

科学级光学 CCD 暗电流及机械快门时间 响应特性测试

程书博^{1,2} 张惠鸽¹ 刘浩¹ 张琛¹ 王哲斌¹ 郑志坚¹ 易有根²

(¹ 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川, 绵阳 621900)

(² 中南大学物理科学与技术学院, 湖南 长沙 410083)

摘要 暗电流在科学级电荷耦合器件(CCD)长时间曝光测试实验中是主要的噪声之一。实验测试了暗电流信号平均计数随曝光时间的变化关系,并经过计算得出 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下暗电流分别为 $2.43\text{ ADU}/(\text{s}\cdot\text{pixel})$ 和 $0.4854\text{ ADU}/(\text{s}\cdot\text{pixel})$,同时测试了暗电流随 CCD 制冷温度的变化特性,结果显示暗电流随温度类似指数函数形式变化。由于 CCD 机械快门的时间响应特性对科学级光学 CCD 的短时曝光计数的影响比较大,实验测试了 CCD 平均计数和曝光时间的关系,得出实验所用的 TEK 512 pixel \times 512 pixel DB CCD 的机械快门在 18 ms 时能够完全打开。

关键词 光学器件;科学级电荷耦合器件;机械快门;暗电流;时间响应

中图分类号 TN386.5 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0204001

Performance Measurement of Mechanical Shutter and Dark Current for Scientific-Grade Optical CCD

Cheng Shubo^{1,2} Zhang Huige¹ Liu Hao¹ Zhang Chen¹

Wang Zhebin¹ Zheng Zhijian¹ Yi Yougen²

(¹ Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

(² School of Physics Science and Technology, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract During the long-period exposure experiment, the dark current noise of scientific grade charge coupled device (CCD) is one of the major noises, the relation of average dark current which is $2.43\text{ ADU}/(\text{s}\cdot\text{pixel})$ and $0.4854\text{ ADU}/(\text{s}\cdot\text{pixel})$ at $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ and exposure time are tested, respectively. The relation of dark current and temperature is tested. The result shows that the dark current varies with temperature exponentially. As the temporal response characteristics of mechanical shutter have a direct effect on the short time exposure of the CCD, the experiment also shows the relation of exposure time and the average counting of CCD. The result indicates that the mechanical shutter can be fully opened at 18 ms.

Key words optical devices; scientific-grade charge coupled device; mechanical shutter; dark current; temporal response

OCIS codes 040.1520; 040.5160; 040.1490

1 引 言

在惯性约束聚变(ICF)和高能量密度物理实验研究中,科学级光学电荷耦合器件(CCD)作为诊断记录器件,发挥着尤为重要的作用,它具有大动态范

围、高量子效率、低噪声和良好的线性特性等优点并且已经取代传统的感光胶片成为激光驱动冲击波研究等领域中应用最为广泛的诊断记录系统之一^[1~6]。暗电流作为科学级 CCD 的一个重要的噪

收稿日期: 2011-07-29; 收到修改稿日期: 2011-08-16

基金项目: 高温高密度等离子体物理国防重点实验室基金(9140C6801010901)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面的研究。E-mail: ccssbb-06@163.com

导师简介: 王哲斌(1978—),博士,主要从事等离子体物理诊断方面的研究。E-mail: zhebinw@vip.sina.com

声源,在 CCD 长时间曝光测量的时候表现得最为明显,同时也是图像还原过程中需要考虑的重要因素之一。本文通过测试暗电流信号平均计数或者热电子数目随时间变化的关系来确定 CCD 的暗电流大小,通过拟合计算得出在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下以模拟-数字转换计数值(ADU)为单位的暗电流分别为 $2.43\text{ ADU}/(\text{s}\cdot\text{pixel})$ 和 $0.4854\text{ ADU}/(\text{s}\cdot\text{pixel})$,同时对暗电流随温度的变化关系进行了测试,并将此结果与 PI 公司产品资料中的该类 CCD 典型的暗电流参数进行了对比性分析,充分说明暗电流受温度的影响非常大。

目前 ICF 研究领域多数科学级 CCD 采用内置电子快门或外置机械快门的方式来实现曝光测量中积分时间的控制,CCD 的机械快门特性对 CCD 的工作状态有重要的影响。实验发现 CCD 机械快门由于机械磨损和电子器件寿命等因素的影响,在使用过程中偶尔会出现不能完全打开或闭合的现象,从而导致 CCD 相机无法正常采集数据,这将严重影响实验数据获取的成功率。同时为了保证 CCD 不处于饱和计数状态,强信号测量中需要超短时间曝光测量,此时机械快门的时间响应特性将直接影响获取数据的准确性,实验通过测试 CCD 平均计数和积分时间的关系曲线,得出所采用的 $\text{TEK } 512\text{ pixel}\times 512\text{ pixel DB CCD}$ 的机械快门在 18 ms 时刻能够完全打开,因此在需要短时间曝光测量的实验中设置曝光时间要超过或者远超过 18 ms ,以保证 CCD 计数有较高的精度。

2 暗电流特性测试

热激发的电子跃迁到导带并被收集到 CCD 势阱里是影响 CCD 计数的一个重要因素,也是 CCD 固有的一种噪声源,甚至在没有曝光的情况下就会存在,它被称为暗电流。每个像素的暗电流是不均匀的,在暗场图中会经常看到个别暗电流非常高的像素(暗电流尖峰或者热像素),这些像素点一般是随机分布的,暗电流来源于三个方面:耗尽层产生的暗电流、衬底内产生的暗电流和 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 界面产生的暗电流。暗电流每时每刻地加入到信号电荷包中,不仅引起附加的散粒噪声,而且还占据越来越多的势阱容量^[7~9]。科学级 CCD 进行长时间弱光测量的时候,暗电流噪声会影响 CCD 的信噪比,虽然在图像校正过程中可以通过减去相同曝光时间下的暗场图来消除暗电流,但是这样会把该暗场图中的泊松噪声引入到图像中。为了减少读出噪声和泊松

噪声所引入的不确定度,要采集多幅暗场图并进行平均得到主暗场图,经过数据图像的处理得到暗电流信号平均计数和曝光时间的关系曲线并进行线性拟合得到其斜率就是暗电流的大小^[10],实验中为了对暗电流进行精确性地标定,主要使用偏置图和暗场图两种标定图像。

偏置图由 CCD 电路等各种内在结构决定,它是曝光时间为零、光照强度为零(实验在暗室环境中进行)的情况下获得的输出图像,这种条件下采集图像的输出计数值可以看作是只包含电路系统产生的读出噪声^[11]。CCD 面阵具有几十万到上百万的像素,各个像素之间的差异使得不同像素的读出噪声呈现不同的计数,所以实验中通常需要采集一定数目(10 幅或者更多)的偏置图然后将各幅图像同一位置像素进行比较,利用平均耦合方法生成一幅新的图像即主偏置图。

暗场图是在 CCD 内在电路结构以及 Si 材料热效应的影响下所产生的图像,设置入射光强为零同时设置曝光时间等于实际实验所设置的曝光时间,这种实验条件下采集的图像就是暗场图,这时候由时间积分产生的暗电流计数及读出电路结构产生的读出噪声计数都会附加到所采集的图像中。与偏置图类似,采集一定数目的暗场图(10 幅或者更多),然后利用平均耦合法生成一幅主暗场图。

2.1 暗电流测试

暗电流的典型特征是与曝光时间成正比,受温度影响比较大。实验设置曝光时间等于待采集图像的曝光时间,所采集图像的计数由暗电流计数、读出噪声计数和光生电荷计数组成。测试暗电流必须将读出的噪声计数和光生电荷计数从原图像中分离出来,设置快门常闭,实验在暗室环境中进行,光生电荷所引入的计数基本为零,同时用暗场图减去主偏置图可以消除读出噪声计数。

暗电流标定实验中,使用科学级 $512\text{ pixel}\times 512\text{ pixel}$ 背照型面阵 CCD,设置 CCD 的模数转换(ADC)类型为 16 bit 和 100 kHz ,全帧读出模式,实验中快门常闭,CCD 制冷温度和曝光时间可以设置系列变化。具体实验步骤:1)设置 CCD 制冷温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,待 CCD 稳定之后采集 10 幅偏置图,并生成一幅主偏置图;2)采集一系列曝光时间的暗场图各 10 幅,并分别生成它们的主暗场图;3)针对每个曝光时间,将主暗场图减去主偏置图得到由于时间积分效应累积的暗电流计数图像;4)以曝光时间为横坐标,以该曝光时间下得到的暗电流图像计数为

纵坐标描点并将这一系列数据进行最小二乘拟合,其斜率就是待标定 CCD 的暗电流,即固定温度下每秒每个像素的计数值;5)设置 CCD 制冷温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,重复步骤 1~4;6)固定曝光时间为 3 s,待 CCD 稳定后采集 10 幅偏置图,并生成一幅主偏置图;7)采集一系列制冷温度下的暗场图各 10 幅,并分别生成它们的主暗场图;8)针对每个温度,将主暗场图减去主偏置图得到对应的暗电流计数图像;9)以 CCD 制冷温度为横坐标,以该制冷温度下得到的暗电流图像计数为纵坐标描点并用平滑的曲线连

接各个数据点;10)设置 CCD 曝光时间为 5 s 重复步骤 6~9。

2.2 实验结果分析

对暗电流特性测试中的大量图像数据进行处理,获得一系列曝光时间下的暗电流累计平均计数后,对实验数据进行了最小二乘拟合,得到拟合线性曲线的斜率就是某一固定温度下的暗电流大小。经过数据分析,暗电流随曝光时间和 CCD 制冷温度的变化曲线如图 1 所示。

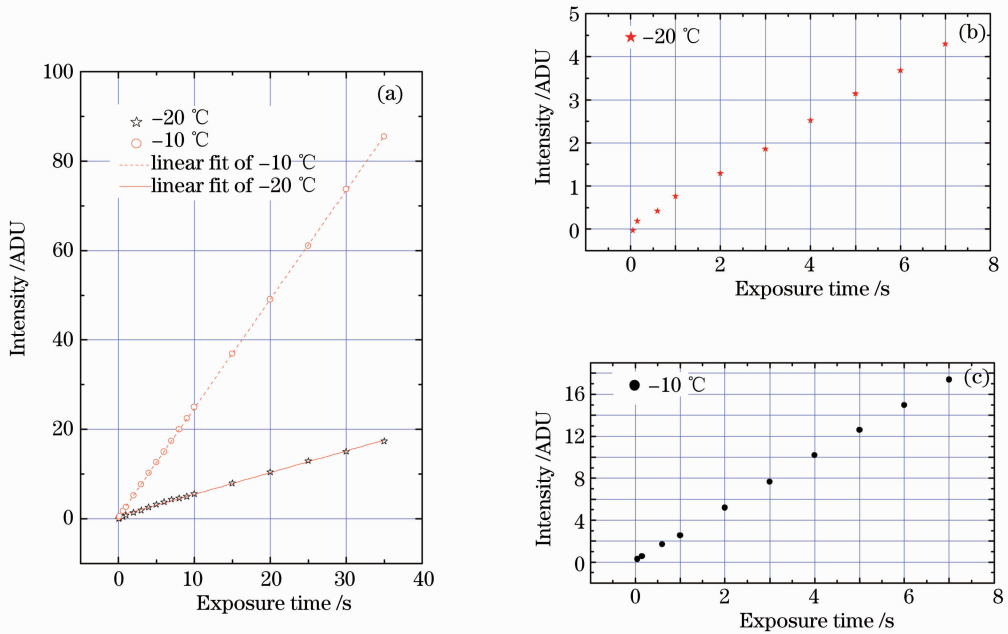


图 1 暗电流随曝光时间的变化

Fig. 1 Dark current versus exposure time

由于受到暗电流散粒噪声、偏置信号涨落的影响,对照图 1(b)和图 1(c)可见 1 s 内暗电流随曝光时间的变化均不稳定,因此只对 1 s 后的数据进行线性拟合,如图 1(a)所示,得到 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下以 ADU 为单位的暗电流信号计数随曝光时间变化的关系式分别为: $y = 0.37636 + 2.43x$ 和 $y = 0.5878 + 0.4854x$ 。因此该台 CCD 在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时以 ADU 为单位的暗电流分别为 $2.43\text{ ADU}/(\text{s}\cdot\text{pixel})$ 和 $0.4854\text{ ADU}/(\text{s}\cdot\text{pixel})$ 。

在文献[12]中,假定暗电流满足 Arrhenius 法则和 Meyer-Neldel 法则(MNR)得到暗电流

$$D_e^- = D_{e0}^- \exp\left[\Delta E\left(\frac{1}{E_{MN}} - \frac{1}{kT}\right)\right], \quad (1)$$

式中 D_e^- 指暗电流,以 e/s 为单位; ΔE 为激发能, D_{e0}^- 是一个等于 $1685\text{ e}/\text{s}$ 的常数因子, E_{MN} 等于 25.3 meV , k 是玻尔兹曼常数, T 是温度。根据(1)

式,绘制出 $-35\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 暗电流随温度变化的关系曲线,如图 2 所示。实验测得曝光时间为 3 s 和 5 s 时暗电流平均计数与 CCD 制冷温度的关系如图 2 所示,可见暗电流噪声随着温度类似指数形式减小,实验曲线变化趋势和 MNR 理论曲线变化趋势吻合,但是(1)式只说明暗电流随温度的变化关系没涉及到 CCD 的积分时间,所以实际测量的暗电流与(1)式结果有一定程度上的偏离,当温度很低的时候,暗电流噪声很小甚至可以被忽略,所以像素的整个暗电流信号计数接近一个较低的水平。如果图像采集过程中没有减偏置本底的话,曲线随着温度的降低应该趋于偏置水平,最终保持不变。

实验测得的暗电流数据和 CCD 的暗电流指标在一定程度上符合,在 PI 公司产品资料中查找到该类 CCD 典型的暗电流参数为 $6 \sim 8\text{ e}/(\text{s}\cdot\text{pixel})$ ($-50\text{ }^{\circ}\text{C}$)。产生这种偏差的因素:1)长期的使用和

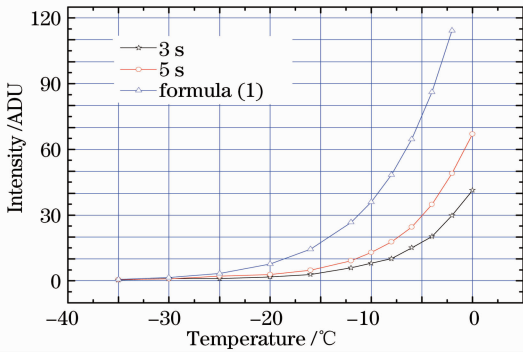


图 2 暗电流随制冷温度的变化

Fig. 2 Dark current versus refrigeration temperature

CCD 电路结构等器件的老化导致 CCD 的某些性能指标比如暗电流已经发生一定的偏差; 2) 温度对 CCD 暗电流的影响非常大, 可能导致数量级上的改变, Andor 公司相关 CCD 暗电流随温度变化趋势图表明这种情况的存在; 3) 暗电流散粒噪声和残留下来的少量读出噪声等对暗电流产生一定的影响, 曝光时间越长或者制冷温度越高影响会越明显。

3 快门时间响应特性测试

实验选择 512 pixel × 512 pixel 的背照型面阵 CCD 及其携带的机械快门, 选用美国 Scientific Gamma 公司生产的高精度数字式可调准单色光源 RS-5B, 自带 NIST (the National Institute of Standards and Technology) 溯源的标准探头 DR-2550, 光源光功率密度设置为 $0.01 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, 波长为 593 nm, CCD 制冷温度设置为 $-30 \text{ }^\circ\text{C}$, 小孔光阑全开。实验主要考察特定光强下, 不同曝光时间内 CCD 计数随曝光时间的变化关系。由于科学级 CCD 极其灵敏, 环境光和光源的稳定性将直接影响

实验精度, 因此在快门时间响应测试之前进行了环境光和光源稳定性测试。

3.1 环境光和光源稳定性测试

在暗室环境下利用 TEK 512 pixel × 512 pixel DB CCD 对实验过程中的环境光进行监测 1 h, 采样 20 次, 测得计数的平均值为 $11.9506 \text{ ADU} \cdot \text{s}$, 其不稳定性到达 0.65%。设置实验波长为 593 nm, 光源的输出功率密度为 $0.01 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, 实验过程中每 5 min 对光源进行一次测量, 共经历 45 min, 记录数据并进行分析, 得到该光源在实验时间范围内不稳定性小于 1%, 这主要受环境光散粒噪声以及 CCD 本身偏置信号涨落的影响, 不过能满足实验要求。

3.2 CCD 机械快门时间响应特性测试

实验通过不断延长积分时间获取 CCD 强度计数和快门曝光时间之间的关系如图 3 所示。图 3(a) 为从整个曝光时间范围和开始的短时间曝光的快门时间响应特性曲线, 由于受快门不完全打开的影响, 在开合时间内进入 CCD 光敏面的通光量不仅与积分时间相关, 还受到 CCD 快门开合程度的影响。在曲线开始 18 ms 之前有着明显的非线性, 所以将 18 ms 之后的数据分成 18~200 ms 与 18~4500 ms 两段进行拟合如图 3(b) 和 (c) 所示, 并采用线性偏离表征法 (分别找出拟合点和原来测量值之间偏差的最大值和最小值, 两者绝对值之和除以线性内的最大计数值) 分析得到这两段的线性拟合斜率分别为 12.84124 和 13.03515, 非线性分别为 0.84% 和 0.34%。无论是从小区域还是接近全区域的线性拟合都能看出 CCD 的线性特性并且能够一直维持到 CCD 的饱和计数点。因此可以认为 CCD 自带的机械快门在 18 ms 时可完全打开, 随着曝光时间的延

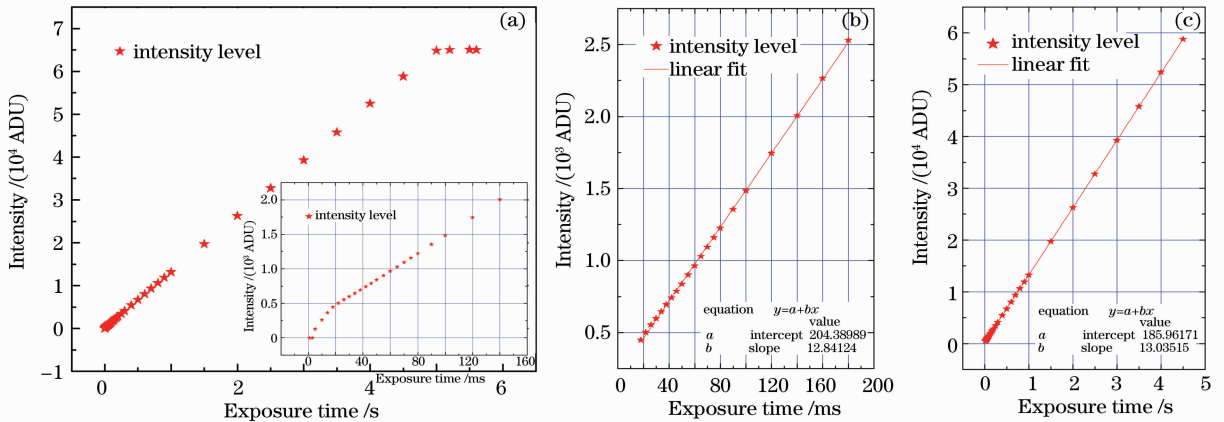


图 3 CCD 快门时间响应特性曲线

Fig. 3 Temporal response characteristic curve of mechanical shutter of the CCD

长由快门时间响应造成的计数偏差对 CCD 的总计数的影响越来越小,也说明在今后实验中使用此类型的机械快门进行短时间曝光测量或者连续多次采样的时候,设置的最短曝光时间要大于 18 ms。为了使快门时间响应对测量结果的影响更小可以合理设置更长的曝光时间。

实验结果受到各种因素的影响,环境光的不稳定性表现为散粒噪声对测量结果的影响,其带来的相对不确定度小于 1.5%。采用 DR-2550 标准探头对光源的稳定性进行验证性测量,发现和使用 CCD 测试的结果很接近,引入相对误差均小于 2%,从实验结果中可以看出快门的时间响应对短时间曝光的影响比较大。实验中使用的 CCD 自带机械快门由于磨损和未能完全打开等原因对 CCD 正常计数带来的影响仅有 0.4%,满足实验精度上的要求。

4 结 论

通过测试暗电流信号平均计数随时间变化的关系确定了 ICF 领域常用的 TEK 512 pixel×512 pixel DB CCD 的暗电流,实验结果显示暗电流大小与理论参考值相符,与曝光时间成正比,同时受温度的影响非常大,甚至在不同的温度下有数量级上的差别。对实验用 CCD 机械快门的时间响应特性进行了系统研究,结果表明该机械快门完全打开的最短时间响应为 18 ms。

参 考 文 献

- 1 Cai Wengui, Li Yongyuan, Xu Zhenhua *et al.*. Technology and Application of CCD [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1992. 11~12
蔡文贵,李永远,许振华等. CCD 技术及应用[M].北京:电子工业出版社,1992. 11~12
- 2 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
- 3 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
- 4 Peng Xiaoshi, Wang Feng, Liu Shenye *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
- 5 Wang Feng, Peng Xiaoshi, Liu Shenye *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
- 6 Wang Feng, Peng Xiaoshi, Liu Shenye *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子化现象研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0312002
- 7 R. Widenhorn, I. Hartwig, J. C. Dunlap *et al.*. Measurements of dark current in a CCD imager during light exposures [C]. *SPIE*, 2008, **6816**: 68160B
- 8 Wang Qingyou. CCD Application Technology [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2000. 52
王庆有. CCD 应用技术[M].天津:天津大学出版社,2000. 52
- 9 W. C. McColgin, J. P. Lavine, J. Kyan *et al.*. Dark current quantization in CCD image sensors [C]. International Electron Device Meeting, 1992, 113~116
- 10 R. Widenhorn, L. Mündermann, A. Rest *et al.*. Meyer-Neldel rule for dark current in charge-coupled devices [J]. *J. Appl. Phys.*, 2001, **89**(12): 8179~8182
- 11 Zhang Huige, Yang Cunbang, Zhang Wenhai *et al.*. Calibration of readout noise for scientific CCD system [J]. *Opt. & Optoelectron. Technol.*, 2007, **5**(5): 9~11
张惠鸽,杨存榜,张文海等. 用于激光聚变的科学级 CCD 读出噪声标定[J]. *光学与光电技术*, 2007, **5**(5): 9~11
- 12 R. Widenhorn, M. M. Blouke, A. Weber *et al.*. Temperature dependence of dark current in a CCD [C]. *SPIE*, 2002, **4669**: 193~201

栏目编辑:韩峰