

文章编号: 1001-1455(2009)06-0625-07

用于冲击波温度测量的宽动态线性光学高温计*

李加波, 周显明, 王翔

(中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室, 四川 绵阳 621900)

摘要: 采用直线聚焦型光电倍增管(PMT), 研制了用于冲击波温度测量的 8 通道辐射高温计。改进后的 PMT 分压器电路使系统各通道脉冲输出线性均大于 8 mA(-800 V 高压), 饱和光强域值达到约 100 μ W 量级, 响应时间(上升沿)小于 3 ns。该系统对光谱辐亮度值的相对测量不确定度为约 3%, 已成功用于测量 50 kK 以内的高温辐射历史和冲击波温度。

关键词: 爆炸力学; 冲击波温度; 光电倍增管; 高温计; 动态线性

中图分类号: O347.5

国标学科代码: 130·35

文献标志码: A

1 引言

冲击波温度测量是构建材料完全物态方程的重要基础, 也是目前冲击波实验研究中尚未完全解决的一个难题^[1-5]。瞬态辐射高温计是测量冲击波温度的主要工具^[6-12], 它还可用于测量物质在冲击压缩下的声速和发光特性、炸药的爆轰波温度和化学反应区等特性, 被广泛应用于武器物理、高压科学和地球行星科学的实验研究中。

辐射高温计的工作原理是 Planck 辐射谱理论, 需要确定光谱辐亮度随波长的变化关系, 属绝对定标测量。而用标准灯对光纤高温计各通道进行直接照射标定时, 探测器接收到的光强比动态实验时的光强要低 3~6 个数量级。另外, 由于冲击波温度的理论计算还有较大的不确定度(主要问题是计算中要用到的高温高压下的 Gruneisen 系数和比定容热容 2 个参数目前还无法准确确定), 导致实验前对样品冲击波温度和辐射亮度的预估不准。用于冲击波温度测量的高温计需具备较宽的动态线性范围, 才能保证所测量到的信号波形不会出现失真。因此, 动态线性范围大小将是衡量瞬态辐射高温计性能高低的一项重要技术指标。

但一般的辐射高温计动态线性都较窄, 如文献[7]为了获得更快的时间响应特性采用了所谓的 Beck 分压器电路^[13], 仅使用了前 5 个倍增级, 这样设计的工作电路产生的一个问题就是增益低、动态线性范围较窄。针对上述问题, 本文中拟对 PMT 分压器电路进行特殊设计, 研制一台宽动态线性范围 8 通道光纤光学高温计, 介绍系统设计、标定方法和应用实例。

2 系统设计

图 1 为冲击波温度测量实验示意图, 由靶装置、高温计系统和高速示波器记录系统组成。高温计系统由传输光纤、高温计主体、高压电源和标定系统组成, 高温计主体由窄带干涉滤光片、PMT 光电转换系统和机箱组成。其中光纤、滤光片和倍增管三者一一对应组成一个测量通道, 实验时可根据需要选择使用 6~7 个测量通道, 最多可达到 8 个。

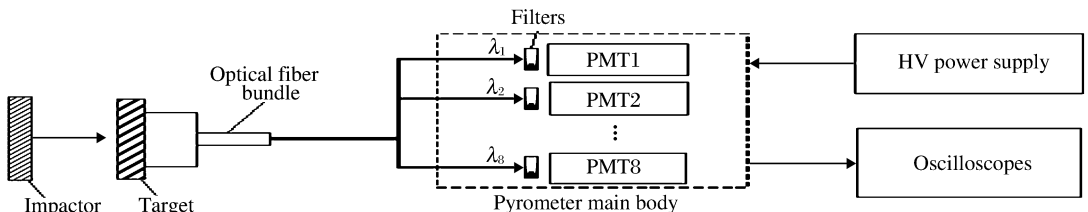


图 1 冲击波温度测量实验示意图

Fig. 1 A schematic layout of the pyrometric temperature measurement system

* 收稿日期: 2008-07-08; 修回日期: 2008-11-17

作者简介: 李加波(1978—), 男, 助理研究员。

传输光纤采用了南京玻纤院春辉公司提供的纯石英光纤,芯径 62.5~200 μm ,数值孔径 0.22~0.37,长度 10~15 m,图 2 为单位长度的透射谱曲线。可见在 200~1 000 nm 波长范围,该光纤每米透过率 β 均大于 87%。

滤光片采用了窄带干涉滤光片(Andover 公司产品),图 3 为其中 10 片的实测相对透射谱曲线,中心波长覆盖 240~800 nm,半波宽(HFWM)14~47 nm,旁侧抑制率小于 0.01%(100~2 000 nm),实验测量时可根据被测温度高低选择使用其中的 6~8 片。

光电转换系统是高温计的核心部分,采用 52 mm 口径的直线聚焦型 PMT。为获得宽动态线性范围,在确保高速时间响应特性不下降的前提下,采用楔形分压器结构设计了大脉冲电流输出电路,参见图 4。后几级的极间电场强度较高,可减小小由于电子流密度的增大而出现的空间电荷效应,总电阻值约 1 M Ω 。在每级上都接去耦电容,以抑制电压下降引起信号畸变而改善脉冲线性。在负高压与地之间接入一去耦电容。

采用高亮度 LED 脉冲光源动态线性检测技术,对各通道的动态线性进行了检测,图 5 为典型测量结果。测量时,采用了 2 种光源,波长分别为 457、660 nm;工作电压则分别取 -0.8、-1.0、-1.2 和 -1.4 kV 等 4 个不同高压值。在图中

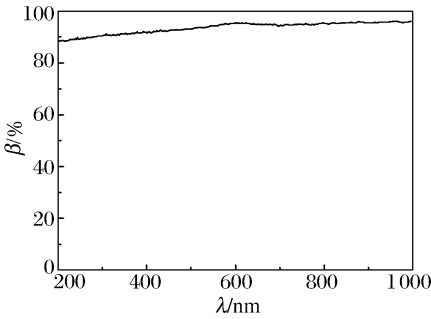


图 2 光纤每米透射谱曲线

Fig. 2 Transmission spectrum of an optical fiber (per meter)

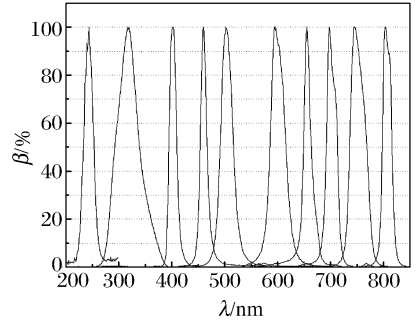


图 3 滤光片相对透射谱曲线

Fig. 3 Relative transmission spectra of the filters

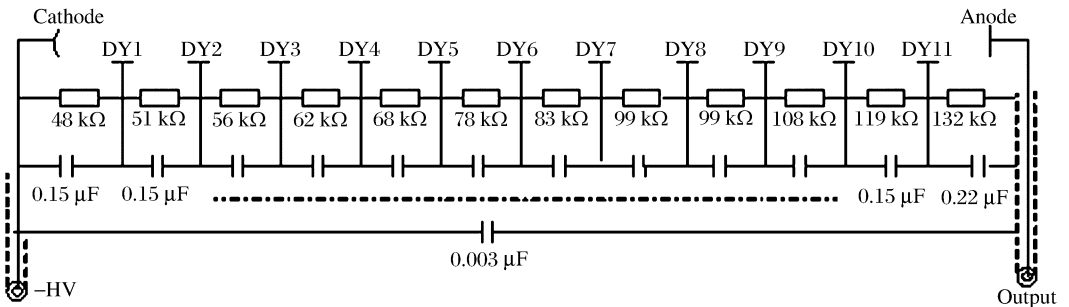


图 4 PMT 楔形分压器电路

Fig. 4 A wedged PMT voltage divider circuit

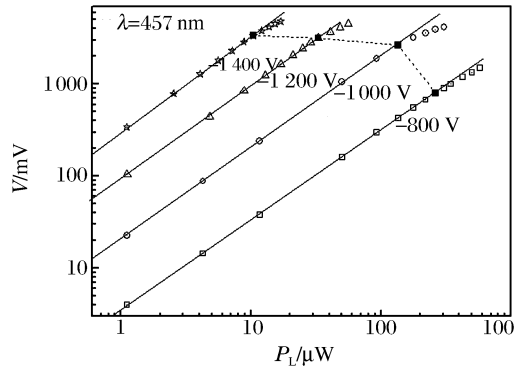
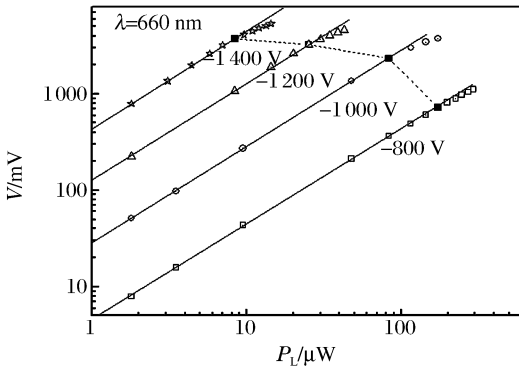


图 5 典型脉冲线性测试结果(通道 CH5)

Fig. 5 Pulse linearity data for CH5

用实心方块和虚线标识出临界饱和点所在位置,8 个通道的测量结果则汇总于表 1 中。由此可见,在-0.8 kV 高压下,对 457、660 nm 光脉冲,输出线性(电压)分别为 720、792 mV,临界饱和光功率值分别达到 173、263 μ W;而在-1.4 kV 高压下,最大线性输出分别为 3 720、3 360 mV,阳极灵敏度分别为 443、323 kV/W。而按照文献[7]中使用的 PMT 和分压器类型,检测得到的 457 nm 光脉冲临界饱和和光强约为 3 μ W,阳极灵敏度为约 168 kV/W。相比之下,本文系统的这 2 项指标均有显著提高。

用 532 nm 波长皮秒激光脉冲(66 ps)对高温计系统各通道的响应时间进行了检测,图 6 为实测典型波形,可见响应时间(上升沿)小于 3 ns,能够满足轻气炮和化爆加载实验(上升沿一般约 20 ns)中辐射历史和冲击波温度测量的时间分辨要求。

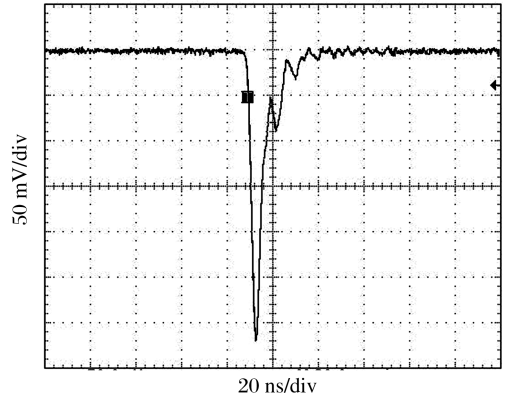


图 6 脉冲响应时间特性测量典型结果

Fig. 6 A typical waveform for rise time measurement

表 1 不同工作电压下各通道动态线性汇总

Table 1 Summary of pulse linearity for all channels under different working voltage mV

通道	$\lambda = 660 \text{ nm}$				$\lambda = 457 \text{ nm}$			
	-0.8 kV	-1.0 kV	-1.2 kV	-1.4 kV	-0.8 kV	-1.0 kV	-1.2 kV	-1.4 kV
CH1	452	1 700	2 540	3 180	412	1 668	3 020	3 440
CH2	580	2 000	3 080	4 440	448	2 140	3 720	3 840
CH3	444	2 120	3 460	4 200	540	2 060	3 600	4 180
CH4	760	2 520	2 880	3 320	580	2 520	3 720	3 880
CH5	792	2 640	3 160	3 360	720	2 340	3 250	3 720
CH6	464	1 440	3 420	3 560	524	2 420	3 380	3 520
CH7	488	1 352	2 500	2 720	496	2 280	2 860	3 140
CH8	912	2 320	2 960	3 260	888	2 820	3 140	3 680

3 标定方法

由于辐射高温计属绝对定标测量,需要通过标定将实测各通道电压幅度转变成各个测量波长处的光谱辐亮度值后,才能按照普朗克辐射公式(灰体模型)拟合冲击波温度和发射率。标定系统的精度关系到整个高温计系统的测试精度。文献[7]采用二级传递标准钨灯和球面镜成像方法进行标定,但我们在实践中发现,将光源会聚成像到光纤端面后,会由于加热作用带来较大的温升效应,造成光纤耦合因子变化从而带来较大的标定误差。

针对上述问题,我们改进发展了溴钨灯(二级传递标准)直接照射标定技术,同时将标定距离由文献报道的 500 mm 缩短至 100 mm,以增加入纤光功率。图 7 为标定系统布局示意图,由高速斩波器可给出约 100 μ s 宽的脉冲信号波形,典型标定波形见图 8。图 9 为在中国测试技术研究院检定给出的溴钨标准灯光谱辐照度曲线。

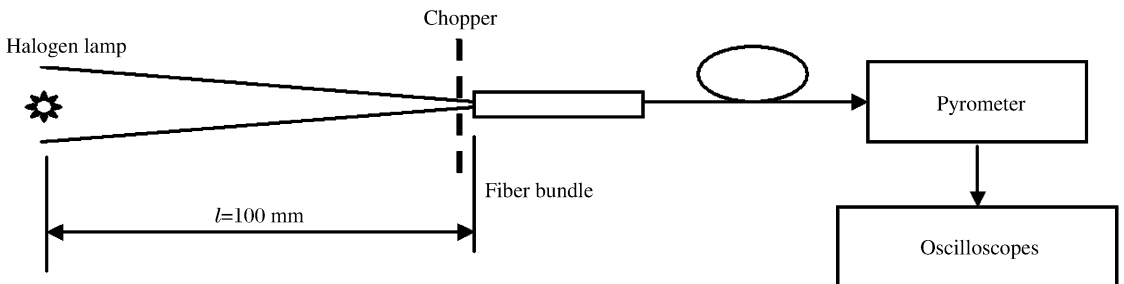


图 7 高温计系统标定示意图

Fig. 7 A schematic layout for calibration of the pyrometer system

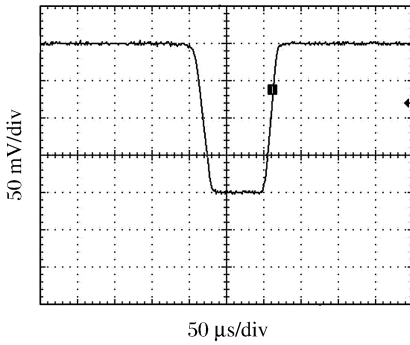


图8 典型标定波形

Fig. 8 A typical calibration waveform

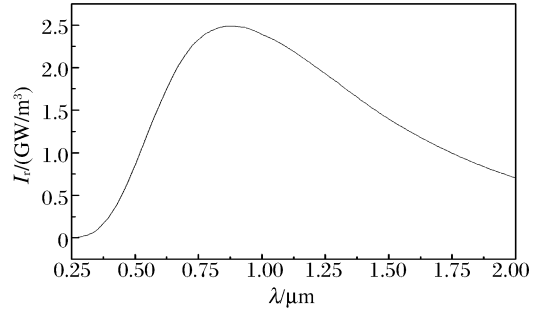


图9 溴钨标准灯光谱辐照度曲线

Fig. 9 Spectral irradiance curve of a tungsten halogen standard lamp

上述标定方法为辐照度标定,实际上在冲击样品表面发光满足朗伯源特性(即余弦辐射体,自然界中大多数金属高温辐射均属此类)的前提下,可以将上述光纤多通道光学高温计测定的光谱辐照度 I_r 数据转换成光谱辐亮度 I_{pl} 数据,通过简单的几何关系,不难导出二者间的关系为

$$I_r = \pi \sin^2 \theta I_{pl} \quad (1)$$

式中: θ 为光纤接收角。

4 测量不确定度分析

根据 Planck 黑体辐射理论,在灰体模型假设下温度为 T 的辐射源在波长 λ 处的光谱辐亮度由下式给出

$$I_{pl}(\lambda, T) = \epsilon C_1 \lambda^{-5} (e^{C_2/\lambda T} - 1)^{-1} \quad (2)$$

式中: ϵ 为平均发射率, $C_1 = 1.919 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2/\text{sr}$ 和 $C_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 分别为第 1 和第 2 辐射系数。采用比较法测量的光谱辐亮度则由下式计算

$$I_{\text{exp}}(\lambda_i) = \frac{I_r(\lambda_i)}{\pi \sin^2 \theta} \frac{1}{\beta} \frac{R_C}{R_L} \frac{V_L}{V_C} \quad (3)$$

式中: λ_i ($i=1, 2, \dots, n$, n 为高温计通道数) 为高温计各通道的中心波长, $\sin \theta$ 为光纤的数值孔径(一般为 $0.22 \sim 0.37$), $I_r(\lambda_i)$ 为标准灯的光谱辐照度(见图 9), R_C 和 R_L 分别为标定电阻和动态负载电阻, V_C 和 V_L 分别为标定电压和动态实测电压, β 为衰减片的透过率。得到光谱辐亮度实验值后,可用式(2)拟合得到 T 和 ϵ 及其标准偏差 σ , 后者反映了冲击波温度测量的 B 类不确定度。

由(3)式确定的 $I_{\text{exp}}(\lambda)$ 测量不确定度为

$$u_C[I_{\text{exp}}(\lambda)] = \sqrt{u^2(R_L) + u^2(R_C) + u^2(V_C) + u^2(V_L) + u^2(I_r(\lambda)) + u^2(\beta)} \quad (4)$$

式中: u 表示各测定量的相对测量不确定度, 根据实际测量的情况, $u(R_C)$ 和 $u(R_L)$ 约为 0.01% ; $u(V_C)$ 和 $u(V_L)$ 分别约为 2% 和 1% , I_r 在 $400 \sim 800 \text{ nm}$ 光谱范围的 $u(I_r(\lambda))$ 为 $1\% \sim 2\%$, 取极大值 2% , $u(\beta)$ 约为 1% 。代入(4)式后得到光谱辐亮度的相对测量不确定度约为 3% 。由此不难得到温度测量不确定度^[10,12,14]

$$u(T) = u_C[I_{\text{exp}}(\lambda)] \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{I_{pl}(\lambda_i, T)}{\partial I_{pl}(\lambda_i, T)/\partial T} \right]^2}{n}} \quad (5)$$

以 $3, 10, 50 \text{ kK}$ 的温度为例, 由上式计算的温度测量相对不确定度分别为 0.4% 、 1.1% 、 2.4% 。可见, 温度测量的 A 类不确定度是随温度的增加而增加的, 在 50 kK 范围内不超过 2.4% 。

将 A 类和 B 类不确定度进行综合评价后, 得到温度和发射率的测量不确定度为

$$u(T) = \sqrt{\sigma^2 + u_C[I_{\text{exp}}(\lambda)]^2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{I_{\text{exp}}(\lambda_i)}{\partial I_{pl}(\lambda_i, T)/\partial T} \right]^2}{n}} \quad (6)$$

$$u(\epsilon) = \sqrt{\sigma^2 + u_C[I_{\text{exp}}(\lambda)]^2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{I_{\text{exp}}(\lambda_i)}{\partial I_{pl}(\lambda_i, T)/\partial \epsilon} \right]^2}{n}} \quad (7)$$

5 应用实例

多通道光学高温计已在多个冲击波温度测量相关课题^[14-22]研究中获得实际应用,图 10~图 12 为其中 2 次实验的典型实测波形及其拟合情况。图 10(a)为 0.8 MPa 氙气冲击到 3.8 GPa 时高温计输出的高温辐射历史实测波形(高温计 600 nm 通道波形),7 个通道平台幅度的拟合情况见图 10(b),其中拟合温度为 $(50\ 447 \pm 4\ 820)$ K,发射率为 0.315 ± 0.043 ,与热力学理论预估计算 49 kK 相差小于 3%。图 11 是 H₂/He 混合气体多次冲击压缩的实测波形(高温计 500 nm 通道波形),图中 A 点为冲击波从基板进入混合气体样品时刻,之后的平台为第 1 次压缩过程;B 点为冲击波到达样品/窗口界面时刻,反射冲击波对样品进行第 2 次冲击压缩产生较高的温升,使得观测到的信号幅度有较大的跳跃,之后观测到第 2 个平台;C 点为第 2 次冲击波从基板反射回来对样品进行第 3 次压缩后再次到达窗口的时刻,之后的幅度跳跃则为窗口反射波对样品进行第 4 次压缩的结果;D 点之后的信号幅度衰减则为蓝宝石窗口冲击压缩层和与样品接触的高温薄层的光学吸收。从上述波形可清楚地分辨出各次冲击作用的特征时间,由此易判读出冲击波走时,从而计算出各次冲击压缩的冲击波速度、粒子速度及冲击压力等状态参量,其中第 1 次冲击压力为 1.44 GPa,第 2 次冲击压力为 8.8 GPa;由 2 个“平台”幅度拟合温度的情况见图 12,由此得到第 1 次和第 2 次冲击波温度实测值分别为 $(4\ 386.7 \pm 400)$ K 和 $(7\ 748.1 \pm 1\ 900)$ K,发射率分别为 0.13 ± 0.07 和 0.19 ± 0.16 ,与 Sesame 库参数理论计算温度符合较好。

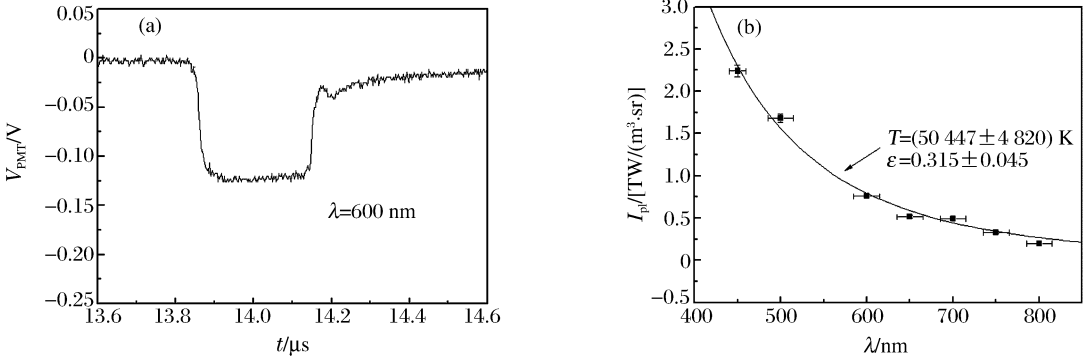


图 10 0.8 MPa 氙气冲击压缩实测波形和冲击波温度拟合结果

Fig. 10 A typical radiance profile emitted by xenon gas shocked from 0.8 MPa to 3.8 GPa and the fitted Planck greybody spectrum with temperature and emissivity

品/窗口界面时刻,反射冲击波对样品进行第 2 次冲击压缩产生较高的温升,使得观测到的信号幅度有较大的跳跃,之后观测到第 2 个平台;C 点为第 2 次冲击波从基板反射回来对样品进行第 3 次压缩后再次到达窗口的时刻,之后的幅度跳跃则为窗口反射波对样品进行第 4 次压缩的结果;D 点之后的信号幅度衰减则为蓝宝石窗口冲击压缩层和与样品接触的高温薄层的光学吸收。从上述波形可清楚地分辨出各次冲击作用的特征时间,由此易判读出冲击波走时,从而计算出各次冲击压缩的冲击波速度、粒子速度及冲击压力等状态参量,其中第 1 次冲击压力为 1.44 GPa,第 2 次冲击压力为 8.8 GPa;由 2 个“平台”幅度拟合温度的情况见图 12,由此得到第 1 次和第 2 次冲击波温度实测值分别为 $(4\ 386.7 \pm 400)$ K 和 $(7\ 748.1 \pm 1\ 900)$ K,发射率分别为 0.13 ± 0.07 和 0.19 ± 0.16 ,与 Sesame 库参数理论计算温度符合较好。

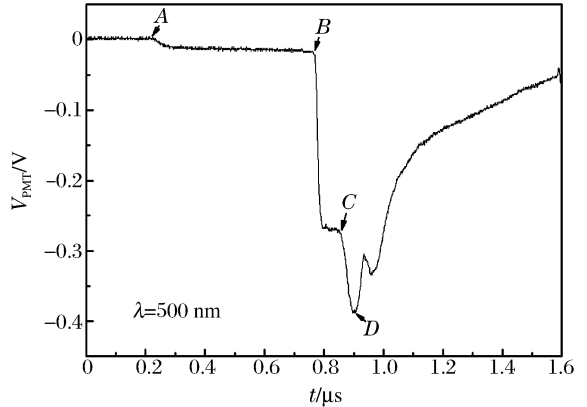


图 11 H₂/He 混合气体多次冲击实测波形

Fig. 11 A multi-compressed waveform measured from a shock experiment of H₂/He mixture

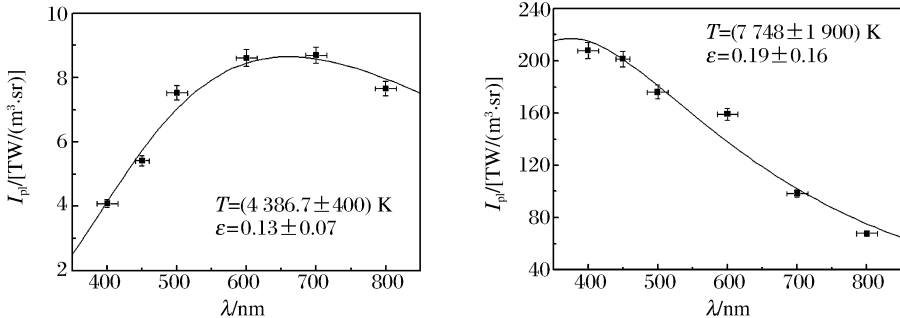


图 12 H₂/He 混合气体第 1 次和第 2 次冲击波温度拟合结果

Fig. 12 A grey-body model fitting for the first- and second-shock compression temperature of the H₂/He mixture

6 结论

采用直线聚焦结构光电倍增管和改进的 PMT 分压器电路,研制了一台宽动态线性范围的光学高温计,8 个通道脉冲线性输出均大于 8 mA (—800V 高压下),饱和光强域值达到约 100 μW 量级,中心波长覆盖 240~800 nm,响应时间(上升沿)小于 3 ns。经初步的实验测量不确定度分析,该系统温度测量的 A 类不确定度随温度的增加而增加,在 50 kK 范围内约为 2.4%。动态实验测量表明该系统可用于 50 kK 以内的冲击波温度测量。

参考文献:

- [1] Williams Q, Jeanloz R, Bass J, et al. The melting curve of iron to 250 gigapascals: A constraint on the temperature at earth's center[J]. *Science*, 1987,236:181-182.
- [2] Yoo C S, Holmes N C, Ross M, et al. Shock temperatures and melting of iron at earth core conditions[J]. *Physical Review Letters*, 1993,80(25):3931-3934.
- [3] Nellis W J, Yoo C S. Issues concerning shock temperature measurements of iron and other metals[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990,95(B13):21749-21752.
- [4] 周显明,经福谦,黄建彬.薄夹层界面热弛豫解及其在冲击温度研究中的意义[J]. *高压物理学报*,1997,11(1):8-12. ZHOU Xian-ming, JING Fu-qian, HUANG Jian-bin. Thermal relaxation at thin-layer interfaces: Its significance to shock temperature study[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1997,11(1):8-12.
- [5] Partouche-Sebban D, Pellissier 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*, 2005,97:043521-1-043521-1-11.
- [6] Radosky H B, Mitchell A C. A fast UV/visible pyrometer for shock temperature measurements to 20 000 K[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1989,60(12):3707-3710.
- [7] Holmes N C. Fiber-coupled optical pyrometer for shock-wave studies[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1995, 66(3):2615-2618.
- [8] 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 增刊:46-49. WANG Gui-chao, YU Quan-you, TAN Xian-xiang, et al. Six channel instantaneous optical pyrometer[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1996,23suppl:46-49.
- [9] Lyzenga G A, Ahrens T J. Multiwavelength optical pyrometer for shock compression experiments[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1979,50(11):1421-1424.
- [10] Boslough M B, Ahrens T J. A sensitive time-resolved radiation pyrometer for shock-temperature measurements above 1 500 K[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1989,60(12):3711-3716.
- [11] Boboridis K, Obst A W. A high-speed four-channel infrared pyrometer[J]. *Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry*, 2003,7:759-763.
- [12] 罗教民.高灵敏度瞬态辐射高温计[J]. *高压物理学报*,1997,11(1):39-45. LUO Jiao-min. A high sensitive transient optic pyrometer[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1997,11(1):39-45.
- [13] Beck G. Operation of a 1P28 photomultiplier with subnanosecond response time[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1976,47(5):537-541.
- [14] 许灿华.铁在冲击压缩下的熔化温度的直接测量[D].绵阳:中国工程物理研究院,2004.
- [15] Li J, Zhou X M, Zhu W J, et al. A shock-induced phase transformation in a LiTaO₃ crystal[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007,102:083503-1-083503-5.
- [16] Tan H, Dai C D, Zhang L Y, et al. Method to determine the melting temperatures of metals under megabar shock pressures[J]. *Applied Physics Letters*, 2005,87:221905-1-221905-3.
- [17] 张凌云,戴诚达,许灿华,等.无氧铜冲击温度的辐射法测量[J]. *高压物理学报*,2005,19(4):365-370. ZHANG Ling-yun, DAI Cheng-da, XU Can-hua, et al. Melting temperatures of OFHC copper under shock compression measured optical radiometry techniques[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2005,19(4):365-370.
- [18] 黄海军.高压下铁的熔化曲线及外地核候选组分的约束性研究[D].绵阳:中国工程物理研究院,2005.

- [19] 冉宪文. 冲击压缩下金属的高压熔化规律相关问题的实验及理论研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006.
- [20] 张颖. 高温高压氢氦混合气体的物态方程研究[M]. 成都: 四川大学, 2006.
- [21] 顾云军. 稠密氢氦混合气体状态方程研究[M]. 成都: 四川大学, 2005.
- [22] 张凌云. 无氧铜冲击熔化特性的实验研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2004.

A fast pyrometer with wide dynamic linearity for shock temperature measurements

LI Jia-bo^{*}, ZHOU Xian-ming, WANG Xiang

(National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics,
Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: By adopting linear-focused photomultiplier tubes (PMT), an eight-channel radiation pyrometer was developed for shock temperature measurements. The dynamic linearity in each channel of the pyrometer, using the developed voltage divider circuit, exceeds 8 mA at the work voltage of -800 V. The saturated light intensity is better than the level of $100 \mu\text{W}$ and the response time is less than 3 ns. The relative uncertainties of spectral radiances, which are measured by the pyrometer, are about 3%. The pyrometer was successfully used to measure the radiance history and shock temperature within 50 kK.

Key words: mechanics of explosion; shock temperature; photomultiplier tube; pyrometer; dynamic linearity

* Corresponding author: LI Jia-bo
Telephone: 86-816-2481051

E-mail address: jiali072@163.com