

像素偏振成像系统的耦合实现

李佳昕¹, 白廷柱¹, 崔志刚², 宋翠芬², 成泽明²

(1. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081; 2. 中国通用技术研究院, 北京 100091)

摘要: 通过将像素偏振片组阵列与 CCD 光敏元耦合对准, 对像素偏振成像系统耦合技术进行了研究。针对偏振片组阵列与 CCD 尺寸不匹配的问题, 采用多种工艺方法进行了加工处理, 提出了完整的耦合对准工艺。文中研制的成像系统可以通过一片成像探测器同时获得 4 个不同偏振方向的斯托克斯分量, 得到所拍摄物体的线偏振度图像和线偏振角图像, 实现图像的偏振增强, 经后处理形成所需要的偏振图像, 有利于在复杂环境中获取目标信息。

关键词: 像素耦合; 目标探测; 对准; 成像质量

中图分类号: O436.3 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.0925001

Coupling implementation of pixel polarization imaging system

Li Jiaxin¹, Bai Tingzhu¹, Cui Zhigang², Song Cuifen², Cheng Zeming²

(1. School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. China General Technology Research Institute, Beijing 100091, China)

Abstract: The coupling technology of the pixel polarization imaging system was studied by aligning the pixel polarizer array with the CCD photosensitive element. Aiming at the problem that the polarizer group array and CCD size do not match, a variety of process methods were used for processing, and a complete coupling alignment process was proposed. The imaging system developed in this paper can obtain four Stokes components with different polarization directions through one imaging detector. After operation and post-processing, it could also obtain the linear polarization image and the linear polarization angle image of the captured object, which realized the polarization enhancement of the image. The required polarization image facilitates the acquisition of target information in a complex environment.

Key words: pixel coupling; target detection; alignment; imaging quality

收稿日期: 2019-05-11; 修订日期: 2019-06-21

作者简介: 李佳昕(1994-), 女, 硕士生, 主要从事偏振成像、图像处理方面的研究。Email: 2220170289@bit.edu.cn

导师简介: 白廷柱(1955-), 男, 教授, 博士, 主要从事红外与微光夜视图像处理方面的研究。Email: tzhbai@bit.edu.cn

崔志刚(1967-), 男, 研究员, 博士, 主要从事微光夜视光锥耦合等方面的研究。Email: forest508@163.com

0 引言

与传统光电成像探测技术相比,偏振成像探测技术将信息从三维(光强、光谱和空间)扩展到七维(光强、光谱、空间、偏振度、偏振角、偏振椭率和旋转方向)^[1],可以扩展人们的视觉信息系统,改善成像性能,从而具有提高探测目标精度、提高目标的识别概率和穿云透雾^[2]等能力。

偏振成像系统按照同一像素偏振分量获取方式可以分为:分孔径偏振成像^[3]、分振幅偏振成像、分时偏振成像和分焦面偏振成像^[4]。分焦面偏振成像系统是近几年发展起来的先进偏振成像系统,该系统早期的微纳结构由美国 Andreou 教授等人研究开发,并将双折射材料和薄膜偏振滤波器整体地集成在一块 CMOS 成像芯片上^[5]。这种系统使得偏振探测具有很好的同步性,可以一次拍摄得到同一个场景不同偏振方向的多幅图像。相对于传统偏振成像,这种方法还具有实时性,解决了在偏振成像技术领域存在已久的难题,代表了偏振成像技术新的发展趋势。

目前,分焦平面偏振成像技术是未来偏振成像领域的一个主流方向,国内的相关技术研究还刚刚起步,尚未有成熟的可见光大尺寸像素偏振成像系统出现。针对这一问题,文中在前期成像系统耦合研究的基础上,设计了像素偏振成像系统,研究了实现系统的工艺过程,制作并实现了可见光大尺寸像素偏振成像系统。

1 像素偏振成像系统设计

为使研制的像素偏振成像系统能够获得所拍摄图像的偏振度、偏振角等偏振信息,进而分析现实场景中物体的偏振特性,实现像素偏振成像系统在反伪装、反密写等方面的应用,文中进行设计并实现了下述像素偏振成像系统。

以探测器的 4 个像素为一基本像元,4 个像素分别对应探测偏振角为 0° 、 45° 、 90° 、 135° 的对应物点的光强度值,对应的偏振成像原理如图 1 所示。因该系统不存在分光元件,故可减小对前端光学系统设计的要求,并能对目标场景进行实时成像,同时还具有结构紧凑、稳定性高、体积重量小等优点^[5]。

该系统的不足是:不同的偏振态分别在相邻的 4 个像素成像,各个像素之间存在一个像素位置的匹配偏差,分辨率相对较低;微偏振元件像元和探测器像元配准难度大。

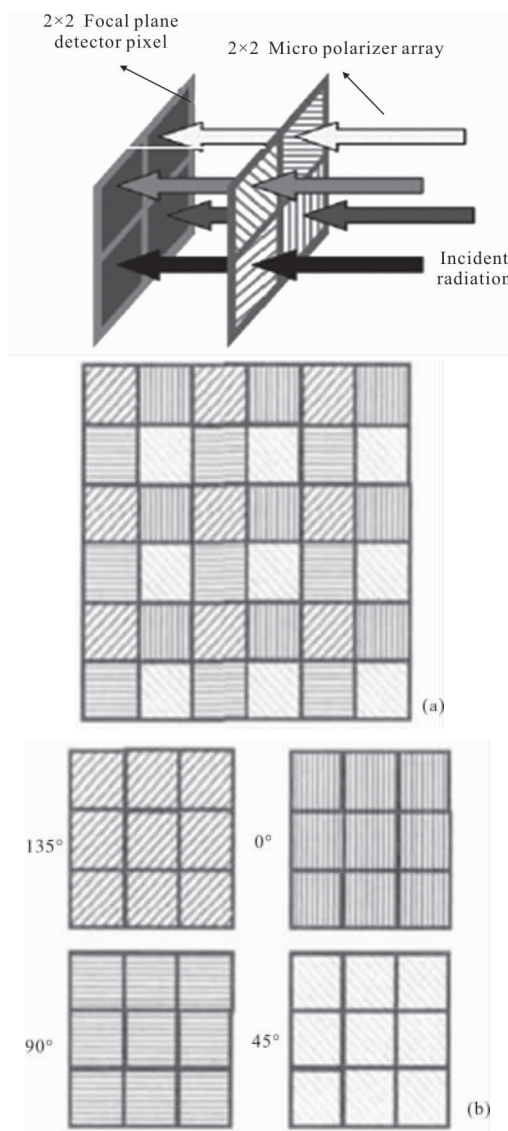


图 1 像素偏振成像原理图

Fig.1 Pixel polarization imaging schematic

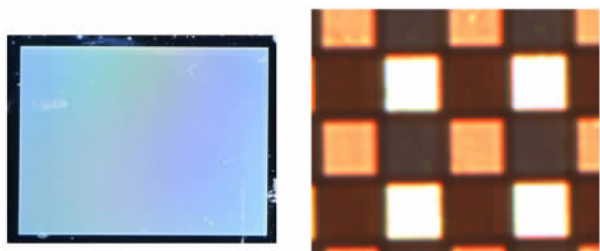
1.1 微像素偏振片阵列

1.1.1 微像素偏振片阵列制作流程

全像素偏振片阵列是像素偏振成像系统的关键元件。目前制备金属微纳结构的工艺主要包括干涉光刻(或全息光刻)^[6]和电子束曝光技术等^[7-9]。

该系统使用的像素偏振片阵列基于电子束曝光技术制作完成。主要制作过程由以下几部分工艺构成^[10]:选用高透光性玻璃作为基底材料,并双面

抛光后选用去离子水、丙酮、酒精经超声清洗后,用氮气吹干;在玻璃基底上溅射一层厚度 100 nm 的铝作为光栅的结构层;旋涂一层正性电子束光刻胶 ZEP 520,并用热板 180 °C 烘烤;采用电子束曝光设备^[11](Vistec EBP 5000+ ES)对光刻胶进行曝光,显影后得到具有 4 个偏振方向的偏振片阵列图形;利用上述得到的 ZEP 520 图形作掩模,采用 ICP 反应离子刻蚀设备 (Sentech PTSA ICP-RIE Etcher SI 500)刻蚀金属铝层将纳米光栅结构转移到铝层上;去除光刻胶层形成铝纳米光栅的像素偏振片阵列。生产出来的像素偏振片阵列实物如图 2 所示。



(a) 偏振片实物图 (b) 偏振片像素显微放大
(a) Physical picture of polarizer (b) Polarizer pixel microscopic amplification

图 2 像素偏振片阵列

Fig.2 Pixel polarizer array

鉴于工艺流程的复杂性,目前,可以通过市场获得的像素偏振片阵列存在以下问题:

(1) 国内可以自主生产满足使用要求的像素偏振片阵列的厂家较少。(2) 现有的像素偏振片阵列像素尺寸较为单一。相对于成熟的像元大小种类繁多的 CCD、CMOS 器件,单一尺寸的像素偏振片阵列尚无法满足不同成像系统的耦合要求。

1.1.2 微像素偏振片阵列参数

基于能够获得的微像素偏振片阵列情况,文中设计的实现像素偏振成像系统使用的微像素偏振片阵列参数为:垂直/水平分辨率为 640 pixel×480 pixel,有效感光面尺寸为 4.88 mm×3.66 mm (包含 0.1 mm 透明边),相邻单元尺寸为 7.4 μm×7.4 μm(其中 6.4 μm×6.4 μm 为透光区域,边缘 1 μm 不透光),每相邻 2×2 单元的透偏振方向分别为 0, π/4, π/2, 3π/4,光栅周期为 140 nm,占空比为 0.5,深度为 100 nm,光栅面型为矩形^[12];金属纳米光栅的栅线无断线、无交叉、无

杂物污染。像素偏振片阵列显微图片如图 3 所示。

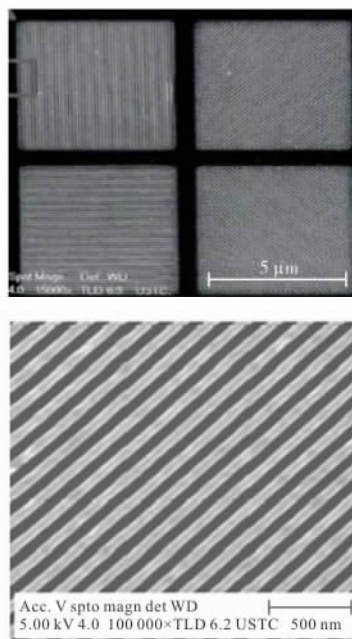


图 3 像素偏振片阵列电镜显微图片

Fig.3 Pixel polarizer array SEM micrograph

1.2 CCD 芯片参数

文中设计的像素偏振成像系统使用的 CCD 型号为 acA640-90gm-Basler ace, 芯片类型为 Sony ICX414AL。该芯片具体参数与偏振片阵列参数一一对应,如表 1 所示。

表 1 CCD 芯片性能参数

Tab.1 CCD chip performance parameter

Parameter	Value
Chip size	4.88 mm×3.66 mm
Vertical/horizontal resolution	658 pixel×492 pixel
Target size	1/3"
Size of adjacent pixels	7.4 μm×7.4 μm
Frame rate	90 fps

2 像素偏振成像系统的实现

根据前述完成的像素偏振成像系统相关器件参数的设计,文中进行了像素偏振成像系统的实现研究。

显微镜下的测量发现,采购的像素偏振片阵列实际尺寸与设计尺寸存在一定程度的误差,如表 2 所示。

表2 实验所用器件实际测量尺寸对照

Tab.2 Comparison of actual measurement dimensions of devices used in the experiment

Polarizer profile	<i>l</i> /mm	<i>h</i> /mm
Ideal size	4.88	3.65
Actual size	5.49	4.18

对比表 2 数据可知, 订制的像素偏振片阵列比要与之耦合的 CCD 尺寸大一些, 如此则在耦合的过程中, 对像素偏振片阵列的些许微小移动都可能会触碰到 CCD 焊盘(比较脆弱, 如图 4 所示), 损坏原有线路分布, 破坏原器件, 造成 CCD 的不可逆损伤。

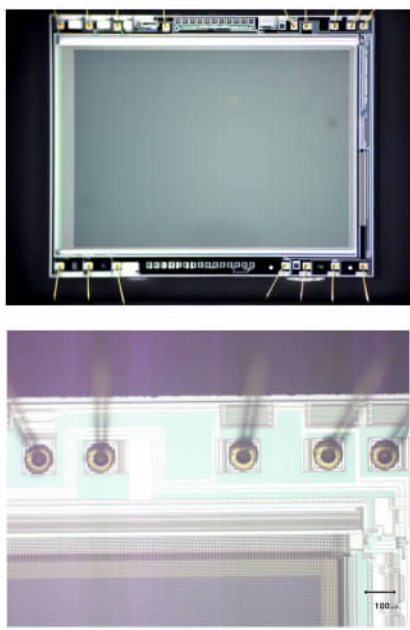


图 4 像素偏振片阵列与 CCD 焊盘之间距离显微图

Fig.4 Micrograph of the distance between the pixel polarizer array and the CCD pad

2.1 像素偏振片的加工

为了保证像素偏振片阵列与 CCD 芯片的准确耦合, 文中对像素偏振片阵列进行了尺寸加工。

由于像素偏振片阵列结构的脆弱性以及毛细结构极易吸附灰尘等微小粒子, 故在加工过程中, 文中尝试了多种减小像素偏振片阵列边缘尺寸的加工方法。

方法一: 直接磨削。将像素偏振片阵列固定在制作好的模具上直接利用金刚石砂轮进行切磨。实验结果发现: 磨掉的像素偏振片阵列粉末极易被其自

身吸附, 使得像素偏振片阵列有效像元数减少, 损害像素偏振片阵列质量, 且随着打磨速度的加快, 像素偏振片阵列崩边儿现象更明显。

方法二: NaOH 溶液腐蚀。利用化学原理, 通过 NaOH 溶液腐蚀像素偏振片阵列黑色边缘的多余部分, 使其由黑色变为透明便于对准观察。实验过程发现由于偏振片阵列结构的特殊性, 毛细作用较强, NaOH 溶液很容易被铝栅结构吸附。在无法控制 NaOH 溶液滴速与流动速度的情况下, 极易造成实际腐蚀面积大于目标腐蚀面积的情况, 对像素偏振片阵列造成一定程度的破坏。

方法三: 将像素偏振片阵列冰封后一起磨削。首先将像素偏振片阵列放在模具上, 放入容器, 加入一定量的去离子水冰冻 10 h, 如图 5 所示; 将冰块从容器中取出, 采用 500 目金刚石砂轮慢速打磨多余边缘, 减小像素偏振片阵列尺寸。注意事项: 在切磨的过程中速度不宜过快, 容易造成像素偏振片阵列崩边儿现象, 如图 6 所示。另外, 由于冰的融化速度较快, 建议实验环境整体温度尽可能低一些。



图 5 像素偏振片阵列冰封图

Fig.5 Pixel polarizer array ice seal diagram



图 6 切磨过程中像素偏振片阵列崩边儿现象图

Fig.6 Phenomenon diagram of pixel polarizer array collapse during the cutting process

综合以上方法可知, 前两种方法均会对像素偏振片阵列造成较大损坏, 故文中采用方法三。由于冰冻的作用, 可以有效减少磨削过程中像素偏振片阵列对磨削粉尘的吸附。同时在模具的作用下, 可以确

定磨削的范围,提高磨削精度。

2.2 与 CCD 的耦合

根据 ICCD 的耦合经验,文中的耦合环境要求洁净度优于万级,无灰尘。

对准前需要进行像素偏振片阵列的预处理:用丙酮、酒精分别超声 10 s(小功率),进而通过去离子水清洗、氮气吹干,匀胶前 50 °C 预烘 3 h。

耦合步骤:

(1) 将 CCD 芯片的防尘玻璃盖板移除,固定在调整平台上;

(2) 将像素偏振片阵列的铝层表面与 CCD 芯片靶面贴在一起;

(3) 微调像素偏振片阵列使得像素偏振片阵列单元与 CCD 芯片单元一一对准;

(4) 在 CCD 芯片靶面上点紫外敏感胶;

(5) 紫外灯曝光,将 CCD 芯片与像素偏振片阵列固化集成在一起;

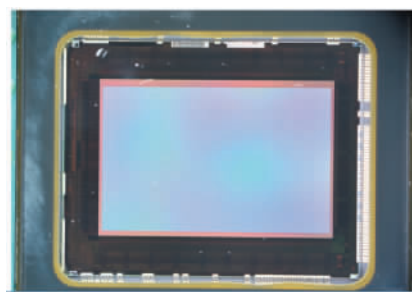
(6) 用酒精冲洗固化后的成像窗口;

(7) 采用紫外敏感胶将 CCD 芯片的防尘玻璃盖板重新粘合上去。粘合过程中应保持紫外固化胶厚度 < 300 nm、紫外固化胶 RMS < 20 nm。

在步骤(4)中,CCD 处于工作状态,采用偏振方向可调的线偏振光照明,通过精确调节像素偏振片阵列的位置和角度使得 CCD 所采集到的图像的消光比(入射光方向平行于偏振片方向时的透射率与入射光方向垂直于偏振片方向时的透射率的比值为消光比)最大,则确定此时的偏振片阵列放置位置和角度最佳;采集此时成像系统拍摄的图像,并用 MATLAB 程序做量化分析,验证消光比是否达到生产要求,如若满足要求,即可进行下一步骤(5)的操作。

耦合完成窗口如图 7(a)所示,系统整体封装图如图 7(b)所示。

耦合过程中发现,像素偏振片阵列的清洁度会严重影响最终系统的成像效果。虽然利用超声的方式可以提高像素偏振片阵列的清洁度,但长时间、大功率的超声清洁会使偏振结构遭到破坏,镀铝栅的一面会出现点状刻蚀现象。由于偏振片厚度的存在,完成的耦合系统与未耦合之前系统的焦距会存在一定的偏差。



(a) 与 CCD 耦合完成图

(a) Completion chart coupled with CCD



(b) 系统整体封装图

(b) System encapsulation diagram

图 7 像素偏振成像系统耦合完成图

Fig.7 Pixel polarization imaging system coupling completion diagram

2.3 像素偏振系统成像效果

文中对完成的像素偏振成像系统进行了标定试验,拍摄已知偏振方向的均匀线偏振光源,采集到的图像如图 8 所示。利用该图可以提取出 4 个不同偏振方向的图像信息,进而分析集成系统的各项性能指标,如偏振角、偏振度、消光比等表征偏振性能的一系列参数。

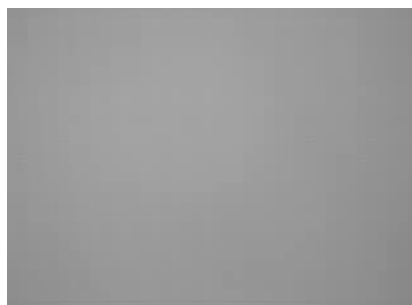


图 8 成像系统拍摄线偏振光源成像

Fig.8 Imaging of a linear polarized light source in an imaging system

通过将所拍摄图像同一偏振方向的像元分别提取出来,得到 4 幅偏振方向分别为 0° 、 45° 、 90° 、 135° 的抽样图像如图 9 所示。



图 9 根据偏振方向抽样得到的采样图像

Fig.9 Sampling image obtained from polarization direction sampling

由理论结论可知,偏振片的偏振方向与线偏振光源的方向垂直时,其光的透过率为 0。但分析采样图 1×1 发现所提取出的数据与理想值有一定差距,并没有达到全黑的效果。分析造成这一现象的原因可能有:像素偏振片阵列性能影响、耦合过程中存在像素对准误差、成像前端整洁度影响,灰尘以及空气中其他一些杂质的吸附作用、耦合过程中使用的胶均会影响整个系统的成像质量。

由像素偏振成像系统得到的偏振度图像如图 10(b) 所示,由于大楼外侧建筑材料玻璃墙以及图像下方汽车表面材料具有偏振特性,偏振成像系统可以捕捉到不同材料的偏振信息。对比可见光图像,偏振度图像对物体的成像效果更加明显。



(a) 可见光图像
(a) Visible image



(b) 偏振度图像
(b) Polarization image

图 10 可见光图像与偏振度图像对比

Fig.10 Contrast of visible image with polarization image

3 制作过程的注意事项

根据文中的工作经验,建议在相关的像素偏振成像系统研制中注意以下事项:

(1) 在实验之前,首先要标定像素偏振片阵列各项性能,以便于日后分析出影响偏振成像系统成像效果的主要原因;

(2) 在耦合过程中发现,由于该实验所定制的像素偏振片阵列尺寸存在误差大于 CCD 尺寸,在实际耦合对准的过程中发现像素偏振片阵列黑边将 CCD 完全覆盖,使得无法观测到 CCD 边缘(如图 11 所示)。对此,可建议生产商将偏振片边缘黑边改成透明边,十字线做成黑色十字线,以便耦合过程中可清晰地看到 CCD 的边缘,提高像素偏振成像系统像素对准精度,降低耦合难度。



图 11 像素偏振片阵列边缘十字线

Fig.11 Pixel polarizer array edge crosshair

(3) 针对现在像素偏振片阵列尺寸制作精度低的问题。在制作的过程中秉持减小像素偏振片整体尺寸,做小不做大的原则。这样的原则虽然在一定程度上会牺牲掉一部分像元数,但由于边缘效应本身会影响整机的成像质量,又为了降低像素偏振成像系统耦合过程的难度,像素偏振片阵列做小不做大的原则利大于弊。

(4) 可以通过提高对准调整平台精度,提高像素对准精度。在像素对准的过程中,使用手动位移旋转平台移动像素偏振片阵列,在 CCD 相机处于工作状态下,采用偏振方向可调的线偏振光照明。通过精确调节像素偏振片阵列的位置和角度观察成像系统透光程度,判断 4 个不同的偏振角度,进而实现最小偏差。目前所使用的调整平台对准精度优于 $0.3 \mu\text{m}$ 。

4 结论

文中利用先进的耦合技术,完成了像素偏振成像系统的设计与实现。将分焦平面像素偏振片阵列对准贴合到成像器件的表面,实现了实时同时线偏振探测,在系统设计与实现的过程中,针对相关的工艺问题提出了相应的优化方案。文中设计完成的像素偏振成像系统除了可以获得普通相机的拍摄效果外,还可以实时得到所拍摄物体的偏振信息,通过后继的图像处理,可以获得偏振角、偏振度、消光比等被拍摄物体的物质信息,进而实现系统在伪装识别方面、遥感探测、目标识别、天文探测及医学诊断等领域的重要应用。

文中的全部耦合工作都是在中国通用技术研究院完成的,在此向帮助完成文中工作的全体老师致谢。

参考文献:

- [1] Zhao Huijie, Zhang Ying, Zhou Guanhua. Targets based on polarization imaging exploration and research [C]// Excerpts from the 2011 Academic Conference of the Chinese Optical Society Summary, 2011. (in Chinese)
赵慧洁,张颖,周冠华. 基于偏振成像的目标探测研究[C]// 中国光学学会 2011 年学术大会摘要集, 2011.
- [2] Zeng Xiangwei, Chu Jinkui, Kang Weidong. Infrared circularly polarized light fog permeability energy analysis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46 (12): 1204002. (in Chinese)
曾祥伟,褚金奎,康维东. 红外圆偏振光透雾性能分析[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(12): 1204002.
- [3] Wang Qi, Liang Jingqiu, Liang Zhonghe, et al. Optical system design of aperture-divided infrared polarization imager[J]. *China Optics*, 2018, 11(1): 92-99. (in Chinese)
王琪,梁静秋,梁中翥,等. 分孔径红外偏振成像仪光学系统设计[J]. 中国光学, 2018, 11(01): 92-99.
- [4] Zhao Jinsong. Progress of polarization imaging technology[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(12): 743-750, 772. (in Chinese)
赵劲松. 偏振成像技术的进展 [J]. 红外技术, 2013, 35 (12): 743-750, 772.
- [5] Liu Jing, Xia Runqiu, Jin Weiqi, et al. Polarization imaging instrument based on Stokes vector and its progress [J]. *Optical Technology*, 2013, 39 (1): 56-62. (in Chinese)
刘敬,夏润秋,金伟其,等. 基于斯托克斯矢量的偏振成像仪器及其进展 [J]. 光学技术, 2013, 9(1): 56-62.
- [6] Jiang Nan. On the spatial resolution limit of direct-write electron beam lithography [J]. *Microelectronic Engineering*, 2017, 168: 41-44.
- [7] Huang Jintang. Research on manufacturing of micro-nanostructures based on laser interferometry [D]. Beijing: University of Science and Technology of China, 2011. (in Chinese)
黄金堂. 基于激光干涉技术的微纳结构制造研究 [D]. 北京: 中国科学技术大学, 2011.
- [8] Benjamin M, David V P. Variable pressure electron beam lithography (VP-eBL): a new tool for direct patterning of nanometer-scale features on substrates with low electrical conductivity[J]. *Nano Letters*, 2016, 6(5): 963-968.
- [9] Dey R K, Aydinoglu F, Cui B. Electron beam lithography on irregular surface using grafted PMMA monolayer as resist [J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2017, 4(3): 1600780.
- [10] Zhang Zhigang, Dong Fengliang, Cheng Teng, et al. Real-time dynamic phase measurement technology based on pixel polarizer array [J]. *Chinese Science: Technology Science*, 2015, 45(5): 491-497. (in Chinese)
张志刚,董凤良,程腾,等. 基于像素偏振片阵列的实时动态相位测量技术 [J]. 中国科学: 技术科学, 2015, 45(5): 491-497.
- [11] Bai Yanli, Yao Rongbin, Gao Haiying, et al. Analysis and performance test of high time resolution scanning imaging technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47 (6): 0624002. (in Chinese)
白雁力,姚荣彬,高海英,等. 高时间分辨率幅成像技术分析及其性能测试[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(6): 0624002.
- [12] Zhang Zhigang, Dong Fengliang, Zhang Qingchuan, et al. Preparation of pixel polarizer array and its application in polarization image enhancement [J]. *Journal of Physics*, 2014, 63(18): 184204. (in Chinese)
张志刚,董凤良,张青川,等. 像素偏振片阵列制备及其在偏振图像增强中的应用 [J]. 物理学报, 2014, 63(18): 184204.