文章编号：1000-5773(2009)05-0345-08

# 一种新型光纤高温计的研制*

周显明，李加波，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**：基于国产 GDB159/142 光电倍增管(PMT)，采用光纤传输并结合二向色分光原理研制了高速光学高温计系统，测量波长覆盖 340～811 nm，响应时间 2～3 ns，可测量 2 500～15 000 K的冲击温度。脉冲线性检测结果表明，6 个通道的动态线性均大于 200 mV(50 Ω 负载)。给出了溴钨灯光谱辐照度标定方法和动态应用实例。

**关键词**：冲击温度；辐射高温计；分色镜；光电倍增管
**中图分类号**：O521.3 **文献标识码**：A

## 1 引 言

冲击温度测量是继雨贡纽线测量之后材料物态方程研究的又一项重要工作，也是当前冲击波物理研究领域的热点和难点[1-5]。目前，辐射高温计仍然是冲击温度诊断的主要工具[6-13]。此外，它还可以用于测量高压声速、爆轰温度、瞬态光辐射和吸收过程等，因而它也是研究材料高压结构相变和熔化规律[14-16]、炸药爆轰特性[17-20]、透明材料动态光学性质[21]等的有力工具，在武器工程、高压科学、材料科学和地球行星科学等研究领域有较大的应用需求。

已报道的瞬态辐射高温计大致可分为两类：光学成像高温计[6-10]和光纤耦合高温计[11-13]，两者各有利弊。光学成像高温计使用光学透镜系统将被测光源成像到探测器敏感面上，因而各通道对应同一目标源，灵敏度较高，但是对光准直和调焦操作较繁琐，且需安放在靶场附近，因而安全性较差。而光纤耦合高温计使用多根光纤探测和传输信号光，每根光纤对应一个测量通道，用干涉滤波片滤出所需中心波长的准单色光。其特点是系统结构简单、操作容易、可遥测，但存在各通道探测区域不同而增大测温不确定度等问题。若能将两者结合起来，即在光学高温计中引入传输光纤，则可弥补上述不足，起到取长补短的作用。

用于冲击温度测量的辐射高温计需要满足以下要求：能够根据辐亮度标准进行精密标定，从而具备同时测量发射率的能力，并保证信号源的时间依赖关系被正确记录；必须具备跨越 2 500～15 000 K 的宽测温量程，这就意味着高温计具有高灵敏度和宽测量光谱；此外，还需保证系统结构简单、调节容易和搬运方便。由于典型冲击实验为纳秒时间尺度，因而系统必须具备 1～3 ns 的时间分辨能力。我们研制的光纤光学高温计就可满足上述要求。这台六通道光纤光学高温计是基于国产 GDB159/142 光电倍增管(PMT)，采用传输光纤并结合二向色分光技术研制而成的。下面将详细地介绍该高温计的系统结构、性能指标、标定方法和动态测量实例。

## 2 系统设计

整套光纤光学高温计系统由传输光纤、高温计主体和标定系统组成。传输光纤选用中国建材研究

* **收稿日期**：2008-03-12；**修回日期**：2008-07-07
**基金项目**：国家自然科学基金(19602017)
**作者简介**：周显明(1963－)，男，研究员，主要从事冲击波物理研究. E-mail：Xianming_zhou@tom.com

院生产的大芯径纯石英紫外光纤，主要技术指标为：芯径 400～600 μm，长度 10～15 m，数值孔径 0.22，每米透过率光谱见图 1。可以看出，在 300～1 000 nm 波段，该光纤的每米透过率均大于 90%。

高温计的主体结构由 FC 光纤接口、石英透镜(L1)、反光镜(M1)、二向色分光镜(D1～D5)、干涉滤光片(F1～F6)、光电倍增管(PMT1～PMT6)、高压电源、仪器面板和机箱等组成，具体光路如图 2 所示。L1 将光纤出射光聚焦成会聚光束，其成像点位置在 PMT5 的阴极上，中间经由 M1、D1～D5 以及 F1～F6，将不同光谱成分的光束依次投射到各 PMT 阴极上，PMT 的阳极信号则经同轴电缆耦合到面板上的 BNC 接口 CH1～CH6 输出。M1 镀铝全反膜，图 3 为 L1、M1、D1～D5 以及 F1～F6 的反射或透射曲线。6 个通道的中心波长、半高宽值(Δλ)以及从 FC 到 PMT 总的光传输系数列于表 1。

**表 1 各通道的光学性能指标**

**Table 1 Optical parameters for all channels**

| Channel number | Central wavelength /(nm) | Δλ /(nm) | Total light transmittance /(%) |
|---|---|---|---|
| CH1 | 340 | 13 | 28.6 |
| CH2 | 405 | 12 | 16.9 |
| CH3 | 494 | 12 | 18.6 |
| CH4 | 621 | 11 | 11.0 |
| CH5 | 690 | 12 | 13.7 |
| CH6 | 811 | 13 | 24.1 |

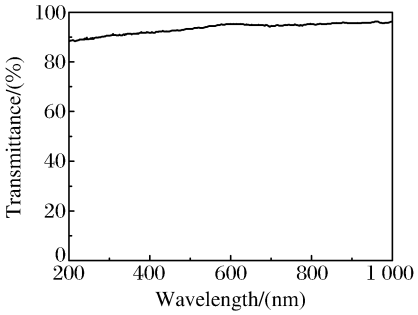



图 1 光纤每米光谱透过率曲线

Fig. 1 Spectral transmittance curve of the optical fiber per meter

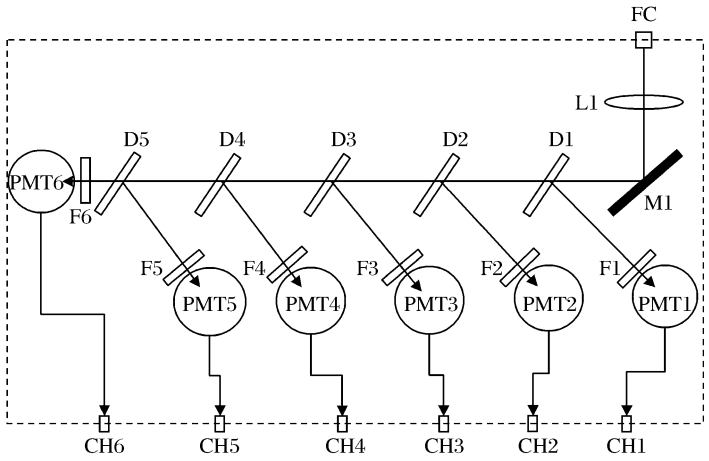
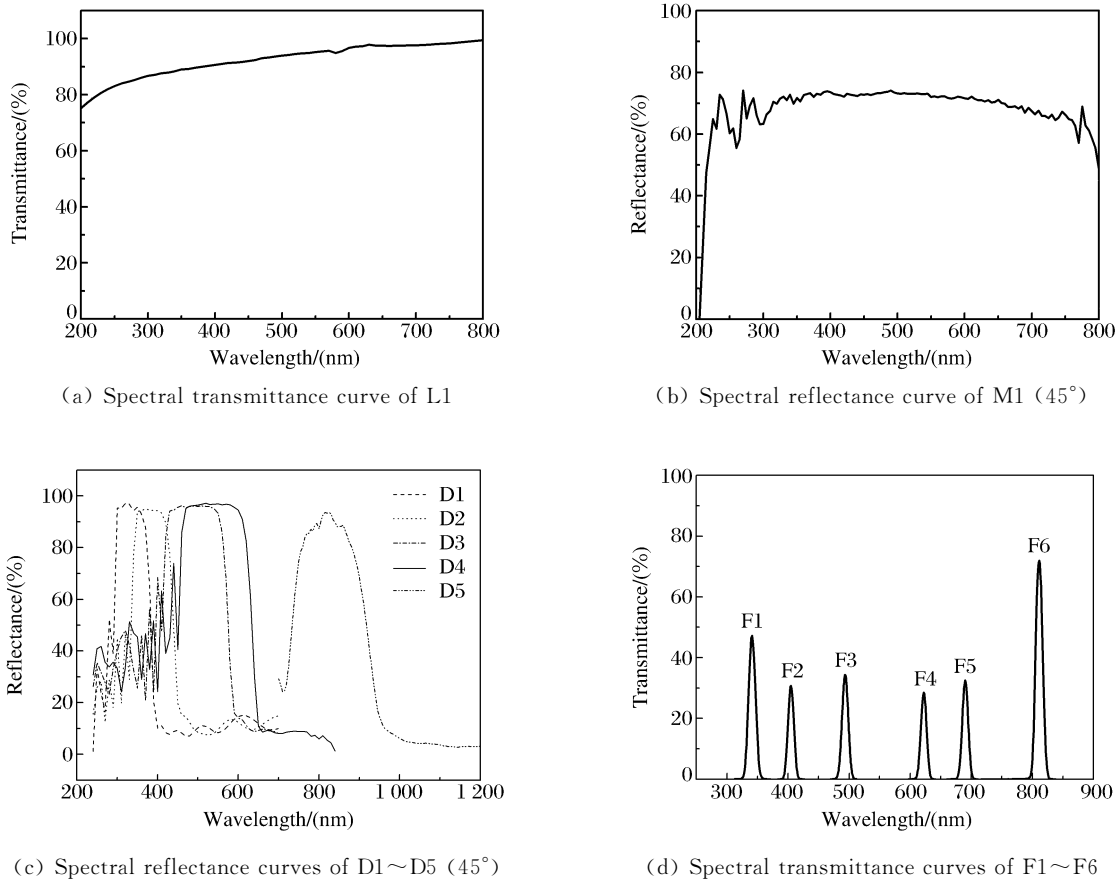



图 2 光纤光学高温计主体结构及光路

Fig. 2 Configuration and optical path of the pyrometer

PMT1～PMT6 为国产环形聚焦型侧窗光电倍增管，具有良好的抗磁干扰特性，其中 PMT1～PMT3 的型号为 GDB142，PMT4～PMT6 的型号为 GDB159。GDB159 可以响应紫外到近红外光，光谱范围为 190～850 nm，图 4 为光阴极灵敏度曲线。GDB142 的光谱范围为 300～650 nm，其暗电流比 GDB159 小，用在紫外和可见光通道上可获得更好的信噪比。

为了增大动态响应的线性范围，采用“楔形”分压电路对每个 PMT 逐一进行优化设计，典型电路见图 5，总电阻约为 220 kΩ。为了克服大电流输出造成的分压比改变，在后三极间串联微法量级的稳压电容器。与之配套，选用中国工程物理研究院流体物理研究所研制的大电流高压电源，其性能指标为：电压可调范围 0～－1 000 V，最大输出电流 4 mA，纹波电压小于 30 mV，长时稳定性 $\Delta V/V \leqslant 0.03\%$。




(a) Spectral transmittance curve of L1　　(b) Spectral reflectance curve of M1 (45°)

(c) Spectral reflectance curves of D1～D5 (45°)　　(d) Spectral transmittance curves of F1～F6

图 3　光学元器件的光谱透射率/反射率曲线

Fig. 3　Spectral transmittance/reflectance curves of the optical components of the pyrometer

采用新建立的 PMT 动态线性检测技术,获得了各通道在不同高压下的动态线性检测结果(见图 6),具体数据列于表 2。从中可以看出,工作电压 $U$ 在－400～－600 V 下,各通道的动态线性电压幅值大于 200 mV(50 Ω 负载),满足动态实验记录的要求(对于 8 位 500 MHz 数字示波器记录设备,信号幅度大于约 20 mV 时即可获得良好的信噪比)。

采用 532 nm 皮秒激光脉冲(脉宽 500 ps)检测高温计系统的时间响应特性,图 7 为典型实测波形。从实测结果看,系统各个通道的响应时间(上升沿)均小于 2 ns。

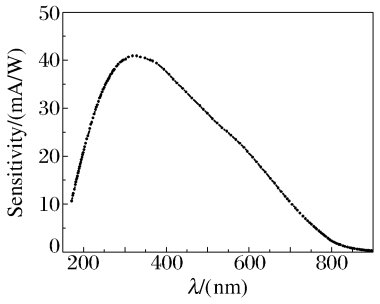



图 4　R50Q 型阴极光谱灵敏度曲线

Fig. 4　Cathode radiant spectral sensitivity for R50Q

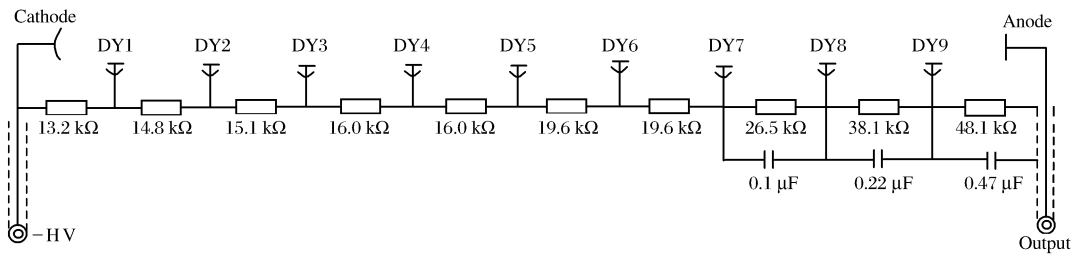
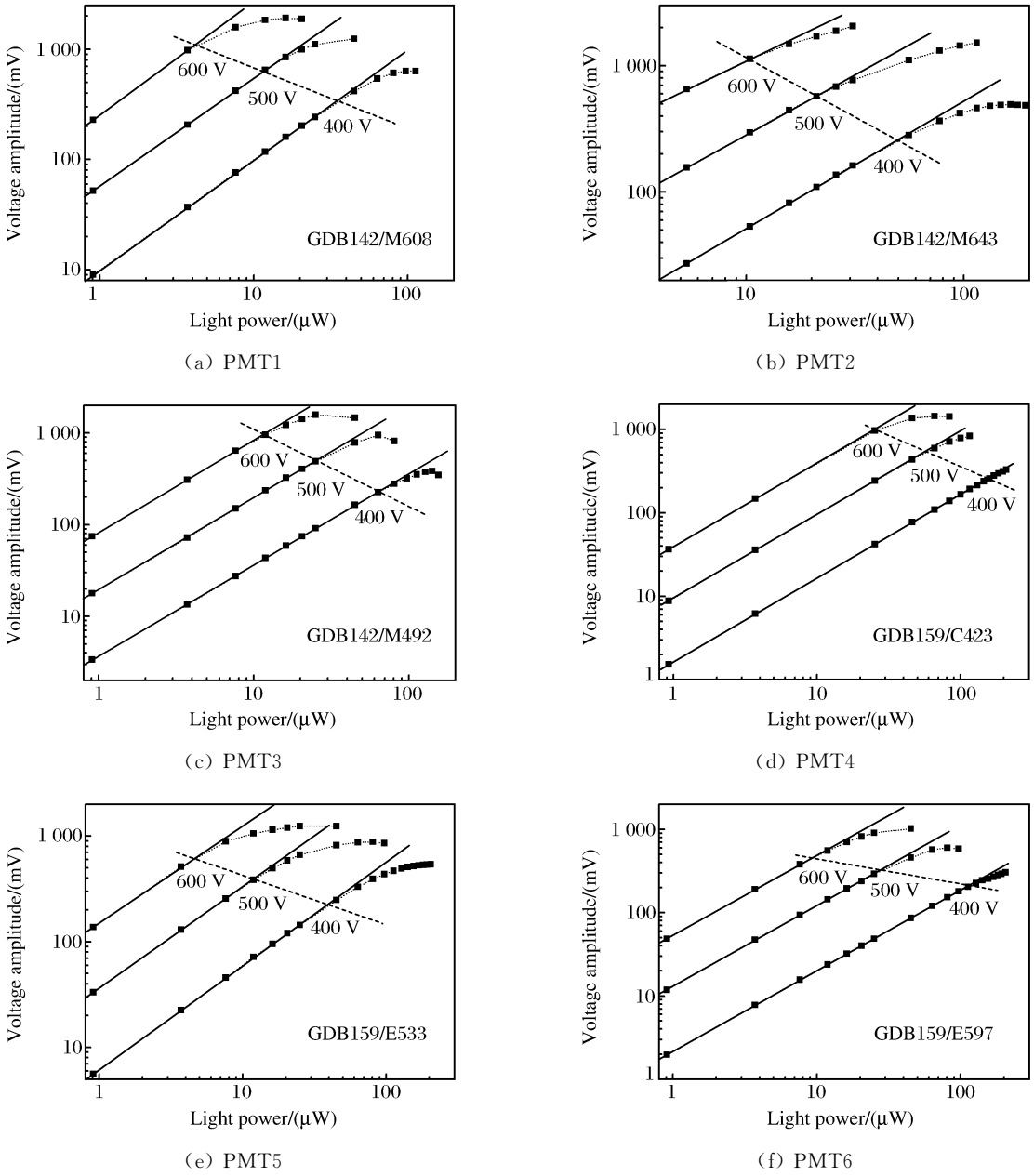



图 5　光电倍增管分压器电路

Fig. 5　The PMT voltage divider circuit




(a) PMT1 (b) PMT2

(c) PMT3 (d) PMT4

(e) PMT5 (f) PMT6

图 6 各通道动态线性测量结果

Fig. 6 Pulse linearity of all channels

**表 2 各通道动态线性汇总**

**Table 2 Summary of pulse linearity for all channels**

| Channel number | PMT type /Serial number | Dynamic linear voltage/(mV) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | $U_1=-400$ V | $U_2=-500$ V | $U_3=-600$ V |
| CH1 | GDB142/M608 | 343 | 626 | 1 083 |
| CH2 | GDB142/M643 | 258 | 576 | 1 119 |
| CH3 | GDB142/M492 | 230 | 497 | 946 |
| CH4 | GDB159/C423 | 255 | 544 | 992 |
| CH5 | GDB159/E533 | 222 | 388 | 606 |
| CH6 | GDB159/E597 | 209 | 320 | 448 |

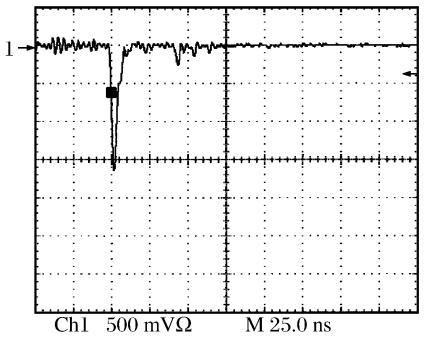



图 7 典型时间响应检测波形

Fig. 7 A typical waveform of time response test

## 3　标定方法

辐射法测温是依据 Planck 黑体辐射定律(灰体模型),属绝对定标测量,需要测定光谱辐亮度随波长的变化关系。因此,必须对辐射高温计进行标定,这样才能将各测量通道记录的电压信号幅值转换为光谱辐亮度值。用高温黑体炉标定辐射高温计可以取得很好的测量精度,但高温黑体炉的建设和运行费用很高,对场地环境的要求比较苛刻,并且标定过程繁琐费时[12]。而采用卤钨标准灯来进行标定则要方便经济得多,是一种十分有效的替代型标定方法。本研究采用后者对光纤光学高温计进行标定。

为了获得足够高的光纤接收光功率,选用由美国进口的大功率溴钨灯(OSRAM,400 W/36 V),并且在满足小角度照射的前提下将标定距离由通常的 500 mm 缩短至 100 mm。图 8 为该灯在中国测试技术研究院检测的光谱辐照度曲线,灯丝工作电流为 10.33 A,色温为 3150 K。图 9 是 100 mm 处的照度空间分布检测结果,在 4 mm×9 mm 的区域内照度变化小于 1%,满足对光纤高温计标定的要求(光纤芯径 0.6 mm)。

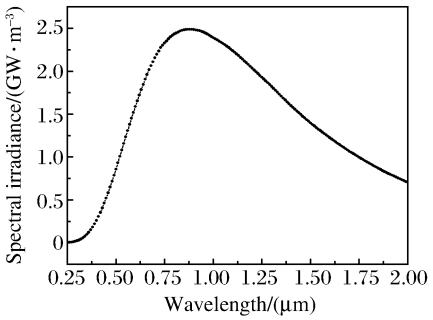



图 8　OSRAM 溴钨标准灯光谱辐照度曲线

Fig. 8　Spectral irradiance curve of a OSRAM halogen standard lamp

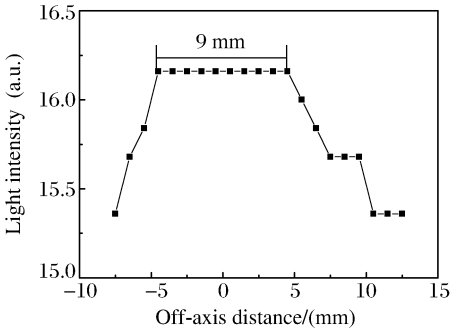



图 9　100 mm 处辐照度空间分布

Fig. 9　Space distribution of irradiance for the standard lamp at 100 mm distance

由于高速高温计中各通道 PMT 工作在脉冲模式,因而需在溴钨标准灯前放置斩波器以获得脉冲光,从而进行正确的标定。斩波器叶片转速通常设置为 60～100 r/s,为获得更大的占空比,用黑纸封住叶片空格,只留出约 3 mm 宽的单孔。图 10 为标定系统工作示意图,图 11 为示波器记录的典型标定波形。此时高温计各通道 PMT 的输出光电流为 1 μA 量级,为了获得较高的标定信号幅度和信噪比,选用高阻负载(12.83 kΩ)。而动态实验时采用 50 Ω 负载,以匹配同轴传输电缆的高频频响特性。在计算被测信号源的辐照度时,需计入标定和测量所用不同负载的阻值,以扣除由此产生的幅度差异。

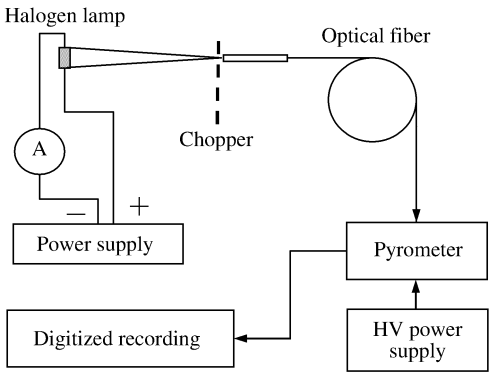



图 10　标定系统示意图

Fig. 10　Schematic of the calibration system

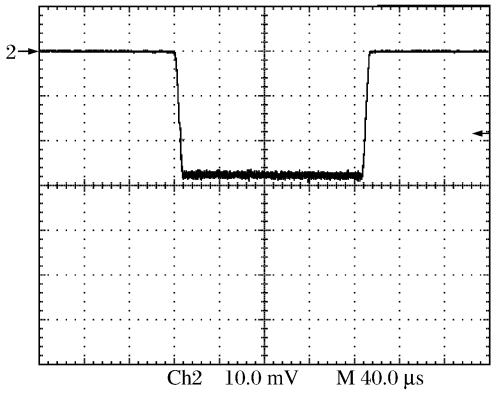
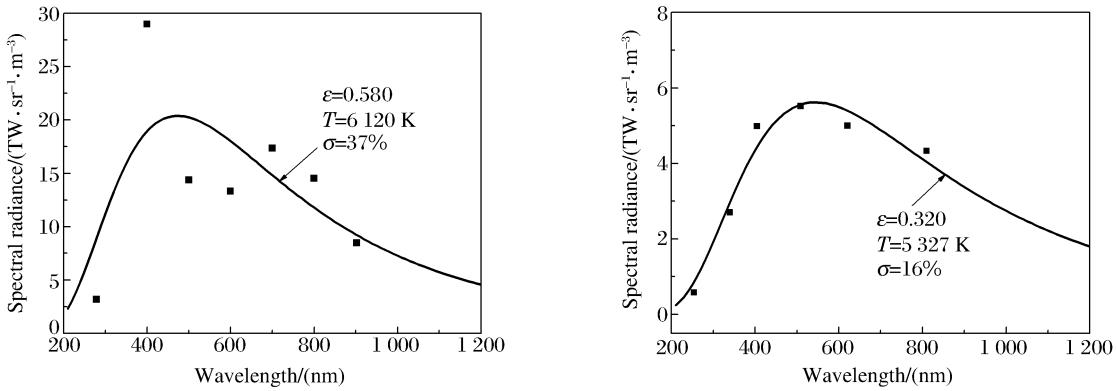



图 11　典型的标定波形

Fig. 11　A typical calibration waveform

## 4 冲击温度测量实例

上述光纤光学高温计系统已在气、液、固等形态物质的冲击温度测量和物态方程研究中获得应用，下面介绍部分应用实例。图 12 为采用两台高温计同时测量 Sn 样品冲击到约 91 GPa 时的实验测量结果和冲击温度拟合结果，其中图 12(a)为传统多光纤高温计测量结果，图 12(b)为单光纤新高温计测量结果。从图中可以看出，新的单光纤高温计系统拟合标准偏差明显小于多光纤高温计系统，拟合温度值 5 327 K 与理论计算值 5 067 K 基本相符(相差 5%)。图 13 为三溴甲烷液体冲击到 60 GPa 时的冲击温度测量结果。其中图 13(a)给出了 340 nm 通道的波形，图中 $A$ 点对应冲击波进入三溴甲烷样品时刻，波形下降沿(约22 ns)为飞片倾斜所致，之后的信号幅度递增为波前方液体层对该波长光吸收所致。$B$ 点对应冲击波到达样品/窗口界面时刻，对应 $B$ 点的 6 个通道数据以及拟合结果见图 13(b)，测量结果与文献[22-23]报道一致。




(a) Seven optical fibers pyrometer (b) Single optical fiber pyrometer

图 12 两种高温计同时测量 Sn 样品冲击温度的结果比较(91 GPa)

Fig. 12 A comparison of Sn shock temperatures simultaneously measured by two pyrometer systems (at 91 GPa)

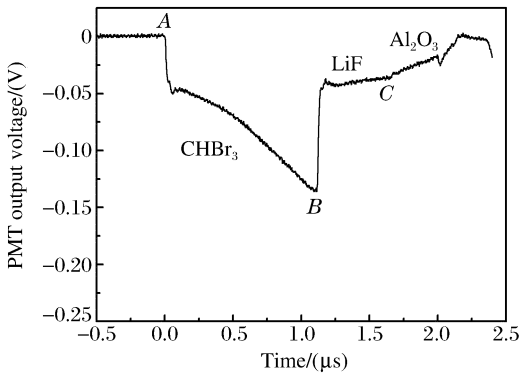



图 13(a) 三溴甲烷冲击实验中 340 nm 通道的波形

Fig. 13(a) PMT waveform at 340 nm in the bromoform shock experiment

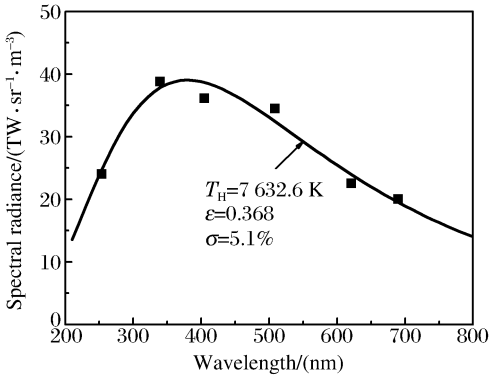



图 13(b) $B$ 点的实验结果和 Plank 公式拟合结果

Fig. 13(b) Experimental results and fitting curve by Plank's formula at point $B$

## 5 结 论

基于国产 GDB159/142 PMT，采用单根大芯径紫外石英传输光纤并结合二向色分光原理研制了六通道光纤光学高温计，较好地解决了以往多通道高温计中多光纤测量带来的分散性问题，实现的主要技术指标包括：测量波长范围 340～800 nm，各通道动态线性范围优于 200 mV(50 Ω 负载)，响应时间(上

升沿)约 2 ns。动态测量实例表明,该系统可用于冲击压缩条件下不同物质的冲击温度和发射率测量。考虑到整套光纤光学高温计系统造价不高,因此该光纤光学高温计是一台性能可靠、经济实用的动态测温诊断系统,具有较高的推广价值。

感谢海通光电公司的杨文龙同志协助完成光谱特性曲线检测,感谢中国工程物理研究院流体物理研究所的王　为、傅秋卫、叶素华、卢　敏、方茂林、陈志云、向耀民、董　石等协助完成了冲击实验。

## References:

[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(4798): 181-182.

[2] Yoo C S, Holmes N C, Ross M, et al. Shock Temperatures and Melting of Iron at Earth Core Conditions [J]. Phys Rev Lett, 1993, 80(25): 3931-3934.

[3] Nellis W J, Yoo C S. Issues Concerning Shock Temperature Measurements of Iron and Other Metals [J]. J Geophys Res, 1990, 95(B13): 21749-21752.

[4] Zhou X M, Jing F Q, Huang J B. Thermal Relaxation at Thin-Layer Interfaces: Its Significance to Shock Temperature Study [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1997, 11(1): 8-12. (in Chinese)
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.

[5] Partouche-Sebban D, Pelissier J L, Abeyta F G, et al. Measurement of the Shock-Heated Melt Curve of Lead Using Pyrometry and Reflectometry [J]. J Appl Phys, 2005, 97(4): 043521.

[6] Lyzenga G A, Ahrens T J. Multiwavelength Optical Pyrometer for Shock Compression Experiments [J]. Rev Sci Instrum, 1979, 50(11): 1421-1424.

[7] Boslough M B, Ahrens T J. A Sensitive Time-Resolved Radiation Pyrometer for Shock-Temperature Measurements above 1 500 K [J]. Rev Sci Instrum, 1989, 60(12): 3711-3716.

[8] Radousky H B, Mitchell A C. A Fast UV/Visible Pyrometer for Shock Temperature Measurements to 20 000 K [J]. Rev Sci Instrum, 1989, 60(12): 3707-3710.

[9] Boboridis K, Obst A W. A High-Speed Four-Channel Infrared Pyrometer [J]. AIP Conf Proc, 2003, 684(1): 759-764.

[10] Luo J M. A High Sensitive Transient Optic Pyrometer [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1997, 11(1): 39-45. (in Chinese)
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.

[11] Holmes N C. Fiber-Coupled Optical Pyrometer for Shock-Wave Studies [J]. Rev Sci Instrum, 1995, 66(3): 2615-2618.

[12] Partouche-Sebban D, Holtkamp D B, Rodriguez P, et al. Alternative Calibration Techniques for High-Speed Pyrometers in Shock Experiments [J]. Rev Sci Instrum, 2005, 76(1): 013106.

[13] Wang G C, Yu Q Y, Tan X X, et al. Six Channel Instantaneous Optical Pyrometer [J]. Opto-Electronic Engineering, 1996, 23(Supplement): 46-49. (in Chinese)
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): 46-49.

[14] Nguyen J H, Holmes N C. Melting of Iron at the Physical Conditions of the Earth's Core [J]. Nature, 2004, 427: 339-341.

[15] Zhou X M, Jing F Q, Hu J B. Sound Speed in a Shocked Tungsten Alloy: Its Significance in Studying "Softening" Mechanism to Multiphase Alloys [J]. Chinese Physics Letter, 1996, 13(10): 761-764.

[16] Li J, Zhou X M, Zhu W J, et al. A Shock-Induced Phase Transformation in a $LiTaO_3$ Crystal [J]. J Appl Phys, 2007, 102(8): 083503.

[17] Gibson F C, Bowser M L, Summers C R, et al. Use of an Electro-Optical Method to Determine Detonation Temperature in High Explosives [J]. J Appl Phys, 1958, 29(4): 628-632.

[18] Yoo C S, Holmes N C, Souers P C, et al. Anisotropic Shock Sensitivity and Detonation Temperature of Pentaerythritol Tetranitrate Single Crystal [J]. J Appl Phys, 2000, 88(1): 70-75.

[19] Crouzet B, Partouche-Sebban D, Carion N. Temperature Measurements in Shocked Nitromethane [J]. AIP Conf Proc, 2004, 706: 1253-1256.

[20] Smilowitz L, Henson B F, Sandstrom M M, et al. Fast Internal Temperature Measurements in PBX9501 Thermal Explosions [J]. AIP Conf Proc, 2006, 845(1): 1211-1214.

[21] Hare D E, Holmes N C, Webb D J. Shock-Wave-Induced Optical Emission from Sapphire in the Stress Range 12 to 45 GPa: Images and Spectra [J]. Phys Rev B, 2002, 66(1): 014108.

[22] Li J, Zhou X M, Li J B. A Time-Resolved Single-Pass Technique for Measuring Optical Absorption Coefficients of Window Materials under 100 GPa Shock Pressures [J]. Rev Sci Instrum, 2008, 79(12): 123107.

[23] Tan H, Hu J B, Jing F Q. Shock-Induced Chemical Reaction in Bromoform [A]//Proceedings of the Second Japan-China High Pressure Seminar and 9th Japan-China Science and Technology Symposium [C]. Tsukuba, Japan, 1995: 36-40.

## Development of a New Fiber-Coupled Optical Pyrometer

ZHOU Xian-Ming, LI Jia-Bo, WANG Xiang

(*National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

**Abstract**: A fast optical pyrometer for shock temperature measurement was developed based on GDB159/142 photo-multiplier tubes (PMT) and one single optical fiber incorporated with dichroic filters. Main features include the central wavelengths within the spectrum range of 340～811 nm, a rise-time of 2～3 ns, and measurable shock temperature span of 2 500～15 000 K. Results of the pulse-linearity measurements indicate that the dynamical linearity values for all six channels are greater than 200 mV (50 Ω load resistor) which meet the requirement for recording on the digital oscilloscopes with good signal-to-noise ratio. Calibration method by the spectral irradiance with a halogen lamp and examples of dynamic measurements are presented. It is demonstrated that this system produces reasonable outputs with stable performance at an economical cost.

**Key words**: shock temperature; radiant pyrometer; dichroic filter; photo-multiplier tube