

文章编号: 1001-3806(2004)06-0625-05

一种实用化实时测温系统的测温灵敏度

谢安东^{1,5}, 施德恒^{2,5}, 陈玉科³, 刘玉芳⁴

(1. 井冈山师范学院 物理系, 吉安 343009; 2. 信阳师范学院 物理系, 信阳 464000; 3. 空军第一航空学院 基础部, 信阳 464000; 4. 河南师范大学 物理系, 新乡 453007; 5. 四川大学 原子与分子物理研究所, 成都 610065)

摘要: 基于基尔霍夫定律, 利用半导体激光器 InGaAs/I 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。基于该系统 A/D 转换器件的分辨率、 $V(T)-T$ 曲线的温度灵敏度及其与测温范围间的制约关系, 确定了系统应选用 16 位的芯片为其 A/D 转换器件; 基于该系统的测温精度、 $V(T)-T$ 曲线的相对温度灵敏度及其与波长间的关系, 对其工作波长的优化选择进行了进一步的讨论; 基于探头的温度分辨率、A/D 转换器件的分辨率以及与 $V(T)-T$ 曲线的温度灵敏度间的制约关系, 对其波长带宽的优化设计进行了进一步的分析, 并给出了系统在 673K~1473K 内的测温灵敏度。对系统进行优化设计后, 在测温范围的低温段, 其灵敏度不低于 0.5K; 在测温范围的高温段, 则不低于 0.1K。在 673K~1473K 内, 其测温不确定度不低于 0.3%。

关键词: 测试计量仪器; 辐射测温; 基尔霍夫定律; 实时测温; 半导体激光器; 热释电探测器

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A

Temperature measurement sensitivity of a practical real-time temperature measurement system

XIE An-dong^{1,5}, SHI De-heng^{2,5}, CHEN Yu-ke³, LIU Yu-fang⁴

(1. Department of Physics, Jinggangshan Normal College, Ji'an 343009, China; 2. Department of Physics, Xinyang Teachers' College, Xinyang 464000, China; 3. Department of Foundation, The First Aeronautical College of Air Force, Xinyang 464000, China; 4. Department of Physics, Henan Normal University, Xinxiang 453002, China; 5. Institute of Atomic and Molecular Physics, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Based on the Kirchhoff law, a practical temperature real-time measurement system using laser diode InGaAs/I and LiTaO₃ pyroelectric detector is presented. By means of analyzing the relationships among resolving power of A/D converter, temperature measurement sensitivity of $V(T)-T$ curve and temperature measurement range, 16bit A/D converter for this instrument is determined. According to the relationships among temperature measurement accuracy, relative temperature measurement sensitivity of $V(T)-T$ curve and wavelengths, further optimal wavelength is discussed. Based on the relationships among resolving power of the detector and A/D converter and temperature sensitivity of $V(T)-T$ curve, further optimal wavelength bandwidth is analyzed. Temperature measurement sensitivity of the instrument at 673K~1473K is given. Temperature measurement sensitivity is above 0.5K at lower temperatures and above 0.1K at higher temperatures at 673K~1473K after using optimal parameters. Temperature measurement inaccuracy at 673K~1473K exceeds 0.3%.

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

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^[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^[2~4]及主动式辐射测温法^[5,6]两种。由于主动式辐射测温法使用激光器或红外辐射源作为测量光源^[7,8], 从而避免了被测目标的发射率的测量或者能够准确地测量出发射率, 因而都能实时、准确地测出被测目标的真实温度。

在使用激光器作为测量光源的主动式辐射测温法中, 报道最多的是利用待测目标的发光光谱进行温度的测量(尤其是测量气体的温度时), 通过测量

基金项目: 河南省科技攻关计划资助项目(001120321)

作者简介: 谢安东(1964-), 男, 副教授, 博士研究生, 主要从事原子分子物理研究。

E-mail: xieandongzhou@163.com

收稿日期: 2003-11-20; 收到修改稿日期: 2004-04-17

待测目标的发射率,进而测出待测目标温度的方法。

施德恒等人^[9]利用系统的工作波长与各主要技术指标(温度分辨力、测温精度及测温范围)之间的关系,对工作波长进行了优化设计,得出了系统应工作在 $\lambda = 200\mu\text{m}$ 处的结论;利用系统的各主要技术指标(温度分辨力、标准差及测温范围)与各主要技术参数(工作波长与波长带宽、光学系统的相对孔径、放大器的带宽与光源能量等)之间的关系,对系统的各主要技术参数(光学系统的相对孔径、放大器的带宽及波长带宽等)进行了优化设计^[10]。文献[9],[10]中虽涉及探头的温度分辨力,但都未涉及到系统的测温灵敏度;在文献[11]中利用系统的各主要技术参数与各主要测量指标之间的关系,对光源对系统的测温精度及其测温范围的影响进行了分析,但仍未涉及到系统的测温灵敏度。本文中则基于系统的A/D转换器件的分辨力、 $V(T)-T$ 曲线的温度灵敏度及其与测温范围间的制约关系,确定出应选用16位的芯片作为该系统的A/D转换器件;基于系统的测温精度、 $V(T)-T$ 曲线的相对温度灵敏度及其与波长间的关系,对系统工作波长的优化选择进行进一步的讨论;通过对探头的温度分辨力与 $V(T)-T$ 曲线的温度灵敏度、A/D转换器件的分辨率间的制约关系的研究,对系统波长带宽的优化设计进行进一步的分析,并绘制出了系统在整个精确测温范围(673K~1473K)内的测温灵敏度。

1 系统的测温灵敏度

系统的测温灵敏度不仅受探头的温度分辨力的影响,而且还受二次仪表的测温灵敏度的约束。而二次仪表的测温灵敏度又由探测器输出的 $V(T)-T$ 曲线的温度灵敏度(相对温度灵敏度)、A/D转换器件的分辨率以及电路的放大倍数等决定。

1.1 $V(T)-T$ 曲线的温度灵敏度

当无激光束入射检测探测器时,检测探测器输出的电信号的强度 $V(T)$ 可写成^[12]:

$$V(T) = D^* P_1 \quad (1)$$

式中, D^* 为钽酸锂热释电探测器的探测率, P_1 为当无激光束入射检测探测器时,检测探测器接收到的待测目标的辐射能,由下式确定^[9~11]:

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

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

盘的调制系数; ε_λ 为温度为 T 的待测目标在波长 λ 处的发射率; τ_λ 为光学系统对波长为 λ 的光的总透过率; L_λ 为温度为 T 的黑体在波长 λ 处的单色辐出度,可由下式确定:

$$L_\lambda = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} [\exp(hc/\lambda kT) - 1]^{-1} \quad (3)$$

式中, h 为Planck常数; k 为Boltzmann常数; c 为光速。这里已假定,在极窄的波段内, ε_λ 及 τ_λ 均与波长无关。

如果将待测温度每变化1K时,探测器输出信号电平的变化量定义为 $V(T)-T$ 曲线的温度灵敏度 S ^[13,14],则有:

$$S = \Delta V(T) / \Delta T \quad (4)$$

据此,容易写出某一温度点处的测温灵敏度:

$$S = \partial V(T) / \partial T \quad (5)$$

利用(1)式、(2)式及(5)式,可以导出:

$$S = \frac{\pi}{4} \frac{D^2}{f^2} \tau_0 A \eta D^* \varepsilon_\lambda \tau_\lambda \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial L_\lambda}{\partial T} d\lambda \quad (6)$$

将(3)式代入上式,并利用 $\Delta\lambda$ 很小这一近似条件,可以导出:

$$S = \frac{\pi}{4} \frac{D^2}{f^2} \tau_0 A \eta D^* \varepsilon_\lambda \tau_\lambda \cdot \frac{2\pi h^2 c^3}{k} \cdot \frac{\exp(hc/\lambda kT)}{\lambda^6 T^2 [\exp(hc/\lambda kT) - 1]^2} \cdot \Delta\lambda \quad (7)$$

1.2 $V(T)-T$ 曲线的相对温度灵敏度

为便于进行进一步的分析和比较,定义当待测目标的温度每变化1K时, $V(T)-T$ 曲线的相对变化量为 $V(T)-T$ 曲线的相对温度灵敏度 S_r ^[11,13,14]:

$$S_r = \left(\frac{\Delta V}{V} \right) / \left(\frac{\Delta T}{T} \right) \quad (8)$$

据此,可以导出某一温度点处 $V(T)-T$ 曲线的相对温度灵敏度:

$$S_r = \frac{hc}{k} \cdot \frac{1}{\lambda T} \cdot \frac{\exp(hc/\lambda kT)}{\exp(hc/\lambda kT) - 1} \quad (9)$$

1.3 探头的温度分辨力

根据(2)式,当待测温度改变 ΔT 时,在极窄的波段内容易导出系统接收到的辐射能的变化为:

$$\Delta P_1 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f} \right)^2 \tau_0 A \eta \varepsilon_\lambda \tau_\lambda \Delta L_\lambda \cdot \Delta\lambda \quad (10)$$

式中,

$$\Delta L_\lambda = \left(\frac{\partial L_\lambda}{\partial T} \right) \cdot \Delta T \quad (11)$$

钽酸锂热释电探测器的噪声等效功率 P_{NEP} 为:

$$P_{NEP} = \frac{V_s}{V_n} \cdot \frac{\sqrt{A \cdot \Delta f}}{D^*} \quad (12)$$

只有当 $\Delta P_1 \geq P_{NEP}$ (13) 时,才能引起系统的响应。式中, V_s/V_n 为信噪比,在推算系统的温度分辨力时,取 $V_s/V_n = 1$; Δf 为后续的选择放大器的带宽。

将(3)式、(10)式、(11)式及(12)式代入(13)式中,并仅考虑极限情况,可以导出:

$$\Delta T = \frac{2kT^2\lambda^6 \sqrt{A \cdot \Delta f}}{\pi^2 h^2 c^3 \tau_0 A \Delta \lambda \eta \tau_\lambda D^* \varepsilon_\lambda (D/f')^2} \cdot \frac{[\exp(hc/\lambda kT) - 1]^2}{\exp(hc/\lambda kT)} \quad (14)$$

式中, ΔT 即为探头的温度分辨力。

2 计算结果和讨论

2.1 基于测温范围的考虑与 A/D 转换器件的优化选择

该系统要求的准确测温范围为 673K~1473K,实际可测范围比这一范围宽(约 573K~2073K)。若要求后接二次仪表的测温灵敏度高于 0.1K,则 A/D 转换器件至少能分辨出 0.1℃ 的温度变化。对于 12 位的 A/D 转换器件而言,只能分辨出 $(1800 - 300)/2^{12} - 1 = 0.37K$ 的温度变化,显然难以满足要求;对于 16 位的 A/D 转换芯片,能分辨出小至 $(1800 - 300)/2^{16} - 1 = 0.023K$ 的温度变化。故仅从分辨率看,16 位的 A/D 转换芯片可以满足要求。

采用 16 位的 A/D 转换器件时,为保证后接二次仪表的测温灵敏度高于 0.1K,则探测器输出信号的灵敏度 S 不应低于 $1.53 \times 10^{-4}[13]$ 。

以文献[9]中给出的实际测量系统和测量环境进行定量分析,并取 $\Delta\lambda = 10nm$ 、且以抛光的钢铸件(温度 593K~1473K, $\varepsilon_\lambda = 0.52 \sim 0.56$) 作为测量对象。为不失一般性,可取 $\varepsilon_\lambda = 0.54$ 代入计算。则由(7)式作出的 $S-\lambda$ 曲线,如图 1 所示。

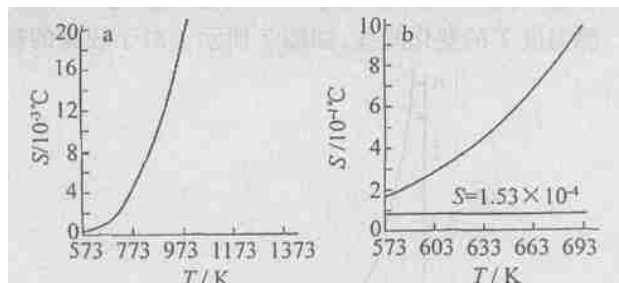


Fig. 1 Curves of $S-T$

a—curves of $S-T$ within 573K~1373K b—curves of $S-T$ within 573K~693K

由图 1a 可见, $V(T)-T$ 曲线的温度灵敏度 S 随被测温度 T 的增大而迅速增大。因此,为研究 $V(T)-T$ 曲线的极限灵敏度,只需考察测温范围中较

低段温度的情形。由图 1b 可见,当 $S = 1.53 \times 10^{-4}$ 时,对应的温度点显然低于 573K。因此,仅就 $V(T)-T$ 曲线的温度灵敏度而言,选用 16 位的 A/D 转换器件后,在 673K~1473K 的范围内,二次仪表的测温精度与测温灵敏度均可达到要求。

2.2 基于测温精度的考虑与系统工作波长的优化选择

仍以文献[9]中给出的测量环境进行定量分析,并取 $\Delta\lambda = 10nm$ 。由(7)式做出的 $S-\lambda$ 曲线及由(9)式做出的 $S_r-\lambda T$ 曲线,如图 2、图 3 所示。

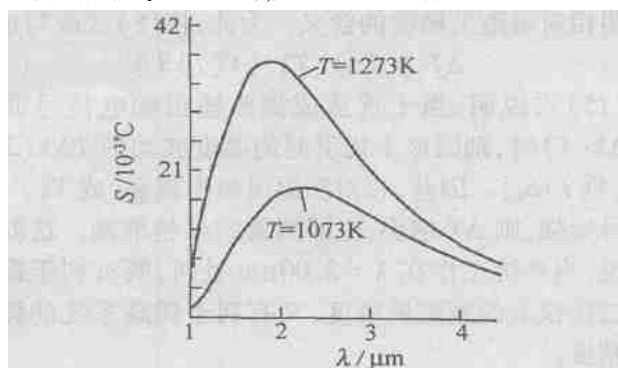


Fig. 2 Curves of $S-\lambda$

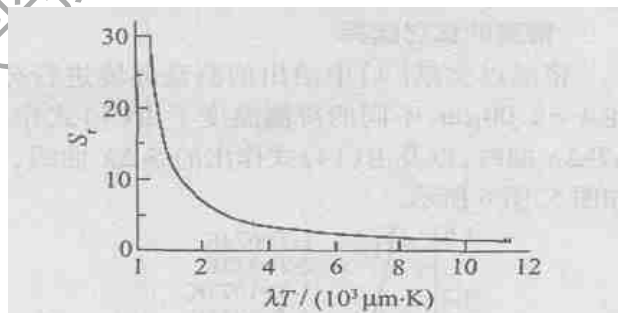


Fig. 3 Curves of $S_r-\lambda T$

由图 2 可以看出,在 $\lambda = 2.00\mu m$ 附近,系统正好工作在 $S-\lambda$ 曲线的峰值区域。这就是说,当 $\lambda = 2.00\mu m$ 时,探测器的输出信号比在其它波长处更为灵敏,因此,当系统工作在 $\lambda = 2.00\mu m$ 时有利于提高二次仪表的测温灵敏度。由图 3 亦可看出,当 $\lambda T \ll 2898\mu m \cdot K$ 时, $S_r-\lambda T$ 曲线十分陡峭,也即 S_r 随 λT 的变化十分灵敏。这也说明,当系统的工作波长为 $\lambda = 2.00\mu m$ 时,若被测温度 $T \leq \frac{2898}{2.00} = 1449K$ 时,只要被测温度有微小的变动,就能引起 S_r 较大的变化。

图 4 中给出了 0.6 μm ~3.0 μm 内海平面 300m 长度的路径上大气的透射光谱曲线^[4]。由图 4 显见, $\lambda = 2.00\mu m$ 时,正好能避开水蒸气、CO₂ 等异核分子的光谱吸收对系统测温精度的影响。因此,仅从探测器输出信号的温度灵敏度及其相对温度灵敏

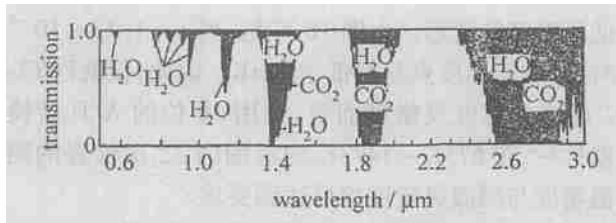


Fig. 4 Atmospheric transmittance spectra within $0.6\mu\text{m}\sim 3.0\mu\text{m}$
度、并结合大气的透射光谱曲线得出的最佳工作波长为 $\lambda = 2.00\mu\text{m}$ 的结论,与先前用其它分析方法^[1]得出的结论是相同的。

下面分析 S_r 与测温精度间的关系,以进一步阐明相对温度灵敏度的含义。为此,将(8)式改写成:

$$\Delta T = T\Delta V(T) / [V(T)S_r] \quad (15)$$

(15)式说明,当干扰造成探头输出的电信号波动 $\Delta V(T)$ 时,则因该干扰引起的温度波动为 $T\Delta V(T) / [V(T)S_r]$ 。因此,相对测温灵敏度越高、或 $V(T)$ 信号越强,则 ΔT 越小,也即测量结果越准确。这就是说,当系统工作在 $\lambda = 2.00\mu\text{m}$ 处时,既有利于提高二次仪表的测温灵敏度,又有利于提高系统的测温精度。

2.3 基于探头的温度分辨力的考虑与系统的波长带宽的优化选择

依然以文献[9]中给出的测量环境进行分析。在 $\lambda = 2.00\mu\text{m}$ 、不同的待测温度下由(7)式作出的 $\Delta T \cdot \Delta \lambda$ 曲线,以及由(14)式作出的 $S \cdot \Delta \lambda$ 曲线,分别如图5、图6所示。

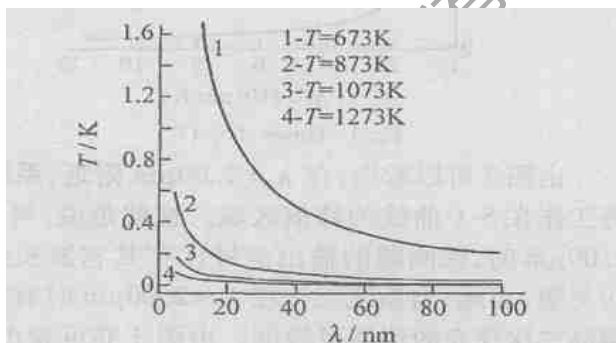


Fig. 5 Curves of $\Delta T \cdot \Delta \lambda$

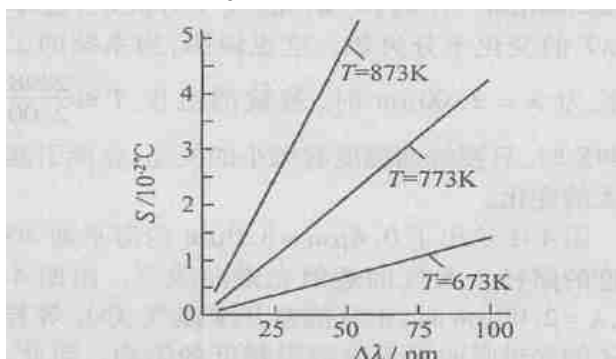


Fig. 6 Curves of $S \cdot \Delta \lambda$

由图5可以看出,探测器的温度分辨力 ΔT 的大小与系统的波长带宽成反比。即波长带宽越窄,则探头的温度分辨力就越低;反之,则越高(例如,当被测温度 $T = 673\text{K}$ 时,若 $\Delta \lambda = 10\text{nm}$,则 $\Delta T = 0.4486\text{K}$;而当 $\Delta \lambda = 20\text{nm}$ 时,则 $\Delta T = 0.8972\text{K}$)。因此,单从探头的温度分辨力考虑,系统工作波长的带宽似应越宽越好。

由图6可以看出, $V(T) - T$ 曲线的温度灵敏度与系统的波长带宽成正比。因此, $\Delta \lambda$ 越大,则二次仪表的测温灵敏度就越高,进而就越容易分辨出变化较小的温度。

从上面的分析中似可得出,波长带宽似应取得越宽越好。但研究指出,系统的测温精度不仅受系统的测温灵敏度的制约,而且更主要的,还受系统的其它因素,如进入探测器的干扰光等的影响。 $\Delta \lambda$ 越宽,则进入探测器中的干扰光越多,从而由干扰光引起的测温误差也就越大^[10]。因此,在确定系统的波长带宽时,既要保证探头有足够的温度分辨力、二次仪表有足够的测温灵敏度,同时,又要使进入探头的干扰光尽量少。

当 $\Delta \lambda = 10\text{nm}$ 时,在精确测温范围的下限, $\Delta T = 0.4486\text{K}$,二次仪表的温度分辨力高于 0.1K (仅受 A/D 转换器件的分辨率的限制),因此可以满足要求。所以,这里选择 $\Delta \lambda = 10\text{nm}$ 作为系统工作波长的带宽,这与文献[10]中单纯从光辐射的角度出发得出的结论是一致的。

2.4 系统的温度灵敏度

在要求精确测量的温度范围内,系统在某一温度点处的测温灵敏度取探头的温度分辨力、 $V(T) - T$ 曲线的温度灵敏度及 A/D 转换器件的分辨率等多个值中较大的一个值。综合 2.1 节、2.2 节及 2.3 节的研究结果,作出的系统的测温灵敏度 ΔT 随被测温度 T 的变化曲线,如图7所示。对于较高的被

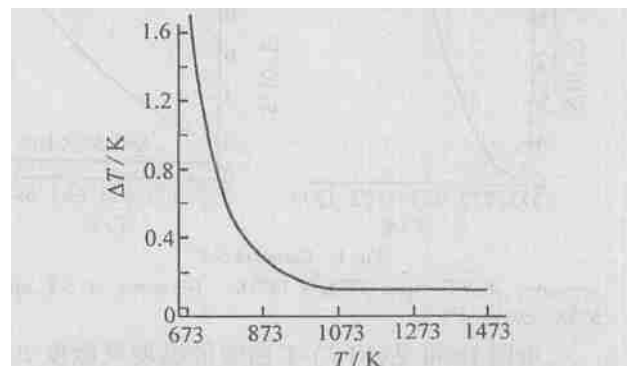


Fig. 7 Curves of $\Delta T \cdot T$

测温度而言,其实际的 $V(T) - T$ 曲线的灵敏度、探头

的温度分辨力以及 A/D 转换器件的分辨率等都是高于图 7 中给出的 0.1K 的。但依据系统的实际需要,在图 7 中,凡是计算得出 $\Delta T < 0.1\text{K}$ 的温度点处,均将取 $\Delta T = 0.1\text{K}$ 。

由图 7 可见,整个系统的测温灵敏度大大小于系统要求的测温误差(不大于 0.3%),因此能够满足需要,实验结果^[9,10]也已证实了这一结论。

3 结束语

研究了一种实用化实时测温系统的测温灵敏度。实验结果显示出:(1)在精确测温的低温段,其系统的测温灵敏度不低于 0.5K,当温度较高时,其系统的测温灵敏度不低于 0.1K;(2)系统的测温不确定度在 0.3% 以内。因此,满足实际需要和符合设计要求。

参 考 文 献

- [1] KHAN M A, ALLEMAND C, EAGAR T W. Noncontact temperature measurement I: interpolation based techniques [J]. *Rev Sci Instrum*, 1991, 62(2): 392~402.
- [2] HAHN J W, RHEE C. Reference wavelength method for a two-color pyrometer [J]. *Appl Opt*, 1987, 26(24): 5276~5279.
- [3] HUNTER G B, ALLEHAND C D, EAGER T W. Multiwavelength pyrometer [J]. *Opt Engng*, 1985, 24(6): 1081~1085.
- [4] DEWITT D P. Inferring temperature from optical radiation measurements [J]. *Opt Engng*, 1986, 25(4): 596~601.
- [5] KRIVITZUM V, GRASS B, HERGENRODER R *et al.* Temperature measurement of liquids by differential absorption of two diode laser [J]. *Applied Spectroscopy*, 2001, 55(9): 1251~1258.
- [6] FAN C H, LONGTIN J P. Laser-based measurement of temperature or concentration change at liquid surface [J]. *Journal of Heat Transfer, Transactions ASME*, 2000, 122(4): 757~762.
- [7] KEE H H, LEES G P, NEWSON T P. Technique for measuring distributed temperature with 35cm spatial resolution utilizing the Landau-Placzek ratio [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2000, 12(7): 873~875.
- [8] 胡瑞华, 栾松, 孙宁克. 可同时测量温度及发射率的辐射温度计 [J]. *红外技术*, 1998, 20(2): 21~22.
- [9] 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优化设计 [J]. *中国激光*, 2003, 30(6): 545~550.
- [10] 施德恒, 黄国庆, 刘玉芳 *et al.* 一种实用化实时测温系统的优化设计 [J]. *光学学报*, 2003, 23(11): 1394~1401.
- [11] 施德恒, 黄国庆, 刘玉芳. 光源对测温系统测温精度及测温范围的影响 [J]. *光电子·激光*, 2003, 14(5): 529~533.
- [12] TAMURA Y, TATSUWAKI M, SUGIMURA T *et al.* Temperature measure of steel in the furnace [A]. *Temperature, its Measurement and Control in Science and Industry [C]*. New York: American Institute of Physics, 1982. 505~512.
- [13] 王勇, 廖延标, 辛军 *et al.* 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): 87~92.
- [14] COATES P B. Analytic estimation of systematic errors in photoelectric pyrometry [J]. *High Temperatures-High Pressures*, 1985, 17: 507~518.
- [15] Q E, 1988, 24(11): 2253~2264.
- [11] BROWN D C, NELSON R, BILLINGS L. Efficient CW end-pumped, end-cooled NdYVO₄ diode-pumped laser [J]. *A P L*, 1997, 36(33): 8611~8613.
- [12] SASAKI T, KOJIMA T, YOKOTANI A *et al.* Single longitudinal mode operation and second harmonic generation of NdYVO₄ microchip lasers [J]. *Opt Lett*, 1991, 16(21): 1665~1667.
- [13] SHEN D, LIU A, SONG J *et al.* Efficient operation of an intracavity-doubled NdYVO₄/KTP laser end pumped by a high-brightness laser [J]. *Appl Opt*, 1998, 37: 7785~7788.
- [14] HE J L, HOU W, ZHANG H L *et al.* Continuous-wave output of 5.5W at 532nm by intracavity frequency doubling of an NdYVO₄ laser [J]. *Chin Phys Lett*, 1998, 15(6): 418~419.
- [15] 刘均海, 吕军华, 卢建仁 *et al.* 高功率端面抽运 NdYVO₄ 固体激光器模式匹配的研究 [J]. *光学学报*, 2000, 20(2): 186~189.

(上接第 619 页)

- [5] 刘均海. 高功率端面泵浦 NdYVO₄, NdGdVO₄ 激光器热效应及激光特性研究 [D]. 济南: 山东大学, 1999. 3~4.
- [6] CHEN Y F, HUANG T M, KAO C F *et al.* Optimization in scaling fiber-coupled laser-diode end-pumped lasers to higher power: influence of thermal effects [J]. *IEEE J Q E*, 1997, 33(8): 1424~1429.
- [7] BAI J T, CHEN G F. Continuous-wave diode-laser-end-pumped NdYVO₄/KTP high-power solid state green laser [J]. *Optic & Laser Technology*, 2002, 34: 333~336.
- [8] INNOCENZI M E, YURA H T, FRUCHER C L *et al.* Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid state lasers [J]. *A P L*, 1990, 56(19): 1831~1833.
- [9] 余锦. 纵向泵浦固体激光介质热透镜效应的理论研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2000, 12(1): 27~31.
- [10] FARRUCH U O, BUOCRISTIANI A M, BYVIK C E. An analysis of the temperature distribution in finite solid-state laser rods [J]. *IEEE J*