

文章编号: 0258-7025(2003)06-0545-06

一种实用化实时测温系统的工作波长的最优设计

施德恒¹, 黄国庆¹, 刘玉芳²

(¹ 空军第一航空学院基础部, 河南 信阳 464000; ² 河南师范大学物理系, 河南 新乡 453002)

摘要 基于 Kirchhoff 定律, 依照测温系统的各主要技术参数与各主要测量指标(极限灵敏度、测温精度及测温范围)之间的关系, 对利用激光并采用钽酸锂热释电探测器作光电转换器件的实用化实时测温系统的工作波长进行了最优化设计。实验表明, 在测温范围 400~1200°C 内, 测温灵敏度及测温精度均符合设计要求。

关键词 测试计量仪器; 辐射测温; Kirchhoff 定律; 热释电探测器; 测温灵敏度; 测温精度; 半导体激光器

中图分类号 TN 247 文献标识码 A

Working Wavelength Optimization of a Practical Real-time Temperature Measurement System

SHI De-heng¹, HUANG Guo-qing¹, LIU Yu-fang²

(¹ Department of Foundation, The First Aeronautical College of Air Force, Xinyang, Henan 464000, China)
(² Department of Physics, Henan Normal University, Xinxiang, Henan 453002, China)

Abstract Based on the Kirchhoff law, according to the relationships between various technical parameters and main specifications (limited temperature measurement sensitivity, temperature measurement accuracy, temperature measurement range), an optimal working wavelength of the practical real-time temperature measurement system using laser diode and LiTaO₃ pyroelectric detector is proposed. Experimental results show that both temperature measurement sensitivity and temperature measurement accuracy are suitable for the requirement in the range of 400~1200°C.

Key words measuring instrument; temperature measurement by radiation; Kirchhoff law; pyroelectric detector; temperature measurement sensitivity; temperature measurement accuracy; laser diode

1 引言

可以将高温的测量方法分为接触式测温法和非接触式测温法两类^[1]。就非接触式的辐射测温法而言, 又可将其分为被动式辐射测温法^[2,3]及主动式辐射测温法^[4]两种。在主动式辐射测温法中, 有使用红外辐射源作为测量光源的^[5], 也有使用半导体激光器作为测量光源的^[4,6]。

在主动式辐射测温系统中, 由于使用了激光器或红外辐射源作为系统的测量光源, 因而都能实时、准确地测出被测目标的真实温度, 且都具有较高的

测温精度和灵敏度^[7,8]。

研究表明, 在采用钽酸锂热释电探测器作光电转换器件并使用半导体激光器作测量光源的测温系统中, 仪器的工作波长对其测温灵敏度及测温精度、乃至测温范围都有不同程度的影响。因此需对其进行最优化设计。

2 系统结构与测温原理

2.1 系统结构

图 1 为实用化实时测温系统的原理结构方框

收稿日期: 2002-03-14; 收到修改稿日期: 2002-05-08

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(001120321)。

作者简介: 施德恒(1964.6—), 男, 河南商城人, 空军第一航空学院基础部教授, 硕士, 主要从事原子分子与光物理及光电子技术与应用研究。E-mail: shideheng@yahoo.com.cn

图,图 2 为该系统的同步光电转换系统、检测光电转换系统、监测光电转换系统及激光器的光路图。仪器工作时,半导体激光器产生的连续激光束,先由准直镜准直、扩束镜扩束、调制盘(见图 3,其中,1,2,3,5,6 用于透过激光、红外辐射;4 仅用于透过红外辐射。1,2,3,5,6 与 4 的中心波长不同;1,2,3 与 5,6 的带宽不同)调制成脉冲激光束,再由分束镜分束后发射。一方面,检测接收镜头接收到的光信号,经调制盘调制、滤波后,再经由钽酸锂热释电探测器(检测探测器)构成的光电转换系统转换成电信号;另一方面,经分束器分出的一部分激光能量,经窄带干涉滤光片滤光后也由钽酸锂探测器(监测探测器)转变成电信号,该信号用于标准化激光光源的发射能量。

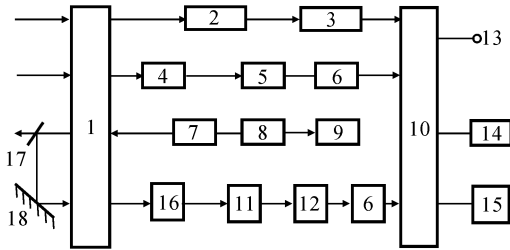


图 1 系统的原理结构简图

1:调制盘;2:同步光电转换系统;3:整形放大电路;4:检测光电转换系统;5:放大及抗干扰电路;6:模-数转换电路;7:扩束镜;8:准直镜;9:激光器;10:单片机系统;11:监测光电转换系统;12:电压跟随放大电路;13:输出;14:显示;15:打印;16:透镜;17:分束镜;18:全反射镜

Fig.1 Schematic diagram of the system

1: chopper; 2: synchronous photoelectrical system; 3: shaping amplifier; 4: measurement photoelectrical system; 5: amplifying and anti-jamming circuit; 6: A/D converter; 7: extending lens; 8: collimating lens; 9: laser diode; 10: chip microprocessor system; 11: monitoring photoelectrical system; 12: voltage amplifier; 13: output; 14: display; 15: printer; 16: focusing lens; 17: optical beam splitter; 18: reflector

透过调制盘上镶嵌的同步滤光片的光信号,也由钽酸锂探测器(同步探测器)转变成电信号。该信号用于后续各个电路的触发与同步。

2.2 测量原理

当无激光束进入检测探测器时,检测探测器接收到的仅是待测目标的辐射能 P_1

$$P_1 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \eta \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_\lambda \tau_\lambda L_\lambda d\lambda \quad (1)$$

式中, D 为通光口径; f' 为光学系统的焦距; τ_0 为大气的传播系数; A 为探测器的灵敏元面积; η 为调制

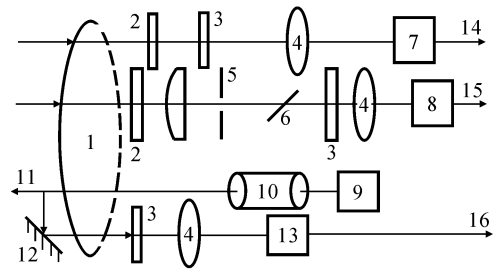


图 2 监测光电转换系统、检测光电转换系统、同步光电转换系统及激光器的光路简图

1:调制盘;2:保护窗;3:窄带干涉滤光片;4:聚焦透镜;5:孔径光阑;6:视场光阑;7:同步探测器;8:检测探测器;9:半导体激光器;10:准直与扩束透镜组;11:分束镜;12:全反射镜;13:监测探测器;14:同步探测器输出;15:检测探测器输出;16:监测探测器输出

Fig.2 Light path diagram of monitoring photoelectrical system, measurement photoelectrical system, synchronous photoelectrical system and laser diode

1: chopper; 2: protection windows; 3: narrow-band optical filter; 4: lens; 5: aperture stop; 6: field stop; 7: synchronous detector; 8: measurement detector; 9: laser diode; 10: collimating and extending lens; 11: optical beam splitter; 12: reflector; 13: monitoring detector; 14: synchronous detector output; 15: measurement detector output; 16: monitoring detector output

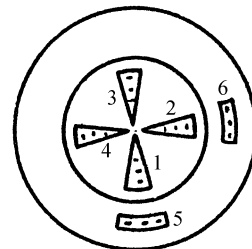


图 3 调制盘结构简图

1~4:窄带干涉滤光片;5,6:同步滤光片

Fig.3 Schematic diagram of the chopper

1~4: narrow-band optical filter; 5,6: synchronous filter

盘的调制系数; ϵ_λ 为温度为 T 的待测目标在波长 λ 处的比辐射率; L_λ 为温度为 T 的黑体在波长 λ 处的单色辐射能; τ_λ 为光学系统对波长为 λ 的光的总透过率。

当有激光束进入检测探测器时,检测探测器接收到的能量 P_2 则由待测目标反射的激光能量及待测目标辐射的红外能量这两部分组成

$$P_2 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \eta \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_\lambda \tau_\lambda L_\lambda d\lambda + \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \eta \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \gamma \beta \tau_\lambda E_\lambda d\lambda \quad (2)$$

式中, γ 为待测目标表面的反射率; β 为待测表面镜

面反射特性的光学校正系数; E_λ 为入射待测表面的单色激光能量。

由 Kirchhoff 定律, 可以得出

$$\gamma = 1 - \epsilon_\lambda \quad (3)$$

在极窄的波段(带宽 $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = 10 \text{ nm}$)内, 可以认为 ϵ_λ 及 τ_λ 均与波长无关。文献[5]也已指出, 对于同一待测面, β 是一常数。据此可将(1), (2) 两式简化为

$$P_1 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \eta \epsilon_\lambda \tau_\lambda \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda d\lambda \quad (4)$$

$$P_2 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \eta \epsilon_\lambda \tau_\lambda \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_\lambda d\lambda + \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \eta \gamma \beta \tau_\lambda \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_\lambda d\lambda \quad (5)$$

由(4), (5)两式可以导出

$$\epsilon_\lambda = 1 - \frac{4f'^2(P_2 - P_1)}{\pi D^2 \tau_0 A \eta \tau_\lambda \beta P_3} \quad (6)$$

其中

$$P_3 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_\lambda d\lambda \quad (7)$$

为入射待测目标表面的激光能量, 由监测探测器监测得到。再结合黑体辐射公式

$$L_\lambda = 2\pi h c^2 \lambda^{-5} [\exp(hc/\lambda k T) - 1]^{-1} \quad (8)$$

即可算出待测目标的温度。式中, h 为 Planck 常数, $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$; k 为 Boltzmann 常数, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$; c 为光速, $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3 系统工作波长的最优设计

3.1 基于极限灵敏度的考虑

高温下当黑体的温度 T 改变 ΔT 时, 波长 λ 处的单色辐射能 L_λ 的改变量 ΔL_λ 可表述为

$$\Delta L_\lambda = \int_T^{T+\Delta T} \frac{\partial L_\lambda}{\partial T} dT \quad (9)$$

当 ΔT 很小时, (9) 式可简化成

$$\Delta L_\lambda = \left(\frac{\partial L_\lambda}{\partial T}\right) \cdot \Delta T \quad (10)$$

由(8)式得

$$\frac{\partial L_\lambda}{\partial T} = \frac{2\pi h^2 c^3}{k} \cdot \frac{\exp(hc/\lambda k T)}{\lambda^6 T^2 [\exp(hc/\lambda k T) - 1]} \quad (11)$$

根据(4) 式, 可以导出当温度 T 改变 ΔT 时, 系统接收到的辐射能变化量为

$$\Delta P_1 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \eta \epsilon_\lambda \tau_\lambda \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Delta L_\lambda d\lambda \quad (12)$$

在极窄的波段内, 可近似认为 ΔL_λ 不随 λ 变化。

据此, 可将(12) 式简化为

$$\Delta P_1 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \eta \epsilon_\lambda \tau_\lambda \Delta L_\lambda \cdot \Delta\lambda \quad (13)$$

只有当系统接收到的辐射能的变化量 ΔP_1 不小于钽酸锂热释电探测器的噪声等效功率时, 才能引起系统的响应。即

$$\Delta P_1 \geq \text{NEP} \quad (14)$$

其中

$$\text{NEP} = \frac{V_s}{V_N} \cdot \frac{\sqrt{A \cdot \Delta f}}{D^*} \quad (15)$$

式中, V_s/V_N 为信噪比, 在推算系统的极限灵敏度时, 取 $V_s/V_N = 1$; D^* 为探测器的探测率; Δf 为后续的选择放大器带宽。

将式(10), (11), (13) 及式(15) 代入式(14) 中, 可以导出

$$\Delta T = \frac{2kT^2 \lambda^6 \sqrt{A \cdot \Delta f}}{\pi^2 h^2 c^3 \tau_0 A \Delta \lambda \eta \tau_\lambda D^* \epsilon_\lambda (D/f')^2} \cdot \frac{[\exp(hc/\lambda k T) - 1]^2}{\exp(hc/\lambda k T)} \quad (16)$$

上式中的 ΔT 即为系统的温度分辨力, 也是系统的极限灵敏度。显见, 极限灵敏度与波长间有较为复杂的关系。

3.2 基于测温精度的考虑

在极窄的波段($\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = 10 \text{ nm}$)内, 由(4), (8)两式, 有

$$P_1 = \frac{\pi^2}{2} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \eta \epsilon_\lambda \tau_\lambda h c^2 \lambda^{-5} \cdot \Delta\lambda \cdot [\exp(hc/\lambda k T) - 1]^{-1} \quad (17)$$

据此可以导出

$$T = \frac{hc}{\lambda k} \cdot \left\{ \ln \left[1 + \frac{\pi^2}{2} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \eta \tau_\lambda h c^2 \lambda^{-5} \cdot \Delta\lambda \cdot \frac{\epsilon_\lambda}{P_1} \right] \right\}^{-1} \quad (18)$$

由误差传递公式^[9], 上式的标准误差可写作

$$\sigma_T = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial \epsilon_\lambda}\right)^2 \cdot \sigma_{\epsilon_\lambda}^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial P_1}\right)^2 \cdot \sigma_{P_1}^2} \quad (19)$$

由(18)式可以导出

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \epsilon_\lambda} &\approx \frac{\lambda k T^2}{hc} \cdot \frac{1}{\epsilon_\lambda} \\ \frac{\partial T}{\partial P_1} &\approx \frac{\lambda k T^2}{hc} \cdot \frac{1}{P_1} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

将式(20)代入式(19)中, 化简后有

$$\sigma_T \approx \frac{\lambda k T^2}{hc} \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta \epsilon_\lambda}{\epsilon_\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P_1}{P_1}\right)^2} \quad (21)$$

式(20)中, $\Delta \epsilon_\lambda/\epsilon_\lambda$ 为非直接测量值。下面推导 $\Delta \epsilon_\lambda/\epsilon_\lambda$

的表达式。

由误差传递公式^[9], (6) 式的标准测量误差可写成

$$\sigma_{\epsilon_\lambda} = \sqrt{\left(\frac{\partial \epsilon_\lambda}{\partial P_1}\right)^2 \cdot \sigma_{P_1}^2 + \left(\frac{\partial \epsilon_\lambda}{\partial P_2}\right)^2 \cdot \sigma_{P_2}^2 + \left(\frac{\partial \epsilon_\lambda}{\partial P_3}\right)^2 \cdot \sigma_{P_3}^2} \quad (22)$$

由(6)式得

$$\left. \begin{aligned} \left| \frac{\partial \epsilon_\lambda}{\partial P_1} \right| &= \frac{4}{\pi} \cdot \left(\frac{f'}{D}\right)^2 \cdot \frac{1}{\tau_0 A \eta \tau_\lambda \beta} \cdot \frac{1}{P_3} \\ \left| \frac{\partial \epsilon_\lambda}{\partial P_2} \right| &= \frac{4}{\pi} \cdot \left(\frac{f'}{D}\right)^2 \cdot \frac{1}{\tau_0 A \eta \tau_\lambda \beta} \cdot \frac{1}{P_3} \\ \left| \frac{\partial \epsilon_\lambda}{\partial P_3} \right| &= \frac{4}{\pi} \cdot \left(\frac{f'}{D}\right)^2 \cdot \frac{|P_2 - P_1|}{\tau_0 A \eta \tau_\lambda \beta} \cdot \frac{1}{P_3^2} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

将(23)式代入(22)式中,化简后得到

$$\sigma_{\epsilon_\lambda} = \frac{4}{\pi} \cdot \left(\frac{f'}{D}\right)^2 \cdot \frac{1}{\tau_0 A \eta \tau_\lambda \beta} \cdot \frac{1}{P_3} \cdot \sqrt{(\Delta P_1)^2 + (\Delta P_2)^2 + (P_2 - P_1)^2 \left(\frac{\Delta P_3}{P_3}\right)^2} \quad (24)$$

利用(6)式还可以得出

$$(P_2 - P_1)^2 \left(\frac{\Delta P_3}{P_3}\right)^2 = \left[\frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \eta \tau_\lambda \beta (1 - \epsilon_\lambda) \right]^2 (\Delta P_3)^2 \quad (25)$$

$$\Delta P_2 = \Delta P_1 + \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \eta \tau_\lambda \beta (1 - \epsilon_\lambda) \Delta P_3 \quad (26)$$

实际测量是在最佳测量条件下(即入射待测目标表面的激光能量 $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_\lambda d\lambda$ 比其红外辐射能高出一个数量级以上)进行的。据此可以得出

$$\Delta P_2 \gg \Delta P_1 \quad (27)$$

将式(25), (26)代入式(24)并考虑式(27),化简后可得

$$\sigma_{\epsilon_\lambda} \approx \sqrt{2} (1 - \epsilon_\lambda) \cdot \left| \frac{\Delta P_3}{P_3} \right| \quad (28)$$

将式(28)代入式(21),得到

$$\sigma_T \approx \frac{\lambda k T^2}{hc} \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta P_1}{P_1}\right)^2 + 2 \left(\frac{1 - \epsilon_\lambda}{\epsilon_\lambda}\right)^2 \cdot \left| \frac{\Delta P_3}{P_3} \right|^2} \quad (29)$$

对于实际的测量环境,可取大气的传播系数 $\tau_0 = 0.80$,光学系统的光的总透过率 $\tau_\lambda = 0.50$,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 $A = \pi(0.1/2)^2 \text{ cm}^2$,调制盘的调制系数 $\eta = 0.80$,实际系统所用的窄带干涉滤光片的光谱带宽 $\Delta\lambda = 10 \text{ nm}$,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 $370 \sim 1040^\circ\text{C}$, $\epsilon_\lambda = 0.52 \sim 0.56$)作为测量对象(为讨论方便, ϵ_λ 取平均值: $\epsilon_\lambda = 0.5$)。

按(16)式作出的系统的极限灵敏度随系统工作波长的变化曲线如图4中的曲线1~4所示;按(29)式作出的系统的标准测量误差随系统工作波长的变化曲线,如图4中的曲线5~8所示。

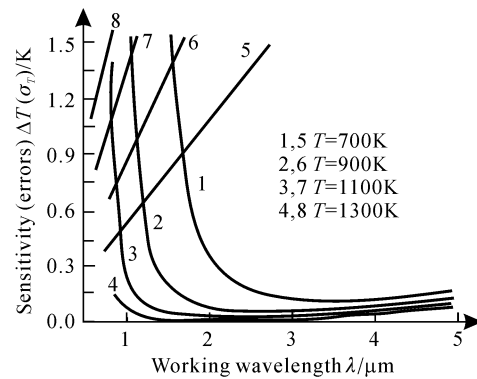


图4 不同温度 T 下系统的极限灵敏度 ΔT 及标准测量误差 σ_T 随工作波长 λ 的变化曲线

Fig. 4 Limited temperature measurement sensitivity ΔT and standard measurement error σ_T versus working wavelengths λ at different temperature T

由曲线1~4可见,对同一温度进行测量时,系统的工作波长越短,其极限灵敏度的值就越大,系统对被测温度变化的反应就越不灵敏。但这并不意味着系统的工作波长越长,系统对温度变化的反应就越灵敏。由曲线的变化趋势可明显地看出,系统的极限灵敏度随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。

由曲线5~8可以看出,系统的工作波长越短,则其标准测量误差就越小。因此单从测量误差出发,则要求系统的工作波长应尽量短。图中,曲线1~3与曲线5~7的交点分别为 $(1.6549 \mu\text{m}, 0.88 \text{ K})$, $(1.1084 \mu\text{m}, 0.97 \text{ K})$ 和 $(0.8246 \mu\text{m}, 1.08 \text{ K})$ 。曲线8与曲线4在给定的范围内没有交点。由于只有当 ΔT 的值小于 σ_T 的值时,这两个技术参数才都有意义,因此在对 700 K , 900 K 和 1100 K 的温度进行测量时,只有当系统的工作波长分别长于 $1.6549 \mu\text{m}$, $1.1084 \mu\text{m}$ 和 $0.8246 \mu\text{m}$ 时,系统才能正常工作。

基于上述分析可以得出,供系统优化选择的波长范围是有限的,不是越长越好,也不是越短越好。

3.3 基于测温范围的考虑

按(16)式作出的系统的极限灵敏度随被测温度的变化曲线如图5所示。从图5可以看出:1)当 λ 较大时, ΔT 随 T 变化平坦。这说明尽管被测温度变化较大,但系统的极限灵敏度仍相对稳定。在考虑(29)式后,可以得出系统的温度可测范围较大这一结论;2)当 λ 较小时,例如 $\lambda=0.81\mu\text{m}$,则 ΔT 随 T 变化剧烈。这说明当温度变化较大时,系统测温的极限灵敏度很不稳定。因此在考虑(29)式后,可以看出此系统的测温范围较小,即只能测量较高的温度(838℃以上)。

当 $\lambda=2.00\mu\text{m}$, $T=673.15\text{K}$ 时,由(16)式得

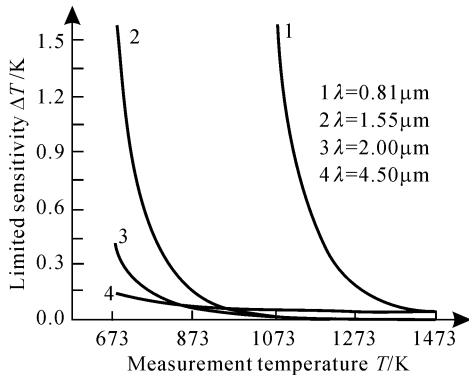


图5 系统的工作波长不同时,其极限灵敏度 ΔT 随被测温度 T 的变化曲线

Fig.5 Limited temperature measurement sensitivity ΔT versus temperature T at different working wavelengths λ

到的 $\Delta T=0.4486\text{K}$,由(29)式得到的 $\sigma_T=0.9830\text{K}$ 。显然 $\Delta T < \sigma_T$ 。这说明,仅从极限灵敏度、测温范围及测温误差出发,再结合图5可以看出, $\lambda \geq 2.00\mu\text{m}$ 的波长均可作为系统的工作波长。

但(29)式指出,波长越短,温度的标准测量误差则越小。同时由图5还可以看出,当 $\lambda=2.00\mu\text{m}$ 时,在一个较宽的温度范围内的 ΔT 都优于 $\lambda=4.50\mu\text{m}$ 时的 ΔT 。基于这些考虑,并结合3.1,3.2节得出的结论和目前市场上可供的半导体激光光源的情况,作者认为,对400℃以上的温度进行测量时,系统的工作波长选择在 $\lambda=2.00\mu\text{m}$ 处是比较合适的。

4 实验结果

以前述抛光的钢铸件作为测量目标,分别采用一长为 $0.81\mu\text{m}$ 的GaAlAs/GaAs,波长为 $1.55\mu\text{m}$ 的InP/InGaAsP和波长为 $2.00\mu\text{m}$ 的InGaAs/I半导体激光器作为激光光源,并分别采用中心波长为 $0.81\mu\text{m}$, $1.55\mu\text{m}$ 和 $2.00\mu\text{m}$ 的窄带干涉滤光片(带宽 $\Delta\lambda=\lambda_2-\lambda_1=10\text{nm}$)进行测温实验,得到的实验结果如表1所示。为便于比较,将按式(29)计算出来的、在相应温度、波长下的标准测量误差及图5中相应点处的极限灵敏度的值也列于表1中。显见,实验结果与理论结果相符,也与预期的相一致,从而证明了系统波长设计的正确性。

表1 在不同温度和波长下,测温灵敏度及测温精度的实验结果及其与计算结果的比较

Table 1 Experimental data and calculation results about temperature measurement sensitivity and measurement errors at different temperature and wavelengths

		Temperature /K	701	848	954	1038	1279
2.00 μm	Limited temperature measurement sensitivity /K	Experimental data	0.32	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
		Calculation results	0.319	0.078	0.0388	0.025	0.01
	Measurement errors /K	Experimental data	1.0	1.5	1.9	2.1	2.4
		Calculation results	1.06	1.81	2.29	2.32	3.53
		Temperature /K	648	853	980	1050	1250
1.55 μm	Limited temperature measurement sensitivity /K	Experimental data	3.6	0.2	<0.1	<0.1	<0.1
		Calculation results	3.417	0.189	0.611	0.038	0.013
	Measurement errors /K	Experimental data	0.9	1.4	1.6	1.9	2.5
		Calculation results	0.70	1.22	1.61	1.84	2.61
		Temperature /K	687	815	912	1193	1245
0.81 μm	Limited temperature measurement sensitivity /K	Experimental data				0.50	0.25
		Calculation results				0.350	0.196
	Measurement errors /K	Experimental data				1.2	1.3
		Calculation results				1.244	1.43

5 结 论

本文按照测温系统的各主要参数与各主要测量指标之间的关系,合理地确定了系统的工作波长,从而既保证了系统的测温灵敏度,又保证了系统的测温精度。

参 考 文 献

- 1 M. A. Khan, C. Allemand, T. W. Eagar. Noncontact temperature measurement I: interpolation based techniques [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1991, **62**(2):392~402
- 2 J. W. Hahn, C. Rhee. Reference wavelength method for a two-color pyrometer [J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(24):5276~5279
- 3 G. B. Hunter, C. D. Allemand, T. W. Eagar. Multiwavelength pyrometer: an improved method [J]. *Opt. Eng.*, 1985, **24**(6):1081~1085
- 4 V. Krivtsum, B. Grab, R. Hergenroder *et al.*. Temperature measurement of liquids by differential absorption of two diode lasers: Application of contactless optical detection in isotachopheresis [J]. *Appl. Spectroscopy*, 2001, **55**(9):1251~1258
- 5 Hu Ruihua, Luan Song, Sun Lingke. Radiation thermometer for determining temperature and emissivity [J]. *Infrared Technology* (红外技术), 1998, **20**(2):21~22, 17 (in Chinese)
- 6 C. H. Fan, J. P. Longtin. Laser-based measurement of temperature or concentration change at liquid surfaces [J]. *Journal of Heat Transfer, Transactions ASME*, 2000, **122**(4):757~762
- 7 H. H. Kee, G. P. Lees, T. P. Newson. Technique for measuring distributed temperature with 35-cm spatial resolution utilizing the Landau-Placzek ratio [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(7):873~875
- 8 Y. Tamura, M. Tatsuwaki, T. Sugimura *et al.*. Temperature measurement of steel in the furnace [C]. in "Temperature Its Measurement and Control in Science and Industry", New York: American Institute of Physics, **5**(1):505~512
- 9 Gao Zhiyun, Gao Yue. Photoelectrical Measurement Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995. 24~25 (in Chinese)