

激光与光电子学进展

电子轰击有源像素传感器光谱响应测试系统设计

严毅赞¹, 钱芸生^{1*}, 张景智¹, 韩坤², 郑舟², 柳磊¹¹南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;²微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065

摘要 电子轰击有源像素传感器(EBAPS)是一种利用真空技术将光阴极、电子敏感有源像素传感器(APS)芯片和基座封装成的真空-固体混合型微光器件。积分灵敏度是EBAPS重要的性能参数之一,但国内目前还缺乏相应的测试手段。因此,基于EBAPS的工作原理和微光像增强器的光谱响应测试方法,用数字-电子转换因子和输出信号得到的电子数对光谱响应度进行表征,并设计了EBAPS的光谱响应测试系统。利用该系统获得了EBAPS器件在-800 V工作电压下的光谱响应曲线,器件的积分灵敏度为 $3.2 \times 10^8 (\text{s} \cdot \text{lm})^{-1}$,重复度为0.65%。

关键词 探测器; 电子轰击; 有源像素传感器; 光谱响应; 测试系统; 电子数

中图分类号 TN223

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1304001

Design of Spectral Response Test System for Electron Bombardment Active Pixel Sensor

Yan Yiyun¹, Qian Yunsheng^{1*}, Zhang Jingzhi¹, Han Kun², Zheng Zhou², Liu Lei¹¹School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing 210094, Jiangsu, China;²Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, Shaanxi, China

Abstract An electron-bombarded active pixel sensor (EBAPS) is a type of vacuum-solid hybrid low light-level device that encapsulates a photocathode, an electronic-sensitive active pixel sensor (APS) chip, and a base, using vacuum technology. Integral sensitivity is a crucial performance parameter of EBAPS, but corresponding test methods in China are lacking. Therefore, based on the working principle of EBAPS and the spectral response test method of a low-light level-image intensifier, the spectral responsivity is characterized by a digital-electron conversion factor and the number of electrons obtained from the output signal in this study. Moreover, a spectral response test system of EBAPS is designed. The spectral response curves of EBAPS at an operating voltage of -800 V are obtained using this system. The EBAPS' integral sensitivity is $3.2 \times 10^8 (\text{s} \cdot \text{lm})^{-1}$, and repeatability is 0.65%.

Key words detectors; electron bombardment; active pixel sensor; spectral response; test system; electron number

1 引言

微光夜视技术是拓展人眼夜间视觉感知的技术之一,其核心是微光探测器件^[1]。电子轰击有源像素传感器(EBAPS)作为一种先进的真空-半导体混合型微光探测器件,兼具真空器件高增益、高信噪比、快响应和固体器件小型化、数字化输出及传输的优点,近年来已成为业内研究的热点^[1-3]。2001年,美国Intevac公司公布了EBAPS混合型光电探测器的发

明专利^[4]。2013年,Photonis公司研制出法国首款EBAPS器件,并研制出了EBNOCTURN的EBAPS相机^[5]。2021年,美国Intevac公司研制的高分辨率、长寿命EBAPS成功应用于阿帕奇直升机和F35战斗机等作战平台^[6]。在国内,微光夜视技术国防科技重点实验室、中国科学院西安精密机械研究所、中国电子科技集团第五十五研究所、长春理工大学、南京理工大学等在EBAPS的理论研究、器件制备、成像技术方面也取得了一系列成果^[7-11]。积分灵敏度能

收稿日期: 2021-07-20; 修回日期: 2021-08-03; 录用日期: 2021-08-09

基金项目: 国防基础重点突破项目(JCKY2018208B016)、国防预研项目(41414020502)

通信作者: *yshqian2015@163.com

反映器件的光-电转换效率,是评价器件性能优劣的重要标准之一,可通过光谱响应测试获得。单独针对真空成像器件或半导体成像器件的性能表征方法和测试系统不适用于 EBAPS 等真空-半导体混合型器件,而目前针对 EBAPS 器件的性能测试手段不完善,且缺乏有效的器件性能全面表征系统,一定程度上制约了器件制备工艺的优化和性能的提升。

为解决当前国产 EBAPS 缺乏光谱响应特性的表征方法和测试手段的关键问题,本文基于微光像增强器的光谱响应测试方法,利用自研的 EBAPS 驱动电路得到输出信号,结合 Visual Studio 软件开发平台对得到的图像数据进行处理,设计了一套 EBAPS 的光谱响应测试系统,期望为鉴别高品质的 EBAPS 器件提供测试手段。

2 基本原理

2.1 EBAPS 的基本结构及工作原理

EBAPS 的基本结构^[12]如图 1 所示,主要包括输入光窗、光阴极、电子敏感有源像素传感器 (APS) 芯片。工作过程主要包括光电转换、电子倍增和信号收集三个阶段。光子透过输入光窗到达光阴极,在光阴极表面发生外光电效应产生光电子,实现光电转换^[13];光阴极和电子倍增层之间连接负高压,光电子在电场的作用下直接轰击 APS 表面的电子倍增层,产生大量的二次电子,实现电子倍增;倍增后的二次电子被 APS 中的光电二极管收集,并通过金属-氧化物-半导体 (MOS) 晶体管电路放大读出^[14],供后端处理。在低照度工作时,EBAPS 为电子轰击模式;在高照度工作时,EBAPS 可以转为普通的光敏互补金属氧化物半导体 (CMOS) 成像模式。

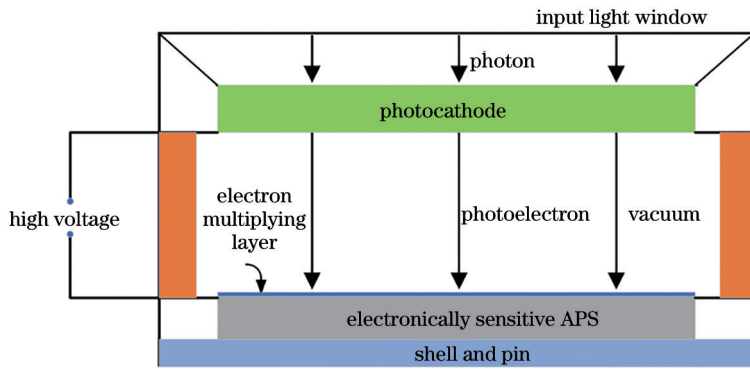


图 1 EBAPS 的基本结构

Fig. 1 Basic structure of the EBAPS

2.2 测试原理

光谱响应反映的是光电探测器件输出信号与输入辐射功率之间的关系,按波长的分布称为绝对光谱响应 $S(\lambda)$,定义为光电探测器件输出电流 I_0 与入射到探测器件上单色辐射通量 $\phi(\lambda)$ 的比^[15],可表示为

$$S(\lambda) = I_0 / \phi(\lambda), \quad (1)$$

式中, λ 为光的波长, $S(\lambda)$ 为波长 λ 处的光谱响应, I_0 为器件的输出电流, $\phi(\lambda)$ 为波长 λ 处的单色光输入辐射通量。

基于电子与电流的线性关系可知,EBAPS 的光谱响应计算可分为获取光功率和通过灰度获取二次电子数两个过程。像元接收的光功率可以通过入射到光阴极的光功率和像元结构获得,可表示为

$$\bar{P}(\lambda) = \frac{P_{\text{power}}(\lambda)}{S_{\text{probe}}} \times S_{\text{APS}}, \quad (2)$$

式中, $\bar{P}(\lambda)$ 为波长 λ 处单个像元接收的光功率, $P_{\text{power}}(\lambda)$ 为波长 λ 处计算的光功率, S_{probe} 为光功率计探头的面积, S_{APS} 为 APS 单个像元的面积。

倍增层倍增后的电子数可通过图像灰度平均值和

数字-电子转换因子计算,可表示为

$$\mu_e(\lambda) = \frac{\mu_y(\lambda) - \mu_{y,\text{dark}}}{K \times T_{\text{exp}}}, \quad (3)$$

式中, $\mu_e(\lambda)$ 为波长 λ 下倍增后得到的二次电子数, $\mu_y(\lambda)$ 为波长 λ 下测得的图像灰度平均值, $\mu_{y,\text{dark}}$ 为无光照情况下测得的图像本底, K 为 APS 的数字-电子转换因子, T_{exp} 为曝光时间。

由式(2)和式(3)得到的光谱响应可表示为

$$S(\lambda) = \frac{\mu_e(\lambda)}{\bar{P}(\lambda)} = \frac{[\mu_y(\lambda) - \mu_{y,\text{dark}}] \times S_{\text{probe}}}{K \times T_{\text{exp}} \times P_{\text{power}}(\lambda) \times S_{\text{APS}}}. \quad (4)$$

积分灵敏度可表示探测器对连续辐射通量的反应程度,微光像增强器的积分灵敏度在可见光波段的计算公式为

$$S_\phi = \frac{\int_0^\infty P_\lambda S_\lambda d\lambda}{\int_{380}^{780} P_\lambda K_\lambda d\lambda}, \quad (5)$$

式中: S_ϕ 为积分灵敏度,单位为 A/lm; P_λ 为光源的光谱辐射功率谱密度; S_λ 为器件响应率,单位为 A/W; K_λ 为光谱的光视效能,单位为 lm/W。积分灵敏度也可以

表示为

$$S_{\phi} = \frac{P_m \int_0^{\infty} P'_{\lambda} S_{\lambda} d\lambda}{P_m K_m \int_{380}^{780} P'_{\lambda} V_{\lambda} d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} P'_{\lambda} S_{\lambda} d\lambda}{683 \int_{380}^{780} P'_{\lambda} V_{\lambda} d\lambda}, \quad (6)$$

$$P'_{\lambda} = P_{\lambda} / P_m, \quad (7)$$

$$V_{\lambda} = K_{\lambda} / K_m, \quad (8)$$

式中, P_m 为单色辐射功率的最大值, P'_{λ} 为单色辐射功率的相对值, V_{λ} 为光谱光视效率, K_m 为 555 nm 处的光谱光视效能, 其值为 683 lm/W。实验中将 EBAPS 的光谱响应表征为输出电子数与输入光能量的比值, 而传统微光像增强器的光谱响应表征为输出电流与输入光能量的比值, 从而将式(6)表示为

$$S_{\phi}^{EB} = \frac{\int_{380}^{1000} P'_{\lambda} S_{\lambda}^{EB} d\lambda}{683 \int_{380}^{780} P'_{\lambda} V_{\lambda} d\lambda}, \quad (9)$$

式中: S_{ϕ}^{EB} 为 EBAPS 的积分灵敏度, 表示单位时间内待测器件输出电子数与入射总光通量之比, 单位为 $(s \cdot \text{lm})^{-1}$; S_{λ}^{EB} 为 EBAPS 的光谱响应率, 单位为 μJ^{-1} 。

3 测试系统设计

3.1 测试系统组成

EBAPS 光谱响应测试系统主要由光源系统、单色仪、测试暗箱、EBAPS 驱动电路、数字恒流源、高压电源、图像采集及测试软件组成, 其结构原理如图 2 所示。

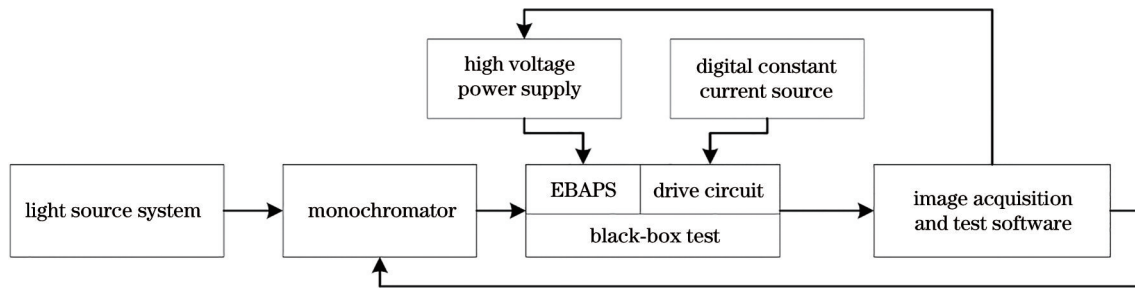


图 2 EBAPS 光谱响应测试的原理

Fig. 2 Schematic diagram of the EBAPS spectral response test

光源系统由 75 W 的溴钨灯和电源组成, 输出光色温为 2856 K。通过自研 EBAPS 测试专用高压电源可产生 -2000~0 V 稳定无过冲电压, 使 EBAPS 器件在测试过程中工作于电子轰击成像模式下。实验室自主研发的 EBAPS 驱动电路为器件正常工作提供保障, 同时也为图像采集提供硬件支持。通过单色仪出光口的狭缝限制输出单色光的辐射通量, 光线射入

暗箱前的积分球内, 在其内壁上发生多次漫反射, 并在出光口处形成均匀辐射的光。再将 EBAPS 安放在积分球出口处, 均匀光照射到 EBAPS 的光阴极面上转换为光电子, 经高压电场加速后轰击电子倍增层实现电子倍增产生二次电子, 此时电子被光电二极管收集并转换为数字信号输出至上位机, 其实物图如图 3 所示。



图 3 EBAPS 光谱响应测试的实物图

Fig. 3 Physical image of the EBAPS spectral response test

3.2 软件

EBAPS 光谱响应测试系统选用的软件平台是

基于 Visual Studio 2013 开发环境、利用 MFC (Microsoft Foundation Classes) 编写而成的。多线程

程开发系统可同时实现数据流采集和图像显示,并将采集到的数据进行实时处理分析。通过MFC程序设计,在一个操作界面完成了图像采集、测试参

数设置、输出光波长切换、EBAPS图像数据处理和测试结果曲线显示等功能,其程序界面如图4所示。

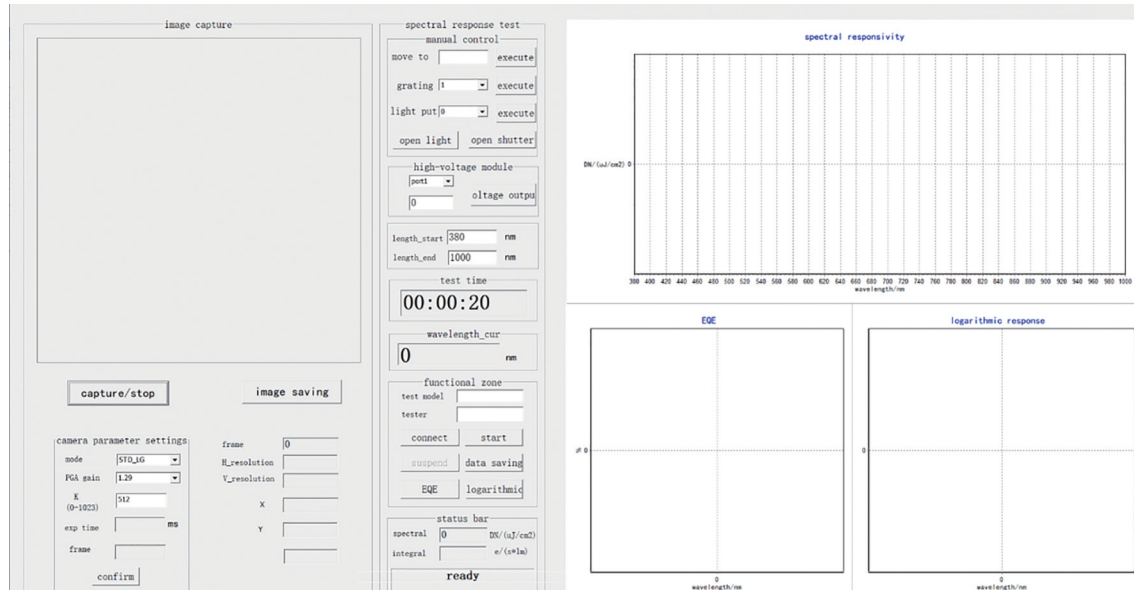


图4 测试系统程序界面

Fig. 4 Program interface of the test system

4 测试结果与分析

4.1 测试流程

对微光夜视技术国防科技重点实验室研制的EBAPS器件进行了光谱响应测试,该器件的像元尺寸为 $11\ \mu\text{m} \times 11\ \mu\text{m}$,数字输出位宽为12 bit,不仅具有光敏感特性,还具有电子敏感特性。实验前30 min打开溴钨灯进行预热,可见光源的供电电压为12 V,电流为6.35 A,保证光源功率为75 W。将光功率计探头放置在积分球出光口处,完成各个波长的光功率标定操作。再将待测EBAPS及其驱动电路放在积分球出光口的相同位置,为驱动电路加载5 V的工作电压使其正常工作。EBAPS器件图像数据通过USB传输至上位机,打开EBAPS测试软件并实时显示图像。当待测EBAPS工作在-800 V高压时(为避免待测原型器件在连续测试过程中可能出现的不稳定因素,EBAPS的轰击电压均不低于-800 V),通过定点调试可知,设置器件读出增益为 $7.25 \times$ 、曝光时间为21 ms时,图像平均灰度值最大约为饱和和信号的90%,从而避免发生图像饱和情况。在高压作用下,只有经腐蚀工艺处理过的APS区域具有电子敏感特性,因此测试过程中选取电子敏感区域(ROI)的图像灰度值进行计算。

4.2 结果分析

实验均在器件读出增益为 $7.25 \times$ 、曝光时间为21 ms的条件下进行。首先,在轰击电压为-800 V的情况下连续测试5次,得到的光谱响应曲线如图5所示。在相同输入光功率、轰击电压、曝光时间情况下,

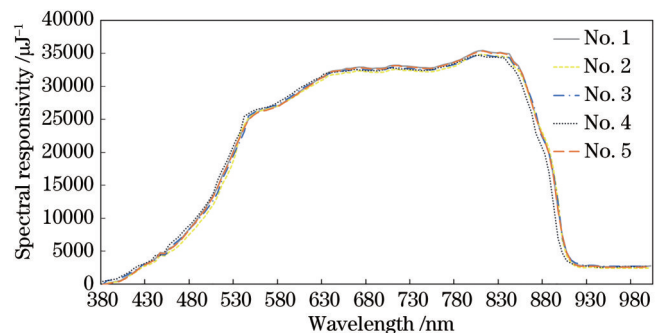


图5 EBAPS得到的光谱响应曲线

Fig. 5 Spectral response curve obtained by EBAPS

器件输出的图像灰度值会随器件读出增益参数设置的不同而改变,直接用灰度值作为测试结果不具有参考性。但在特定高压下器件内每个像素产生的电荷量只与输入信号有关,可真实反映器件在该高压下的光谱响应特性,因此,用经数字-电子转换因子换算后得到的电子数与输入光能量的比值表示光谱响应测试的实验结果,单位为 μJ^{-1} 。可以发现,该器件在电子轰击工作模式下起始响应波长在400 nm左右,在810 nm处器件的响应度达到峰值,在840~900 nm范围内器件响应迅速衰减但并没有完全截止。原因是GaAs的光阴极截止波长约为940 nm^[16],而硅的光谱响应长波限约为1100 nm^[17],因此推测940~1000 nm的光谱响应值为器件在光敏成像模式下测得的结果。

由式(9)计算得到图5中曲线的积分灵敏度及重复度如表1所示。可以发现,器件的积分灵敏度在 $3.17 \times 10^8 \sim 3.23 \times 10^8 (\text{s} \cdot \text{lm})^{-1}$ 之间浮动,且测试结果

表 1 EBAPS 的积分灵敏度

Table 1 Integral sensitivity of the EBAPS unit: (s·lm)⁻¹

No.	1	2	3	4	5
Value	3.23×10 ⁸	3.17×10 ⁸	3.20×10 ⁸	3.19×10 ⁸	3.21×10 ⁸

的重复度较好,重复度 σ 为 0.65%。

为分析器件在不同轰击电压下光谱响应的变化,给 EBAPS 分别加 -600, -700, -800 V 的电压,测试得到的曲线如图 6 所示。

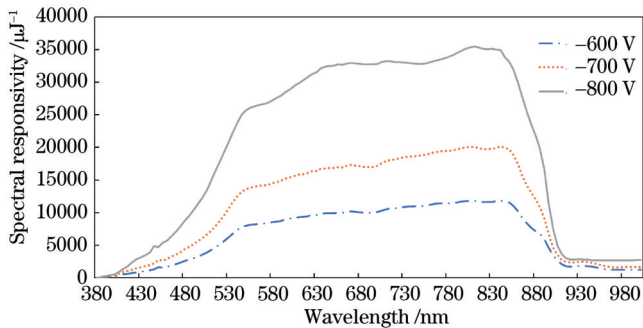


图 6 不同高压下测得的光谱响应曲线

Fig. 6 Spectral response curves measured under different high voltage

从图 6 可以发现,光阴极与栅极之间的轰击电压越高,器件的响应越大。但 -800~-700 V 之间的响应差值大于 -700~-600 V,这表明增大相同轰击电压时,器件光谱响应率的增大速度随轰击电压的升高而加快。EBAPS 的器件增益^[18-19]可表示为

$$G = \frac{\epsilon(U_0 - U_{\text{dead}})}{W}, \quad (10)$$

式中, G 为器件增益, ϵ 为电荷收集效率, U_0 为光阴极与电子倍增层之间的轰击电压, U_{dead} 为阈值电压, W 为产生一个电子-空穴对所需的能量。由式(10)可知,轰击电压和电荷收集效率对器件增益有直接影响:轰击电压越高,器件增益越大;电荷收集效率越大,器件增益越大。此外,文献[20]的研究结果表明,光阴极与背面轰击 CMOS(BSB-CMOS)之间施加的电压越大,越有利于电子聚焦,电荷收集效率也越高。因此,在轰击电压涨幅相同的情况下,电压越高,电荷收集效率越好,器件的光谱响应增长越快,与实验结果相吻合。

5 结 论

针对当前缺乏 EBAPS 光谱响应测试手段问题,基于微光像增强器光谱响应的测试方法,结合 EBAPS 的工作原理设计了一套 EBAPS 光谱响应测试系统,并实现了图像采集与实时显示的同步性、单色仪的自动调节、光谱响应计算、曲线绘制和保存等多项功能。在轰击电压为 -800 V 的工作条件下,对波长在 380~1000 nm 范围内的器件连续测试 5 次光谱响应曲线,计算得到器件的积分灵敏度达 3.2×10^8 (s·lm)⁻¹,重复

度为 0.65%。此外,通过改变 EBAPS 轰击电压使其先后工作于 -600, -700, -800 V 条件获得了相应的光谱响应曲线,增大轰击电压还有利于提高电荷收集效率和促进电子聚焦,导致光谱响应度增大,该结果对研究 EBAPS 器件增益具有重要的参考意义。

参 考 文 献

- [1] 张元涛,曹开钦,孙德新,等.高灵敏度低噪声科学级 CMOS 图像传感器微光探测[J].激光与光电子学进展,2018,55(8):080401.
Zhang Y T, Cao K Q, Sun D X, et al. Low light level detection based on scientific CMOS image sensor with high sensitivity and low noise[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 080401.
- [2] 刘虎林,王兴,田进寿,等.高分辨紫外电子轰击互补金属氧化物半导体器件的实验研究[J].物理学报,2018,67(1):014209.
Liu H L, Wang X, Tian J S, et al. High resolution electron bombarded complementary metal oxide semiconductor sensor for ultraviolet detection[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(1): 014209.
- [3] 张静,孙宇勃,付秀华,等.微光系统 CMOS 光学调色膜的研制[J].激光与光电子学进展,2020,57(9):093101.
Zhang J, Sun Y B, Fu X H, et al. Development of CMOS optical color modulation films for low-light-level systems[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(9): 093101.
- [4] Aebi V W, Boyle J J. Electron bombarded active pixel sensor: US6285018[P]. 2001-09-04.
- [5] Chrzanowski K. Review of night vision technology[J]. Opto-Electronics Review, 2013, 21(2): 153-181.
- [6] Intevac. Apache M611-02 low light level camera[EB/OL]. [2021-03-04]. <https://www.intevac.com/>.
- [7] 刘亚宁,桑鹏,吕嘉玮,等.微型低功耗 EBAPS 相机技术[J].红外技术,2019,41(9):810-818.
Liu Y N, Sang P, Lü J W, et al. Miniature low power consumption EBAPS camera technology[J]. Infrared Technology, 2019, 41(9): 810-818.
- [8] Doan Q T, Barbier R, Dominjon A, et al. Multiple-target tracking implementation in the ebCMOS camera system: the LUSIPHER prototype[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8436: 84360J.
- [9] 张海舟,母一宁,王连锴,等.EBCMOS 微光成像器件的研究[J].真空科学与技术学报,2017,37(10):991-996.
Zhang H Z, Mu Y N, Wang L K, et al. Impact of passivation layer on photoelectron energy loss in EBCMOS low-light-level imaging device: a simulation and experimental study[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2017, 37(10): 991-996.
- [10] Tang X D, Qian Y S, Kong X Y, et al. A high-dynamic range CMOS camera based on dual-gain channels[J]. Journal of Real-Time Image Processing, 2020, 17(3): 703-712.
- [11] 宋德,石峰,李野.基底均匀掺杂下 EBAPS 电荷收集效率的模拟研究[J].红外与激光工程,2016,45(2):

0203002.
Song D, Shi F, Li Y. Simulation of charge collection efficiency for EBAPS with uniformly doped substrate [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0203002.
- [12] 徐鹏霄, 唐光华, 唐家业, 等. EBCMOS 混合型光电探测器研究[J]. *光电子技术*, 2016, 36(4): 232-236, 252.
Xu P X, Tang G H, Tang J Y, et al. Review of EBCMOS hybrid photodetector[J]. *Optoelectronic Technology*, 2016, 36(4): 232-236, 252.
- [13] 李洪博, 刘云清, 宋延嵩, 等. CMOS 相机光电参数的测试方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(10): 100401.
Li H B, Liu Y Q, Song Y S, et al. Test method of optoelectronic parameters of CMOS camera[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(10): 100401.
- [14] Barbier R, Cajgfinder T, Calabria P, et al. A single-photon sensitive ebCMOS camera: the LUSIPHER prototype[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2011, 648(1): 266-274.
- [15] European Machine Vision Association. EMVA standard 1288: standard for characterization of image sensors and cameras[EB/OL]. (2010-11-29) [2021-06-30]. <http://www.emva.org>.
- [16] 高频, 张益军. 不同结构的反射式 GaAs 光电阴极的光谱特性比较[J]. *红外技术*, 2011, 33(7): 429-432.
Gao P, Zhang Y J. Comparison of spectral characteristics on different reflection-mode GaAs photocathodes[J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(7): 429-432.
- [17] 唐玉玲, 夏少杰, 陈俊. 表面微结构的高响应度 Si 基近红外光电探测器[J]. *红外与毫米波学报*, 2020, 39(4): 417-421.
Tang Y L, Xia S J, Chen J. High responsivity Si-based near-infrared photodetector with surface microstructure [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2020, 39(4): 417-421.
- [18] 田佳峰, 宋德, 陈卫军, 等. 电子倍增层表层掺杂分布对 EBCMOS 电荷收集效率的影响[J]. *半导体光电*, 2021, 42(1): 45-51, 105.
Tian J F, Song D, Chen W J, et al. Influence of doping distribution in electron multiplier surface layer on charge collection efficiency of EBCMOS[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2021, 42(1): 45-51, 105.
- [19] Hirvonen L M, Jiggins S, Sergeant N, et al. Photon counting imaging with an electron-bombarded CCD: towards wide-field time-correlated single photon counting (TCSPC) [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2015, 787: 323-327.
- [20] 王巍, 李野, 陈卫军, 等. EBCMOS 近贴聚焦结构及电场分布对电子运动轨迹的影响[J]. *中国光学*, 2020, 13(4): 713-721.
Wang W, Li Y, Chen W J, et al. Influence of proximity focusing structure and electric field distribution on electron trajectory in the EBCMOS[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 713-721.