

## 基于近红外光谱的高精度测温系统

张玉存, 齐艳德\*, 付献斌

燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004

**摘要** 目前红外测温方法难以消除复杂环境下外来辐射的干扰, 导致测温精度低, 设计了一种高精度的红外测温系统。该系统提出了由宽带滤光片和三级干涉滤光器结合的滤光方法, 根据该方法对高温物体发出的近红外光谱进行滤光, 将高温背景光和环境干扰光滤掉, 得到两个单色光谱, 经红外探测器接收获得其辐射功率比, 通过计算得出物体温度。该系统透过的单色光谱带宽仅有 1 nm, 将透射光谱以外的背景光辐射和环境光源辐射抑制达 8 个数量级, 降低了因被测对象周围环境升温引起的测温误差, 提高测温系统的精度。最后通过实验验证了该测温系统的可行性, 精度达 0.2%。

**关键词** 近红外光谱; 红外探测器; 宽带滤光片; 三级干涉滤光器

**中图分类号:** TN215 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)12-3236-05

### 引言

目前双波长红外测温技术广泛应用于现代工业领域<sup>[1,2]</sup>, 它受被测物体比辐射率的影响小, 能排除中性介质的影响并且抗干扰性强<sup>[3,4]</sup>, 特别适用于测量局部被遮挡或无法充满测量视场的目标温度<sup>[5]</sup>。但是在一些复杂环境下测温精度还不能满足要求。张忠恒等采用避开“辐射率修正困难”的方法, 弥补了红外测温仪准确度不高的缺陷, 可以精确测出被测对象的温度。孙志远等在目标附近放置一个超大面元黑体来消除环境反射辐射和大气辐射等辐射量的影响, 降低了系统的测温误差<sup>[6]</sup>。施德恒等对仪器工作波长与波长带宽进行了优化设计, 从而获得两个最优的光谱信息, 使其测温精度和灵敏度满足实际需要<sup>[7]</sup>。以上方法都取得了一定的成果, 但是在一些环境极其恶劣的工作条件下, 比如在高温锻造过程中, 大型锻件表面状态(如氧化、剥离、生锈等)不断变化, 高温锻件周围环境温度升高, 厂房温度高等都直接影响双色信号的比值, 从而影响系统的测温精度<sup>[8-10]</sup>。

本文提出了一种高精度的红外测温系统。系统采用双通道结构通过宽带滤光片和三级干涉滤光器结合, 对物体发出的近红外光谱进行滤光。该系统能够充分的抑制高温物体周围背景光和环境光源辐射, 同时保证所需光谱的通过, 降低了复杂环境外来辐射和物体状态变化的干扰, 提高了系统信噪比, 减小测温误差, 更精确的得到物体温度。

### 1 红外双色测温系统

该红外测温系统结构如图 1 所示, 高温锻件辐射发出的红外光谱由聚光镜收集, 再经过散光镜将光束变成平行光, 经宽带滤光片可透过包括预测波长的宽带光, 宽带光到达分光片一部分透过分光片进入三级干涉滤光器 A, 得到中心波长为  $\lambda_1$  的窄带光, 再经过牛顿双反射镜和场镜将透射光收集到红外探测器 1。另一部分宽带光由分光片反射经三级干涉滤光器 B 得到中心波长为  $\lambda_2$  的窄带光, 最后收集到红外探测器 2。然后将两个红外探测器探测到的不同波长的单色光信号转变成电信号, 由数据采集卡采集输入到计算机, 最终计算并显示被测物体温度。

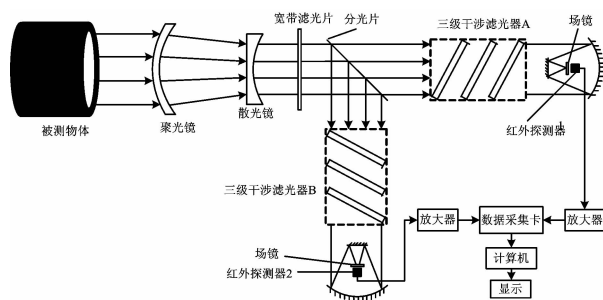


Fig. 1 The working schematic diagram of infrared temperature measurement

收稿日期: 2011-03-30, 修订日期: 2011-07-10

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX04002-101)资助

作者简介: 张玉存, 1969年生, 燕山大学电气工程学院副教授 e-mail: oldzhang@ysu.edu.cn

\* 通讯联系人 e-mail: qiyandehao@126.com

1.1 宽带滤光片

宽带滤光片采用常用带通滤光片，带通滤光片是让特定波长的光通过而让其他波段的光反射(或衰减)的光学元件。根据测温要求选用近红外光谱段的工作区域，元件材料一般为 K9 玻璃、石英玻璃等，中心波长为 2 165 nm，带宽为 (2 165±100) nm，透过率>90%。

1.2 三级干涉滤光器

单级干涉滤光片如图 2 所示，由两个石英板构成，折射率为  $n$ ，两板的内表面平行，并镀有高反射率膜层，组成一个具有高反射率表面的空气层平行平板，空气层间隙为  $h$ 。对辐射的红外光谱具有干涉滤光的作用，可透过特定波长的光谱。三级干涉滤光器如图 3 所示，它由三个不同空气间隙的单级干涉滤光片组成。通过设定三个单级干涉滤光片的间隙，得到不同的透射光谱，相互叠加后最终透过一单色光谱，同时各滤光片按 60°角放置，使其中的反射光偏离透射光的范围，以免干扰。该结构充分的抑制了物体周围背景光和环境光源的干扰，并保证了特定单色光的通过，提高了测温精度。

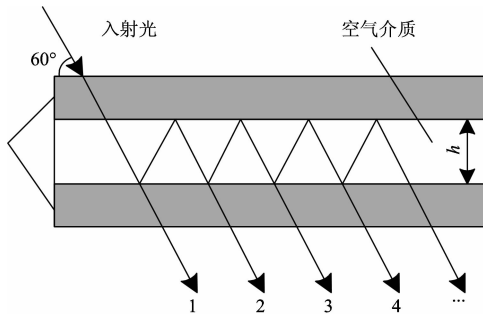


Fig. 2 Schematic diagram of single interference filter

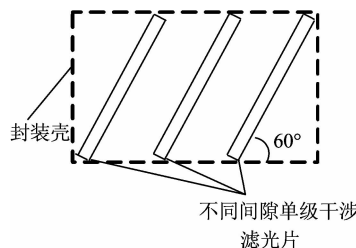


Fig. 3 Three-level interference filter

1.3 红外探测器

红外探测器的好坏直接影响信号的精度，它将被测物体辐射的光信号转换成电信号输入计算机<sup>[11]</sup>。硫化铅(PbS)红外探测器具有灵敏度高，时间常数小，能在室温下工作，成本低，生产工艺简单等许多优点。本文采用 DPbs3200 红外探测器，响应波段为 0.8~3.2 μm，光敏面尺寸 6 mm×6 mm，峰值波长≥2.1 μm，时间常数≤400 μs，频率响应范围 100~1 000 Hz，输出为正电压信号。

2 系统测温原理

高温物体发出的红外光谱经光学系统收集通过两个通道

滤光系统得到两个单色光谱，由红外探测器接受转换成电信号得到两单色光谱的辐射功率比，将其代入测温公式即可求出物体温度。单级干涉滤光片滤波原理如图 2 所示，当一束非单色光以 60°角入射，各光束在标准平面之间来回反射形成一系列彼此光程差为  $2nh\cos60^\circ$ 沿同一方向出射的透射光束。假设介质无吸收，不考虑两外侧界面的反射时，设入射光振幅为  $A$ ，入射光束在上界面入射点处初相位为零，即入射光复振幅为  $\tilde{E}_0 = Ae^{i0} = A^{[12]}$ ，则各透射光的复振幅为

$$\tilde{E}_P = Ad^2 r^{2(P-1)} e^{i(P-1)\phi} \quad (P = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

式中， $r$  为高反射膜层反射率； $d$  为平行平板透射率； $\phi$  为入射光与透射光的相位差。

$$\tilde{E}_D = \sum_{P=1}^{\infty} \tilde{E}_P = Ad^2 \left( \frac{1}{1-r^2 e^{i\phi}} \right) = A \left( \frac{D}{1-Re^{i\phi}} \right) \quad (2)$$

其中， $\tilde{E}_D$  为总透射光， $R = r^2$ ， $D = d^2$ ， $R + D = 1$ 。则透射光强度为

$$I = |\tilde{E}_D|^2 = \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R\sin^2(\phi/2)} I_0 \quad (3)$$

其中， $\phi = 4\pi nh\cos60^\circ/\lambda$ 。

则单级干涉滤光片的透过率为

$$D = 1 / \left( 1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \left( \frac{2\pi nh\cos60^\circ}{\lambda} \right) \right) \quad (4)$$

如果要求干涉滤光片透过中心波长为  $\lambda_0$ ，即要使波长为  $\lambda_0$  透射率最大，须让  $\sin^2 \phi/2$  最小，即： $\sin^2 \phi/2 = 0$ ，则得到  $\phi = 2m\pi$ 。将  $\phi$  值代入  $\phi = 4\pi nh\cos60^\circ/\lambda$  得

$$m\lambda_0 = 2nh\cos60^\circ \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (5)$$

式中  $m$  为干涉级次。当选择材料和调节干涉滤光片间隙使  $nh$  满足式(5)时，透射光中波长为  $\lambda_0$  的光透过率最大，而不满足式(5)的光将被滤掉。

三级干涉滤光器滤光作用是三个单级干涉滤光片叠加后的效果。设单级干涉滤光片间隙分别为  $h_1$ ， $h_2$  和  $h_3$ 。则三个单级干涉滤光片的透过率为

$$D_n = 1 / \left( 1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \left( \frac{2\pi nh_n \cos60^\circ}{\lambda} \right) \right) \quad (6)$$

式中， $n=1, 2, 3$ 。那么三级干涉滤光器透过率公式为  $D = D_1 \times D_2 \times D_3$ 。

本测温系统的测温范围为 700~1 500 °C，所以选取近红外光谱范围的两个波长，分别为 2.125 和 2.225 μm。选取宽带滤光片透射光谱波段为 2.065~2.265 μm，设定两通道的三级干涉滤光器参数如表 1 所示。

Table 1 Parameters of three-level interference filter

	高反射膜 反射率/%	石英折 射率	单级干涉 滤光片	间隙距 离/μm	中心波 长/μm
三级干涉 滤光器 A	95	1.553	1	121.78	2.125
			2	203.88	
			3	71.15	
三级干涉 滤光器 B	95	1.553	4	157.60	2.225
			5	227.80	
			6	98.86	

测温系统接受到高温物体辐射的红外光谱经表 1 参数设

定的两个通道, 根据上述三级干涉滤光器滤光原理滤出两个特定波长的单色光谱, 分别由两个红外探测器接受得到两单色光谱的辐射功率比  $V_1/V_2$ , 将其代入测温公式

$$T = C_2 \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \left( \ln \frac{V_1}{V_2} - \ln \frac{\epsilon_{\lambda_1}}{\epsilon_{\lambda_2}} - 5 \ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2} - \ln \frac{\Delta \lambda V_1}{\Delta \lambda V_2} \right)^{-1} \quad (7)$$

即可得到物体温度。又因为两波长非常接近, 可认为  $\epsilon_{\lambda_1} \approx \epsilon_{\lambda_2}$ , 透过光谱半波宽度  $\Delta \lambda_1, \Delta \lambda_2$  非常窄, 近似于单色光谱,

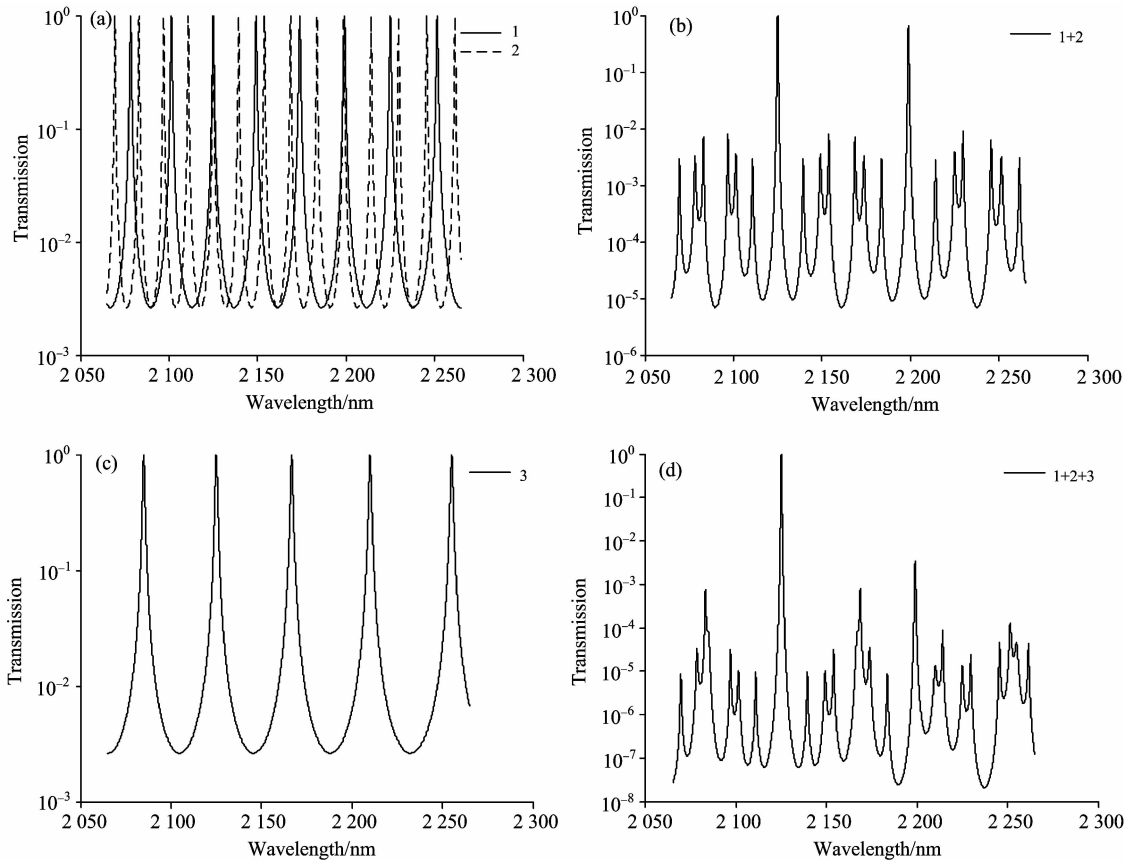


Fig. 4 Transmittance curves of single interference filter 1, 2, 3 and each combination in passage 1

如图 4(a)为三级干涉滤光器 A 中单级干涉滤光片 1 和单级干涉滤光片 2 的透过率曲线, 单级干涉滤光片 1 和 2 组合后可通过  $2.125 \mu\text{m}$  的单色光谱如图 4(b)所示, 同时对背景光辐射抑制达 5 个数量级。单级干涉滤光片 3 在保证透过波长为  $2.125 \mu\text{m}$  的单色光谱的同时主要加强对背景光辐射的抑制, 其透过率曲线如图 4(c)所示。单级干涉滤光片 1, 2 和 3 组合后的透过率曲线如图 4(d)所示, 由图可看出透过的窄带波的半波宽度仅为  $1 \text{ nm}$  左右, 近似于单色光, 将背景光光谱辐射抑制达 8 个数量级, 同时保证了所需波长的通过, 提高了系统的测温精度。

同理, 如图 5(a)为单级干涉滤光片 4 和单级干涉滤光片 5 的透过率曲线, 图 5(b)为单级干涉滤光片 4 和 5 组合后的透过率曲线, 图 5(c)为单级干涉滤光片 6 的透过率曲线, 图 5(d)为三个单级干涉滤光片组合后的透过率曲线, 三级干涉滤光器 B 保证透过波长为  $2.225 \mu\text{m}$  的单色光谱, 同时极大

故可忽略。最终测温公式简化为

$$T = C_2 \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) / \left( \ln \frac{V_1}{V_2} - 5 \ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) \quad (8)$$

### 3 三级干涉滤光器滤波仿真

通过 Matlab 软件仿真出两个通道滤光系统的红外光谱透过率曲线如图 4、图 5 所示。

的抑制了背景光的透过, 提高了测量精度, 达到了滤光要求。

### 4 实验验证

为了验证本文开发的测温系统的实用性和精度值, 将 C19-P1600B2 黑体炉代替被测对象在实验室对其进行了测温实验。

(1) 实验仪器: C19-P1600B2 黑体炉, 红外测温系统, 计算机。

实验室黑体炉型号为: C19-P1600B2。温度范围:  $500 \sim 1550 \text{ }^\circ\text{C}$ 。红外测温系统为本文开发的基于近红外光谱的高精度测温系统。

(2) 实验环境: 无风有粉尘; 环境光源: 灯光; 室温:  $300 \text{ K}$ ; 湿度:  $60\%$ 。

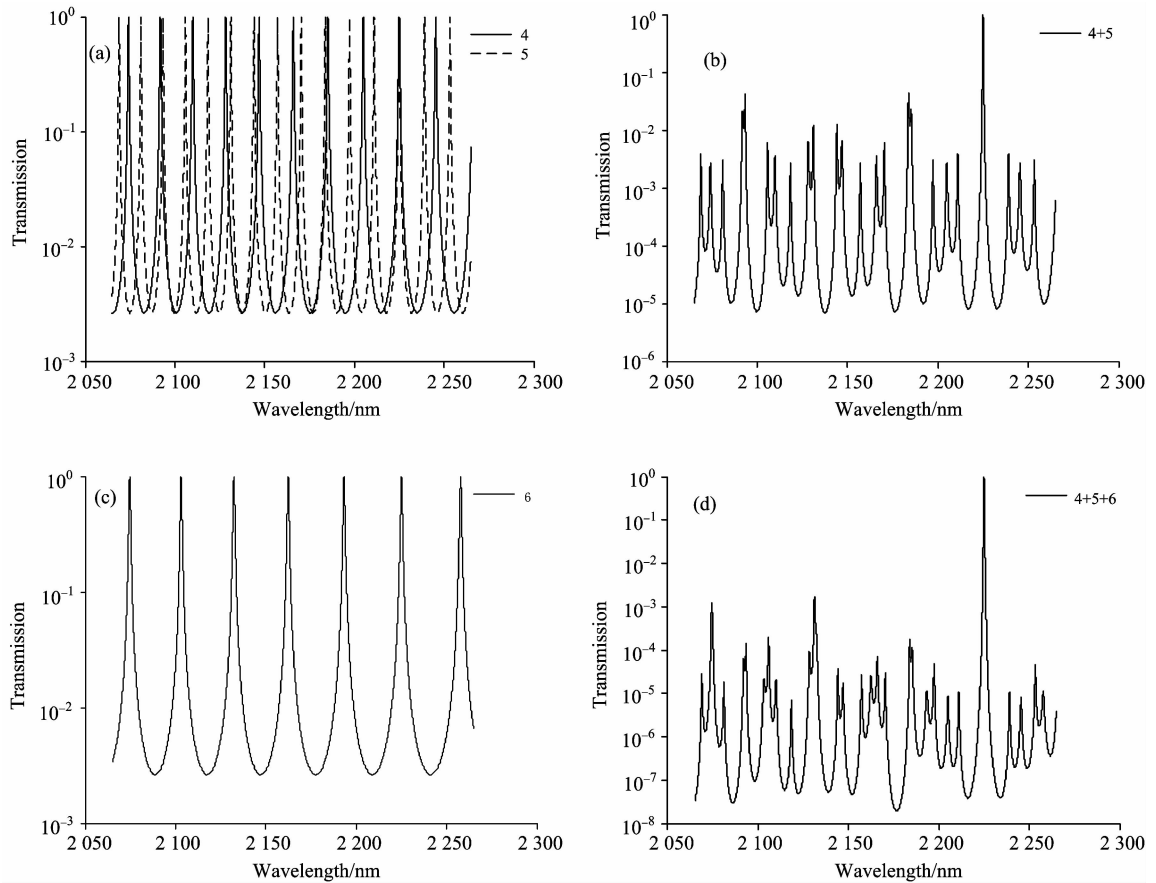


Fig. 5 Transmittance curves of single interference filter 4, 5, 6 and each combination in passage 2

Table 2 Experimental data

	实际温度值/°C	测量温度值/°C	误差/°C
1	755.1	756.6	1.5
2	810.7	809.3	1.4
3	877.0	878.0	1.0
4	938.3	937.5	0.8
5	990.0	990.9	0.9
6	1 058.5	1 059.2	0.7
7	1 109.8	1 110.8	1.0
8	1 165.1	1 166.0	0.9
9	1 214.2	1 213.1	1.1
10	1 260.5	1 261.5	1.0
11	1 317.2	1 316.0	1.2
12	1 378.6	1 379.9	1.3
13	1 425.1	1 426.6	1.5
14	1 479.3	1 480.9	1.6

(3) 调试。

将黑体炉温度较高的内表面看作是目标，把温度较低的

外表面看作是背景。设定好黑体炉各项参数值，调节黑体炉温度，使用本文测温系统在 700~1 500 °C 范围内测量了 14 组不同温度下黑体炉的温度值，测量数据如表 2 所示。

(4) 实验结果分析： $\delta = (\Delta_{\max}) / (A_{\max}) \times 100\%$  ( $\delta$  为精度； $\Delta_{\max}$  为最大测量误差； $A_{\max}$  为仪表量程)。根据表 2 测温结果  $\delta = 1.6 / 800 \times 100\% = 0.2\%$ 。验证了此红外测温系统的精度为 0.2%，精度高，满足测温要求。

## 5 结 论

提出的基于近红外光谱的高精度测温系统利用宽带滤光片和三级干涉滤光器结合对高温物体发出的红外光谱滤光得到两个单色光谱，充分抑制了高温物体周围背景光和环境光源辐射的干扰，降低了因高温物体周围环境温度升高引起的测温误差，提高了测温系统的精度。最后通过实验室测温实验，验证了本文开发的红外测温系统精度比一般测温仪得到了提高，精度达到 0.2%，满足了工业测温精度要求。

## References

- [ 1 ] ZHENG Zhong, HE La-mei(郑 忠, 何腊梅). Industrial Heating(工业加热), 2005, 34(3): 25.
- [ 2 ] WANG Xi-bin, RONG Rui-fang(王喜斌, 荣瑞芳). Laser & Infrared(激光与红外), 2004, 34(5): 3557.
- [ 3 ] WANG Bo, ZHAO Guo-rong(王 波, 赵果荣). Science & Technolog of Baotou Steel Corporation(包钢科技), 2005, 31(1): 56.
- [ 4 ] DAI Jing-min, YANG Mao-hua, CHU Zai-xiang(戴景民, 杨茂华, 褚载祥). Journal of Infrared Millimeter Waves(红外与毫米波学报), 1995, 14(6): 461.
- [ 5 ] GE Hua-guang, WANG Sun-an, ZHAO Lin-hai(葛华光, 王孙安, 赵淋海). Modern Cast Iron(现代铸铁), 2006, (1): 92.
- [ 6 ] SUN Zhi-yuan, LI Qing-an(孙志远, 李清安). Chinese Journal of Scientific Instrument(仪器仪表学报), 2006, 27(6): 67.
- [ 7 ] SHI De-heng, DAI Qi-run, CHEN Yu-ke(施德恒, 戴启润, 陈玉科). Chinese Journal of Scientific Instrument(仪器仪表学报), 2005, 26(12): 1238.
- [ 8 ] ZHANG Jian, YANG Li, LIU Hui-kai(张 健, 杨 立, 刘慧开). Infrared Technology(红外技术), 2005, 27(5): 419.
- [ 9 ] YANG Zhen, YANG Li(杨 楨, 杨 立). Optical Technique(光学技术), 2008, Suppl. : 154.
- [ 10 ] JIANG Shi-chang, CHEN Chu-xin(姜世昌, 陈出新). J. Infrared Millim. Waves(红外与毫米波学报), 2001, 20(6): 426.
- [ 11 ] FU An-ying, MA Rui(付安英, 马 睿). Modern Electronics Technique(现代电子技术), 2007, 30(4): 4.
- [ 12 ] CAI Lü-zhong, WANG Cheng-yan(蔡履中, 王成彦). Optics(光学). Ji'nan: Shandong University Press(济南: 山东大学出版社), 1992. 302.

## Research on High-Precision Temperature Measurement System Based on Near Infrared Spectroscopy

ZHANG Yu-cun, QI Yan-de\*, FU Xian-bin

Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China

**Abstract** At present, the interference from outside radiation under the complex environment is difficult to eliminate by using the infrared thermometry method. It leads to the low measurement accuracy. In the present paper, a high-precision infrared temperature measurement system was designed. The light filter method is presented in this system. The broadband filters and three-level interference filter were combined in this method. According to the method, the near-infrared spectra sent out by high temperature object is filtered. The high temperature background light and the environment obtrusive light are filtered out. In this way, two monochromatic spectra are obtained. The radiation power ratio is received after receiving by the infrared detector. Then the temperature is obtained by calculating. In this system, the bandwidth of monochromatic spectrum permeated is only 1 nm. The inhibition of radiation from background light and ambient light except transmittance spectrum is up to 8 orders of magnitude. The measurement error caused by the ambient temperature heating of the measured object is reduced. The accuracy of the temperature measurement system is improved. Finally, the temperature measurement system is feasible according to the experiment result. The precision reached to 0.2%.

**Keywords** Near infrared spectroscopy; Infrared detector; Broadband filter; Three-level interference filter

(Received Mar. 30, 2011; accepted Jul. 10, 2011)

\* Corresponding author