

一种新型偏振-微光 EMCCD 传感器研制

顾子悦，那启跃，徐建东，沈吉，常维静

(华东光电集成器件研究所，江苏 苏州 215163)

摘要：随着图像传感器的发展，图像传感器需要探测更多维度的图像信息。为了解决偏振单元无法在低照度条件下成像的问题，设计了一种新型偏振-微光结构，新型结构单元的引入可以大幅度提高器件在低照度微光条件下的成像质量。完成了偏振-微光结构的工艺制作，同时利用多次高能离子注入及高温退火形成鞍形 p 型纵向抗晕结构，实现了 EMCCD 器件的光晕抑制。最后对器件成像性能进行了分析，器件在 10^{-2} lx 量级环境照度下成像质量几乎不下降，同时也能够获得足够的偏振信息，实现对目标的偏振探测。此新型偏振-微光结构能使图像传感器在低照度微光条件下完成对目标的多维度信息探测。

关键词：EMCCD；偏振；微光；抗光晕

中图分类号：TN223

文献标识码：A

文章编号：1001-8891(2024)10-1138-07

Development of a Novel Polarization Low-light EMCCD Sensor

GU Ziyue, NA Qiyue, XU Jiandong, SHEN Ji, CHANG Weijing

(East China Institute of Optoelectronic Integrated Device, Suzhou 215163, China)

Abstract: The development of image sensors has made it necessary to detect more dimensions of image information. Hence, a new polarization low-light structure was designed to solve the problem in which polarization units cannot be imaged under low-illumination conditions. The introduction of this new structural unit significantly improves the imaging quality of the device under low illumination and light conditions. We completed the production process of a polarized low-light structure and utilized multiple high-energy ion implantation and high-temperature annealing to form a saddle-shaped, “p”-shaped, longitudinal antiblooming structure to achieve the halo suppression of EMCCD devices. Finally, the imaging performance of the device was analyzed, and it was found that the imaging quality of the device hardly decreased under low-illumination conditions, while sufficient polarization information was obtained to achieve polarization detection of the target. This new polarized low-light structure enables image sensors to detect multidimensional information from targets under low-illumination and low-light conditions.

Key words: EMCCD, polarization, low light, antiblooming

0 引言

相较于传统的 CCD 器件，电子倍增 CCD (electron multiplying charge coupled device, EMCCD) 器件在弱光条件下表现出色，能够捕捉微弱信号并在每个像素上进行多次电子累积，从而显著提高信噪比，有效地增强微光条件下的图像质量，使其成为在科学、医学、天文学等领域中的重要选择^[1-4]。

偏振成像能够提供与目标表面的含水量、纹理、电导率、粗糙度等表面特性相关的偏振信息，利用

目标与背景间偏振特性的差异，可以凸显隐蔽在自然背景中的军事目标。偏振成像技术可以凸显人造目标，在一定程度上弥补传统军事侦察的不足。通常情况下，人造目标物体相比于自然物体往往具有较高的偏振度，尤其反映在电介质材料上，如塑料、玻璃和某些金属板^[5-8]。因此，对于对典型目标的军事打击目标如坦克、装甲车、无人机、自行榴弹炮、帐篷等，通过偏振成像技术，有效利用偏振矢量信息，就可以增强图像对比度，提高信噪比，从而在军事应用上可以改善目标探测成像的质量、提高探

收稿日期：2024-06-19；修订日期：2024-07-24。

作者简介：顾子悦（1992-），男，工程师，硕士，主要从事光电器件设计及开发，E-mail: jssgzy@vip.qq.com。

通信作者：沈吉（1988-），男，高级工程师，硕士，主要从事光电器件与组件科研开发，E-mail: njustshenji@126.com。

基金项目：科技创新 2030-“新一代人工智能”重大项目（2018AAA0103100）

测精度,为及时发现敌方目标提供有效的手段^[9-11]。

偏振成像探测技术作为一种新型的光电探测技术,在目标识别及处理方面相对于传统的成像模式有着独特的优势,对未来战争中应对日益复杂战场环境下目标侦察与识别具有重要的意义^[12-15]。

传统偏振单元结构受到偏振单元透光率的影响^[14],在低照度条件下无法获得足够的光强度信息,为了解决器件在低照度条件下成像的问题,前期研究中^[5]通过引入无偏振单元结构,使器件在 10^{-1} lx 条件下具备成像能力。为了进一步提升器件在低照度条件下的成像能力,在文献[5]的研究基础上优化设计了新的偏振单元阵列,该结构包含更多的无偏振单元。此外,为解决新型偏振-微光 EMCCD 器件在低照度条件下易受到强光干扰而产生光晕的问题,在 EMCCD 器件像元中设计了鞍形 P 阵纵向抗光晕结构,从而实现抗晕目的。

1 器件偏振-微光结构设计

1.1 偏振-微光结构阵列设计

对于偏振成像的解算过程,通常利用当前像元及其周围像元的响应直接或间接得到该像元对不同方向的偏振分量或偏振态,进而解算出偏振信息,完成偏振成像解算。微纳偏振光栅单元集成于成像器件表面,每个光敏单元均对应一个偏振单元。

如图 1 所示为传统 2×2 偏振单元阵列设计^[14],包含 4 个偏振方向 (0° 、 45° 、 90° 、 135°) , 同时在相邻偏振单元之间,设计了一定宽度的金属光栅作为隔离,避免相邻像元之间的串扰。考虑到低照度探测的需求,需要设计白光通道增加进光量,文献[5]中设计了图 2 所示的像元阵列结构,该设计在 3×3 阵列中引入无偏振单元结构,可增强集成偏振器件对微光的响应^[5]。

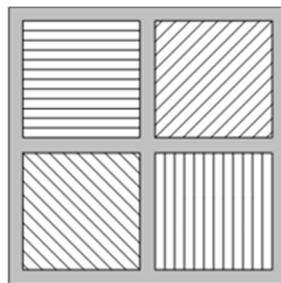


图 1 传统 2×2 偏振单元阵列设计^[14]

Fig.1 Design of unit array with four polarization directions^[14]

但 3×3 阵列单元设计仍存在问题,对于无偏振单元的像素,在解算其偏振信息时,需要采用周围 8 个像素的偏振信息进行加权平均得到,在进行原始偏振图像预处理时,会存在预处理出不同偏振角度的超像元阵列,进而使得后期的偏振信息解算过程

变得复杂与困难。

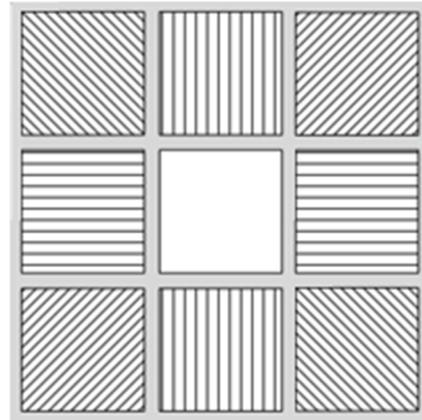


图 2 引入无偏振单元的 3×3 阵列设计^[5]

Fig.2 Design of 3×3 polarization unit array with non polarization units^[5]

结合图 1 和图 2 的设计思想,优化设计了图 3 所示的像元阵列结构。同样具备 4 个偏振方向 (0° 、 45° 、 90° 、 135°) 和无偏振单元(即白光通道),每个重复单元包含 2 个偏振方向 (0° 、 135° 或者 90° 、 45°) 和 2 个无偏振单元。该优化的偏振阵列结构的优势在于,既保留了白光通道,又使得还原后的像素超像元结构是固定的,便于图像处理。

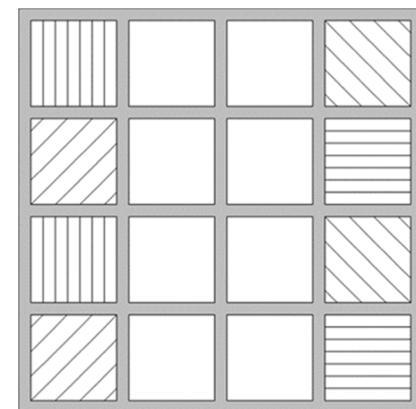


图 3 优化后的偏振单元阵列设计

Fig.3 Optimized polarization unit array design

1.2 偏振-微光结构膜层设计

入射到金属微纳光栅表面的光可以分解为电矢量垂直于光栅方向的 TM 波和电矢量平行于光栅方向的 TE 波。根据理论分析,金属微纳光栅的偏振性能与金属光栅的周期、宽度和栅槽深度密切相关,而衬底的选择直接影响消光比的设置。

由于 Si 片在 550 nm 波长处的折射率高达 4.09,存在较大的反射能量损失。为了进一步提高偏振-微光结构的透光率,在 Si 基片与金属光栅之间引入单层或多层减反射膜,能够有效减少表面反射损失,提高光栅的透过率。根据光学薄膜理论,对于理想的减反射膜,应使用折射率小于 1.99 的材料。为此,

可在金属光栅和 Si 基片之间加入低折射率 SiO_2 介质层作为减反射膜层，设计的带有 SiO_2 介质层的金属光栅结构示意图如图 4 所示。

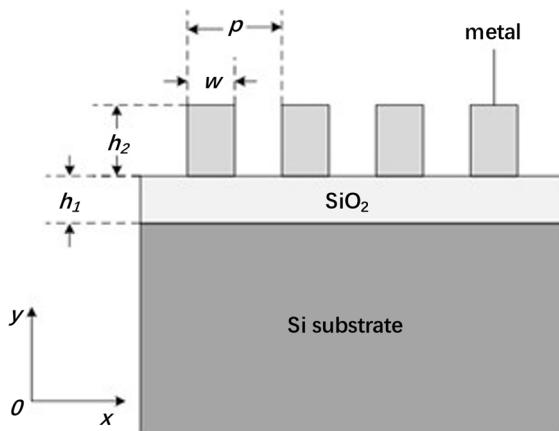


图 4 在金属光栅和 Si 基片之间添加 SiO_2 的结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of adding SiO_2 between metal grating and Si substrate

通过改变 SiO_2 厚度，能实现对特定波长的增透效果。当固定光栅周期是 100 nm，金属厚度 100 nm，占空比 0.5 时， SiO_2 厚度对透过率影响明显。在不引入 SiO_2 介质层时，在可见光波段 TM 波的透过率较低，在 400 nm 波长处其透过率小于 0.6，由于 EMCCD 器件结构影响， SiO_2 介质膜的厚度不小于 4 μm ，此时上下表面的光程差较大，可以对较宽的波长引起 TM 波透过率的干涉增强，起到增透膜的作用。综合评判，选择的 SiO_2 介质层厚度为 4.1 μm ，可在较宽光谱范围内获得响应增透效果。此时，膜系的反射率曲线如图 5 所示，在 400~1100 nm 区间内的平均反射率为 5.2%。通过设计分析可知，在 Si 基片和金属光栅之间加一层低折射率的 SiO_2 介质层作为减反射膜，可有效提高 TM 偏振光的透过率和 TE 偏振光的反射率，同时也会消弱金属栅条与 Si 基片界面处激发的表面等离子体，金属光栅的偏振性能得到明显提升。

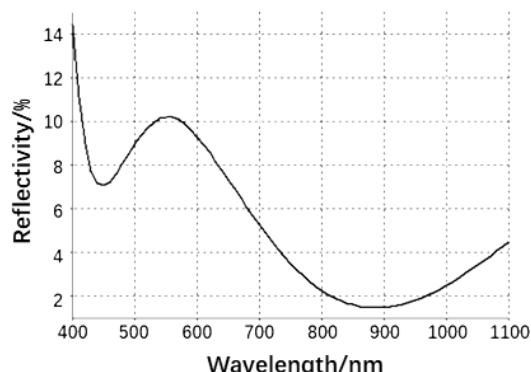


图 5 膜系反射率曲线

Fig.5 Film reflectance curve

等离子体干法刻蚀方法流程如图 6 所示。首先，将 SiO_2 基底进行彻底清洗干燥，以保证表面无杂质且与金属可以良好粘附；然后，采用磁控溅射的方法镀铝，厚度为 100 nm，相比于其他镀膜方法，磁控溅射具有更强的附着力，避免小线条在后端工序中脱离表面；随后，在样品表面旋涂电子束胶 ARP6200，并进行图形曝光、显影等步骤，得到刻蚀掩模；然后采用干法刻蚀对铝膜进行刻蚀，将电子束胶上的图形传递至铝膜；最后，利用氧等离子体处理表面残胶，得到最终样品。

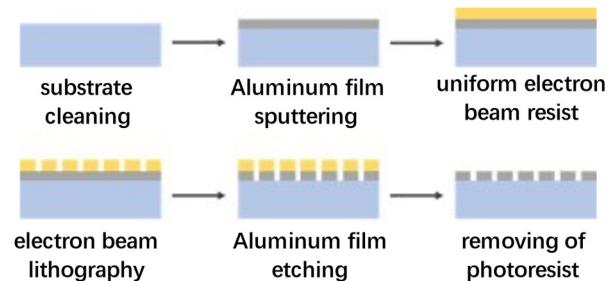


图 6 偏振光栅加工工艺流程

Fig.6 Polarization grating processing process flowchart

本方法对单个偏振方向的光栅结构进行加工与测试，结果如图 7 所示。

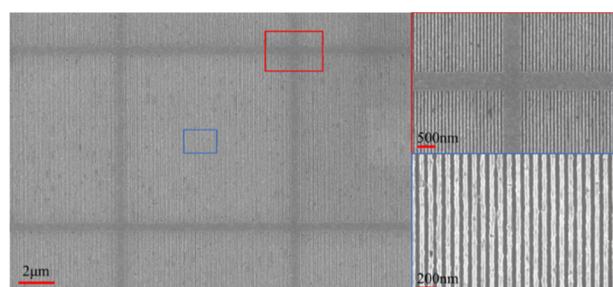


图 7 单个偏振方向的光栅结构 SEM 图像

Fig.7 Polarization grating SEM image

偏振光栅结构测试结果如下：光栅栅高 99.25 nm，周期 98.81 nm，占空比 52%，满足光栅结构设计要求。经测试，单个偏振方向的光栅结构消光比为 82:1，透过率为 52%。

在验证单个偏振单元后，在正式片中引入无偏振光栅的区域，其版图如图 8(a)所示。加工过程中电子束胶样品的电镜图如图 8(b)~(d)所示。

偏振光栅区域图形清晰可见，各个方向条纹均满足设计要求，无偏振光栅区域表面平整光滑，偏振光栅工艺的引入未对像素表面产生影响。如图 9 所示为最终工艺完成的带偏振-微光结构的 EMCCD 晶圆，经测试，阵列式光栅消光比为 62:1，透过率为 58.4%。

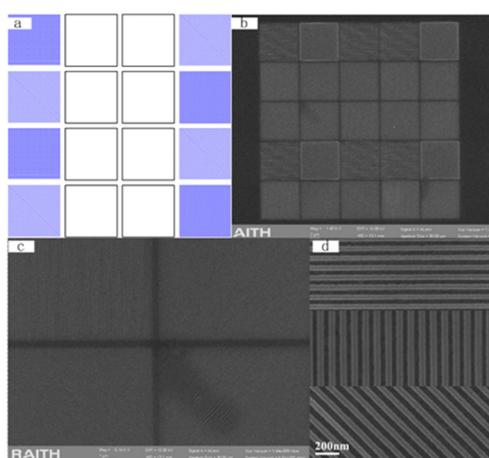


图 8 偏振-微光结构版图及 SEM 图像

Fig.8 Polarization low light structure layout and SEM images

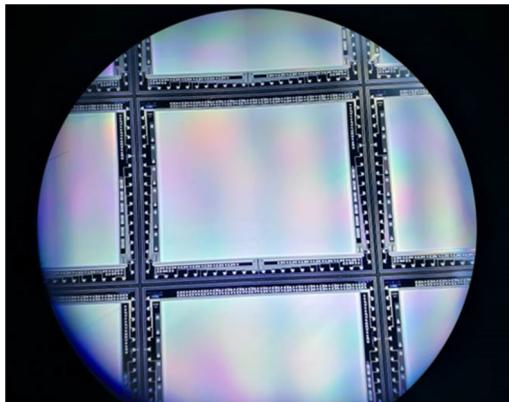


图 9 带偏振-微光结构的 EMCCD 晶圆

Fig.9 EMCCD wafer with polarization low light structure

2 器件纵向抗光晕结构设计

设计的 EMCCD 器件光敏单元具有抗晕功能。信号电荷在三面被 PStop 区域隔离的沟阻结构 PD 像元内可以有效积分，像元制作在 P 阵的内部，一方面有利于抗晕结构的制作，同时也提高信号电荷转移速度。

如图 10 所示为纵向抗晕机理示意图，入射光产生的电荷存储在 N 型埋沟势阱之中，当产生的电荷数量超过势阱容量时，若衬底施加一定的电压，过剩的电荷将越过鞍形 P 阵势垒，泄放进入 N 型衬底，防止 N 型埋沟内的电荷泄入至垂直寄存器中，从而实现抗晕目的。因此，光敏区鞍形 P 阵的浓度、结深将直接影响器件的抗晕和弥散特性，是本款 EMCCD 器件制造中的关键工艺之一。

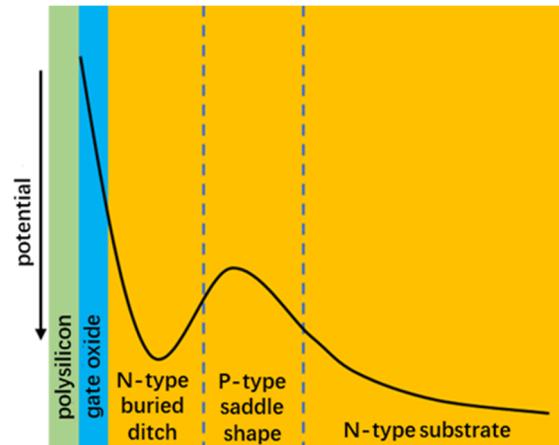


图 10 纵向抗晕机制示意图

Fig.10 Schematic diagram of longitudinal anti halo mechanism

像元纵向抗晕设计不仅要考虑 PD、鞍形 P 阵、N 型衬底之间形成的有效电荷信号释放通路，同时也必须考虑鞍形 P 阵对寄存器单元及放大器单元的影响，需在 VAB 区域外形成浓度分布均匀的 P 型区，因此需要采用高能（大于 500 keV）离子注入及长时间（大于 600 min）高温（大于 1100℃）推阱的方式制作鞍形 P 阵。由于长时间高温工艺对硼原子的扩散影响很大，因此根据设计要求，必须通过精细的工艺仿真，同时结合工艺实验，来确定 P 阵的注入能量和剂量。鞍形 P 阵工艺的重点在于高能离子注入均匀性控制，需要开展束流速度、偏转角度、扫描速度等参数的优化实验。对 P 阵工艺的评价手段主要是通过二次离子质谱（secondary ion mass spectrometry, SIMS）测试和扩展电阻（spreading resistance profile, SRP）测试，来获得 P 阵的杂质浓度、深度、均匀性等信息。

为了确保寄存器和放大器区域掺杂足够均匀，同时满足纵向抗晕效果。器件制造过程将采用 3 次离子注入及高温推阱的方式来制造鞍形 P 阵。

第一次阱注入伴随长时间推阱，用以确保硼在工作区域均匀分布，同时在抗光晕区，当衬底为 0V 电压时，衬底与光电二极管之间建立起势垒。如图 11 所示为第一次推阱后光敏单元的浓度分布图。

第二次及第三次高能注入伴随短时间推阱，用以确保抗光晕控制具有大的跨导。如图 12 所示为第三次推阱后光敏单元的浓度分布图。如图 13 所示为光电二极管 $1 \mu\text{m}^2$ 面积内的电荷 N_{pd} 与衬底电压 V_{sub} 之间的关系，可以看到在衬底电压 V_{sub} 在 20V 左右时，PD 内的电荷将通过衬底全部泄放干净，若此电压值设计较低，会影响 PD 的满阱容量，若电压值设计太高，则会增大器件的整体功耗。

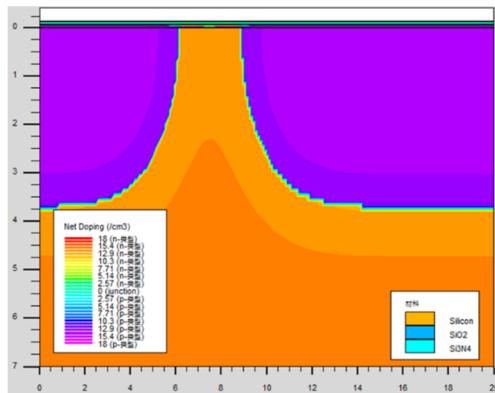


图 11 第一次推阱后光敏单元浓度分布图

Fig.11 Concentration distribution map of photosensitive units after the first trap push

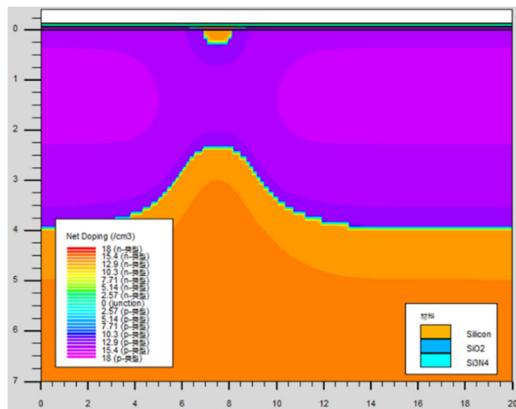


图 12 第三次推阱后光敏单元浓度分布图

Fig.12 Concentration distribution diagram of photosensitive units after the third push well

3 偏振-微光 EMCCD 器件成像测试结果

基于偏振 EMCCD 器件设计的偏振成像模组如图 14 所示, 相机分辨率为 1024×1024 , 波段为 $400 \sim 1100\text{ nm}$, 光栅透过率为 58%, 消光比为 62。并选择

在晴朗夜晚环境下进行偏振成像试验, 环境照度在 10^{-2} lx 量级。通过偏振成像模组采集原始图像, 解算出图像中的光强度、偏振度和偏振角信息, 然后进行灰度级融合和彩色融合, 成像结果如图 15 所示。

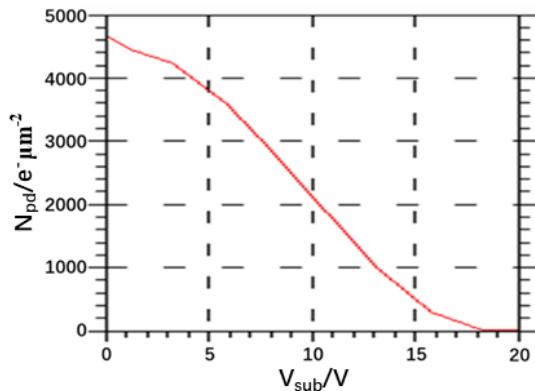


图 13 光电二极管 $1\text{ }\mu\text{m}^2$ 面积内的电荷 N_{pd} 与衬底电压 V_{sub} 之间的关系

Fig.13 The relationship between the charge N_{pd} within the $1\text{ }\mu\text{m}^2$ area of the photodiode and the substrate voltage V_{sub}



图 14 偏振成像模组(左)及偏振 EMCCD 器件(右)

Fig.14 Polarization imaging module(left) and polarization EMCCD device(right)



(a) 原始图像(红框内为局部放大图)
(a) Original image(Enlarged local image of the original image within the red box)



(b) 光强度图像
(b) Light intensity image



(c) 偏振度图像
(c) Polarization degree image

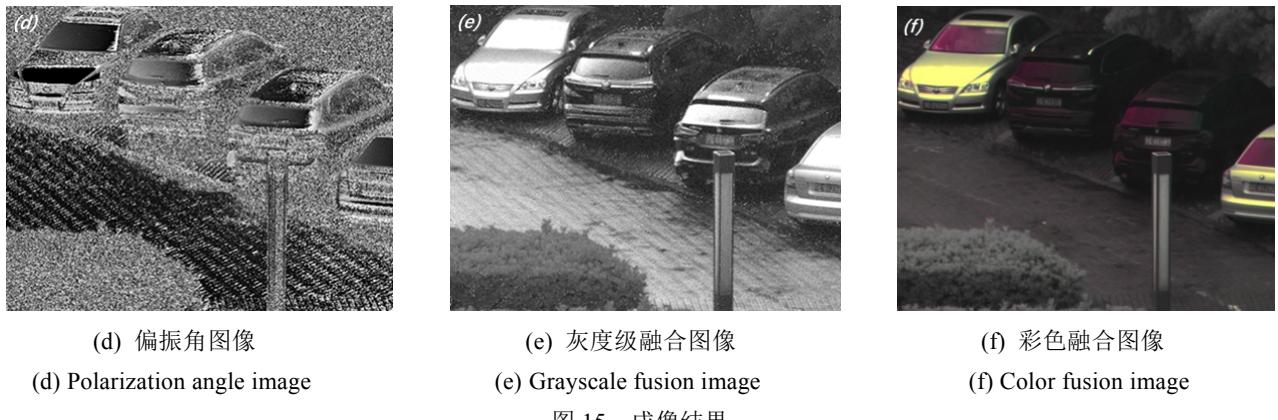


图 15 成像结果

Fig.15 Imaging results

从偏振成像效果对比中可以看出,光强度图像无法识别的黑色车辆和路面,偏振度图和偏振角图可以提炼出车辆的轮廓和纹理结构等细节信息;车辆上不同材质的部件在偏振度和偏振角图像中可以被明显区分,同一材质的玻璃车窗因不同的镀膜而产生不同的偏振信息;通过灰度级融合和彩色融合后的图像,细节信息更加丰富,通过凸显偏振目标的颜色,可以有效增大背景与目标间的差异。

为了对比 3×3 阵列偏振结构与新型偏振-微光结构在低照度条件下的成像能力,在 0.1 lx 照度条件下对两种结构的图像传感器分别进行测试并解算出图像中的光强度信息,如图16所示,相比于 3×3 阵列偏振结构,新型偏振-微光结构在低照度条件下可以获得更多的光强度信息,可以更好地观测到目标信息。

同时,对器件抗光晕性能进行了测试,如图17(a)

为器件在 10^{-2} lx 量级微光条件下,面对一个 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 正方形发光光源拍摄的照片,此时光源照度为 10 lx ,可以看到器件无明显光晕外溢,整体抗光晕效果较好。如图17(b)为关闭抗光晕功能时的图像,可以看到明显的光晕现象。

4 结论

本文采用一种新型偏振-微光单元阵列,在低照度条件下实现了对物体的偏振成像,相比于 3×3 阵列偏振结构^[5]在 10^{-1} lx 量级环境照度下获取目标细节信息,新型偏振-微光结构具备更多的白光通道,工作环境照度能够达到 10^{-2} lx 量级,可以区分肉眼难以区分的物体,观测到更多物体信息,同时在器件光敏单元制作了纵向抗光晕结构,实现了器件光晕抑制,减少了器件在弱光条件下易被强光致盲的劣势,提升了器件在复杂环境中的工作能力。

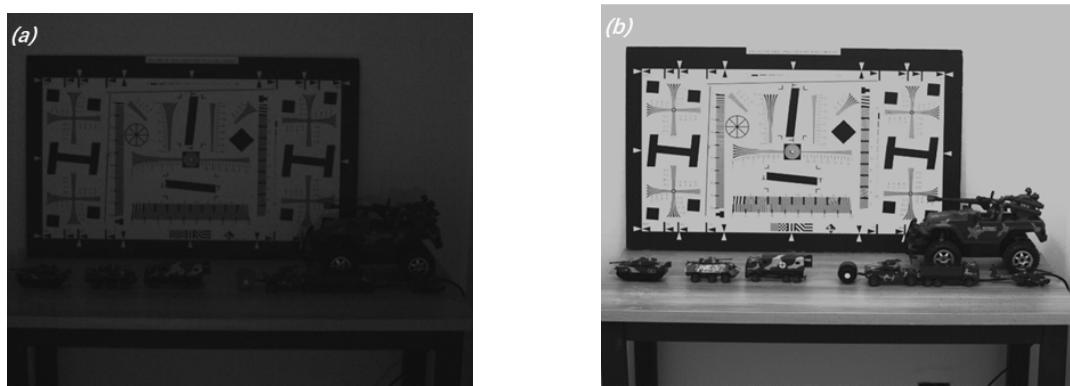


图 16 不同偏振结构成像结果对比

Fig.16 Comparison of imaging results with different polarization structures

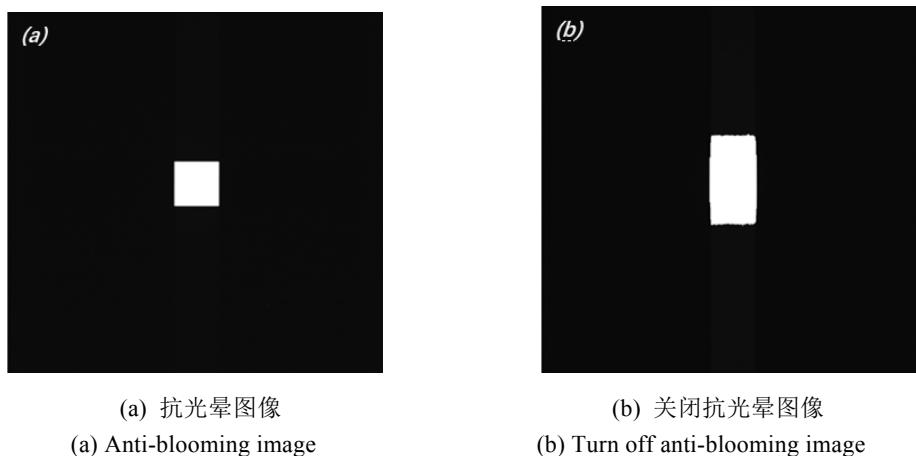


图 17 器件抗光晕性能测试结果

Fig.17 Test results of device anti halo performance

参考文献：

- [1] Jeong J, Jung C, Kim T. Using machine learning to improve multi-qubit state discrimination of trapped ions from uncertain EMCCD measurements[J]. *Optics Express*, 2023, **31**(21): 35113-35130.
- [2] 陈远金, 张猛蛟, 戴放, 等. 基于 EMCCD 的单兵综合侦察仪设计及作用距离研究[J]. 红外技术, 2017, **39**(5): 399-403.
CHEN Yuanjin, ZHANG Mengjiao, DAI Fang, et al. The design of the individual integrated reconnaissance instrument based on EMCCD and estimation of function distance[J]. *Infrared Technology*, 2017, **39**(5): 399-403.
- [3] Gural P, Mills T, Mazur M, et al. Development of a very faint meteor detection system based on an EMCCD sensor and matched filter processing[J]. *Experimental Astronomy*, 2022, **53**(3): 1085-1126.
- [4] LV T, LI J, Arif N, et al. Polarization and external-field enhanced photocatalysis[J]. *Matter*, 2022, **5**(9): 2685-2721.
- [5] 那启跃, 姜恺文, 徐建东, 等. 偏振-微光一体化 EMCCD 相机的设计与开发[J]. 应用光学, 2024, **45**(2): 321-328.
NA Qiyue, JIANG Kaiwen, XU Jiandong, et al. Design and development of polarization-low level light integrated EMCCD camera[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, **45**(2): 321-328.
- [6] WANG Shen, Douglas A Carpenter, Adam DeJager, et al. A 47 million pixel high-performance interline CCD image sensor[J]. *IEEE Trans. on Electron Devices*, 2016, **63**: 174-181
- [7] LI C, GUO C, HAN L, et al. Low-light image and video enhancement using deep learning: a survey[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2021, **44**(12): 9396-9416.
- [8] Douglas A. Carpenter, et al. High performance 7.4-micron interline transfer CCD platform for applied imaging markets[C]//*Proc. of SPIE*, 2013, **8659**(1) : 8
- [9] Wilson A E, Parker V A, Feinberg M. Polarization in the contemporary political and media landscape[J]. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 2020, **34**: 223-228.
- [10] LI Shujun, JIANG Huilin, ZHU Jingping, et al. Development status and key technologies of polarization imaging detection[J]. *Chinese Optics*, 2013, **6**(6): 803-809.
- [11] LUO Haibo, ZHANG Junchao, GAI Xingqin, et al. Development status and prospects of polarization imaging technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, **51**(1): 109-118.
- [12] WU Hao, WU Yuan, WU Wei, et al. Study on the digital low-light level night vision device technology[J]. *Optoelectronic Technology*, 2022, **42**(1): 72-78.
- [13] WU Xingxing, LIU Jinguo, ZHOU Huaide, et al. Spaceborne low light imaging based on EMCCD and CMOS[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(5): 205-210.
- [14] 陈远金, 张猛蛟, 戴放, 等. EMCCD 集成偏振-微光一体化成像技术研究[J]. 应用光学, 2020, **41**(2): 242-247.
CHEN Yuanjin, ZHANG Mengjiao, DAI Fang, et al. Research on polarization-low level integrated imaging technology based on EMCCD[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, **41**(2): 242-247.
- [15] 何家维, 何昕, 魏仲慧, 等. 高灵敏度 EMCCD 导航相机的设计[J]. 光学精密工程, 2018, **26**(12): 3019-3027.
HE Jiawei, HE Xin, WEI Zhonghui, et al. Design of high-sensitivity EMCCD navigation camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, **26**(12): 3019-3027.