

doi: 10.3788/gzxb20144304.0428002

一种差分吸收式光纤瓦斯传感系统

荆耀秋¹, 江毅¹, 肖尚辉^{2a}, 江艳^{2b}

(1 北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

(2 宜宾学院 a. 物理与电子工程学院; b. 实验与教学资源管理中心, 四川 宜宾 644000)

摘要: 基于差分吸收法, 研究了一种光纤瓦斯传感系统. 采用双波长参考测量法, 选取输出波长为 1 551 nm 的分布式反馈半导体激光器作为参考光源, 输出波长为 1 653 nm 的激光器作为甲烷气体的吸收峰处光源, 通过改变甲烷气体吸收峰处激光器的输出波长, 使其扫描到甲烷气体的吸收峰, 通过比较吸收峰处和没有吸收峰处的光功率, 测得甲烷气体浓度的分辨率达到 0.038%. 实验结果表明该系统的分辨率高、稳定性好、抗干扰能力强, 可用于对煤矿瓦斯气体的检测.

关键词: 甲烷; 光纤传感; 差分吸收; 波长扫描

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)04-0428002-4

A Differential Absorption Based Optical Fiber Methane Gas Sensing System

JING Yao-qiu¹, JIANG Yi¹, XIAO Shang-hui^{2a}, JIANG Yan^{2b}

(1 School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(2 a. School of Physics and Electronic Engineering; b. Experiment and Teaching Resource Management Center, Yibin University, Yibin, Sichuan 644000, China)

Abstract: Optical fiber methane gas sensing system based on differential absorption was investigated. Two distributed feedback laser diodes were used in the system. The wavelength of the reference light source was 1551nm and the wavelength of the measurement light source was 1653nm, which was located around the absorption peak wavelength of methane. The methane absorption peak was detected by scanning the wavelength of the measurement light source, and then the concentration of methane was measured by comparing the output power at the absorption peak with that not at the absorption band. The system possesses the properties of high resolution, good stability and a measurement resolution of 0.038% is achieved for methane detection.

Key words: Methane; Fiber optic sensors; Differential absorption; Wavelength scanning

OCIS Codes: 280.4788; 060.2370; 120.3930

0 引言

瓦斯是一种无色、无味、易燃、易爆的气体, 其主要成分是甲烷. 在我国, 因瓦斯爆炸而引起的事故给人民的生命安全造成了巨大的损害, 因此减少或避免瓦斯爆炸事故成为一项迫切的任务. 准确、快速、实时地对瓦斯气体的浓度进行监测和预警, 对煤矿的安全生产、人身安全以及环境保护有着重要的作用.

传统检测甲烷气体法主要有催化燃烧法、半导体气敏法、红外光谱法和气相色谱法等^[1]. 近年来, 随着

光纤传感技术的迅速发展, 利用光纤传感器来测量甲烷气体浓度的技术也成为检测甲烷气体的重要方法. 由于光纤传感器具有灵敏度高、响应速度快、不受电磁干扰、体积小、耐腐蚀、防燃防爆, 可以在恶劣危险的环境下可靠工作等优点, 因此引起许多科技工作者的研究热情.

目前, 基于甲烷气体对近红外光谱吸收的原理, 国内外常用的光纤瓦斯测量技术主要有: 1) 宽带光源滤波测量法^[2-4]. 由于宽带光源发光二极管 (Light-Emitting Diode, LED) 的谱宽比气体吸收线宽大得多,

基金项目: 四川省科技厅科技支撑项目 (No. 2011GZ0254) 资助

第一作者: 荆耀秋 (1987-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感器的研制. Email: jingyaoqiu@163.com

导师 (通讯作者): 江毅 (1967-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为光纤传感及光电子技术等. Email: bitjy@bit.edu.cn

收稿日期: 2013-07-22; 录用日期: 2013-10-10

<http://www.photon.ac.cn>

因此可以使用干涉滤光片或光纤光栅对宽带光源进行滤光,提取需要的波长,这一技术的优势在于可以同时测量多种气体浓度,但信噪比低,稳定性较差. 2) 双波长参考测量法^[5]. 即两个波长的光同时注入一根光纤,一个波长在瓦斯气体的吸收峰上,另一个波长不被矿井中任何气体吸收,它们同时通过气室,在接收端用滤波器分开,分别探测其光强,这一技术不但可以消除光源波动和光电器件参数漂移的影响,还可以克服外界共模干扰的影响. 3) 基于波长扫描技术测量法^[6]. 宽带光源经过光纤可调谐 Fabry-Perot 滤波器 (Fiber Fabry-Perot Tunable Filter, FFP-TF) 后,输出波长扫描光,用吸收峰处波长和某一参考波长(此波长处没有吸收)的光强之比进行测量,实际上是一种双波长参考测量法,这一技术可以灵活地选取参考波长,但信噪比低. 4) 谐波检测法^[7-8]. 它是将注入气室的激光锁定在甲烷的吸收波长上,同时正弦调制激光器的输出波长,用输出光的二次谐波和一次谐波的比值进行测量,这一技术难度大,但抗干扰能力强,适合用于矿井瓦斯的长期连续测量. 本文采用输出波长分别为 1551nm 和 1653nm 的两个分布式反馈半导体激光器 (Distributed Feedback Laser Diode, DFB LD) 作为光源,基于波长扫描技术的双波长参考测量法,设计了一种光纤瓦斯传感系统,测量瓦斯气体的分辨率达到 0.038%.

1 差分吸收检测原理

当系统光源发出的光通过待测气体时,考虑到光路中各种因素的干扰,出射光强与入射光强的关系满足 Lambert-Beer(朗伯-比尔)定律,即

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda)cL + \beta(\lambda)] \quad (1)$$

式中, $I(\lambda)$ 为出射光强, $I_0(\lambda)$ 为入射光强, $\alpha(\lambda)$ 为一定波长下单位浓度、单位作用长度介质的吸收系数, $\beta(\lambda)$ 为光路干扰系数, L 为待测气体与光相互作用的长度, c 为待测气体的浓度.

由于系统所采用的光源往往不稳定,会存在一定的波动,为消除此影响,可将光源分出一路(不通过待测气体)作为基准光路,其输出强度记为 $I_d(\lambda)$,再将两者 $I(\lambda)$ 和 $I_d(\lambda)$ 作比,记为光强比 $R(\lambda)$,此时还应该包含一个比例系数 K ,则

$$R(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{I_d(\lambda)} = K(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda)cL + \beta(\lambda)] \quad (2)$$

式中 $K(\lambda)$ 与 $I(\lambda)$ 和 $I_d(\lambda)$ 两个光路的效率、系统光器件损耗以及光电转换效率有关.

因为光路的干扰系数 $\beta(\lambda)$ 是一个随机量,它受光纤传输路径上的损耗、连接头损耗、气室中的粉尘和水雾等因素影响,不是一个确定数值,所以仅从式(2)来计算待测气体的浓度 c 是困难的. 为此采用两个波长 (λ_1, λ_2) 参考测量的差分吸收方法,两个波长相隔较近但在吸收系数上有很大差别,波长为 λ_1 和 λ_2 的光束同

时通过待测气体时,则^[9-10]

$$R(\lambda_1) = \frac{I(\lambda_1)}{I_d(\lambda_1)} = K(\lambda_1) \exp[-\alpha(\lambda_1)cL + \beta(\lambda_1)] \quad (3)$$

$$R(\lambda_2) = \frac{I(\lambda_2)}{I_d(\lambda_2)} = K(\lambda_2) \exp[-\alpha(\lambda_2)cL + \beta(\lambda_2)] \quad (4)$$

通过式(3)和(4)作比,可以得到待测气体的浓度 c 为

$$c = \frac{1}{[\alpha(\lambda_1) - \alpha(\lambda_2)]L} \left\{ \ln \frac{K(\lambda_1)}{K(\lambda_2)} - \ln \frac{R(\lambda_1)}{R(\lambda_2)} - [\beta(\lambda_2) - \beta(\lambda_1)] \right\} \quad (5)$$

由于两束光的波长接近,而且同时通过待测气体,因此可以认为外界对它们的影响相同,有 $\beta(\lambda_1) \approx \beta(\lambda_2)$,则式(5)可以简化为

$$c = \frac{1}{[\alpha(\lambda_1) - \alpha(\lambda_2)]L} \left[\ln \frac{K(\lambda_1)}{K(\lambda_2)} - \ln \frac{R(\lambda_1)}{R(\lambda_2)} \right] \quad (6)$$

实验中,波长 λ_1 对应待测气体的吸收峰,波长 λ_2 则偏离该吸收峰,为参考波长. 系统确定后,光路的效率为一个定值,系统光器件损耗及光电转换效率只与波长有关,在小范围内波动时可近似为定值,则 $K(\lambda_1)/K(\lambda_2)$ 近似为一个定值;气体与光相互作用的长度 L 以及气体的吸收系数 $\alpha(\lambda_1)$ 、 $\alpha(\lambda_2)$ 均为已知量,则待测气体的浓度 S 就只与 $R(\lambda_1)/R(\lambda_2)$ 的值有关,记为

$$S = R(\lambda_1)/R(\lambda_2) \quad (7)$$

2 传感系统

差分吸收式光纤瓦斯传感系统原理如图 1,系统采用由奥康光通器件有限公司提供的输出波长 λ_1 为 1 653 nm(在甲烷气体的吸收峰处)和 $\lambda_2 = 1 551$ nm(不在甲烷气体的吸收峰处)的两个 DFB-LD 作为光源,两个激光器发出的光首先通过耦合器 1 和耦合器 2 被各分出一路分别由 PD₁ 和 PD₁ 直接进行探测并作放大滤波处理,其余两路经波分复用 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 器 WDM₁ 合波后进入气室,形成两个不同波长光的共光路系统,气室输

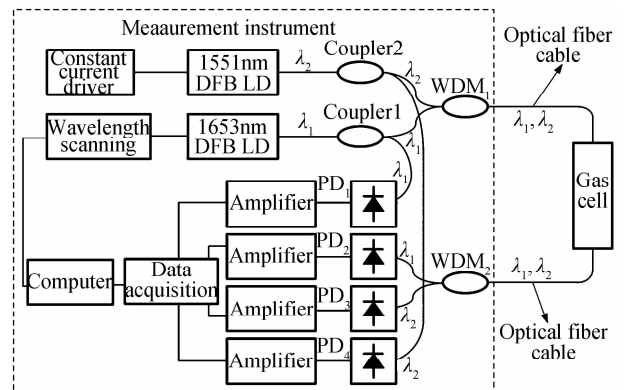


图 1 系统原理

Fig. 1 Schematic diagram of the optical fiber methane gas sensing system

出光再由波分复用器 WDM₂ 分波,得到该两路光,分别由 PD₂ 和 PD₃ 进行探测并作放大滤波处理,最后利用 UA302 系列采集器将四路数据采集到计算机进行分析计算。

对于输出波长为 1 551 nm 的激光器而言,作为参考光,必须保证其输出功率的稳定,然而受外界环境等因素的影响,光源本身会存在一定的波动,因此,可以将采集到的 PD₃ 和 PD₄ 两路数据对比,得到式(4)中的 $R(\lambda_2)$,即 $R_{1551\text{nm}}$,达到消除光源本身影响的效果;而对于输出波长为 1 653 nm 的激光器,为了找到甲烷气体的吸收峰,可以周期性地改变激光器的驱动电流,使其输出扫描的波长,在波长扫描的范围内存在甲烷气体的吸收峰^[11-14]。同样地,可以将采集得到的 PD₂ 和 PD₁ 两路数据对比,得到式(3)中的 $R(\lambda_1)$,即 $R_{1653\text{nm}}$,消除光源由于光强变化所引起的波动影响,而 $R_{1653\text{nm}}$ 中包含甲烷气体浓度的信息,将得到的 $R_{1653\text{nm}}$ 与 $R_{1551\text{nm}}$ 对比,得到

$$S = \frac{R_{1653\text{nm}}}{R_{1551\text{nm}}} \quad (8)$$

由于系统结构及器件参数均为对称,两束光的波长接近,则两者比值 $K_{1653\text{nm}}/K_{1551\text{nm}}$ 近似为 1,那么式(6)变为

$$c = -\frac{1}{[\alpha(\lambda_1) - \alpha(\lambda_2)]L} \ln S \quad (9)$$

则通过 S 的值可以获得待测气体的浓度。

3 实验结果与分析

采用如图 1 所示的光纤瓦斯传感系统,在常压和室温下进行实验。首先对标准浓度为 3.04% 的甲烷气体(甲烷与空气的混合气体)进行检测,连接系统,待其工作稳定后将气体通入气室,检测得到的实验结果如图 2。相同条件下,再对纯净的空气进行检测,得到的实验结果如图 3。

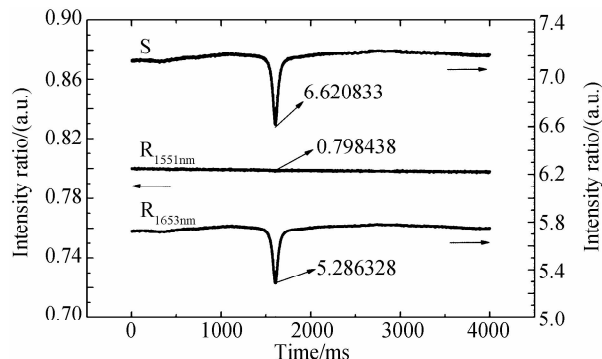


图 2 检测标准浓度为 3.04% 的甲烷与空气的混合气体时,输出强度比随时间的变化关系

Fig. 2 The relationship between the output intensity ratio and time when we measure the standard gas of 3.04% methane

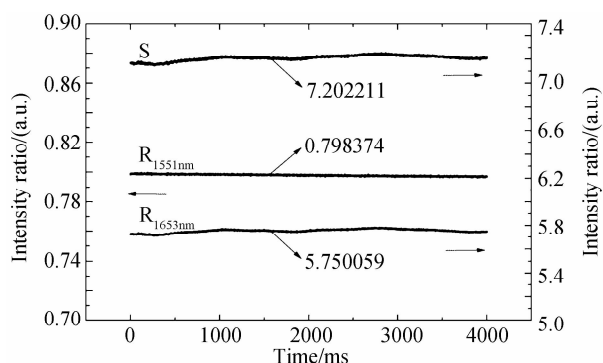


图 3 检测纯净空气时,输出强度比随时间的变化关系

Fig. 3 The relationship between the output intensity ratio and time when we measure the pure air

由图 2 可以看出,当检测标准浓度为 3.04% 的甲烷与空气的混合气体时,输出波长为 1 653 nm 激光器进行波长扫描,由于甲烷气体对扫描范围内的某个波长有特定的吸收,因此,在这个特定波长处,输出强度比 $R_{1653\text{nm}}$ 的值有明显下降,即存在甲烷气体的吸收峰。此时有

$$S_{\text{混合气体}} = 6.620833 \quad (10)$$

当对纯净空气进行检测时,由于待测气体中不含甲烷气体,因此,实验结果中不存在甲烷气体的吸收峰,即甲烷气体的浓度为 0,如图 3 所示,此时

$$S_{\text{纯净空气}} = 7.202211 \quad (11)$$

$S_{\text{混合气体}}$ 和 $S_{\text{纯净空气}}$ 的值分别对应着浓度为 3.04% 和 0 的甲烷气体。进一步的实验中,可通过对多种已知浓度甲烷气体的测量,对系统(即 S)进行标定,进而实现瓦斯气体的实时测量。

对标准浓度为 3.04% 的甲烷与空气的混合气体进行重复检测,测量得到 S 的值如图 4,可以得到 $\Delta S \leq 0.016677$,稳定性好,计算得到 S 的标准差 $\sigma \approx 3.65286 \times 10^{-3}$,则测量得到 S 的分辨率为 $2\sigma \approx 7.30571 \times 10^{-3}$,采用线性分析有^[15]

$$\frac{\text{测量 } S \text{ 的分辨率}}{|S_{\text{纯净空气}} - S_{\text{混合气体}}|} = \frac{\text{测量甲烷气体浓度的分辨率}}{|0 - 3.04\%|} \quad (12)$$

代入数据计算得到测量甲烷气体浓度的分辨率为 0.038%。由于实验室只有一种浓度的标准气体,不能做出光谱吸收强度与瓦斯浓度的关系曲线,但从重复性实验的结果来看,这一传感系统具有较高的瓦斯浓度测量分辨率。

在测量实验的基础上,通过增大气室光路的损耗,模拟出了长时间进行煤矿瓦斯检测时气室中粉尘、水雾等对光路的影响,对标准浓度为 3.04% 的甲烷与空气的混合气体进行检测,对应损耗的不同,测量得到的 S 值及测量浓度值如图 5。

以正常实验条件(图 4 结果的实验条件)下测量得到的 $S_{\text{混合气体}} = 6.62$ 为基准,认为此时气室光路的损耗

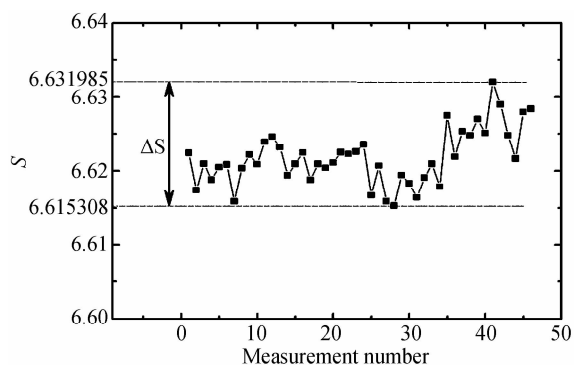


图4 重复测量标准浓度为3.04%的甲烷与空气的混合气体得到的S值

Fig. 4 The different value of S when we repeat measuring the standard gas of 3.04% methane

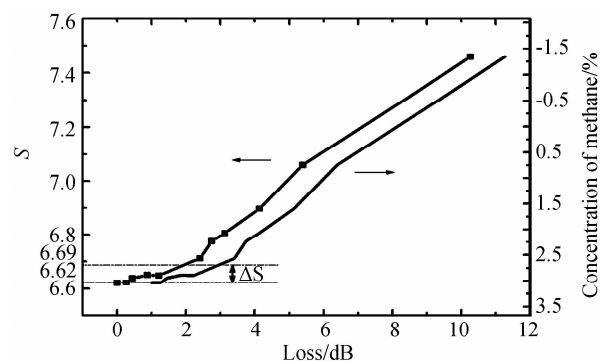


图5 不同损耗下,测量标准浓度为3.04%的甲烷与空气的混合气体得到的S值及测量浓度值

Fig. 5 The different value of S and the concentration of methane with different losses when we measure the standard gas of 3.04% methane

为0 dB,如图5。当气室光路损耗逐渐增大时,测量得到的S值总体上也逐渐变大,测量浓度值逐渐变小。

在损耗为0~2 dB的范围内时,测量得到的S值相对稳定, $\Delta S \approx 0.07$,其对应测量浓度的误差为 $\pm 0.37\%$;在损耗为2 dB~10 dB的范围内时,测量得到的S值变化明显,这是由于系统中的光器件及放大滤波电路等并非绝对对称、检测波长与参考波长并非十分接近的影响,则对应的测量浓度值将不再准确。

因此,气室光路的损耗在小范围内变化时,系统测量得到的S值相对稳定,误差小,则对应的测量浓度值准确,抗干扰能力强。

4 结论

研究并搭建了一种差分吸收式光纤瓦斯传感系统,实现了通过扫描DFB LD工作波长来扫描甲烷气体吸收峰,进而测量得到甲烷气体浓度的方法,获得测量甲烷气体浓度的分辨率为0.038%。实验结果表明该系统的分辨率高、稳定性好、抗干扰能力强,可用于对煤矿瓦斯气体的检测。进一步研究气室的结构、光源的稳定技术等对系统的影响,以及缩小检测波长与参考波长的间隔,可以提高该系统的稳定性和可靠性。

参考文献

- [1] CHAI Hua-peng, FENG Feng, BAI Yun-feng, *et al.* Advances in Methane Sensor[J], *Journal of Shanxi Datong University(Natural Science)*, 2009, **25**(3): 27-31. 柴化鹏, 冯锋, 白云峰, 等. 瓦斯传感器的研究进展[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2009, **25**(3): 27-31.
- [2] CHAN K, ITO H, INABA H. Remote sensing system for near-infrared differential absorption of CH₄ gas using low-loss optical fiber link[J]. *Applied Optics*, 1984, **23**(19): 3415-3420.
- [3] WANG Yu-tian, GUO Zeng-jun, WANG Li-tian. Study on transmission-type optical fiber CH₄ sensor [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2001, **22**(2): 147-151. 王玉田, 郭增军, 王莉田. 透射式光纤甲烷气体传感器的研究[J]. 传感技术学报, 2001, **22**(2): 147-151.
- [4] LIN Feng, CAI Hai-wen, XIA Zhi-ping, *et al.* Study on fiber methane sensing system using FBG filters[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, **32**(4): 549-552. 林枫, 蔡海文, 夏志平, 等. 光纤光栅滤波的瓦斯传感系统的研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(4): 549-552.
- [5] FENG Ming-kun, SUI Cheng-hua. Research on performance of two-wave-length optical spectral[J], *Journal of Transducer Technology*, 2005, **24**(12): 16-18. 丰明坤, 隋成华. 双波长光谱法光纤甲烷传感器性能的研究[J]. 传感器技术, 2005, **24**(12): 16-18.
- [6] JIANG Yi, TANG Cai-jie. An optical fiber methane sensing system employing a two-step reference measuring method[J]. *Sensors & Actuators B*, 2008, **133**(1): 174-179.
- [7] REID J, LABRIE D. Second-harmonic detection with tunable diode lasers-comparison of experiment and theory[J]. *Applied Physics B*, 1981, **26**(3): 203-210.
- [8] CAO Jia-nian, ZHANG Ke-ke, WANG Zhuo, *et al.* Research on a fiber-optical methane sensor based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J], *Journal of Harbin Engineering University*, 2011, **32**(3): 366-371. 曹家年, 张可可, 王琢, 等. 可调谐激光吸收光谱光纤甲烷传感器研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, **32**(3): 366-371.
- [9] WANG Yu-tian, GUO Zeng-jun, WANG Li-tian. Study on difference absorption optical fiber CH₄ sensor [J]. *Optoelectronics · Laser*, 2001, **12**(7): 675-678. 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.
- [10] WU Bing-bing, Lü Yao, DAI Ji-zhi, *et al.* Research on optical fiber gas sensor detection technology[J]. *Laser & Infrared*, 2009, **39**(7): 707-712. 吴兵兵, 吕垚, 戴基智, 等. 光纤气体传感检测技术研究[J]. 激光与红外, 2009, **39**(7): 707-712.
- [11] SHIMOSE Y, OKAMOTO T, MARUYAMA A, *et al.* Remote sensing of methane gas by differential absorption measurement using a wavelength tunable DFB LD[J]. *IEEE Photonics Technology Letter*, 1991, **3**(1): 86-87.
- [12] NI Jia-sheng, CHANG Jun, LIU Tong-yu, *et al.* Fiber methane gas sensor and its application in methane outburst prediction in coal mine[J]. *Journal of Electronic Science and Technology of China*, 2008, **6**(4): 373-376.
- [13] WANG Shu-tao, CHE Ren-sheng. Novel spectrum absorption fiber methane sensor with DFBLD[C]. *Photonics Asia 2004*. International Society for Optics and Photonics, 2005: 619-626.
- [14] LI Sanguo, ZHANG Yan, KOSCICA T, *et al.* Near-infrared fiber optics gas sensor for remote sensing of CH₄ gas in coal mines[C]. *SPIE*, 2006, **6299**(0Q): 1-8.
- [15] ZHANG Ying, WANG Hai-rong, GAO Xian-ni, *et al.* Methane sensing system based on infrared absorption[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2008, **30**(2): 156-158. 张英, 王海容, 高鲜妮, 等. 红外吸收式光纤甲烷气体传感系统的研究[J]. 压电与声光, 2008, **30**(2): 156-158.