

文章编号 1004-924X(2011)02-0475-07

500 fs 紫外激光系统及其在 闪烁体荧光特性测试中的应用

张永生, 郑国鑫

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要:介绍了用于高速时间记录设备以及多种闪烁体材料时间响应特性测试的 500 fs, 248 nm 超短脉冲紫外激光系统的构成及其主要技术参数。系统的核心部分是一个分布反馈染料激光器, 即一个稀疏刻线光栅的动态像。像的长度和染料溶液的折射率决定了脉冲的最短宽度, 并且通过改变动态光栅的间距就可以改变输出光谱。在实验条件下, 分布反馈染料激光器输出波长为 496 nm, 倍频后为 248 nm, 与 KrF 准分子激光放大器工作波长匹配。放大器介质的低饱和能量密度和三程离轴放大技术使得输出激光的强度分布非常均匀, 这对于标定快速记录器件极其有利。利用该系统对 ZnO : Ga 薄膜闪烁体在超短紫外激光激发下的荧光特性进行了测试, 建立了荧光传输光路, 解决了散射激光干扰和荧光高效率收集等问题。测量得到其荧光光谱为 380~410 nm, 中心波长为 392 nm, 荧光响应时间约为 80 ps。最后, 讨论了在现有实验条件下影响测量结果的一些因素。

关键词:紫外激光; 闪烁体; 荧光特性; 时间响应特性

中图分类号: TN248.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111902.0475

500 fs UV laser system and its application to fluorescence test of thin film scintillators

ZHANG Yong-sheng, ZHENG Guo-xin

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: A 500 fs, 248 nm ultra-short UV laser system for high speed recording devices and scintillators' fluorescent excitation was introduced in the paper. The central part of the laser system is a Distributed Feedback Dye Laser (DFDL), namely, a dynamic image of coarse grating. The image length and the index of dye solution give the shortest pulse duration and changing the pitch of the grating results in a tunable spectrum. In experiments the working wavelength of the DFDL was adjusted to 496 nm and frequency doubled to 248 nm, which was match to that of the KrF excimer amplifier. The off-axis three pass amplification schemes and low saturation energy density of the excimer laser media made the intensity profile of the laser beam fairly uniform, which was very attractive for the calibration of a high-speed recording device. An experiment to measure the fluorescent characteristics of a thin film ZnO : Ga scintillator under UV laser excitation was demonstrated with the laser system. The interference of the scattered laser and the weak fluorescent signal was solved by using a collective ima-

收稿日期: 2010-10-08; 修订日期: 2010-10-30.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 10474081)

ging lens and a monochrometer. Obtained results show that the fluoresce spectrum is in the 380 nm to 410 nm with the central peak at 392 nm, and the fluorescence time of the scintillator is about 80 ps. Finally, the factors which may affect the measuring results were also discussed.

Key words: ultraviolet laser; scintillator; fluorescence characteristics; time response

1 引言

在激光与等离子体相互作用、宇宙空间射线测量以及所有涉及 X 射线照相的科学研究中,常需要时间响应在亚纳秒甚至更快的探测器。超短脉冲激光在这些探测器的标定中有广泛应用,美国、俄罗斯、日本、法国和意大利等国都建有专门的标定装置^[1-3]。我国虽然未见有专门用于时间特性标定用激光系统的报道,但是中国工程物理研究院、中国计量院、中科院上海光机所、中科院西安光机所等单位均报道过利用超短脉冲激光进行高速时间记录设备测试的实验^[4-7]。目前激光标定/测试系统大多采用固体锁模激光器,这种激光器系统结构紧凑、容易维护、但是存在输出能量低,光谱范围固定,光强分布不均匀,对环境要求高等缺点,使得其应用范围受到一定限制。

本文介绍了一套由 compex150 准分子激光系统(Lambda Physik)及 FAMP(LLG)染料激光系统构成的紫外超短脉冲激光源^[8]。该激光系统具有输出能量高、均匀性好、脉冲宽度覆盖范围宽、工作模式(单次或者重频)可控等优点,适合多种高速测量仪器的时间响应特性标定和测试工作。同时报道了利用该系统输出的 248 nm 紫外超短脉冲激光进行的 ZnO:Ga 超快闪烁体材料荧光特性测试实验。对该测试实验中出现的一些问题进行了简要的讨论,以供相关试验研究参考。

2 超短脉冲激光系统构成

超短脉冲激光系统主要由 Compex150 双腔准分子激光器和产生超短脉冲的 FAMP 染料激光系统构成,如图 1 所示。Compex150 双腔准分子激光器由一台 XeCl 准分子激光器和一台 KrF 准分子激光器组成。其中的 XeCl 准分子激光器作为 FAMP 染料激光系统的泵浦源,泵浦光通过扩束望远镜和消色差显微镜头将一个低线密度透射衍射光栅成像在染料池内,获得一个缩小

的增益调制瞬态光栅像,即分布反馈染料激光器。分布反馈染料激光器(DFDL)是整个 FAMP 染料激光系统的核心^[9]。通过调节透射光栅的位置和使用不同的染料,就可以在 400~600 nm 获得连续可调的激光输出。

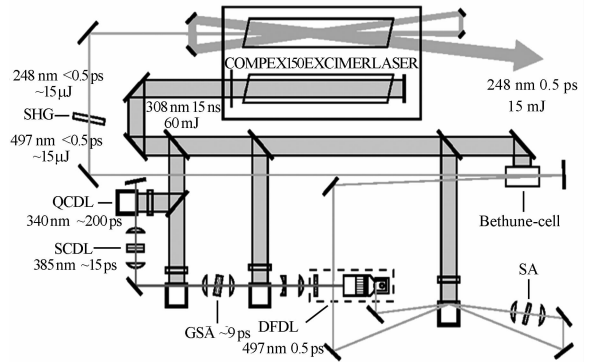


图 1 超短脉冲激光系统光路示意图

Fig. 1 Scheme of ultra-short laser system

测试中最常用的是波长为 248 nm 的紫外激光,单光子能量 5 eV。为此分布反馈染料激光器调节到输出波长为 497 nm,通过两级染料放大器放大并用饱和吸收体(SA)滤掉放大自发辐射(ASE)后,利用 BBO 晶体倍频(SHG)获得 248 nm 的紫外脉冲种子光,送入 KrF 准分子激光放大器进一步将能量放大。KrF 准分子激光放大器出口处光斑尺寸约为 2 cm×2 cm,能量通常控制在 15 mJ 以内。为了改善光束的均匀性,在 KrF 准分子激光放大器前先用凹面镜扩束,然后利用三程离轴放大形式使得入射激光信号在离开放大器前处于均匀饱和放大状态,从而实现获得较高激光能量的同时,降低激光的 ASE 水平,提高激光脉冲信号的对比度。进一步用空间滤波器滤波,信号对比度可以达到 10⁸ 以上。

3 激光系统的技术参数

激光系统具有两种工作模式,一种是通过外部触发控制,可以完成单次及重复频率输出。另一种是系统本身以重复频率工作。重复频率工作

时,一般控制在 10 Hz 以下。

脉冲宽度是最重要的激光参数之一,需要尽可能准确地获得关于脉冲波形的测量结果。紫外超短脉冲激光的时间特性测量,尤其是在单脉冲或者低重复频率下的测量,目前还没有可靠的简便可行的方法。为此,使用自相关仪对 DFDL 输出的 497 nm 可见光放大后进行测量。DFDL 能够产生一个几乎是傅里叶受限的 500 fs 激光脉冲,典型结果如图 2 所示^[10]。在经过恰当设计的 BBO 晶体倍频后,紫外 248 nm 激光的脉冲宽度将基本保持不变。自相关仪给出的测量结果说明激光脉冲宽度在亚皮秒量级。

为了进一步验证测量结果,用紫外-软 X 光条纹相机直接对 248 nm 紫外激光的波形进行强度测量。将入射激光的能量尽可能降低,得到的平均结果为 10.4 ps,如图 3(a)所示。通过在飞秒激光光束一半处插入 3 cm 厚石英玻璃,人为将该脉冲变为两个超短脉冲,两个脉冲之间的时间间隔通过玻璃厚度就可以计算得到,如图 3(b)所

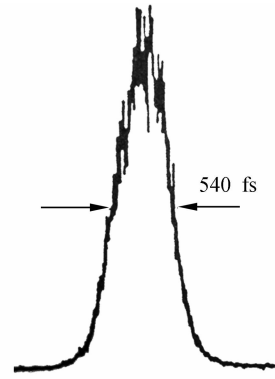
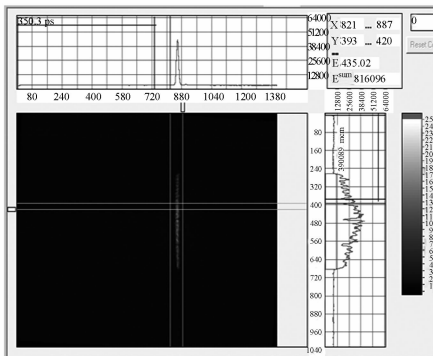
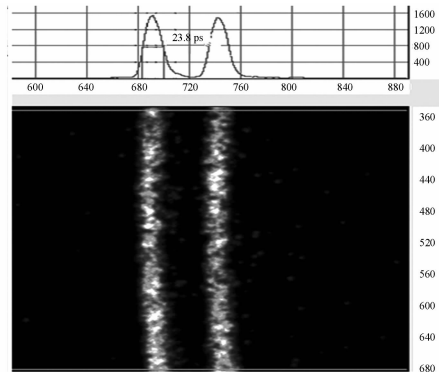


图 2 DFDL 脉冲的自相关轨迹
Fig. 2 Autocorrelation trace of DFDL

示。由于条纹相机极限时间分辨率为 10 ps,不能准确得到实际的脉冲宽度结果,但对于直接判断 248 nm 紫外激光的脉宽范围有参考价值。与自相关仪给出的倍频前激光脉宽的测量结果对比,说明紫外超短激光的脉宽在 1 ps 以内,可以用于绝大多数超快测量仪器的时间响应特性测试或者标定研究。



(a) 一个激光脉冲波形
(a) One pulse waveform



(b) 加上 3 cm 厚石英玻璃的脉冲波形
(b) Double pulse with 3 cm quartz

图 3 利用 K010X 条纹相机测量结果

Fig. 3 Pulse waveform measured with K010X streak camera

4 ZnO : Ga 无机晶体在紫外超短激光作用下的荧光特性测试

闪烁体材料的荧光发射测量通常包括光谱特性和时间特性,测试光路如图 4 所示。经过反射镜或者空间滤波器准直的紫外 248 nm 激光脉冲首先通过一个可调光学衰减器,衰减器可以连续

调节入射光脉冲的能量,然后入射到一个石英光楔上。光楔前后两个表面将光束取样,取样光束分别入射到超快光电二极管 UPD-200-UD(Alpha Las GmbH, 前沿 200 ps)和 PEM100 微焦能量计(Lasertechnik Berlin, 最小量程 0.1 μJ)上。光电管的输出可以作为光脉冲信号监视、探测器时间响应对比以及作为同步触发脉冲信号产生器。微焦能量计用来监测脉冲能量,进行光脉冲的能量密度控制和归一化处理。光脉冲的主要能

量通过光楔后,用一个长焦透镜来控制光斑的尺寸以适应闪烁体的面积。为了控制闪烁体表面对于标定激光脉冲的散射,入射角度接近掠入射。在闪烁体表面法线方向上用 K9 材料的透镜将闪烁体成像在三光栅单色仪的入口狭缝上。成像透

镜不但起到收集闪烁体发出的荧光功能,还作为滤光片滤掉绝大部分测量方向上的 248 nm 散射激光脉冲。在实验中发现,在不加成像透镜的情况下,在此方向散射的紫外激光强度仍远大于加了成像收集透镜后闪烁体产生的荧光强度。

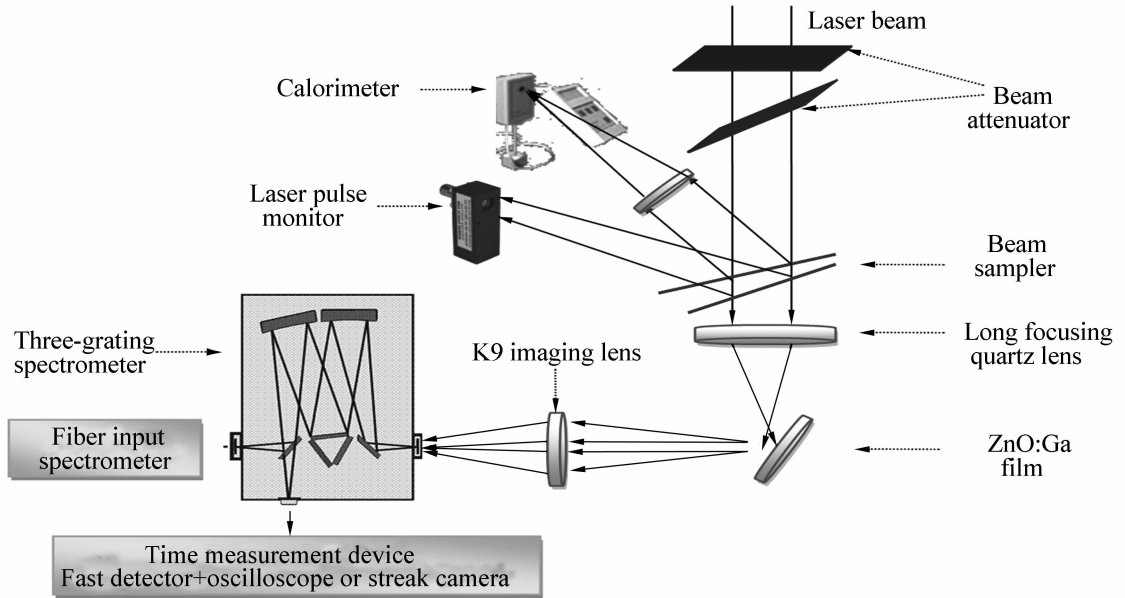


图 4 紫外飞秒激光激发 ZnO : Ga 无机晶体的荧光特性测试系统示意图

Fig. 4 Fluorescent test for ZnO : Ga thin film scintillators with UV ultra-short laser pulse

三光栅单色仪具有三个主要功能:一是作为探测器的屏蔽暗室,尤其是对于可见光也敏感的高灵敏度探测器是必不可少的;二是利用不同刻线密度光栅的色散作用将标定激光和闪烁体产生的荧光在不同方向上分开,进一步控制从其他方向散射来的 248 nm 紫外激光,并在出口狭缝处测量荧光的时间特性;三是可以同时测量荧光光谱特性。

在出口狭缝处的探测器可以是测量光谱的阵列 CCD 或者是各种类型的高速探测器,如光电管、光电倍增管、条纹相机及分幅相机等设备。这些设备可以带有自己的数据记录与处理单元,也可以用宽带数字示波器作为数据处理单元。考虑到紫外 248 nm 激光的能量不稳定性较大,实验中使用光纤光谱仪独立测量 ZnO : Ga 闪烁体的荧光光谱,光谱能量主要集中在 380~410 nm,如图 5 所示。闪烁体荧光时间特性测量使用的是定制的 GD-5002 光电管^[11](南京 55 所)和 Tek 7404 数字荧光示波器(带宽 4 GHz)。

为了得到系统的时间响应,先去掉 K9 玻璃

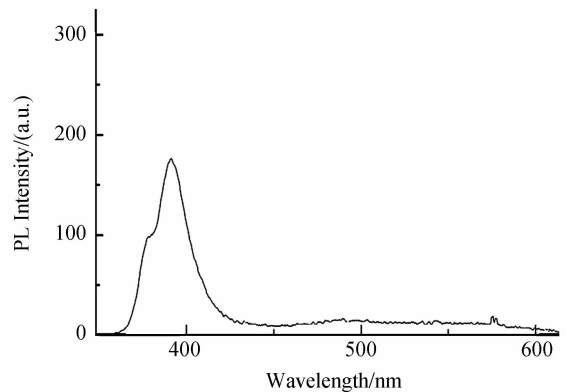


图 5 ZnO : Ga 在 248 nm 激光激发下的荧光光谱
Fig. 5 Fluorescent spectrum of ZnO : Ga film excited by 248 nm laser

成像透镜,将单色仪内的光栅调节到 248 nm 位置,就可直接测量散射的紫外激光并得到系统的时间响应,典型波形如图 6 所示。从示波器直接测量得到半高宽 $t_{FWHM,system} = 153.51$ ps,上升时间 $t_{r,system} = 104.93$ ps。根据示波器带宽和电缆长度估算 GD-5002 光电管的上升时间在 80 ps 左右。

加上 K9 玻璃成像透镜,通过调节单色仪内

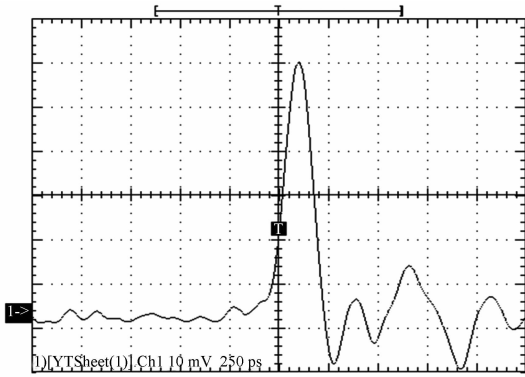


图6 光电管+信号电缆+示波器系统时间响应

Fig. 6 Time response of measurement system

光栅就可以测量不同波长荧光的时间特性。实验中测量得到的 ZnO : Ga 无机晶体在 392 nm 左右的荧光时间特性典型波形如图 7 所示。从示波器直接测量得到其半高宽 $t_{FWHMZnO, Ga} = 163.41$ ps, 上升时间 $t_{ZnO, Ga} = 127.75$ ps。由此估算得到 ZnO : Ga 无机晶体的荧光前沿在 80 ps 左右。显然,通过图 6 和图 7 的测量结果,就可以通过反卷积运算得到准确的闪烁体荧光强度波形。

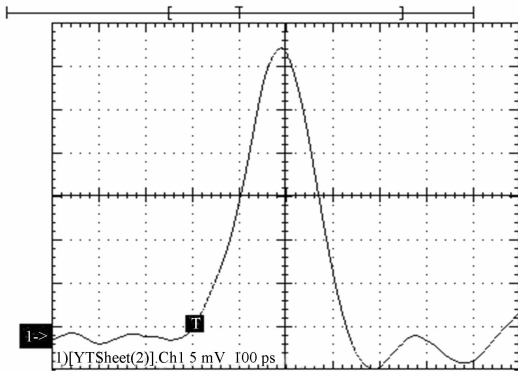


图7 测试系统加 ZnO : Ga 闪烁体的时间响应

Fig. 7 Time response of ZnO : Ga film

5 测量结果的影响因素

首先,在使用高功率快放电的准分子激光系统或者固体调 Q 激光系统的情况下,电参数测量系统应该在良好的电磁屏蔽条件下工作。除对仪器进行良好的接地外,测试系统的供电和激光系统的供电电网隔离也是非常必要的。通过使用大功率的 UPS 直流电源给整个参数测量系统供电,能够显著降低供电电网的串扰水平。这些措施对于降低参数测量系统,如示波器的噪声水平,获得

良好的实验结果是非常必要的。其次,关于电缆和示波器有限带宽引起的测量不确定因素,可以参见专门的论述文章^[12]。

从文献报道来看,ZnO : Ga 无机晶体粉末的最快荧光上升时间在 30 ps 左右,应使用时间分辨率在 ps 量级的扫描条纹相机最合适^[13]。本实验中利用定制的 GD-5002 光电管进行测试,需先对高速光电管进行初步标定。

高速探测设备的时间特性标定包括时间分辨率(或者前沿响应, rise time), (线性)动态范围和最小可探测能量密度 3 个密不可分的参数。对于将时间特性转换成空间特性来记录的高速成像设备,如扫描条纹相机,还包括空间分辨率。在利用高速光电管测量时,待测光强度的绝对值往往很难预估,或者预估的光强值在相当大的范围内,例如 1~3 个量级内变化,这就要求探测器具有大的线性动态范围。影响这个线性关系的因素主要有两个,一是光电子的初始能量分布;当时间分辨率(激光脉宽)为亚皮秒量级时,光电阴极发射的统计涨落现象是很严重的^[14-15]。实验中观察到,在散射紫外超短激光入射,光斑面积 4 mm² 情况下, GD-5002 光电管输出信号的前沿变化明显,在 100~120 ps 变化。从实际可以控制的情况来看,目前能够改进的是尽可能增大探测器的有效受照面积^[16];其次是空间电荷效应,这个效应主要出现在光电阴极附近及电子束的交叉点,它会导致探测器输出脉冲变宽。考虑到薄膜闪烁体材料的荧光光强较小,不可能接近 GD-5002 光电管线性动态范围的上限,所以在测试中将测试工作点取在线性动态范围的下限,即最小可探测强度附近(选择信噪比均在 10 附近),如本文第三节图 6, 7 所示。

特别地,在用超短激光标定探测器时,光电阴极输出与输入的线性会进一步变差,因为某些低灵敏度阴极在超短激光作用下会出现双光子或者多光子效应^[17],因而破坏了线性关系。这种与冲击信号强度有关的非线性会出现在几乎所有的高速记录设备中。

6 结论

介绍了一套由 Compex 150 准分子激光系统(Lambda Physik)及 FAMP 染料激光系统构成的

紫外超短脉冲激光源。报道了利用该系统输出的 248 nm 紫外超短脉冲激光进行的 ZnO : Ga 超快闪烁体材料荧光特性实验。结果显示,本文讨论的 ZnO : Ga 闪烁体荧光时间特性测量能够集中反映紫外飞秒激光系统在用于超快(100 ps 以下)、微弱光信号测量下需要关注的问题。

由于目前缺少方便的超短 X 光源,或者其他

超短粒子束辐射源,许多辐射探测设备利用其对紫外光响应的特点进行时间响应特性的测试工作^[18]。对于两者之间能否等效以及等效关系如何,目前还缺少相关资料和实验研究工作,而且这方面的研究工作还可能涉及到利用激光来模拟其他强辐射效应研究,希望随着各种相关技术的发展能够越来越清楚地解决此类问题。

参考文献:

- [1] LEBEDEV A. A laser calibration system for the STAR TPC[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2002, 478: 163-165.
- [2] GABRIEL V S. The HARP TPC laser calibration system[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2004, 518: 132-134.
- [3] HANNA D, MUKHERJEE R. The laser calibration system for the STACEE ground-based gamma ray detector[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2002, A482: 271-280.
- [4] 赵卫, 刘晋升, 杨斌洲, 等. X 射线条纹相机紫外光时标研究[J]. *强激光与粒子束*, 1998, 10(1): 127-130.
ZHAO W, LIU J SH, YANG B ZH, *et al.*. Calibration Reaserch of X-ray streak camera with UV laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, 10(1): 127-130. (in Chinese)
- [5] 刘天夫, 张步新. 皮秒条纹相机的标定[J]. *物理*, 1999, 28(4): 241-243.
LIU T F, ZHANG B X. Calibration of picosecond streak camera[J]. *Physics*, 1999, 28(4): 241-243. (in Chinese)
- [6] 易荣清, 郑志坚, 胡昕, 等. 条纹相机静态能量响应的绝对标定[J]. *高能物理与核物理*, 2003, 27(5): 452-454.
YI R Q, ZHENG ZH J, HU Y. Absolute calibtation of streak camera's static energy response[J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2003, 27(5): 452-454. (in Chinese)
- [7] 刘永刚, 彭晓世, 汤小青. 光学条纹相机扫描速度和非线性测试[J]. *核电子学与探测技术*, 2004, 24(2): 218-220.
LIU Y G, PENG X SH, TANG X Q. Test of scanning speed and noliner character of optical streak camera[J]. *Nuclear electronics and detection techniques*, 2004, 24(2): 218-220. (in Chinese)
- [8] SZATMARI S, SCHAFFER F P. Subpicosecond, widely tunable distributed feedback dye laser [J]. *Applied Physics B*, 1988, 46: 305-311.
- [9] 张永生, 颜立新, 等. 分布反馈染料激光器实验研究 [J]. *红外与激光工程*, 2005, 34(2): 155-157.
ZHANG Y S, YAN L X. Experimental study of distributed feedback dye lasers [J]. *Infrared and laser engineering*, 2005, 34(2): 155-157. (in Chinese)
- [10] Femtosecond Laser System Instruction Manual, March 1995.
- [11] 王晓耘. 超高速光电管中银氧铯光电阴极的研究 [J]. *光电子技术*, 2004, 24, 2: 81-83.
WANG X Y. Study of Ag-O-Se photoelectronic cathode of ultrafast phototube [J]. *Photoelectronic Techniques*, 2004, 24(2): 81-83. (in Chinese)
- [12] SROKA J. Oscilloscope influence on the calibration uncertainty of the pulse rise time of ESD simulators [J]. *IEEE*, 2003: 378-381.
- [13] DERENZO S E, WEBER M J, MOSES W W, *et al.*. Measurements of the intrinsic rise times of common inorganic scintillators1 [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science* [J], 2000, 47(3): 860-864.
- [14] HARA T, TANAKA Y, KITAMURA H, *et al.*. Observation of hard X-ray pluses with a highly sensitive streak camera [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2001, 457(9): 1125-1128.
- [15] 徐大纶. 变像管高速摄影 [M]. 北京: 科学出版社, 1990.
XU D L. *High Speed Photography with Photoconverter* [M]. Beijing: Science Press, 1990. (in Chinese)
- [16] 吕敏. 脉冲射线束测量中的统计起伏问题 [J]. *物理学报*, 1983, 32(2): 216-224.
LV M. Statistic flucturation of pulsed radiation measurement [J]. *Physics Letter*, 1983, 32, 2: 216-224. (in Chinese)

- [17] 李禄华. 快速强流光电管的时间特性研究[J]. 原子能科学技术, 1975, 2(2): 354-360.
LI L H. Time characters study of ultrafast high current phototube[J]. *Science and Technology of Atomic Energy*, 1975, 2(2): 354-360. (in Chinese)
- [18] BLANKESPOOR S C, DERENZO S E, MOSES W W. Characterization of a pulsed X-ray source for fluorescent lifetime measurements [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1994, 41 (4): 698-702.

作者简介:

张永生(1973—), 辽宁朝阳人, 副研究员, 主要从事高功率准分子激光技术及其应用方面的研究。E-mail: zhangysh_2006@yahoo. com. cn

郑国鑫(1979—), 男, 陕西安康人, 助理研究员, 2003 年于兰州大学获得学士学位, 主要从事高功率激光技术的研究。E-mail: zgclean@sina. com

● 下期预告

星载 TDI CCD 动态成像全物理仿真系统研究

张 刘¹, 孙志远^{1,2}, 金 光¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 130039)

基于高精度卫星姿态控制仿真三轴气浮台, 研制了高精度的卫星姿态控制仿真子系统, 为地面 TDI CCD 动态成像仿真系统提供一个真实的仿真环境, 同时根据 TDI CCD 实际成像原理, 采用软件模拟来替代实际线阵相机的 TDI 电荷转移迭加过程的方法, 研制了基于面阵 CCD 的星载 TDI CCD 动态成像仿真系统。利用该系统, 不仅可实现最高指向控制精度为 0.1° , 姿态稳定度为 $0.01^\circ/\text{s}$ 的卫星姿态控制仿真实验, 还可模拟积分时间为 0.1 s 的 TDI CCD 相机 4-16 级动态成像过程, 研究卫星姿态对 TDI CCD 相机拍照的影响情况及进行实际航天高性能 TDI CCD 相机成像建模理论的正确性。由进行的像移速度匹配误差为 0 及姿态稳定度大于 $0.01^\circ/\text{s}$ 时的实验结果可以看出: 物理仿真结果、数学仿真结果与理论分析基本一致, 不仅验证了该平台物理仿真方案的正确性, 也初步验证了航天 CCD 成像建模理论的正确性。