

文章编号: 0258-7025(2004)11-1367-06

一种双波长光纤测温系统波长带宽的 优化设计

施德恒^{1,2,3}, 孙金锋^{1,3}, 陈玉科², 刘玉芳¹, 黄国庆²

¹ 河南师范大学物理系, 河南 新乡 453002

(² 空军第一航空学院基础部, 河南 信阳 464000; ³ 四川大学原子与分子物理研究所, 四川 成都 610065)

摘要 基于 Kirchhoff 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。简要介绍了该仪器的基本结构及其工作原理, 并依照单个探测器的温度分辨率、测温系统中 $R(T)$ - T 曲线的线性度与温度灵敏度, 以及系统的测温误差随波长带宽的变化, 在考虑单个探测器的最小响应度和温度分辨率的基础上, 对系统工作波长的带宽进行了优化设计。得出了在测温范围 $400\sim 1300\text{ }^\circ\text{C}$ 内, 当系统的工作波长为 $\lambda_1 = 2.1\ \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 2.3\ \mu\text{m}$ 时, 其工作波长的带宽取 $20\ \text{nm}$ 较为合适的结论。

关键词 测量与计量; 测温仪器; Kirchhoff 定律; 辐射测温; 双波长; 光纤

中图分类号 TN 247 **文献标识码** A

Optimization of Wavelength Bandwidth for a Dual-Wavelength Fiber-Optic Temperature Measuring System

SHI De-heng^{1,2,3}, SUN Jin-feng^{1,3}, CHEN Yu-ke², LIU Yu-fang¹, HUANG Guo-qing²

¹ Department of Physics, Henan Normal University, Xinxiang, Henan 453002, China

² Department of Foundation, The First Aeronautical College of Air Force, Xinyang, Henan 464000, China

³ Institute of Atomic and Molecular Physics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

Abstract Based on the Kirchhoff law, a practical high-precision dual-wavelength fiber-optic temperature measuring system using LiTaO_3 pyroelectric detector is presented. The structure and the principle of the system are described. According to the temperature resolving power of single detector, the linearity of $R(T)$ - T curves, temperature measuring sensitivity in the measuring system as well as the relationship between the temperature measuring errors and the change of wavelength bandwidth, and after considering the minimal responsibility and the measuring resolution of a single detector, the optimization for its working wavelength bandwidth was done. The optimal result showed that the proper bandwidth of the working wavelength should be 20nm at $400\sim 1300\text{ }^\circ\text{C}$ and $\lambda_1 = 2.1\ \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 2.3\ \mu\text{m}$.

Key words measurement and metrology; temperature measuring instrument; Kirchhoff law; temperature measurement by radiation; dual-wavelength; optical fiber

1 引言

与传统的测温方法^[1,2]相比, 双波长光纤高温测温系统具有测温精度高、抗电磁干扰能力强、体积

小等优点^[3], 且可以有效地减小被测目标光谱发射率的变化、环境光干扰、器件老化等因素带来的测温误差^[4~6], 因而受到了广泛的重视。

双波长光纤测温系统的优化设计是该测温系统

收稿日期: 2003-06-18; 收到修改稿日期: 2003-10-08

基金项目: 河南省自然科学基金(编号: 0314003002)资助项目。

作者简介: 施德恒(1964—), 男, 河南商城人, 教授, 博士研究生, 主要从事光电子技术与应用及原子分子与光物理研究。

E-mail: scattering@sina.com.cn

实用化的重要保证^[7,8]。优化设计的主要目标是选择最佳的工作波长、波长带宽和光学探测器,以及为光学探测器及其后续的电子学系统进行最佳配置^[9~11],以改善系统测温曲线的线性度和温度灵敏度,提高探头的温度分辨率并减小系统的测温误差。文献[12,13]已对该系统的总体设计进行了描述,并对其工作波长进行了优化设计。本文则依照系统的测温误差, $R(T)$ - T 曲线的线性度和温度灵敏度随波长带宽的变化关系,在考虑单个探测器的最小响应度及温度分辨率的基础上,对其波长带宽进行了优化设计。

2 仪器结构与测温原理

仪器的原理结构简图如图 1 所示。其调制盘的结构简图以及系统的工作过程等,参见文献[12,13]。

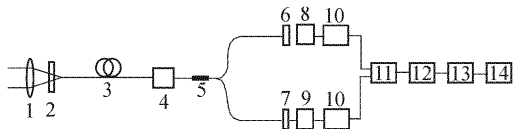


图 1 仪器的结构简图

1: 宝石透镜; 2: 斩波器; 3: 多模光纤; 4: 扰模器; 5: Y 型耦合器; 6, 7: 窄带干涉滤光片; 8, 9: 钽酸锂热释电探测器; 10: 前置放大与选频放大电路; 11: 除法电路; 12: 模-数转换电路; 13: 单片机系统; 14: 显示系统

Fig. 1 Schematic diagram of the instrument

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

由文献[13]知,两个钽酸锂热释电探测器应分别工作在 $\lambda_1 = 2.1 \mu\text{m}$ 及 $\lambda_2 = 2.3 \mu\text{m}$ 处。两只探测器接收到的辐射能 $P_{\lambda_1}, P_{\lambda_2}$ 分别为

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

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

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; ϵ_{λ} 为温度为 T 的待测目标在波长 λ 处的发射率; τ_{λ} 为光纤、光学系统对波长为 λ 的光的总透过率(其中也包括光纤的传输损耗); 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。

测量是在不太宽的波段内进行的。在这样的带宽内,可以认为 $\epsilon_{\lambda}, \tau_{\lambda}$ 及 D_{λ} 均为常数。据此, (1), (2) 两式可分别简化为

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

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

(3), (4) 两式相除, 并令

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

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

其中 $L_{\lambda} = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} [\exp(hc/\lambda kT) - 1]^{-1}$ (7) 式中, h 为普朗克常数, $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$; k 为玻尔兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$; c 为光速, $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。针对不同的测量对象, 利用(6), (7)两式进行标定, 并根据标定结果绘制出 $R(T)$ - T 关系曲线(它们是分段的直线段)。实际应用时, 测得 $R(T)$ 后查表可求得温度 T 。

3 波长带宽的优化设计

3.1 单个探测器的温度分辨率

高温下, 当黑体的温度 T 改变 ΔT 时, 波长 λ 处的单色辐出度 L_{λ} 的改变量 ΔL_{λ} 可表述为

$$\Delta L_{\lambda} = \int_T^{T+\Delta T} \frac{\partial L_{\lambda}}{\partial T} dT \quad (8)$$

利用式(3)和式(4), 可以导出当温度 T 改变 ΔT 时, 两只探测器接收到的辐射能的变化量分别为

$$\Delta P_{\lambda_1} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'} \right)^2 \tau_0 A \eta D_{\lambda_1} \epsilon_{\lambda_1} \tau_{\lambda_1} \int_{\lambda_1 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_1 + \Delta\lambda/2} \Delta L_{\lambda} d\lambda \quad (9)$$

$$\Delta P_{\lambda_2} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'} \right)^2 \tau_0 A \eta D_{\lambda_2} \epsilon_{\lambda_2} \tau_{\lambda_2} \int_{\lambda_2 - \Delta\lambda/2}^{\lambda_2 + \Delta\lambda/2} \Delta L_{\lambda} d\lambda \quad (10)$$

只有当两只探测器接收到的辐射能的变化量 $\Delta P_{\lambda_1}, \Delta P_{\lambda_2}$ 均不小于探测器的噪声等效功率时, 才能引起探测器的响应。即

$$\Delta P_{\lambda_1} \geq P_{\text{NEP}} \quad (11)$$

$$\Delta P_{\lambda_2} \geq P_{\text{NEP}} \quad (12)$$

其中

$$P_{\text{NEP}} = \frac{V_S}{V_N} \cdot \frac{\sqrt{A \cdot \Delta f}}{D^*} \quad (13)$$

(13) 式中, P_{NEP} 为噪声等效功率, V_S/V_N 为信噪比, 在推算探测器的温度分辨率时, 取 $V_S/V_N = 1$; D^* 为探测器的探测率; Δf 为后续的选频放大器的带宽。

由式(7)可以导出

$$\frac{\partial L_\lambda}{\partial T} = \frac{2\pi h^2 c^3}{k} \cdot \frac{\exp(hc/\lambda k T)}{\lambda^6 T^2 [\exp(hc/\lambda k T) - 1]^2} \quad (14)$$

将式(8)~(14)联合起来,并仅考虑极限时的情况,可以导出

$$\int_{\lambda_1-\Delta\lambda/2}^{\lambda_1+\Delta\lambda/2} \left\{ \int_T^{T+\Delta T} \frac{\exp(hc/\lambda k T)}{\lambda^6 T^2 [\exp(hc/\lambda k T) - 1]^2} dT \right\} d\lambda = \frac{2k \sqrt{A \cdot \Delta f}}{\pi^2 h^2 c^3 \tau_0 A \eta \tau_{\lambda_1} D_{\lambda_1} D^* \epsilon_{\lambda_1} (D/f')^2} \quad (15)$$

$$\int_{\lambda_2-\Delta\lambda/2}^{\lambda_2+\Delta\lambda/2} \left\{ \int_T^{T+\Delta T} \frac{\exp(hc/\lambda k T)}{\lambda^6 T^2 [\exp(hc/\lambda k T) - 1]^2} dT \right\} d\lambda = \frac{2k \sqrt{A \cdot \Delta f}}{\pi^2 h^2 c^3 \tau_0 A \eta \tau_{\lambda_2} D_{\lambda_2} D^* \epsilon_{\lambda_2} (D/f')^2} \quad (16)$$

对于实际的测量环境,可取大气的衰减系数 τ_0

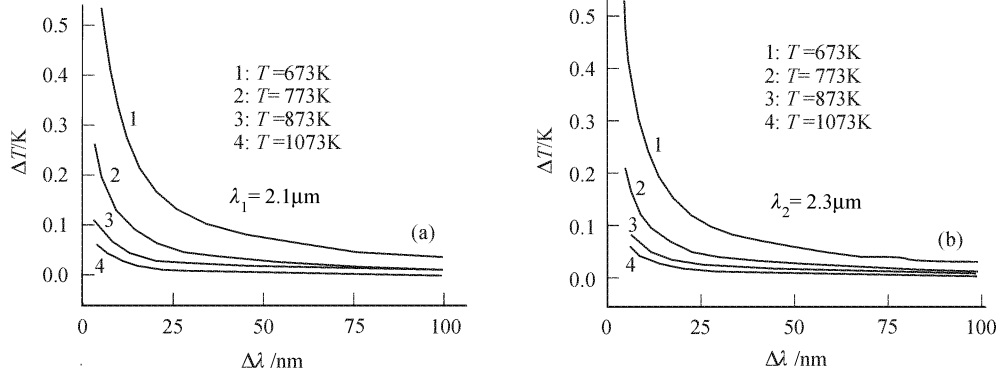


图2 不同波长下单个探测器的温度分辨率 ΔT 随波长带宽 $\Delta\lambda$ 的变化曲线

Fig. 2 Temperature resolution ΔT of a single detector versus wavelength bandwidth $\Delta\lambda$ at different temperature T

由图2可以看出,1)在同一待测温度下,系统的波长带宽越窄,则其单个探测器的温度分辨率就越低(对应的 ΔT 的值就越大),反之,则越高(例如, $\lambda_1 = 2.1 \mu\text{m}$ 和 $\Delta\lambda = 5 \text{ nm}$ 时, $\Delta T = 0.7557 \text{ K}$;而当 $\lambda_1 = 2.1 \mu\text{m}$ 和 $\Delta\lambda = 50 \text{ nm}$ 时, $\Delta T = 0.07557 \text{ K}$)。但在 $\Delta\lambda = 5 \sim 25 \text{ nm}$ 时,变化较慢;2)在同一波长带宽下,温度越低,则其温度分辨率越低。反之,则越高(例如, $\Delta\lambda = 20 \text{ nm}$ 和 $T = 673 \text{ K}$ 时,其温度分辨率的值只有 0.18893 K ;但当 $\Delta\lambda = 20 \text{ nm}$ 和 $T = 873 \text{ K}$ 时,则为 0.01706 K)。这说明,待测温度越低,则波长带宽对单个探测器的温度分辨率的影响就大;反之,则越小;3)在同一待测温度、同一波长带宽下, $\lambda_2 = 2.3 \mu\text{m}$ 的一路探测器的温度分辨率总比 $\lambda_1 = 2.1 \mu\text{m}$ 的一路高。因此,只要 λ_1

$= 0.85$,光学系统对光的总透过率 $\tau_{\lambda_1} = \tau_{\lambda_2} = 0.50$,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 $\eta_1 = \eta_2 = 0.90$,窄带干涉滤光片的透过率 $D_{\lambda_1} = D_{\lambda_2} = 0.80$;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 $370 \sim 1040^\circ\text{C}$, $\epsilon_\lambda = 0.52 \sim 0.56$)作为测量对象。为分析上的方便,同时也不失一般性,取 $\epsilon_{\lambda_1} = \epsilon_{\lambda_2} = 0.54$ 代入计算。在不同的待测温度下,由式(15)和(16)作出的温度分辨率分别随波长带宽的变化曲线如图2所示。

$= 2.1 \mu\text{m}$ 的一路达到设计要求,则 $\lambda_2 = 2.3 \mu\text{m}$ 的一路必将满足要求。

从上面的分析似可得出,系统的波长带宽应取得越短越好。

3.2 $R(T)$ - T 曲线的温度灵敏度

两路信号的比值随温度的变化曲线即 $R(T)$ - T 关系曲线,是本系统进行温度测量的依据。因此,它对温度变化的敏感程度将大大影响系统的测温精度。若将待测温度每变化 1°C 时,信号电平的变化量(即 $R(T)$ - T 的变化量)记为系统的温度灵敏度 $S^{[14,15]}$

$$S = \Delta R(T) / \Delta T \quad (17)$$

则可求出某一温度点处 $R(T)$ - T 曲线的温度灵敏度

$$S = dR(T) / dT \quad (18)$$

将式(6)代入式(18)中,并利用式(14),可以导出

$$S = \frac{D_{\lambda_1} \epsilon_{\lambda_1} \tau_{\lambda_1}}{D_{\lambda_2} \epsilon_{\lambda_2} \tau_{\lambda_2}} \cdot \frac{2\pi h^2 c^3}{k} \cdot \frac{\int_{\lambda_1-\Delta\lambda/2}^{\lambda_1+\Delta\lambda/2} \frac{\exp(hc/\lambda k T)}{\lambda^6 T^2 [\exp(hc/\lambda k T) - 1]^2} d\lambda \cdot \int_{\lambda_2-\Delta\lambda/2}^{\lambda_2+\Delta\lambda/2} L_\lambda d\lambda - \int_{\lambda_2-\Delta\lambda/2}^{\lambda_2+\Delta\lambda/2} \frac{\exp(hc/\lambda k T)}{\lambda^6 T^2 [\exp(hc/\lambda k T) - 1]^2} d\lambda \cdot \int_{\lambda_1-\Delta\lambda/2}^{\lambda_1+\Delta\lambda/2} L_\lambda d\lambda}{\left(\int_{\lambda_2-\Delta\lambda/2}^{\lambda_2+\Delta\lambda/2} L_\lambda d\lambda \right)^2} \quad (19)$$

为简化分析,这里取 $D_{\lambda_1} = D_{\lambda_2}, \epsilon_{\lambda_1} = \epsilon_{\lambda_2}, \tau_{\lambda_1} = \tau_{\lambda_2}$ 。在不同待测温度下作出的温度灵敏度随波长带宽的变化曲线以及在不同的波长带宽下作出的温度灵敏度随待测温度的变化曲线分别如图 3,4 所示。

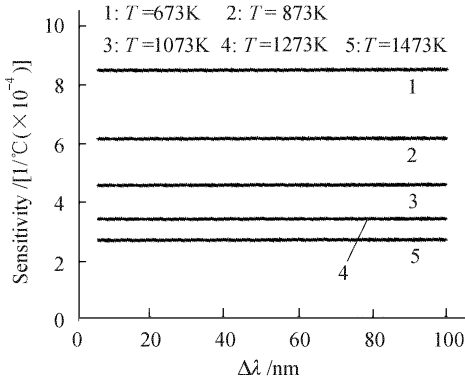


图 3 不同被测温度下温度灵敏度 S 随波长带宽的变化曲线

Fig. 3 Temperature sensitivity S versus wavelength bandwidth $\Delta\lambda$ at different temperature T

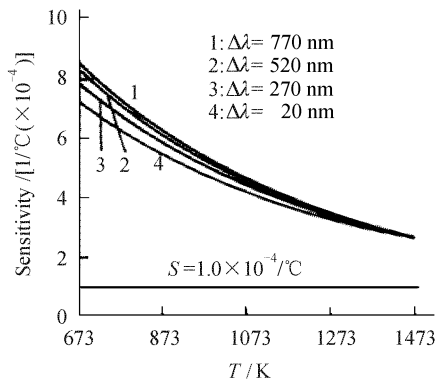


图 4 不同波长带宽下温度灵敏度 S 随被测温度的变化曲线

Fig. 4 Temperature sensitivity S versus measurement temperature T at different wavelength bandwidth $\Delta\lambda$

在本系统的电子学线路中,采用了 16 位的器件作为其 A/D 转换器件^[13]。当要求其后续接的二次仪表的测温灵敏度高于 0.15°C 时,则要求 $R(T)-T$ 曲线的灵敏度 S 不应低于 $1 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ ^[13]。为便于分析和比较,该曲线也示于图 4 中。

由图 3 不难看出,在某一确定温度下,温度灵敏度 S 随波长带宽的变化曲线几乎与 $\Delta\lambda$ 轴平行;图 4 也显示出,在 $673 \sim 1473 \text{ K}$ 的测温范围内,于 $\Delta\lambda = 20, 270, 520$ 及 770 nm 这 4 个波长带宽下作出的温度灵敏度随被测温度的变化曲线也几乎重叠在一起。因此,不太大的 $\Delta\lambda$ 变化 ($\Delta\lambda \leq 100 \text{ nm}$) 对 $R(T)-T$ 曲线的温度灵敏度几乎不产生什么影响。

3.3 $R(T)-T$ 曲线的线性度

良好的 $R(T)-T$ 曲线的线性度是进行准确测温的关键。因此 $\Delta\lambda$ 对 $R(T)-T$ 曲线的线性度的影响将直接影响温度的测量精度。

为简化分析,同样取 $D_{\lambda_1} = D_{\lambda_2}, \epsilon_{\lambda_1} = \epsilon_{\lambda_2}, \tau_{\lambda_1} = \tau_{\lambda_2}$ 。利用式(15)在几种不同的带宽及温度下算出的 $R(T)-T$ 曲线的数据如表 1 所示。由表 1 可明显看出, $\Delta\lambda$ 的变化对 $R(T)-T$ 曲线的线性度虽有影响,但影响较小(例如,在 $T = 673 \text{ K}$ 处,当 $\Delta\lambda$ 由 5 nm 变为 95 nm 时, $R(T)-T$ 曲线的线性度改变为 0.066% ;在 $T = 1273 \text{ K}$ 处,当 $\Delta\lambda$ 由 5 nm 变为 95 nm 时, $R(T)-T$ 曲线的线性度改变只有 0.012% 。它们都是非常小的)。因此在 $\Delta\lambda$ 较小 ($\Delta\lambda \leq 95 \text{ nm}$) 时,由 $\Delta\lambda$ 的变化引起的 $R(T)-T$ 曲线的线性度的变化几乎可以忽略不计。

表 1 不同带宽及待测温度下的 $R(T)-T$ 曲线的线性度变化数据

Table 1 Linearity change about $R(T)-T$ curves at different $\Delta\lambda$ and T

Temperature /K	Bandwidth /nm	$R(T)$	Linearity change compared with $\Delta\lambda = 5 \text{ nm} / \%$
673	5	0.65014	
	35	0.65020	0.00922
	65	0.65034	0.03080
	95	0.65057	0.06610
873	5	0.79607	
	35	0.79609	0.00250
	65	0.79612	0.00628
	95	0.79617	0.01260
1073	5	0.90329	
	35	0.90328	0.00110
	65	0.90326	0.00332
	95	0.90323	0.00664
1273	5	0.98415	
	35	0.98414	0.00101
	65	0.98410	0.00508
	95	0.98403	0.01230
1473	5	1.04657	
	35	1.04656	0.00096
	65	1.04651	0.00573
	95	1.04643	0.01338

3.4 系统测温误差

先考虑无外界干扰光进入探测器的情况。为分析上的方便,仍然假设 $D_{\lambda_1} = D_{\lambda_2}, \epsilon_{\lambda_1} = \epsilon_{\lambda_2}, \tau_{\lambda_1} =$

τ_{λ_2} ,且在 λ_1, λ_2 这两个波长点处的带宽 $\Delta\lambda$ 内, ϵ_{λ} 为相等的常数。则式(6)可简化为

$$R(T) = \frac{\int_{\lambda_1-\Delta\lambda/2}^{\lambda_1+\Delta\lambda/2} L_{\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_2-\Delta\lambda/2}^{\lambda_2+\Delta\lambda/2} L_{\lambda} d\lambda} \quad (20)$$

利用式(20)在不同的待测温度下作出的测温误差随波长带宽的变化曲线,以及在不同的波长带宽下作出的测温误差随被测温度的变化曲线如图5和6所示。

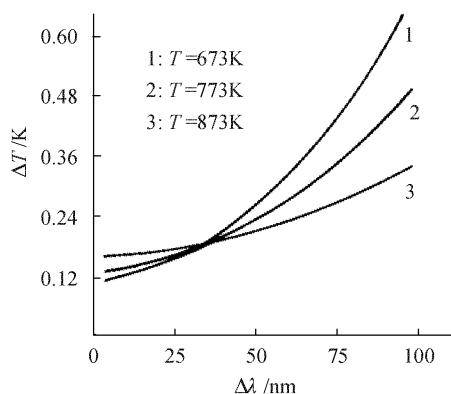


图5 不同温度下测温误差 ΔT 随波长带宽 $\Delta\lambda$ 的变化曲线

Fig. 5 Temperature measurement ΔT versus wavelength bandwidth $\Delta\lambda$ at different temperature T

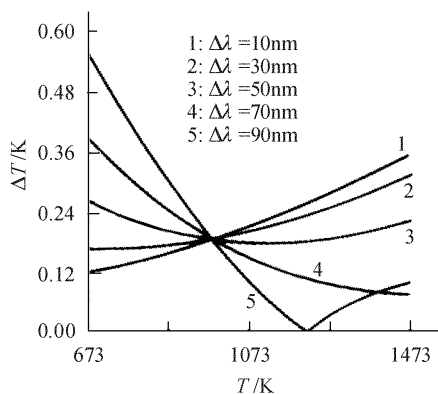


图6 不同波长带宽 $\Delta\lambda$ 下测温误差 ΔT 随被测温度 T 的变化曲线

Fig. 6 Temperature measurement ΔT versus measurement temperature T at different wavelength $\Delta\lambda$

由图5可以看出,1)当待测温度较低时,带宽越窄,则测温误差越小,反之,则越大(例如在 $T = 673$ K下进行测量,当 $\Delta\lambda = 5$ nm时 $\Delta T = 0.11$ K,而当 $\Delta\lambda = 95$ nm时则 $\Delta T = 0.62$ K);2)当待测温度较高时,波长带宽的变化对测温误差的影响也较大,但随着波长带宽的增大,波长带宽的变化对测温误差的影响则没有低温时明显。

由图6可看出,1)当波长带宽较窄($\Delta\lambda \leq 30$ nm)时,测温误差随被测温度的增加而明显增大;2)当 $\Delta\lambda$ 较宽($\Delta\lambda \geq 50$ nm)时,测温误差随波长带宽的增加虽有所减小,但在低温段仍有较大的误差(例如,在 $T = 673$ K下进行测量,当 $\Delta\lambda = 90$ nm时 ΔT 则有0.57 K)。因此,在无外界光干扰的情况下要提高温度的测量精度,尤其是要提高低温的测温精度,波长带宽应越窄越好。

考虑有外界干扰光进入探测器的情况。探测器接收到的辐射应包括待测物体自身的辐射及其对周围环境辐射的反射^[16]。显然,波长带宽越宽,则进入探头的外界干扰光就越多,从而引入的测温误差也就越大。因此,从抗外界光干扰的角度出发,系统的波长带宽也应取得越窄越好^[17]。

3.5 探测器最小可探测功率与系统波长带宽的优化选择

从上面的分析可以看出,仅从系统测温误差的角度考虑,则 $\Delta\lambda$ 越小,系统总体上的测温误差就越小。但当 $\Delta\lambda$ 很小时(考虑到钽酸锂热释电探测器的最小可探测功率及光路的损耗情况, $\Delta\lambda$ 不宜小于10 nm),探头的温度分辨率很低。这同样也制约着测温精度的提高。本系统要求准确测温的范围为 $400 \sim 1200$ °C(实际可测范围要求约 $300 \sim 1800$ °C), 400 °C下 $\Delta\lambda = 10$ nm时,探头部分的温度分辨率 ΔT 仅约 0.8 °C,显然不能满足测温精度的要求。因此本系统选取 $\Delta\lambda = 20$ nm作为系统的波长带宽(此时,探头部分的温度分辨率约为 0.1889 K,无外界光干扰时的测温误差为 0.14 K,都满足设计要求)。

4 实验结果

以抛光的钢铸件作为测量对象。采用5组共10块中心波长分别为 $2.1 \mu\text{m}$ 和 $2.3 \mu\text{m}$ 的窄带干涉滤光片(带宽分别为10 nm, 20 nm, 50 nm, 80 nm

表2 在不同的待测温度下,系统的波长带宽对测温不确定度的影响

Table 2 Effect on temperature measurement errors by different wavelength bandwidths at different temperatures

Wavelength bandwidths /nm	10	20	50	80	100
Measurement errors ($T = 738$ K)	1.2	1.2	1.3	1.4	1.4
Measurement errors ($T = 879$ K)	1.6	1.6	1.8	1.8	1.8

及 100 nm),对温度分别为 738 K 及 879 K 的待测目标进行测温实验,得到的实验结果如表 2 所示。由表 2 可见,这一测量结果与前面分析得到的结论是吻合的,从而证明了前文讨论所得结果的正确性。

5 结 论

本系统在研究测温系统探头的温度分辨率, $R(T)-T$ 曲线的线性度与温度灵敏度以及测温精度的基础上,研究了系统波长带宽的选取原则,得到了如下结论:

1) 系统的波长带宽对探头的温度分辨率有较大的影响。系统的波长带宽越窄,则系统的温度分辨率就越低,反之,则越高。因此从提高探头的温度分辨率的角度考虑,应使系统的波长带宽尽量宽些;

2) 系统的波长带宽对 $R(T)-T$ 曲线的线性度及其温度灵敏度影响很小,在进行波长带宽的优化设计时可以不予考虑;

3) 波长带宽对系统的测温精度有较大的影响。波长带宽越窄,则测温误差越小。因此从系统的测温精度的角度考虑,应使系统的波长带宽尽量小些。

实际波长带宽的选择,应在不影响探头的温度分辨率的情况下使其尽量小,以充分提高系统的测温精度。基于这些考虑,本测温系统选择 $\Delta\lambda = 20$ nm 作为其波长带宽。

参 考 文 献

- D. P. Dewitt. Inferring temperature from optical radiation measurement [J]. *Opt. Engng.*, 1986, **25**(4):596~601
- Shi Deheng, Zhang Yunlong, Huang Yijun *et al.*. A study of the on-line measuring instrument for the specific radiance of high-temperature object [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 1999, **20**(4):364~367
施德恒,张云龙,黄宜军等. 高温物体比辐射率在线测量系统的研究[J]. *仪器仪表学报*, 1999, **20**(4):364~367
- P. B. Coates. Multi-wavelength pyrometry [J]. *Metrologia*, 1981, **17**:103~109
- G. B. Hunter, C. D. Allemand, T. W. Eagar. Multiwavelength pyrometer: an improved method [J]. *Opt. Engng.*, 1985, **24**(6):1081~1085
- P. B. Coates. Analytic estimation of systematic errors in photoelectric pyrometry [J]. *High Temperatures-High Pressures*, 1985, **17**:507~518
- J. W. Hahn, C. Rhee. Reference wavelength method for a two-color pyrometer [J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(24):5276~5279
- Wang Yong, Liao Yanbiao, Xin Jun *et al.*. Optimization of a practical birefringence fiber-optic temperature sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(1):88~92
王勇,廖延彪,辛军等. 实用化双折射式光纤温度传感器系统最佳设计[J]. *光学学报*, 1999, **19**(1):88~92
- M. A. Khan, C. Allemand, T. W. Eagar. Noncontact temperature measurement I. Interpolation based techniques [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1991, **62**(2):392~402
- Shi Deheng, Huang Guoqing, Liu Yufang *et al.*. Optimization of a practical real-time temperature measurement system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9):1394~1401
施德恒,黄国庆,刘玉芳等. 一种实用化实时测温系统的优化设计[J]. *光学学报*, 2003, **23**(9):1394~1401
- Shi Deheng, Huang Guoqing, Liu Yufang. Working wavelength optimization of a practical real-time temperature measurement system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(6):545~550
施德恒,黄国庆,刘玉芳等. 一种实用化实时测温系统的工作波长的最优设计[J]. *中国激光*, 2003, **30**(6):545~550
- Liu Yufang, Shi Deheng, Chen Yuke *et al.*. Laser source optimization of a practical real-time temperature measurement system [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2003, **22**(4):297~302
刘玉芳,施德恒,陈玉科等. 一种实用化实时测温系统激光光源的最佳选择[J]. *红外与毫米波学报*, 2003, **22**(4):297~302
- Shi Deheng, Chen Yuke, Liu Yufang *et al.*. A practical dual-wavelength high-precision fiber-optic colorimeter using pyroelectric detector [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2004, **25**(3):223~227
施德恒,陈玉科,刘玉芳等. 一种采用热电器件的实用化双波长高精度光纤测温仪[J]. *计量学报*, 2004, **25**(3):223~227
- Shi Deheng, Liu Yufang, Chen Yuke *et al.*. A high-precision fiber optic colorimeter using pyroelectric detector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4):542~547
施德恒,刘玉芳,陈玉科等. 一种高精度光纤测温系统工作波长的优化设计[J]. *光学学报*, 2004, **24**(4):542~547
- Xin Jun, Feng Qibo, Lin Tiesheng *et al.*. Wavelength optimization of a high-precision noncontact dual-wavelength fiber-optic pyrometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(2):121~126
辛军,冯其波,林铁生等. 高精度双波长非接触光纤高温计的波长最优设计[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(2):121~126
- Wang Wei, Zhou Bangquan, Zhang Zaixuan *et al.*. Temperature measurement accuracy of the distributed optical fiber Raman photons temperature sensor system [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(1):100~105
王伟,周邦全,张在宣等. 分布型光纤拉曼光子温度传感器系统的测温精度[J]. *光学学报*, 1999, **19**(1):100~105
- Shi Deheng, Liu Yufang, Sun Jinfeng *et al.*. Effect and control on temperature measurement accuracy of real-time temperature measurement system by reflection radiation and detector radiation itself [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1):105~110
施德恒,刘玉芳,孙金锋等. 反射辐射和探测器本身的辐射对实时测温系统测温精度的影响及其抑制[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1):105~110
- Y. Tamura, M. Tatsuwaki, T. Sugimura *et al.*. Temperature measurement of steel in the furnace [C]. New York: American Institute of Physics, 1982, **5**:505~512