 随着 DDCI(1, 1'-Diethyl-4, 4'-Dicarbocyanine Iodide) 浓度的增高, 腔内吸收损耗增大, 而相应的衰荡时间则变小。

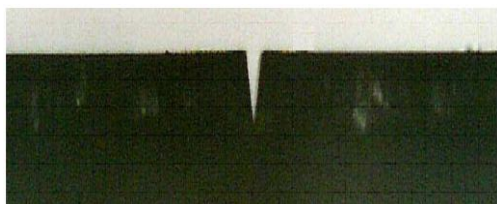


图 20 飞秒激光加工 1550 nm 单模光纤微腔显微照片
Fig.20 Microgram of micro-cavity written on 1550 nm Single mode fiber by femtosecond laser

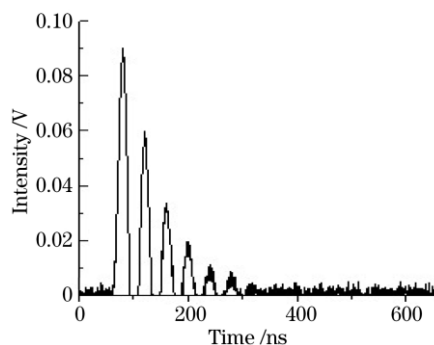


图 21 插入微腔后感测 DDCI 的光纤衰荡谱
Fig.21 Ring-down spectroscopy of the metrical DDCI after the micro-cavity inserted into the fiber loop of the CRDS system

5.1.4 引入特殊结构

在光纤 CRDS 系统设计中, 引入特殊结构也是一种有效的设计方式。图 22 为作者引入两种特殊结构设计的反射型光纤 CRDS 系统。其中, 单端反射头可由单端反射镜或自聚焦透镜替换。此外, 通过对光纤端面结构优化、刻制周期性结构、引入特殊的敏感结构等方式, 也可设计出其他类型的光纤 CRDS 系统。

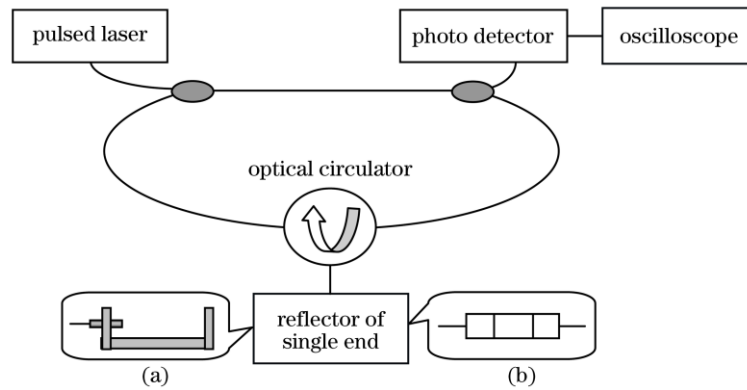


图 22 光纤无源 CRDS 系统结构图。(a) 单端反射镜；(b) 自聚焦透镜
Fig.22 Structure of passive fiber CRDS system. (a) single-ended reflector; (b) self-focusing lens

5.2 新型光纤 CRDS 系统设计及流体传感

通过选择不同波段光源、引入光纤微腔、改变传感器拓扑结构等方式，设计出可用于流体检测的新型光纤 CRDS 系统。

5.2.1 980 nm 脉冲光纤 CRDS 流体检测系统

与 1550 nm 波段光纤 CRDS 系统不同，我们设计并研制了一种适用于 980 nm 波段的脉冲光纤 CRDS 流体检测系统，其结构如图 23 所示。该系统包括一台脉冲宽度为 15 ns、重复频率为 0~50 kHz 的 980 nm 半导体脉冲激光器作为光源，2 个耦合比均为 1: 99 的 2×2 耦合器(插入损耗小于 0.1 dB)构成一个 980 nm 单模光纤环衰荡腔。激光脉冲从耦合器 1%端输入，两个耦合器 99%端和 100%端分别相连构成光纤环，环内激光脉冲经历腔内损耗后从 1%端输出，紧接其后的 InGaAs 光电探测器(Thorlabs FGA04, 波长范围 800~1800 nm, 最大响应频率 2 GHz)探测到一连串脉冲峰值光强呈指数形式衰减的信号。专门定做的放大电路用以放大探测器接收到的光信号，经光电转换后由数字示波器(YOKOGAWA DL9140, 5 Gs/s, 响应频率 1 GHz)显示。用指数函数对衰荡信号拟合得到衰荡时间，可获得衰荡腔的固有损耗、待测流体的浓度或折射率等信息。

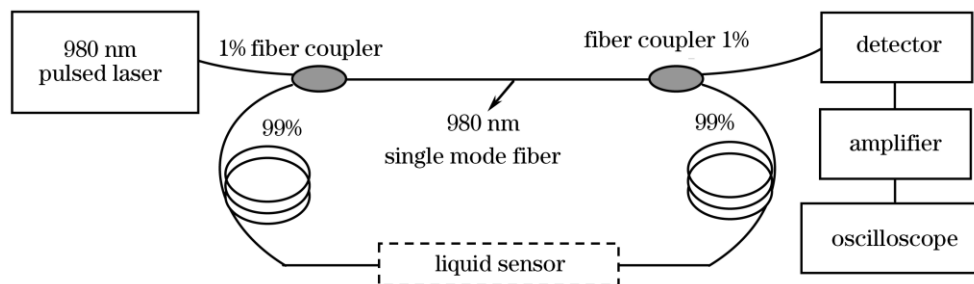


图 23 980 nm 脉冲光纤 CRDS 流体检测系统结构图
Fig.23 Structure of fiber CRDS liquid detecting system for 980 nm pulse

我们采用这套系统进行了腔损耗与 DMSO 浓度及折射率关系的实验测量。将光纤环内一段光纤用氢氟酸腐蚀掉一部分包层，置于不同浓度的 DMSO 中，利用倏逝场吸收的原理，当外界溶液的折射率接近包层折射率时，光纤中的模式泄露，引起衰荡腔内损耗增加衰荡时间减小，进而可以对溶液的浓度或折射率进行传感。经腐蚀后的光纤显微照片如图 14(b)所示。图 24 为 DMSO 溶液浓度与衰荡腔损耗的实验曲线，图 25 为传感光纤被腐蚀至不同直径时周围介质折射率与腔内损耗的关系。

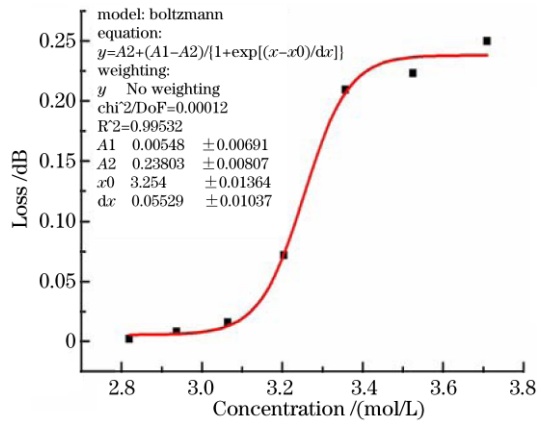


图 24 DMSO 溶液浓度与衰荡腔损耗的实验曲线
Fig.24 Experimental curve of the loss magnitude depending on the concentration of DMSO solvent

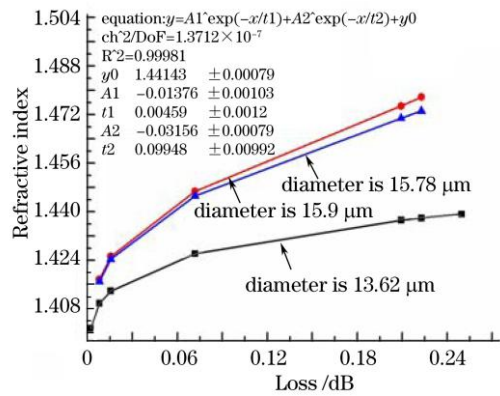


图 25 传感光纤被腐蚀至不同直径时周围介质折射率与腔内损耗的关系
Fig.25 Relation of the loss magnitude in cavity and refractive index of DMSO solvent when the tapered fiber sensing region is etched into different diameter

5.2.2 基于飞秒激光刻蚀的光纤 CRDS 传感系统

我们设计并研制了一种适用于 1550 nm 波段的光纤微腔 CRDS 流体传感系统，如图 26 所示。首先，用电光调制器(Mod22212)对可调谐激光器(Santec TSL-210)输出的连续光进行调制，使之输出脉冲宽度为 20 ns、重复频率约为 1 kHz 的脉冲序列。然后，脉冲序列经光纤耦合器 1 的 1% 输入端，输入由两个 1:99 耦合器(Lightcomm Technology)所构成的光纤环内；进而，光脉冲开始在光纤环内往复环绕，每绕一周即经过流体传感微腔一次，经光纤耦合器 2 的 1% 输出端有少部分光脉冲能量被环外的光电探测器(Thorlabs FAG4)以及电流放大器(Conquer Optical Technology)接收；最后，经光电转换后，通过示波器观察衰荡谱，从谱中可以获得关于光纤环内损耗，通过数据拟合获得传感微腔内所探测物质的浓度、折射率以及物质成分等细致信息。利用该系统探测的衰荡谱如图 21 所示。

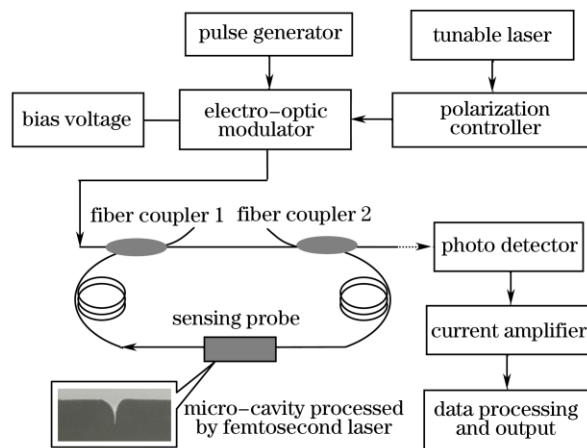


图 26 光纤微腔 CRDS 流体传感系统结构示意图
Fig.26 Structure of the liquid sensing system based on fiber micro-cavity

5.2.3 光纤 CRDS 微量流体多组分检测系统

考察光纤CRDS技术在流体检测中的应用现状，其基本方法和实现技术已日趋成熟，流体检测对象从液体到气体，解调方式从单一样品的吸收光谱、倏逝场吸收到光栅透射谱等均有涉猎。然而，这些研究与应用大多针对单一参量或者单一组分而言，光纤CRDS系统已实现的功能远未满足实际需求。因此，利用CRDS技术高精度检测流体多组分以及快速预警有害物质，是光纤CRDS系统设计追求的一个重要目标。光

纤CRDS微量流体多组分检测系统一般结构如图27所示。

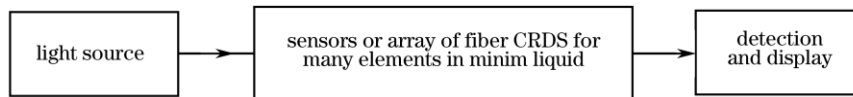


图 27 光纤 CRDS 微量流体多组分检测系统一般结构图
Fig.27 General structure of fiber CRDS detecting system of multi elements in minim liquid

鉴于光纤衰荡腔结构具有灵活的设计性及成熟的光纤复用技术，在提高系统利用率并增强其功能性的同时，作者提出光源复用、光路复用、传感器复用、探测器复用等复用技术，并对光纤CRDS微量流体多组分检测系统进行了方案设计及应用探索。

1) 光源复用

研究发现，光源复用一般可采取两种方案加以实现：

方案一：系统采用宽带光源，同时对不同波段的敏感元进行传感检测，这称之为光源同步复用。我们在实验中使用的宽带光源调谐范围不小于80 nm，可以采用多路光纤衰荡腔，使每一路衰荡腔工作在不同波长，通过调谐激光源的工作波长，分别实现各支路的传感检测任务。其中，光纤分路可通过光纤耦合器实现，而每一光纤支路的衰荡腔可根据实际需要选用光纤环衰荡腔、光纤光栅衰荡腔、纤端涂覆衰荡腔等。一般而言，采用光纤光栅衰荡腔是结构最简洁的一种，但前提是光纤光栅对与激光工作波长要相匹配。

方案二：系统采用窄线宽可调谐激光器，通过调谐光源的工作波长有效利用各波段扫描，这称之为非同步复用。对于非同步复用，采用1530~1610 nm的连续可调谐激光器(Santec 2100)作为光源，用信号发生器与光强调制器联合对连续光进行光强调制，用产生的光脉冲激发光纤环或光纤光栅对形成的衰荡腔，设计并实现可调谐光纤腔衰荡系统。

2) 光路复用

以下给出基于并联、混联两种设计方式的光路复用方案。

方案一：系统采用多传感器并联光路复用技术，图28为作者设计的光路并联复用光纤CRDS微量流体多组分检测系统。该系统光源采用1530~1610 nm连续可调谐激光器，用信号发生器和光强调制器联合对连续激光进行斩波，产生的光脉冲激发光纤环或光纤光栅对形成衰荡腔。通过调谐工作波长，使每一路衰荡腔工作在不同波长处，可以实现多路光纤衰荡腔检测。因此，不同波长处的衰荡信号所携带的待测流体信息可通过解调及数值拟合而获得。此方案实现关键在于：需写制相同共振波长的光纤布拉格光栅对；传感元件的设计与制作，如制作弱调制长周期光栅(具有比较宽的线性损耗可调谐范围)或探索设计其他类型光纤光栅或特殊结构的传感头。目前这些研制工作正在进行之中。李文超等^[33]提出过类似的系统结构，用于多组分气体浓度在线测量。

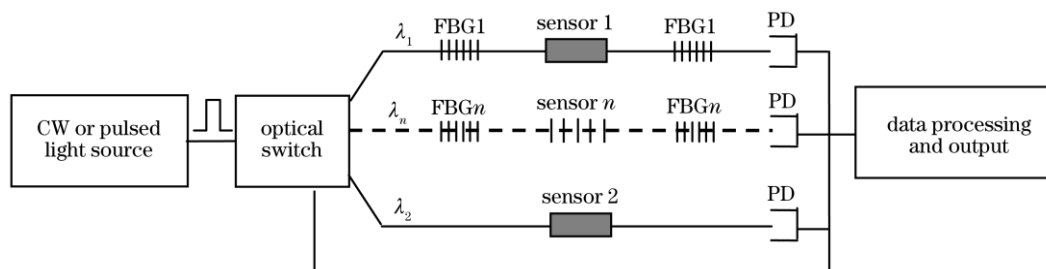


图 28 光路并联复用光纤 CRDS 微量流体多组分检测系统结构图
Fig.28 Structure of fiber CRDS detecting system for multi elements in minim liquid with the parallel multiplexing technology of optical circuitry

方案二：系统采用多传感器混联光路复用技术，图29为作者设计的光路混联复用光纤CRDS微量流体

多组分检测系统,这是一种新型的串并联光路复用技术。该系统综合了上述两种方案的优点,在此基础上进一步优化,适合多种光纤CRDS微量流体多组分检测系统的设计需要。该方案实现的关键器件是光开关,可选择不同的光路,实现接入1~ n 个不同传感器的光纤衰荡腔。通过探测不同数量传感器检测的衰荡谱,能够对微量流体进行多组分高精度检测。

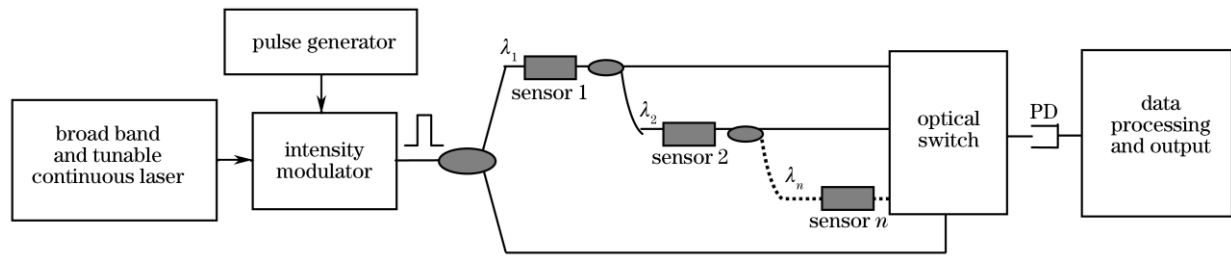


图 29 光路混联复用光纤 CRDS 微量流体多组分检测系统结构图

Fig.29 Structure of fiber CRDS detecting system for multi elements in minim liquid with the mixing multiplexing technology of optical circuitry

3) 传感器复用

在图 28 与 29 所示的系统中,每一衰荡环路均需接入一个传感器,系统中传感器较多,开销负担增大。若采用多个衰荡环路共用一个传感器的复用技术,则能够有效解决这一问题。图 30 为我们设计的一种单传感器复用光纤 CRDS 系统微量流体多组分检测系统。其中,原来的多传感器被单传感器(流体吸收池)所代替。该系统采用单传感器并联光路复用技术,将各路光纤衰荡腔传感单元置于同一种流体混合物(液体或气体)中;调谐激光器波长,在流体各组分特征吸收波长处即可获得各微量组分的细致信息。本方案能否实现的关键是损耗小、方便流量控制吸收腔的设计,这也是系统设计的难点之一。本文有关衰荡腔结构的设计方法可作为吸收池设计的参考。

4) 探测器复用

在图 28 与 30 所示的系统中,每一条光纤衰荡腔支路上均需设置一个光电探测器接收衰荡信号,如此系统代价及复杂性势必增加。采用探测器复用技术,即一个探测器接收和分辨所有支路的衰荡信号,能很好地解决这一问题。考虑到光纤布拉格光栅的解调技术中有一种是时延差解调方式,将该思路引入到此光纤衰荡腔系统设计中,我们设计了如图 31 所示的探测器复用结构。

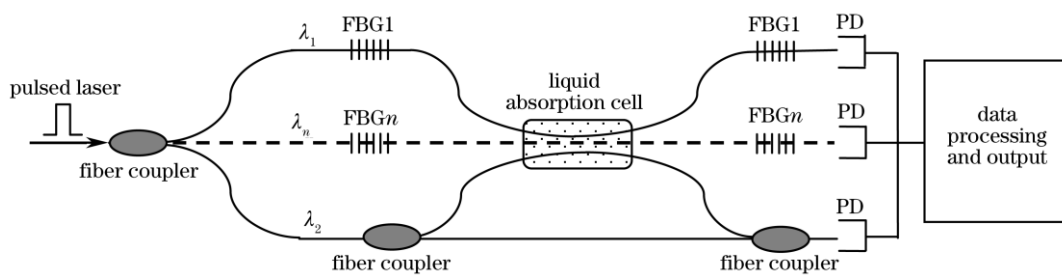


图 30 单传感器复用光纤 CRDS 微量流体多组分检测系统结构图

Fig.30 Structure of fiber CRDS detecting system for multi elements in minim liquid with the single sensor multiplexing technology

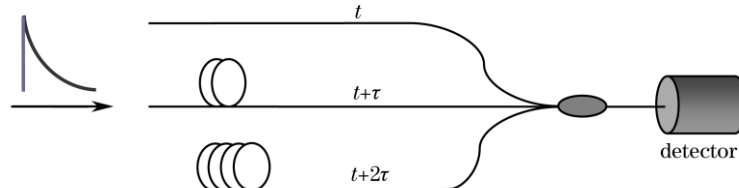


图 31 探测器时延复用技术原理示意图

Fig.31 Principle diagram of detector delay multiplexing technology

该探测器复用原理为:系统设计时根据探测器的响应性能,在各光纤衰荡腔支路后由短到长依次设置

不同长度的光纤,使各路传输的脉冲衰荡信号经历不同光程,即探测器接收的是不同时延的衰荡信号。借助电路或者计算机控制系统(如 Labview),可实现系统的总体控制,在将各支路衰荡信号分别存储和处理后,最后获得各支路的感测信息。

6 总结及展望

简要回顾了腔衰荡谱技术的发展历程,分析了腔衰荡谱技术基本原理并总结了其优缺点,指出了改造传统衰荡腔结构、设计新型光纤衰荡腔以优化系统功能并提高检测性能的必要性和重要意义。将目前光纤 CRDS 系统归纳为光纤环 CRDS 系统、纤端镀膜 CRDS 系统和光纤光栅 CRDS 系统三大类型,并对典型的光纤 CRDS 系统结构及性能进行了分析和评述。在此基础上,提出了光纤 CRDS 系统的设计方法,从选择光源、改变腔结构、补偿腔损耗、特种光纤以及检测参数等方面,比较系统地阐述了光纤 CRDS 系统的设计过程和实现方式,其中列举了诸多设计与应用实例。并且,从新型光纤衰荡腔设计、新型光纤 CRDS 系统设计两个方面较为全面地介绍了作者及课题组在光纤衰荡腔理论研究、传感结构设计、系统研制与流体传感等方面开展的研究工作及取得的创新性研究成果。提出并采用光源复用、光路复用、传感器复用以及探测器复用技术,创新性设计出多种光纤 CRDS 微量流体多组分检测系统,分析了工作原理、评价了优缺点,阐明了关键技术,指出了其应用方向,并提出了一些研究思路和有待深入分析和研究的课题。

目前,光纤 CRDS 系统的设计、研制及应用已出现了令人兴奋的新动向。作者经深入分析和研究,针对光纤 CRDS 技术及应用有望取得新突破的几个方面提出一些新思路 and 课题建议:

1) 改进或创新光纤衰荡腔结构,设计并研制用于电磁、生化等微量感测的传感机构。寻找低损耗、宽波段特种光纤,通过设计、研制介质(如流体)载入装置,将特殊流体选择性填充于特种光纤(如 MOF)或光栅(如 MOFG)特定位置,调控其传输或谐振波长,从而改变其光学及传感性质。

2) 探索开发光纤衰荡腔新技术,将光源复用、光路复用等单一复用技术交叉组合形成如光源-光路等联合复用技术。在此基础上,再引入波分复用(WDM)、时分复用(TDM)、空分复用(SDM)等光通信复用技术,可建立多种用于光纤 CRDS 系统设计的新式复用技术。

3) 进一步探索光纤微加工技术,采用飞秒激光、CO₂ 激光技术刻制光纤微腔,研制具有高灵敏度、高信噪比、低探测限、实用性强等优良特性的光纤 CRDS 系统,用于微量流体多参数、多组分检测。这种多功能光纤 CRDS 系统可望在预警、监测、诊断、物探、环保、节能等领域拓展应用。

4) 深入研究光纤 CRDS 理论问题,针对新型光纤衰荡腔进行建模,数值模拟分析其传感机理与过程,提取传感特征参量,探索传感定量关系,实验检验及应用推广。传感方式需考虑由单参数向多参数发展,静态参量向动态参量转化,分波段检测向全波段检测过渡,分时检测向同时检测转变等。

5) 探索光纤 CRDS 系统可变参数,设计并研制可调谐光纤 CRDS 系统。对光纤衰荡腔传感部位进行特殊处理,通过施加外场(如应力场^[34]、温度场^[35]、电磁场^[36]等)、改变光源(如输入不同波段光脉冲等)、调控耦合(如耦合比^[37]、液体折射率^[38]等)作用,有望实现多方式微量调谐感测。

参 考 文 献

- 1 C. Vallance. Innovations in cavity ringdown spectroscopy[J]. *New J. Chem.*, 2005, **29**(7): 867~874
- 2 D. Z. Anderson, J. C. Frisch, C. S. Masser. Mirror reflectometer based on optical cavity decay time[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(8): 1238~1245
- 3 A. O'Keefe, D. A. G. Deacon. Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1988, **59**(12): 2544~2555
- 4 Shucheng Xu, Guohe Sha, Jinchun Xie. Cavity ring-down spectroscopy in the liquid phase[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2002, **73**(2):

255~258

- 5 C. Wang, A. Mbi. An alternative method to develop fibre grating temperature sensors using the fibre loop ringdown scheme[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2006, **17**(7): 1741~1751
- 6 T. Yu, M. C. Lin. Kinetics of phenyl radical reactions studied by the “cavity-ring-down” method[J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 1993, **115**(10): 4371~4372
- 7 Steven S. Brown, A. R. Ravishankara, H. Stark. Simultaneous kinetics and ring-down: rate coefficients from single-cavity loss temporal profiles[J]. *J. Phys. Chem. A*, 2000, **104**(30): 7044~7052
- 8 A. C. R. Pipino. Monolithic folded resonator for evanescent wave cavity ringdown spectroscopy[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(9): 1449~1453
- 9 Liu Yaping, Zhang Weigang, Jiang Meng *et al.*. Development and recent progress of fiber cavity ring-down spectroscopy[J]. *Progress in Physics*, 2008, **28**(4): 401~409
刘亚萍, 张伟刚, 姜 萌 等. 光纤腔衰荡光谱技术及其最新进展[J]. *物理学进展*, 2008, **28**(4): 401~409
- 10 G. Stewart, K. Atherton, H. Yu *et al.*. An investigation of an optical fibre amplifier loop for intra-cavity and ring-down cavity loss measurements[J]. *Meas. Sci. Tech.*, 2001, **12**(7): 843~849
- 11 R. S. Brown, I. Kozin, Z. Tong *et al.*. Fiber-loop ring-down spectroscopy[J]. *J. Chem. Phys.*, 2002, **117**(23): 10444~10447
- 12 Z. Tong, M. Jakubinek, A Wright *et al.*. Fiber-loop ring-down spectroscopy: a sensitive absorption technique for small liquid samples[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2003, **74**(11): 4818~4826
- 13 Peter B. Tarsa, Diane M. Brzozowski, Paul Rabinowitz *et al.*. Cavity ringdown strain gauge[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(12): 1339~1341
- 14 Hans-Peter Loock. Ring-down absorption spectroscopy for analytical microdevices[J]. *Trends in Analytical Chemistry*, 2006, **25**(7): 655~664
- 15 H. Sun, F. He, Z. Zhou *et al.*. Fabrication of microfluidic optical waveguides on glass chips with femtosecond laser pulses[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(11): 1536~1538
- 16 Bo Liu, Jianhua Luo, Guiyun Kai. Temperature and strain sensor based on weak LPG and fiber ring down[J]. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 2008, **50**(1): 111~114
- 17 Zhang Qi, Zhang Weigang, Zhang Jian *et al.*. Micro-cavity fabricated by femtosecond lasers and its application in fiber-loop ringdown spectrscopy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 713~717
张 琦, 张伟刚, 张 建 等. 飞秒激光蚀刻光纤微腔及其在光纤环衰荡腔中的应用[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 713~717
- 18 T. von Lerber, M. W. Sigrist. Cavity-ring-down principle for fiber-optic resonators: experimental realization of bending loss evanescent-field sensing[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(18): 3567~3575
- 19 M. Gupta, H. Jiao, A O'Keefe. Cavity-enhanced spectroscopy in optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(21): 1878~1880
- 20 Peter B. Tarsa, Diane M. Brzozowski, Paul Rabinowitz *et al.*. Cavity ringdown strain gauge[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(12): 1339~1341
- 21 Peter. B. Tarsa, P. Rabinowitz, K. K. Lehmann. Evanescent field absorption in a passive optical fiber resonator using continuous-wave cavity ring-down spectroscopy[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2004, **383**: 297~303
- 22 Zhang Weigang. Progress in microstructure optical fiber sensor designing[J]. *Progress in Physics*, 2007, **27**(4): 449~466
张伟刚. 微结构光纤传感器设计的新进展[J]. *物理学进展*, 2007, **27**(4): 449~466
- 23 Runkai Li, Hans-Peter Loock, Richard D. Oleschuk. Capillary electrophoresis absorption detection using fiber-loop ring-down spectroscopy[J]. *Anal. Chem.*, 2006, **78**(16): 5685~5692
- 24 Liu Weijun, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. Optical fiber F-P refractive index sensor based on 157 nm laser micromachining[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1): 99~102
刘为俊, 饶云江, 冉曾令 等. 基于157 nm激光制作的微光纤F-P折射率传感器[J]. *光子学报*, 2009, **38**(1): 99~102
- 25 G. Stewart, K. Atherton, B. Culshaw. Cavity enhanced spectroscopy in fiber cavities[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(5): 442~444
- 26 G. Stewart, P. Shields, B. Culshaw. Development of fibre laser systems for ring-down and intracavity gas spectroscopy in the near-IR[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2004, **15**: 1621~1628
- 27 Jing Li, Weigang Zhang, Jiangbing Du *et al.*. Design of photonic bandgap fibre with novel air-hole structure[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, **25**(7): 2531~2534
- 28 Zhang Weigang. Principle and Applications of Fiber Optics[M]. Tianjin: Nankai University Press, 2008, **4**: 10~11
张伟刚. 光纤光学原理及应用[M]. 天津: 南开大学出版社, 2008, **4**: 10~11
- 29 Study on Optical Fiber Cavity Ringdown Spectroscopy and the Response of LPFG to Humidity[D]. Tianjin: Nankai University, 2009, **5**: 54~55

- 刘亚萍. 光纤CRDS技术及LPFG湿度传感研究[D]. 天津: 南开大学硕士学位论文, 2009, **5**: 54~55
- 30 Meng Jiang, Weigang Zhang, Long Jin *et al.*. Fabrication of temperature-insensitive chirped fiber grating pressure sensor[C]. *SPIE*, 2007, **6830**: 83018~83018
- 31 Li Jing, Zhang Weigang, Du Jiangbing *et al.*. Application of hydrofluoric acid's corrosive properties in the fabrication of photonic crystal fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 705~712
李 婧, 张伟刚, 杜江兵 等. 氢氟酸填充腐蚀方法在光子晶体光纤制造中的应用[J]. 中国激光, 2009, **36**(3): 705~712
- 32 Zhang Qi. Research on Fiber-loop Ring Down Spectroscopy System and Its Application in Fluidic Sensing[D]. Tianjin: Nankai University, 2009, **5**: 65~66
张 琦. 光纤衰荡系统及其在流体传感中的应用[M]. 天津: 南开大学硕士学位论文, 2009, **5**: 65~66
- 33 Li Wenchao, Tian Xiuxian, Wu Fei *et al.*. Research on the multi-type gas concentration in-situ measurement system based on fiber-circled cavity ring-down method[J]. *J. Transduction Technol.*, 2008, **21**(8): 1466~1471
李文超, 田秀仙, 吴 飞 等. 光纤环路光腔循环衰荡多组分气体浓度在线测量系统的研究[J]. 传感技术学报, 2008, **21**(8): 1466~1471
- 34 W. G. Zhang, X. Y. Dong, Q. D. Zhao *et al.*. FBG-type sensor for simultaneous measurement of force (or displacement) and temperatures based on bilateral cantilever beam[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(12): 1340~1342
- 35 Zhang Weigang, Zhou Guang, Liang Longbin *et al.*. Experiment of temperature sensitivity fiber grating component packaged with mixed polymer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(8): 1003~1005
张伟刚, 周 广, 梁龙彬 等. 混合聚合物光纤光栅封装元件的温敏实验[J]. 光子学报, 2001, **30**(8): 1003~1005
- 36 W. G. Zhang, Z. G. Liu, Q. Q. Sheng *et al.*. On-line detecting of the electric current by applying electromagnetic tuning[C]. *SPIE*, 2000, **4220**: 109~112
- 37 Lin Jinhai, Zhang Weigang. Recent progress in theory, design and development of fiber coupler[J]. *Progress in Physics*, 2010, **30**(1): 37~80
林锦海, 张伟刚. 光纤耦合器的理论、设计及进展[J]. 物理学进展, 2010, **30**(1): 37~80
- 38 Zhang Weigang, Xu Zhaowen, Kai Guiyun *et al.*. Design and realization of fiber intensity-type sensor of solution contribution[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2003, **24**(3): 272~274
张伟刚, 许兆文, 开桂云 等. 强度型光纤浓度传感器的设计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2003, **24**(3): 272~274