

文章编号:1673-0291(2009)03-0078-05

基于全光缓存器的光纤传感甲烷多点监测系统

余觐球^{a,b}, 吴重庆^{a,b}, 王智^{a,b}, 刘锐^c, 王俏^{a,b}

(北京交通大学 a. 发光与光信息教育部重点实验室, b. 理学院光信息科学与技术研究所,
c. 电子信息工程学院, 北京 100044)

摘要:当前的光纤甲烷传感器通常使用长距离准直器,导致探头体积大、安装对准不易等问题. 本文提出一种基于全光缓存器的光纤甲烷检测系统,利用全光缓存器多波长多圈缓存的特性,可将探测长度缩短为 5 cm,是国内外现有方案的 1/6~1/10. 本方案能有效缩小探头体积,同时保证检测精度.

关键词:光纤传感;甲烷检测;多点监测系统;全光缓存器;双波长缓存
中图分类号:TP212.14 **文献标志码:**A

Optical Fiber Methane Sensor Based on Double Loop Optical Buffer

YU Kuanglu^{a,b}, WU Chongqing^{a,b}, WANG Zhi^{a,b}, LIU Rui^c, WANG Qiao^{a,b}

(a. Key Laboratory of Luminescence and Optical Information, Ministry of Education.

b. Institute of Optical Information, School of Science;

c. School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Long interval collimators were used in most kinds of optical fiber methane sensing systems, hence the probes were big and heavy, hard to collimate and maintain. In this manuscript, we put forward a novel system based on Double Loop Optical Buffer (DLOB) which is used in gas sensing field for the first time. By using the DLOB configuration the gas gap is shortened to 50 millimeters which is only 1/6 to 1/10 as usual. As a result, the volume of the probe is minished and system stability is improved with DLOB's dual-wavelength and multi-circutation buffer properties.

Key words: fiber sensor; methane sensor; multi-point sensing system; double loop optical buffer; double wavelength buffer

甲烷是一种温室气体,其温室效应约为二氧化碳的 26 倍. 另外,甲烷气体燃点低,是一种危险易爆气体,严重威胁矿井安全^[1],因此,甲烷浓度的实时监测有着重要意义. 光纤甲烷气体传感器具有灵敏度高、抗电磁干扰、易小型化和可在恶劣条件下工作等优点,是较为理想的选择.

目前,国内研究通常都局限于 1 330 nm 波段^[2-3],实验结果测量灵敏度仅有 0.7%^[3]. 甲烷气

体在 1 665 nm 处的吸收约为在 1 330 nm 处的两倍,国外转而研究 1 665 nm 波段的吸收,可达 $10^{-5}/\text{m}$ 的测量精度^[4]. 但检测气室的长度一般为 32~50 cm^[5-6]. 如此长的距离对准困难,对调整精度要求也较高. 尤其在矿井等恶劣条件下,探头体积大,不易安放,抗震性能差,难以长期使用. 为此,有文献提出使用多次反射的方案解决气室过长的问题^[4],但此方案中光在气室需经多次反射后被探

收稿日期:2008-07-01;修回日期:2009-04-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60877057);北京交通大学重大科研基金项目资助(2005SZ001)

作者简介:余觐球(1986—),男,江西景德镇人,博士生, email:06118331@bjtu.edu.cn.

吴重庆(1944—),男,重庆市人,教授,博士生导师.

测器接收,系统复杂,对光路稳定性要求很高,不易实现.

对上述情况,本文作者提出了一种基于双环全光缓存器(Double Loop Optical Buffer,DLOB)的光纤甲烷气体传感器系统,可以实现多点监测.本系统利用光纤缓存器多圈缓存的技术^[7],将气室长度减少到 5 cm,是目前国内外甲烷检测方案中气室长度的 1/6~1/10.因小气室易于安装,对准直器的要求低,可有效提高系统稳定性和可靠性.

1 实验原理

1.1 检测原理

为提高灵敏度,采用双光源单光路的光谱吸收法在 1 665 nm 附近检测.双光源单光路法使用两束波长接近的光 λ_1 、 λ_2 通过同一光路,可减少系统误差和干扰因素,由 Beer-Lambert 定律,可知甲烷气体浓度 C 为

$$C = \frac{1}{[a(\lambda_1) - a(\lambda_2)]L} \ln \frac{I(\lambda_2) - I(\lambda_1)}{I(\lambda_2)} \quad (1)$$

式中: $a(\lambda_1)$ 、 $a(\lambda_2)$ 分别为甲烷对波长 λ_1 、 λ_2 光的吸收系数; $I(\lambda_1)$ 、 $I(\lambda_2)$ 分别为波长 λ_1 、 λ_2 光的强度; L 为气室的长度.

1.2 双环全光缓存器

全光缓存器是将要缓存的数据信号在光纤环中环行多圈然后读出的技术,目的是根据信号处理的需要进行延迟时间控制.双环耦合圈光缓存器,具有结构紧凑,工作稳定等优点.

如图 1 所示为双环全光缓存器结构,当信号光从环行器的 1 端口进入,由环行器的 2 端口输出后进入 3×3 耦合器的 2 端口,并以 50∶50 的分光比

从其 4、5、6 端口输出,定义 4 端口的输出光为顺时针信号光 S_{cw} ,6 端口输出的为逆时针信号光 S_{ccw} 两束光在环 1 内相向环行.当环内不加入控制光时,两束光再次回到耦合器并由 2 端口输出.

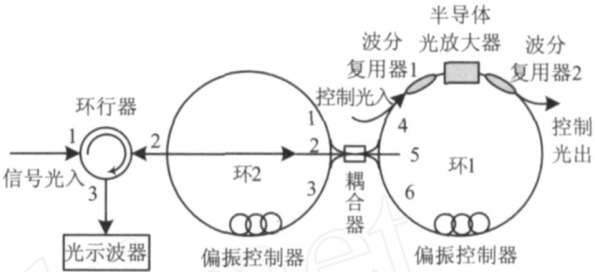


图 1 双环全光缓存器

Fig. 1 Configuration of double loop optical buffer(DLOB)

当外部引入一束“写”控制光,在其作用下利用半导体光放大器(SOA)的交叉相位调制特性(XPM),使得 S_{cw} 产生 π 的相移.而控制作用时间使得 S_{ccw} 不受 SOA 调制,相位不发生改变.当这两束信号光在耦合器再次相遇时,其相位相差 π ,并将以分光比 50∶50 从 1、2、3 端口输出,此后信号光将一直在环 1 和环 2 中(8 字环中)环行.直到下一束“读”制光作用下,将相位差改变为 2π ,信号光在耦合器内相干并从此 2 端口输出.从而在“读、写”控制脉冲的控制下,可利用 DLOB 实现信号光多圈缓存.

利用 DLOB 的多圈缓存技术,在环 2 中加入探测气室,则探测光在环路中每缓存一圈也就是通过气室一次,缓存 n 圈即通过气室 n 次,将有效检测距离增加了 n 倍.文献^[7]中实验证明双波长光在 DLOB 中可缓存 12 圈,而损耗不到 4 dB.利用 DLOB 可以在缩小气室长度,增加气室稳定性的同

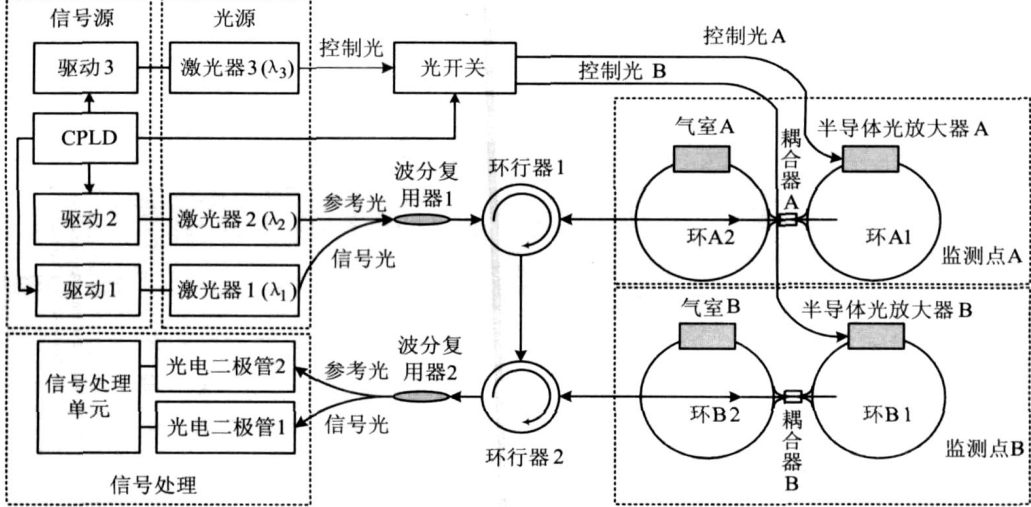


图 2 实验系统原理图

Fig. 2 Principle diagram of the experimental setup

时,保证检测精度.

1.3 实验系统原理

如图 2 所示为实验系统原理图,以两个检测点(分别命名为 A 点和 B 点)为例.

系统采用 CPLD 作为编码器,周期性产生发送给激光器 1、激光器 2 的信号(同一数据包,每包有两帧长度相同的数据),及激光器 3 和光开关的控制信号.激光器 1 和激光器 2 分别产生信号光 λ_1 和参考光 λ_2 ,其波长接近,但甲烷对两者吸收系数不同.

信号光和参考光经波分复用器(WDM)1 合束,随后过环行器 1,进入探测点 A.控制光开关和激光器 3 产生的控制光 A 使得激光器 1 和激光器 2 的数据包中第 1 帧数据 A 被缓存在环 A 中,并记录 A 点的甲烷气体浓度信息.数据包中第 2 帧数据 B 没有被缓存,经过环 A1 后直接从 A 环中输出并经过环行器 2 进入 B 点,控制光 B 使得第 2 帧数据在 B 点缓存,检测 B 点的甲烷气体浓度.

当光信号缓存若干圈后,控制光开关产生两个读信号,两帧数据顺序输出.由波分复用器 2 分束后

分别被检测信号光的光电二极管 1 和参考光的光电二极管 2 接收,经过信号处理后即可知 A 点和 B 点的甲烷气体浓度.

2 系统设计

2.1 编码器和信号帧的设计

2.1.1 编码器的设计

系统中采用 Lattice CPLD4064V 作为编码器,用 Verilog HDL 语言编程,控制驱动 1、驱动 2、驱动 3 和光开关.通过时序控制,使得 SOA 可以实现“读/写”功能,进而缓存光信号并检测气室中的甲烷浓度.

2.1.2 信号帧的设计

为满足本实验发射和接收的要求,设计的信号帧分 A、B、S、3 部分,如图 3 所示.

帧 A、帧 B 分别为在缓存器中缓存的信号帧,分为前导码、同步码、标识码和信息码 4 部分.因控制光脉冲宽于信号帧,为防止串扰,特设计保护帧 S.

2.2 系统工作示意

如图 4 为系统工作示意图.

帧标识	A				S			B	
帧长	80 bit				80 bit			80 bit	
数据	01...01	D8D8	1010	1010	0000...00	01...01	D8D8	1001	1010
说明	前导码	同步码	标识码	信息码	间隔保护	前导码	同步码	标识码	信息码

图 3 帧格式结构图

Fig.3 Format of signal frame

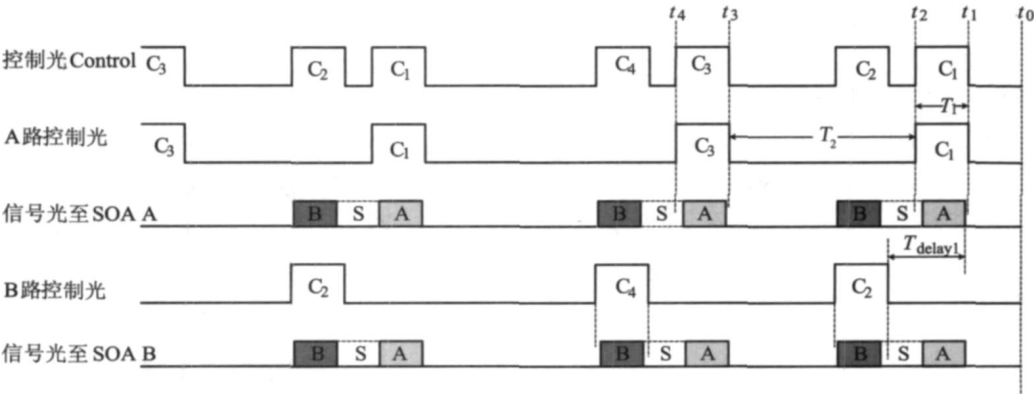


图 4 系统工作示意图(阴影表示此时该信号帧未在同一 Buffer 中)

Fig.4 Operational schematic diagram of the system

(slash frame means it was not in the same buffer at meantime)

t_0 时刻,系统开始计时.激光器 3 发出的控制光被光开关分为 A、B 两路. t_1 时刻,A 路控制光“写”脉冲 C_1 已到达半导体光放大器(SOA) A 并开始作用,随后信号帧 A 到达 SOA A,且信号帧通过后 C_1 作用结束.即满足控制光脉冲长度 T_1 大于信号帧长度 T_A , $T_1 > T_A$.随后信号帧 A 在缓存器 A 中环行.当帧 B 进入 SOA A 时因无控制光作用,帧

B 仅环行环 A1 后进入缓存器 B.同理,信号帧 B 在“写”脉冲 C_3 的作用下缓存器 B 中环行,直到 C_4 的到来(此时信号帧 A 在缓存器 A 中缓存,以阴影表示).

在 t_3 时刻,光信号已经缓存所需圈数.控制光“读”脉冲 C_3 从 A 路输入缓存器 A, C_3 作用下帧 A 从缓存器 A 中输出,经过环 B1 后进入到信号处理

单元.同理,在控制光“读”脉冲 C_4 作用下,帧 B 从缓存器 B 中输出并进入信号处理单元.

至此,激光器 2 和激光器 3 发射的第 1 个数据包中的帧 A 和帧 B 已经分别在缓存器 A,缓存器 B 中环行一定圈数,并携带气体浓度信息进入信号处理单元.帧 A,帧 B 经历的总光程相同,所以仍按照输入时的顺序进入信号处理单元.

2.3 环长的设计

在 DLOB 中左右环长与所要求存储光的速率和数据包的长度密切相关,因此需要计算并设计好各环的长度.分析可知,环长应当满足下述条件.

1) 控制光脉冲应当完全包络数据包中第 1 帧(第 1 帧和第 2 帧长度相同).

$$T_1 > T_A \tag{2}$$

其中: T_1 为控制光的宽度, T_A 为信号帧的宽度.

2) 控制光 B 应当与第 2 帧数据同步(或略早)到达 SOA B.

$$T_{dA} = T_A + T_S + \frac{L_{loop1} + L_t}{v} \tag{3}$$

式中: T_{dA} 为控制光脉冲 C_1 和 C_2 的间隔; T_A 和 T_S 分别为信号帧 A 和间隔帧 S 的宽度; v 为光在光纤中的速度; L_t 为从耦合器 A 到耦合器 B 的光纤长度; L_{loop1} 为右环的长度.

3) 数据在缓存器中首尾不能相遇,否则将无法进行“读/写”.

$$T_{dB} \geq T_1 + T_2 + T_A + \frac{L_{loop1}}{v} \tag{4}$$

式中: T_2 为“读”脉冲和“写”脉冲的时间间隔; T_{dB} 为前后信号帧 A 之间时间间隔.

4) 当存在 N 个检测点时,由电光开关控制的各点控制信号不应冲突.

$$T_1 + T_2 > T_{delay(N-1)} + T_1 \tag{5}$$

式中: $T_{delay(N-1)}$ 为第 $N-1$ 个控制点的“写”脉冲和第 1 个“写”脉冲的时间间隔.

5) 光纤右环长 L_{loop1} 和左环长 L_{loop2} 均应大于信号帧长,否则将产生串扰.

$$\min(L_{loop1}, L_{loop2}) > T_A + T_B + T_S$$

由上述 5 条决定了环长及各段光纤的长度,当速率、数据包帧长、检测点一定,则可求得环 1 和环 2 的长度范围.

3 阶段成果

3.1 甲烷吸收峰的测定

使用 SLD 作为光源,及 ANDO 生产的 AQ6317C 光谱仪测定了甲烷气体在 1 630~1 690 nm 波段内

的吸收峰位置和深度,如图 5 所示.图中曲线所示为宽带光源直接输出的光谱情况和宽带光源通过含纯甲烷(纯度大于 99.9%)的气室后的光谱.可以看出在 1 666.5 nm $\pm$ 1.5 nm 波段内吸收峰密集,吸收强度最大.所以应选择 1 665 nm 附近作为检测波长.

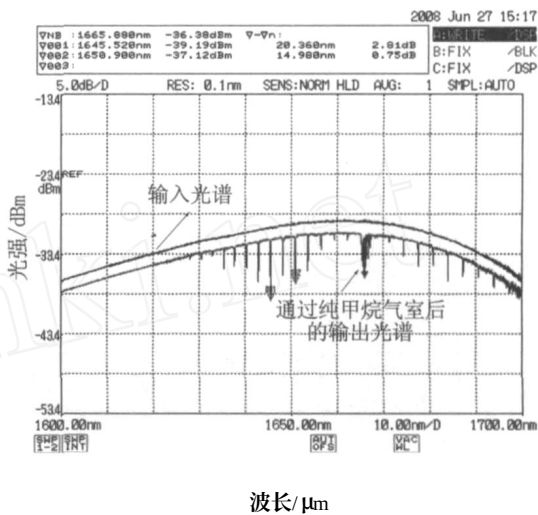


图 5 1 660 nm 波段光通过气室前后光强对比

Fig. 5 Before and after SLD light in the gas chamber

随后我们测定甲烷在 1 665~1 668 nm 范围内的吸收峰,如图 6 所示.吸收最强的 4 个峰分别位于 1 665.874 nm、1 665.508 nm、1 666.114 nm 和 1 665.384 nm.吸收深度依次为 6.20 dB、4.67 dB、4.55 dB 和 3.93 dB.

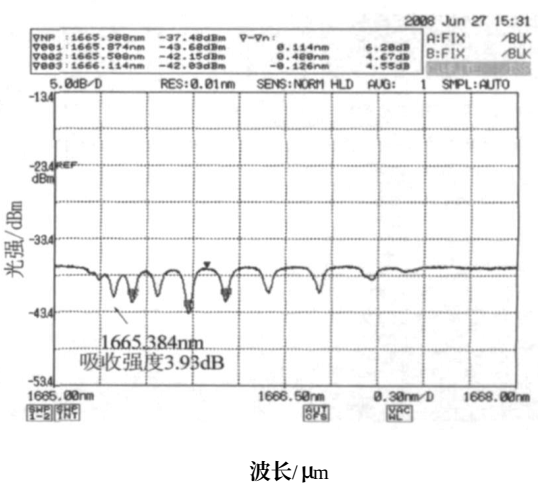


图 6 1 665 nm 附近吸收峰示意图

Fig. 6 Absorption peaks near 1665 nm

3.2 气体扩散实验

为了对低浓度的甲烷气体的检测提供依据,进行了气体扩散实验.将光源调整到 1 665.384 nm,光通过充满甲烷气体的气室.随后打开出气阀门,每隔一段时间读取输出光功率值,并求得损耗.

实测点如图 7 中的点所示,当气室中全为甲烷时,损耗为 3.75 dB,与 3.1 节中光谱仪测量值基本

相符.同理可以测得气室中甲烷浓度.将实测值拟合指数图形如图中实线所示.

另由 Beer-Lambert 定律可知其中损耗系数 α 为 - 0.003 6,此数值反映的是此状态下气室的损耗变化情况.

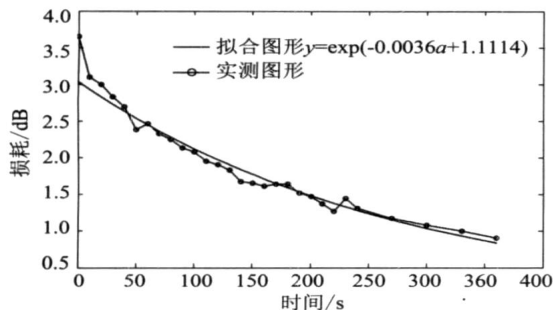


图7 气体扩散实验

Fig. 7 Measured curve (dotted-line) and fitted curve (solid line) of the diffusion experiment

4 结论

提出了一种多点光纤甲烷监测系统,首次将全光缓存技术和通信编码技术运用到气体检测领域中,将检测有效距离增加为以往的6至10倍,因而可大大缩小气室且不影响其检测精度,同时提高检测灵敏度.目前实验已取得了一些阶段性成果,并验证了技术可行性.

参考文献:

[1] Culshaw B, Johnstone W, Mcleart A, et al. Large Scale Multiplexing A Point Sensor for Methane Gas Detection[C] //OFS, WA4, 2002.

[2] 赵晔,朱遵略,施德恒,等.双激光光源吸收法甲烷浓度光纤监测仪[J].光学技术,2004,30(6):745-752.

ZHAO Ye, ZHU Zunlue, SHI Deheng, et al. Monitoring Instrument for Methane Concentration by Light Absorption Method Using Dual Laser Sources[J]. Optical Technique, 2004, 30(3):745-752. (in Chinese)

[3] 王书涛,车仁生,王玉田,等.光纤甲烷气体传感器的研究[J].仪器仪表学报,2006,27(10):1276-1278.

WANG Shutao, CHE Rensheng, WANG Yutian, et al. Study on the Optical Fiber Methane Gas Sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(10):1276-1278. (in Chinese)

[4] Pfeiffer P, Meyrueis P, Patillon D, et al. Limiting Sensitivity of A Differential Absorption Spectro-Meter with Direct Detection in the $2\nu_3$ and $\nu_2 + \nu_3$ vibration bands[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2004, 53(1):45-50.

[5] Nelson D D, Mcmanus B, Urbanski S, et al. High Precision Measurements of Atmospheric Nitrous Oxide and Methane Using Thermoelectrically Cooled Mid-Infrared Quantum Cascade Lasers and Detectors[J]. Spectrochimica Acta Part A, 2004, 60:3325-3335.

[6] 王玉田,郭增军,王莉田.差分吸收式光纤甲烷气体传感器的研究[J].光电子·激光,2001,12(7):675-678.

WANG Yutian, GUO Zengjun, WANG Litan. Study on Difference Absorption Optical Fiber CH_4 Sensor[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2001, 12(7):675-678. (in Chinese)

[7] Tian Changyong, Wu Chongqing, Peng Peng, et al. Dual-Wave Length Packets Buffering in DLOB Based on SOA[C] // APOC2007. Wuhan:SPIE, 2007.