

基于 ZnO 薄膜光学温变特性的反射式光纤 温度传感器

夏娟 隋成华 刘玉玲 徐天宁

(浙江工业大学理学院应用物理系, 浙江 杭州 310023)

摘要 基于 ZnO 薄膜吸收光谱的温变特性,设计了一种反射式光纤温度传感器。该传感器以镀于蓝宝石三棱镜面上的 ZnO 薄膜作为敏感材料,采用三棱镜、凸透镜和位于凸透镜焦点处的光纤端面相配合的结构以及相应的反射式光路。室温至 500 °C 范围测试实验表明,所设计的传感器的温度曲线线性拟合度达 99.3% 以上,灵敏度优于 0.05 nm/°C。该传感器的理论测温范围可达 10 K~1000 K,稳定性高,适用于实际工作环境中的宽温变范围温度测量。

关键词 传感器;反射式光纤温度传感器;ZnO 薄膜;温变特性;蓝宝石三棱镜

中图分类号 TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0205003

Reflective Optical Fiber Temperature Sensor Based on Temperature-Dependent Optical Properties of ZnO Film

Xia Juan Sui Chenghua Liu Yuling Xu Tianing

(Department of Applied Physics, College of Science, Zhejiang University of Technology,
Hangzhou, Zhejiang 310023, China)

Abstract A reflective optical fiber temperature sensor is highly developed on the basis of the temperature-dependent character of ZnO thin film's optical absorption spectra. ZnO thin film as sensing material is deposited on a sapphire triangular prism surface by the electron-beam evaporation technique. And then the triangular prism and a fiber-ending located at a convex lens' focus are employed in the mode of a reflective optical configuration. According to the measurement results, the goodness-of-fit of the sensor's temperature curve is above 99.3%, and the sensitivity of the sensor is beyond 0.05 nm/°C when the temperature varies from 300 K to 773 K. Moreover, this temperature sensor is steady enough for a wide temperature range measurement in the experiment, even from 10 K to 1000 K.

Key words sensors; reflective optical fiber temperature sensor; ZnO thin film; temperature-dependent; sapphire triangular prism

OCIS codes 060.2370; 160.6000; 280.6780; 300.1030; 310.6860

1 引 言

光纤温度传感器在工业生产、航天等领域有着广泛的应用前景。它的探头和仪表分离,采用光纤进行联接,能在恶劣环境下进行非接触式、非破坏性以及远距离测量,环境适应能力强,并利用了光纤本身具有的优点,如长距离低损耗、易弯曲、体积小、重

量轻、成本低、防水、防火、耐腐蚀、抗电磁干扰等^[1]。同时,它还便于与计算机相连,实现智能化和远距离监控,不少情况下能够完成传统传感器很难完成甚至不能完成的任务。目前已出现多种光纤温度传感器^[2,3]。例如辐射型光纤温度传感器,其理论依据是普朗克辐射定律,它对高温物体具有很高的灵敏

收稿日期: 2010-07-14; 收到修改稿日期: 2010-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(60777034)资助课题。

作者简介: 夏娟(1985—),女,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: superpainkiller@163.com

导师简介: 隋成华(1956—),男,博士,教授,主要从事光纤传感和光信息处理等方面的研究。

E-mail: suich@zjut.edu.cn(通信联系人)

度,但无法应用于低温区域^[4];荧光测温型光纤温度传感器,它利用荧光寿命与温度对应关系来测量温度,但只适用于低温区^[5];吸收式温度传感器,它利用半导体晶体薄片(如砷化镓等)吸收光谱的温变特性制成,但该种温度传感器存在着结构复杂、制作成本较高,测温范围相对较窄的不足^[6,7]。且这些传感器的测温系统大多采用光强调制的方式,光源和光探测器性能的稳定和光纤耦合效率变动对这些系统测量精度的影响非常大。因此,研制一种结构简单、性能稳定、并且可将低温和高温测量功能集于一体的新型宽量程光纤温度传感器具有重要意义。当然,此类光纤温度传感器的研制离不开新型的温度敏感材料,而 ZnO 薄膜正是理想的选择之一^[8,9]。

ZnO 是一种 II-VI 族宽带隙半导体材料,通常在 0.4~2 μm 甚至更长的波长范围内都是透明的,具有熔点高(1975 ℃),激子束缚能大,光电、压电性能优良,化学稳定性好等优点,在发光器件、紫外光探测器、集成光学以及太阳能电池的透明电极等领域均有着重要的应用^[10~12]。由于 ZnO 原料易得、制备成本低、工艺简单、外延生长温度低,且对环境无毒无害,对衬底也没有苛刻的要求,国际上在 ZnO 的基础研究和器件研制领域已取得了众多突破性的进展。大量围绕 ZnO 薄膜的研究表明,ZnO 薄膜的光学、电学参数对外界环境的改变比较敏感,例如外界压力、温度、外加电场等的改变往往会导致 ZnO 薄膜光学吸收边的移动,甚至发光强度的改变^[13~15]。目前,ZnO 薄膜已被当作敏感材料应用于半导体传感器^[16]。先期关于在蓝宝石(熔点 2045 ℃)光纤端面上 ZnO 薄膜的制备及其光学温变特性的研究显示^[17],利用电子束蒸发技术可以在大直径蓝宝石光纤端面上生长出高质量的 ZnO 薄膜,其光学吸收边随温度升高有红移现象,且禁带宽度和热力学温度之间满足一定的线性关系。进一步实验显示,经过高温退火后的 ZnO 薄膜光学吸收边与之前相比基本重合,具有很高的热稳定性。鉴于此,设计了一种基于 ZnO 薄膜温变特性的透射式光纤温度传感器^[18],通过检测透射光谱,观察吸收边移动实现测温;其测量稳定性高,量程范围宽。但是这种光纤温度传感器采用蓝宝石光纤和普通石英光纤及 ZnO 薄膜层相耦合的结构,存在多处端面损耗从而降低了总耦合效率。此外该光纤温度传感器由于采用了透射式光路,在实际测量中,光源和光探测装置需分置在传感器的两端,这种检测光路的配置方式在多数测试环境下难以实现,不利于做成可随

意安插于所需测温环境中的便携式实用产品。

针对上述温度传感器的种种缺陷,本文提出了一种新型宽量程反射式光纤温度传感器。它以镀于蓝宝石三棱镜面上的 ZnO 薄膜作为敏感元件,采用三棱镜、凸透镜、位于凸透镜焦点处的光纤端面相配合的结构以及相应的反射式光路。利用所设计的传感器进行变温测试实验,取得了理想结果。与其他传统温度传感器相比,该温度传感器具有结构简单、稳定性高、量程范围宽和环境适应性强等优点。

2 传感器原理与设计

2.1 传感器测温原理

Wang Ming Song 等^[19,20]的研究表明,在 10 K~1000 K 温度范围内,ZnO 的禁带宽度能量 $E_g(T)$ 与温度 T 的关系为

$$E_g(T) = E_g(0) + rT^2/(T + \beta), \quad (1)$$

式中 $E_g(T)$ 和 $E_g(0)$ 分别是温度为 T 和 0 K 时 ZnO 的禁带宽度, r 和 β 是两个与 ZnO 材料本身有关的常量,ZnO 所吸收的光的波长为

$$\lambda_g(T) = \frac{hc}{E_g(T)}, \quad (2)$$

式中 $\lambda_g(T)$ 是 ZnO 的吸收边波长, h 为普朗克常量, c 为光速。由(1),(2)式可知

$$\lambda_g(T) = \frac{hc}{E_g(0) + rT^2/(T + \beta)}. \quad (3)$$

入射光光强 I_0 与经 ZnO 薄膜吸收后的透射光光强 I 之间的关系为

$$I = I_0 \exp(-\alpha d), \quad (4)$$

式中 α 为 ZnO 薄膜的吸收系数, d 为 ZnO 薄膜的厚度。 α 可表示为

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^{1/2}, \quad (h\nu > E_g) \quad (5)$$

式中 A 是与 ZnO 材料本身有关的常数, $h\nu$ 为光子能量。用 T_R 表示 ZnO 薄膜的透射率,则根据(4)式可推导出

$$\alpha = -\frac{\ln(I/I_0)}{d} = -\frac{\ln T_R}{d}. \quad (6)$$

以 $h\nu$ 为 x 轴、以 $(\alpha h\nu)^2$ 为 y 轴画出 $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ 关系曲线,此曲线近似为一条直线,将此直线外推延长至 x 轴即可确定禁带宽度 E_g ,从而确定温度 T 和禁带宽度 E_g 之间的关系。因此,可根据已测到的样品透射光谱,来确定禁带宽度 E_g ,从而可检测出当时测量环境的温度。这为利用 ZnO 薄膜光学吸收边随温度变化而移动的特性,研制以蒸镀于蓝宝石三棱镜面上的 ZnO 薄膜为敏感元件的新型宽量程反

射式光纤温度传感器提供了理论依据。

2.2 敏感元件制备及性能测试

利用电子束蒸发技术,在直角边长 10 mm,斜边长 14 mm,高 15 mm 的等腰直角蓝宝石三棱镜斜边面[Al₂O₃(0001)]上蒸镀一层 ZnO 薄膜(500 nm 左右)作为敏感元件。样品制备后,利用原子力显微镜(AFM,型号:SPA400,日本精工株式会社)和 X 射线衍射仪(XRD,型号:X'PERT PRO 多功能 X 射线衍射仪,波长 0.15418 nm;荷兰帕纳科公司)对 ZnO 薄膜样品的表面形貌和微结构进行了测试分析。AFM 结果表明其表面较为平整致密,粗糙度较小,其最大粗糙度约为 7.3 nm,颗粒大小为 100~200 nm。

XRD 测试结果如图 1 所示。从图中可看出,生长的 ZnO 薄膜样品具有高度 C 轴择优取向性(0002)。位于 $2\theta=34.588^\circ$ 的 ZnO(0002)晶面的衍射峰半峰全宽为 0.372° ,利用 Scherrer 公式: $D=0.94\lambda/(B\cos\theta)$ 计算晶粒大小。其中 D 为晶粒尺寸, λ 为 X 射线的波长(0.15418 nm), B 为半峰全宽, θ 为衍射角。计算晶粒尺寸为 23.38 nm,达到了纳米量级。光滑的表面形貌与良好的结晶质量将使该薄膜在可见光区域具有较高的透射率^[21]。

利用电子束蒸发技术蒸镀于蓝宝石三棱镜面上的 ZnO 薄膜为反射式光纤温度传感器提供了优良的敏感元件。

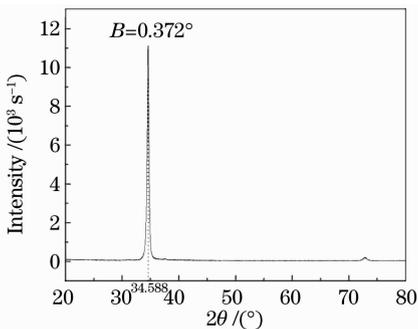


图 1 ZnO 薄膜 XRD 测试图

Fig. 1 XRD pattern of ZnO film

2.3 传感器结构设计及实验

新型宽量程反射式光纤温度传感器系统如图 2 所示。该系统由光源、光纤光谱仪和 Y 型传导光纤及温度传感头等组成。光源的选择考虑到 ZnO 薄膜的光学吸收区(360~380 nm)处于紫外波段,因此光源在紫外波段要有较强光强。光强太弱,就不能准确观察吸收边随温度变化情况。光源选择了以色列 Prizmatix 公司生产的光纤耦合式 3 波段发光二极管(LED)光源,它具有 3 个不同波段的光强输

出并可任意组合,能提供从 350~450 nm 的紫外连续谱,光强高且可按需要调节。光纤光谱仪的选择也充分考虑到 ZnO 光学吸收边的波长,因此要采用在 380 nm 附近波段有较高响应度的光纤光谱仪。实验中选择了美国海洋公司生产的 USB4000 光纤光谱仪。光源和光纤光谱仪通过 Y 型传导光纤耦合连接至温度传感头。该 Y 型传导光纤可看作 2 根 I 型传导光纤的部分复合,有 1 个公共端口和 2 个分叉端口,如图 3 所示。用于对某处的照明(公共端口对好该处)和同时对该处反射光的接收。由于它的 3 个端口采用相同的 SMA 905 接头,产生的损耗也是一致的,保证了实验的准确性。

温度传感头由蓝宝石三棱镜,ZnO 薄膜,凸透镜及封装套管组成,如图 2(a)所示。其中镀有 ZnO 薄膜的蓝宝石三棱镜斜边面向套管内侧,光纤端面位于凸透镜的焦点处且垂直于凸透镜的光轴,光纤端面、凸透镜及蓝宝石三棱镜斜边面三者中心大致成一直线,位于凸透镜光轴上。测试时,从光源发出的激励光经 Y 型传导光纤的一分支端(A)传入温度传感头。由于从光纤端面出射的光束经一定距离后会发散,而该光纤端面相对于凸透镜的表面积较小,因此可将该光纤端面等效为一个点光源。由该点光源发出的发散光经凸透镜后变成与凸透镜光轴平行的光线,并垂直于蓝宝石三棱镜斜边面入射,在三棱镜两个直角边面发生全反射后,又以平行光的形式垂直于斜边面出射,经凸透镜的汇聚作用,汇聚入射于凸透镜焦点处的光纤端面。这些经过镀于蓝宝石三棱镜斜边面上 ZnO 薄膜 2 次吸收的光线经 Y 型传导光纤的另一分支端(B)后被光纤光谱仪探测到,并经 USB 传送到计算机上进行数据处理。该温度传感头由于采用三棱镜改变光路产生全反射的原理,同时采用三棱镜、凸透镜、位于凸透镜焦点的光纤端面相配合的结构,不仅有效降低了传入光的发散损耗,提高了光源利用率,且易于做成便携式微型化产品,只要配合适当的光源及光谱仪即可安插于各种环境场合中进行温度测量。

图 2(b)是反射式光纤温度传感器的测温实验装置图。实验中将该温度传感头端点放置在温度可以加热到最高温度为 500 °C 的加热炉中,通过记录不同温度下所得到的透射光谱图,观察吸收边移动,并进一步得到温度 T 和禁带宽度 E_g 之间的关系。考虑到温度的变化范围较宽,而分辨率要求在现阶段并不太高,温度标定采用比较稳定的热电偶测温计(乐清精达仪表厂,型号:数显 TM-902 C),测温

范围-50℃~750℃,基本误差±0.75%,分辨率1℃,探头选择TP-02型。将热电偶放在加热炉腔

中,探头位置尽量选择离ZnO薄膜传感头较近的位置,以保证标定温度的可靠性。

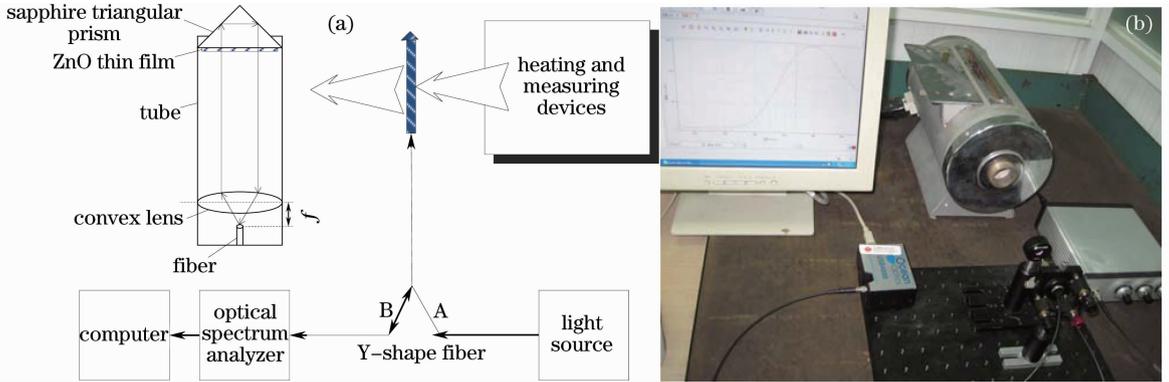


图2 反射式光纤温度传感器系统示意图(a)及实验装置图(b)

Fig.2 Schematic diagram (a) and experimental device photo (b) of reflective optical fiber temperature sensing system



图3 Y型传导光纤

Fig.3 Y-shape optical fiber

3 实验结果与讨论

实验中,光纤光谱仪计算透射率 T_λ 的公式为

$$T_\lambda = \frac{S_\lambda - D_\lambda}{R_\lambda - D_\lambda} \times 100\%.$$

式中 S_λ 是波长为 λ 时样品(实验中为ZnO薄膜)光强, D_λ 是波长为 λ 时暗光强, R_λ 是波长为 λ 时参考光强。在进行测试时,用一块未镀膜的蓝宝石三棱镜作为本底,测量并存储参考光谱与暗光谱,然后更换为已经生长了ZnO薄膜的蓝宝石三棱镜,测量样品光谱,即得到扣除本底的透射光谱。

图4为蒸镀在蓝宝石三棱镜面上的ZnO薄膜在不同温度下的透射率谱,由图4可看出ZnO薄膜具有陡峭的光学吸收边,在紫外波段有较强的光吸收,对应于ZnO禁带宽度的本征吸收。在其他测量参数(如压力、电场和磁场等)保持不变的情况下,随着温度的升高,ZnO薄膜吸收边发生了红移现象。随着波长的增加,ZnO薄膜的光学吸收迅速降低,在可见光波段具有较高的透射率,平均大于80%。这一现象产生的主要原因是测量光路中增加了蓝宝石三棱镜面/ZnO界面,光纤光谱仪接收的光线主

要由两部分组成:经ZnO薄膜2次吸收的透射光线,由三棱镜斜边面/ZnO界面直接反射回来的光线。由于蓝宝石三棱镜面上生长的ZnO薄膜具有极高的结晶质量和光滑度,其反射光线能力超过了未镀膜的蓝宝石三棱镜面,这部分增强的反射光线补偿了ZnO薄膜的吸收损耗,使光纤光谱仪接收的样品光强增强从而使透射率大幅度提高。当ZnO薄膜对光线的反射作用超过了对吸收损耗的补偿作用时(尤其是在长波段)会产生透射率饱和现象,但这一现象对光学吸收边的移动状况并无影响,因而对测量结果影响可以忽略。

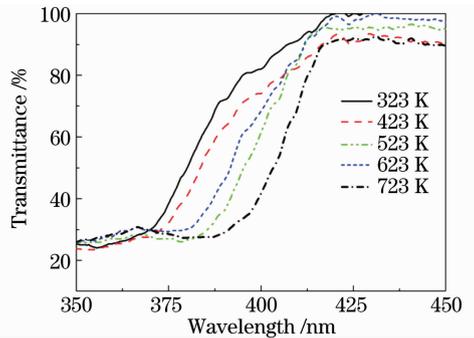


图4 ZnO薄膜在不同温度下的透射率谱

Fig.4 Transmittance spectra under different experimental temperatures

图5为ZnO薄膜的禁带宽度与温度关系的实验数据拟合图。通过数据拟合发现,ZnO薄膜的禁带宽度与温度之间的关系基本呈现线性关系,线性度达到99.3%以上,并满足方程 $E_g(T) = E_g(0) + rT$, $E_g(0) = 3.4205 \text{ eV}$, r 为拟合常数,等于 $-5.2640 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ 。与之前的报道^[18]相符,进一步证明该反射式测温系统的可靠性,且与Wang Ming Song等^[19,20]公式中的 r 值($r = -0.0003 \text{ K}^{-1}$)数值上非常接近,

在同一个数量级,但是此系统对温度更加敏感(绝对值大于后者)。随着温度的升高(升高了约 400 °C),禁带宽度逐渐减小,从 3.223 eV 减小到 3.024 eV,改变了约 0.199 eV。反映在光学吸收边上,大概线性红移了 20 nm,灵敏度约为 0.05 nm/°C,因此该传感器的测温分辨率还依赖于所使用的光纤光谱仪的波长分辨率。

作为温度传感器,重复性和稳定性也是非常重要的性能指标,为此分别对测试系统在升温和降温过程中不同温度下的透射谱以及间隔一段时间后的变温透射谱进行了多次测量,图 6 显示了 200 °C 及 300 °C 时的多次透射光谱。结果表明,该温度传感器具有良好的稳定性和重复性能。另外,根据生长在蓝宝石三棱镜面上 ZnO 薄膜在低温段(10 K~300 K)光学吸收边温变特性的研究^[22],ZnO 薄膜禁带宽度随温度的变化也满足一定的负温度效应。结

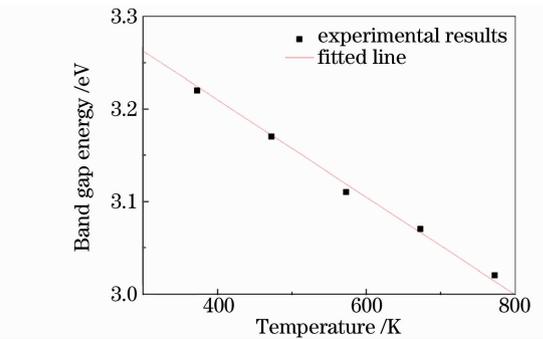
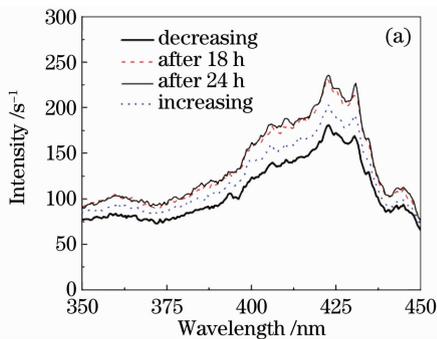


图 5 禁带宽度与温度的关系

Fig. 5 Band gap versus temperature

合高温段温变特性关系,该光纤温度传感器的测温范围理论上可从低温区(约 -260 °C)至高温区(约 700 °C)。但由于负温度的实现所需的仪器结构相对复杂且成本较高,同时光纤温度传感器的加热器件可获得的最髙温度为 500 °C,因此该温度传感器的测试范围为室温至 500 °C。今后实验中可通过改进加温装置,将测量范围进一步扩展。

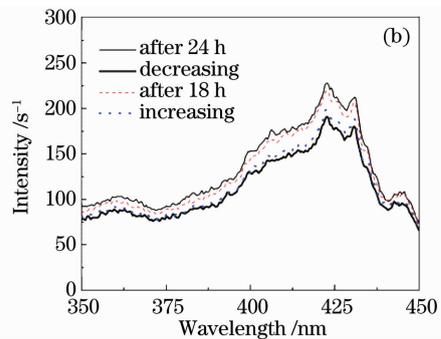


图 6 200 °C (a)与 300 °C (b)时的多次透射光谱

Fig. 6 Repetitive transmissive spectra under 200 °C (a) and 300 °C (b)

4 结 论

利用电子束蒸发法在蓝宝石三棱镜面上生长一层 500 nm 的 ZnO 薄膜,作为光纤温度传感器的敏感元件。利用 ZnO 薄膜吸收光谱的温变特性,采用三棱镜、凸透镜、位于凸透镜焦点处的光纤端面相配合的结构以及相应的反射式光路,构建了一种反射式光纤温度传感器。室温至 500 °C 范围测试实验表明,所设计的传感器的温度曲线线性拟合度达 99.3% 以上,灵敏度优于 0.05 nm/°C。该传感器的理论测温范围可达 10 K~1000 K,集低温与高温测量功能于一体。今后通过改进实验装置,可进一步提高测温范围及精度。该温度传感器具有结构简单、稳定性高和量程范围宽等优点,适用于各种环境场合中温度变化范围较宽的温度测量。

参 考 文 献

- Guan Rongfeng, Ye Jiaxiong, Yin Xinda *et al.*. Investigation on the properties of semiconductor optic-fiber temperature sensor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1997, **24**(2): 51~54
关荣峰,叶嘉雄,印新达等. 半导体光纤温度传感器特性研究[J]. *光电工程*, 1997, **24**(2): 51~54
- Shen Yongxing. Sapphire fiber thermometer ranging from the room temperature to 1800 °C [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(1): 83~87
沈永行. 从室温到 1800 °C 全程测温的蓝宝石单晶光纤温度传感器[J]. *光学学报*, 2000, **20**(1): 83~87
- Ye Yutang, Peng Yuanwang, Lei Zhaodi *et al.*. Signal processing of single-mode optical fiber phase-modulated temperature sensors [J]. *Chinese J. Lasers*, 1993, **A20**(7): 504~507
叶玉堂,彭远旺,雷肇棣等. 一种高灵敏度相位调制单模光纤传感器的信号处理系统[J]. *中国激光*, 1993, **A20**(7): 504~507
- R. R. Dils. High-temperature optical fiber thermometer[J]. *J. Appl. Phys.*, 1983, **54**(3): 1198~1200
- R. R. Sholes, J. G. Small. Fluorescent decay thermometer with biological applications[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1980, **51**(7): 882~884

- 6 Wang Yutian, Guo Zengjun, Wang Litian. Study on the modulation type optic fiber CH₄ sensor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, **29**(2): 35~39
王玉田, 郭增军, 王莉田. 调制式光纤甲烷气体传感器的研究[J]. *光电工程*, 2002, **29**(2): 35~39
- 7 Wu Yunfeng, Ye Yutang, Jiao Shilong *et al.*. An infrared temperature-measuring system for a small high-temperature region on semiconductor substrate [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, **30**(6): 32~36
吴云峰, 叶玉堂, 焦世龙等. 半导体基片表面微小高温区域的红外测温系统[J]. *光电工程*, 2003, **30**(6): 32~36
- 8 Zhou Hong, Sui Chenghua, Chen Naibo *et al.*. Growth and optical performance of ZnO films on sapphire fiber ends [J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2008, **14**(4): 37~42
周红, 隋成华, 陈乃波等. 在蓝宝石光纤端面上生长 ZnO 薄膜的方法及光学性能分析[J]. *功能材料与器件学报*, 2008, **14**(4): 37~42
- 9 Sui Chenghua, Cai Pinggen, Xu Xiaojun *et al.*. The temperature-dependent optical properties of ZnO film deposited on sapphire fiber-ending [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(4): 2792~2796
隋成华, 蔡萍根, 许晓军等. 蓝宝石光纤端面上 ZnO 薄膜的制备及其温变光学特性[J]. *物理学报*, 2009, **58**(4): 2792~2796
- 10 N. B. Chen, C. H. Sui. Recent progress in research on Mg_xZn_{1-x}O alloys [J]. *Mater. Sci. Eng. B*, 2006, **B126**: 16~21
- 11 B. J. Jin, S. H. Bae. Effects of native defects on optical and electrical properties of ZnO prepared by pulsed laser deposition [J]. *Mater. Sci. Eng. B*, 2000, **B71**: 301~305
- 12 Fang Zujie, Chen Gaoting, Ye Qing *et al.*. Progress of photovoltaic electric power generation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 5~14
方祖捷, 陈高庭, 叶青等. 太阳能发电技术的研究进展[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 5~14
- 13 D. A. Chistensen. A new non-perturbing temperature probe using semiconductor band edge shift [J]. *J. Bioeng.*, 1977, **1**: 541~545
- 14 J. M. J. Pelletier, Altkorn Robert. Efficient elimination of fluorescence background from Raman spectra collected in a liquid core optical fiber [J]. *Appl. Spectrosc.*, 2000, **54**(12): 1837~1841
- 15 C. J. da Silva, M. T. de Araujo, E. A. Gouveia *et al.*. Thermal effect on multi-phonon-assisted anti-Stokes excited up conversion fluorescence emission in Yb³⁺-sensitized Er³⁺-doped optical fiber [J]. *Appl. Phys. B*, 2000, **70**(2): 185~188
- 16 Dikovska Anna Og, P. A. Atanasov, A. Ts Andreev *et al.*. ZnO thin film on side polished optical fiber for gas sensing applications [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2007, **254**(4): 1087~1090
- 17 C. H. Sui, N. B. Chen, X. J. Xu *et al.*. High-temperature-dependent optical properties of ZnO film on sapphire substrate [J]. *Thin Solid Films*, 2008, **516**(6): 1137~1141
- 18 Sui Chenghua, Zheng Dong, Liu Yuling *et al.*. Optical fiber temperature sensor based on temperature-dependent optical properties of ZnO film on the sapphire fiber-ending [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(10): 1~6
隋成华, 郑东, 刘玉玲等. 利用 ZnO 薄膜温变特性构建光纤温度传感器[J]. *光电工程*, 2009, **36**(10): 1~6
- 19 Wang Ming Song, Kim Eui Jung, Chung Jin Suk *et al.*. Influence of annealing temperature on the structural and optical properties of sol-gel prepared ZnO thin films [J]. *Phys. Status Solid A*, 2006, **203**(10): 2418~2425
- 20 K. J. Hong, T. S. Jeong. Growth and optical absorption spectra of ZnO films grown [J]. *J. Cryst. Growth*, 2005, **280**(3-4): 545~550
- 21 P. G. Cai, D. Zheng, X. J. Xu *et al.*. A novel fiber-optic temperature sensor based on high temperature-dependent optical properties of ZnO film on sapphire fiber-ending [J]. *Mater. Sci. Eng.*, 2010, **171**(1-3): 116~119
- 22 N. B. Chen, H. Z. Wu, D. J. Qiu *et al.*. Temperature-dependent optical properties of hexagonal and cubic Mg_xZn_{1-x}O thin-film alloys [J]. *J. Phys: Condens. Matter*, 2004, **16**: 2973~2980