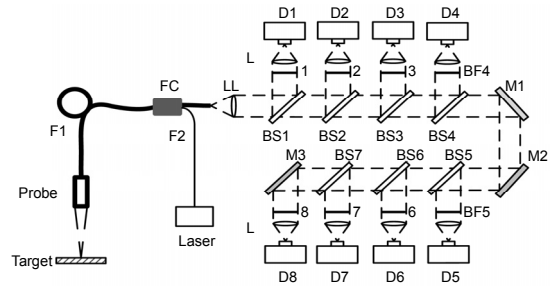


八通道瞬态可见-红外光学高温计的设计与实现

王荣波*, 周维军, 蒙建华, 田建华, 何莉华

中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900



摘要: 基于受冲击加载样品的温度测量需求, 设计了一种测温范围 1500 K~10000 K 的八通道光学高温计, 通过优化计算选取了最佳的工作波长和带宽, 使每个通道的线性外推误差控制在 2% 以内。采用高通低反分光片结合窄带滤光片的分光模式, 使每通道光能利用率达到 60% 以上。采用带宽 150 MHz 的 Si 和 InGaAs 半导体光探测器, 工作波长覆盖 400 nm~1700 nm, 利用黑体炉完成高温计的多点标定。

关键词: 光学高温计; 黑体辐射; 冲击波物理; 半导体探测器

中图分类号: TN249

文献标志码: A

A high-speed, eight-wavelength visible light-infrared pyrometer

Rongbo Wang*, Weijun Zhou, Jianhua Meng, Jianhua Tian and Lihua He

The Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China

Abstract: A high-speed, eight-channel pyrometer for precise temperature measurements in the 1500 K to 10000 K temperature range has been designed. It can be used in shock physics experiments to measure temperature of shock loaded sampling. The wavelength and bandwidth of each channel are optimized by analysis and calculation. The semiconductor detectors of Si and InGaAs are used as photoelectric devices, whose bandwidth is 150 MHz and working wavelength covers 400 nm~1700 nm range. By combing the high-transmittance beam-splitters and narrow-bandwidth filters, the peak spectrum transmissivity of each channel can all be higher than 60%. This pyrometer is calibrated by using high temperature blackbody furnace and standard opto-electronic pyrometer.

Keywords: optic pyrometer; blackbody radiation; shock physics; semiconductor detectors

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.06.008

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, **44**(6): 621–625

1 引言

在诸如冲击加载、强粒子流加载、惯性约束聚变等极端条件下, 待测材料(物质)的温度高达几千开尔文甚至几万开尔文, 且持续时间很短, 一般在几纳秒到几微秒之间, 因此瞬态的温度测量方法对这些实验至关重要。特别是在受冲击材料的状态方程(EOS)的研究中, 对温度的直接测量可以对现有的流体力学和状

态方程代码进行校验。因此, 精确测量瞬态高温的方法, 比如高温计^[1,2]、拉曼光谱测温^[3]、动态中子共振谱测温^[4]等方法都被尝试着用于实验中。使用拉曼光谱测温需要拉曼样本在可见光谱下呈透明状态, 而透明样本具有非常小的发射率, 使得信号的信噪比很低且需极为准确地同步测定拉曼脉冲时间, 因此, 近年来鲜有应用拉曼光谱法成功测量瞬态温度的报道。动态中子共振谱法可以测量样品的体温度, 但该方法需要较大的中子源, 且时间分辨率仅百纳秒量级, 所以也未在瞬态测温实验中得到大量的应用。对于瞬态高

收稿日期: 2017-03-11; 收到修改稿日期: 2017-05-04

*E-mail: xtsanwen@126.com

温的测量最有效的方法仍然是辐射测量技术。该技术通过测量待测目标在一个或多个波长下的光谱辐射亮度,利用普朗克黑体辐射定律计算出目标的温度值。由于目标发射率数据的缺乏,常常将目标假定为发射率不随波长变化的灰体,通过多波长拟合得到目标的温度。截至目前,多波长高温计仍然是高温高压状态物质温度诊断的主要手段^[5-12]。虽然近年来瞬态发射率测量技术得到一定的发展^[5,6],但其仍需配合多波长高温计才可获得目标的温度值。目前常用的多波长瞬态光学高温计分别覆盖 2500 K~10000 K 和 1500 K~2500 K 两个测温范围^[1,2,8-10],由于分光效率和光学耦合效率低等原因,能同时满足 1500 K~10000 K 温度范围的光学高温计设计难度较大。

本文介绍了一种基于半导体探测器和高通低反分光片组合分光模式的八通道光学高温计,其测温范围可覆盖 1500 K~10000 K,探测器带宽 150 MHz,可以满足大部分冲击温度测试的需求。

2 瞬态多波长光学高温计工作原理

瞬态多波长光学高温计是以普朗克热辐射理论为基础,将待测光源的辐亮度与标准光源的辐亮度在多个波长下进行比较,从而获得待测光源温度的一种光学系统。光学高温计工作时,每个工作通道输出的电信号幅度 V_i 与该通道的光谱辐亮度 I_i 应具有良好的线性关系:

$$I_i(\lambda_i, T) = V_i / k_i, \quad (1)$$

式中: k_i 是波长为 λ_i 的通道的线性常数,经标定得到。

计算温度时,利用式(1)计算出各个通道的光谱辐亮度,再利用最小二乘法将各通道亮度用普朗克公式拟合,就可得到待测光源的温度。

对于发射率为 ε 的灰体光源,其辐亮度为

$$I(\lambda, T) = \varepsilon L(\lambda, T), \quad (2)$$

其中 $L(\lambda, T)$ 为温度 T 的绝对黑体辐射亮度,可由普朗克公式给出:

$$L(\lambda, T) = (C_1 / \pi) \lambda^{-5} [e^{C_2 / \lambda T} - 1]^{-1}, \quad (3)$$

式中: C_1 和 C_2 分别为第一与第二辐射常数, $C_1 = 3.7418 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$, $C_2 = 1.4388 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{K}$ 。

对于具有 n 个通道的高温计而言,在实际应用时测量值是 λ_i 和 $I_i(\lambda_i)$, 考虑到实验测量误差 V_i , 则有:

$$V_i = \varepsilon L(\lambda_i, T) - I_i(\lambda_i), \quad (4)$$

$$V^2 = \sum_{i=1}^n [\varepsilon L(\lambda_i, T) - I_i(\lambda_i)]^2. \quad (5)$$

根据最小二乘法原理,就是从式(5)求出满足 V^2

取最小值时的 ε 和 T 。

不难推导出,满足条件的 ε 和 T 可由下式求出:

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon(T) &= \frac{\sum_1^n I_i(\lambda_i, T) L(\lambda_i, T)}{\sum_1^n L^2(\lambda_i, T)} \\ \frac{\sum_1^n I_i(\lambda_i, T) J(\lambda_i, T)}{\sum_1^n L^2(\lambda_i, T)} &= \frac{\sum_1^n I_i(\lambda_i, T) J^2(\lambda_i, T) \lambda_i^4 \exp(\frac{C_2}{\lambda_i T})}{\sum_1^n L^3(\lambda_i, T) \lambda_i^4 \exp(\frac{C_2}{\lambda_i T})} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

在实际应用中,通过式(1)计算出通道实测的辐亮度后代入式(6),可以计算出待测光源的灰体发射率 ε 和温度 T 。

3 工作波长和探测器类型选取

对于温度为 T 的黑体(或灰体),其辐射光谱的峰值波长 λ_m 可根据维恩位移公式(式(7))进行计算:

$$\lambda_m = 2898 / T, \quad (7)$$

可知在 1500 K~10000 K 温度范围内, λ_m 在 0.28 μm ~1.93 μm 之间。

目前较为成熟的窄带滤光片的中心波长最大可达 1.6 μm , 最小达 0.214 μm 。技术成熟且价格便宜的光探测器 Si 和 InGaAs 探测器的光谱响应范围分别覆盖 0.4 μm ~1.1 μm , 0.9 μm ~1.7 μm , 可以满足本套高温计的设计需要。

按上述分析,结合等间隔分布原则并避开采集和传输器件的吸收峰,本台高温计的工作波长选定为 8 个, ch1~ch8 依次为: 0.5 μm , 0.7 μm , 0.9 μm , 1.1 μm , 1.25 μm , 1.35 μm , 1.5 μm , 1.6 μm ; 其中 ch1~ch3 三个通道采用 Si 探测器, ch4~ch8 采用 InGaAs 探测器。

4 工作波长带宽设计

4.1 带宽对线性常数的影响分析

高温计各通道的工作波长及带宽主要由系统中的窄带滤光片决定。假设接收光学系统的透过率曲线为 $r(\lambda)$, 光探测器响应曲线为 $\phi(\lambda)$, 窄带滤光片透过率曲线为 $\phi(\lambda)$, 滤光片底宽为 $\lambda_2 \sim \lambda_1$, 滤光片截止区为 $(\lambda_{\min}, \lambda_{\max})$, 则在光源温度为 T , 发射率为 1 时, 工作波长为 λ_0 的光电通道输出的电信号幅度可由式(8)计算。

$$V_i = [\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r(\lambda) \phi(\lambda) \phi(\lambda) L(\lambda, T) d\lambda + \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_1} Ar(\lambda) \phi(\lambda) L(\lambda, T) d\lambda + \int_{\lambda_2}^{\lambda_{\max}} Ar(\lambda) \phi(\lambda) L(\lambda, T) d\lambda] \cdot S \cdot \Delta\Omega, \quad (8)$$

式中: $\phi(\lambda)$ 一般满足类高斯分布曲线, 可由式(9)近似

给出; A 为滤光片背景透过率; S 为探头可接收的光源面积, $\Delta\Omega$ 为探头接收立体角; 式(8)后两项积分为背景光对信号的贡献。

$$\phi(\lambda) = b \cdot \exp\left[\frac{-2(\lambda - \lambda_0)^2}{((\lambda_2 - \lambda_1)/3)^2}\right], \quad (9)$$

式中: b 为滤光片的峰值通过率, 该式是通过分析拟合大量的滤光片透过率曲线得到的, 对于窄带滤光片的拟合度在 90% 以上。

标定 k_i 时, 标准光源输入到该通道的光谱辐亮度是按式(10)计算的。

$$L_i = \varepsilon_0 L(\lambda_0, T), \quad (10)$$

式中: ε_0 为标准光源的光谱发射率, 对于黑体炉而言, 该值约等于 1。

用式(8)除以式(10)并结合式(1)可得:

$$k_i = \frac{(V_s + V_{b1} + V_{b2}) \cdot S \cdot \Delta\Omega}{\varepsilon_0 L(\lambda_0, T)}, \quad (11)$$

式中: $V_s = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r(\lambda)\phi(\lambda)L(\lambda, T)d\lambda$,

$$V_{b1} = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_1} Ar(\lambda)\phi(\lambda)L(\lambda, T)d\lambda,$$

$$V_{b2} = \int_{\lambda_2}^{\lambda_{\max}} Ar(\lambda)\phi(\lambda)L(\lambda, T)d\lambda.$$

由式(11)可知, 多波长高温计各通道的线性常数 k_i 是温度的函数, 其值与各通道工作波长的带宽、峰值透过率和背景透过率有关。根据文献[13]的讨论结果, 滤光片背景透过率越低、峰值透过率越高, 通道线性越好。目前成熟的滤光片产品背景透过率可达 0.01%, 峰值透过率一般都大于 80%, 均满足设计要求。

4.2 各通道最佳带宽计算

在式(11)中, 相对于 $\phi(\lambda)$, $r(\lambda)$ 和 $\phi(\lambda)$ 属于慢变函数,

且高温计所使用的滤光片通带一般很窄(小于 100 nm), 因此, 为了突出 $\phi(\lambda)$ 的影响且简化计算, 设计时可将 $r(\lambda)$ 、 $\phi(\lambda)$ 、 $\Delta\Omega$ 、 b 、 s 和 ε_0 的数值均取为 1, $A=0.01\%$ 。根据 Si 和 InGaAs 探测器的光谱响应范围, 设定 ch1~ch3 的截至区为 0.3 μm ~1.2 μm , ch4~ch8 的截至区为 0.8 μm ~1.8 μm 。

在上述参数选定之后, 利用式(11)可以计算出在给定的通带半宽下各通道线性常数 k 随温度的变化情况。计算温度范围为 1500 K ~ 10000 K, 每间隔 50 K 计算一个点。设 k_{\max} 为在每个通道计算过程中获得 k 的最大值, k_{\min} 为最小值, k_{ave} 为平均值, $dk = (k_{\max} - k_{\min}) / k_{\text{ave}}$ 。计算中发现, 0.5 μm 和 0.7 μm 波长通道(ch1、ch2)在 1500 K ~ 10000 K 温度范围内即使选取最佳通带半宽值通道线性常数仍然变化很大, 达几千倍。通过计算确定 0.5 μm 和 0.7 μm 波长通道适用温度范围为 3000 K ~ 10000 K。据此, 设定 ch1 ~ ch6 的测温范围 3000 K ~ 10000 K, ch3 ~ ch8 通道的测温范围为 1500 K ~ 3000 K。

图 1(a)给出了 ch3 ~ ch8 通道在 1500 K ~ 3000 K 温度范围内线性常数变化率随工作波长带宽的变化曲线; 图 1(b)给出了 ch1 ~ ch6 通道在 3000 K ~ 10000 K 温度范围内线性常数变化率随工作波长带宽的变化曲线。由图 1 可知, 各通道均存在一个最优的工作波长带宽可使通道的线性在设定的测温范围内最佳, 将线性常数的变化量限制在 2% 以内, 这对于利用标定数据进行外推高温测量十分重要。综合图 1(a)和图 1(b)选定的工作波长带宽列于表 1 中。与文献[2]相比, 本文设计的高温计测温上限由 9000 K 提高为 10000 K 而最短工作波长却由 0.4 μm 变成了 0.5 μm , 这得益于本文

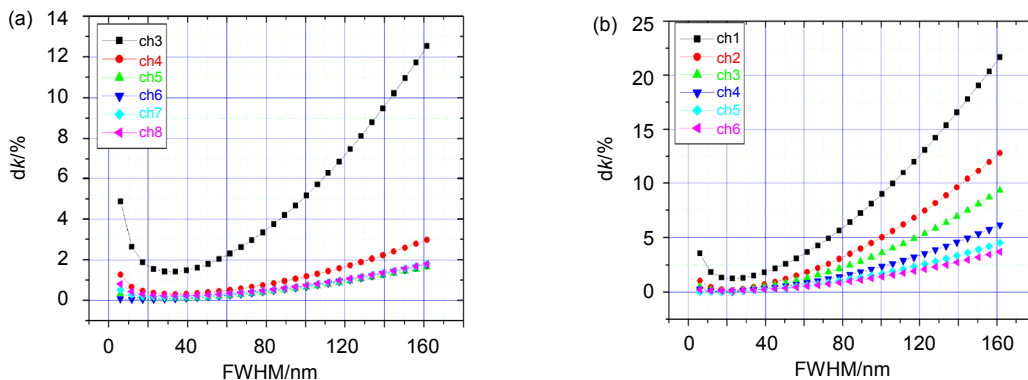


图 1 高温计各通道在设定的温度范围内线性变化量随通带半宽的变化。(a) 温度范围 1500 K~3000 K, ch3~ch8。(b) 温度范围 3000 K~10000 K, ch1~ch6。

Fig. 1 Channel linearity constant's variation dk vs. bandpass (FWHM) in the temperature range of 1500 K~3000 K for ch3~ch8 (a) and in temperature range of 3000 K~10000 K for ch1~ch6 (b).

采用的工作波长带宽的优化选择方法使高温计线性外推的误差减小,外推范围增大。

5 高温计整体结构设计与实现

根据表 1 的参数,设计了如图 2 所示结构的八通道可见-红外光学高温计。光学探头采集的目标辐射光通过光纤传输到白光准直透镜(LL)中,输出的准直光通过由 7 块分光片(BS1~BS7)和 3 片全反射镜(M1~M3)组成分光系统,分为八束带宽较宽的准单色光,每束准单色光通过窄带滤光片(BF)滤波为带宽符合要求的单色光,再通过聚焦镜 L,将单色光耦合入光探测器(D1~D8)中。配备了一套激光瞄准系统,由激光器(Laser)、一分二的光纤和光学探头组成,实验前利用该系统可以将探头精确瞄准待测区域。

表 1 高温计各通道工作波长及带宽和探测器选定结果。
Table 1 Working wavelength and detector type of each channel.

Channel	Working wavelength/nm	FWHM/nm	Photodetector type
ch1	500	20	Si
ch2	700	25	Si
ch3	900	30	Si
ch4	1100	30	InGaAs
ch5	1250	30	InGaAs
ch6	1350	30	InGaAs
ch7	1500	30	InGaAs
ch8	1600	30	InGaAs

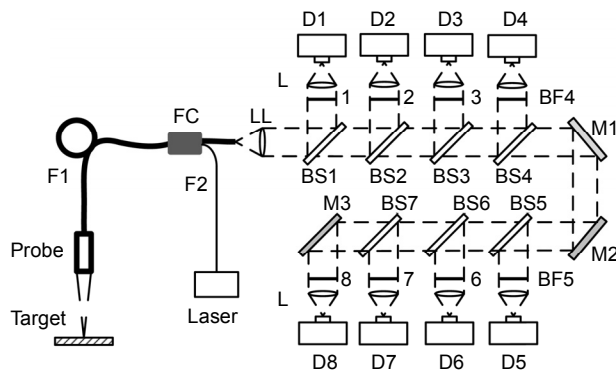


图 2 八通道可见-红外高温计结构示意图。
Fig. 2 Schematics of the eight-wavelength pyrometer.

由图 2 可知,高温计采用白光准直透镜(LL)结合多片长波通短波反射的分光片(BS1~BS7)的级联方式进行分光。分光片(BS1~BS7)的反射谱为 $R(\lambda)$,透射谱为 $T(\lambda)$,反射镜的反射谱为 $M(\lambda)$,则 ch1~ch8 的分光结果可用下式计算。

$$\tau_i(\lambda) = \begin{cases} \prod_{n=0}^{i-1} T_n(\lambda) \cdot R_i(\lambda) & (i = 1, 2, 3, 4; T_0 = 1) \\ \prod_{n=1}^{i-1} T_n(\lambda) \cdot R_i(\lambda) \cdot M^2(\lambda) & (i = 5, 6, 7) \\ \prod_{n=1}^{i-1} T_n(\lambda) \cdot R_i(\lambda) \cdot M^3(\lambda) & (i = 8) \end{cases} \quad (12)$$

分光片叠加后的每路光谱透射率曲线如图 3 所示,图中横坐标为波长,纵坐标为透过率。可以看出,八路分光光谱的峰值透过率都在 65%以上,远大于光纤分光时的 6%。这有利于探测 1500 K~3000 K 的温度范围。

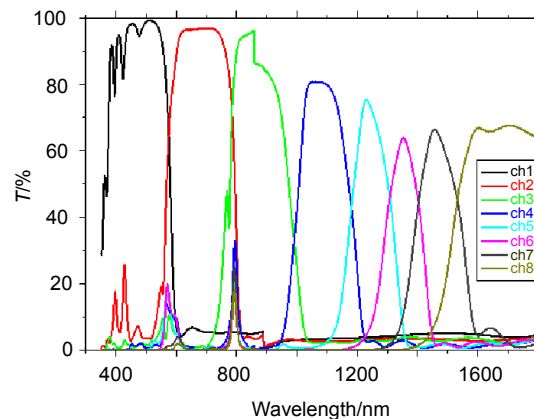


图 3 分光片叠加后的每路的光谱透射率曲线。
Fig. 3 Spectral transmissivity of the eight channels with the dichroic beamsplitters.

图 2 中光学探头的工作距离 1 m,焦点直径为 1 mm,光纤芯径 0.6 mm,数值孔径 0.22。LL 设计的输出光斑直径为 3 mm,准直距离 500 mm,经实际测量,在 5 mm~500 mm 的准直距离上,其实际的光斑直径最大为 3.5 mm,这样窄带滤光片(BF)和聚焦镜(L)的直径只需要略大于 3.5 mm 即可。考虑成本和工程安装的因素,本系统选用了市场上可买到的两款成熟产品。窄带滤光片(BF)的直径选定了常用的 12.5 mm,其峰值波长透过率大于 90%,背景透过率小于 0.01%。聚焦镜(L)的直径为 20 mm,焦距为 18 mm,焦点光斑的直径小于 0.5 mm,18 mm 的焦距使聚焦镜和探测器之间有足够的距离用于安装固定底座。Si 探测器的带宽为 50 MHz,InGaAs 探测器的带宽为 150 MHz,输出阻抗都为 50 Ω ,有效感光面直径都为 0.5 mm。

6 标定

利用高温黑体炉作为光源、标准光电高温计作为标准器,完成了本套高温计标定,获得了每个工作通道的线性常数 $k(\lambda)$ 。图 4 给出了标定框图。标定时将

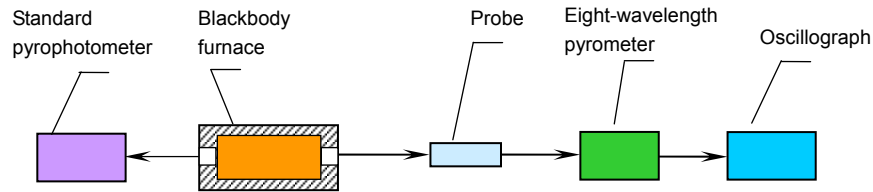


图4 高温计标定框图。

Fig. 4 Schematics of calibration experiment for eight-wavelength pyrometer.

采光探头、传光光纤与高温计主体一同标定。所用黑体炉为卧式石墨炉，其最高温度可达 3000 °C，发射率 0.996；标准光电高温计为中国计量院生产的 RT9032 型光电高温计，测温范围为 800 °C~3200 °C。采用了多点标定的方法：在黑体可调的温度范围内选取多个温度点，测出高温计各通道在对应温度点的信号幅度值，再采用最小二乘法将各温度点的标定结果拟合^[2]。在 1500 K~3000 K 温度范围内等间隔选取了 10 个温度点对 ch3~ch8 六个通道进行了标定，在 3000 K~3200 K 温度范围内等间隔选取了 10 个温度点对 ch1~ch6 六个通道进行了标定。标定结果分别用于 1500 K~3000 K 温度范围和 3000 K~10000 K 温度范围的测量。

7 结 论

设计研制了一套测温范围 1500 K~10000 K 的用于样品冲击温度测量八通道瞬态光学高温计，通过优化计算选取了最佳的工作波长和带宽，采用带放大的半导体探测器作为线性光电转换元件，波长范围覆盖可见光到近红外，可满足不同类型冲击实验的测量需求。系统分光模块采用长距离准直透镜配合多片高通低反分光片的模式，效率更高。分段的多点标定方法可使高温计具有更好的线性外推性能。

基金项目

中国工程物理研究院科学技术发展基金(2015B0403081, 2015B0401079, 2015B0401080)；国家自然科学基金(11272298)资助。

参考文献

- 1 Tan Hua. Introduction to experimental shock-wave physics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 67-77.
谭华. 实验冲击波物理导引[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 67-77.
- 2 Wang Guichao, Yu Quanyou, Tan Xianxiang, et al. Six channel instantaneous optical pyrometer[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1996, **23**(S1): 46-49.

- 王贵朝, 余泉有, 谭显祥, 等. 六通道瞬态光学高温计[J]. *光电工程*, 1996, **23**(S1): 46-49.
- 3 McGrane S D, Barber J, Quenneville J. Anharmonic vibrational properties of explosives from temperature-dependent Raman[J]. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2005, **109**(44): 9919-9927.
- 4 Yuan V W, Bowman J D, Funk D J, et al. Shock temperature measurement using neutron resonance spectroscopy[J]. *Physical Review Letters*, 2005, **94**(12): 125504.
- 5 La Lone B M, Stevens G D, Turley W D, et al. Release path temperatures of shock-compressed tin from dynamic reflectance and radiance measurements[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, **114**(6): 063506.
- 6 Boboridis K, Seifter A, Obst A W, et al. Radiance temperatures and normal spectral emittances (in the wavelength range of 1500 to 5000 nm) of Tin, Zinc, aluminum, and silver at their melting points by a pulse-heating technique[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2004, **25**(4): 1187-1202.
- 7 Xu Baochang, Zhang Dingyuan. An improved colorimetric temperature measurement method[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, **38**(4): 1-6.
徐宝昌, 张丁元. 一种改进的比色测温方法研究[J]. *光电工程*, 2011, **38**(4): 1-6.
- 8 Wang Rongbo, Zhu Jun, Zhou Weijun, et al. Temperature measurement of Ta, Al and Cu target stricken by strong electron beam[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, **26**(2): 024001.
王荣波, 朱隽, 周维军, 等. 强流电子束加载下 Ta, Al, Cu 的温度测量[J]. *强激光与粒子束*, 2014, **26**(2): 024001.
- 9 Ni P A, Kulish M I, Mintsev V, et al. Temperature measurement of warm-dense-matter generated by intense heavy-ion beams[J]. *Laser and Particle Beams*, 2008, **26**(4): 583-589.
- 10 Ni P, Hoffmann D H H, Kulish M, et al. Pyrometric system for temperature measurements of HED matter generated by intense heavy ion beams[J]. *Journal de Physique IV*, 2006, **133**(1): 977-980.
- 11 Partouche-Sebban D, Pélissier J L, Abeyta F G, et al. Measurement of the shock-heated melt curve of lead using pyrometry and reflectometry[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, **97**(4): 043521.
- 12 Bordzilovskii S A, Karakhanov S M, Bordzilovskii D S. Using an optical pyrometer for temperature measurements of shock-compressed polytetrafluoroethylene[J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2010, **46**(1): 81-88.
- 13 Wang Rongbo, Li Zeren. The influence of filter on channel linearity of instantaneous optical pyrometer[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2009, **23**(2): 150-154.
王荣波, 李泽仁. 滤光片对瞬态光学高温计通道线性的影响[J]. *高压物理学报*, 2009, **23**(2): 150-154.