

# 科学级光学 CCD 非线性特性测试

程书博<sup>1,2</sup> 张惠鸽<sup>2\*</sup> 王哲斌<sup>2</sup> 易有根<sup>1</sup> 张琛<sup>2</sup> 刘浩<sup>2</sup> 郑志坚<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中南大学物理科学与技术学院, 湖南 长沙 410083  
<sup>2</sup> 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 在惯性约束聚变(ICF)实验研究中,科学级 CCD 常和光谱仪、条纹相机等诊断设备组合进行冲击波等物理过程的时间、空间方面的诊断研究。非线性作为 CCD 一个非常重要的性能参数,在实验的后处理过程中有着相当重要的作用,实验分别采取固定曝光时间,改变光源的出射功率密度、固定光源的输出功率密度和改变 CCD 的曝光时间两种方案对 TEK 512×512DB CCD 的非线性特性进行测试,计算得到两种实验方案下该 CCD 的非线性度分别为 0.595% 和 0.508%,并通过对各种因素的评估得到第一种标定方案为最佳,为科学级 CCD 的性能参数自动测试平台的建立提供参考。

**关键词** 测量;科学级 CCD;条纹相机;非线性

**中图分类号** TN386.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0404001

## Nonlinearity Property Testing of the Scientific Grade Optical CCD

Cheng Shubo<sup>1,2</sup> Zhang Huige<sup>2</sup> Wang Zhebin<sup>2</sup> Yi Yougen<sup>1</sup> Zhang Chen<sup>2</sup>  
Liu Hao<sup>2</sup> Zheng Zhijian<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> School of Physics Science and Technology, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)  
(<sup>2</sup> Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering and Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** In inertial confinement fusion (ICF) experimental studies, scientific-grade CCD coupled with streak camera is widely used in time and space diagnosis experiment with physical processes such as shock wave. As a significant property of the scientific grade CCD, nonlinearity plays an important role in experimental dealing. The experiment tests the nonlinearity property of the TEK 512×512DB CCD with the two schemes respectively: that the exposure time is fixed, the power density of the RS-5B is varied; power density is fixed, the exposure time is varied, and it shows the nonlinearity of the CCD is 0.595% and 0.508% respectively, meanwhile, the two experimental scheme are evaluated by analyzing kinds of factors, indicating that the first scheme is better, which provides the reference for establishment of automated testing platform.

**Key words** measurement; scientific-grade CCD; streak camera; nonlinearity

**OCIS codes** 040.1520; 040.5160; 040.1490

## 1 引言

科学级 CCD 相机与普通 CCD 相机相比,它以其噪声低、灵敏度高、量子效率高、线性度好、动态范围大和空间分辨率高等优越性能颇受科研领域的青

睐<sup>[1,2]</sup>。在惯性约束聚变(ICF)实验研究中,科学级 CCD 经常和条纹相机、光谱仪等组合进行散射光特性、冲击波传输等物理过程的时间和空间等方面的诊断研究<sup>[3~9]</sup>,非线性度作为一个重要参数,直接影

**收稿日期**: 2011-09-26; **收到修改稿日期**: 2011-11-04

**基金项目**: 国家自然科学基金(11005097)、中国工程物理研究院科学技术发展基金(2010A0102003)和中南大学研究生教育创新工程基金(2010ssxt128)资助课题。

**作者简介**: 程书博(1986—),男,硕士研究生,主要从事光学精密器件方向的研究。E-mail: ccssbb-06@163.com

**导师简介**: 易有根(1965—),男,博士,教授,主要从事原子分子物理方面的研究。E-mail: yougenyi@163.com

\* **通信联系人**。E-mail: huigezhang@126.com

响实验准确度,所以需要在这种性能参数进行的精确性标定。

科学级光学 CCD 线性度,是指 CCD 相机产生的电信号与入射光强的线性关系。在科学领域,响应的线性度是必须考虑的参数,理想情况下每个像素都可被视为一个高保真的光子测量器件,它产生的电信号与入射光强成正比。在理想情况下,CCD 入射信号和最终数字输出计数之间满足一定的关系,即在 CCD 的动态范围内,输出图像计数随入射光强增加而线性变化<sup>[10]</sup>。国内已经有不少人对 CCD 的非线性特性进行了测试,不过侧重的角度不同,董怡等<sup>[11]</sup>利用查表转换法来完成对 CCD 的非线性特性的测试,该方法的优点是无需知道光照度的具体值,陈家凤等<sup>[12]</sup>利用由光源、积分球、高精度直流恒流电源、高精度照度计、待测面阵 CCD 器件及图像采集系统与计算机组成的系统对 CCD 的非线性特性进行检测,精度上相当可靠,同时利用积分球提供均匀光也是很好的举措。考虑到 ICF 实验过程中测试平台及方案的应用稳定性、可靠性和便捷性,在已知 CCD 机械快门时间响应特性之后,本

文分别采取两种方案对 CCD 的非线性进行测试,首先在稳定波长的照射下,通过改变曝光时间采集系列图像获取其图像的均值计数,从而得到一系列测量数值;其次通过固定曝光时间,改变入射光的功率,来采集系列的平场图,从而得到一系列的测量值,最后对两种方案进行评测。

## 2 CCD 非线性特性测试

采用 Scientific Gamma 公司的 RS-5B 光源作为准单色均匀光源同时利用光源自带的可 NIST 溯源的标准探头 DR-2550 对 TEK 512×512DB CCD 的非线性特性进行测试研究,实验设置 RS-5B 光源产生 593 nm 的准单色光,CCD 的制冷温度为 -20 ℃,分别采取固定曝光时间、改变光源的出射功率密度和固定光源的输出功率密度改变 CCD 的曝光时间两种方案对该 CCD 的非线性特性进行测试。实验排布图如图 1 所示(基本保证 CCD 和 DR-2550 的光敏面在同一平面上)。

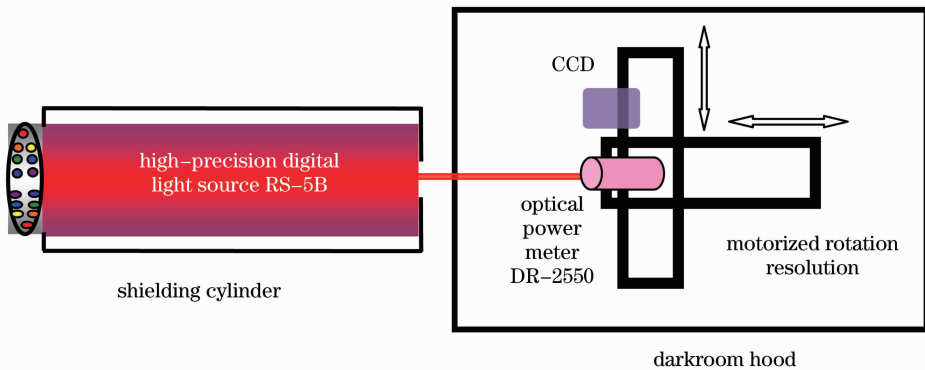


图 1 CCD 非线性特性测试系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the system for the test nonlinearity property of CCD

### 2.1 固定曝光时间、改变光源的出射功率密度

采用固定曝光时间、改变入射光功率密度的方法来测试 CCD 的非线性特性,可以避免曝光时间带来的不确定性,但是由于 TEK 512×512DB CCD 自带有机快门,同时 Gamma Scientific 公司高精度数字式可调准单色光源 RS-5B 所自带的可 NIST 溯源的标准探头 DR-2550 前面带有一个收光镜头,使得该探头无法精确地测得进入该 CCD 光敏面的光的功率密度,所测得的强度值不能够用来评定 CCD 的非线性特性,又由于特定情况下光源的非线性特性基本不会改变,所以可以间接地利用光源的标称输出功率密度和实际输出功率的线性关系特

性,通过分析光源的标称功率密度与 CCD 的总计数的线性关系进一步评估 CCD 本身的非线性特性。按图 1 所示的实验图进行实验,实验之前利用 DR-2550 标准探头对环境光的稳定性进行测试,实验持续 30 min,得到环境光的不稳定性仅为 0.2%。实验设置 CCD 的曝光时间为 20 ms,选定 CCD 读出类型 fast 及速率 100 kHz,设置光源的输出波长为 593 nm,功率密度从 0.002~1.592  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  连续变化。具体操作如下:

- 1) 在暗室环境下关闭光源利用 CCD 采集多幅暗场图像并形成一幅主暗场图;
- 2) 固定 CCD 曝光时间为 20 ms,设置光源输出

标称功率密度为  $0.002 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，用探头测试光源出射光功率密度，然后利用二维电动平移台将 CCD 调节到图 1 中探头所在的位置并采集多幅平场图像；

3) 改变光的强度分别为  $0.004, 0.006, 0.008, 0.010, 0.015, 0.020, 0.025 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  等，重复实验步骤 2)；

4) 绘出特定标称功率和该功率下每幅图像平均计数值之间的关系曲线，然后用最小二乘法进行曲线拟合；绘出特定功率密度和实际输出功率密度

之间的关系曲线，然后进行线性拟合；

5) 求出拟合点和原来测量值之间的偏差，分别找出最大和最小偏差，两者绝对值之和除以线性内的最大计数值即为其非线性度。

分析实验数据得到光源的标称功率密度与 CCD 计数之间的线性关系如图 2 所示，同时也得到光源 RS-5B 标称功率密度与实际输出功率密度之间的线性关系曲线如图 3 所示，其中 ADU 为 CCD 计数单位。

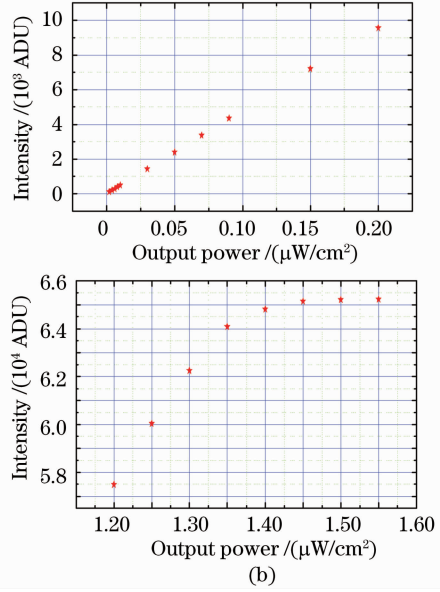
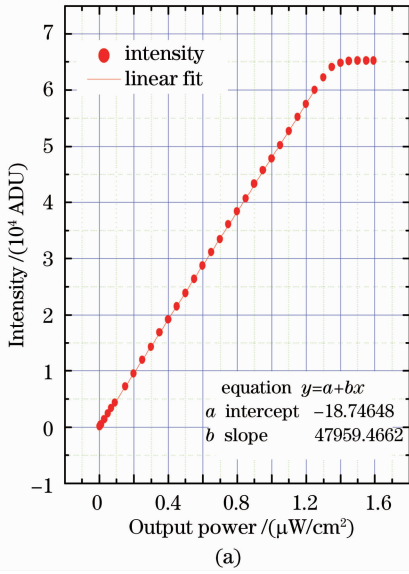


图 2 标称功率密度与 CCD 计数的关系曲线

Fig. 2 Relation graph of nominal power density and counts of the CCD

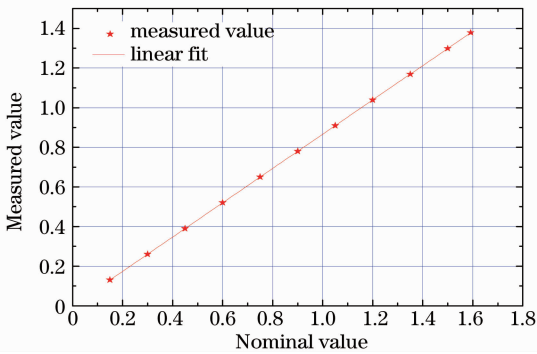


图 3 光源标称功率密度和实际输出功率密度的曲线关系图

Fig. 3 Graph of the nominal and actual power density

设置曝光时间  $20 \text{ ms}$ ，根据快门时间响应特性知道这时 CCD 机械快门是完全打开的，所以测试结果无需考虑快门的因素。图 2(a) 为 CCD 计数与标称功率密度之间的线性关系。图 2(b) 在较小功率密度范围和接近饱和计数范围两个区段分别展示了该 CCD 的线性度，可以看出小范围内 CCD 的线性

度是很好的，当 CCD 接近饱和时 CCD 的非线性明显增大。从整体上来说， $1.25 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  这点可以作为 CCD 线性范围内的最后一点，因此利用这一点之前的所有数据进行拟合 [如图 2(a) 所示] 并且利用线性拟合偏离的方法来衡量该 CCD 的非线性度为  $0.66\%$ 。

光源的标称功率密度记为  $p_1$ ，出射光功率密度记为  $p_2$ ，CCD 的计数记为  $A$ ，对于光源的标称功率密度与输出功率密度之间的关系式为  $p_2 = k p_1$ ，CCD 的入射光功率密度与其计数之间的关系式为  $A = k_1 p_2$ ，很容易得到  $A/p_1 = k_1 k$ 。很明显可以看出，当利用光源功率密度的标称值与 CCD 的计数之间的线性关系来间接衡量 CCD 的非线性时受光源本身出射光功率密度与标称功率密度之间的非线性关系的影响较大，只有当光源本身的非线性非常小甚至可以忽略时，才可以认为利用光源标称功率密度与 CCD 计数的非线性关系来衡量该 CCD 自身的非线性是可行的。通过这种方案实验得到 CCD 的

非线性为 0.66%，同时经过实验测得光源的标称功率与输出功率的线性斜率为 0.86562，其非线性度表征为 0.02%；CCD 总计数与光源标称功率的线性斜率为 47959.46628，其非线性度表征为 0.66%，很容易得到 CCD 的入射光功率密度与其计数之间的线性拟合斜率为 55404.76。由于这两种非线性关系并不是独立的，可以近似地认为 CCD 总计数与入射到其光敏面上光的非线性度表征为两个非线性度表征的平方差，得到结果为 0.595%。光源标称功率和实际输出功率的非线性对 CCD 自身非线性的相对影响为 10.9%。

### 2.2 固定光源的输出功率密度, 改变 CCD 曝光时间

采取固定光源的输出功率密度、改变 CCD 曝光时间的方法来评估 CCD 的非线性特性有一个好处就是避免直接测量进入 CCD 面阵上的光的功率密度，同时也减小了光源本身不稳定性的影响。由于光源的出射功率密度是固定的，所以只需要改变曝光时间，通过衡量 CCD 的总计数与曝光时间的线性特性来得到 CCD 的非线性特性。实验过程中 CCD 自带机械快门时间响应特性会影响 CCD 非线性特性的测试，虽然不能够消除这个影响，但是能够估测出这个影响对 CCD 非线性特性的影响大小，方便对实验精度的把握。在实验过程中固定光源功率密度并且将 RS-5B 自带探头 DR-2550 放置在与 CCD 的光敏面同一平面上(如图 1 所示)，每隔 3 min 测量 1 次并记录出射光的功率密度，共测量 27 min，通过计算得到对 CCD 总计数的影响。不稳定性体现在 CCD 线性工作区间内，同一时间段内的总计数的波动。

在特定功率的均匀光照射下，通过逐渐增加曝光时间来改变入射光的总功率，考虑到对 CCD 的机械快门时间响应的估测结果，可以设置最短曝光时间为 22 ms，在已经测得主偏置图的前提下，重复测量 CCD 的一系列平场图。实验步骤如下：

- 1) 首先采集标定环境下的背景图像，包括环境光计数、暗电流计数、读出噪声计数，并将背景图像存储在特定目录中；
- 2) 采集软件中设置减除背景图像，设置输出波长为 593 nm；
- 3) 依次设置不同的曝光时间，采集稳定光源照射下的系列曝光平场图像。记下计数的平均值，经 bias 校正并且经过快门时间响应校正(尤其是短时曝光)；
- 4) 绘出曝光时间和该时间下每幅图像平均计数值间的曲线并用最小二乘法进行曲线拟合；

5) 求拟合点和原来测量值之间的偏差，分别找出最大和最小偏差，两者绝对值之和除以线性内的最大计数值即为其非线性度。

得到的 CCD 的非线性特性曲线如图 4 所示。据图 4 中局部曲线关系图可知 4700 ms 这一点是 CCD 线性关系区段的终点(从右下角曲线图中两个被圈住的部分很显然可以看到有很大的线性变化)，所以在衡量其线性度的时候就取其线性部分进行拟合，CCD 计数与曝光时间的整体曲线关系图如图 4 所示。对 18~4700 ms 的数据进行线性拟合得到拟合斜率为 13.0415，其标准误差(standard error)为 0.00564，并通过线性拟合偏离的方法得到该 CCD 的非线性度为 0.579%。为了基本消除 CCD 机械快门时间响应对 CCD 的总计数的影响，在得到的总计数基础上减去前 18 s 内的总计数然后对新的数

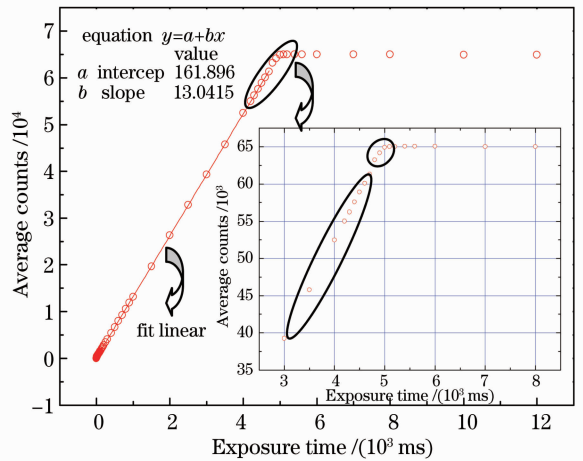


图 4 未经快门时间响应校正的曲线关系

Fig. 4 Curves without the shutter response corrected

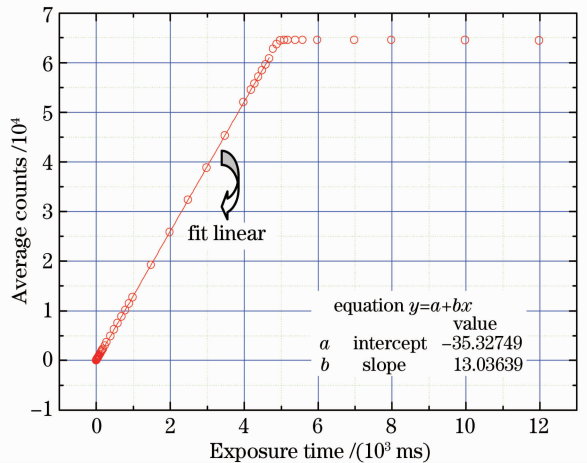


图 5 经快门时间响应校正的 CCD 非线性特性关系曲线

Fig. 5 Nonlinearity property of CCD curves with the shutter response corrected

据进行线性拟合,所绘制的曲线关系如图 5 所示。按照未校正曲线关系的处理过程,得到拟合斜率为 13.03639,其标准误差为 0.0042,非线性度为 0.508%,校正后的拟合斜率标准误差要小于未校准的拟合斜率,很显然快门的时间响应特性对 CCD 的非线性特性是有一定影响的,经过计算可以得到其对 CCD 非线性的相对影响到达 13.98%。

表 1 CCD 计数比较

Table 1 Comparison of CCD counts

Experimental number	1	2	3	4	5	6	7	8
Time /ms	0~100	100~200	0~500	500~1000	0~1000	1000~2000	2000~3000	3000~4000
CCD counts	1485.54	1305.68	6676.57	6489.89	13189.47	13065.67	12993.13	13135.77

根据对该 CCD 机械快门时间响应特性的测试,可知 18 ms 之后 CCD 处于线性工作区域,现分别比较表 1 中 1 与 2 组,3 与 4 组,发现线性段 100 ms 与 500 ms 内 CCD 的总计数分别小于开始前 100 ms (0~100 ms)、500 ms(0~500 ms)内的计数。考虑 CCD 机械快门的一个很简单情况,先设定快门打开的速率为  $v$ ,那么在时间  $t$  内,快门打开的面积为

$$s = \pi v^2 t^2, \quad (1)$$

打开面积随时间的变化率为

$$ds = 2\pi v^2 t dt, \quad (2)$$

当快门闭合的时候,设全开时的半径为  $r_0$ ,那么经过时间  $t$ ,快门打开的面积为

$$s = \pi(r_0 - vt)^2, \quad (3)$$

那么快门闭合率为

$$ds = 2\pi v^2 t dt - 2\pi r_0 v. \quad (4)$$

显然在同样的时间内,快门开得快,在这段时间内损失的计数小,而快门闭合的速度慢,导致 CCD 计数会增加。

比较表 1 中 6~8 组,这三组数据中线性部分 1 s(1000~2000,2000~3000 和 3000~4000)内的总计数分别为 13065.67,12993.137,13235.77,偏离平均为 91.72,平均偏离程度为 0.7%,这主要是由于光源本身的不稳定性。再将这 3 组数据线性部分 1 s 内的计数数同开始 0~1 s 内的总计数相比较得到偏离值分别为 123.8,196.13 和 46.3,在实际值中占有的比重分别为 0.95%,1.51% 和 -0.35%。在这种情况下,机械快门时间响应对 CCD 总计数的影响为 0.94%。

### 3 结 论

采用 Scientific Gamma 公司生产的 RS-5B 光源以及该光源自带的可 NIST 溯源的标准探头 DR-

在 CCD 机械快门时间响应的测试实验中测得 CCD 自带机械快门完全打开的时间是 18 ms,评估该快门时间响应对 CCD 计数的影响,就是找出在该响应时间内 CCD 丢失或增加的计数,并衡量其在 CCD 总计数中的影响程度的大小。CCD 计数比较由表 1 所示。

2550,分别采取固定曝光时间、改变光源的出射功率密度和固定光源的输出功率密度、改变 CCD 的曝光时间两种方案对该 CCD 的非线性特性进行测试,分别得到两种方案下 CCD 的非线性度分别为 0.595% 和 0.508%,同时得到光源标称功率和实际输出功率的非线性对 CCD 自身非线性的相对影响为 10.9%,快门的时间响应特性对 CCD 的非线性特性相对影响到达 13.98%。在稳定的光源条件下,考虑到固定曝光时间、改变功率密度方案的实验操作简便性,选择后一种方案作为科学级 CCD 自动化检测平台的最佳方案,为即将进行科学级 CCD 以及冲击波诊断设备的自动化平台的建立提供了一个可信的方案同时,也为后期的处理提供了参照。

### 参 考 文 献

- Li Ende, Duan Haifeng, Yang Zeping *et al.*. Method of calibrating CCD optics-electron characteristic [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(2): 227~229  
李恩德,段海峰,杨泽平等. 电荷耦合器件光电响应特性标定研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(2): 227~229
- Yang Jiamin, Yi Rongqing, Chen Zhenglin *et al.*. Experimental calibration of response curves for soft X-ray film 5FW on synchrotron radiation [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, **10**(1): 131~134  
杨家敏,易荣清,陈正林等. 5FW 软 X 光胶片响应在同步辐射源上的实验标定[J]. *强激光与粒子束*, 1998, **10**(1): 131~134
- Wang Chuanke, Liu Shenye, Wang Zhebin *et al.*. A method for calibrating the system efficiency of optical multichannel analyzer and CCD [J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2006, **19**(2): 25~29  
王传珂,刘慎业,王哲斌等. 光学多道谱仪和 CCD 组合系统的效率曲线标定[J]. *光电子技术与信息*, 2006, **19**(2): 25~29
- V. N. Rai, M. Shukla, R. K. Khardekar *et al.*. A picosecond optical pulse generator to calibrate the optical streak camera[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, **66**(5): 513~549
- D. S. Montgomery, R. A. Lerche, C. W. Laumann *et al.*. Evaluating the accuracy of optical-streak-camera sweep rates using uncertain data[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1992, **63**(10): 4322~4326
- D. J. Bradley, B. Liddy, W. E. Sleat. Direct linear

- measurement of ultrashort light pulses with a picosecond streak camera[J]. *Opt. Commun.*, 1971, **2**(8): 391~395
- 7 Wang Feng, Peng Xiaoshi, Liu Shenyue *et al.*. Ionization effect in the transparent window for shock-wave diagnosis under indirect drive [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0312002  
王 峰, 彭晓世, 刘慎业 等. 辐射驱动条件下冲击波诊断用透明窗口离化现象研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0312002
- 8 Peng Xiaoshi, Wang Feng, Liu Shenyue *et al.*. Development of an imaging velocity interferometer system for any reflector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3207~3211  
彭晓世, 王 峰, 刘慎业 等. 成像型任意反射面速度干涉仪研制[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3207~3211
- 9 Wang Feng, Peng Xiaoshi, Liu Shenyue *et al.*. Shock wave velocity calculation under X-ray preheat effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1327~1331  
王 峰, 彭晓世, 刘慎业 等. 预热效应影响下冲击波速度推算方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1327~1331
- 10 Zhang Huige, Wang Zhebin, Yang Cunbang *et al.*. Linearity slope and nonlinear scale for CCD sampling and collecting system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(8): 1313~1316  
张惠鸽, 王哲斌, 杨存榜 等. CCD采集系统线性斜率及非线性研究[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(8): 1313~1316
- 11 Dong Yi, Wang Fu, Cheng Shoucheng *et al.*. Nonlinear response measurement of planar CCD [J]. *J. Ordnance Engineering College*, 2001, **13**(4): 39~42  
董 怡, 王 斧, 程守澄 等. 面阵 CCD 非线性响应的测量[J]. *军械工程学院学报*, 2001, **13**(4): 39~42
- 12 Chen Jiafeng, Chen Haiqing, Chen Zhuo. Discussing on non-linearity of optoelectric conversion in area CCD camera [J]. *Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2002, **30**(10): 99~101  
陈家凤, 陈海清, 陈 卓. 面阵 CCD 各像元光电变换非线性程度探讨[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2002, **30**(10): 99~101

栏目编辑:何卓铭