

## 表面钝化膜对 BCMOS 传感器电子敏感特性影响的实验研究

乔 凯<sup>1,2</sup>, 王生凯<sup>1,2</sup>, 程宏昌<sup>1,2</sup>, 靳 川<sup>1,2</sup>, 张太民<sup>1,2</sup>, 杨晓军<sup>1,2</sup>, 任 彬<sup>1,2</sup>

(1. 微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065;  
2. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

**摘 要:** 基于硅表面的薄膜钝化原理, 开展了不同厚度的表面钝化膜对背减薄 CMOS(Back-thinned CMOS, BCMOS) 传感器电子敏感特性影响的实验研究。首先, 对 CMOS 传感器进行背减薄处理后, 对背减薄 CMOS 进行电子轰击测试, 由测试结果可知, 电子图像灰度随入射电子能量的变化呈现出线性关系。然后, 采用电子束蒸镀法在 BCMOS 传感器表面镀制了不同厚度的氧化铝薄膜, 并进行了电子轰击测试。研究发现, 当表面氧化铝薄膜厚度为 20 nm 时, 可以将 BCMOS 传感器的二次电子收集效率提高 14.9%, 通过表面薄膜钝化实现了电子敏感性的提升, 同时, 随着薄膜厚度的增加, BCMOS 暗电流由 1510 e<sup>-</sup>/s/pix 减小至 678 e<sup>-</sup>/s/pix。上述结果说明, 氧化铝薄膜对 BCMOS 背减薄表面具有良好的钝化作用, 可以提高 BCMOS 传感器的二次电子收集效率、降低暗电流, 为将来高灵敏度 EBCMOS 器件的研制提供了技术支持。

**关键词:** 微光夜视; 背减薄 CMOS; 氧化铝薄膜; 二次电子收集效率; 暗电流  
**中图分类号:** TN223      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0418002

## Experimental study on the electron sensitivity of BCMOS sensor influenced by surface passivation film

Qiao Kai<sup>1,2</sup>, Wang Shengkai<sup>1,2</sup>, Cheng Hongchang<sup>1,2</sup>, Jin Chuan<sup>1,2</sup>, Zhang Taimin<sup>1,2</sup>, Yang Xiaojun<sup>1,2</sup>, Ren Bin<sup>1,2</sup>

(1. Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China;  
2. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

**Abstract:** Based on the principle of silicon surface film passivation, the effect of different thickness surface passivation film on the electronic sensitivity of back-thinned CMOS (BCMOS) sensor was studied. Firstly, the electron bombardment test was carried out after the back thinning processing on CMOS sensor. The electron bombardment test shows that the gray value of the electronic image presents a linear relationship with the change of bombarding electron energy. Then, the aluminum oxide films with different thickness were deposited on the surface of back-thinned CMOS, and the electron bombardment test was carried out. It was found that the collection efficiency of secondary electron was increased by 14.9% when the thickness of aluminum oxide film was 20 nm, meaning that the electron sensitivity could be improved by surface film passivation. Furthermore, the dark current of the back-thinned CMOS sensor reduced from 1510 e<sup>-</sup>/s·pix<sup>-1</sup> to 678 e<sup>-</sup>/s·pix<sup>-1</sup> with the increase of film thickness. The above results show that aluminum oxide film has a good passivation effect on back-thinned CMOS sensor, which could improve the secondary electron collection efficiency and reduce the dark current of the back-thinned CMOS sensor, and provide a technical support for the development of high sensitivity EBCMOS devices in the future.

收稿日期: 2019-12-20; 修订日期: 2020-01-15

基金项目: 十三五装备预研兵器实验室基金 (JC2018017-3)

作者简介: 乔凯 (1989-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事数字微光技术等方面的研究。Email: qiaokaisxyl@163.com

**Key words:** low-light-level (LLL) night vision; back-thinned CMOS; aluminum oxide thin film; secondary electron collection efficiency; dark current

## 0 引言

微光成像技术广泛应用于军事及民用各领域<sup>[1]</sup>。目前主流的微光夜视器件为真空微光器件,入射光激发光阴极将产生光电子,通过微通道板的电子倍增轰击到荧光屏上形成亮度增强的可见光<sup>[2]</sup>。

近年来,针对高灵敏度数字微光成像器件的技术需求,欧美国家通过 CMOS 图像传感器与光阴极组件相结合,在像增强器中插入 BCMOS 图像传感器,取代了微通道板 (MCP) 和荧光屏,使光激发阴极产生光电子在高压电场作用下直接轰击 BCMOS 实现电子倍增及数字图像信号输出<sup>[3]</sup>,基于上述原理的器件称为电子轰击 CMOS(EBCMOS) 器件,其具有高灵敏度、高帧频、快响应、低功耗、低噪声等优点,是一种理想的数字微光成像器件<sup>[4]</sup>。根据文献报道<sup>[5-6]</sup>,要使 BCMOS 传感器具有电子敏感性,必须通过减薄工艺将表面硅外延层减薄至 10 μm 左右,但该工艺会在硅表面引入复合中心,导致倍增产生的电子-空穴对向表面扩散并复合,降低了结区对电子的收集效率,导致其电子敏感性低。法国里昂大学对 BCMOS 进行背减薄处理,将硅外延层减薄至 8 μm 左右,通过离子注入工艺在硅表面形成重掺杂 P+层,利用掺杂离子浓度差形成内建电场,产生的场钝化效应提高了结区对倍增电子收集效率,有效提高了 BCMOS 电子敏感性<sup>[7]</sup>。但是,离子注入掺杂包括离子注入、激光退火等工艺,工艺复杂、成本高,且离子注入容易对表面硅材料造成二次损伤。目前,国内关于提高 BCMOS 传感器电子敏感性的报道较少,主要以理论研究为主<sup>[8]</sup>,极大地限制了 EBCMOS 器件技术的发展。

文中针对 BCMOS 传感器的电子敏感性提升问题,基于氧化铝薄膜对硅具有化学钝化、场效应钝化双重钝化作用的原理<sup>[9-10]</sup>,采用电子束蒸镀法在 BCMOS 表面制备了不同厚度的氧化铝薄膜。通过电子轰击测试技术,研究了特定工艺下不同膜厚度对 BCMOS 电子敏感特性的影响,包括阈值电压、电子收集效率、以及暗电流噪声等,为高灵敏度 EBCMOS 器件的研制提供技术支撑。

## 1 实验

该实验对芯片进行减薄处理后,将芯片与陶瓷管壳进行粘接、打线,获得背减薄的 CMOS 传感器。采用电子束蒸镀的方式在背减薄表面镀制氧化铝薄膜,利用高能电子束轰击铝靶产生铝蒸汽,在腔体中通入高纯氧气与铝蒸汽反应产生氧化铝,氧化铝薄膜沉积在基底上,沉积速率为 0.5 Å/s,镀膜中采用晶体膜厚仪对厚度进行实时监控,实现对镀膜速率和厚度的自动控制。电子束蒸镀法具有薄膜均匀性好、孔洞少、工艺条件简单、适合于批量生产等优势。该实验在 CMOS 传感器背减薄表面分别镀制了 10、15、20 nm 厚的氧化铝薄膜。

BCMOS 的测试采用电子轰击性能测试系统,具体测试装置如图 1 所示,其中金阴极、微通道板、BCMOS 传感器和读出电路均放置于真空腔体内,腔体真空度小于  $1 \times 10^{-3}$  Pa。真空腔室设置有透紫外玻璃窗口、高压电极接口、采集电路电源及信号接口。真空腔室外的高压电源、读出电路电源、采集卡及电脑通过上述接口实现与内部连接。通过上位机软件可以实现对 BCMOS 光电参数的控制以及测试数据的快速处理,可实现暗电流、平均输出灰度值、信噪比等参数的测量。

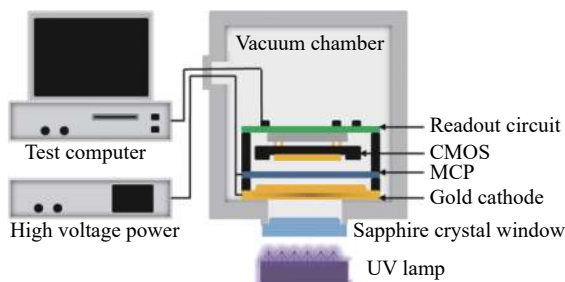


图 1 真空电子轰击测试系统示意图

Fig.1 System of vacuum electron bombardment test

测试系统的工作原理为:均匀紫外光透过窗口入射到金阴极面上激发产生均匀光电子,光电子入射微通道板后,通过调节微通道板输入端与输出端偏压对电子束流进行控制,最后微通道板输出端的出射电子在偏置电压作用下轰击 BCMOS 产生电子图像信号,

最后通过上位软件对图像信号进行分析处理。

实验中,采用高压电源在光阴极与微通道板输入端、微通道板输入、输出端之间施加额定电压,保证工作时微通道板输出端输出稳定面电子;通道板输出端与 BCMOS 电子接收面之间的电压在测试中实时调整,且通道板输出端与 BCMOS 电子接收面的距离为 5 mm,实现对入射电子能量 300 eV ~ 2 000 eV 的连续可调。图像采集过程中图像的灰度等级为 12 bit,积分时间为 8 ms ~ 25 ms。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 BCMOS 电子轰击测试

电子轰击半导体 (Electron Bombarded Semiconductor, EBS) 增益是 CMOS 传感器背减薄后能实现电子探测的关键。入射电子穿过死层轰击 Si 材料产生的电子-空穴对,几乎全部产生在外延层 100 nm 范围内,然后倍增电子在漂移、扩散作用下通过外延层被结区吸收,电子倍增原理如图 2 所示。

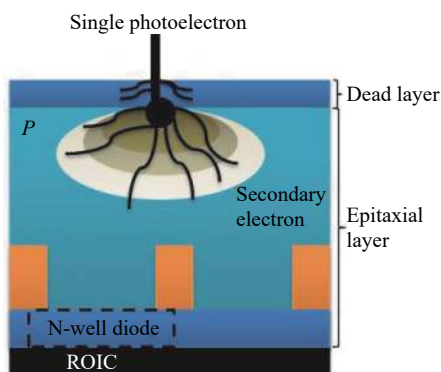


图 2 电子倍增原理示意图

Fig.2 Principle of electron multiplication

BCMOS 的电子增益可以通过如下简化公式进行计算:

$$G = CE \times (E - E_{\text{dead}}) / 3.6 \quad (1)$$

式中:  $E$  为入射电子能量;  $E_{\text{dead}}$  为电子穿越死层消耗的能量; 3.6 eV 为电子轰击硅半导体产生一个电子-空穴对所消耗的能量;  $CE$  为 BCMOS 对于电子的收集效率。在测试 BCMOS 的电子敏感性时,为了降低光学图像背景,提高电子图像测试的准确性,采用金阴极和微通道板结构组成的电子源,因此只有很少一部分紫外光入射至 BCMOS,非常有利于对电子图像的

测试研究。

该实验在微通道板输出端和 BCMOS 之间分别施加 300 ~ 2 000 V 不同加速电压的情况下,对电子响应图像的灰度值进行统计分析,得到 BCMOS 器件电子轰击响应曲线如图 3 所示。

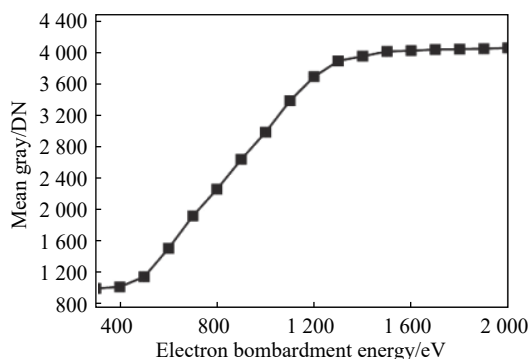


图 3 电子轰击响应曲线

Fig.3 Electron bombardment response curve

由图 3 中的测量结果可知,在电子能量对小于 500 eV 时,图像平均灰度值基本没有明显变化,其电子响应阈值电压为 500 V,当电子能量高于 500 eV 后,电子图像的灰度值与入射电子能量具有很好的线性关系。这是由于 CMOS 传感器经过背减薄后,表面引入的复合中心以及表面氧化硅膜形成死层,因此当入射电子能量小于 500 eV 时,无电子响应信号。随着电场强度的不断增加,入射电子穿过死层产生电子倍增,电子增益与入射电子能量满足公式 (1) 所示关系,因此 BCMOS 的电子图像灰度值也越来越高。

为了说明 BCMOS 电子倍增特性与电子图像灰度值的关系,假设入射至 BCMOS 每个像素的平均电子个数为  $n$ ,电子入射能量为  $E$  时对应有效平均灰度值为  $N(\text{DN})$ ,BCMOS 中灰度值与电子个数的转换因子为  $k(\text{e}^-/\text{DN})$ ,忽略电子背散射的影响,二者之积即为倍增后每个像素收集到的有效电子数,则根据公式 (1) 可得到入射电子数与有效平均灰度值关系为:

$$n \cdot \frac{CE(E - E_{\text{dead}})}{3.6} = N \cdot k \quad (2)$$

由公式 (2) 可得到收集效率  $CE$  的数学表达式为:

$$CE = \frac{3.6N \cdot k}{n \cdot (E - E_{\text{dead}})} \quad (3)$$

当测试条件不变时,参数  $n$  和  $k$  均为固定正值,因此利用固定值  $K$  代替上式中  $\frac{3.6k}{n}$ ,则  $CE$  的表达式为:

$$CE = K \frac{N}{(E - E_{dead})} \quad (4)$$

由公式 (4) 可知, 电子收集效率  $CE$  与电子图像灰度值随入射电子能量变化曲线的线性区域斜率成正比关系, 因此曲线斜率越高, 则对应的二次电子收集效率越高, 对应的电子增益越高。

## 2.2 钝化膜厚度对 BCMOS 的电子增益的影响

该实验在微通道板输出端和 CMOS 芯片之间分别施加 300 ~ 2 000 V 的不同加速电压情况下, 对镀制了不同厚度钝化膜的 CMOS 器件进行了电子轰击测试, 对电子响应图像的灰度值进行统计分析, 得到了表面氧化铝薄膜不同厚度条件下, BCMOS 器件电子轰击响应曲线, 具体如下图 4 所示。

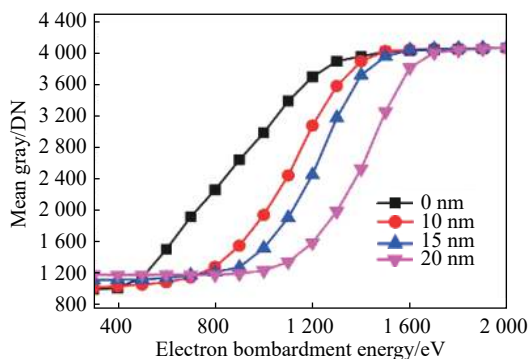


图 4 表面不同厚度氧化铝薄膜的 BCMOS 对应的电子轰击响应曲线  
Fig.4 Electron bombardment response curve of BCMOS with  $Al_2O_3$  film of different thickness

由测量结果可知, 当薄膜厚度为 10 nm 时, 其电子相应能量为 800 eV, 电子图像灰度值线性增大区域为 800~1 200 eV, 之后图像信号趋于饱和; 薄膜厚度为 15 nm 时, 其电子响应能量为 900 eV, 电子图像灰度值线性增大区域为 900~1 400 eV; 薄膜厚度为 20 nm 时, 其电子响应能量为 1 100 eV, 电子图像灰度值线性增大区域为 1 100~1 600 eV; BCMOS 的电子响应阈值电压随薄膜厚度的变化曲线如图 5 所示, 可知随着薄膜厚度增加, BCMOS 的电子响应能量逐渐增加。

结合响应能量值, 可以分别根据图 5 中不同薄膜厚度对应的电子图像灰度值随入射电子能量变化曲线的线性区域, 根据公式 (4) 计算了表面未镀膜和镀制 10、15、20 nm 厚薄膜的 BCMOS, 其对应的倍增电子收集效率  $CE$  与固定值  $K$  的关系分别为:  $3.425K$ 、 $3.904K$ 、 $3.927K$ 、 $3.936K$ 。表面镀膜后 BCMOS 较未

镀膜 BCMOS 的二次电子收集效率提高百分比随薄膜厚度的变化如图 6 所示。

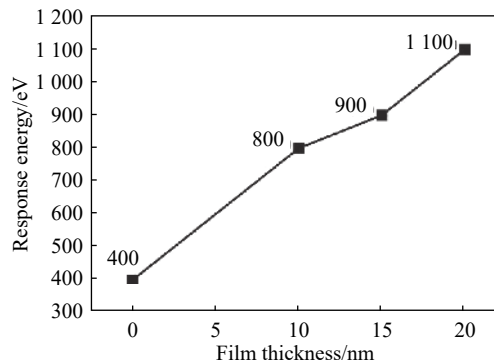


图 5 不同厚度薄膜对应的响应能量

Fig.5 Response energy corresponding to different thin film thickness

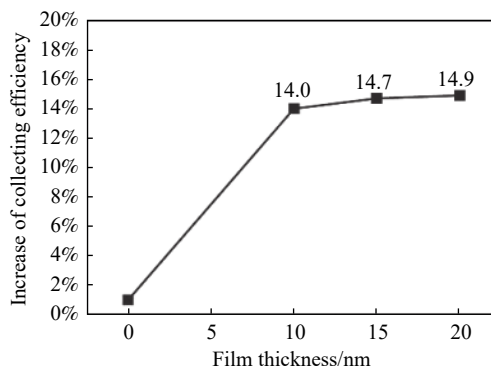


图 6 倍增电子收集效率提高的百分比随薄膜厚度变化

Fig.6 Increasing percentage of the multiplier electron collection efficiency varies with the film thickness

由图 6 可知, 相较于未镀膜 BCMOS, 在表面镀制 10、15、20 nm 钝化膜后, 对应的二次电子收集效率分别提高了 14.0%、14.7%、14.9%, 显然通过面氧化铝薄膜钝化可以显著提高 BCMOS 的  $CE$ , 但随着薄膜厚度的增加, 对二次电子收集效率的提高逐渐趋于平缓。上述实验主要原因为: 如图 7(a) 所示, 由于背减薄表面存在复合中心, 且表面自然氧化硅中存在固定正电荷, 因此导致在界面处能带向下弯曲, 电子轰击产生的二次电子通过背扩散输运至表面复合, 降低了二次电子的收集效率; 通过在表面镀制氧化铝薄膜, 如图 7(b) 所示, 一方面氧化铝薄膜通过化学钝化可减少表面复合中心, 同时区别于氧化硅层中的正电荷, 氧化铝薄膜中的固定负电荷对表面电子具有排斥作用, 形成场钝化效应, 钝化层与背减薄硅界面处能带向上弯曲, 减少了电子轰击产生少子在背扩散作用

下输运至表面复合,使更多的电子扩散进入 BCMOS 传感器结区被收集为有效信号。但是,由于薄膜中固定负电荷主要形成和积累在界面处附近,因此随着薄膜厚度增加,固定负电荷密度也趋于稳定,因此二次电子的收集效率也趋于稳定。

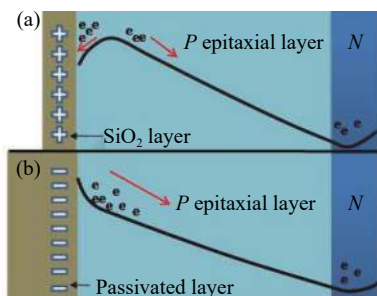


图 7 钝化前后能带分布及对二次电子收集的影响

Fig.7 Effect of energy band distribution on secondary electron collection before and after passivation

### 2.3 暗电流测试

CMOS 传感器在既无光注入又无电子轰击情况下的输出电流称为暗电流。CMOS 的暗电流主要由耗尽区产生电流、扩散电流、表面产生电流组成。

测试时,在无光条件下分别统计不同积分时间下 BCMOS 的像素平均输出灰度值,利用所有像素暗电流平均值来表示 BCMOS 暗电流,单位为  $e^-/s \cdot \text{pix}^{-1}$ 。图 8 中为不同条件下 BCMOS 传感器的平均暗电流值,可知 BCMOS 的平均暗电流为  $1\,510 e^-/s \cdot \text{pix}^{-1}$ ,在表面镀制 10、15、20 nm 氧化铝薄膜后 BCMOS 传感器的平均暗电流分别为  $1\,052 e^-/s \cdot \text{pix}^{-1}$ 、 $786 e^-/s \cdot \text{pix}^{-1}$ 、 $678 e^-/s \cdot \text{pix}^{-1}$ 。可知镀膜后其暗电流呈现变小的趋势,

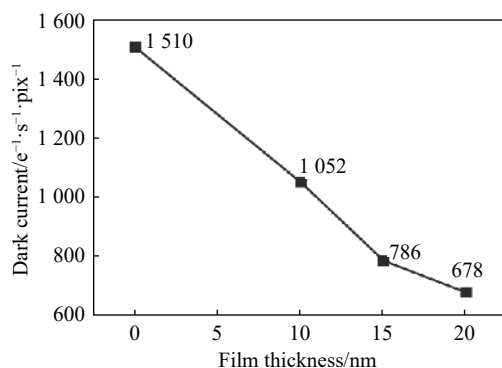


图 8 不同条件下对应的 BCMOS 传感器平均暗电流

Fig.8 Average dark current of BCMOS sensor under different conditions

且薄膜越厚对应的暗电流越小。

由测试结果可知,CMOS 传感器经过背减薄后,由于表面周期性突然中断,造成能量和产生中心增多,表面产生电流增大,导致 BCMOS 传感器暗电流较大。当在背减薄表面镀膜后 BCMOS 传感器暗电流降低,这充分说明氧化铝薄膜对 BCMOS 具有钝化作用,这是因为薄膜与背减薄表面界面处通过 Si-O-Al 键的形成,有效降低了表面态密度,同时氧化铝薄膜中的固定电荷对界面处的电子形成排斥作用,降低了硅表面电子密度,进而抑制了表面产生电流。

### 3 结 论

对 CMOS 传感器进行了背减薄处理后,采用电子束蒸镀法在 BCMOS 面镀制了不同厚度的氧化铝薄膜,使用真空电子轰击性能测试系统对 BCMOS 传感器的电子敏感特性进行测试。结果表明:在一定范围内,未镀膜以及镀制不同厚度薄膜的 BCMOS,电子图像灰度随电子能量的变化呈现出较好的线性关系,且电子响应阈值电压随着薄膜厚度的增加而变大;在表面镀制厚度分别为 10、15、20 nm 的氧化铝薄膜,BCMOS 传感器二次电子收集效率分别提高了 14.0%、14.7%、14.9%,可知通过表面钝化可以有效提升 BCMOS 器件的电子敏感性。同时,BCMOS 传感器暗电流随薄膜厚度增加,BCMOS 的暗电流分别为  $1\,052 e^-/s \cdot \text{pix}^{-1}$ 、 $786 e^-/s \cdot \text{pix}^{-1}$ 、 $678 e^-/s \cdot \text{pix}^{-1}$ ,呈现出减小趋势,可知通过表面钝化可有效抑制暗电流。以上研究结果对 EBCMOS 器件的研制工作具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] Zhang Jingxian, Li Yudan, Jin Weiqi. Imaging Technique of LLL and Laser[M]. Beijing: Beijing University of Science and Technology Press, 1995. (in Chinese)
- [2] Jin Weiqi, Tao Yu, Shi Feng, et al. Progress of low light video technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3167-3176. (in Chinese)
- [3] Barbier R, Baudot J, Chabant E, et al. Performance study of a megapixel single photon position sensitive photodetector EBCMOS [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2009, 640(1): 54-56.
- [4] Liu Hulin, Wang Xing, Tian Jinshou, et al. High resolution electron bombarded complementary metal oxide semiconductor

- sensor for ultraviolet detection [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(1): 014209. (in Chinese)
- [5] Barbier R, Cajgfinger T, Calabria P, et al. A single-photon sensitive ebCMOS camera: the LUSIPHER prototype [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2011, 648(1): 266–274.
- [6] Dominjon A, Ageron M, Barbier R, et al. A ebCMOS camera system for marine bioluminescence observation: the luSEapher prototype [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2012, 695(1): 172–178.
- [7] Cajgfinger T, Barbier R, Dominjon A. Single photon detection and localization accuracy with an ebCMOS camera [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2015, 787(1): 176–181.
- [8] Song De, Shi Feng, Li Ye. Simulation of charge collection efficiency for EBAPS with uniformly doped substrate [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0203002. (in Chinese)
- [9] Zhang Xiang, Liu Bangwu, Xia Yang, et al. The passivation of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and its applications in the crystalline silicon solar cell [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(18): 187303. (in Chinese)
- [10] Yang Chengcai, Ju Guohao, Chen Yongping. Study on the photo response of a CMOS sensor integrated with PIN photodiodes [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(5): 1076–1089.