

一种实用化实时测温系统优化设计中的几个问题*

施德恒^{1,2} 孙金锋¹ 刘玉芳¹ 朱遵略¹

(1 河南师范大学物理系, 新乡 453007)

(2 空军第一航空学院基础部, 信阳 464000)

摘 要 基于 Kirchoff 定律, 利用半导体激光器及钽酸锂热电器件设计了一种实用化的实时测温系统. 根据待测目标的光谱辐出度及相对测温灵敏度随 λT 的变化关系, 确定了系统工作波长的大致范围; 通过对水冷遮蔽板的尺寸及其放置位置与波长间的关系、以及对大气的红外透射谱等的分析, 确定了系统的工作波长; 按照水冷遮蔽板的尺寸及其放置位置 (H/R 之值) 对测温精度的影响, 讨论了水冷遮蔽板的 H/R 之值, 并由此分析了系统的抗干扰能力及测温精度. 指出了引起系统测温不确定度的 5 种主要原因, 并对其中的 2 种进行了简要的分析. 实验结果表明, 该系统的测温精度优于 0.3%.

关键词 应用光学; 温度测量; 辐射测温; 实时测量; 半导体激光器; 热释电探测器

中图分类号 TN247 **文献标识码** A

0 引言

研究表明, 在使用钽酸锂热电器件作光接收器件、利用半导体激光器 InGaAs/I 作测量光源的实时测温系统^[1]中, 仪器的工作波长与波长带宽、探测器的灵敏元面积、选频放大器的带宽及激光器的发射能量^[1~3]、环境温度及干扰光^[4]等都将影响到系统的测温精度. 文献[1~4]已对仪器的工作波长及其带宽的优化设计、环境温度及干扰光等对测温精度的影响进行了研究, 本文则结合待测目标的黑体辐射特性以及水冷遮蔽板的尺寸设计等问题, 对仪器优化设计中的几个问题进行深入研究.

1 测温原理

仪器的原理结构简图、工作过程以及调制盘的调制原理等, 文献[2, 3]中已有描述, 本文不再重复. 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

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

式(1)成立的条件及各量的含意与文献[3]相同. 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 则由待测目标辐射的红外能量及其反射的激光能量这两部分组成

$$P_2 = \frac{\pi}{4} \left[\frac{D}{f'} \right]^2 \tau_0 A \eta \epsilon_\lambda \tau_{\lambda_1} \int L_\lambda d\lambda +$$

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

式中, γ, β 及 E_λ 的含意与文献[3]相同. 由基尔霍夫定律, 可以得出

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

由式(1)、(2)、(3), 再结合黑体辐射公式

$$L_\lambda = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} [\exp(hc/\lambda kT) - 1]^{-1} \quad (4)$$

即可算出待测目标的温度. 式中, h 为普朗克常数, k 为玻耳兹曼常数, c 为光速.

2 系统工作波长的选择范围

2.1 待测面的黑体辐射特性随 λT 的变化

式(4)可改写成

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

以 λT 为横坐标、信号 $\frac{L_\lambda}{T^5}$ 为纵坐标作出的 $\frac{L_\lambda}{T^5} \sim \lambda T$ 曲线, 如图 1.

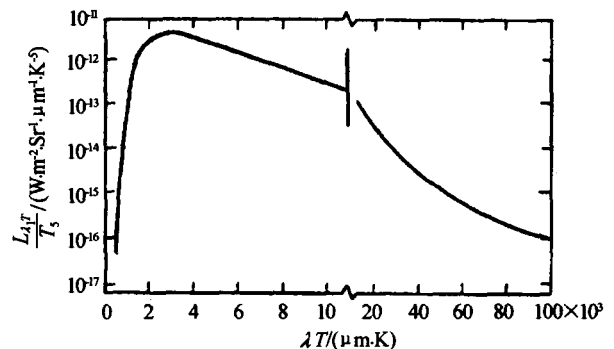


图 1 $\frac{L_\lambda}{T^5} \sim \lambda T$ 曲线

Fig. 1 Curve of $\frac{L_\lambda}{T^5} \sim \lambda T$

以图 1 并结合系统的测温范围 (400~1200℃)

*河南省科技攻关计划项目(编号:001120321)和河南省自然科学基金项目(编号:0511014300)资助
Tel:0376-6393178 Email:scattering@sina.com.cn
收稿日期:2004-05-10

进行分析. 由图 1 显见, $\lambda T = 2.898 \times 10^3 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 时, 信号最强; $\lambda T = (3 \sim 8) \times 10^3 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 时, 信号也很强; 当 $\lambda T = (1.5 \sim 2) \times 10^3 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 时, 信号虽然变化较快, 但目标的辐射亦不弱. 因此, 当 $673\text{K} \leq T \leq 1473\text{K}$ 时, 只需系统的工作波长 $\lambda \geq 1.1 \mu\text{m}$, 在近、中红外波段内, 就都能保证探测器接收到较强的辐射信号.

2.2 相对测温灵敏度随 λT 的变化

$V(T) \sim T$ 曲线的温度灵敏度 S 定义为当待测温度每变化 1°C 时, 探测器输出的信号电平的变化量^[5,6], 即

$$S = \frac{\Delta V(T)}{\Delta T} \tag{6}$$

据此, 文献[3]已导出 $V(T) \sim T$ 曲线在某一温度点处的相对温度灵敏度

$$S_r = \frac{hc}{k} \cdot \frac{1}{\lambda T} \cdot \frac{\exp(hc/\lambda kT)}{\exp(hc/\lambda kT) - 1} \tag{7}$$

依据式(7), 文献[3]指出, 当 $\lambda T \leq 2.898 \times 10^3 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 时, $S_r \sim \lambda T$ 曲线十分陡峭, 也即 S_r 随 λT 的变化十分灵敏. 由于系统的测温范围为 $400 \sim 1200^\circ\text{C}$, 因此, 只要 $\lambda \leq \frac{2898}{1200+273} \approx 2.0 \mu\text{m}$, 则当被测温度有微小变动时, 就能引起 S_r 较大的变化.

2.3 系统工作波长的取值范围

2.1 节得出, $\lambda \geq 1.1 \mu\text{m}$ 时, 检测探测器将接收到较强的红外辐射; 2.2 节指出, 当 $\lambda \geq 2.0 \mu\text{m}$ 时, 则 $V(T) \sim T$ 曲线十分灵敏, 也即系统具有较高的相对测温灵敏度. 因此, 若工作波长介于 $1.1 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 之间, 则两者都能得到满足.

3 H/R 之值、工作波长 λ 与遮蔽效果间的关系

为抑制反射辐射, 采用了图 2 所示的水冷遮蔽板. 在某一特定的立体角内, 假定待测面沿各个方向都具有相同的辐出度(这种表面也叫 Lambertian Surface^[8,9]), 则来自待测面的辐出度 M_e 可表示为

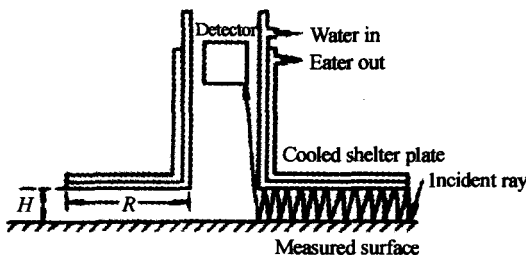


图 2 水冷遮蔽板遮蔽原理
Fig. 2 Schematic diagram of cooled shelter plate

$$M_e = \epsilon_\lambda L_{\lambda, T_0} + k L_{\lambda, T_s} \tag{8}$$

式中, L_{λ, T_0} 为温度为 T_0 的待测面在波长 λ 处的辐出

度; L_{λ, T_s} 为待测面附近温度为 T_s 的其它辐射体在波长 λ 处的辐出度; k 为待测面的有效反射率, 由式(9)确定^[9]

$$k = (1 - \epsilon_\lambda) \times \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + (H/R)^2}}\right) \tag{9}$$

利用式(9), 可将式(8)改写成

$$M_e = \epsilon_\lambda L_{\lambda, T_0} + (1 - \epsilon_\lambda) \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + (H/R)^2}}\right) L_{\lambda, T_s} \tag{10}$$

据此, 利用式(1)、(8)及式(10), 可导出此时探测器接收到的辐射能 P_{1, T_0}

$$P_{1, T_0} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \eta \epsilon_\lambda \tau_\lambda \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda, T_0} d\lambda + \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \tau_0 A \eta (1 - \epsilon_\lambda) \tau_\lambda \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + (H/R)^2}}\right) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda, T_s} d\lambda \tag{11}$$

3.1 H/R 之值与波长间的关系

利用文献[3]给出的实际测量系统和测量环境进行定量分析, 并以文献[3]给出的抛光钢铸件作为测量对象. 不失一般性, ϵ_λ 取 0.54 代入式(1)、式(11)进行计算. 在 $T_0 = 900\text{K}$ 、 $T_s = 850\text{K}$ 、不同的 H/R 下、以及在 $T_0 = 900\text{K}$ 、 $H/R = 0.20$ 、不同的 T_s 下作出的相对测温不确定度 $\frac{T - T_0}{T} \times 100\%$ 随波长 λ 的变化曲线, 如图 3.

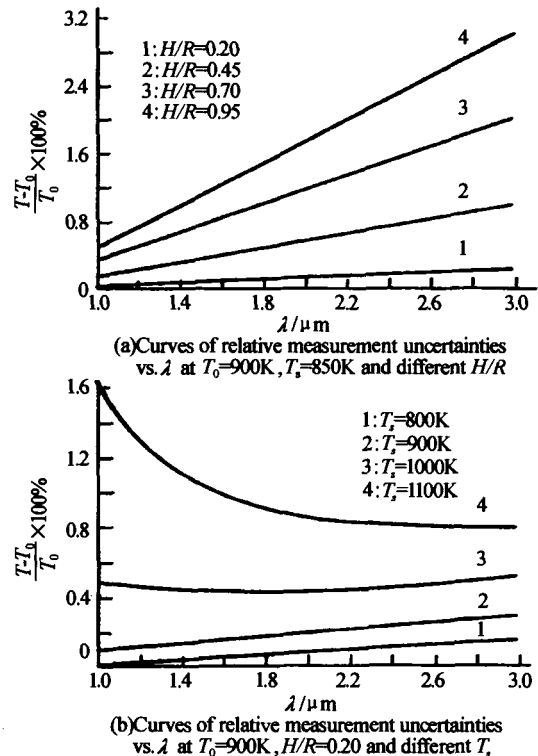


图 3 水冷遮蔽板的遮蔽效果与系统工作波长之间的关系
Fig. 3 Relationship between sheltering effectiveness of cooled shelter plate and working wavelengths

由图 3(a) 见: 1) 在相同的 T_0 及确定的 H/R 下, 当 T_s 较小(一般不超过待测温度)时, 相对测温

不确定度随 λ 的增大而增大. 亦即, 此时水冷遮蔽板对短波辐射的遮蔽效果比长波好; 2) 当 T_0 、 T_s 及 H/R 之值确定时, 不同的 λ 对测温精度虽有影响, 但总体上影响不大.

由图 3(b) 亦可看出, 1) T_0 、 H/R 确定时, 在同一 λ 下, 较强的环境辐射对测温精度的影响较大, 但随着 λ 的减小, 这种影响也随之减小; 2) 当 T_s 较大 (明显高于待测温度) 时, 系统的相对测温不确定度反而随 λ 的增大而减小. 因此可以得出结论: 为使水冷遮蔽板达到好的遮蔽效果, 系统工作波长的选择应在充分考虑背景辐射温度的情况下进行.

另外, 由图 3 还可以看出, 在其它条件都相同时, H/R 之值越小, 水冷遮蔽板对环境辐射的遮蔽效果就越好.

3.2 H/R 之值与测温精度的关系

仍采用 3.1 节给出的条件进行计算. 联合式 (1) 及式 (11), 在 $T_0 = T_s = 1000\text{K}$ 、不同的 λ 下、以及在 $T_0 = 1000\text{K}$ 、 $\lambda = 2.00\ \mu\text{m}$ 、不同的 T_s 下作出的相对测温不确定度随 H/R 的变化曲线, 见图 4. 显见, 1) 在其它条件都相同时, H/R 之值相同的水冷遮蔽板对短波的遮蔽效果比长波要好. 随着 H/R 的减小, 其遮蔽效果也渐好; 2) 在其它条件都相同时, 背景辐射越强, 其遮蔽效果就越差, 但不管怎样, 只要 H/R 小到一定程度 (如, $H/R = 0.1$) 时, 其遮蔽效果亦能达到很理想的程度.

4 大气的透射窗口与工作波长的确定

文献[1]对探测器的温度分辨力及其标准偏差进行研究后得出, 在测温范围 $400\sim 1200\text{C}$ 内, 只有工作波长长于 $1.66\ \mu\text{m}$ 时, 系统才能正常工作. 再结合本文第 2 节中得出的结论可以得出, 系统的工作波长最好介于 $1.66\sim 2.00\ \mu\text{m}$ 之间.

进入光路中的水蒸气以及其它一些选择性吸收气体如 CO_2 等, 都是影响系统测温精度的重要因素. 因此在确定系统的工作波长时应尽量避开它们. 由文献[3]给出的大气的红外透射谱并结合上面得出的结论可以看出, 只有波长位于 $1.66\sim 1.80\ \mu\text{m}$ 、 $2.00\sim 2.40\ \mu\text{m}$ 时, 才能既避开 CO_2 等选择性吸收气体的光谱吸收, 又能满足本文第 1、2 节中的要求.

本文第 3 节指出, 在其它条件都相同时, 系统受到的外界辐射干扰对其测温精度的影响, 当 T_s 小于 T_0 时, 将随其工作波长的变长而增大; 当 T_s 明显高于 T_0 时, 反而随其工作波长的变长而减小. 因此从这个角度看, 系统的工作波长不是越短越好, 也不是越长越好. 不过, 计算也指出[1], 在短波处, 系统的温度分辨力在测温范围的低端不太理想; 另一方

面, 从图 4 还可以看出, 在其它条件不变的情况下, 只需适当减小 H/R , 系统工作波长的变化给测温精度带来的影响就可以小到几乎可以忽略不计的程度.

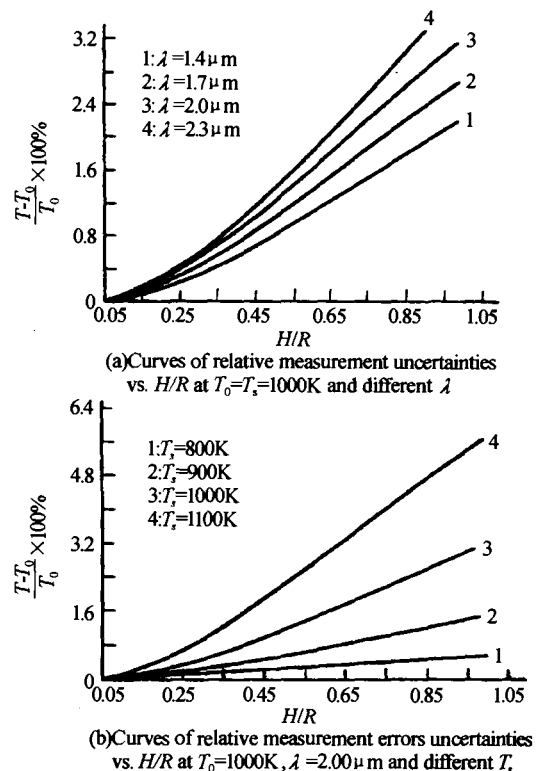


图 4 水冷遮蔽板的 H/R 与遮蔽效果之间的关系
Fig. 4 Relationships between H/R values of cooled shelter plate and sheltering effectiveness

结合 $1.66\sim 1.80\ \mu\text{m}$ 、 $2.00\sim 2.40\ \mu\text{m}$ 波长范围内市场上半导体激光器的可供情况, 以及上面的分析和本系统对激光光源发射能量的要求[1], 作者选择 $\lambda = 2.00\ \mu\text{m}$ 作为系统的工作波长. 同时, 选择 InGaAs/I 半导体激光器作为系统的测量光源. 这与文献[1, 2]从其它途径出发得出的结论是相同的.

5 测温精度

测温系统的结构设计及其测温方法都是影响测温精度的重要因素[8~10]. 测温时, 探测器接收到的信号, 既有被测目标的温度信号, 又有周围环境的温度信号[11]; 后续电路中处理的信号, 既有探测器接收到的光辐射信号, 又有探测器及其后续电路产生的噪声信号[12, 13]. 具体地讲, 可以将影响测温精度的因素划分成 5 类:

1) 产生于光学器件的制作方面: 如窄带干涉滤光片的中心波长及其波长带宽的制作准确度; 窄带干涉滤光片的透光均匀度; 调制盘的对称性与偏心度以及光学器件的排列结构等;

2) 产生于温度的测量过程: 如调制盘转速的稳定性; 检测探测器测量 P_1 、 P_2 的准确度; 监测探测

器测量 P_3 的准确度;电路的线性放大特性以及数据处理的方法,等等;

3)产生于温度的测量方法:如标定过程中参考温度的实现、标定的准确性以及温度计算方法的近似程度,等等;

4)产生于探测器及电路的噪声:如产生于探测器、放大电路、多路模拟开关、采样保持电路以及模-数转换过程的噪声信号,等等;

5)产生于温度的测量原理:如因测量原理产生的发射率测量的不确定度以及由此带来的测温不确定度,等等。

由1)、2)、3)所产生的测温不确定度十分复杂。限于篇幅,作者将另文讨论。本文仅简单分析由4)、5)所产生的随机测温不确定度。

探测器及电路的噪声所产生的随机测温不确定度可用式(12)表示

$$\epsilon = \sqrt{\epsilon_{PD}^2 + \epsilon_{AMP}^2 + \epsilon_{MUX}^2 + \epsilon_{SH}^2 + \epsilon_{AD}^2} \quad (12)$$

式中, ϵ_{PD} 为钽酸锂热释电探测器产生的随机噪声误差; ϵ_{AMP} 为放大电路产生的随机噪声误差; ϵ_{MUX} 为多路模拟开关产生的随机噪声误差; ϵ_{SH} 为采样保持电路产生的随机噪声误差; ϵ_{AD} 为模-数转换电路产生的随机噪声误差。采用性能优良的热释电探测器,可使 ϵ_{PD} 很小;精选电路器件,可使 ϵ_{AMP} 、 ϵ_{MUX} 及 ϵ_{SH} 更小。因此主要考虑模-数转换的误差。这种误差主要包括量化误差、非线性误差、失调误差及增益误差。采用性能优良的 A/D 转换器件并尽可能增大信号的幅度(0~10V 输入),可令人满意的解决这一问题。

下面分析因测量原理带来的测温不确定度。为分析方便,可以将黑体的辐射公式写成

$$L_\lambda(T) = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} \exp(-c_2/\lambda T) \quad (13)$$

式中, $c_2 = 14388 \mu\text{m} \cdot \text{K}$, 为第二辐射常数; T 的意义同前,为待测面的真实温度。

设待测面的光谱辐出温度(spectral radiance temperature)为 T_λ , 则容易写出

$$\epsilon_\lambda L_\lambda(T) = L_\lambda(T_\lambda) \quad (14)$$

利用式(13),可以将式(14)化简成

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_\lambda} + \frac{\lambda}{c_2} \ln \epsilon_\lambda \quad (15)$$

式(15)两端对 ϵ_λ 求微分,并化简,则可得到

$$\frac{dT}{T} = \frac{\lambda T}{c_2} \frac{d\epsilon_\lambda}{\epsilon_\lambda} \quad (16)$$

由式(16)可见,相对测温不确定度 $\frac{dT}{T}$ 与 λT 成正比。此即,随着 λT 的减小,发射率的测量不确定度对测温不确定度的影响将减小。因此实际系统的

λT 应尽量小。这一要求与本文第2节得出的、 λT 较小($\lambda T \leq 2898 \mu\text{m}$)时,测温曲线处于最灵敏区域的结论是一致的。

以前述抛光的钢铸件作为测量目标,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、采用中心波长为 $2.00 \mu\text{m}$ 的窄带干涉滤光片(带宽 $\Delta\lambda = 10 \text{ nm}$)进行测温实验,得到的实验结果已由文献[3]的表1给出。显见实验结果是较为准确的。

6 结论

本文以 InGaAs/I 半导体激光器作测量光源、以钽酸锂热释电探测器作光电转换器件,实现了一种能准确测量中、高温度的实时测温系统,其测温的不确定度在 0.3% 以内。

参考文献

- 1 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.光学学报,2003,23(11):1394~1441
Shi D H, Huang G Q, Liu Y F, et al. *Acta Optica Sinica*, 2003,23(11):1394~1441
- 2 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.中国激光,2003,30(6):545~550
Shi D H, Huang G Q, Liu Y F. *Chinese Journal of Lasers*, 2003,30(6):545~550
- 3 施德恒,刘玉芳,孙金锋,等.一种实用化实时测温系统工作波长优化设计的进一步分析.光子学报,2004,33(6):658~662
Shi D H, Liu Y F, Sun J F, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004,33(6):658~662
- 4 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.中国激光,2004,31(1):105~110
Shi D H, Liu Y F, Sun J F, et al. *Chinese Journal of Lasers*, 2004,31(1):105~110
- 5 胡瑞华,栾松,孙宁克.发射率和温度同时测定的辐射测温仪.红外技术,1998,20(2):21~22
Hu R H, Luan S, Sun N K. *Infrared Technology*, 1998, 20(2):21~22
- 6 王勇,廖延彪,辛军,等.实用化双折射式光纤温度传感器最佳设计.光学学报,1999,19(1):87~92
Wang Y, Liao Y B, Xin J, et al. *Acta Optica Sinica*, 1999,19(1):87~92
- 7 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.中国激光,1999,A26(2):121~126
Xin J, Feng Q B, Lin T S, et al. *Chinese Journal of Lasers*, 1999,A26(2):121~126
- 8 Coates P B. Analytic estimation of systematic errors in photoelectric pyrometry. *High Temperatures-High*

- Pressures, 1985, **17**(5): 507~518
- 9 Dewitt D P. Inferring temperature from optical radiation measurement. *Opt Eng*, 1986, **25**(4): 596~601
- 10 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
- 11 王春晖, 成向阳, 王骥, 等. CO₂ 激光成像雷达距离分辨率测距精度的分析与实验研究. *光子学报*, 2003, **32**(10): 1212~1215
- Wang C H, Cheng X Y, Wang Q, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10): 1212~1215
- 12 杨玉孝, 熊开利, 孙艳, 等. 光纤白色干涉法与膜厚纳米测量新技术研究. *光子学报*, 2003, **32**(8): 973~976
- Yang Y X, Xiong K L, Sun Y, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8): 973~976
- 13 陈磊, 高志山, 何勇. 红外光学透镜焦距测量. *光子学报*, 2004, **33**(8): 986~988
- Chen L, Gao Z S, He Y. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 986~988

Several Problems about Optimization of a Practical Real-time Temperature Measurement System

Shi Deheng^{1,2}, Sun Jinfeng¹, Liu Yufang¹, Zhu Zunlue¹

¹ Department of Physics, Henan Normal University, Xinxiang, Henan 453007

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

Received date: 2004-05-10

Abstract Based on the Kirchhoff law, a practical temperature real-time measurement system using laser diode and LiTaO₃ Pyroelectric detector is presented. According to the curves of spectral radiance and relative temperature measurement sensitivity versus λT , working wavelength range of the system is given. By means of analyzing the relationships between sizes of cooled shelter plate and positioning method and working wavelength, and atmospheric infrared transmission, working wavelength of the system is determined. According to the effect on temperature measurement accuracy by sizes of cooled shelter plate and positioning method, H/R values are discussed. And at the same time, anti-jamming ability and temperature measurement inaccuracy are also analyzed. Five main reasons resulted in temperature measurement uncertainty are presented. And the two are briefly discussed. Temperature measurement uncertainty exceeds 0.3%.

Keywords Applied Optics; Temperature measurement; Temperature measurement by radiation; Real-time measurement; Laser diode; Pyroelectric detector



Shi Deheng was born on June 28, 1964, in Henan, China. He received the B. S. degree from Henan Normal University in 1987 and the M. S. degree from University of Science and Technology of China in 1990. Since 1990, he has been working in the First Aeronautical College of Air Force and specializing in atomic and molecular physics and applied optics. Now he is a doctoral student guided by professor Sun Jinfeng in Henan Normal University.