

文章编号: 0258-7025(2004)01-0105-06

# 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

施德恒<sup>1,2,3</sup>, 刘玉芳<sup>2</sup>, 孙金锋<sup>2,3</sup>, 黄国庆<sup>1</sup>, 陈玉科<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 空军第一航空学院基础部, 河南 信阳 464000

<sup>2</sup> 河南师范大学物理系, 河南 新乡 453002; <sup>3</sup> 四川大学原子与分子物理研究所, 四川 成都 610065

**摘要** 在介绍一种采用钽酸锂热释电探测器实现的实时测温系统的基础上,着重讨论了反射辐射和探测器本身的辐射对该系统测温精度的影响。提出了抑制反射辐射及探测器本身的辐射对测温精度影响的4条措施:1)采用水冷遮蔽板并对探测器进行水冷;2)尽可能地使探头正对待测物体表面;3)选择合适的仪器工作波长带宽( $\Delta\lambda = 10$  nm);4)进行电气补偿。进行了一些必要的分析与讨论,得到了采用水冷遮蔽板、将探头尽可能地正对待测面并选用合适的波长带宽可以有效地抑制反射辐射、及对探测器进行水冷并进行电气补偿,可有效地抑制探测器本身的辐射的结论。实验表明,采取优化措施后,在要求的测温范围400~1200℃内测温精度不低于0.3%,符合设计要求。

**关键词** 测试计量仪器;温度测量;热释电探测器;测温误差;反射辐射;辐射测温

中图分类号 O 551.2 文献标识码 A

## Effect and Control on Temperature Measurement Accuracy of Real-time Temperature Measurement System by Reflection Radiation and Detector Radiation Itself

SHI De-heng<sup>1,2,3</sup>, LIU Yu-fang<sup>2</sup>, SUN Jin-feng<sup>2,3</sup>, HUANG Guo-qing<sup>1</sup>, CHEN Yu-ke<sup>1</sup>

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

**Abstract** After introducing the temperature real-time measurement system using lasers InGaAs/I and pyroelectric detector LiTaO<sub>3</sub>, this paper mainly discusses the effect and control on temperature measurement accuracy by reflection radiation and detector radiation itself. Four measures on improving temperature measurement accuracy are presented: The first is using water-cooled shelter plate and cooling the detector by water. The second is making the detector head the measurement surface as vertically as possible. The third is choosing suitable wavelength bandwidth. The fourth is making electrical compensation. Some necessary calculations and analyses are given. Experimental results show that temperature measurement accuracy is suitable for requirement in the range of 400~1200℃ after taking these optimal measures.

**Key words** measurement instrument; temperature measurement; pyroelectric detector; temperature measurement error; radiation by reflection; temperature measurement by radiation

## 1 引言

可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<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>[2~4]</sup>及主动式辐射测温法<sup>[5,6]</sup>两种。在主动式辐射测温法中,由

收稿日期:2002-09-20;收到修改稿日期:2003-02-24

基金项目:河南省科技攻关计划(001120321)资助项目。

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,四川大学原子与分子物理研究所博士生,主要从事原子光谱物理及光子技术与应用研究。E-mail:shideheng@yahoo.com.cn

于使用了激光器或红外辐射源作为测量光源<sup>[7,8]</sup>,因而都能实时、准确地测出被测目标的真实温度。

研究表明,在作者等人设计的、使用钽酸铷热释电探测器作光电转换器件、利用 InGaAs/I 半导体激光器作测量光源的实时测温系统中,仪器的工作波长、探测器的灵敏元面积、选频放大电路的带宽、激光器的发射能量<sup>[9]</sup>、采样精度<sup>[10]</sup>、环境温度及干扰光<sup>[11]</sup>、反射辐射以及探测器系统本身的辐射等都将影响系统的测温精度。文献<sup>[9~11]</sup>已对激光器的发射能量、仪器的工作波长、选频放大电路的带宽、采样精度、环境温度及干扰光等进行了研究,本文则结合反射辐射及探测器本身的辐射对测温精度的影响,讨论为克服这种影响所采取的措施及其效果。

## 2 测温原理

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;  $\tau_0$  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;  $\epsilon_\lambda$  是温度为  $T$  的待测目标在波长  $\lambda$  处的发射率;  $L_\lambda$  是温度为  $T$  的黑体在波长  $\lambda$  处的单色辐射能;  $\tau_\lambda$  是光学系统对波长为  $\lambda$  的光的总透过率。

当有激光束进入检测探测器时,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,  $\gamma$  为待测目标表面的反射率;  $\beta$  为待测目标表面镜面反射特性的光学校正系数;  $E_\lambda$  为入射待测目标表面的单色激光能量。

由 Kirchhoff 定律,可以得出

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

在极窄的波段内,可以认为  $\epsilon_\lambda$  及  $\tau_\lambda$  均与波长无关。文献<sup>[8]</sup>也已指出,对于同一待测面,  $\beta$  是一常数。据此,可将(1)、(2)两式分别简化为

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

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

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

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

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

(7)式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

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

即可算出待测目标的温度。式中,  $h$  为普朗克常数;  $k$  为玻尔兹曼常数;  $c$  为光速。

## 3 反射辐射对测温精度的影响及其抑制

### 3.1 反射辐射对测温精度的影响

探测器接收到的来自待测物体方向的辐射,由待测物体自身的辐射和待测物体对周围环境辐射的反射,即反射辐射这两部分组成。

设待测目标表面的温度为  $T_0$ 。由(8)式,其辐出度可写成

$$L_{\lambda, T_0} = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} [\exp(hc/\lambda k T_0) - 1]^{-1} \quad (9)$$

据此并由(4)式,可将来自待测物体自身的辐射进一步写成

$$P_{1, T_0} = \frac{\pi}{4} \left( \frac{D}{f'} \right)^2 \tau_0 A \eta \epsilon_\lambda \tau_\lambda \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda, T_0} d\lambda \quad (10)$$

为分析方便,在探测方向上,可将周围环境看成是黑体。若其温度为  $T_s$ ,则其辐出度可写成

$$L_{\lambda, T_s} = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} [\exp(hc/\lambda k T_s) - 1]^{-1} \quad (11)$$

该辐射入射到待测物体的表面上,经待测表面反射后的强度为

$$L'_{\lambda, T_s} = \gamma L_{\lambda, T_s} \quad (12)$$

为便于分析,这里假定反射率  $\gamma$  与方向无关。据此,由(3)式,可将(12)式改写成

$$L'_{\lambda, T_s} = (1 - \epsilon_\lambda) L_{\lambda, T_s} \quad (13)$$

于是,在考虑反射辐射后,来自待测物体表面的辐出度  $M_e$  可表示为

$$M_e = \epsilon_\lambda L_{\lambda, T_0} + (1 - \epsilon_\lambda) L_{\lambda, T_s} \quad (14)$$

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

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

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

$$P_{1,T_0} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \eta \epsilon_\lambda \tau_\lambda \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda,T_0} d\lambda + \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \eta (1 - \epsilon_\lambda) \tau_\lambda \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda,T_0} d\lambda \quad (15)$$

下面进行定量分析。为分析上的方便，暂取窄带干涉滤光片的带宽  $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = 10 \text{ nm}$ 。对于实际的测量系统和测量环境，仪器的工作波长为  $\lambda = 2.0 \text{ }\mu\text{m}$ ，大气的传播系数  $\tau_0 = 0.50$ ，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  $\eta = 0.80$ ，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  $D = 10 \text{ cm}$ 。在相同的  $\epsilon_\lambda$ ，不同的  $T_0$  下，由(4)，(15) 联合作出的测量温度  $T$  的相对测量误差随环境温度  $T_s$  的变化曲线，以及在相同的  $T_0$ ，不同的  $\epsilon_\lambda$  下， $T$  的相对测量误差随  $T_s$  的变化曲线，如图 1 所示。

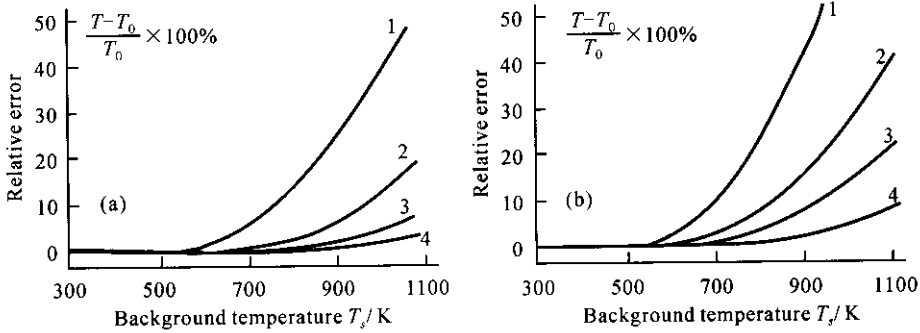


图 1 在不同温度和反射率下，反射辐射对测温精度的影响

(a)  $\epsilon_\lambda = 0.54$  时，不同温度下相对测量误差随背景温度的变化曲线；(b)  $T_0 = 900 \text{ K}$  时，不同  $\epsilon_\lambda$  下相对测量误差随背景温度的变化曲线

Fig. 1 Effect of reflection radiation on temperature measurement accuracy at different temperature and reflection ratio (a) curves of relative measurement error vs background temperature at  $\epsilon_\lambda = 0.54$  and different temperature. 1:  $T_0 = 700 \text{ K}$ ; 2:  $T_0 = 900 \text{ K}$ ; 3:  $T_0 = 1100 \text{ K}$ ; 4:  $T_0 = 1300 \text{ K}$ ; (b) curves of relative measurement error vs background temperature at  $T_0 = 900 \text{ K}$  and different  $\epsilon_\lambda$ . 1:  $\epsilon_\lambda = 0.10$ ; 2:  $\epsilon_\lambda = 0.35$ ; 3:  $\epsilon_\lambda = 0.60$ ; 4:  $\epsilon_\lambda = 0.85$

图 1 表明，当待测温度一定时，其表面发射率越小，即反射率  $\gamma$  越大，则背景辐射对其测温精度的影响就越大；反之，则越小。例如，当  $\epsilon_\lambda = 0.85$  时，对于  $T_0 = 900 \text{ K}$  的待测温度而言， $T_s = 900 \text{ K}$  的背景辐射可引起 2.07% 的误差；而当  $\epsilon_\lambda = 0.10$  时，引起的误差则为 40.38%。

在本仪器的应用现场，有较多的高温背景目标。由上述分析可知，如不采取适当的措施来抑制这些辐射，则温度的测量结果可能会毫无意义。

### 3.2 反射辐射的抑制

#### 3.2.1 采用水冷遮蔽板

本系统是通过采用水冷遮蔽板来限制反射辐射进入探测器，从而提高测温精度的。

如图 2 所示，假定背景辐射在进入探测器之前，已在待测物体表面上反射了  $N$  次，则式(14) 应修改成

$$M_e' = \epsilon_\lambda L_{\lambda,T_0} + (1 - \epsilon_\lambda)^N (1 - \epsilon_\lambda')^{N-1} L_{\lambda,T_s} \quad (16)$$

式中， $\epsilon_\lambda'$  为水冷遮蔽板在波长  $\lambda$  处的发射率。为讨论方便，取  $\epsilon_\lambda' = 0$ ，则式(16) 可简化为

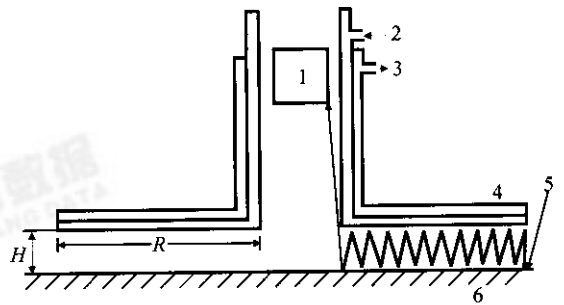


图 2 水冷遮蔽板遮蔽原理示意图

1: 探头; 2: 给水; 3: 排水;

4: 水冷遮蔽板; 5: 入射光; 6: 被测物体表面

Fig. 2 Schematic diagram of water-cooled shelter plate

1: detector; 2: water in; 3: water out; 4: water-cooled shelter plate; 5: incident ray; 6: measurement surface

$$M_e' = \epsilon_\lambda L_{\lambda,T_0} + (1 - \epsilon_\lambda)^N L_{\lambda,T_s} \quad (17)$$

进而可将(15)式修正为

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

下面进行定量分析。联立(4)，(18) 式，在  $N =$

35,不同的发射率及不同的待测温度下作出的测温误差随环境温度的变化曲线,以及在 $\epsilon_\lambda = 0.2, T_0 = 673 \text{ K}$ 及不同的环境温度下作出的测温误差随反射次数 $N$ 的变化曲线,如图3所示。

图3(a)给出了 $\epsilon_\lambda = 0.1$ ,即待测表面的反射率较高的情形。由图3(a)可见,对于同一环境温度 $T_s$ ,待测温度 $T_0$ 越高,则测温误差越小,也即遮蔽板对反射辐射的遮蔽效果越好。

图3(b)给出了 $\epsilon_\lambda = 0.2$ 的情形。由图3(b)可见,在 $T_s = 1300 \text{ K}, T_0 = 1273 \text{ K}$ 的情况下,反射辐射所引起的测温误差最大也仅约1%。显见,遮蔽板对背景辐射的遮蔽效果已较好。

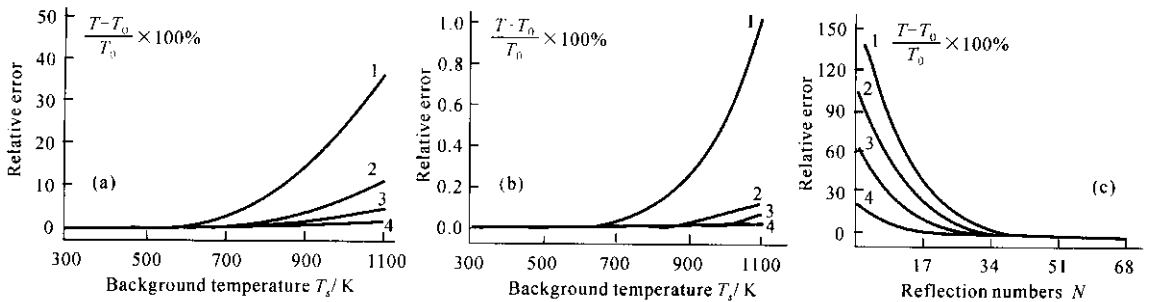


图3 遮蔽板遮蔽效果分析

(a)  $\epsilon_\lambda = 0.1, N = 35$ ; (b)  $\epsilon_\lambda = 0.2, N = 35$ ; (c)  $\epsilon_\lambda = 0.2, T_0 = 673 \text{ K}$

Fig. 3 Effective analysis of shelter plate

(a) curves of relative measurement error vs background temperature at  $\epsilon_\lambda = 0.1, N = 35$  and different temperature. 1:  $T_0 = 700 \text{ K}$ ; 2:  $T_0 = 900 \text{ K}$ ; 3:  $T_0 = 1100 \text{ K}$ ; 4:  $T_0 = 1300 \text{ K}$ ; (b) curves of relative measurement error vs background temperature at  $\epsilon_\lambda = 0.2, N = 35$  and different temperature. 1:  $T_0 = 673 \text{ K}$ ; 2:  $T_0 = 873 \text{ K}$ ; 3:  $T_0 = 1073 \text{ K}$ ; 4:  $T_0 = 1273 \text{ K}$ ; (c) curves of relative measurement error vs  $N$  at  $\epsilon_\lambda = 0.2, T_0 = 673 \text{ K}$  and different background temperature. 1:  $T_s = 1273 \text{ K}$ ; 2:  $T_s = 1073 \text{ K}$ ; 3:  $T_s = 873 \text{ K}$ ; 4:  $T_s = 673 \text{ K}$

### 3.2.2 尽可能使探头正对待测物体表面

将探头尽可能地正对待测面并加设孔径光阑,是限制杂散光进入探测系统的又一重要方法。一方面,在垂直于待测表面的法线方向上,待测物体的发射率最大,而对入射光的反射却较小;另一方面,由图2还很容易看出,这也增加了背景辐射在待测面上的反射次数,进而也削弱了背景辐射对测温精度的影响。

### 3.2.3 选择合适的仪器工作波长带宽

调制盘上的滤光片的带宽 $\Delta\lambda$ 也是限制反射辐射对测温精度影响的重要参数。 $\Delta\lambda$ 越大,虽然进入探测器的光信号越强,但进入探测器的反射辐射也越多,进而引起的测温误差也就越大。因此实际测温系统的光谱带宽 $\Delta\lambda$ 应尽量小。但考虑到实际窄带干涉滤光片的制作难度和钽酸锂热释电探测器的最小可探测功率, $\Delta\lambda$ 又不可能取得太小。在要求的测温范围(400~1200°C)内,400°C时的光信号功率最弱。

图3(c)显示了反射辐射对测温精度的影响随 $N$ 值增大而衰减的程度。显见,只要 $N$ 值足够大,即背景辐射在待测面上的反射次数足够多,遮蔽板对背景辐射的遮蔽效果就能达到很理想的程度。

显见, $N$ 值的大小与 $H/R$ 的值密切相关。容易看出,只要保证 $H/R \gg 1$ ,就能使 $N$ 值大到足以满足要求。

本文采用的“水冷”遮蔽板除遮蔽反射辐射外,还具有使探测器的“周边环境”的温度稳定在一个相对较小的范围,从而抑制调制盘、窄带干涉滤光片以及探头本身的外壳等处的热辐射对测温精度影响的作用。

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精度的影响来说较为合适。

## 4 探测器系统本身的辐射对测温精度的影响及其抑制

### 4.1 探测器系统本身的辐射对测温精度的影响

引起钽酸锂热释电探测器响应的热辐射,由来自待测方向的辐射及探测器系统本身的辐射这两部分组成。为便于分析,不妨假定来自待测目标表面非测量区域的红外辐射、待测目标表面对背景辐射的反射以及背景目标的红外辐射等对测温精度的影响均可忽略不计。

不失一般性,这里仅考虑探测器系统内调制盘的辐射对测温精度的影响。若调制盘的温度为 $T'$ ,则其辐出度可写成

$$L_{\lambda, T'} = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} [\exp(hc/\lambda k T') - 1]^{-1} \quad (19)$$

于是,来自调制盘的辐射能  $P_{1,T'}$  则为

$$P_{1,T'} = \frac{\pi}{4} \left( \frac{D}{f} \right)^2 \tau_0 A \eta \int_{\lambda_1'}^{\lambda_2'} \tau_{\lambda'} \epsilon_{\lambda'} L_{\lambda,T'} d\lambda \quad (20)$$

式中,  $\epsilon_{\lambda'}$  是温度为  $T'$  的调制盘在波长  $\lambda$  处的发射率;  $\tau_{\lambda'}$  为光学系统对波长为  $\lambda$  的光的透过率;  $\lambda_1', \lambda_2'$  分别为钽酸锂热释电探测器的响应下限及上限。

基于  $\epsilon_{\lambda'}$  及  $\tau_{\lambda'}$  均与  $\lambda$  无关的假设,可将(20)式简化为

$$P_{1,T'} = \frac{\pi}{4} \left( \frac{D}{f} \right)^2 \tau_0 A \eta \tau_{\lambda'} \epsilon_{\lambda'} \int_{\lambda_1'}^{\lambda_2'} L_{\lambda,T'} d\lambda \quad (21)$$

因此,当无激光束进入探测器时,在考虑调制盘的热辐射后,探测器接收到的辐射能  $P_1$  应为

$$P_1 = P_{1,T_0} + P_{1,T'} \quad (22)$$

即

$$P_{1,T_0} = \frac{\pi}{4} \left( \frac{D}{f'} \right)^2 \tau_0 A \eta \epsilon_{\lambda} \tau_{\lambda} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda,T_0} d\lambda + \frac{\pi}{4} \left( \frac{D}{f'} \right)^2 \tau_0 A \eta \epsilon_{\lambda'} \tau_{\lambda'} \int_{\lambda_1'}^{\lambda_2'} L_{\lambda,T'} d\lambda \quad (23)$$

下面仍以 3.1 节中给出的数据进行定量分析。由于钽酸锂热释电探测器从紫外到红外响应平坦,

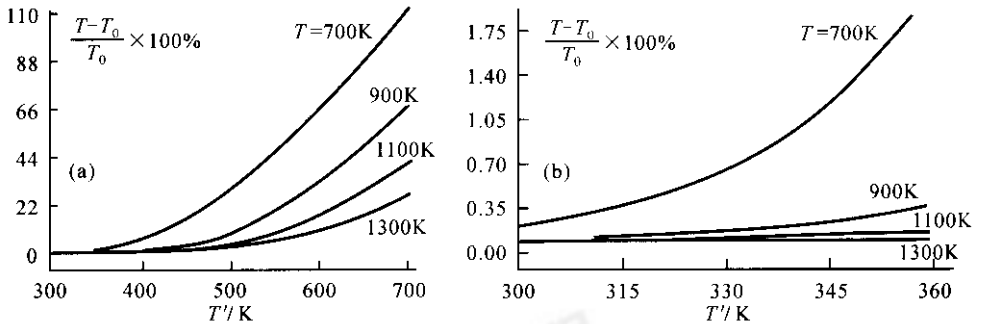


图 4 实测温度  $T$  的相对测量误差随调制盘温度  $T'$  的变化曲线

(a) 水冷前;(b) 水冷后

Fig. 4 Curves of relative error of measurement temperature  $T$  vs chopper's temperature  $T'$

(a) before water-cooling; (b) after water-cooling

## 4.2 探测器系统本身辐射的抑制

### 4.2.1 水冷

本系统是通过采用 3.1 节所述的“水冷”遮蔽板来抑制调制盘等处的热辐射,从而提高测温精度的。图 4(b) 给出了采用“水冷”遮蔽板之后,在不同的  $T_0$  下,由(4),(23) 两式联立作出的实测温度  $T$  的相对测量误差随调制盘的温度  $T'$  的变化曲线。由图 4(b) 可以看出,在采用了水冷之后,调制盘的辐射所引起的测温误差最大也只有 1.6%(对应于 360 K 的调制盘温度。采用水冷却之后,调制盘的实际温度只会低于这一数值)。对于更高的待测温度,由调

且输出信号与入射光功率成正比,因此为尽可能使问题简单化,同时又不失一般性,可以取  $\tau_{\lambda'} = \tau_{\lambda}, \epsilon_{\lambda'} = \epsilon_{\lambda}, \lambda_1' = 0.4 \mu\text{m}, \lambda_2' = 3.0 \mu\text{m}$  代入计算。在不同的待测温度  $T_0$  下,由(4),(23) 两式联立作出的实测温度  $T$  的相对测量误差随调制盘的温度  $T'$  的变化曲线如图 4(a)所示。

图 4(a)表明,1) 当  $T_0$  一定时,  $T'$  越高,则调制盘的辐射对测温精度的影响越大。如,当  $T_0 = 1300$  K 时,温度仅为 600 K 的调制盘在计算给定的条件下就能引起 9.5% 的测量误差;2)  $T'$  一定时,  $T_0$  越低,则调制盘的辐射对待测温度的测量精度的影响越大。如,当调制盘的温度为 600 K 时,在上述计算条件下对 700 K 的待测温度则可引起 71.4% 的误差。

在本仪器的应用现场,调制盘距待测目标是比较近的。因此,调制盘几乎可以被加热到接近待测目标的温度。由上述分析可知,必须采取适当的措施对调制盘等的辐射进行抑制,否则温度的测量结果是毫无意义的。

制盘等的辐射引起的相对测量误差则更小。

因此,进行水冷却是抑制调制盘等的热辐射对测温精度影响的一条重要措施,实验结果已明确地证明了这一点。

### 4.2.2 电气补偿

对于接近待测目标表面的透镜、调制盘以及探测器四周的内壁等处的辐射,本系统则是通过进行电气补偿来消除的。

显然,探测器输出的信号  $V$  为待测目标表面的热辐射信号  $V_1$  与探头本身的外壳、窗口、透镜等处的热辐射信号  $V_2$  之和。即

$$V = V_1 + V_2 \quad (24)$$

用一感温系统置于探头前部内壁。此时,感温系统将产生一信号  $V_2' = V_2$ 。若将  $V_2'$  叠加在  $V$  之上,并使其满足

$$V_s = V - V' = (V_1 + V_2) - V_2 = V_1 \quad (25)$$

即可消除环境温度及窄带滤光片、探头本身的外壳及透镜等处的热辐射对测温精度的影响。

## 5 实验结果

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,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,采用一块中心波长为  $2.00 \mu\text{m}$  的窄带干涉滤光片(带宽  $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = 10 \text{ nm}$ )和图 2 所示结构的水冷遮蔽板(实验中,  $H/R$  的值分别取为 20, 30, 40, 在改变  $H/R$  的值的过程中,  $R$  值保持不变),在温度为 732 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)辐照下进行测温实验,得到的实验结果如表 1 所示。由表 1 可见,当  $H/R$  的值为 30 时,测温精度即已基本满足要求,当  $H/R$  的值为 40 时,测温精度就已达到较理想的程度,从而证明了本文所采取的光干扰抑制措施的正确性。

表 1 不同温度和  $H/R$  下的测温精度的实验结果

Table 1 Experimental data about measurement errors at different temperature and  $H/R$

		Temperature /K	701	848	954	1038	1279
H/R	40	Measurement errors /K	1.0	1.5	1.9	2.1	2.4
	30	Measurement errors /K	1.2	1.6	2.0	2.1	2.4
	20	Measurement errors /K	2.0	2.8	3.1	3.3	3.5

## 6 结 论

通过以上计算和分析,可以得出如下结论:

1) 反射辐射对测温精度有影响。当背景温度的大小和待测温度差不多时,或者当背景温度高于待测温度时,或者当待测面的发射率很低时,这种影响可能会大到不能容忍的地步,因此必须予以抑制;

2) 采用水冷遮蔽板可以有效地抑制反射辐射。抑制的效果与  $H/R$  的值密切相关。当  $H/R \gg 1$ , 即背景辐射在待测面上反射的次数足够多时,抑制的效果可十分理想;

3) 调制盘等处的热辐射对测温精度的影响很大,但采用“水冷”的方法可将调制盘等的热辐射对

测温精度的影响大为降低。此外,探头本身的外壳、透镜、窗口等处的热辐射对测温精度也有较大的影响,但采用“水冷”遮蔽板稳定住探测器的“周边环境”后,再进行电气补偿即可很好地消除其辐射对测温精度的影响;

4) 将探头尽可能地正对待测面并选用合适的波长带宽,也有助于消除反射辐射并提高测温精度。

因此本系统选用水冷遮蔽板来抑制探测器本身的辐射,并使水冷遮蔽板的  $H/R \gg 1$  来抑制反射辐射,实验结果已经证实了上述结论。

## 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 D. P. DeWitt. Inferring temperature from optical radiation measurements [J]. *Opt. Eng.*, 1986, **25**(4):596~601
- 5 V. Krivtsum, B. Grab, R. Hergenroder *et al.*. Temperature measurement of liquids by differential absorption of two diode laser: Application of contactless optical detection in isotachophoresis [J]. *Appl. Spectroscopy*, 2001, **55**(9):1251~1258
- 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 Hu Ruihua, Luan Song, Sun Ningke. Radiation thermometer for determining temperature and emissivity [J]. *Infrared Technology*, 1998, **20**(2):21~22, 17  
胡瑞华, 栾松, 孙宁克. 发射率和温度同时测定的辐射测温仪[J]. *红外技术*, 1998, **20**(2):21~22, 17
- 9 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. 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
- 10 Shi Deheng, Xu Qifu, Chen Yuke *et al.*. Measures on improving sampling accuracy of temperature real-time measurement system [J]. *Laser Journal*, 2001, **22**(1):41~43  
施德恒, 许启富, 陈玉科等. 实时测温系统中采样精度的提高措施[J]. *激光杂志*, 2001, **22**(1):41~43
- 11 Shi Deheng, Xu Qifu, Chen Yuke *et al.*. Measures to improve the accuracy of a real-time temperature measurement system [J]. *Laser Technology*, 2002, **26**(2):90~93  
施德恒, 郭峰, 刘玉芳等. 实时测温系统中测温精度的提高措施[J]. *激光技术*, 2002, **26**(2):90~93