

文章编号 1004-924X(2017)10-2676-06

## CMOS 图像传感器光子转移曲线辐照后的退化机理

冯 婕, 李豫东\*, 文 林, 周 东, 马林东

(中国科学院 新疆理化技术研究所 材料物理与化学研究室, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:**针对 EMVA 1288 标准测试辐照后互补金属氧化物半导体(CMOS)图像传感器的重要性能参数(光子转移曲线和转换增益)适用范围受限的问题,提出了针对辐照后 CMOS 图像传感器光子转移曲线和转换增益的改进的测试方法。该方法通过调整测试条件,限制辐照后 CMOS 图像传感器的暗电流和暗电流非均匀性噪声,求解出辐照后正确的器件性能参数,从而直观地得知辐照所引起的器件性能变化。利用该方法进行了实验测试,结果显示:辐照导致转换增益比辐照前退化了 7.82%。依据此结果分析了辐照导致光子转移曲线和转换增益退化的机理,认为转换增益的退化是由于质子辐射引起的电离效应和位移效应导致暗电流、暗电流非均匀性增大所致。本文为掌握 CMOS 图像传感器的空间辐射效应提供了理论基础。

**关键词:**CMOS 图像传感器;辐照;光子转移曲线;转换增益

**中图分类号:**TP212.16;O536 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172510.2676

## Degradation mechanism for photon transfer curve of CMOS image sensor after irradiation

FENG Jie, LI Yu-dong\*, WEN Lin, ZHOU Dong, MA Lin-dong

(Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry,  
Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

\* Corresponding author, E-mail: lydong@ms.xjb.ac.cn

**Abstract:** As application scopes of photon transfer curve and conversion gain of a CMOS (Complementary Metal-oxide-Semiconductor) image sensor are limited after irradiated by EMVA 1288 standard testing, an improved testing method of photon transfer curve and conversion gain of CMOS image sensor is presented. By adjusting test conditions, the method limits the dark current and the non-uniform noise of dark current from the CMOS image sensor after irradiation to solve the correct device parameters. By which the device performance changes caused by irradiation are intuitively obtained. An experimental test is performed with the proposed method, and the results show that the switching gain caused by irradiation is reduced by 7.82%. On the basis of the results, the degradation mechanism of photon transfer curve and conversion gain of the CMOS caused by irradiation is analyzed. The results point out that conversion gain degradation comes from the increases of dark current and the non-uni-

收稿日期:2017-06-02;修订日期:2017-06-29.

基金项目:中国科学院西部之光重点资助项目(No. ZD201301);新疆维吾尔自治区青年科技创新人才培养工程资助项目(No. qn2015yx035);中国科学院西部之光青年博士资助项目(No. XBBS201316);中科院西部之光西部青年学者 B 类项目(No. 2016-QNXZ-B-2);中国科学院青年创新促进会资助项目

form noise of dark current caused by the proton radiation ionization effect and displacement effect. The paper provides a theoretical basis for mastering the spatial radiation effect of CMOS image sensors.

**Key words:** CMOS image sensor; irradiation; photon transfer curve; conversion gain

## 1 引 言

光电成像器件是利用光电效应将光辐射图像转换为可观察、记录、传输、存储以及处理的信息转换器件的总称。光电成像器件广泛应用在各类空间光学卫星和有效载荷中,由于能够实时获得图像,目前已成为对地遥感侦察、目标监视、星敏感器等空间光电系统中不可缺少的核心器件<sup>[1-4]</sup>。互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)图像传感器与电荷耦合器件(Charge-Coupled Device, CCD)是目前普遍采用的两种光电成像器件。与 CCD 相比,CMOS 具有单片集成、可靠性高、单电压、功耗低和成本低等明显优势,正在逐渐占据对体积和重量有苛刻要求的空间中低端成像领域,广泛应用于星敏感器、太阳敏感器、微纳卫星遥感、卫星姿态控制、飞船可视系统和空间视觉监控等各个方面<sup>[5-7]</sup>。随着大规模集成电路工艺制造技术的进步,部分高性能 CMOS 图像传感器的灵敏度及噪声性能已接近 CCD 的水平,在国内外空间高端成像领域正逐渐取代 CCD。

航天器所处的天然空间辐射环境中,辐射主要来源于银河宇宙射线、太阳宇宙射线以及围绕地球的地磁俘获带辐射。辐射环境中的高能带电粒子作用于 CMOS 图像传感器会对它的性能参数产生影响<sup>[1,8-9]</sup>。目前国内多采用图像对比、目视法,或者不提取参数直接对比辐照前后图像灰度值等方法来测试 CMOS 图像传感器性能参数的变化,但均未给出量化的结果;可是研究器件在空间辐射环境中的辐射效应时是需要知道器件性能参数定量变化结果的。国外是遵照 EMVA 1288 测试标准<sup>[10]</sup>来定量求解分析 CMOS 图像传感器性能参数的,但也只解决了参数的测试问题,并未考虑辐照引起 CMOS 图像传感器参数变化的情况,从而导致辐照后提取出的部分参数是不正确的,并且这种现象存在普遍。

在 CMOS 图像传感器性能参数测试中,光子

转移曲线和转换增益是两个非常重要的参数。转换增益的意义是每个有效光电子导致输出图像灰度值的增量,通过光子转移曲线可以很直观地看出亮场和暗场信号差值的变化趋势。CMOS 图像传感器辐照前光子转移曲线和转换增益可以根据 EMVA 1288 测试标准中的相应方法求解出来,但辐照后利用该方法绘制出的光子转移曲线是无规律的波动曲线,因此无法求解转换增益。然而 CMOS 图像传感器辐照后的其它性能参数如满阱、时域暗噪声、暗信号非均匀性、暗电流等需要根据辐照后的转换增益转换成以电子为单位的数据,这样才可以更直观地掌握器件受辐照后的性能。

考虑光子转移曲线、转换增益这两个参数的重要性,以及 EMVA 1288 标准测试辐照后 CMOS 图像传感器的性能参数适用范围受限,部分参数无法求解等问题,本文提出了辐照后 CMOS 图像传感器光子转移曲线和转换增益的测试方法,求解出了辐照后正确的器件性能参数,直观地得到了辐照所引起器件性能的变化。以此为基础,文中深入分析了辐照导致 CMOS 图像传感器光子转移曲线和转换增益退化的机理,为掌握 CMOS 图像传感器的空间辐射效应提供了理论基础,同时也为推广 CMOS 图像传感器在航天在轨载荷的应用提供了有力支撑。

## 2 光子转移曲线和转换增益

与 CCD 类似,CMOS 图像传感器原始输出的是光生电子,以电子为单位,经过模数转换器之后以数字图像的形式读出。由于这些图像数据没有实际物理学单位数值,通常以数字单位(DN)表示。但是这里存在着单位转换的问题,即一个数字单位对应多少光生电子数,为此引入了 Janesick 提出的转换增益概念<sup>[11]</sup>。通常,用来测量转换增益的是借助光子转移曲线(Photon Transfer Curve, PTC)的光子转移技术。

绘制光子转移曲线时,先计算暗场和亮场的

平均灰度值和相应的灰度值的时域方差,然后用亮场数据减掉相同积分时间的暗场数据,得到平均灰度值的差值及灰度值时域方差的差值,最后分别以其作为横、纵坐标绘制出 PTC 图。光子转移曲线线性部分的拟合斜率即为转换增益  $K$ 。这种求解转换增益的方法适用于未受辐照的 CMOS 图像传感器,但对于辐照后的 CMOS 图像传感器需满足一定限制条件后方可适用。

转换增益  $K$  的意义是每个有效光电子导致输出图像灰度值的增量,其单位为  $\text{DN}/e$ 。光场下图像传感器的主要噪声一般是由量子涨落统计引起的,也就是说在一个给定的曝光水平上所感应到的光子数量的变化,这种噪声被认为是光子散粒噪声。散粒噪声均方根与图像强度的方根成正比,不同像素的散粒噪声是彼此独立的,散粒噪声服从泊松分布,因此光子散粒噪声的幅度等于平均入射光子数的平方根<sup>[10]</sup>,即  $n_{\text{photon}} = \sqrt{N_{\text{sig}}}$ 。由此可有:

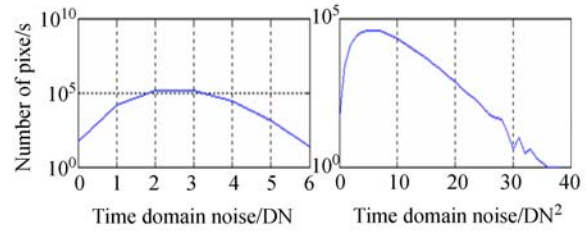
$$N_{\text{noise}} = \frac{N_{\text{noise}}}{K}, \quad (1)$$

$$N_{\text{noise}} = \sqrt{N_{\text{sig}}} = \sqrt{\frac{Y}{K}}, \quad (2)$$

其中,  $N_{\text{noise}}$  为光子散粒噪声,  $N_{\text{noise}}$  为输出噪声灰度值,  $N_{\text{sig}}$  为入射信号,  $Y$  为输出灰度值,  $K$  为转换增益。由式(1)和式(2)可得:

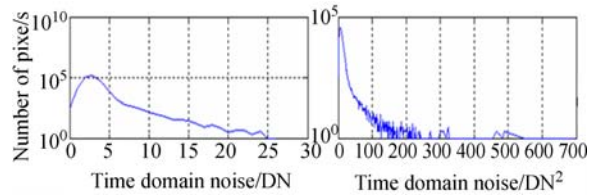
$$K = \frac{N^2}{Y}. \quad (3)$$

因此当光子散粒噪声在系统内占主导时, CMOS 图像传感器的转换增益可以由光子转移曲线的线性区斜率得到。需要注意的是利用此种方法测试转换增益的前提是传感器在光场下光子散粒噪声占主导,由于辐照会增大 CMOS 图像传感器的暗电流和暗电流非均匀性引起的噪声,使得光子散粒噪声不再占主导地位,在这种情况下需对传感器噪声进行一些处理和限制才能使用此种方法测试转换增益。比如某些商用 3T 像素结构的 CMOS 图像传感器受到质子辐照后,由于质子辐照引入大量缺陷使得暗电流和暗电流非均匀性引起的噪声大幅增加甚至使光子散粒噪声不再占主导地位。如图 1 所示,在图 1(b)中质子辐照后图像传感器的时域噪声大大增加,此时光子散粒噪声不再占主导地位,在这种情况下使用光子转移曲线法将无法求解出转换增益。只有通过



(a) 正常情况

(a) Normal condition



(b) 质子辐照后

(b) After irradiation

图 1 图像传感器辐照前后的时域噪声

Fig. 1 Time domain noise of image sensor before and after irradiation

计算机中增大积分球光源辐照度,同时减小积分时间来弱化辐照引起的 CMOS 图像传感器暗电流和暗电流非均匀性增大导致的噪声增大对辐照后光子转移曲线测试和辐照后转换增益求解的影响,最终使积分球光源的辐照度与测试软件积分时间的乘积为 CMOS 图像传感器的饱和输出,通过增加这个限制条件后才能使用光子转移曲线的线性区斜率求解转换增益,实现辐照后 CMOS 图像传感器转换增益的正确提取。

### 3 试验

#### 3.1 试验样品与试验过程

试验样品选用国产 4T-CMOS 科学级图像传感器,其分辨率为  $2\,048 \text{ pixel} \times 2\,048 \text{ pixel}$ ,像素结构为 4T-APS,像素尺寸为  $11 \mu\text{m} \times 11 \mu\text{m}$ ,读出方式为电子卷帘快门。样品测试板的型号为 vesion1.1,样品测试板分别与直流电源、计算机相连,连接后将直流电源的三路设置为  $+5 \text{ V}$ 、 $-5 \text{ V}$  和接地,设置样品测试板(4)在  $+5 \text{ V}$  下的正常工作电流为  $435 \sim 550 \text{ mA}$ ,此时限流设置为  $800 \text{ mA}$ ;样品测试板(4)在  $-5 \text{ V}$  下限流设置为  $100 \text{ mA}$ 。样品测试板的时序和配置参数由长春

长光辰芯光电技术有限公司提供,分为标准模式和高动态范围模式,本测试过程中采用高动态范围模式时序和此模式下的配置参数。

将未辐照的样品进行暗场、亮场测试,积分时间设置为 0.012 12~20.511 6 ms,积分时间范围内等间隔取 15 个点,每个积分时间下由图像传感器采 20 帧 2 048 pixel×2 040 pixel 的灰度图像。计算辐照前样品暗场和亮场的平均灰度值和相应的灰度值的时域方差,然后用亮场数据减掉相同积分时间的暗场数据,得到平均灰度值的差值及灰度值时域方差的差值,根据公式(4),以输出信号平均灰度值的差值和输出信号灰度值时域方差的差值作为横、纵坐标,最终绘制出样品辐照前的 PTC 图,如图 2 所示。

$$\sigma_y^2 - \sigma_{y, \text{dark}}^2 = K(\mu_y - \mu_{y, \text{dark}}), \quad (4)$$

其中  $\sigma_y^2$  为亮场输出信号灰度值时域方差,  $\sigma_{y, \text{dark}}^2$  为暗场输出信号灰度值时域方差,  $K$  为转换增益,  $\mu_y$  为亮场输出信号的平均灰度值,  $\mu_{y, \text{dark}}$  为暗场输出信号的平均灰度值。

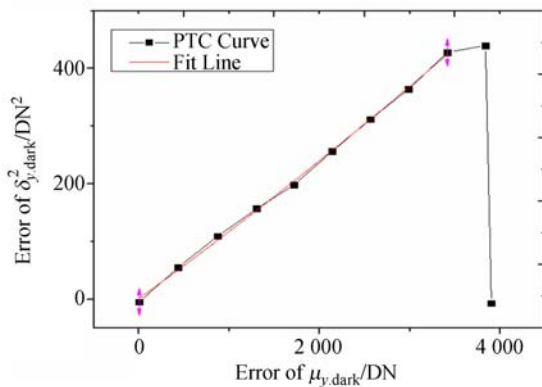


图 2 样品辐照前的光子转移曲线

Fig. 2 Photon transfer curve of CMOS APS before radiation

图 2(彩图见期刊电子版)中黑线为辐照前光子转移曲线,红线为辐照前光子转移曲线线性部分的拟合曲线( $y=0.12179x-2.36703$ ),求出该拟合曲线的拟合斜率即为辐照前 CMOS 图像传感器的转换增益,其值为 0.121 79 DN/e。

将样品进行质子辐照,质子能量为 10 MeV,注量率  $1E8p/(cm^2 \cdot s)$ (等效剂量率为 55.8 rad(Si)/s),总注量  $1E11 p/cm^2$ (等效总剂量为 55.8 krad(Si))。辐照后,对样品进行暗场测试和亮场测试,积分时间仍设置为 0.012 12~20.511 6

ms,积分时间范围内等间隔取 15 个点,每个积分时间下由图像传感器采 20 帧 2 048 pixel×2 040 pixel 的灰度图像,计算辐照后样品暗场和亮场的平均灰度值和相应的灰度值的时域方差,然后用亮场数据减掉相同积分时间的暗场数据,得到平均灰度值的差值及灰度值时域方差的差值,分别以其作为横、纵坐标,最终绘制出样品经辐照后的 PTC 图,如图 3 所示。

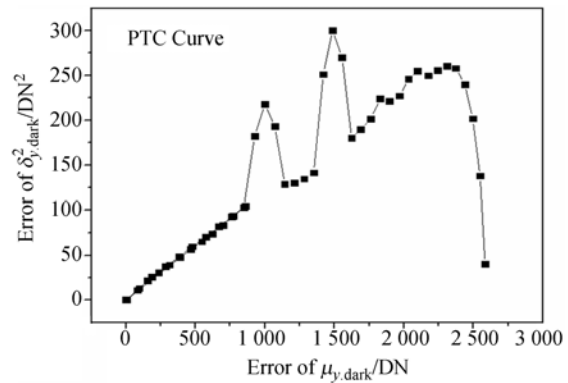


图 3 样品辐照后的光子转移曲线

Fig. 3 Photon transfer curve of CMOS APS after radiation

从图 3 看出,由于辐照的影响,绘制出的样品辐照后光子转移曲线呈现无规律波动,并且无法求出辐照后转换增益  $K$ 。为了减小辐照的影响,需要在计算机中调整积分球光源的辐照度和测试软件的积分时间,使二者的乘积为样品的饱和输出,试验中该值为 4 094 DN。调整后重新由图像传感器采 20 帧 2 048 pixel×2 040 pixel 的灰度图像,计算辐照后样品暗场和亮场的平均灰度值和相应的灰度值的时域方差,然后用亮场数据减掉相同积分时间的暗场数据,得到平均灰度值的差值及灰度值时域方差的差值,分别以其作为横、纵坐标,最终绘制出辐照后样品经调整过的 PTC 图,如图 4 所示。

图 4 中黑线为辐照后正确的光子转移曲线,红线为辐照后光子转移曲线线性部分的拟合曲线( $y=0.11226x+5.82538$ ),求出该拟合曲线的拟合斜率,即为辐照后样品正确的转换增益,其值为 0.112 26 DN/e。

### 3.2 试验结果分析

样品在辐照前的转换增益为 0.121 79 DN/e,经过辐照后转换增益为 0.112 26 DN/e,可以看出,样品辐照后转换增益相对于辐照前减小了

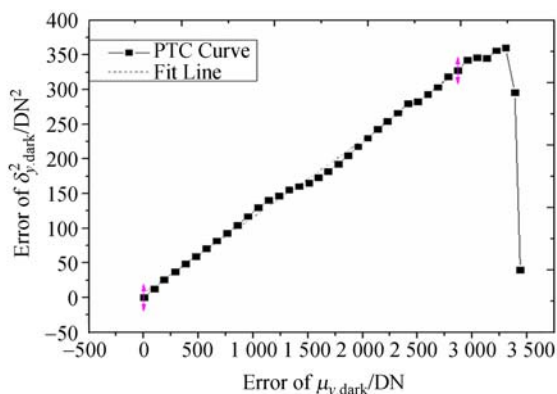


图 4 调整过积分球辐照度和积分时间二者乘积的辐照后光子转移曲线

Fig. 4 Photon transfer curve of CMOS APS after radiation by increasing the irradiance of integral ball light source and reducing the integration time

7.82%，质子辐照产生的总剂量效应和位移效应会对转换增益产生一定影响。同时总剂量效应和位移效应导致光子转移曲线出现不规则波动，因此不能直接根据光子转移曲线线性区的斜率直接求解转换增益。在电离辐射过程中，Si-SiO<sub>2</sub> 界面产生的悬挂键和位缺陷在质子作用下更加活跃，其密度会随着辐射总剂量的增加而持续上升；另一方面辐射感生的氧化物陷阱电荷和界面态会引起表面暗信号增大。位移效应在 CMOS 图像传感器体 Si 禁带中诱发的体缺陷会形成新的复合-产生中心，使 CMOS 图像传感器体暗信号增大。如上所述，辐射效应会增大暗电流。暗电流抬升的同时暗电流非均匀性也会增大，暗电流和暗电流非均匀性增大引起的时域噪声导致光子散粒噪声不再占主导地位。因此辐射后光子转移曲线法

求解转换增益不再适用。这时就需要通过调整试验所用的积分球辐照度和测试软件的积分时间来对 CMOS 图像传感器的暗电流和暗电流非均匀性噪声进行处理和限制，重新使 CMOS 图像传感器的光子散粒噪声占主导，这样才能用光子转移曲线法求解辐照后 CMOS 图像传感器的转换增益。

## 4 结 论

为了解决 EMVA 1288 标准测试辐照后 CMOS 图像传感器重要性能参数(光子转移曲线和转换增益)适用范围有限的问题，本文提出了通过调整测试条件，限制辐照后 CMOS 图像传感器暗电流和暗电流非均匀性噪声的改进测试方法。该方法通过增大积分球光源辐照度，同时减小积分时间，使二者的乘积为 CMOS 图像传感器待测样品的饱和输出，并利用该方法求解出辐照后正确的光子转移曲线和转换增益。试验结果表明，辐照导致转换增益相比于辐照前退化了 7.82%。最后依据此结果分析了辐照导致光子转移曲线和转换增益退化的机理。分析认为，转换增益的退化是由于质子辐射引起的电离效应和位移效应导致暗电流、暗电流非均匀性增大所致。在电离辐射过程中，Si-SiO<sub>2</sub> 界面产生的悬挂键和位缺陷在质子作用下更加活跃，其密度会随着辐射总剂量的增加而持续上升；另一方面辐射感生的氧化物陷阱电荷和界面态会引起表面暗信号增大。位移效应在 CMOS 图像传感器体 Si 禁带中诱发的体缺陷会形成新的复合-产生中心，使 CMOS 图像传感器体暗信号增大，而暗电流抬升的同时暗电流非均匀性也会增大。

## 参考文献:

- [1] 汪波. 3T 和 4T-CMOS 图像传感器空间辐射效应及损伤机理研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.  
WANG B. *Spatial radiation effect and damage-mechanism of 3T and 4T-CMOS image sensor*[D]. Beijing: The University of Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [2] 万磊, 贾平, 张叶, 等. 飞行器姿态对 CMOS 航空相机成像的影响[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(1): 203-209.

WAN L, JIA P, ZHANG Y, *et al.*. Effect of aircraft attitude on imaging of CMOS aerial cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(1): 203-209. (in Chinese)

- [3] 郑亮亮, 金光, 曲宏松, 等. 高信噪比星载 CCD 成像电路系统[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(8): 2027-2036.

ZHENG L L, JIN G, QU H S, *et al.*. Space-borne CCD imaging circuit system with high signal-to-noise ratio[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(8): 2027-2036. (in Chinese)

- [4] 胡君,王栋. 空间光学遥感器的多光谱 TDI CCD 信号检测与生成[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 1810-1818.  
HU J, WANG D. Detection and generation of multi-spectral TDI CCD signals for space optical remote sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1810-1818. (in Chinese)
- [5] 王帆,李豫东,郭旗,等. 温度对 4 管像素结构 CMOS 图像传感器性能参数的影响[J]. 发光学报, 2016, 37(3): 332-337.  
WANG F, LI Y D, GUO Q, *et al.*. Temperature effects on performance parameters in 4 T CMOS image sensor[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, 37(3): 332-337. (in Chinese)
- [6] 程万胜,赵杰,蔡鹤皋. CCD 像素响应非均匀的校正方法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2): 314-318.  
CHENG W SH, ZHAO J, CAI H G. Correction method for pixel response nonuniformity of CCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 314-318. (in Chinese)
- [7] 金龙旭,李国宁,刘妍妍. 帧转移型面阵 CCD 驱动电路的设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(6): 1140-1145.  
JIN L X, LI G N, LIU Y Y. Design of driving circuit for frame transfer area CCD[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(6): 1140-1145. (in Chinese)
- [8] PELAMATTI A, GOIFFON V, CHABANE A, *et al.*. Charge transfer inefficiency in pinned photodiode CMOS image sensors: simple monte-carlo modeling and experimental measurement based on a pulsed storage-gate method[J]. *Solid-State Electronics*, 2016, 125: 227-233.
- [9] DURNEZ C, GOIFFON V, VIRMONTAIS C, *et al.*. In-depth analysis on radiation induced multi-level dark current random telegraph signal in silicon solid state image sensors[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2017, 64(1): 19-26.
- [10] EMVA Standard 1288. Standard for characterization of image sensors and cameras[S]. EMVA, 2010.
- [11] HOPKINSON G R, DALE C J, MARSHALL P W. Proton effects in charge-coupled devices[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1996, 43(2): 614-627.

#### 作者简介:



冯 婕(1985—),女,新疆乌鲁木齐人,助理研究员,2009 年于重庆邮电大学获得学士学位,2014 年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事光电成像器件辐射效应与损伤机理研究、光学系统辐射效应研究。E-mail: fengjie@ms. xjb. ac. cn



李豫东(1982—),男,新疆伊犁人,研究员,2004 年于吉林大学获得学士学位,2009 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事半导体器件和集成电路的辐射效应与机理、模拟试验方法、试验系统研究。E-mail: lydong@ms. xjb. ac. cn