

文章编号: 1001-3806(2012)03-0315-03

## 变像管扫描相机扫描速度及非线性标定技术

畅里华, 刘宁文, 彭其先, 刘寿先, 李军

(中国工程物理研究院 流体物理研究所 绵阳 621900)

**摘要:** 变像管扫描相机在超快物理过程的研究中具有广泛的应用。扫描速度及其非线性作为相机的主要技术指标之一,其准确度对实验结果有着重要影响。为了准确获取数据,确保实验结果的可靠性,采用皮秒光脉冲源、标准具及精密延时器,对高速变像管相机扫描速度和扫描速度非线性进行了实验标定,取得了较好的扫描速度非线性实验数据。结果表明,标定的变像管扫描相机最大扫描速度非线性为 $\pm 3.52\%$ ;标定结果最大相对误差为 $\pm 1.4\%$ 。这一结果对有效提高实验数据处理和物理分析的可靠性是有帮助的。

**关键词:** 测量与计量; 标定方法; 标准具; 变像管扫描相机; 扫描速度; 扫描速度非线性

中图分类号: TN29 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.03.007

### Sweep speed and its nonlinearity calibration for an image-converter tube streak camera

CHANG Li-hua, LIU Ning-wen, PENG Qi-xian, LIU Shou-xian, LI Jun

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** Image-converter tube streak cameras are commonly used in study on ultra-high speed physical phenomena. The sweep speed and its nonlinearity are main parameters of an image-converter tube streak camera and its accuracy has great effect on experimental results of ultra-high speed physical phenomena. The cause of nonlinearity was explained in theory. A method was introduced to calibrate the sweep speed and its nonlinearity, in which a picosecond light pulse source, an etalon and a high precision time delay device was used. Better experimental results were obtained with  $\pm 3.52\%$  maximum nonlinearity of the sweep speed and its relative error of measurement was  $\pm 1.4\%$ , which improved the reliability of experimental data processing and analysis effectively.

**Key words:** measurement and metrology; calibration method; etalon; image converter tube streak camera; sweep speed; sweep speed nonlinearity

## 引言

变像管扫描相机作为一种具有高时间分辨能力的设备,在弹道学、等离子体物理、瞬态光谱物理学、高能物理、核工程及激光核聚变等科学领域具有重要作用。它不仅能提供空间分辨的图像,同时还能提供目标随时间运动变化的信息。但变像管相机也有它的缺点,它的扫描线路是由多个雪崩晶体管串联,通过“雪崩”产生线性快速斜坡高压脉冲,从而获得相应的扫描速度,由于晶体管存在老化现象,经过长时间使用后,它的扫描速度非线性会变差,这种不均匀性不仅产生了扫描时间

上的计量误差,而且由于像面上扫描速度的不同,相同强度的光脉冲在荧光屏上的光强会不一样(扫描速度慢时,荧光屏上光强相对亮;扫描速度快时,荧光屏上光强相对弱),导致光强的测量也不准确。因此每隔一定时间,应该对标称扫描速度及其非线性进行校准,如此才能保证科研生产的正常进行和数据获取的准确度,确保实验结果的精确性。作者主要介绍用皮秒激光器、标准具及精密延时器对所用变像管扫描相机的扫描速度及扫描速度非线性进行的标定<sup>[1-7]</sup>。

## 1 标定方法

变像管扫描相机中扫描速度的非线性将直接影响时间测量精度,同时也使荧光屏发出的光辐射强度不均匀。即强度不变的脉冲光入射到系统上,由于扫描速度的非线性,将导致时间轴被压缩,使得强度看起来增加了,从而引入时间测量误差。为了测量扫描速度的非线性,同时兼顾测量的动态范围,选用了标准具,

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展基金资助项目(2011B0401007)

作者简介: 畅里华(1974-),女,工程师,目前从事高速摄影技术的研究。

E-mail: clhww@tom.com

收稿日期: 2011-08-11; 收到修改稿日期: 2011-09-08

让其产生一系列等时间间隔的脉冲,来对相机扫描速度及扫描速度非线性进行标定。实验布局见图1。根据所标定的档位,选定标准具的间隔 $d$ ,标准具示意图如图2所示。皮秒脉冲光源经标准具,产生一系列时间间隔相等的光脉冲,精确调试触发信号与激光信号的时间差,保证同步信号与激光信号到达扫描相机的时间精确同步,在荧光屏上得到一系列强度递减的脉冲序列。若相机扫速呈线性,则相邻脉冲峰值间的间隔应一致。将各相邻脉冲间的实际位置间隔与理想间隔相比较,利用数学公式处理后就可得到某个档位的扫描速度及扫描速度非线性<sup>[8-9]</sup>。

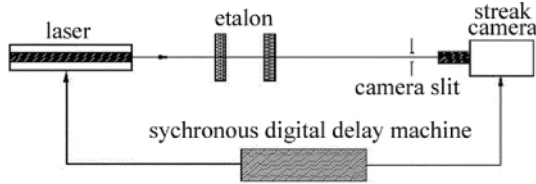


Fig. 1 Measurement layout of sweep speed

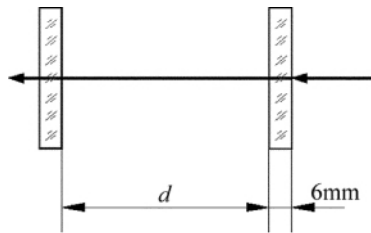


Fig. 2 Schematic drawing of an etalon

标定时所使用的标准具是由透过率不同的两块镜片组成,厚度均为6mm,第1块镜片的前表面镀增透膜,透过率99%,内腔表面镀析光膜半透半反,第2块镜片内腔表面镀析光膜半透半反,外表面透过率99%。两镜片间距精确可调,根据不同时间档位,选合适的间隔 $d$ 。皮秒脉冲经标准具产生一系列脉冲时间间隔 $t$ 就是激光在长 $2d$ 空气中传播的时间,则 $t$ 由下式得到:

$$t = 2d/c \tag{1}$$

式中 $c$ 为光在空气中的传播速度。

## 2 标定结果与分析

对所用相机常用档位进行了标定,图3为1ns/mm档得到的条纹序列图,图中横轴为时间分辨率,方向从左到右,纵轴为空间方向。将图3经过处理,可以得到强度与时间的关系曲线图,如图4所示。从图4可得到相邻脉冲峰值间的间隔 $l_i$ ,而相邻脉冲的时间间隔 $t$ 已知,相机的扫描速度 $v$ 就可由(2)式得到,相机的扫描速度非线性 $\delta$ 由(3)式得到<sup>[10]</sup>:

$$v = \frac{l_0}{t} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n \cdot t} \tag{2}$$

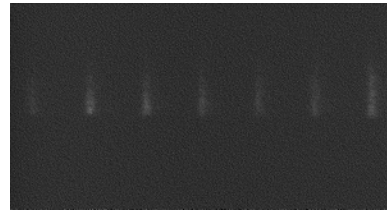


Fig. 3 Pattern sequence diagram at 1ns/mm

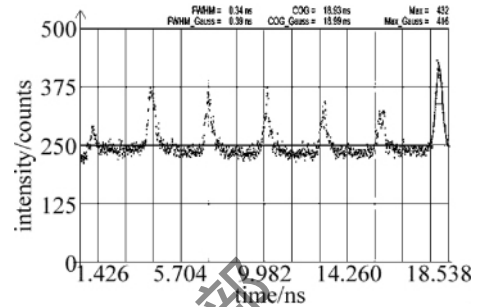


Fig. 4 Intensity vs. time graph at 1ns/mm

$$\delta = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (l_i - l_0)^2}}{l_0} \times 100\% \tag{3}$$

对于慢扫描档位,为避免标准具间距过长带来较大误差,通过调节延时时间使狭缝像分别在像面的左端、中端、右端3次成像,从而考核相机的扫描非线性,图5~图10所示为5ns/mm档左端、中端、右端条纹序列图和相应的强度时间曲线图。

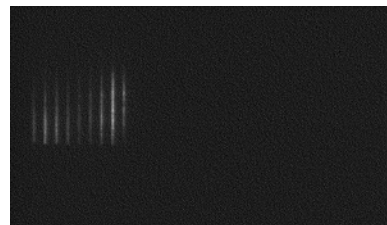


Fig. 5 Pattern sequence diagram on the left at 5ns/mm

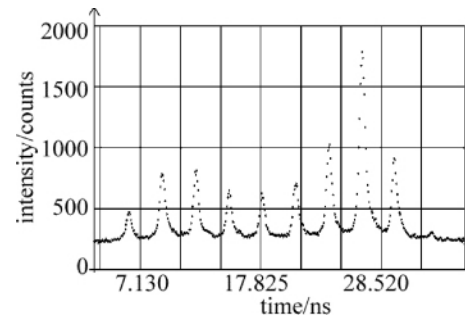


Fig. 6 Intensity vs. time graph on the left at 5ns/mm

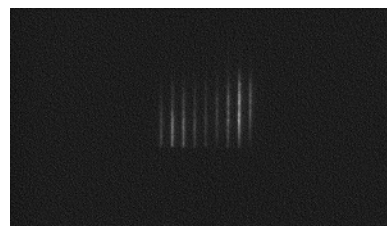


Fig. 7 Pattern sequence diagram in the middle at 5ns/mm

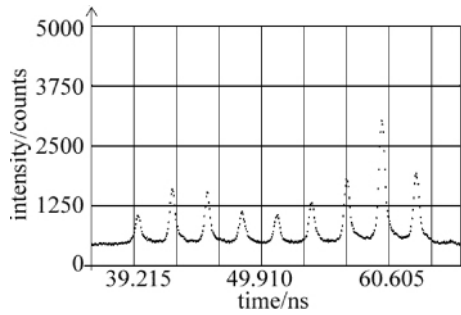


Fig. 8 Intensity vs. time graph in the middle at 5ns/mm

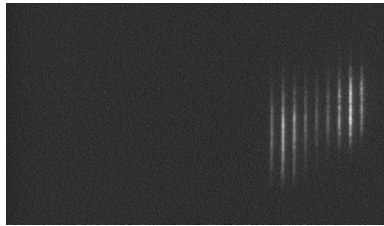


Fig. 9 Pattern sequence diagram on the right at 5ns/mm

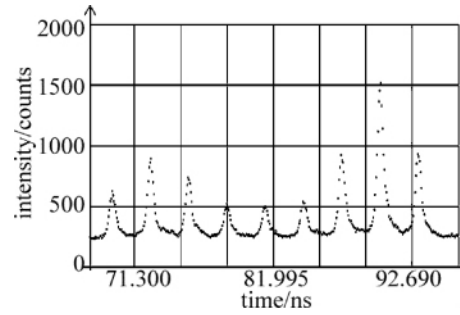


Fig. 10 Intensity vs. time graph on the right at 5ns/mm

按上述两种方法,对变像管扫描相机各档位进行了标定,经计算及数据处理,得到变像管扫描相机各档位扫描速度及扫描速度非线性,结果如表 1 所示。

一般在实际使用中,当扫描速度非线性好于  $\pm 5\%$  时,认为该档扫描速度在允许误差范围内,测量结果比较精确可信,否则超出了允许误差范围,需标定后

Table 1 Calibrated results of a high speed image-converter streak camera

| sweep time / ns                                     | 2          | 5          | 10         | 20         | 50         | 100        | 200        |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| sweep speed / ( ns · mm <sup>-1</sup> )             | 0.01       | 0.025      | 0.5        | 1          | 2.5        | 5          | 10         |
| sweep speed measurement / ( ns · mm <sup>-1</sup> ) | 0.0103     | 0.0243     | 0.518      | 1.031      | 2.46       | 5.016      | 10.21      |
| relative error / %                                  | 3          | -2.8       | 3.6        | 3.1        | -1.6       | 0.32       | 2.1        |
| sweep speed nonlinearity / %                        | $\pm 3.52$ | $\pm 1.08$ | $\pm 1.37$ | $\pm 1.42$ | $\pm 2.86$ | $\pm 1.62$ | $\pm 2.56$ |

按实际测量值使用。由表 1 可以看出,所使用的变像管扫描相机扫描速度非线性均在  $\pm 5\%$  内。大相对误差为  $\pm 1.4\%$ 。

通过以上分析可知,由标准具带来的时间间隔误差完全可以忽略,影响测量结果的主要因素是狭缝像在扫描方向的空间距离的测量误差,即  $\pm 1.4\%$ 。

### 3 测量结果误差分析

根据上述标定方法,对标定结果精度影响的因素有两个:一是标准具输出序列激光脉冲时间间隔的精度;二是在相机 CCD 上相邻狭缝像在扫描方向的空间距离的精度。下面以变像管相机 1ns/mm 档位进行误差分析。

将 100ps 的激光脉冲输入间隔距离为 436mm 的标准具,就可获取 7 个脉冲、时间间隔为 2.9ns 的序列激光脉冲。标准具的间隔距离是通过精密电控导轨来实现的,精密电控导轨的最大误差为  $\pm 0.1\text{mm}$ ,相对误差  $\pm 0.023\%$ 。相应地,标准具输出序列激光脉冲间隔距离的最大相对误差也为  $\pm 0.023\%$ 。

通过精密延时机使得脉冲激光与相机同步工作,脉冲激光照明相机狭缝并使得在 CCD 上成 7 条狭缝像,通过图像分析软件对狭缝像进行处理,得到狭缝像在扫描方向上的灰度曲线,测量相邻曲线的峰与峰的距离,这个数值就是狭缝像在扫描方向的空间距离。在标定时,狭缝宽度为 0.08mm,由分析得知,相邻狭缝像的间隔距离的测量误差最大为狭缝宽度的 1/2,即  $\pm 0.04\text{mm}$ ,而相邻狭缝像的理论间隔距离为 2.9mm,因此,相邻狭缝像在扫描方向的空间距离的最

### 4 结 论

对目前使用的变像管扫描相机的扫描速度及非线性进行了标定,得到了相机各档位扫描速度与扫描速度非线性值,对变像管相机性能有了进一步了解,为今后定时标定变像管扫描相机的扫描速度及扫描速度非线性提供了条件。同时,根据扫描速度及扫描速度非线性实测数据结果可以看出,扫描相机经过一段时间使用后,有些档位扫描速度和扫描速度非线性已与出厂指标有了较大变化,对于精密实验测量,使用前需对所使用档位扫描速度及扫描速度非线性进行标定,超出实验允许误差范围,需按标定后实际测量值处理实验数据。

#### 参 考 文 献

[1] TAN X X. Test technique for optical high speed photograph [M]. Beijing: Science Press, 1992: 114-116 (in Chinese).  
 [2] TAN X X. Technique for high speed photography [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1990: 159-160 (in Chinese).  
 [3] KALIBJIN R. Recent progress on dissector tube prepositioning circuit framing image converter [C] // Proceeding of 15th International

## 4 结论

基于 LD 双端抽运陶瓷板条放大器设计方案,对端面抽运条件下,单一浓度掺杂和梯度浓度掺杂板条介质吸收抽运功率密度情况进行了理论分析。分析表明,对于单一浓度掺杂板条,在提高抽运光吸收效率的同时,会产生激光介质内抽运功率密度不均匀问题,而采用梯度浓度掺杂板条介质则可以很好地解决这一矛盾。通过计算和比较单一掺杂、2 阶阶变梯度掺杂、4 阶阶变梯度掺杂以及理想梯度掺杂等 4 种掺杂情况在相同抽运条件、相同的吸收效率情况下复合 Nd:YAG 陶瓷板条介质吸收抽运功率分布,可知采用梯度浓度掺杂结构,板条介质吸收抽运功率分布更加均匀。从理论上证明采用梯度浓度掺杂激光介质,可以有效解决抽运效率与抽运功率均匀性之间的制约,在较高的抽运效率情况下,大大提高激光介质内抽运光分布的均匀性,为以后的实际工程应用提供指导作用。

### 参考文献

- [1] FAN T Y, BYER R L. Diode laser-pumped solid-state lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1988, 24(6): 895-912.
- [2] COMASKEY B J, BEACH R, ALLBRECHT G, et al. High average power diode pumped slab laser [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1992, 28(4): 992-996.
- [3] SRIDHARAN A K, SARAF S, SINHA S, et al. Zigzag slabs for solid-state laser amplifiers: batch fabrication and parasitic oscillation suppression [J]. Applied Optics, 2006, 45(14): 3340-3351.
- [4] HOU J Y, WANG Y F, ZHU X P, et al. Numerical simulation of pumping uniformity and thermal effects of LD end-pumped slab amplifier [J]. Laser Technology, 2010, 34(6): 802-805 (in Chinese).
- [5] YAN Y, ZHANG H L, LIU Y, et al. Thermal effects of laser diode end-pumped multi-segmented slab Laser [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(9): 2174-2178 (in Chinese).
- [6] WANG J L, LI L, QIAO L, et al. Theoretical analysis of temperature and stress distribution in end-pumped composite ceramic Nd:YAG laser slab [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(7): 1777-1783 (in Chinese).
- [7] KRACHT D, WILHELM R, FREDE M. 407W end-pumped multi-segmented Nd:YAG laser [J]. Optical Express, 2005, 13(25): 10140-10144.
- [8] RUTHERFORD T S, TULLOCH W M, GUSTAFSON E K, et al. Edge pumped quasi-three-level slab lasers: design and power scaling [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2000, 36(2): 205-219.
- [9] CHEN B, CHEN Y, BASS M. Edge- and end-pumped slab lasers with both efficient and uniform pumping [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2006, 42(5): 483-489.
- [10] LEI Ch Q, WANG Y F, HOU J Y, et al. Thermal effect analysis of LD end-pumped composite slab [J]. Applied Laser, 2011, 31(2): 164-167 (in Chinese).
- [1] FAN T Y, BYER R L. Diode laser-pumped solid-state lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1988, 24(6): 895-912.
- [2] COMASKEY B J, BEACH R, ALLBRECHT G, et al. High average power diode pumped slab laser [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1992, 28(4): 992-996.
- [3] SRIDHARAN A K, SARAF S, SINHA S, et al. Zigzag slabs for solid-state laser amplifiers: batch fabrication and parasitic oscillation suppression [J]. Applied Optics, 2006, 45(14): 3340-3351.
- [4] HOU J Y, WANG Y F, ZHU X P, et al. Numerical simulation of pumping uniformity and thermal effects of LD end-pumped slab amplifier [J]. Laser Technology, 2010, 34(6): 802-805 (in Chinese).
- [5] YAN Y, ZHANG H L, LIU Y, et al. Thermal effects of laser diode end-pumped multi-segmented slab Laser [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(9): 2174-2178 (in Chinese).
- [6] WANG J L, LI L, QIAO L, et al. Theoretical analysis of temperature and stress distribution in end-pumped composite ceramic Nd:YAG laser slab [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(7): 1777-1783 (in Chinese).
- [7] KRACHT D, WILHELM R, FREDE M. 407W end-pumped multi-segmented Nd:YAG laser [J]. Optical Express, 2005, 13(25): 10140-10144.
- [8] RUTHERFORD T S, TULLOCH W M, GUSTAFSON E K, et al. Edge pumped quasi-three-level slab lasers: design and power scaling [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2000, 36(2): 205-219.
- [9] CHEN B, CHEN Y, BASS M. Edge- and end-pumped slab lasers with both efficient and uniform pumping [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2006, 42(5): 483-489.
- [10] LEI Ch Q, WANG Y F, HOU J Y, et al. Thermal effect analysis of LD end-pumped composite slab [J]. Applied Laser, 2011, 31(2): 164-167 (in Chinese).

### (上接第 317 页)

- Congress of High Speed Photography. San Diego, USA: International Congress on High Speed Photography, 1982: 201-203.
- [4] STRADLING G L, ATTWOOD D T, KAUFFMAN R L. A soft X-ray streak camera [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1983, 19(4): 604-615.
- [5] LIU T F, ZHANG B X. Calibration of picosecond streak cameras [J]. Physics, 1999, 28(4): 241-243 (in Chinese).
- [6] WANG L, LI G H, KONG Ch, et al. Phase retardation measurement with two  $\lambda/4$  wave-plates [J]. Laser Technology, 2007, 31(6): 663-664 (in Chinese).
- [7] GUO B P, CUNIN B, NIU H B. High repetition rate trigger mode streak camera [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(3): 442-444 (in Chinese).
- [8] WANG W, CHANG L H, LIU N W, et al. Calibration of scanning time and scanning velocity for high speed image converter camera [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2002, 14(6): 827-830 (in Chinese).
- [9] TIAN J Sh, ZHAO B Sh, WEN W L, et al. A multiple-slit streak tube [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(17): 1979-1982 (in Chinese).
- [10] HUANG Y X, JIANG Sh E, LI W H, et al. Emporal characteristics calibration for an X-ray streak camera [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(5): 829-833 (in Chinese).