

文章编号:1001-9014(2009)01-0062-04

# 基于半导体激光器模式跳变的甲烷浓度检测方法研究

张悦, 张记龙, 李晓, 王志斌, 王鹏

(中北大学教育部仪器科学与动态测试重点实验室 山西省光电信息与  
仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051)

**摘要:**基于单模半导体激光器的模式跃变特性,用两个不同的驱动电流交替驱动激光器使其交替输出两个波长相近的激光,一个位于甲烷的一个窄带吸收峰处,被甲烷吸收;另一个错开稍许,不被甲烷吸收,用作参考光束.光束通过气体吸收室后,经光电转换输出方波电信号,两个波长光的强度分别对方波信号的顶部和底部,随甲烷浓度变化的光,与其相对应方波的顶部也将随着甲烷气体浓度的变化而变化;参考光束的光不被甲烷吸收,与其对应的方波的底部将不随甲烷气体浓度的变化而变化,于是方波的幅值与甲烷浓度成一一对应关系.由于二者的波长相近,当它们通过媒介气体时,尘埃引起的散射或者衰减基本相同,可以用数学方法将其消去.实验结果表明,该方法在不采用昂贵的数字锁相放大器,且气体吸收光程只有10cm的条件下,达到了0.05%的探测灵敏度.

**关键词:**分子光谱学;甲烷浓度检测;窄带吸收;半导体激光器跳模

**中图分类号:**0433.5+1 **文献标识码:**A

## METHOD OF METHANE CONCENTRATION DETECTION BASED ON THE MODE-HOPPING OF DIODE LASER

ZHANG Yue, ZHANG Ji-Long, LI Xiao, WANG Zhi-Bin, WANG Peng

(Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, North University of China,  
Engineering Technology Research Center of Shanxi Province for Photoelectric Information  
and Instrument, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Based on the mode-hopping of single mode diode laser, two different currents drive the laser alternately, the laser emits alternately two beam lights whose wavelength is differently, but closely. The first beam light's wavelength is at the absorption peak of methane. The second beam light's wavelength is a little shorter than the first one, which is not absorbed by methane, and it will serve as a reference light beam. The double beam will be converted into an electronic square wave after passing through the gas cell. The intensity of the double beam will correspond to the top and the bottom of the square wave respectively. The top of the square wave will vary if the methane concentration varies, but the bottom of the square wave will not vary because the intensity of the second light does not vary while methane concentration varying. Thus the amplitude of the square wave is proportion to the methane concentration. Because the two wavelengths are very close, the scatters or the losses caused by dust are almost the same after they passing through the methane, and they can be eliminated by mathematics. The result of experiment shows that the method can reach the sensitivity of 0.05% even without using a phase-locked amplifier and the absorption light path is only 10 centimeters.

**Key words:** molecule spectroscopy; methane concentration detection; narrow-band absorption; mode-hopping of diode laser

### 引言

甲烷浓度实时检测在煤矿安全生产中具有重要意义. 目前在我国矿井下广泛使用的甲烷检测的仪

器仍然采用无焰催化燃烧式传感器,这类传感器响应速度慢,校正周期短,我国现行煤炭生产安全规程规定,每两周必须对其校正一次;而且选择性差,其它可燃气体如CO, H<sub>2</sub>S等也可引起该仪器的响应.

收稿日期:2008-10-21, 修回日期:2008-12-18

Received date: 2008-10-21, revised date: 2008-12-18

基金项目:本项目由科技部国际合作项目(2006DFB72510),山西省国际合作项目(2006081015),山西省留学归国人员关键技术研究基金资助(2006.9),太原市科技兴市专项(07010709)资助

作者简介:张悦(1964-),男,山西大同市人,高级工程师,博士生,主要研究方向为痕迹气体检测.

红外光谱既能表征物质特性的宏观特性<sup>[1,2]</sup>,也能作为物质定性定量分析的有效手段<sup>[3]</sup>,特别是差分光学吸收谱法<sup>[4]</sup>、二次谐波法<sup>[5-7]</sup>等都可以实现甲烷浓度的高选择性和高灵敏度的测量,但由于这些方法使用上的限制,不能满足现场测量的需要.而且煤矿下的灰尘和湿度也使得这类仪器不能用于现场测量矿井下的甲烷.研究适用在井下的甲烷浓度检测方法具有重要意义.

## 1 甲烷浓度光谱吸收理论

当一束功率为  $I_1$ , 波长为  $\lambda_1$  的光通过甲烷气体时,由于甲烷气体对光的特征吸收,其光功率将按照比尔定律变化,

$$I(\lambda_1, l) = KI_1 \exp(-\alpha(\lambda_1)cl) \quad (1)$$

这里,  $K$  为与系统有关的常数,  $\alpha(\lambda)$  为甲烷气体在波长  $\lambda_1$  处的吸收系数,  $c$  为甲烷气体的体积浓度,  $l$  为光通过甲烷气体的光程长度. 考虑实际情况,在矿井下,被测甲烷气体中包含灰尘粒子、水分等成分,式(1)可修正为

$$I(\lambda_1, l) = KI_1 \exp(-(\alpha(\lambda_1)cl + \beta(\lambda_1)l + \gamma(\lambda_1)l + \eta(\lambda_1)l + \delta)) \quad (2)$$

式中,  $\beta(\lambda_1)$  为瑞利散射系数,  $\gamma(\lambda_1)$  为米氏散射系数,  $\eta(\lambda_1)$  为水分子及其它与波长有关的吸收系数,  $\delta$  为附加的与波长无关的不确定吸收因子.

同理,如果有另一束功率为  $I_2$ , 波长为  $\lambda_2$  的光同时通过甲烷气体,相应得有:

$$I(\lambda_2, l) = KI_2 \exp(-(\alpha(\lambda_2)cl + \beta(\lambda_2)l + \gamma(\lambda_2)l + \eta(\lambda_2)l + \delta)) \quad (3)$$

当系统所使用的波长  $\lambda_1 \approx \lambda_2$  时,按照米氏散射理论,有  $\beta(\lambda_1) \approx \beta(\lambda_2)$ ,  $\gamma(\lambda_1) \approx \gamma(\lambda_2)$ , 更进一步,选择的  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  远离水分及其它与波长有关的吸收峰时,并使  $\alpha(\lambda_2) = 0$ , 此时  $\eta(\lambda_1) = \eta(\lambda_2) = 0$ , 由式(2)与式(3)可以导出与灰尘及水分无关的被测甲烷气体浓度

$$c = \frac{(\ln(KI_1(\lambda_2)) - \ln(KI_1(\lambda_1))) - (\ln(I(\lambda_2, l)) - \ln(I(\lambda_1, l)))}{\alpha(\lambda_1)l} \quad (4)$$

通过查阅 HITRAN 2004 数据库,如图 1 所示,选择  $\lambda_1 = 1651.018\text{nm}$ , 并在其附近选择参考波长  $\lambda_2 = 1650.887\text{nm}$ , 即能满足上述之假定条件.

对于给定的系统,其初始状  $(\ln(KI_1(\lambda_2)) - \ln(KI_1(\lambda_1)))$  为固定常数,以  $Z_0$  表示,吸收系数  $\alpha(\lambda)$  与吸收光程  $l$  的乘积也是一个确定的值,以  $A$  表示,

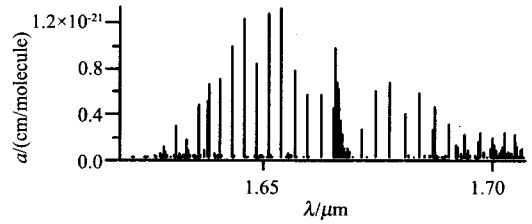


图1 甲烷吸收谱

Fig.1 The absorption spectrum of methane

对于随气体浓度变化的部分  $(\ln(KI(\lambda_2)) - \ln(KI(\lambda_1)))$ , 以  $Z$  表示, 则等式(4)可改写为

$$c = \frac{1}{A}(Z_0 - Z) \quad (5)$$

即  $c$  和  $Z$  成线性对应关系,用已知的浓度  $c$  对  $Z$  进行标定后,通过测量  $Z$  可以测出气体浓度  $c$ .

## 2 单模半导体激光器模式跳变级双波长输出

根据半导体激光器原理,激光器中的活性物质的受激辐射波长取决于半导体该物质的禁带宽度  $\Delta E_g$

$$\lambda = \frac{hv}{\Delta E_g} = \frac{1240.6}{\Delta E_g} (\text{nm}) \quad (6)$$

$$\Delta E_g = \Delta E_{g0}(1 - \alpha T) \quad (7)$$

其中,  $\Delta E_{g0}$  是在  $T=0\text{K}$  时的禁带宽度,  $\alpha$  为温度系数 ( $\alpha > 1.10\text{K}^{-1}$ ). 即受激辐射波长随着温度的升降而变化. 然而导带有一定的宽度,活性物质受激后,并不只辐射单一波长的光,受谐振腔中驻波条件(8)的约束,

$$2n_g L = m\lambda \quad (8)$$

这里,  $n_g$  为激活区折射率,  $m$  为整数,  $L$  为激光器谐振腔腔长.

激光器的输出波长并不随温度的改变而立即改变,即:在一定的范围内,激光器的输出波长,维持不变,具有一定的稳定性. 但超出稳定范围时,将跳至另外一个波长,即纵模跳变,相邻两个波长的间隔是式(9)

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2n_g L} \quad (9)$$

由于 PN 结的电阻作用,当有电流流过时,会产生热量,激光器波长随驱动电流的变化与温度类似,考虑到波长调整的方便性和及时性,可以采用调整驱动电流的方式改变激光器的输出波长,下图是我们采用日本 Anritsu Corporation 的 AB6A1052J510F 单模激光器,在不同的电流调制下的波长输出特性的实验结果,跳模分别发生在 23.8mA 和 46.8mA 处,输出波长分别为 1650.756nm、1650.887nm 以及 1651.018nm,跳模间隔为 0.131nm,其中 1650.887nm

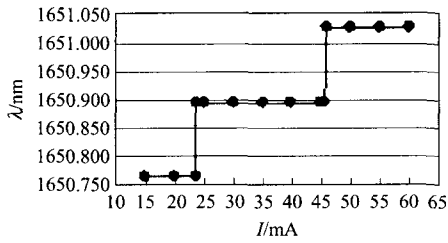


图2 电流与波长的关系

Fig. 2 The relationship between the driving current and wavelength of the laser

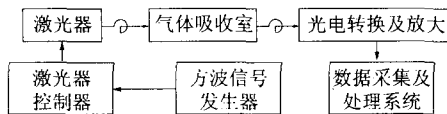


图3 系统原理框图

Fig. 3 The block diagram of the system

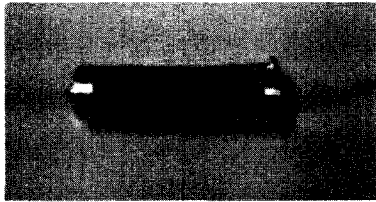


图4 气体吸收单元

Fig. 4 Absorption cell

处为甲烷吸收峰,即采用两个不同的驱动电流交替驱动激光器即可使该激光器交替输出两个波长。

### 3 基于跳模的单激光器双波长检测甲烷浓度的检测实验及结果

#### 3.1 系统原理

参见图3,方波信号发生器使激光器控制器驱动激光器交替产生波长为1650.887nm和1651.018nm的激光,通过光纤进入气体吸收室被气体吸收后,再通过光纤进入光电转换器经光电转换放大后,被数据采集及处理系统进行数据处理。

#### 3.2 实验及精度分析

将光程长度为10cm的气体吸收单元(图4)置于体积为3735cm<sup>3</sup>的密闭盒内,先充入99.99%的氮气后,记录下系统初态 $Z_0$ ,再用体积为10cm<sup>3</sup>的注射器,每次充入2cm<sup>3</sup>的99.8%的甲烷(相当于0.05%),共计20次,记录下系统的相应输出 $Z$ ,应用最小二乘法计算出系统常数 $A$ 和 $Z_0$ 后,再重复上述实验,对系统给定一系列的标准浓度,并记录相应的输出(表1中的测量浓度),然后用excel的数据分析工具进行

表1 试验数据

Table 1 Data of experiment

序号	实际浓度(%)	测量浓度(%)
1	0	0.00
2	0.05	0.04
3	0.1	0.09
4	0.15	0.16
5	0.2	0.22
6	0.25	0.24
7	0.3	0.29
8	0.35	0.36
9	0.4	0.39
10	0.45	0.46
11	0.5	0.49
12	0.55	0.55
1	0.6	0.62
14	0.65	0.64
15	0.7	0.73
16	0.75	0.77
17	0.8	0.81
18	0.85	0.84
19	0.9	0.87
20	0.95	0.95
21	1.00	1.01

表2 回归统计

Table 2 Regression statistical analysis

	相关系数
判定标准	0.998809592
修正后判定标准	0.997495369
标准误差	0.015516695
观测值	21

回归分析,分析结果见表2,系统测量值与给定值的相关度为0.9988,具有很强的相关性,标准误差为0.015,说明该系统达到了0.05%的探测精度。

### 4 结论

通过理论与实验研究表明,基于单模半导体激光器的跳模机理,一个特定的方波驱动电流可以使同一激光器输出两个波长相近的激光,这两个波长的光分别对应甲烷的吸收峰和非吸收峰,采用光谱吸收及差分原理可以消除灰尘、水分等影响.本文采用日本Anritsu Corporation的AB6A1052J510F单模半导体激光器,用偏置方波驱动电流使其交替输出波长为1650.887nm和1651.018nm的两束激光.试验表明,该系统在没有采用锁相放大器的情况下,也达到了0.05%的甲烷浓度探测精度.如采用更长的光腔,分辨率可进一步提高,更换不同中心波长的激光器,即可对不同的气体进行测量。

## REFERENCES

- [1] TAN Ke-Long, ZHOU Ri-Ping, WAN Yu-Qing, *et al.* Remote sensing monitoring method of hyper spectral and high-resolution for underground coal bed combustion[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (谭克龙, 周日平, 万余庆, 等. 地下煤层燃烧的高光谱及高分辨率遥感监测方法. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(5): 349—358.
- [2] GUAN Li, HUANG Hung-Lung, Array co-registration error of airs[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (官莉, Huang Hung-Lung, 大气红外探测仪的探测器序列定位误差. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(2): 153—156.
- [3] HE Jin-Cheng, YANG Xiang-Long, WANG Li-Ren. Path length selection of determining the chemical oxygen demand (COD) in wastewater by using near-infrared transmission spectra[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (何金成, 杨祥龙, 王立人. 近红外光谱透射法测量废水化学需氧量(COD)的光程选择. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(4): 317—320.

(上接第 49 页)

这种关系没有出现. 说明随着能见度的减小, 其对邻近效应的影响也呈现复杂化.

(3) 在其他条件不变的情况下, 对比度越大, 邻近效应越明显.

(4) 暗像元在亮背景下的邻近效应比亮像元在暗背景下的邻近效应明显.

邻近效应是由背景辐射场通过大气散射进入传感器引起的, 这部分影响是一个非常复杂的过程. 尤其是当大气较混浊或地表不均一的情况下, 大气中多次散射占很重要的地位, 这时邻近效应的影响更为复杂. 文中只考虑了同一大气模式下不同条件对邻近效应的影响, 其实大气的成分是很复杂的, 如气溶胶, 由于其产生的原因千差万别, 所以其组成成分、光学特征、粒子形状、尺度谱以及其数密度随高度的分布等要素随时随地都有极大的变化, 这些因素的不同均会对邻近效应产生不同程度的影响, 这些均需要进行更深入的研究.

## REFERENCES

- [1] YIN Qiu, KUANG Ding-Bo. Views on chinese remote sensing development[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (尹球, 匡定波. 促进遥感发展的几点思考. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(3): 225—231.
- [2] SHEN Yuan-Ting, NI Guo-Qiang, XU Da-Qi, *et al.*

- [4] Lee J S, Kuk B J, Kim Y J. Development of a differential optical absorption spectroscopy (DOAS) system for the detection of atmospheric trace gas species; NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, and O<sub>3</sub> [J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2002, **41**(5): 693—698.
- [5] DONG Lei, MA Wei-Guang, YIN Wang-Bao, *et al.* Experimental study on harmonic detection of methane by use of a digital lock-In Amplifier[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (董磊, 马维光, 尹王保, 等. 利用数字锁相放大器对甲烷气体进行谐波探测的实验研究. *光谱学与光谱分析*), 2005, **23**(3): 473—476.
- [6] Linnerud I, Kaspersen P, Jæger T. Gas monitoring in the process industry using diode laser spectroscopy[J]. *Appl. Phys. B*, 1998, **67**(3): 297—305.
- [7] Liu J T C, Jeffres J B, Hason R K. Wavelength modulation absorption spectroscopy with 2 f detection using multiplexed diode lasers for rapid temperature measurements in gaseous flows[J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **78**(3—4): 503—511.

Study on gas exploration by hyperion hyperspectral remote sensing data[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (沈渊婷, 倪国强, 徐大琦, 等. 利用 Hyperion 短波红外高光谱数据勘探天然气的研究. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(3): 210—213, 223.

- [3] YANG Gui-Jun, LIU Qin-Huo, LIU Qiang, *et al.* Adjacency effect analysis in image simulation of high resolution mid-infrared (3 ~ 5 μm) remote sensing[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杨贵军, 柳钦火, 刘强, 等. 高分辨率中红外遥感 (3 ~ 5 μm) 成像模拟中邻近效应分析. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(3): 233—240.
- [4] Singh S M. Estimation of multiple reflection and lowest order adjacency effects on remotely-sensed data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1988, **9**(9): 1433—1450.
- [5] Otterman J, Fraser R S. Adjacency effects on imaging by surface reflection and atmospheric scattering - cross radiance to zenith[J]. *Applied Optics*, 1979, **18**(16): 2852—2860.
- [6] Lyapustin A I, Kaufman Y J. Role of adjacency effect in the remote sensing of aerosol[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2001, **106**(D11): 11909—11916.
- [7] Ma J W, Li X W, Chen X, *et al.* Target adjacency effect estimation using ground spectrum measurement and Landsat-5 satellite data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, **44**(3): 729—735.
- [8] Kaufman Y J. Atmospheric effect on spatial-resolution of surface imagery[J]. *Applied Optics*, 1984, **23**(22): 4164—4172.
- [9] Liang S L, Fang H L, Chen M Z. Atmospheric correction of landsat ETM + land surface imagery - Part I: Methods[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, **39**(11): 2490—2498.