

基于EBAPS的光响应非均匀性测试方法研究

刘秀娟 杨晔 郑舟 刘欢

Research on test method of photoresponse non-uniformity based on EBAPS

LIU Xiujuan, YANG Ye, ZHENG Zhou, LIU Huan

引用本文:

刘秀娟, 杨晔, 郑舟, 等. 基于EBAPS的光响应非均匀性测试方法研究[J]. 应用光学, 2025, 46(3): 682–688. DOI: 10.5768/JAO202546.0303004

LIU Xiujuan, YANG Ye, ZHENG Zhou, et al. Research on test method of photoresponse non-uniformity based on EBAPS[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 682–688. DOI: 10.5768/JAO202546.0303004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0303004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于光响应非均匀性的WhatsApp压缩视频来源识别

WhatsApp compressed video source camera identification based on photo response nonuniformity

应用光学. 2024, 45(2): 337–345 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0201009>

基于时空域滚动引导滤波的分尺度非均匀性校正算法

Scale-separated non-uniformity correction algorithm based on spatio-temporal rolling guidance filter

应用光学. 2025, 46(2): 309–318 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0202003>

光栅式成像光谱仪空间均匀性测试研究

Research on spatial uniformity test of grating imaging spectrometer

应用光学. 2020, 41(2): 354–360 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0203003>

EBAPS的调制传递函数测试系统

Modulation transfer function testing system for EBAPS

应用光学. 2024, 45(5): 992–1000 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0503001>

地面最小操纵速度试飞光电测试方法

Photoelectric test method for ground minimum control speed flight test

应用光学. 2021, 42(6): 1072–1079 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0603003>

红外目标模拟系统DMD成像非均匀性分析及校正

Nonuniformity analysis and correction of DMD imaging in infrared target simulation system

应用光学. 2020, 41(5): 1074–1081 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0506002>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 03-0682-07

引用格式: 刘秀娟, 杨晔, 郑舟, 等. 基于 EBAPS 的光响应非均匀性测试方法研究 [J]. 应用光学, 2025, 46(3): 682-688.

LIU Xiujuan, YANG Ye, ZHENG Zhou, et al. Research on test method of photoresponse non-uniformity based on EBAPS[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 682-688.



在线阅读

基于 EBAPS 的光响应非均匀性测试方法研究

刘秀娟¹, 杨 晔^{2,3}, 郑 舟^{2,3}, 刘 欢³

(1. 中国电子技术标准化研究院 北京 100176; 2. 微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065;

3. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘 要: 电子轰击有源像素传感器 (electron bombardment active pixel sensor, EBAPS) 的光响应非均匀性是指 EBAPS 中光电阴极被均匀光源照射时, 不同像素输出灰度不一致的现象, 尤其是在低光环境下, 图像的非均匀性会使细节识别变得困难, 影响后续图像处理和分析的准确性。光响应非均匀性主要由光电阴极不同区域对光响应的差异、电子敏感互补金属氧化物半导体不同区域的电子倍增特性差异、各像素间对同一激励的响应差异以及读出电路中传输信道的差异性等因素导致。针对 EBAPS 的非均匀性问题, 提出了一种基于 EBAPS 光电阴极响应、电子倍增以及像素响应非均匀性协同适配的测试方法。实验结果表明, 该方法能够有效评价 EBAPS 的非均匀性, 并且能够对器件的测试筛选和算法校正起到指导作用。

关键词: 电子轰击有源像素传感器; 非均匀性; 光响应; 测试方法; 测试模型

中图分类号: TN223

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202546.0303004](https://doi.org/10.5768/JAO202546.0303004)

Research on test method of photoresponse non-uniformity based on EBAPS

LIU Xiujuan¹, YANG Ye^{2,3}, ZHENG Zhou^{2,3}, LIU Huan³

(1. China Institute of Electronic Technology Standardization, Beijing 100176, China; 2. Science and Technology

on Low-Level-Light Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China; 3. Kunming Institute of

Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: The photoresponse non-uniformity of electron bombardment active pixel sensor (EBAPS) refers to the phenomenon that when the photocathode in the EBAPS device is illuminated by a uniform light source, the output grayscale of different pixels is inconsistent. Especially in low-light environments, the image non-uniformity makes it difficult to identify details, affecting the accuracy of subsequent image processing and analysis. Its generation mechanism is mainly caused by the difference in light response of different regions of the photocathode, the difference in electron multiplication characteristics of different regions of the electron-sensitive complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS), the difference in response of each pixel to the same stimulus, and the difference in transmission channels in the readout circuit. Aiming at the non-uniformity problem in EBAPS, a test method based on the coordinated adaptation of EBAPS photocathode response, electron multiplication and pixel response non-uniformity was proposed. Experimental results show that this method can effectively evaluate the non-uniformity effect of EBAPS devices and can play a guiding role in device test screening and algorithm correction.

Key words: electron bombardment active pixel sensor; non-uniformity; photoresponse; test method; test model

收稿日期: 2024-11-29; 修回日期: 2024-12-31

作者简介: 刘秀娟 (1983—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事光电器件标准化技术研究。E-mail: liuxiujuan@cesi.cn

引言

夜战作为现代战争中的一种重要作战形式,已成为掌握战场主动权的重要手段。夜战的关键在于先敌发现的能力,而这与夜视装备的性能密切相关。随着信息化技术的深入发展,微光夜视成像器件逐渐受到重视。当前,国内夜视装备中的微光像增强器在低照度环境下表现出较高的光电增益,可以实现暗弱目标的清晰成像。然而,其输出为模拟信号,缺乏数字化成像能力,导致在信息化作战环境中,微光像增强器难以与现代数字化装备相结合,不利于图像的传输、存储、分析和处理,影响数据共享和后续智能分析应用的效果,从而降低夜间作战的整体效率。另一方面,当前的数字化成像器件中,低照度的互补金属氧化物半导体(complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS)的灵敏度较低,不具备微光成像的能力,在低光环境下的成像均匀性差,成像效果不佳,增强电荷耦合器件(intensified charge coupled device, ICCD)和增强型互补金属氧化物半导体(intensified complementary metal-oxide-semiconductor, ICMOS)存在结构可靠性差、体积大不便携、界面能量损耗等诸多局限,这些缺陷严重影响了数字微光器件在夜间作战中的应用效果^[1-3]。

为了应对这些挑战,电子轰击有源像素传感器(electron bombarded active pixel sensor, EBAPS)技术作为一种新兴的数字微光成像技术,结合了真空电子技术和固态半导体技术的优势,同时具备高灵敏度、低噪声和数字化输出等优异性能,迅速成为高性能夜视装备未来发展的重要方向之一^[4-5]。

EBAPS 的结构如图 1 所示,通过光阴极捕捉微弱的人射光子并转换为光电子,光电子进入真空腔并通过静电场进行加速。EBAPS 的真空腔结构允许这些电子在无阻碍的环境中获得高动能,随后这些高能电子轰击到芯片的电子敏感区域^[6]。在这一过程中,轰击产生了电子-空穴对,发生电子倍增效应,即一个高能电子撞击到半导体材料时,会激发出更多的电子。电子倍增效应可以增加电子信号的强度,进而增强对微弱光信号的探测能力。

图像非均匀性是指在光电传感器件中,尽管在相同的照度和工作环境下,不同像素对同一目标的响应输出仍存在差异的现象^[7]。这种现象是器

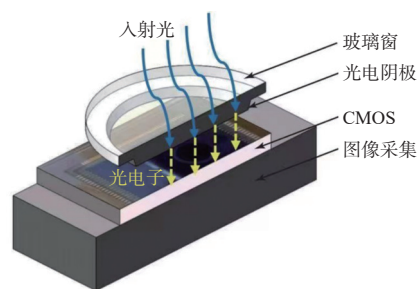


图 1 EBAPS 工作原理图

Fig. 1 Schematic diagram of EBAPS operation

件固定噪声的一种,具体表现为输出图像中亮度或对比度不一致,导致视觉上产生斑块、亮度漂移或缺陷像素等问题。通过三维灰度排布图可以直观展示这种现象,在均匀光源输入下,像素点的灰度值应呈现一致性,但由于器件响应的非均匀性,图像中不同区域的灰度值^[8]高低不一,反映出各像素对光信号响应的不一致性。

EBAPS 结构复杂、噪声来源多样,其非均匀性是器件成像效果的重要表征参数之一,非均匀特性测试分析对其性能提升有很大的帮助。针对 CMOS 和红外相机的非均匀性测试方法,通常侧重于评估读出电路和放大器^[9]偏差对非均匀性的影响,然而,EBAPS 的电子倍增特性导致轰击电压是影响其图像质量的关键因素之一,CMOS 传感器的测试方法对于 EBAPS 并不完全适用。由于 EBAPS 的成像条件受多方面因素影响,非均匀性测试方法需从 EBAPS 的非均匀来源方面进行考虑。

对 EBAPS 成像非均匀性的研究,可为后续噪声处理工序提供数据基础,对于在不同测试条件下不变的固定图案噪声,可以采取两点法进行提前标定校正,对于随着一定规律改变的非均匀噪声,可以通过采集多组图像数据进行基于最小二乘法的多点标定校正,对于无法利用标定校正方法去除的非均匀噪声,可与其他噪声一起对深度学习进行训练,利用深度学习来识别噪声特点并进行去除,在有效抑制噪声信息的同时尽可能保留更多的边缘细节,提高图像清晰度^[10-11]。

本文针对 EBAPS 的非均匀性来源以及成像特点设计了专用的非均匀性测试方法,通过多维度评估,区分不同技术组件的影响,为 EBAPS 的非均匀性测试提供了精确的分析基础,也为进一步研究非均匀校正算法提供了数据支持,确保器件在不同工作模式和应用场景下保持高质量的成像效果。

1 机理分析

如图2所示,在EBAPS中,图像非均匀性问题源于其复杂的工作原理和多重差异的叠加效应。首先,光电阴极对光子的响应存在区域差异。光电响应差异的机理为光电阴极在不同区域对光子的转换效率不一致,并在后续电子倍增过程中被放大,从而造成像素间显著的亮度差异。其次,电子敏感CMOS表面倍增层的增益能力在区域间存在不均,这在低照度条件下尤为明显,直接影响图像的整体一致性。此外,CMOS芯片内各像素的模数转换电路(analog to digital converter, ADC)、比较器和放大器的工艺差异,使每个像素对同一输入信号的响应不完全一致,而行、列读出电路的偏差进一步加剧了这种不一致性,导致同一输入光信号在不同像素处输出不同的电信号,这种信号失配最终在图像中表现为各像素亮度或灰度的差异。在EBAPS的整体制备工艺中,任何细微的制造偏差都会导致器件的非均匀响应。这些偏差可能出现在电子倍增层的掺杂均匀性^[12]、光电阴极的材料分布^[13],以及器件的装配工艺和结构的完整性方面。例如,减薄过程中不均匀的腐蚀操作常常引发像素缺陷,例如暗斑点或亮斑点,这些斑点会对成像质量产生负面影响。以上这些多重差异在图像生成链路中层层叠加,使得EBAPS的图像非均匀性更加复杂,严重影响EBAPS的成像质量和应用效果。

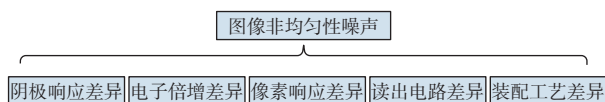


图2 EBAPS非均匀性噪声引入链路图

Fig. 2 EBAPS non-uniformity noise introduction path diagram

图3展示了实际拍摄的EBAPS非均匀图像,其中存在明显的缺陷像元、亮度不均和视场差异,其中,输出亮度差异是由光电阴极响应、电子倍增特性、像素响应、读出电路传输等引起。这种非均匀性不仅影响图像的一致性,还会显著降低图像的对比度,使细节难以分辨,导致实际使用中产生严重的功能性障碍,不仅影响用户的视觉体验,还会在关键任务(如夜间侦察、瞄准或目标识别)中降低设备的有效性,导致误判或观察困难。如果不进行适当的测试筛选和算法校正,图像质量将无法满足不同应用需求。

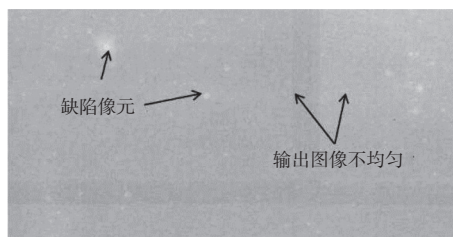


图3 EBAPS的输出图像

Fig. 3 Output image of EBAPS

2 EBAPS非均匀性成像特点

EBAPS的噪声类型复杂,其非均匀性不仅受光照条件及电路读出噪声的影响,还受光阴极响应、电子敏感CMOS芯片表面膜层制备工艺及器件整体装配工艺等因素的影响。在极低照度下采集暗弱目标时,这些因素的综合作用会进一步加剧图像非均匀性,显著影响成像质量。图4展示了非均匀性对EBAPS实际成像效果的影响,体现了多源噪声在暗弱目标成像中的累积效应。由于EBAPS的工作场景通常为在极低照度下采集暗弱目标,因此需要对图像进行增强处理,基于灰度分布信息的增强算法虽然能有效提高器件对目标的辨识率,但也会增强噪声信号,尤其是电路引入^[14]的非均匀性噪声信号。

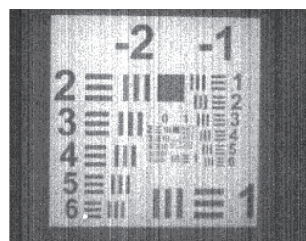


图4 非均匀性在实际应用中对成像效果的影响

Fig. 4 Imaging effects of non-uniformity in practical applications

由于EBAPS的高增益特性本质来源于电子敏感CMOS对电子的倍增能力,因此这一核心部件对成像效果起到决定性作用。如图5(a)、图5(b)、图5(c)所示,芯片加工工艺中引入的条纹、刷痕及缺陷像元会在电子倍增的过程中更加明显,进而影响成像效果。但在使用过程中研究特定的校正算法可以减少部分非均匀噪声的影响,校正后结果如图5(d)所示。

EBAPS工作时需要依据实际工作环境对轰击电压进行自适应调整,由轰击电压带来的非均

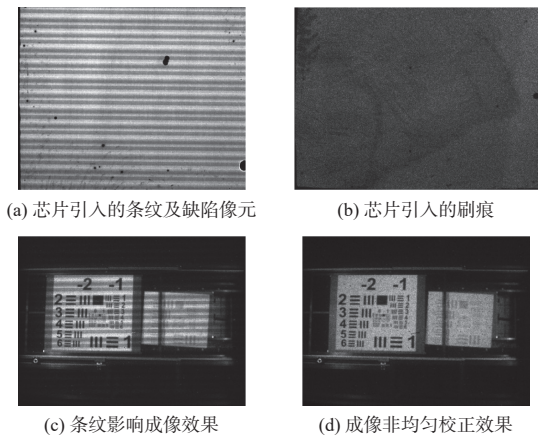


图5 电子敏感 CMOS 引入的非均匀噪声

Fig. 5 Non-uniform noise introduced by electronically sensitive CMOS

匀噪声不仅源于电子敏感 CMOS 芯片表面膜层厚度的不一致, 还可能由不同方向上光电阴极与基座之间的平行度不合格引起。这些装配工艺中的细微差异会导致电场分布不均, 进而影响电子倍增过程的均匀性, 加剧图像的非均匀性噪声, 在电压未超过阈值电压前会出现区域性的非均匀电场分布, 超过阈值电压后会导致器件产生如图 6(a) 所示的边缘放电, 严重影响其使用。图 6(c) 和图 6(e) 是对图像图 6(b) 和图 6(d) 的二值化处理^[15] 图像, 可以直观反映出器件区域性的非均匀分布。

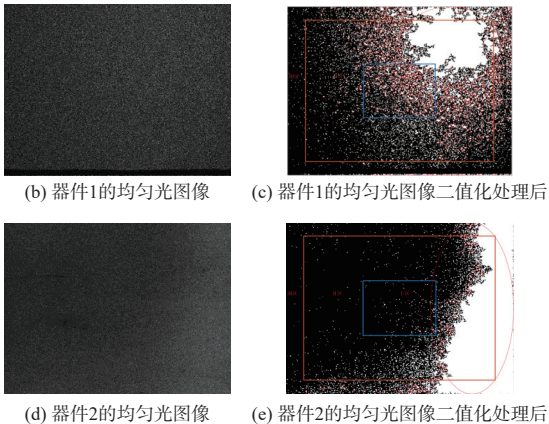


图6 电子轰击引入的非均匀噪声

Fig. 6 Non-uniform noise introduced by electron bombardment

可以通过采集 EBAPS 的均匀光图像并对其灰度值进行分析来进行非均匀性测试, 图 7(a) 为 EBAPS 在 1 lx 条件下拉伸后的均匀光图像, 截取其避开黑点等缺陷像素的部分区域, 图 7(b) 为截取区域的三维灰度分布图。由于非均匀性对 EBAPS 的成像效果影响巨大, 在实际应用过程中如果不对传感器进行测试筛选, 就无法真正了解其非均匀情况, 也就无法研究专用的校正算法。

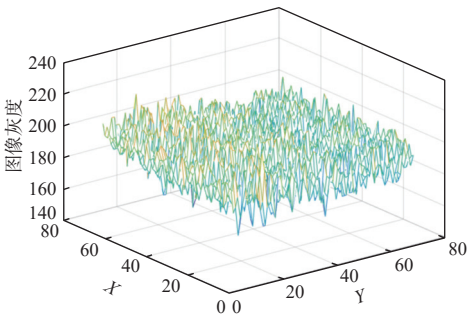
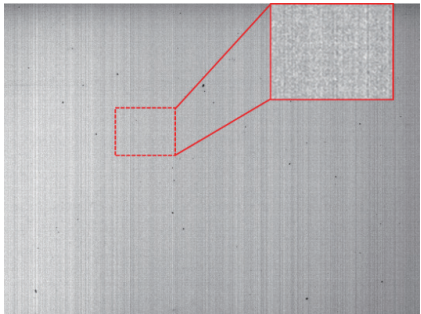


图7 均匀光图像及三维灰度分布图

Fig. 7 Average grayscale and 3D grayscale distribution diagram

3 EBAPS 非均匀性测试方法

CMOS 的非均匀性用于表征像元间光响应度的偏差^[16], 其测试方法可以参照国家标准 GB/T 43063-2023《集成电路 CMOS 图像传感器测试方法》, 该方法对图像传感器的非均匀性提供了明确的定义和测试方法, 确保不同设备的性能可以进行标准化的对比和评估。光响应非均匀性(photo response non-uniformity, PRNU)的原理^[17] 是基于方差衡量像素响应的离散性, 可以更直观地量化和表征非均匀性, 在光源输出为均匀光的条件下采集器件半饱和的图像并计算图像的均值和空域方差。相比其他定性或不全面的衡量方法, PRNU 提供了一个明确的数学模型, 使测试结果更加客

观。其次, PRNU^[18] 对小范围像素差异的敏感性较高, 能够捕捉细微的制造差异, 这对高精度应用至关重要。其计算公式如式(1)所示:

$$E_{\text{PRNU}} = \frac{\sqrt{s_{y_0}^2 - s_{y_{\text{dark}}}^2}}{\mu_{y_0} - \mu_{y_{\text{dark}}}} \quad (1)$$

式中: s_{y_0} 为传感器有光时各像元之间的空域方差; $s_{y_{\text{dark}}}$ 为传感器暗场各像元之间的空域方差; μ_{y_0} 为传感器有光时各像元平均得到的图像; $\mu_{y_{\text{dark}}}$ 为传感器暗场图像各像元平均得到的图像。空域方差用于量化各个像素之间的响应差异, 反映不同像素之间的响应非均匀性。

然而对于 EBAPS 来说, 光照降低的条件下会引入噪声, 进而影响器件的整体成像水平。如图 8(a) 所示, 随着照度的升高, EBAPS 成像的非均匀性逐渐降低, 可以看出光照是非均匀性测试条件中需要考虑的重要因素之一。随着照度的持续降低, EBAPS 的工作原理由芯片光子成像转变为倍增电子成像, 因此轰击电压和电子敏感 CMOS 表面膜层会影响其成像非均匀程度。针对实验采用样品, 在 $5 \times 10^{-3} \text{ lx}$ 的条件下, 控制最大工作电压在 800 V 以内以防损害其性能, 设计梯度试验计算 0, 200 V, 400 V, 600 V 和 800 V 时的图像去除随机噪声后的非均匀性, 如图 8(b) 所示, 轰击电压在一定范围内增加可以使非均匀性线性降低。虽然轰击电压的增加会带来一定的随机散射噪声, 但对于成像的非均匀性有改善作用, 成像结果如图 9 所示。因此对于 EBAPS 的非均匀性测试不能依赖图像上的灰度值分布, 还需充分考虑测试时的光照条件和轰击电压的影响, 同样的非均匀性数值可能对应着高照度、低电压及低照度、高电压的情况, 如果不考虑低照度工作条件, 很难客观地对 EBAPS 器件进行筛选。

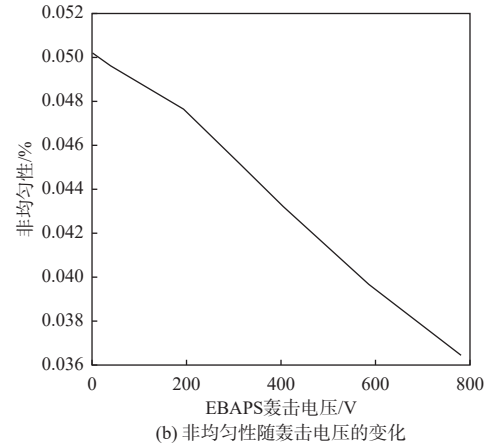
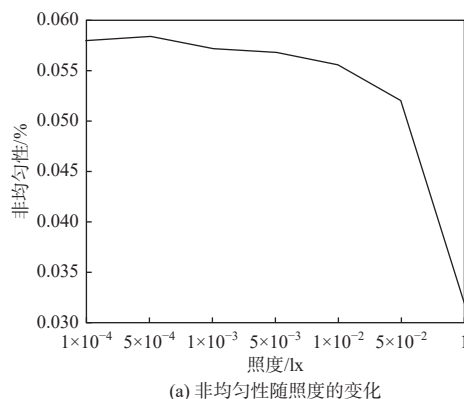


图 8 不同照度及不同电压下 EBAPS 的非均匀性

Fig. 8 Non-uniformity of EBAPS devices under different illuminance and voltage conditions

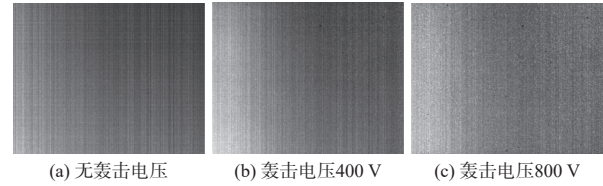


图 9 轰击电压对 EBAPS 成像非均匀性的影响

Fig. 9 Effect of bombardment voltage on non-uniformity of EBAPS imaging

选取 5 只 EBAPS 器件进行非均匀性测试, 采集了 500 张在 $1 \times 10^{-4} \text{ lx}$, $5 \times 10^{-4} \text{ lx}$, $1 \times 10^{-3} \text{ lx}$, $5 \times 10^{-3} \text{ lx}$ 等不同照度、0~1 500 V 内不同电压下的图像数据。由图 8 可知, 照度及电压都会对 EBAPS 器件的非均匀性产生较大影响, 而 CMOS 测试方法并未考虑这两项关键参数; PRNU 测试方法是在 CMOS 成像半饱和时测试 CMOS 的非均匀性, 针对 EBAPS 在高照度、低电压及低照度、高电压条件下均可能出现成像半饱和的情况, 进行多组照度和多组电压的测试结果求平均, 可以有效避免单一条件下测试的局限性。根据 EBAPS 的工作原理和特性建立针对 EBAPS 的非均匀性测试模型 EPRNU, 如式(2)所示:

$$E_{\text{EPRNU}} = \frac{1}{M} \sum_{L=1 \times 10^{-4}}^{5 \times 10^{-3}} \sum_{V=100}^{V_{\text{max}}} \frac{\sqrt{s_{y_0}^2 - s_{y_{\text{dark}}}^2}}{\mu_{y_0} - \mu_{y_{\text{dark}}}} \quad (2)$$

式中: L 为光源照度, lx ; V 为施加轰击电压, V ; V_{max} 为输出图像为半饱和时的电压值, V ; M 为组数。

根据 EBAPS 非均匀性测试模型可知, 需要精确控制不同的工作照度和工作电压以获得多组数据并计算其平均值, 其结果可全面评价 EBAPS 的成像非均匀性。为了提高测试条件的可重复性, 搭建了如图 10 所示的测试系统。测试系统包括均

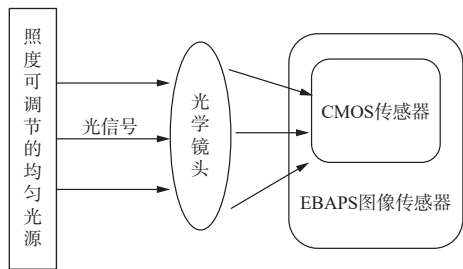


图 10 EBAPS 图像非均匀性测试系统

Fig. 10 EBAPS device image non-uniformity testing system

匀涂层的卤钨灯积分球光源、光阑、稳定高压电源、静电防护设备、温控系统、暗室环境和实时采集软件。均匀涂层卤钨灯积分球光源与光阑共同组成照度可调节的均匀光源, 电流调节不影响光源的光谱分布; 稳定高压电源和静电防护设备为 EBAPS 施加轰击电压; 温控系统和暗室环境则能

确保实验过程中无温度变化及杂散光干扰。测试系统可精确调节输入照度、电压及电路等方面引入的非均匀性, 精确定位追踪各个像素的响应波动范围。实时采集软件可以分析探测器各像素的输出信号, 并同步计算出非均匀性参数。

4 验证及结论

选取 5 只同批次、工艺参数一致, 在工艺状态稳定的情况下制备的 EBAPS 进行非均匀性测试, 利用 EBAPS 非均匀性测试模型 EPRNU 对不同器件采集的图像进行计算, 计算结果如表 1 所示, 并由 10 位不同性别、年龄、具有正常视力的专业测试人员进行主观评价。在相同照度条件(约 5×10^{-3} lx)下, 不同轰击电压使成像达到半饱和的状态时输出的均匀光图像如表 1 所示, 5 只器件在相同的成像灰度范围内进行非均匀性的对比和测试。

表 1 不同器件 EPRNU 的计算值

Table 1 Calculated values of EPRNU for different devices

器件编号	1	2	3	4	5
均匀光图像					
EPRNU	14.7%	18.2%	22.6%	19.9%	16.7%

EBAPS 图像的非均匀性测试误差包括测试方法自身的误差和外界因素影响带来的误差。一方面, 非均匀性测试是一种图像客观评价方法, 其测试准确性在图像质量评价领域通常利用皮尔逊线性相关系数 (pearson linear correlation coefficient, PLCC) 来表征客观评价和主观评价之间拟合后的相关性, 本文中测试方法得分与主观评价得分之间的 PLCC 为 0.9, 表明测试方法的准确性较高; 另一方面, 外界影响因素会带来测试误差, 在同一个 EBAPS 测试过程中连续采集 50 帧时, 帧与帧之间的结果不完全一致, 误差最大为 0.68%, 标准差为 0.26。本文提出的测试方法, 最终测试结果与人眼主观观测结果一致, 说明其对于 EBAPS 输出图像的非均匀性具有稳定的测试能力, 此方法不仅能有效评价 EBAPS 的性能, 还可推广应用于 ICCD 等其他相关器件的性能测试。

EBAPS 的非均匀性问题对其输出图像的质量有极大影响, 如果不进行有效的测试筛选和算法校正, 设备的实际应用将受到严重限制。因此, 数字微光器件未来的研究应侧重于开发 EBAPS 针对

性强的非均匀性检测和校正方法, 以确保 EBAPS 器件能够在各种应用场景下提供高质量的成像结果, 满足用户的需求。本文提出的 EBAPS 非均匀性测试模型, 可以对 EBAPS 器件的光响应非均匀性作出准确判断, 与人眼视觉感知结果相匹配, 准确率较高, 具有高度的可重复性, 为 EBAPS 的广泛应用提供了强有力的技术支持。

参考文献:

[1] ALEXANDRE L R, CEDRIC V, PHILIPPE P, et al. Comparison of X-ray and electron radiation effects on dark current non-uniformity and fluctuations in CMOS image sensors[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2020, 67(1): 268-277.

[2] LEE D H, PARK Y, MOON B, et al. Improvements of the PLD (pulsed laser deposition) method for fabricating photocathodes in ICMOS (Intensified CMOS) sensors[C]//Optical Sensors 2019: SPIE Optics + Optoelectronics. Prague, Czech Republic: SPIE, 2019: 116.

[3] TAKAHASHI N, SUENAGA H, ICHII G, et al. Time-re-

- solved observation of 150 kHz high-power pulse burst high-frequency discharge using a high-speed video camera and an intensified charge coupled device camera[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2024, 63(5): 05SP12.
- [4] FENG Z, ZHOU Z, ZENG J, et al. Comparison of corrosion behavior of a-C coatings deposited by cathode vacuum arc and filter cathode vacuum arc techniques. *Coatings*, 2024, 14(8): 1053.
- [5] SHARMA K, DEKA U. Comprehensive review on various instabilities in semiconductor quantum plasma[J]. *Brazilian Journal of Physics*, 2021, 51(6): 1944-1955.
- [6] YANG Y, HAN K, YAN L, et al. Study on effect of different temperatures on imaging performance of EBAPS devices[C]//Seventh Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Applications. Kunming, China: SPIE, 2020: 117634T.
- [7] 韩剑, 焦岗成, 闫磊, 等. 数字微光器件研究进展[J]. *应用光学*, 2023, 44(4): 874-886.
HAN Jian, JIAO Gangcheng, YAN Lei, et al. Research progress of digital low-light-level devices[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(4): 874-886.
- [8] 张艳超, 高策, 宋聪聪, 等. 用于实时图像增强的灰度等间距密度均衡改进算法[J]. *液晶与显示*, 2024, 39(4): 482-489.
ZHANG Yanchao, GAO Ce, SONG Congcong, et al. Real-time image enhancement based-on improved algorithm of gray-scale equispacing density equalization[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(4): 482-489.
- [9] 陈志刚, 张伟君, 张兴雨, 等. 基于运算放大器的超导纳米线单光子探测器低温直流耦合读出电路[J]. *物理学报*, 2024, 73(13): 367-377.
CHEN Zhigang, ZHANG Weijun, ZHANG Xingyu, et al. Cryogenic DC-coupled readout electronics for high-speed superconducting nanowire single-photon detectors based on a commercial operational amplifier[J]. *Acta Physica Sinica*, 2024, 73(13): 367-377.
- [10] 赵冬冬, 叶逸飞, 陈朋, 等. 基于残差和注意力网络的声呐图像去噪方法[J]. *光电工程*, 2023, 50(6): 230017.
ZHAO Dongdong, YE Yifei, CHEN Peng, et al. Sonar image denoising method based on residual and attention network[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2023, 50(6): 230017.
- [11] 闫宁, 周斌, 王伟明, 等. 基于子空间投影的生成对抗网络红外图像降噪[J]. *半导体光电*, 2024, 45(5): 847-852.
YAN Ning, ZHOU Bin, WANG Weiming, et al. Infrared image denoising based on a generative adversarial network improved by subspace projection[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2024, 45(5): 847-852.
- [12] FIGUERA J R, CATELAN M, HORNE K, et al. Digging deeper into the dense galactic globular cluster terzan 5 with electron-multiplying CCDs: variable star detection and new discoveries[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2024, 689: A108.
- [13] 胡朝龙, 刘磊, 钱芸生, 等. 一种基于微光夜视系统下光电阴极探测的评价因子[J]. *应用光学*, 2023, 44(3): 628-635.
HU Zhaolong, LIU Lei, QIAN Yunsheng, et al. Evaluation factor for photocathode detection in low-level-light night vision system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(3): 628-635.
- [14] 夏皓天, 钱芸生, 王逸伦, 等. 基于 FPGA 的低照度条件下 EBAPS 图像混合噪声去除算法[J]. *应用光学*, 2022, 43(6): 1075-1087.
XIA Haotian, QIAN Yunsheng, WANG Yilun, et al. Mixed noise removal algorithm of EBAPS image under low illumination condition based on FPGA[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(6): 1075-1087.
- [15] 孙国栋, 徐昀, 徐亮, 等. 不均匀光照和重影的仪表图像二值化方法[J]. *应用光学*, 2020, 41(1): 74-78.
SUN Guodong, XU Yun, XU Liang, et al. Binarization method of instrument image with uneven illumination and ghosting[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(1): 74-78.
- [16] BAI J Z, BAI Y L, HOU X, et al. The analysis of electron scattering among multiplying layer in EBAPS using optimized Monte Carlo method[J]. *Modern Physics Letters B*, 2020, 34(34): 2050398.
- [17] IBRAHIM K H, KORANY N R, SALEH S M. Effects of power transformer high-frequency equivalent circuit parameters non-uniformity on fault diagnosis using SFRA test[J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2022, 13(4): 101674.
- [18] LI J, LIU Y, MA B, et al. A novel PCA-based method for PRNU distillation to the benefit of source camera identification[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(11): 6583.