

基于波分复用的多点光纤乙炔传感系统

余 颀 球¹ 吴 重 庆¹ 郭 旋¹ 王 智^{1,2} 石 梅 荣¹ 武 文 彬³

¹北京交通大学理学院光信息科学与技术研究所, 发光与光信息教育部重点实验室, 北京 100044

²Electrical and Computer Engineering, University of California, Santa Barbara, Santa Barbara CA 93106, USA

³北京交通大学理学院, 北京 100044

摘要 理论分析了考虑吸收线型函数展宽时的 Beer-Lambert 定律,作了进一步推导并应用于多点乙炔气体监测。提出一种采用波分复用器、利用吸收峰区分不同传感点的多点光纤乙炔传感系统,系统简单易操作,无需对光源进行调制,且系统损耗与串扰小。理论分析表明当目标检测灵敏度为 0.5%时,在 1510~1540 nm 范围内该系统最大可监测 18 个传感点。搭建了一个 3 个监测点的乙炔传感系统并验证了上述理论的可行性,各传感点的测量误差均小于 1.8%。

关键词 吸收光谱法;乙炔检测;传感系统;光纤传感;波分复用

中图分类号 TN215 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0506003

A Novel Multi-Point Fiber Optics Acetylene Sensing System Based on Dense Wavelength Division Multiplexers

Yu Kuanglu¹ Wu Chongqing¹ Guo Xuan¹ Wang Zhi^{1,2} Shi Meirong¹ Wu Wenbin³

¹Key Lab of Luminescence and Optical Information, Ministry of Education, Institute of Optical Information, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

²Electrical and Computer Engineering, University of California, Santa Barbara, Santa Barbara CA 93106, USA

³School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract The Beer-Lambert law, taking into account the pressure broadening of the absorption lines function is analyzed, then it is used for multi-point acetylene gas detection. A fiber optical multi-point acetylene sensing system using dense wavelength division multiplexers, which takes advantage of different absorption lines to tag different probes in the system, is put forward. This system is easy to build and operate, while it does not need to modulate the light source. In addition, the system has a much smaller system loss and cross talks as the consequences of employing the dense wavelength division multiplexers. Theoretical results show that the maximum sensor number of the system is eighteen with a 0.5% sensitivity using the absorption lines from 1510 to 1540 nm. A three-point sensing system is experimentally demonstrated and the errors of the measured results are within 1.8%.

Key words absorption spectrum method; acetylene detection; sensing system; fiber optics sensor; wavelength division multiplexing

OCIS codes 060.4264; 120.0280; 280.1120; 280.4788; 300.1030

1 引 言

自从 1979 年 H. Inaba 等^[1]提出一种基于光谱吸收型的光纤甲烷传感器以来,光纤气体传感器因具有抗干扰性、本质安全、可用于光通信技术、便于

组网等优点^[2]而备受人们关注。利用光纤气体传感技术可检测的目标气体种类很多,如汽车尾气^[3]、氧气^[4]、温室气体^[5~9]和易燃易爆危险气体^[5~12]等。乙炔是有机化工产品最基本的一种原料,还是一种

收稿日期: 2010-05-31; **收到修改稿日期**: 2010-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(60877057)和北京市自然科学基金(4092031)资助课题。

作者简介: 余颀球(1986—),男,博士研究生,主要从事光纤气体传感方面的研究。E-mail: 06118331@bjtu.edu.cn

导师简介: 吴重庆(1944—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤通信,全光信号处理,光纤传感,光网络等方面的研究。

E-mail: cqwu@bjtu.edu.cn(通信联系人,中国光学学会会员号:S0404200675)

易燃易爆的气体。因此对乙炔浓度进行高灵敏的多点实时监测,在保障工业安全生产和环境污染监测等领域都具有重要的意义。

现有的光纤多点气体传感系统的多址技术可分为副载波频分多址技术(FDMA)^[13,14]、时分多址技术(TDMA)^[15,16]、码分多址技术(CDMA)^[17]、连续波调频技术(FMCW)^[18,19](也可理解为频分多址技术的一种)以及波分多址技术(WMDA)^[20]等。频分复用的气体传感网络的缺点在于每次只能监控某一频率,不利于了解整个监测范围内目标气体的变化趋势。时分复用的传感网络缺点在于若监测点太多则必须增加监测时间周期,减小检测脉冲的脉宽,最终影响信号质量,且每次也只能获知单个监测点的目标气体浓度。这两种方案还存在网络损耗大、受光调制器消光比及器件偏振性能等制约等缺陷;而 CDMA 方案缺点在于由于系统成本较高,且受非线性器件性能制约,系统复杂;FMCW 方案缺点在于可监测的范围仅为米量级、可监测点数少以及系统串扰大等;现有波分复用方案采用掺铒光纤放大器(EDFA)放大 U 波段的光信号,难以实现。此外该方案因采用光纤光栅和环形器作为滤波器件导致系统损耗大及稳定性差。最后方案中采用宽谱光先通过气室然后滤波的方法,不如先滤波后通过气室波长调节准确。

为此,本文将密集波分复用(DWDM)技术应用于气体传感领域,提出一种利用 DWDM 技术使用不同吸收峰的波长标记不同监测点而构成一个基于 DWDM 的传感系统。对 Beer-Lambert 定律在考虑多波长使用时做了进一步推导,使之适用于 DWDM 的气体传感系统。经过计算求得波分复用型乙炔多点传感检测系统在 1510~1540 nm 波长范围内以目标检测灵敏度为 0.5%时,最多可以复用监测 18 个传感点,最后实际搭建了一个 3 点乙炔传感系统并验证了理论正确性。该方案的优势在于实验系统简单,而且因波分复用器的使用而大大降低系统损耗以及信号之间串扰。

2 实验原理

乙炔分子在 1515~1540 nm 内存在一组吸收峰,图 1 所示为实测得乙炔在上述波长范围内的吸收峰。以往的光纤多点气体监测系统通常只从这一组待测气体吸收峰中选用最强的一个作为检测波长,选择另外一个较弱吸收峰作为参考波长^[17,21~23];然而这一组吸收峰恰好适合搭建一个

DWDM 监测系统,可以利用不同的吸收峰标记不同的传感点。利用波分复用器将宽谱光源的光分为若干个不同波长的窄带光,每个窄带光中只包含乙炔的一个吸收峰并被送入不同的气室,随后携带各监测点气体浓度信息的窄带光再经波分复用器并为一路上送给接收系统分析。最后根据波长和吸收峰峰值可一次性得知整个系统中各传感点的气体浓度。

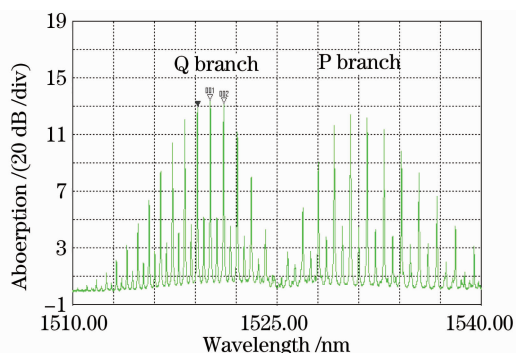


图 1 乙炔吸收谱线(1510~1540 nm)

Fig. 1 Acetylene absorption lines from 1510 to 1540 nm

2.1 理 论

为了利用不同的波长测定不同传感点的浓度,首先需要明确波长 λ (或频率 ν)与气体体积分数 C_{gas} 的关系。当不考虑多波长复用时的 Beer-Lambert 定律可写为

$$I(\nu, L) = I_0(\nu) \exp(-\alpha C_{\text{gas}} L), \quad (1)$$

式中 $I_0(\nu)$ 为光频为 ν 的单色光光强, $I(\nu, L)$ 代表频率 ν 的单色光通过长度为 L 的气体间隙后的出射光强。通常认为(1)式中的吸收系数 α 为常数。然而这只是一近似,当考虑波长因素时,必须考虑吸收峰的展宽,且吸收峰的展宽与各气体组分的分压强有关。

考虑波长的 Beer-Lambert 定律可写为

$$I(\nu, L) = I_0(\nu) \exp[-\beta(\nu) P_{\text{gas}} L], \quad (2)$$

而 $P_{\text{gas}} = C_{\text{gas}} P_t$, P_{gas} 和 P_t 分别为气室内待测气体分气压和气室内的总气压。(2)式中 $\beta(\nu) = \alpha(\nu) / P_t$, 此处认为吸收系数 α 应为频率 ν 的函数 $\alpha(\nu)$,称 $\beta(\nu)$ 为线性吸收系数, $\beta(\nu)$ 可以表示为

$$\beta(\nu) = S(\nu) g(\nu - \nu_0) N, \quad (3)$$

$$N = N_L \frac{296}{T}, \quad (4)$$

$$N_L = 2.479 \times 10^{19}, \quad (5)$$

式中 $S(\nu)$ 为分子在频率 ν 处的吸收线强度, $g(\nu - \nu_0)$ 为归一化的线型函数, N 为当气室处于单位气压下时气室内气体的总粒子数体积密度, N_L 为洛希米特数(Loschmidt number), T 为开尔文温度。在

大多数实际应用情况下,通常外界气压为 1 个大气压,则碰撞压力展宽为吸收峰展宽的主要因素,此时归一化的线型函数 $g(\nu - \nu_0)$ 可近似为洛伦兹型

$$g(\nu - \nu_0) = \frac{1}{\pi} \frac{\Delta\nu_L}{(\nu - \nu_0)^2 + (\Delta\nu_L)^2}, \quad (6)$$

式中 $\Delta\nu_L$ 为气体碰撞(压力)引起的线型展宽的半峰半宽,它是气室中待测气体的分压强 P_{gas} 与气室中其他气体(本文中为氮气)的分压强 $(P_t - P_{\text{gas}})$ 的线性组合。表示为

$$\Delta\nu_L = \left(\frac{296}{T}\right)^n [P_{\text{gas}}\gamma_{\text{self}} + (P_t - P_{\text{gas}})\gamma_{\text{air}}], \quad (7)$$

式中 γ_{self} 为待测气体的自展宽系数, γ_{air} 为待测气体与空气碰撞引起的互展宽系数,它们都与所处吸收峰的有关。温度系数 n 约为 0.5。将(3)~(7)式代入(2)式可得在常温常压下气体体积分数 C_{gas} 与损耗 $\alpha_{\text{gas}}(\nu)$ 的关系为

$$C_{\text{gas}} = \frac{1}{1 - A(\nu) \left[\frac{B(\nu)}{\alpha_{\text{gas}}(\nu)} + 1 \right]}, \quad (8)$$

$$A(\nu) = \frac{\gamma_{\text{self}}(\nu)}{\gamma_{\text{air}}(\nu)}, \quad (9)$$

$$B(\nu) = \frac{-4.34S(\nu)NL \left[1 - \frac{\gamma_{\text{self}}(\nu)}{\gamma_{\text{air}}(\nu)} \right]}{\pi\gamma_{\text{air}}(\nu)}, \quad (10)$$

$$\alpha_{\text{gas}}(\nu) = -10\lg[I(\nu, \lambda)/I_0(\nu)], \quad (11)$$

式中参数 $A(\nu)$ 定义为展宽系数比,而参数 $B(\nu)$ 反映了频率为 ν 的光信号通过纯乙炔后的损耗(L 为 20 cm)。表 1 是根据 HITRAN 数据库^[24] 给出了乙炔气体从 1510~1540 nm 范围内较强的 46 个吸收峰参数和对应吸收峰的 $A(\nu)$ 及 $B(\nu)$ 的值。这里为考虑不同波长以及考虑由碰撞而引起的线型展宽的气体吸收传感技术提供了一种新的计算方法。

表 1 1510~1540 nm 内的乙炔吸收峰参数

Table 1 Parameters of acetylene absorption lines from 1510 nm to 1540 nm

Peaks	Wave-number / cm ⁻¹	$\gamma_{\text{air}}/(1.01 \times$ $10^5 \text{ Pa} \cdot \text{cm})^{-1}$	$\gamma_{\text{self}}/(1.01 \times$ $10^5 \text{ Pa} \cdot \text{cm})^{-1}$	$S /$ $(10^{-21} \text{ cm}^2/\text{mol})$	A (a. u.)	B /dB
1	6490.0202	0.0597	0.1099	1.375	1.8409	-8.5753
2	6495.9119	0.0635	0.1155	2.214	1.8189	-13.1384
3	6501.7047	0.0671	0.1210	3.379	1.8033	-19.1403
4	6504.5639	0.0688	0.1237	1.363	1.7980	-7.5522
5	6507.3982	0.0704	0.1264	4.882	1.7955	-26.4726
6	6510.2076	0.0719	0.1291	1.915	1.7955	-10.1669
7	6512.9921	0.0733	0.1319	6.665	1.7995	-34.6339
8	6515.7516	0.0746	0.1347	2.539	1.8056	-12.9194
9	6518.4860	0.0756	0.1376	8.572	1.8201	-42.6983
10	6521.1953	0.0768	0.1407	3.165	1.8320	-15.4179
11	6523.8794	0.0777	0.1438	10.350	1.8507	-49.3319
12	6526.5384	0.0787	0.1471	3.693	1.8691	-17.2073
13	6529.1721	0.0796	0.1505	11.650	1.8907	-53.0562
14	6531.7805	0.0808	0.1541	4.002	1.9072	-17.8000
15	6534.3636	0.0820	0.1578	12.110	1.9244	-52.5997
16	6536.9214	0.0834	0.1618	3.977	1.9400	-16.8470
17	6539.4537	0.0852	0.1660	11.440	1.9484	-47.2351
18	6541.9606	0.0875	0.1705	3.539	1.9486	-14.2267
19	6544.4419	0.0903	0.1752	9.475	1.9402	-37.0674
20	6546.8978	0.0940	0.1801	2.675	1.9160	-10.1802
21	6549.3280	0.0985	0.1854	6.299	1.8822	-23.2867
22	6551.7327	0.1043	0.1910	1.448	1.8313	-5.1961
23	6554.1117	0.1114	0.1969	2.222	1.7675	-7.7347
24	6561.0943	0.1043	0.1910	4.441	1.8313	-15.9365
25	6563.3702	0.0985	0.1854	2.17	1.8822	-8.0223
26	6565.6203	0.0940	0.1801	8.385	1.9160	-31.9107
27	6567.8446	0.0903	0.1752	3.337	1.9402	-13.0548
28	6570.0429	0.0875	0.1705	11.340	1.9486	-45.5864

Peaks	Wave-number / cm ⁻¹	$\gamma_{\text{air}} / (1.01 \times 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{cm})^{-1}$	$\gamma_{\text{self}} / (1.01 \times 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{cm})^{-1}$	S / (10 ⁻²¹ cm/mol)	A (a. u.)	B /dB
29	6572.2152	0.0852	0.1660	4.117	1.9484	-16.9988
30	6574.3615	0.0834	0.1618	13.030	1.9400	-55.1966
31	6576.4818	0.0820	0.1578	4.456	1.9244	-19.3546
32	6578.5761	0.0808	0.1541	13.400	1.9072	-59.6003
33	6580.6442	0.0796	0.1505	4.380	1.8907	-19.9473
34	6582.6862	0.0787	0.1471	12.640	1.8691	-58.8953
35	6584.7020	0.0777	0.1438	3.977	1.8507	-18.9558
36	6586.6916	0.0768	0.1407	11.070	1.8320	-53.9262
37	6588.6550	0.0756	0.1376	3.369	1.8201	-16.7814
38	6590.5922	0.0746	0.1347	9.078	1.8056	-46.1922
39	6592.5030	0.0733	0.1319	2.677	1.7995	-13.9107
40	6594.3875	0.0719	0.1291	7.000	1.7955	-37.1636
41	6596.2456	0.0704	0.1264	2.004	1.7955	-10.8667
42	6598.0774	0.0688	0.1237	5.092	1.7980	-28.2140
43	6599.8828	0.0671	0.1210	1.418	1.8033	-8.0323
44	6601.6617	0.0653	0.1183	3.504	1.8116	-20.3014
45	6605.1401	0.0616	0.1128	2.285	1.8312	-13.8843
46	6608.5124	0.0578	0.1070	1.414	1.8512	-9.0576

2.2 波分复用系统方案

构成波分复用系统的方案大体上有三种。第一种是利用光纤光栅加环行器搭建系统,此方案由于器件集成度不够,导致分束合束器损耗大;第二种方案就是阵列波导光栅(AWG)组成系统,此方案虽然可以精确获得所需要的各信号波长且损耗很小,但需要定制器件而导致价格较高,这是因为气体的吸收峰通常不是通信波段的标准波长;第三种则为利用波分复用器的方案,优点在于可以直接利用光通信领域现有的器件,价格低廉,质量可靠,损耗和串扰较小。缺点在于由于波分复用器的合束分束波长已经由ITU-T确定^[25],如需定制特定波分复用器价格相对较贵。考虑购买器件的便利性,本文选用第三种方案搭建系统。

2.3 理论最大可监测点数

利用(8)式和表1中的数据可反推出常温常压条件下,系统最大可利用的吸收峰数。若要求最低可检测 $C_{\text{gas,min}}$ 为0.5%的乙炔(乙炔的低爆下限的20%),假定气室的有效长度 L 为20 cm,已知系统中使用的光谱仪检测灵敏度 $\alpha_{\text{gas,min}}(\lambda)$ 为0.2 dB,则可从表1中找出满足条件的吸收峰,此时满足条件的吸收峰数目为18个。倘若采用更高灵敏度的光谱仪,或是利用光放大器增益信号光功率,或光电倍增管来接收信号,都可增加系统监测点数。

3 实 验

按图2搭建了一个基于DWDM的乙炔3点监测系统。选出中心波长分别为1530.371,1532.830和1534.099 nm的3个乙炔强吸收峰,用上述3个吸收峰的中心波长分别标记传感点A点、B点和C点,并选出包含上述吸收峰的中心波长为1530.330,1532.680以及1534.250 nm 3个通道定制密集的波分复用器(DWDM1~3)。宽谱光源是一只中心波长在1548.04 nm,半峰全宽为60 nm的半导体光放大器(SOA),工作时的偏置电流为180 mA。其输出光经EDFA增益(输出功率约30 mW)后进入DWDM1,中心波长为1530.330 nm谱宽约0.8 nm(20 dB down)的窄带光透射过DWDM1并进入A传感点的气室,其他波长的光被DWDM1反射并顺次通过DWDM2和DWDM3,同样中心波长1532.680 nm及1534.250 nm谱宽约0.8 nm(20 dB down)的窄带光透射分别进入传感点B点和C点。剩余宽谱光被DWDM3反射并由光功率计接收,作为光源光功率的监控。进入A点、B点和C点的信号光通过各气室后,携带各点的乙炔浓度信息后经DWDM2和DWDM3合束最终被光谱仪(YOKOGAWA生产的AQ6317C)接收。在光谱仪上即可实时测得上述3个点对应的吸收峰峰值大小。图3为充入体积分数9.94%标准乙炔气体前

后光谱的对照,测得 A、B、C 三点的峰值吸收功率分别为 2.33、2.11 和 1.77 dB。而利用(8)式和表 1 即可以解得 3 个点的气体浓度对应为 10.06%、10.03%和 9.84%。分别用上述 3 个点对乙炔气样进行了 40 次测量,实际测量结果如表 2 中所示。其中 $\alpha_{\text{gas_avg}}$ 代表 40 次测量的吸收峰峰值的平均值,

$C_{\text{gas_avg}}$ 代表利用该系统测得的乙炔体积分数,3 个传感点各 40 次测量所得实验数据绘制成稳定性图,如图 4 所示。可见测量重复性很好且测量误差均小于 1.8%,误差的原因来自于温度(23 ± 1 °C)和气室中气压($1.01 \times 10^5 \sim 1.02 \times 10^5$ Pa)的变化^[26],以及光源光功率的不稳定(SOA 功率抖动小于 0.5 dB)等。

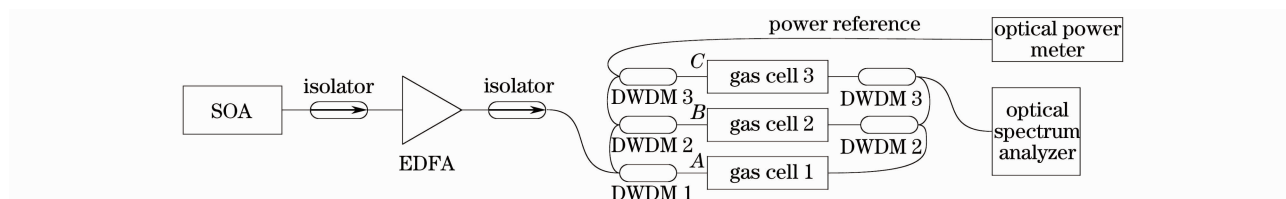


图 2 实验系统图

Fig. 2 System configuration

表 2 测量结果表

Table 2 Table of the test results

Sensor	A	B	C
Wave-number / (cm^{-1})	6518.4860	6523.8794	6534.3636
$\gamma_{\text{air}} / (1.01 \times 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{cm})^{-1}$	0.0756	0.0777	0.0820
$\gamma_{\text{self}} / (1.01 \times 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{cm})^{-1}$	0.1376	0.1438	0.1578
$S / (10^{-20} \text{ cm/mol})$	8.572	10.350	12.110
A (a. u.)	1.8201	1.8507	1.9244
B / dB	-10.6746	-12.3330	-13.1499
$\alpha_{\text{gas_avg}} / \text{dB}$	1.7605	2.1258	2.3243
$C_{\text{gas_avg}} / \%$	9.789	10.115	10.037
$f_{\text{error}} / \%$	-1.5222	1.7606	0.9770
Stability	0.0028	0.0023	0.0028

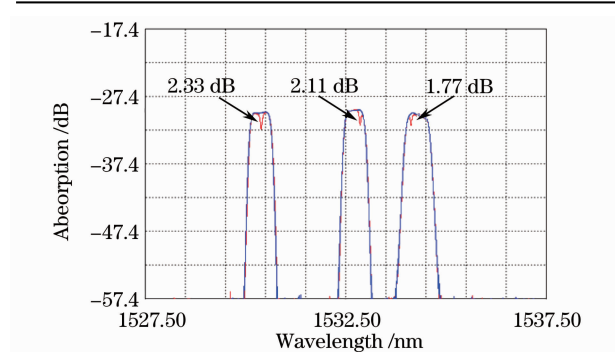


图 3 三传感点同时测量的实验光谱图

Fig. 3 Absorption spectra of measuring 3 points at one time

4 结 论

本文为考虑不同波长和吸收线型展宽的多点气体吸收传感技术提供了一种计算方法,并提出一种基于波分复用的多点气体检测系统。分析表明当目

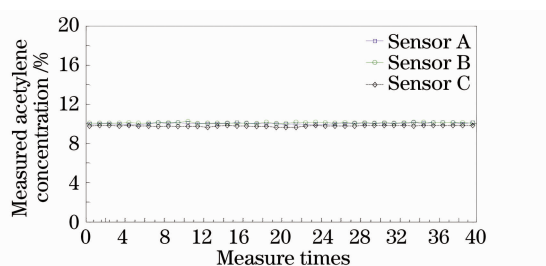


图 4 测量稳定性图(40次)

Fig. 4 Stabilities of the tests (40 measurements)

标检测灵敏度为 0.5% (乙炔低爆下限的 20%),气室有效光程为 20 cm,光谱仪的监测灵敏度为 0.2 dB 时,在 1510~1540 nm 范围内存在 18 个可用吸收峰,可搭建含 18 个传感点的基于波分复用技术的乙炔检测系统。综合考虑实验进度和器材,实际搭建了一套 3 个传感点的乙炔监测系统,各点测量误差均小于 1.8%。

参 考 文 献

- Inaba H., Kobayasi T., Hiramama M. *et al.*. Optical-fiber network system for air pollution monitoring over a wide area by optical absorption method [J]. *Electron. Lett.*, 1979, **15** (23): 749~751
- Udd E. *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*[M]. New York: John Wiley, 1991
- Wojtas J., Bielecki Z., Mikolajczyk J. *et al.*. Optoelectronic sensor for NO_x detection [C]. *Progress In Electromagnetics Research Symposium 2009, Beijing, China 2009*. 1088~1092
- Chu Fenghong, Cai Haiwen, Qu Ronghui *et al.*. Oxygen sensor based on U-shaped plastic optical fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1220~1223
初凤红,蔡海文,瞿荣辉等.基于U形塑料光纤的氧气传感器[J].*中国激光*, 2008, **35**(8): 1220~1223
- Nikiforova Y., Kapitanov A., Ponomarev N. *et al.*. Influence of ethylene spectral lines on methane concentration measurements with a diode laser methane sensor in the 1.65 μm region[J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **90**(2): 263~268
- Chan K., Ito H., Inaba H.. Optical remote monitoring of CH₄

- gas using low-loss optical fiber link and InGaAsP light-emitting diode in 1.33 μm region[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **43**(7): 634~636
- 7 Fu Songnian, Su Liguang, Wu Chongqing *et al.*. Application of correlation spectroscopy method to fiber gas sensor [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2002, **22**(6): 912~915
付松年, 苏立国, 吴重庆等. 相关光谱法在光纤气体传感中的应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2002, **22**(6): 912~915
- 8 Zhang Jingchao, Liu Jin, Wang Yutian *et al.*. Study on a novel optical fiber CO gas sensor [J]. *Journal of Optoelectronic Laser*, 2004, **15**(4): 428~431
张景超, 刘 瑾, 王玉田等. 新型光纤 CO 气体传感器的研究[J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(4): 428~431
- 9 Li Zhengying, Wang Honghai, Chen Songlin *et al.*. Phase-Synchronization using double optical-path technology in fiber optic gas sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 728~732
李政颖, 王洪海, 程松林等. 光纤气体传感的双光路相位保持方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 728~732
- 10 Peng Yong, Yu Qingxu. Tunable fiber laser based photoacoustic spectroscopy for acetylene detection [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, **29**(8): 2030~2033
彭 勇, 于清旭. 基于可调谐光纤激光器 C_2H_2 气体光声光谱检测[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, **29**(8): 2030~2033
- 11 Jia Dagong, Liu Kun, Jing Wencai *et al.*. Method of gas detection based on intra-cavity erbium-doped fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2384~2387
贾大功, 刘 琨, 井文才等. 基于环腔光纤激光器的气体检测方法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2384~2387
- 12 Ding Hui, Liang Jianqi, Xiong Zhihui *et al.*. Double FBG system for acetylene sensing based on differential absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 548~551
丁 晖, 梁建奇, 熊志辉等. 基于差分光谱吸收技术的双光纤光栅乙炔测量系统[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 548~551
- 13 Whitenett G., Stewart G., Yu H. B. *et al.*. Investigation of a tuneable mode-locked fiber laser for application to multipoint gas spectroscopy [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(3): 813~819
- 14 Stewart G., Yu H. B., Whitenett G. *et al.*. A mode-locked fibre laser system for multi-point intra-cavity gas spectroscopy [C]. OFS 15, USA 2002, 1: 257~260
- 15 Jin W.. Performance analysis of a time-division-multiplexed fiber-optic gas-sensor array by wavelength modulation of a distributed-feedback laser[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(25): 5290~5297
- 16 Ho H. L., Jin W., Demokan M. S.. Sensitive, multipoint gas detection using TDM and wavelength modulation spectroscopy [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(14): 1191~1193
- 17 Wu Chongqing, Wang Zhi, Yu Kuanglu *et al.*. Multi-point Methane Sensing System based on Fiber Optics Buffer, China: 200710176033.1[P]. [2008-03-12]
吴重庆, 王 智, 余观球等. 一种基于光纤缓存器的多点光纤瓦斯传感系统, 中国 200710176033.1[P]. [2008-03-12]
- 18 Miha Zavrsnik, George Stewart. Theoretical analysis of a quasi-distributed optical sensor system using FMCW for application to trace gas measurement[J]. *Sens. Actuators, B*, 2000, **71**(1-2): 31~35
- 19 Miha Zavrsnik, George Stewart. Coherence addressing of quasi-distributed absorption sensors by the FMCW method [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(1): 57~65
- 20 Fu Hua, Chen Baoshi, Sun Hongge. Optical fiber sensor system for methane based on WDM technology [J]. *Chinese J. Sensors and Actuators*, 2007, **20**(12): 2549~2552
付 华, 陈宝石, 孙红鹤. 基于波分复用技术的光纤甲烷传感系统研究[J]. *传感技术学报*, 2007, **20**(12): 2549~2552
- 21 Chan K., Ito H., Inaba H.. Remote sensing system for near-infrared differential absorption of CH_4 gas using low-loss optical fiber link [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **23**(19): 3415~3420
- 22 Pfeiffer P., Meyrueis P., Patillon D. *et al.*. Limiting sensitivity of a differential absorption spectrometer with direct detection in the $2\nu_3$ and $\nu_2+\nu_3$ vibration bands [J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2004, **53**(1): 45~50
- 23 K. Uehara. Alternate intensity modulation of a dualwavelength He-Ne laser for differential absorption measurements [J]. *Appl. Phys. B*, 1985, **38**(1): 37~40
- 24 L. S. Rothman, D. Jacquemart, A. Barbe *et al.*. The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database [J]. *J. of Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 2005, **96**(2): 139~204
- 25 Telecommunication Standardization Sector of International Telecommunication Unit, ITU-T Rec. G. 692. Transmission Media Characteristics-Characteristics of Optical Components and Sub-Systems[S]. 1998, 10
- 26 Chen Weigen, Yun Yuxin, Pan Chong. Analysis of infrared absorption properties of dissolved gases in transformer oil [J]. *Proc. CSEE*, 2008, **28**(16): 148~153
陈伟根, 云玉新, 潘 翀. 变压器油中溶解气体的红外吸收特性理论分析[J]. *中国电机工程学报*, 2008, **28**(16): 148~153