

文章编号: 0253-2239(2003)11-1394-8

# 一种实用化实时测温系统的优化设计\*

施德恒<sup>1</sup> 黄国庆<sup>1</sup> 刘玉芳<sup>2</sup> 陈玉科<sup>1</sup> 李振新<sup>2</sup>

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

**摘要:** 基于基尔霍夫定律, 利用半导体激光器及钽酸锂热释电探测器设计了一种实用化的实时测温系统。依照测温系统各主要技术指标(温度分辨力、温度的标准偏差及测温范围)与各主要技术参量(激光光源的能量、波长、放大器的带宽及光学系统的相对孔径等)之间的关系, 对实时测温系统的各主要参量(激光光源的能量、光学系统的相对孔径及放大器的带宽)进行了优化设计。实验表明, 在测温范围 673~1473 K 内, 温度测量的不确定度优于 0.3%, 分辨力优于 0.4 K, 均符合设计要求。

**关键词:** 光学计量; 测温; 辐射测温; 半导体激光器; 热释电探测器; 温度分辨力; 测温不确定度

中图分类号: TN247 文献标识码: A

## 1 引 言

高温的测量方法可分为接触式测温法和非接触式测温法两类<sup>[1]</sup>。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<sup>[2~6]</sup>及主动式辐射测温法<sup>[7]</sup>两种。在主动式辐射测温法中, 由于使用了激光器或红外辐射源作为系统的测量光源<sup>[8~11]</sup>, 因而都能实时、准确地测出被测目标的真实温度, 且都具有较高的精度。

研究表明, 在作者等设计的采用钽酸锂热释电探测器作光电转换器件的测温系统<sup>[12]</sup>中, 激光器的波长(仪器的工作波长)及发射能量、放大器的带宽及光学系统的相对孔径等参量都能影响系统的测温不确定度及其温度分辨力。文献<sup>[12]</sup>已对仪器的工作波长进行了讨论, 本文拟对激光光源的能量、放大器的带宽以及光学系统的相对孔径等进行最优化设计。

## 2 测温原理

当无激光束进入检测探测器时, 文献<sup>[12]</sup>已导出检测探测器接收到的待测目标的辐射能

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

式中  $D$  为通光口径,  $f'$  为光学系统的焦距,  $\tau_0$  为大气

的传播系数,  $A$  为探测器的灵敏元面积,  $\eta$  为调制盘的调制系数,  $\epsilon_\lambda$  为温度为  $T$  的待测目标在波长  $\lambda$  处的比辐射率,  $L_\lambda$  为温度为  $T$  的黑体在波长  $\lambda$  处的单色辐射能,  $\tau_\lambda$  为光学系统对波长为  $\lambda$  的光的总透过率。

当有激光束进入检测探测器时, 文献<sup>[12]</sup>已导出检测探测器接收到的能量  $P_2$

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

式中  $\gamma$  为待测目标表面的反射率;  $\beta$  为待测表面镜面反射特性的光学校正系数;  $E_\lambda$  为入射待测表面的单色激光能量。

由(1)式、(2)式可以导出

$$\epsilon_\lambda = 1 - \frac{4f'^2(P_2 - P_1)}{\pi D^2 \tau_0 A \eta \tau_\lambda \beta P_3}, \quad (3)$$

其中

$$P_3 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_\lambda d\lambda. \quad (4)$$

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

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

在极窄的波段内, 由(1)式可以导出

$$P_1 = \frac{\pi^2}{2} \left( \frac{D}{f'} \right)^2 \tau_0 A \eta \epsilon_\lambda \tau_\lambda hc^2 \lambda^{-5} \times \Delta\lambda [\exp(hc/\lambda k T) - 1]^{-1}, \quad (6)$$

据此可以算出待测目标的温度

\* 河南省科技攻关项目(001120321)资助课题。

E-mail: shideheng@yahoo.com.cn

收稿日期: 2002-09-19; 收到修改稿日期: 2003-09-01

$$T = \frac{hc}{\lambda k} \left\{ \ln \left[ 1 + \frac{\pi^2}{2} \left( \frac{D}{f'} \right)^2 \tau_0 A \eta \tau_\lambda h c^2 \lambda^{-5} \Delta \lambda \frac{\epsilon_\lambda}{P_1} \right] \right\}^{-1}, \quad (7)$$

式中  $h$  为普朗克常量,  $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $k$  为玻尔兹曼常量,  $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $c$  为光速,  $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。其中 (3) 式中的  $\frac{f'2}{D^2 \tau_0 A \eta \tau_\lambda \beta}$  及 (7) 式中的  $\left( \frac{D}{f'} \right)^2 \tau_0 A \eta \tau_\lambda$  由标定给出。

### 3 系统的优化设计

#### 3.1 基于温度的标准偏差的考虑与激光器的优化选择

由误差传递公式<sup>[13]</sup>, (7) 式标准偏差可写作

$$\sigma_T = \sqrt{\left( \frac{\partial T}{\partial \epsilon_\lambda} \right)^2 \sigma_{\epsilon_\lambda}^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial P_1} \right)^2 \sigma_{P_1}^2}. \quad (8)$$

利用 (7) 式, 可将 (8) 式进一步化简成

$$\sigma_T \approx \frac{\lambda k T^2}{hc} \sqrt{\left( \frac{\Delta \epsilon_\lambda}{\epsilon_\lambda} \right)^2 + \left( \frac{\Delta P_1}{P_1} \right)^2}. \quad (9)$$

文献[12]已导出  $\sigma_{\epsilon_\lambda}$  的表达式:

$$\sigma_{\epsilon_\lambda} = \frac{4}{\pi} \left( \frac{f'}{D} \right)^2 \frac{1}{\tau_0 A \eta \tau_\lambda \beta} \frac{1}{P_3} \times \sqrt{(\Delta P_1)^2 + (\Delta P_2)^2 + (P_2 - P_1)^2 \left( \frac{\Delta P_3}{P_3} \right)^2}. \quad (10)$$

利用 (3) 式还可以得出<sup>[12]</sup>

$$\left. \begin{aligned} (P_2 - P_1)^2 \left( \frac{\Delta P_3}{P_3} \right)^2 &= \left[ \frac{\pi}{4} \left( \frac{D}{f'} \right)^2 \tau_0 A \eta \tau_\lambda \beta (1 - \epsilon_\lambda) \right]^2 (\Delta P_3)^2, \\ \Delta P_2 &= \Delta P_1 + \frac{\pi}{4} \left( \frac{D}{f'} \right)^2 \tau_0 A \eta \epsilon_\lambda \tau_\lambda \beta (1 - \epsilon_\lambda) \Delta P_3. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

假定检测探测器接收到的待测目标表面反射的激光能量 [大小为  $\frac{\pi}{4} \left( \frac{D}{f'} \right)^2 \tau_0 A \eta \gamma \beta \tau_\lambda \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_\lambda d\lambda$ ] 为其接收到的红外能量  $P_1$  的  $\alpha$  倍, 即

$$\frac{\pi}{4} \left( \frac{D}{f'} \right)^2 \tau_0 A \eta \gamma \beta \tau_\lambda \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_\lambda d\lambda = \alpha P_1,$$

也就是

$$\frac{\pi}{4} \left( \frac{D}{f'} \right)^2 \tau_0 A \eta \gamma \beta (1 - \epsilon_\lambda) P_3 = \alpha P_1,$$

或

$$\alpha \Delta P_1 = \frac{\pi}{4} \left( \frac{D}{f'} \right)^2 \tau_0 A \eta \gamma \beta (1 - \epsilon_\lambda) \Delta P_3, \quad (12)$$

(11) 式、(12) 式代入 (10) 式中, 化简后有

$$\sigma_{\epsilon_\lambda} = \sqrt{2} (1 - \epsilon_\lambda) \frac{\sqrt{1 + \alpha + \alpha^2}}{\alpha} \left| \frac{\Delta P_1}{P_1} \right|, \quad (13)$$

(13) 式代入 (9) 式中, 有

$$\sigma_T = \frac{\lambda k T^2}{hc} \times \sqrt{2 \left( \frac{1 - \epsilon_\lambda}{\epsilon_\lambda} \right)^2 \frac{1 + \alpha + \alpha^2}{\alpha^2} \left| \frac{\Delta P_3}{P_3} \right| + \left| \frac{\Delta P_1}{P_1} \right|}. \quad (14)$$

以抛光的钢铸件 (温度 643~1313 K,  $\epsilon_\lambda = 0.52 \sim 0.56$ ) 作为测量对象。对于实际的测量系统,  $P_1$ 、 $P_3$  的测量不确定度都不大于 1%。为分析方便, 不妨取  $|\Delta P_1/P_1| = 1\%$ 、 $|\Delta P_3/P_3| = 1\%$ ,  $\epsilon_\lambda = 0.54$ , 则 (14) 式可化为

$$\sigma_T = \frac{\lambda k T^2}{hc} \sqrt{\frac{2.45\alpha^2 + 1.45\alpha + 1.45}{\alpha^2}} \times 10^{-2}. \quad (15)$$

下面进行定量分析。文献[12]指出, 该系统的最佳工作波长应在 2.00  $\mu\text{m}$  左右。不妨取  $\lambda = 2.00 \mu\text{m}$ 。在不同的温度下按 (15) 式作出的  $\sigma_T/T \sim \alpha$  关系曲线, 如图 1 所示。由图 1 可以看出: 1) 被测温度相同时,  $\alpha$  越小, 则  $\sigma_T/T$  越大, 反之, 则  $\sigma_T/T$  越小。由此可见,  $\alpha$  取值要大, 也就是说光源的能量越高越好; 2)  $\alpha$  大到一定程度时 ( $\alpha > 10$ ), 则  $\sigma_T/T$  基本不随  $\alpha$  的变化而变化。综合 1)、2) 可以得出, 激光光源的能量应较高 ( $\alpha > 10$ ), 但太高的激光能量 ( $\alpha > 30$ ) 又无实际意义, 甚至有害 (此时红外信号将淹没在强大的激光信号中)。

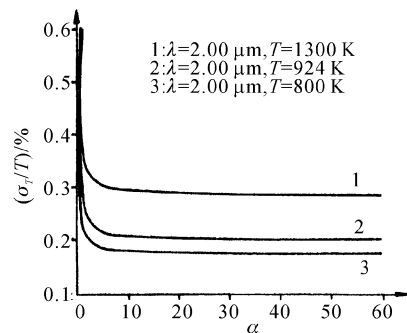


Fig. 1 Curves of temperature standard deviation  $\sigma_T$  versus  $\alpha$

按照系统温度的标准偏差对激光器发射能量的要求, 并结合文献[12]得出的结论及目前市场上半导体激光器件的可供情况, 选择 InGaAs/I 半导体激光器作为该系统的激光光源。

由于温度越高,  $P_1$  越大, 因此针对实际的测温系统来说, 应在较高的温度下进行定量分析。表 1 给出了采用波长为 2.00  $\mu\text{m}$  的 InGaAs/I 半导体激光器作为光源, 以抛光的钢铸件作为测量对象, 在 1215 K 的温度下进行测量时得到的相对不确定度随  $\alpha$  的变化

数据。其中,光源入射能量的改变,即  $\alpha$  值的改变是用衰减片的衰减来实现的。通过用示波器监测  $P_1$  及监测探测器的输出来得到  $\alpha$  值。由表 1 显见,当  $\alpha$  的

值较大时,进一步增大  $\alpha$  不会引起相对不确定度的显著变化。也就是说,只需  $\alpha > 15$ ,即可基本满足温度的测量不确定度对光源能量的要求。

Table 1 Experimental results about relative measurement error versus  $\alpha$  at  $T=1215$  K,  $\lambda=2.00$   $\mu\text{m}$

$\alpha$	5.1	10.8	15.5	26	30.5
Relative measurement error	0.279%	0.274%	0.270%	0.268%	0.267%

### 3.2 基于温度分辨力的考虑与光学系统相对孔径及放大器带宽的选择

高温下,在极窄的波段内,且当  $\Delta T$  很小时,文献[12]已经导出

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

上式中的  $\Delta T$  即为系统的温度分辨力,也是系统的极限灵敏度。文献[12]仅讨论了  $\Delta T$  随波长  $\lambda$  的变化关系。本文则分析光学系统的相对孔径及放大器带宽的优化选择。

仍以前述的钢铸件为测量对象。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射率  $\tau_\lambda = 0.50$ ,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  $\eta = 0.80$ ,实际系统所用的激光光源的波长  $\lambda = 2.00 \mu\text{m}$ ,窄带干涉滤光片的光谱带宽  $\Delta \lambda = 10 \text{ nm}$ 。

#### 3.2.1 光学系统相对孔径的优化选择

暂取选频放大器的带宽  $\Delta f = 10 \text{ Hz}$ 。在不同的温度下按(27)式作出的温度分辨力随光学系统相对孔径的变化曲线,以及在不同的相对孔径下作出的温度分辨力随被测温度的变化曲线,如图 2 所示。

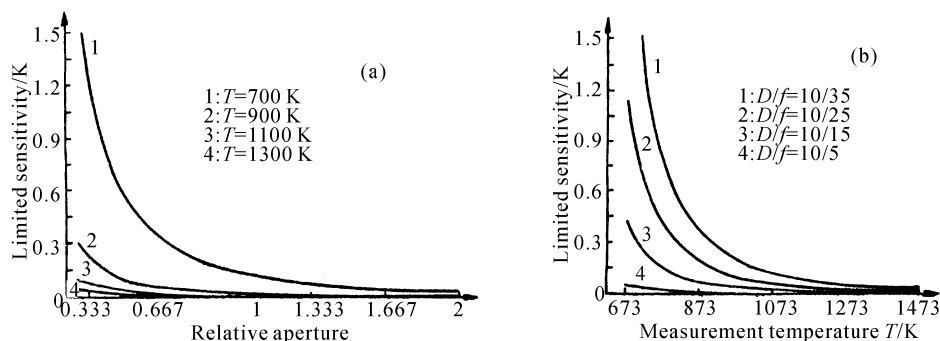


Fig. 2 Curves of temperature resolving power  $\Delta T$  versus relative aperture  $D/f'$  and working wavelength  $\lambda$ . (a) Curves of temperature resolving power  $\Delta T$  versus relative aperture  $D/f'$  at different temperature  $T$ . (b) Curves of temperature resolving power  $\Delta T$  versus measurement  $T$  at different relative aperture  $D/f'$

显然,1)  $D/f'$  越大,则系统的温度分辨力就越高,反之,则越低;2) 对较高的被测温度来说, $D/f'$  的大小对系统的温度分辨力的影响较小。如对 1470 K 的高温进行测量,在  $D/f' = 10/35$  时的温度分辨力  $\Delta T = 0.0378 \text{ K}$ ,在  $D/f' = 10/4$  时的  $\Delta T = 0.00077 \text{ K}$ ,两者都是较小的,且都比此时的  $\sigma_T$  小得多。但对 680 K 的温度进行测量,在  $D/f' = 10/35$  时的温度分辨力  $\Delta T = 2.233 \text{ K}$ ,比  $\sigma_T$  大。而在  $D/f' = 10/5$  时的  $\Delta T = 0.04558 \text{ K}$ ,则比  $\sigma_T$  小许多,且两者相差较大。

从上述分析可以看出,仅从温度分辨力的角度考虑,较大的相对孔径同较小的相对孔径相比,则较大的相对孔径对系统有利。从光电转换器件来看,

孔径大时,进入探测器系统的有用辐射增多,显然有利于探测器响应。但较大的孔径也增大了系统的体积,同时干扰光进入探测器的机会也大大增加,因此相对孔径也不是越大越好。

基于以上分析和针对本系统的实际情况,取光学系统的相对孔径  $D/f' = 10/15$ 。实验结果已证实了这一选择的正确性。

#### 3.2.2 放大器带宽的优化选择

取  $D/f' = 10/15$ 。在不同的温度下按(16)式作出的温度分辨力随放大器带宽的变化曲线以及在不同的带宽下作出的温度分辨力随被测温度的变化曲线,如图 3 所示。

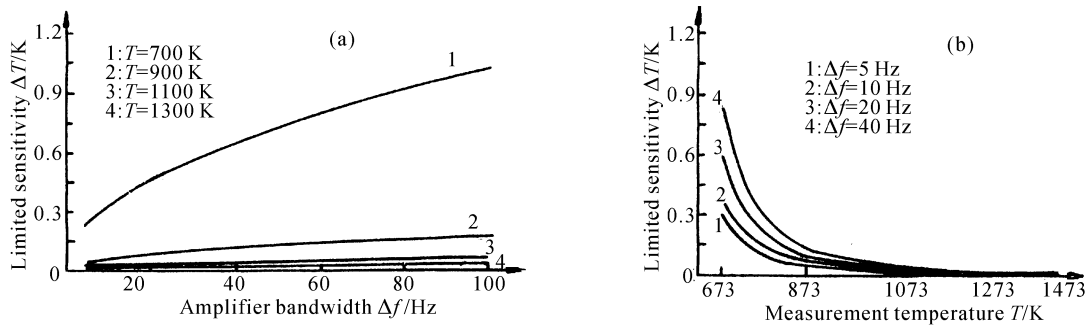


Fig. 3 Curves of temperature resolving power  $\Delta T$  versus amplifier bandwidth  $\Delta f$  and measurement temperature  $T$ . (a) Curves of temperature resolving power  $\Delta T$  versus amplifier bandwidth  $\Delta f$  at different temperature  $T$ . (b) Curves of temperature resolving power  $\Delta T$  versus measurement  $T$  at different amplifier bandwidth  $\Delta f$

由图 3 显而易见：1) 对同一温度进行测量，选频放大器的带宽越窄，则系统的温度分辨力的值越小，也就是系统越灵敏；2) 在某一温度范围内，在同一放大器带宽下测量，则所测温度越高，系统就越灵敏，反之，则越不灵敏。

由图 3 不难看出，若仅从温度分辨力的角度考虑，当  $D/f'=10/15$  时，小于 40 Hz 的带宽对给定的测温范围都具有选择意义 ( $\Delta T < \sigma_T$ )。

本仪器中，选频放大器的主要作用是对检测及监测探测器输出的 80 Hz 的电信号进行选频放大，以滤除电路中 50 Hz 的工频及其 100 Hz 的倍频干扰。因此其带宽必须小于 40 Hz。

另一方面，选频放大器的带宽越窄，则对干扰信号的滤除越有帮助。但此时对系统的其它部分，如

斩波器转速的稳定性等的要求也就越高，同时也大大地增加了选频放大器的制作难度，所以实际选频放大器的带宽不能太窄。

综合考虑上述因素后，选择  $\Delta f=10\text{ Hz}$  作为本系统选频放大器的带宽。

采用一台波长为  $2.00\ \mu\text{m}$  的 InGaAs/I 半导体激光器作为激光光源，取 1、2、3 号滤光片的带宽  $\Delta\lambda=10\text{ nm}$ ，4 号滤光片的带宽  $\Delta\lambda=20\text{ nm}$ ，5、6 号滤光片的带宽  $\Delta\lambda=100\text{ nm}$ ，光学系统的相对孔径  $D/f'=10/15$ ，选频放大器的带宽  $\Delta f=10\text{ Hz}$ ，以前述抛光的钢铸件作测量对象，在 5 个温度点处进行测温实验，得到的实验结果如表 2 所示 [其中的理论值由 (15) 式、(16) 式计算得到]。显见，这些结果与理论预期的相一致，也是较精确的。

Table 2 Experimental data about temperature resolving power  $\Delta T$  and measurement errors at different temperatures  $T$

Temperature /K		701	848	954	1038	1279
Temperature resolving power /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 error /K (experimental data)		1.0	1.5	1.9	2.1	2.4
Standard deviation /K (calculation results)		1.06	1.81	2.29	2.32	3.53

### 3.3 基于测温不确定度、温度分辨力及探测器本身的考虑与工作波长带宽的选择

#### 3.3.1 基于测温不确定度(抗反射辐射能力)的考虑

探测器接收到的、来自待测目标方向的红外辐射，由待测目标自身的辐射和待测目标对周围环境辐射的反射、即反射辐射这两部分组成。对于反射辐射，本系统则主要是采用水冷遮蔽板来加以抑制的<sup>[6]</sup>。水冷遮蔽板对反射辐射的遮蔽原理，如图 4 所示。

设待测目标表面的温度为  $T_0$ 。由 (5) 式，其辐射度可写成

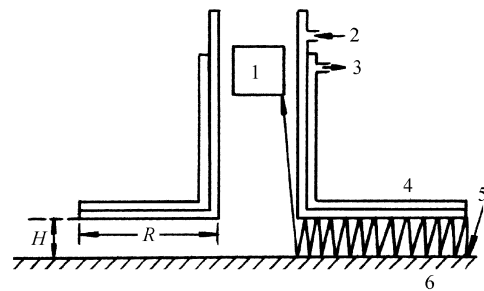


Fig. 4 Schematic diagram of walter-cooled shelter plate. 1: detector; 2: water in; 3: walter out; 4: water-cooled shelter plate; 5: incident ray; 6: measurement surface

$$L_{\lambda, T_0} = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} [\exp(hc/\lambda k T_0) - 1]^{-1}, \quad (17)$$

据此可将来自待测目标自身的辐射能写成

$$P_{1, T_0} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \eta \epsilon_\lambda \tau_\lambda \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda, T_0} d\lambda, \quad (18)$$

为分析上的方便,在探测方向上,可将周围环境看成是黑体<sup>[14]</sup>。若其温度为  $T_s$ ,则其辐出度可写成

$$L_{\lambda, T_s} = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} [\exp(hc/\lambda k T_s) - 1]^{-1}, \quad (19)$$

该辐射入射到待测目标的表面上,经待测表面反射  $N$  次后的强度为

$$L'_{\lambda, T_s} = (1 - \epsilon_\lambda)^N (1 - \epsilon'_\lambda)^{N-1} L_{\lambda, T_s}, \quad (20)$$

式中  $\epsilon'_\lambda$  为水冷遮蔽板在波长  $\lambda$  处的发射率。为分析上的方便,这里已假定反射率与方向无关。于是,在考虑反射辐射后,来自待测目标表面的辐出度  $M_e$  可表示为

$$M_e = \epsilon_\lambda L_{\lambda, T_0} + (1 - \epsilon_\lambda)^N (1 - \epsilon'_\lambda)^{N-1} L_{\lambda, T_s}, \quad (21)$$

因此,当无激光束进入探测器时,检测探测器接收到的辐射能  $P_{1, T_0}$  应为

$$P_{1, T_0} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \eta \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_\lambda [\epsilon_\lambda L_{\lambda, T_0} + (1 - \epsilon_\lambda)^N (1 - \epsilon'_\lambda)^{N-1} L_{\lambda, T_s}] d\lambda,$$

基于在较窄的波段内,  $\epsilon_\lambda$ 、 $\tau_\lambda$  均与  $\lambda$  无关的假设,可将上式简化为

$$P_{1, T_0} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \eta \epsilon_\lambda \tau_\lambda \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda, T_0} d\lambda + \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \eta (1 - \epsilon_\lambda)^N (1 - \epsilon'_\lambda)^{N-1} \tau_\lambda \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda, T_s} d\lambda, \quad (22)$$

为讨论方便,取  $\epsilon'_\lambda = 0$ ,则(16)式可简化为(事实上,取  $\epsilon'_\lambda = 0$  则相当于在更严格的意义上分析问题)

$$P_{1, T_0} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \eta \epsilon_\lambda \tau_\lambda \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda, T_0} d\lambda + \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \eta (1 - \epsilon_\lambda)^N \tau_\lambda \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda, T_s} d\lambda. \quad (23)$$

下面进行定量分析。对于实际的测量系统和测量环境,仪器的工作波长  $\lambda = 2.0 \mu\text{m}$ ,大气的传播系数  $\tau_0 = 0.80$ ,光学系统对光的总透过率  $\tau_\lambda = 0.50$ ,钽酸锂探测器的探测率  $D^* = 7.0 \times 10^7 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ ,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  $\eta = 0.80$ ,光学系统的焦距  $f' = 15 \text{ cm}$ ,通光口径  $D = 10 \text{ cm}$ 。联合(1)式、(23)式,在  $N = 25$ 、不同的发射率  $\epsilon_\lambda$ 、相同的待测温度和背景辐射温度 ( $T_0 = 700 \text{ K}$ 、 $T_s = 700 \text{ K}$ )下作出的测量温度  $T$  的相对测量不确定度随波长带宽  $\Delta\lambda$  的变化曲线,如图 5 所示。

图 5(a)给出了  $\epsilon_\lambda = 0.1$  的情形。这是一种发射

率非常低的极端情况。i) 由图 5(a) 显见,  $\Delta\lambda = 5 \text{ nm}$  时,由反射辐射引入的测温不确定度为  $5.457\%$ ;  $\Delta\lambda = 100 \text{ nm}$  时,由反射辐射引入的测温不确定度为  $5.571\%$ ,变化  $0.114\%$  (相当于  $0.80 \text{ K}$ ); ii) 由图 5(a) 还可以看出,因  $\Delta\lambda$  的变化引入的测温不确定度在  $\Delta\lambda = 5 \sim 30 \text{ nm}$  时随  $\Delta\lambda$  变化较快(约占  $0.7 \text{ K}$ ),当  $\Delta\lambda = 30 \sim 100 \text{ nm}$  时,则变化不大(仅约  $0.1 \text{ K}$ )。

图 5(b) 给出了  $\epsilon_\lambda = 0.2$  的情形。由图 5(b) 亦可看出,随着  $\Delta\lambda$  的增加,曲线开始段测温不确定度迅速增大,当  $\Delta\lambda$  大到一定程度( $\Delta\lambda > 30 \text{ nm}$ )时,由反射辐射引入的测温不确定度基本不随  $\Delta\lambda$  的增加而增大。

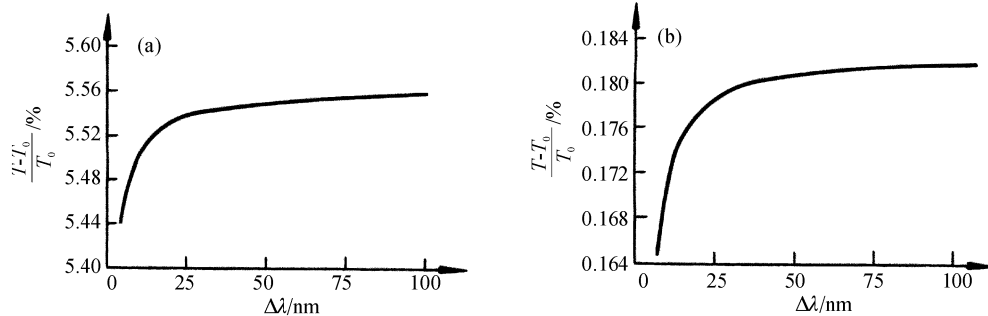


Fig. 5 Temperature measurement accuracy vs  $\Delta\lambda$  at same measure temperature background radiation and different specific radiance. (a)  $\epsilon_\lambda = 0.1$ ; (b)  $\epsilon_\lambda = 0.2$

在该条件下,在  $\Delta\lambda=5\sim 100\text{ nm}$  内,由  $\Delta\lambda$  引入的测温不确定度介于  $0\sim 0.018\%$  之间(约  $0.12\text{ K}$ )。

在其他条件都相同的情况下,作者还计算了  $\epsilon_\lambda=0.4$  时因  $\Delta\lambda$  的变化由反射辐射引入的测温不确定度。结果表明,在  $\Delta\lambda=5\sim 100\text{ nm}$  内,由反射辐射引入的辐射能要比待测目标的低  $4\sim 5$  个数量级,由此引入的测温不确定度小于  $0.0001\%$ 。当  $\epsilon_\lambda$  更大时,则引入的测温不确定度会更小。因此若仅从反射辐射(这是本系统在实际应用中遇到的最重要的光干扰)出发,对低反射(高辐射)物体而言, $\Delta\lambda$  可

以无严格要求。

在本仪器的应用现场,有较多的高温辐射源。为此还研究了较大的背景辐射对  $\Delta\lambda$  提出的要求。图 6 是在  $N=25$ 、 $T_0=700\text{ K}$ 、 $\epsilon_\lambda=0.2$  时作出的曲线。由图 6 也可以看出,不管背景辐射温度是  $800\text{ K}$  还是  $1000\text{ K}$ ,因  $\Delta\lambda$  的变化引入的测温不确定度基本上都介于  $0\sim 0.07\%$  之间(小于  $0.6\text{ K}$ ),且测温不确定度随  $\Delta\lambda$  的变化依然在  $\Delta\lambda=5\sim 30\text{ nm}$  内较快( $T_s=800\text{ K}$  时约相当于  $0.50\text{ K}$ , $T_s=1000\text{ K}$  时约相当于  $0.40\text{ K}$ ),在  $\Delta\lambda=30\sim 100\text{ nm}$  内缓慢。

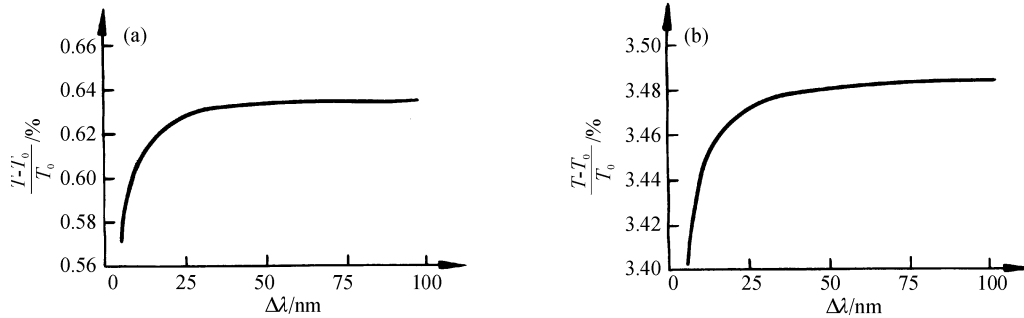


Fig. 6 Temperature measurement accuracy vs  $\Delta\lambda$  at same specific radiance and different background radiation. (a)  $T_s=800\text{ K}$ ; (b)  $T_s=1000\text{ K}$

### 3.3.2 基于系统的温度分辨力的考虑

高温下,当将  $\Delta\lambda$  看成变量时,由(12)式、(13)式、(14)式及(16)式代入(15)式中,还可以导出

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left\{ \int_T^{T+\Delta T} \frac{\exp(hc/\lambda kT)}{\lambda^6 T^2 [\exp(hc/\lambda kT) - 1]^2} dT \right\} d\lambda = \frac{2k \sqrt{A \cdot \Delta f}}{\pi^2 h^2 c^3 \tau_0 A \eta \tau_\lambda D^* \epsilon_\lambda (D/f')^2}, \quad (24)$$

以钢铸件为测量对象(温度  $370\sim 1040\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\epsilon_\lambda=0.52\sim 0.56$ )。对于实际的测量系统,取选频放大器的带宽  $\Delta f=10\text{ Hz}$ ,为分析方便,不妨取  $\epsilon_\lambda=0.54$ 。在不同的待测温度下,按(24)式作出的系统的温度分辨力随仪器波长带宽的变化曲线,如图 7 所示。

由图 7 可以看出,1) 在同一待测温度下,系统的波长带宽越窄,则其温度分辨力越低(对应的  $\Delta\lambda$  的值越大),反之,则越高。在  $\Delta\lambda=5\sim 30\text{ nm}$  时, $\Delta T$  随  $\Delta\lambda$  变化较快( $700\text{ K}$  时约  $0.52\text{ K}$ , $800\text{ K}$  时约为  $0.2\text{ K}$ ),但当  $\Delta\lambda>30\text{ nm}$  时,其变化较慢( $700\text{ K}$  时为  $0.096\text{ K}$ , $800\text{ K}$  时则仅为  $0.027\text{ K}$ ); 2) 在同一波长带宽下,温度越低,则其温度分辨力越高(对应的  $\Delta\lambda$  的值越小)。这说明,待测温度越高,系统的波长带宽对其温度分辨力的影响也就越小。

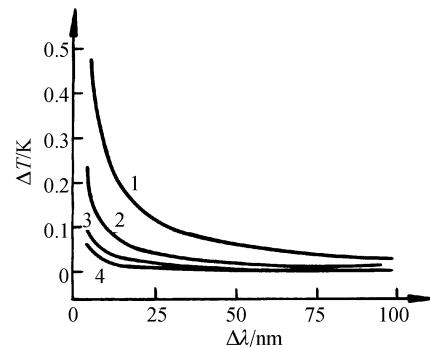


Fig. 7 Limited temperature measurement sensitivity  $\Delta T$  vs working wavelength bandwidths  $\Delta\lambda$  at different temperature  $T$

综上所述,一方面, $\Delta\lambda$  越小,则由反射辐射引入的测温不确定度也就越小,尤其是当  $\Delta\lambda$  小于  $30\text{ nm}$  时,测温不确定度还将随着  $\Delta\lambda$  的减小而显著减小,因此  $\Delta\lambda$  的取值应越小越好;另一方面, $\Delta\lambda$  越小,系统的温度分辨力却越低,因此单从温度分辨力的角度考虑, $\Delta\lambda$  的取值越大越好。

实际测温系统中  $\Delta\lambda$  的取值,应在保证系统有足够的温度分辨力的情况下,使其测温不确定度为最小。由本仪器的技术指标要求并结合图 7 容易看出,仅就系统的温度分辨力而言, $\Delta\lambda\geq 10\text{ nm}$  的波长

带宽均符合仪器的设计要求。

### 3.3.3 基于探测器本身的考虑及系统工作波长带宽的选择

尽管  $\Delta\lambda$  越小,由反射辐射等干扰光引入的测温不确定度越小,但考虑到实际窄带干涉滤光片的制作难度及钽酸锂热释电探测器的最小可探测功率, $\Delta\lambda$  不可能取得太小<sup>[15]</sup>。在要求的测温范围(400~1200 °C)内,400 °C 时的光信号最弱。利用(1)式进行简单计算后即可得出, $\Delta\lambda$  取 10 nm 对抑制反射辐射对测温不确定度的影响来说较为合适。

以抛光的钢铸件(温度 370~1040 °C,  $\epsilon_\lambda =$

Table 3 Effect on temperature measurement errors by different wavelength bandwidths at different temperature

Wavelength bandwidth /nm	10	30	50	80	100
Measurement error ( $T=732$ K)	1.1	1.2	1.3	1.3	1.3
Measurement error ( $T=864$ K)	1.5	1.6	1.7	1.7	1.7

**结语** 本文从测温系统各主要技术指标与各主要技术参量间的关系出发,讨论了系统的测温不确定度和温度分辨力,并对系统的各主要参量进行了优化设计。实验表明,在本文所列参量下,系统的测温不确定度优于 0.3%,温度分辨力优于 0.4 K,均符合设计要求,并与理论分析相一致。

### 参 考 文 献

- 1 Khan M A, Allemand C, Eagar T W. Noncontact temperature measurement I: interpolation based techniques. *Rev. Sci. Instrum.*, 1991, **62**(2):392~402
- 2 Hahn J W, Rhee C. Reference wavelength method for a two-color pyrometer. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(24):5276~5279
- 3 Hunter G B, Allemand C D, Eagar T W. Multiwavelength pyrometer. *Opt. Engng.*, 1985, **24**(6):1081~1085
- 4 Wang Yong, Liao Yanbiao, Xin Jun *et al.*. Optimization of a practical birefringence fiber-optic temperature sensor. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(1):87~92 (in Chinese)
- 5 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)
- 6 Tamura Y, Tatsuwaki, Sugimura T *et al.*. Temperature measurement of steel in the furnace. In: *Temperature, Its Measurement and Controll in Science and Industry*. New York: American Institute of Physics, 1982, **5**:505~512
- 7 Krivtsum V, Grab B, Hergenroder R *et al.*. Temperature measurement of liquids by differential absorption of two

0.52~0.56)作测量对象。采用一只波长为 2.00  $\mu\text{m}$  的 InGaAs/I 半导体激光器作为激光光源、采用 5 组 15 块中心波长为 2.00  $\mu\text{m}$  的窄带干涉滤光片(带宽分别为 10 nm、30 nm、50 nm、80 nm 及 100 nm)和图 4 所示结构的水冷遮蔽板(实验中, $H/R$  的值取 30),在温度为 800 K 的背景目标(其位置接近待测目标表面,且紧靠水冷遮蔽板)辐照下对温度分别为 732 K 及 876 K 的待测目标进行测温实验,得到的实验结果如表 3 所示。由表 3 显见,只有当  $\Delta\lambda=10$  nm 时的测温不确定度最小。这与前面分析得到的结果是吻合的,从而证明了前文讨论所得结果的正确性。

diode laser: Application of contactless optical detection in isotachophoresis. *Appl. Spectrosc.*, 2001, **55**(9):1251~1258

- 8 Hu Ruihua, Luan Song, Sun Lingke. Radiation thermometer for determining temperature and emissivity. *Infrared Technology* (红外技术), 1998, **20**(2):21~22 (in Chinese)
- 9 Fan C H, Longtin J P. Laser-based measurement of temperature or concentration change at liquid surfaces. *J. Heat Transfer, Transactions ASME*, 2000, **122**(4):757~762
- 10 Kee H H, Lees G P, Newson T P. Technique for measuring distributed temperature with 35 cm spatial resolution utilizing the Landau-Placzek ratio. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(7):873~875
- 11 Tetsuya A, Takeyuka K, Takashi T. Measurements of temperature and OH radical concentration in combustion gases by absorption spectroscopy with a diode laser. *Proc. 1999 Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics*. Seoul, Korea, 1999. 567~568
- 12 Shi Deheng, Huang Guoqing Liu Yufang. Working wavelength optimization of a practical real-time temperature measurement system. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2003, **30**(6):545~550 (in Chinese)
- 13 Gao Zhiyun, Gao Yue. *Photoelectrical Measurement Technology* (光电检测技术). Beijing: National Defense Industry Press, 1995. 24~25 (in Chinese)
- 14 Dewitt. Inferring temperature from optical radiation measurements. *Opt. Engng.*, 1986, **25**(4):596~601
- 15 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, **26**(2):121~126 (in Chinese)

## Optimization of a Practical Real-Time Temperature Measurement System

Shi Deheng<sup>1</sup> Huang Guoqing<sup>1</sup> Liu Yufang<sup>2</sup> Chen Yuke<sup>1</sup> Li Zhenxin<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Foundation, The First Aeronautical College of Air Force, Xinyang 464000)  
(<sup>2</sup> Department of Physics, He'nan Normal University, Xinxiang 453002)

(Received 13 May 2002; revised 1 September 2003)

**Abstract:** Based on the Kirchhoff law, a practical real-time temperature measurement system using laser diode and LiTaO<sub>3</sub> pyroelectric detector is developed. According to the relations between main specifications (temperature measurement resolving power, standard deviation and range) and main technical parameters of the instrument, such as laser energy and wavelength of emitting source, bandwidth of amplifier and relative aperture of optical system, the above technical parameters are optimized. Experimental results show that temperature measurement accuracy is better than 0.3% and temperature resolution is better than 0.4 K at 673~1473 K. They are both in accordance with the requirement.

**Key words:** optical measurement; temperature measurement; temperature measurement by radiation; laser diode; pyroelectric detector; temperature resolution; temperature measurement accuracy

\*\*\*\*\*

### 告《光学学报》投稿者

今年以来,《光学学报》来稿量翻番,而发表容量基本不变,造成《光学学报》的发表周期过长。为了尽快缩短发表周期,提升《光学学报》的学术质量,从现在开始,大幅度提高录用水准,把《光学学报》办成刊登优质学术论文的品牌期刊。

录用的具体要求如下:

- 1) 创新性明显: 物理思想新或所用方法新,结果新;
- 2) 可信性强: 研究背景交代清楚,引用相应文献完整;
- 3) 实验数据丰富完整,详实可靠;理论分析参量、假设条件已清楚列出;
- 4) 理论分析详尽,深入透彻;并曾从多方面加以考虑、验证过;研究内容足以证明结论;
- 5) 研究结果具有足够的学术价值和普遍意义,在本分支学科或光学领域将会有一定影响;
- 6) 论文撰写条理清楚,重点突出,语言简洁,篇幅适中,摘要、关键词、字符、公式书写、图表、参考文献等均符合《光学学报》征稿简则中所载明的 10 项要求。

7) 从 2004 年第 24 卷第 1 期起,文章的英文部分(即英文题目、作者及单位署名、收稿日期、摘要和关键词)均排在首页的中文摘要、关键词和中图分类号的下方。投稿时也按新格式排。已投稿但尚未录用的,则在修改时改排过来,敬请留意。

《光学学报》编辑部  
2003 年 10 月 20 日