

文章编号: 0253-2239(2004)04-542-6

一种高精度光纤测温系统工作波长的优化设计*

施德恒^{1,2,3} 刘玉芳¹ 陈玉科² 朱遵略¹ 孙金锋^{1,3}

1 河南师范大学物理系, 新乡 453002
2 空军第一航空学院基础部, 信阳 464000
3 四川大学原子与分子物理研究所, 成都 610065

摘要: 基于基尔霍夫定律, 利用钽酸锂热释电探测器设计了一种实用化的双波长、高精度光纤测温系统。依照测温系统中单个探测器的温度分辨力、 $R(T) \sim T$ 曲线的线性度、 $R(T) \sim T$ 曲线的温度灵敏度及其相对温度灵敏度与各主要技术参量之间的关系, 对采用钽酸锂热释电探测器作光电转换器件实现的实用化实时测温系统的工作波长进行了优化设计。实验表明, 在测温范围 400~1300 °C 内, 当系统工作在 $\lambda_1 = 2.1 \mu\text{m}$ 、 $\lambda_2 = 2.3 \mu\text{m}$ 时, 其温度灵敏度高于 $1.0 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 相对温度灵敏度不低于 0.9, 测温精度不低于 0.15%。均符合设计要求。

关键词: 光学测量; 测试计量仪器; 辐射测温; 热释电探测器; 比色测温; 光纤

中图分类号: TN247 文献标识码: A

A High-Precision Optic Fiber Colorimeter Using Pyroelectric Detector

Shi Deheng^{1,2,3} Liu Yufang¹ Chen Yuke² Zhu Zunlue¹ Sun Jinfeng^{1,3}

1 Department of Physics, Henan Normal University, Xinxiang 453002
2 Department of Foundation, The First Aeronautical College of Air Force, Xinyang 464000
3 Institute of Atomic and Molecular Physics, Sichuan University, Chengdu 610065

(Received 13 January 2003; revised 8 January 2004)

Abstract: Based on the Kirchhoff law, a practical dual-wavelength high-precision fiber-optic colorimeter using LiTaO₃ pyroelectric detector is presented. According to the relationships between various technical parameters and main specifications (temperature resolving power of single detector, linearity of $R(T) \sim T$ curves, temperature measurement sensitivity and relative temperature sensitivity), a method of optimal parameter selection for determining two operating wavelengths of a new kind of the practical IR fiber-optic colorimeter using LiTaO₃ pyroelectric detector is presented. Experimental results show that temperature measurement sensitivity exceeds $1.0 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, and relative temperature sensitivity and temperature measurement accuracy are better than 0.8 and 0.15% respectively at 400~1300 °C and $\lambda_1 = 2.1 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 2.3 \mu\text{m}$ which reach design requirements.

Key words: optical measurement; measurement instrument; temperature measurement by radiation; pyroelectric detector; colorimeter; optical fiber

1 引 言

钢铁生产中, 为保证产品的质量, 各道工序都设有测温点, 且要求严格。沿用传统的接触式测温仪进行测量, 虽然精度高, 但必须使探头接触被测物体, 因此在某些场合下(如轧钢中对运动着的热轧钢

板及对高温炉中的火焰等)无法使用^[1]; 用传统的单波长辐射测温计进行测量, 由于某些情况下待测物体的发射率随温度变化太大(如热轧钢板的发射率在 0.35~0.95 之间变化)^[2], 因而存在着较大的误差; 采用激光或红外源作测量光源^[4~6], 虽可同时准确测出待测物体的发射率及温度, 但由于这种测温仪需要有反射面与之配合才能使其正常工作, 因而在某些场合仍难使用。比色测温仪虽可应用于上述难以应用的场合^[7~9], 但由于现有的比色测温仪

* 河南省自然科学基金研究计划(0314003002)资助课题。

E-mail: scattering@sina.com.cn

收稿日期: 2003-01-13; 收到修改稿日期: 2004-01-08

多用半导体硅光电二极管作光电转换器件,因此难以测量较低的高温(600 ℃以下的温度)^[10]。为此,作者提出了使用钽酸锂热释电探测器作光电转换器件的实时测温系统。

2 仪器结构与测温原理

2.1 仪器的结构

利用钽酸锂热释电探测器实现的光纤比色测温

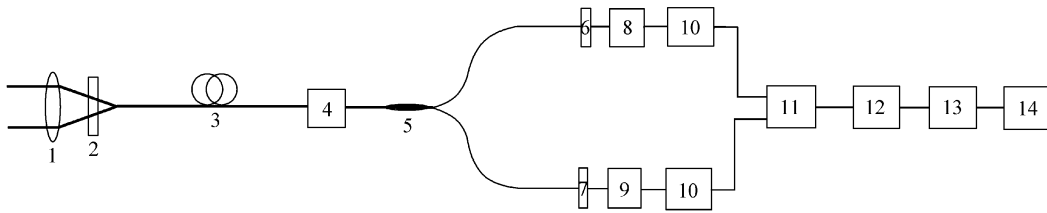


Fig. 1 Schematic diagram of the instrument. 1: sapphire lens; 2: optical chopper; 3: multimode optical fiber; 4: mode filter; 5: Y-coupler; 6,7: narrow-band filter; 8,9: LiTaO₃ pyroelectric detector; 10: head amplifier and selecting-frequency amplifier; 11: divider; 12: A/D converter; 13: 8031 chip microcomputer; 14: display

宝石透镜收集到的热辐射,经调制盘(见图2)调制后被聚焦到光纤的端面上,两者的数值孔径相匹配。辐射光沿芯径为200 μm的多模光纤传输,被由相同光纤制成的定向3 dB耦合器分为两路,再由带宽相同、中心波长不同的两块窄带干涉滤光片滤光后分别经由钽酸锂热释电探测器构成的光电转换系统转变成电信号。电信号再经前置放大、选频放大、相除、模-数转换后送入8031单片机系统以进行必要的数据处理。

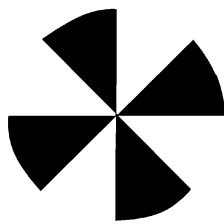


Fig. 2 Schematic diagram of the chopper

2.2 测温原理

透过滤光片6到达探测器8的辐射能 P_{λ_1} 为

$$P_{\lambda_1} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'} \right)^2 \tau_0 A \eta \int_{\lambda_1 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_1 + \Delta\lambda/2} D_{\lambda} \epsilon_{\lambda} \tau_{\lambda} L_{\lambda} d\lambda, \quad (1)$$

透过滤光片7到达探测器9的辐射能 P_{λ_2} 为

$$P_{\lambda_2} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'} \right)^2 \tau_0 A \eta \int_{\lambda_2 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_2 + \Delta\lambda/2} D_{\lambda} \epsilon_{\lambda} \tau_{\lambda} L_{\lambda} d\lambda, \quad (2)$$

式中, D 为宝石透镜的通光口径; f' 为其焦距; τ_0 为大气的衰减系数; A 为探测器的灵敏元面积; η 为调

仪的原理结构简图如图1所示。主要由光学接收系统(包括透镜、斩波器、多模光纤、扰模器、Y型耦合器、窄带干涉滤光片及钽酸锂热释电探测器等)、信号放大与处理系统(主要包括前置放大电路、选频放大电路、除法电路、采样保持电路、模-数转换电路及单片机系统等)和显示系统(主要包括显示器及多个接口电路等)三部分组成。

制盘的调制系数; D_{λ} 为窄带干涉滤光片对波长为 λ 的光的透过率; L_{λ} 为温度为 T 的待测目标在波长 λ 处的发射率; τ_{λ} 为光学系统对波长为 λ 的光的总透过率; L_{λ} 为温度为 T 的黑体在波长 λ 处的单色辐出度; λ_1 、 λ_2 分别为两个测量点处的中心波长, $\Delta\lambda$ 为其带宽。

本仪器采用的窄带干涉滤光片的带宽 $\Delta\lambda$ 仅有20 nm。在这样窄的带宽内,可以认为 ϵ_{λ} 、 τ_{λ} 及 D_{λ} 均与波长无关。据此,可将(1)式、(2)式简化为

$$P_{\lambda_1} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'} \right)^2 \tau_0 A \eta D_{\lambda_1} \epsilon_{\lambda_1} \tau_{\lambda_1} \int_{\lambda_1 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_1 + \Delta\lambda/2} L_{\lambda} d\lambda, \quad (3)$$

$$P_{\lambda_2} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'} \right)^2 \tau_0 A \eta D_{\lambda_2} \epsilon_{\lambda_2} \tau_{\lambda_2} \int_{\lambda_2 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_2 + \Delta\lambda/2} L_{\lambda} d\lambda, \quad (4)$$

(3)式、(4)式相除,并令

$$R = P_{\lambda_1} / P_{\lambda_2}, \quad (5)$$

则有

$$R = \frac{D_{\lambda_1} \epsilon_{\lambda_1} \tau_{\lambda_1}}{D_{\lambda_2} \epsilon_{\lambda_2} \tau_{\lambda_2}} \cdot \left(\int_{\lambda_1 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_1 + \Delta\lambda/2} L_{\lambda} d\lambda \right) / \left(\int_{\lambda_2 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_2 + \Delta\lambda/2} L_{\lambda} d\lambda \right), \quad (6)$$

其中

$$L_{\lambda} = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda k T}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad (7)$$

式中, h 为普朗克常量, $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J/s; k 为玻尔兹曼常量, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K; c 为光速, $c = 2.998 \times 10^8$ m/s。针对不同的测量对象,利用(6)式、(7)式进行标定,并根据标定结果绘制出

$R(T) \sim T$ 关系曲线,测得 R 后查表可求得温度 T 。

3 波长的优化设计

3.1 基于单个探测器的温度分辨力的考虑

不失一般性,以两路探测器中的第一路作为讨论对象。在极窄的波段(带宽 $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = 20 \text{ nm}$)内,可以认为 $D_{\lambda_2} = D_{\lambda_1}$, $\epsilon_{\lambda_2} = \epsilon_{\lambda_1}$ 及 $\tau_{\lambda_2} = \tau_{\lambda_1}$ 均与波长无关。结合文献[5,6]导出的结果,容易写出

$$\Delta T = \frac{2kT^2\lambda^2 \sqrt{A \cdot \Delta f}}{\pi^2 h^2 c^3 \tau_0 A \Delta\lambda \eta \tau_{\lambda_1} D_{\lambda_1} D^* \epsilon_{\lambda_1} (D/f')^2} \times \frac{[\exp(hc/\lambda kT) - 1]^2}{\exp(hc/\lambda kT)}, \quad (8)$$

上式中的 ΔT 即为单个探测器的温度分辨力。

下面进行定量分析。对于实际的测量环境,可取大气的衰减系数 $\tau_0 = 0.85$,光学系统的光的总透过率 $\tau_{\lambda_1} = 0.50$,钽酸锂热释电探测器的探测率 $D^* = 7.0 \times 10^7 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$,探测器的灵敏元面积 $A = \pi \times 0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$,调制盘的调制系数 $\eta = 0.90$,窄带干涉滤光片的透过率 $D_{\lambda_1} = 0.80$;实际系统所用的窄带干涉滤光片的光谱带宽 $\Delta\lambda = 20 \text{ nm}$,选频放大器的带宽 $\Delta f = 10 \text{ Hz}$,光学系统的焦距 $f' = 15 \text{ cm}$,通光口径 $D = 10 \text{ cm}$,并以抛光的钢铸件(温度 $370 \sim 1040 \text{ }^\circ\text{C}$, $\epsilon_{\lambda} = 0.52 \sim 0.56$)作为测量对象(为讨论方便,同时又不失一般性,这里 ϵ_{λ_1} 取平均值: $\epsilon_{\lambda_1} = 0.54$)。

按(8)式作出的在不同的温度下系统中单个探测器的温度分辨力随系统工作波长的变化曲线、以及在不同的工作波长下系统中单个探测器的温度分辨力随被测温度的变化曲线,分别如图3、图4所示。

Fig. 3 Temperature resolving power ΔT versus working wavelengths λ at different temperature T

由图3见,1)对同一待测温度进行测量时,单个探测器的工作波长越短,则其温度分辨力就越低(ΔT 的值越大),但这并不意味着单个探测器的工作波长越长,其温度分辨力就越高。由曲线的变化

趋势可以明显地看出,单个探测器的温度分辨力随其工作波长的变化存在着一个极值点,且这个极值点的位置随被测温度的不同而变化较大;2)当 $\lambda > 2.10 \text{ } \mu\text{m}$ 时,在 $400 \sim 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ 内,不管被测温度如何变化,其温度分辨力均不低于 $0.8 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\Delta T < 0.8 \text{ }^\circ\text{C}$);3)当 $\lambda = 3 \sim 5 \text{ } \mu\text{m}$ 时,对较低的被测温度而言,其温度分辨力基本稳定(介于 $0.3 \sim 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间)。

从图4可以看出,1)当 λ 较大时,系统中单个探测器的温度分辨力 ΔT 随 T 变化平坦。这说明尽管被测温度变化较大,但单个探测器的温度分辨力相对较为稳定;2)当 λ 较小时,例如 $\lambda = 15.0 \text{ } \mu\text{m}$ 时,则 ΔT 随 T 变化剧烈。这说明当温度变化较大时,系统中单个探测器的温度分辨力很不稳定。

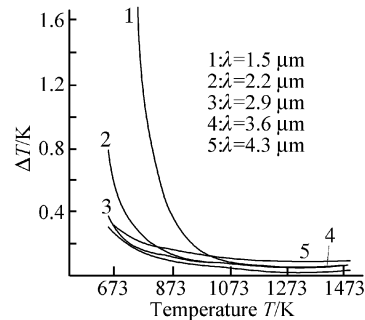


Fig. 4 Temperature resolving power ΔT versus temperature T at different working wavelengths λ

基于上述分析并结合仪器的设计指标可以得出, $\lambda > 2.10 \text{ } \mu\text{m}$ 的波长均可供系统优化选择。但在 $\lambda = 3.0 \sim 4.6 \text{ } \mu\text{m}$ 附近,温度分辨力 ΔT 随 T 变化较为缓慢。

3.2 基于仪器曲线的线性度的考虑

本仪器是利用(7)式绘制出 $R(T) \sim T$ 关系曲线,实测时通过测量 $R(T)$ (表示两种光信号的比值)的值,再利用线性插值法求得温度 T 的。因此 $R(T) \sim T$ 曲线的线性度的优劣,与仪器的测温精度密切相关。

为简化分析,不妨取 $D_{\lambda_1} = D_{\lambda_2}$, $\epsilon_{\lambda_1} = \epsilon_{\lambda_2}$, $\tau_{\lambda_1} = \tau_{\lambda_2}$ 。结合3.1节得到的结果,在 $\lambda_2 = 3.00 \sim 4.50 \text{ } \mu\text{m}$ 的范围内,取 $\lambda_1 = 3.5 \text{ } \mu\text{m}$ 、在不同的 λ_2 下按(6)式作出的 $R(T) \sim T$ 曲线,如图5所示。

由图5可以看出,1) λ_1 、 λ_2 之间的间隔越大,则比值 R 的变化范围就越大,也即曲线的线性度越差,反之,则曲线的线性度就越好;2)当 λ_1 、 λ_2 较接近时,尽管随着被测温度 T 的变化,曲线的线性度亦在变化,但从计算结果(图5)可以看出,这种变化

不大。同时, λ_1 、 λ_2 相距越近时, λ_1 、 λ_2 两波长点处的发射率 ϵ_{λ_1} 、 ϵ_{λ_2} 间的差别就越小, 对提高测温精度也就越有利。因此从图 5 似可得出, λ_1 、 λ_2 间的间隔似越小越好。

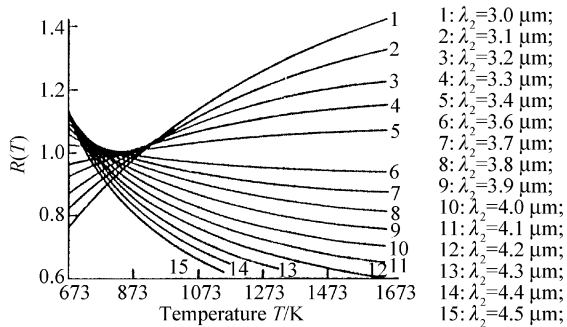


Fig. 5 $R(T)$ versus temperature T at $\lambda_1 = 3.5 \mu\text{m}$ and different working wavelengths λ_2

取 $\Delta\lambda = 0.2 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda$ 。在 $\lambda_1 = 2.2 \sim 4.3 \mu\text{m}$ 的范围内按(6)式作出的 $R(T) \sim T$ 曲线, 如图 6 所示。由图 6 可以看出, 仪器的工作波长似取得越长越好。

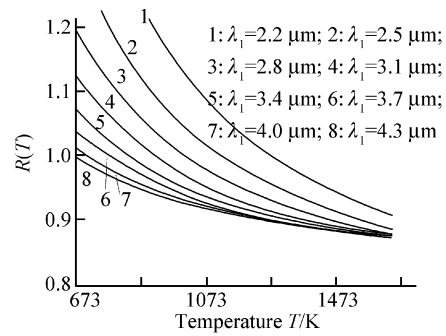


Fig. 6 $R(T)$ versus temperature T at $\Delta\lambda = 0.2 \mu\text{m}$ and different working wavelengths λ_1, λ_2

3.3 基于仪器 $R(T) \sim T$ 曲线灵敏度的考虑

在双波长光纤测温系统中, 待测温度每变化 1°C 时, 信号电平的变化量[本文即 $R(T) \sim T$ 的变化量]被称为系统的温度灵敏度 $S^{[11,12]}$ 。即

$$S = \Delta R(T) / \Delta T, \quad (9)$$

据此容易写出某一温度点处的温度灵敏度

$$S = dR(T) / dT, \quad (10)$$

当 $\Delta\lambda$ 很小 ($\Delta\lambda/\lambda \approx 0$) 时, 利用(7)式可以导出

$$\int_{\lambda_1 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_1 + \Delta\lambda/2} L_\lambda d\lambda \approx 2\pi hc^2 \lambda_1^{-5} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda_1 kT}\right) - 1 \right]^{-1} \Delta\lambda, \quad (11)$$

同理

$$\int_{\lambda_2 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_2 + \Delta\lambda/2} L_\lambda d\lambda \approx 2\pi hc^2 \lambda_2^{-5} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda_2 kT}\right) - 1 \right]^{-1} \Delta\lambda, \quad (12)$$

将(18)式、(19)式代入(6)式中, 化简后得到

$$R = \frac{D_{\lambda_1} \epsilon_{\lambda_1} \tau_{\lambda_1}}{D_{\lambda_2} \epsilon_{\lambda_2} \tau_{\lambda_2}} \cdot \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^5 \cdot \frac{\exp(hc/\lambda_2 kT) - 1}{\exp(hc/\lambda_1 kT) - 1}, \quad (13)$$

(20)式代入(17)式中, 化简后有

$$S = \frac{D_{\lambda_1} \epsilon_{\lambda_1} \tau_{\lambda_1}}{D_{\lambda_2} \epsilon_{\lambda_2} \tau_{\lambda_2}} \cdot \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^5 \cdot \frac{hc}{kT^2} \times \frac{(1/\lambda_1) \exp(hc/\lambda_1 kT) [\exp(hc/\lambda_2 kT) - 1] - (1/\lambda_2) \exp(hc/\lambda_2 kT) [\exp(hc/\lambda_1 kT) - 1]}{[\exp(hc/\lambda_1 kT) - 1]^2}, \quad (14)$$

为简化分析, 这里也取 $D_{\lambda_1} = D_{\lambda_2}$, $\epsilon_{\lambda_1} = \epsilon_{\lambda_2}$, $\tau_{\lambda_1} = \tau_{\lambda_2}$ 。在不同的 λ_1 、 λ_2 下作出的温度灵敏度随温度 T 的变化曲线, 以及在不同的被测温度下作出的温度灵敏度随波长 λ 的变化曲线, 分别如图 7、图 8 所示。

在探测器的后接放大电路中, 所采用的模-数转换器为 16 位的器件。其对单位参考电压的分辨率为 1.53×10^{-5} 。若要求后接二次仪表的测温灵敏度高于 0.15°C , 则 $R(T) \sim T$ 曲线的灵敏度 S 不应低于 $1 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。该曲线也示于图 7、图 8 之中。

由图 7、图 8 显见, 在 $400 \sim 1300^\circ\text{C}$ 内, 仪器的工作波长越长, 则 $R(T) \sim T$ 曲线随温度 T 的变化就越不灵敏; 反之, 则越灵敏。因此, 若仅从 $R(T) \sim T$ 曲线随温度 T 的灵敏度变化的角度出发, 则可得系统的工作波长应越短越好的结论。

由图 7、图 8 还可以看出, 在满足灵敏度 S 不小于 $1 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 的条件下, λ_1 应不大于 $3.1 \mu\text{m}$ 。再结合 3.1 节得出的结论, λ_1 的取值应介于 $2.1 \sim 3.1 \mu\text{m}$ 之间。

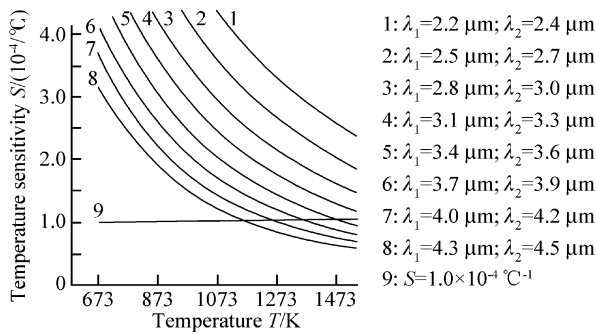


Fig. 7 Temperature sensitivity S versus temperature T at different working wavelengths λ_1, λ_2

进一步的分析亦可得出, λ_1, λ_2 之间的间隔越小, 则 $R(T) \sim T$ 曲线随温度 T 的变化就越不灵敏, 反之, 则越灵敏。

但 3.1 节业已得出, 若 $\Delta\lambda$ 越大, 则 $R(T) \sim T$ 曲线的线性度就越差, 同时, 两波长点处的发射率之间的差别也可能越大。因此, $\Delta\lambda$ 的取值应适中。经反复优化设计, 本文取 $\Delta\lambda = 0.2 \mu\text{m}$ 。

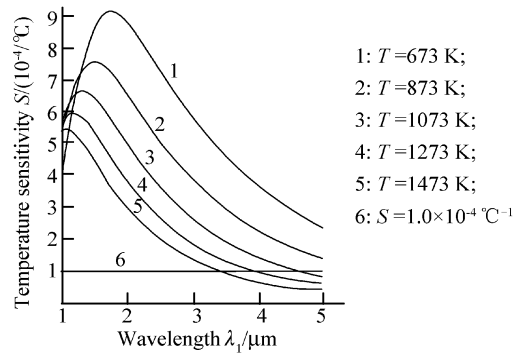


Fig. 8 Temperature sensitivity S versus working wavelengths λ_1 ($\lambda_2 = \lambda_1 + 0.2 \mu\text{m}$) at different temperatures T

为进一步比较, 也定义当待测温度每变化 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, $R(T) \sim T$ 曲线的相对变化量为系统的相对温度灵敏度 S_r [11~13]

$$S_r = \frac{\Delta R/R}{\Delta T/T}, \quad (15)$$

据此并利用(13)式, 可以导出某一温度点处的相对温度灵敏度

$$S_r = \frac{hc}{kT} \frac{(1/\lambda_1) \exp(hc/\lambda_1 kT) [\exp(hc/\lambda_2 kT) - 1] - (1/\lambda_2) \exp(hc/\lambda_2 kT) [\exp(hc/\lambda_1 kT) - 1]}{[\exp(hc/\lambda_1 kT) - 1][\exp(hc/\lambda_2 kT) - 1]}, \quad (16)$$

在不同波长 λ_1, λ_2 下作出的相对温度灵敏度 S_r 随被测温度 T 的变化曲线, 以及在不同的被测温度下作出的相对温度灵敏度 S_r 随波长 λ 的变化曲线, 分别如图 9、图 10 所示。

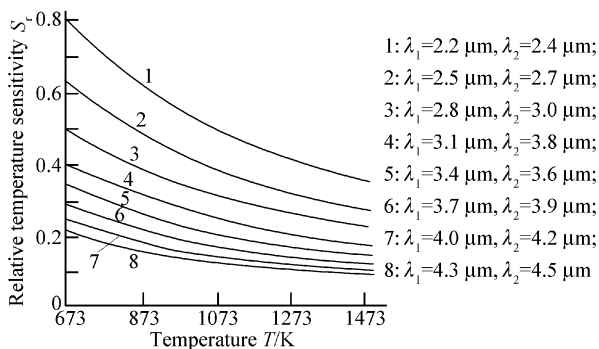


Fig. 9 Relative sensitivity S_r versus temperature T at different working wavelength λ_1, λ_2

图 9、图 10 清楚地表明, 在相同的条件下, 系统的工作波长越短, 则 S_r 的值就越大, 也即系统的相对温度灵敏度越高。反之, 则 S_r 的值就越小, 进而系统的相对温度灵敏度也就越低。

由(22)式可以导出

$$\Delta T = T \Delta R / R S_r, \quad (17)$$

在其他条件都相同的情况下, 据(17)式, 系统

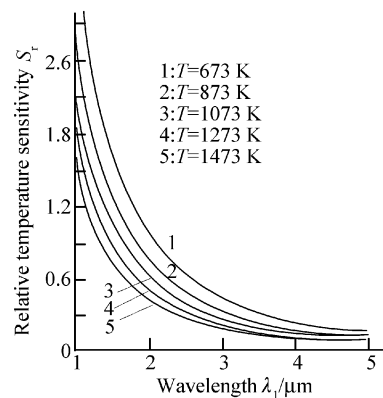


Fig. 10 Relative sensitivity S_r versus wavelengths λ at different temperature T

的相对温度灵敏度 S_r 成反比, 因此相对温度灵敏度越高, 即 S_r 的值越大, 则 ΔT 就越小, 也即系统的测量精密度越高。因此单从相对温度灵敏度的角度出发, 系统的工作波长应越短越好。

图 11 给出了在 $1.0 \sim 3.0$ 内海平面 300 m 长度的路径上大气的透射光谱曲线 [13]。由图 11 可以看出, 在 $2.1 \sim 3.1 \mu\text{m}$ 的范围内, 只有取 $\lambda_1 = 2.1 \mu\text{m}$ 时, 才能既避开水蒸气及 CO_2 气体分子的光谱吸收, 又能满足前面得出的结论。因此, 本文取系统的工作波长 $\lambda_1 = 2.1 \mu\text{m}, \lambda_2 = 2.3 \mu\text{m}$ 。

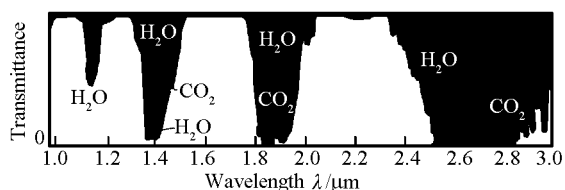


Fig. 11 Atmospheric transmittance spectra at sea level over a 300 m path indicating windows for radiation thermometer operation within 1.0~2.0 μm

Table 1 Experimental results

Measurement methods	Thermalcouple /K	674	825	976	1028	1195	1397
	This instrument/K	674.8	824.1	9776.9	1026.8	1196.3	1395.5
Measurement inaccuracy	Inaccuracy /K	0.8	0.9	0.9	1.2	1.3	1.5
	Relative inaccuracy /%	0.110	0.097	0.102	0.117	0.109	0.107

参 考 文 献

- Khan M A, Allemand C, Eagar T W. Noncontact temperature measurement I: interpolation based techniques. *Rev. Sci. Instrum.*, 1991, **62**(2):392~402
- Shi Deheng, Zhang Yunlong, Huang Yijun *et al.*. A study of the on-line measuring instrument for the specific radiance of high-temperature object. *Chin. J. Scientific Instrument* (仪器仪表学报), 1999, **20**(4):364~367 (in Chinese)
- Krivtsum V, Grass V, Hergenroder R *et al.*. Temperature measurement of liquids by differential absorption of two diode laser; Application of contactless optical detection in isotachopheresis. *Appl. Spectroscopy*, 2001, **55**(9):1251~1258
- Fan C H, Longtin J P. Laser-based measurement of temperature or concentration change at liquids surfaces. *J. Heat Transfer, Transactions ASME*, 2000, **122**(4):757~762
- Shi Deheng, Huang Guoqing, Liu Yufang *et al.*. Optimization of a practical real-time temperature measurement system. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(11):1394~1401 (in Chinese)
- Shi Deheng, Huang Guoqing. Working wavelength optimization of a practical real-time temperature measurement system. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2003, **30**(3):545~550 (in Chinese)
- Hahn J W, Rhee C. Reference wavelength method for a two-color pyrometer. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(24):5276~5279
- Hunter G B, Allehand C D, Eagar T W. Multiwavelength pyrometer. *Opt. Engng.*, 1985, **24**(6):1081~1085
- Tamura Y, Tatsuwaki M, Sugimura T *et al.*. Temperature measurement of steel in the furnace. In: *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, New York: American Institute of Physics, 1982, **5**:505~512
- Coates P B. Multiwavelength pyrometer. *Metrologia*, 1981, **17**:103~109
- Xin Jun, Feng Qibo, Lin Tiesheng *et al.*. Wavelength optimization of a high-precision noncontact dual-wavelength fiber-optic pyrometer. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 1999, **A26**(2):121~126 (in Chinese)
- Wang Wei, Zhou Bangquan, Zhang Zaixuan *et al.*. Temperature measurement accuracy of the distributed optical fiber Raman photons temperature sensor system. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(1):100~105 (in Chinese)
- Dewitt D P. Inferring temperature from optical radiation measurement. *Opt. Engng.*, 1986, **25**(4):596~601

结束语 本文采用双光通道、利用钽酸锂热释电探测器作光电转换器件,设计出了一种能在钢铁生产线上准确测量中、高温度的实时红外比色测温仪。只需对该仪器稍加改进,即可测量更低的温度。应用该仪器对钢铸件进行测量,所得结果如表 1 所示。由表 1 可见,其温度的绝对测量误差及相对测量误差均令人满意。进一步的工作正在进行之中。