

ZnO 温度传感器光谱监测系统的设计

叶必卿¹ 汪 飞^{2*} 隋成华² 鄢 波² 石文渊²

(¹ 浙江工业大学之江学院, 浙江 杭州 310024)
(² 浙江工业大学理学院, 浙江 杭州 310023)

摘要 为解决 ZnO 温度传感器测温精度和集成化的问题,设计了一套测量光谱范围为 350~450 nm,分辨率为 0.1 nm 的光谱监测系统。通过合理地选择光学系统的结构、计算各光学元件的参数和光路结构以及消除系统像差,实现了光谱监测系统的窄波段、高分辨率的要求。最终结果显示系统的体积为 111 mm×83 mm×30 mm,基本满足系统可集成化的要求,可以做进一步的优化,公差分析使之满足加工需求。

关键词 光学设计;交叉非对称切尔尼-特纳系统;温度传感器;球差;彗差

中图分类号 TH744.1;TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0716001

Optical Design of Spectrum Observation System in ZnO Temperature Sensor

Ye Biqing¹ Wang Fei² Sui Chenghua² Yan Bo² Shi Wenyuan²

(¹ College of Zhijiang, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310024, China)
(² College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China)

Abstract In order to solve the measurement and integration of ZnO temperature sensor, a spectrum observation system is designed. Its spectrum range is 350~450 nm and resolution is approximately 0.1 nm. A reasonable optical structure is selected. Optical elements and light path are calculated and the aberration of system is eliminated to achieve the requirements of narrow spectrum range and high resolution. The system volume is 111 mm×83 mm×30 mm, satisfying the requirement of integration. And it can be used for further optimization, tolerance analysis to meet the processing requirements.

Key words optical design; cross-asymmetric Czerny-Turner system; temperature sensor; spherical aberration; coma

OCIS codes 220.1010; 220.2740; 220.4830; 130.6010

1 引 言

基于 ZnO 薄膜温变特性的光纤温度传感器是一种结构简单、操作方便、成本较低、测温范围广的新型测温传感器,其基本原理是 ZnO 薄膜的光学吸收边随温度升高有红移现象,并且其禁带宽度和热力学温度之间满足一定的线性关系^[1~4]。在 10 K~1000 K 的温变范围内,ZnO 薄膜的光学吸收边的光谱红移范围为 350~450 nm^[5,6]。而测温的精度和光谱测量系统的分辨率有关,当光谱测量系统的分辨率达到 0.1 nm 时,测温精度可以达到 2 ℃。

目前常见的微型光谱仪的光谱测量范围一般都超过 300 nm,分辨率一般都大于 1.5 nm,如果直接应用于 ZnO 温度传感器的光谱测量系统,则测量光谱范围过宽,测温精度过低,大于 10 ℃,同时不易于系统的集成。因此有必要针对 ZnO 温度传感器研制专用的光谱监测系统以满足测温精度和系统集成的需要。本文通过合理地选择光学系统,分析和计算各个光学元件的参数、光路以及消除系统像差,设计出了一套测量光谱范围为 350~450 nm,分辨率约为 0.1 nm 的窄波段、高分辨率的适用于 ZnO 温度

收稿日期:2011-03-01;收到修改稿日期:2011-03-11

基金项目:浙江省自然科学基金(Y4090599)和浙江省教育厅自然科学类重点项目(Z201018276)资助课题。

作者简介:叶必卿(1978—),女,博士,副教授,主要从事光学设计及微纳传感等方面的研究。E-mail:canooye@163.com

* 通信联系人。E-mail: fbc-110@163.com

传感器的微型光谱监测系统。

2 光学系统的设计

2.1 光学系统的选择

不同的光学结构具有不同的像差特性,决定了光学系统的基本性能。在 ZnO 温度传感器光谱监测系统的设计过程中为了达到高分辨率的要求,应尽可能选择合理的光学系统以降低球差和彗差。为此采用离轴高度不相等的非对称切尔尼-特纳的结构,即 $h_1 \neq h_2$ 。如图 1 所示,CG 为系统的光轴,入射光线由 S_1 入射,被准直镜 mirror 1 准直后入射到光栅上,衍射光线经 mirror 2 聚焦成像在 CCD 上,C 点为两面反射镜的曲率中心。该系统在同类系统中具有最小的彗差以及易于控制系统的球差^[7],采用两块小反射镜,可以有效地避免系统的二次、三次衍射,提高系统的工艺性和经济性,从而提高系统的分辨率^[8~10]。为降低系统的复杂程度和生产成本,使两面反射镜的曲率半径相等,即 $r_1 = r_2$ 。

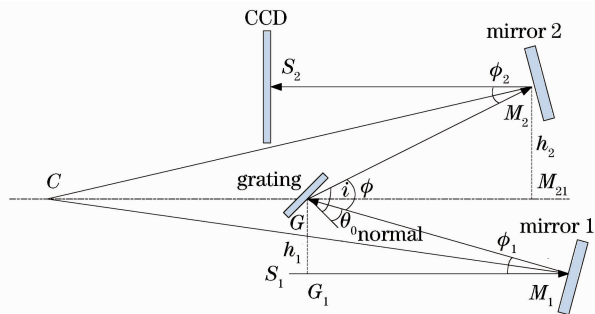


图 1 切尔尼-特纳光学系统

Fig. 1 Czerny-Turner optical system

2.2 准直镜、光栅和聚焦镜的入射光线与出射光线夹角的设计

各光学元件的离轴是产生彗差的主要原因,因此需要通过合理地分析和计算准直镜、光栅和聚焦镜的入射光线与出射光线夹角以降低系统的彗差和杂散光,保证系统的分辨率和可集成性。

选用的 CCD 的封装长度为 46.1 mm,为有保证足够的光能量和系统结构的体积尽可能地小,所采用的光栅宽度大约为 15 mm,由此可以得出聚焦镜的离轴高度至少为 30 mm。为此确定中间波长的入射光线与衍射光线的夹角 ϕ 为 30° ,为保证 0.1 nm 的分辨率,选用光栅刻线密度 n 为 $1.8 \text{ line}/\mu\text{m}$ 的闪耀光栅。

由图 1 可知

$$\theta_0 = i - \phi, \quad (1)$$

$$\phi = \phi_1 + \phi_2. \quad (2)$$

光栅方程

$$\sin i + \sin \theta = mn\lambda, \quad (3)$$

式中 m 为光谱级次,取 $m = -1$ 级。由(1),(3)式可以求得光线的入射夹角

$$i = -\arcsin\left[\frac{n\lambda}{\sqrt{(1 + \cos \phi)^2 + \sin^2 \phi}}\right] + \arctan \frac{\sin \phi}{1 + \cos \phi}. \quad (4)$$

取中间波长分析,把 $\lambda = 0.4 \mu\text{m}$, $\phi = 30^\circ$ 代入(1),(4)式求出入射角 $i = -8.9^\circ$,光线衍射角 $\theta_0 = -36.9^\circ$ 。对中间波长消除彗差,所以 h_1, h_2, i, θ_0 满足

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\sin(\phi_1/2)}{\sin(\phi_2/2)} = \left(\frac{\cos \theta_0}{\cos i}\right)^3 = \left[\frac{\cos(-36.9^\circ)}{\cos(-6.9^\circ)}\right]^3 = 0.52, \quad (5)$$

即

$$\sin(\phi_1/2) = 0.52\sin(\phi_2/2), \quad (6)$$

由(2),(5),(6)式可以求得: $\phi_1 = 10^\circ, \phi_2 = 20^\circ$ 。相应的角度确定之后就可以对光栅相关参数进行计算。

2.3 光栅参数的求解

光栅是整个光学系统的核心元件,光栅的闪耀波长决定了光学系统的探测光谱范围,光栅的闪耀角影响着光栅的入射光线和出射光线,从而影响系统的彗差。因此在刻线密度确定后,这两个参数设计得是否合理直接影响着整个光学系统的性能。

光栅的闪耀波长满足^[11]

$$\lambda_b = \lambda_1 + \frac{1}{4}(\lambda_2 - \lambda_1), \quad (7)$$

式中 λ_1, λ_2 为所设计测量光谱范围的起始波长和终止波长,由(7)式可以得出副闪耀波长 $\lambda_b = 375 \text{ nm}$ 。

又由(3)式可以求出闪耀方向 $\theta_b = -33.7^\circ$ 。而光栅的闪耀角、入射角和闪耀方向满足

$$\alpha = -\frac{i + \theta_b}{2}. \quad (8)$$

因此由(8)式可以求出光栅的闪耀角 $\alpha = 20.3^\circ$,同时光栅的闪耀角和主闪耀波长满足

$$\lambda_B = 2\sin \alpha/n. \quad (9)$$

所以可以得到光栅的主闪耀波长 $\lambda_B = 385.5 \text{ nm}$ 。至此求解了所需要的光栅的基本参数。

2.4 反射镜参数的设计

准直镜的焦距决定着系统的分辨率,聚焦镜的焦距决定着成像谱面的宽度,同时它们的孔径大小决定了系统的球差。需要合理地控制孔径的大小以

达到控制整个系统球差的目的,保证系统分辨率达到设计要求。

其中准直镜的焦距可表示为

$$f_1 = \frac{a \cos \theta}{n \delta \lambda}, \quad (10)$$

式中 $a = 25 \mu\text{m}$ 为狭缝的宽度,在衍射角不是很大的情况下, $\theta \approx 0^\circ$, 所以 $f_1 = 138.9 \text{ mm}$ 。

而聚焦镜焦距满足

$$f_2 = \Delta l \cos \theta \cos \varphi / [(\lambda_2 - \lambda_1) n], \quad (11)$$

式中 Δl 是 CCD 有效长度,约为 28.5 mm , φ 为谱面倾斜角度,在初始设计中可以近似为 0° , 因此可以求得 $f_2 = 158.3 \text{ mm}$ 。由于在(11)式的计算中忽略谱面衍射角和谱面倾斜的影响,所以实际聚焦镜的焦距应小于 158.3 mm 。

为保证光栅不对 CCD 造成挡光, h_2 应大于 30 mm , 即

$$2f_2 \sin(\phi_2/2) \geq 30 \text{ mm}, \quad (12)$$

求得 $f_2 \geq 58 \text{ mm}$, 综合考虑系统结构最终确定 $f_1 = f_2 = 110 \text{ mm}$ 。在光谱仪的设计中除了要考虑彗差对成像质量的影响,因球差会引起光谱脉冲展宽降低系统分辨率,因此必须把球差控制在像差容限之内,即准直的焦距和孔径需满足

$$D_1 \leq \sqrt[4]{256 \lambda f^3}, \quad (13)$$

求得 $D_1 \approx 20 \text{ mm}$, 入射光束经光栅衍射出射后,光束成扇形展开,为保证出射光线被充分聚焦到 CCD 上,聚焦的孔径需满足

$$D_2 \geq 2f_2 \tan(\theta_0 - \theta_2) / \cos(\phi_2/2), \quad (14)$$

式中 θ_2 为终止波长的衍射角,满足

$$\sin i + \sin \theta_2 = -n\lambda_2. \quad (15)$$

通过(14),(15)式可以求出 $D_2 = 30 \text{ mm}$ 。而光栅宽度和光线入射角以及准直镜孔径满足

$$\omega \geq D_1 / \cos i, \quad (16)$$

由(16)式解得 $\omega = 21 \text{ mm}$ 。

2.5 光路参数计算

在完成整个光学元件设计的基础上,可以对光路参数进行分析计算,从而确定整个光学系统的参数,保证系统的可集成化。由图 1 可得

$$S_1 M_1 = M_1 G = f_1 / \cos(\phi_1/2), \quad (17)$$

$$M_1 G_1 = f_1 \cos \phi_1 / \cos(\phi_1/2), \quad (18)$$

$$GM_{21} = f_2 \cos \phi_2 / \cos(\phi_2/2), \quad (19)$$

$$S_2 M_2 = M_2 G = f_2 / \cos(\phi_2/2), \quad (20)$$

$$h_1 = 2f \sin(\phi_1/2), \quad (21)$$

$$h_2 = 2f \sin(\phi_2/2), \quad (22)$$

求解(17)~(22)式可得: $S_1 M_1 = M_1 G = 110.4 \text{ mm}$,

$M_1 G_1 = 110.8 \text{ mm}$, $GM_{21} = 105 \text{ mm}$, $S_2 M_2 = M_2 G = 111.7 \text{ mm}$, $h_1 = 19.2 \text{ mm}$, $h_2 = 38.2 \text{ mm}$, 即 CCD 的离轴高度为 38.2 mm , 并且保持与光轴垂直放置。最终所取得的元件设计参数和系统结构参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 元件设计参数

Table 1 Design parameters of optical element

Optical element	Parameters	Value
Collimating mirror	Focal length	110 mm
	Aperture	20 mm
Blazing grating	Dimension	21 mm × 21 mm
	Grating period	1.8 line/ μm
	Blazing angle	20.3°
	Blazing wavelength	385.5 nm
Focusing mirror	Focal length	110 mm
	Aperture	30 mm

表 2 系统结构参数

Table 2 Parameters of optical structure

Parameters	Value	Parameters	Value
ϕ	30°	$M_1 G_1$	110.8 mm
ϕ_1	10°	GM_{21}	105 mm
ϕ_2	20°	$S_2 M_2$	111.7 mm
i	-8.9°	$M_2 G$	111.7 mm
θ_0	-36.9°	h_1	19.2 mm
$S_1 M_1$	110.4 mm	h_2	38.2 mm
$M_1 G$	110.4 mm		

3 结 论

通过对各光学元件、系统像差和光路参数进行了详细的分析和计算,设计出了光谱波段为 $350 \sim 450 \text{ nm}$, 分辨率为 0.1 nm 的窄波段、高分辨率的 ZnO 温度传感器光谱监测系统。该系统的各个参数均符合设计要求,可以得出该系统的体积为 $111 \text{ mm} \times 83 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, 基本满足系统可集成化的要求。在此基础上可借助光学设计软件进行仿真设计,优化各个光学元件和光路,进一步降低系统的像差和杂散光,提高光学系统性能,并分析系统的公差,与相应的机械、电路和软件系统组成一款测温范围广、精度高的测温传感器。

参 考 文 献

- 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): 729~734
- 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): 729~734

- 2 Chenghua Sui, Naibo Chen, Xiaojun Xu *et al.*. High-temperature-dependent optical properties of ZnO film on sapphire substrate [J]. *Thin Solid Films*, 2008, **516**(6):1137~1141
- 3 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):94~99
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):94~99
- 4 Xia Juan, Sui Chenghua, Liu Yuling *et al.*. Reflective optical fiber temperature sensor based on temperature-dependent optical properties of ZnO film [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2):0205003
夏娟,隋成华,刘玉玲等. 基于 ZnO 薄膜光学温变特性的反射式光纤温度传感器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2):0205003
- 5 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. 蓝宝石光线端面上 ZnO 薄膜的制备及其温变光学特性[J]. *物理学报*, 2009, **58**(4):2792~2796
- 6 Pinggen Cai, Dong Zhen, Xiaojun 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. Engng. B*, 2010, **171**(1-3):116~119
- 7 Cheng Liang. Design and Application of Micro-Spectrometer System [D]. Hangzhou: College of Information Engineering, Zhejiang University, 2008
程梁. 微型光谱仪系统的研究及其应用[D]. 杭州:浙江大学信息学院, 2008
- 8 Wang Lingfang, Wen Zhiyu, Xiang Xianyi. Design and simulation of the NIR micro-spectrometer optical system [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, **29**(6):1721~1725
王玲芳,温志渝,向贤毅. 近红外微型光谱仪光学系统设计与模拟[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, **29**(6):1721~1725
- 9 Chen Tanxuan, Yang Huaidong, Chen Kexin *et al.*. Coma and resolution in wide spectral region Czerny-Turner spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(6):1692~1696
陈谭轩,杨怀栋,陈科新等. 宽光谱 Czerny-Turner 光谱仪中的彗差与分辨率[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(6):1692~1696
- 10 Xue Qingsheng, Wang Shurong, Lu Fengqin. Aberration correction of Czerny-Turner imaging spectrometer carried by satellite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1):35~40
薛庆生,王淑荣,鲁凤芹. 星载车尔尼-特纳型成像光谱仪像差校正的研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1):35~40
- 11 Ling Zhong, Fan Shifu. Spectrum Instrument Study [M]. Beijing: China Machine Press, 1989. 66
林中,范世福. 光谱仪器学[M]. 北京:机械工业出版社, 1989. 66