

# 像素偏振片阵列制备及其在偏振图像增强中的应用\*

张志刚<sup>1)</sup> 董凤良<sup>2)</sup># 张青川<sup>1)</sup>† 褚卫国<sup>2)</sup>‡ 仇康<sup>1)</sup>  
程腾<sup>1)</sup> 高杰<sup>1)</sup> 伍小平<sup>1)</sup>

1) (中国科学技术大学近代力学系, 中国科学院材料力学行为与设计重点实验室, 合肥 230027)

2) (国家纳米科学中心纳米加工技术实验室, 北京 100190)

(2014年2月26日收到; 2014年4月10日收到修改稿)

像素偏振片阵列在实时测量光的斯托克斯参量方面具有重要的应用. 本文设计和制作了基于金属铝纳米光栅的像素偏振片阵列, 制作工艺基于电子束曝光技术. 偏振片阵列单元尺寸为  $7.4\ \mu\text{m}$ , 每相邻  $2 \times 2$  单元的透偏振方向分别为  $0, \pi/4, \pi/2$  和  $3\pi/4$ . 光栅周期为  $140\ \text{nm}$ , 占空比为  $0.5$ , 深度  $100\ \text{nm}$ , 光栅面型为矩形. 像素偏振片阵列的扫描电子显微镜照片显示, 制备的偏振片阵列的金属纳米光栅栅线无断线、无交叉、无杂物污染, 光栅栅线结构平直, 厚度均匀, 满足理想矩形面型. 采用偏振光作为照明光的光学显微镜拍摄图片显示, 像素偏振片阵列整体形状规则, 具有很好的偏振特性, 最大偏振透射率可达到  $79.3\%$ , 消光比可达到  $454$ . 将像素偏振片阵列与 CCD (charge coupled device) 集成在一起, 采集单帧图像即可计算图像的斯托克斯参量, 从而得到拍摄物体线偏振度图像和线偏振角图像, 实现了偏振增强, 可应用于目标反隐和识别.

**关键词:** 偏振片阵列, 金属纳米光栅, 偏振透射率, 消光比

**PACS:** 42.25.Ja, 42.87.Bg, 81.16.Nd

**DOI:** 10.7498/aps.63.184204

## 1 引言

自然界中, 一些生物具有感受光的偏振信息的能力, 如沙蚁、蜜蜂、墨鱼等<sup>[1]</sup>, 这是人类所不具备的. 这些生物能够感受和探测到光的偏振特性和隐藏在其中独特的信息, 并用于导航和图像增强等方面. 研究发现, 沙蚁等生物复眼内部具有对天空偏振光敏感的独特结构, 能够感知偏振光在天空中强度和方向的分布模式, 并利用其来实现导航定位的目的. 这种导航方式不受电磁干扰, 误差不随时间累积, 具有广泛的应用前景<sup>[2,3]</sup>. 墨鱼具有偏振视觉能力, 当其伪装在淤泥中时, 其自身表面反射的光与周围淤泥漫反射的光的偏振信息不同, 可被其

他墨鱼探测到, 实现种内识别和沟通<sup>[4]</sup>.

受到沙蚁、墨鱼等生物的启发, 科研工作者开展了大量的仿生研究, 如多方向金属光栅偏振器的偏振导航设备、基于金属光栅的像素偏振片阵列设备. 大连理工大学的褚金奎课题组制作了多个不同方向的金属光栅偏振器, 并将该偏振器应用于偏振导航传感器上, 在晴朗天气下获得了很好的导航作用<sup>[5,6]</sup>. 另外, 将像素偏振片阵列集成在图像传感器之前(偏振片阵列的单元尺寸与图像传感器像素尺寸一致, 每相邻  $2 \times 2$  个单元的透偏振方向分别为  $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$ ), 可实时获得光的斯托克斯参量, 已被应用于图像偏振视觉增强<sup>[7,8]</sup>. 另外, 应用光学方法检测试件形貌变形以及应力应变可实现

\* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2011CB302105)、国家自然科学基金(批准号: 11332010, 11102201, 11372300)和中国科学院科研装备研制项目(批准号: YZ201265)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zhangqc@ustc.edu.cn

‡ 通讯作者. E-mail: wgchu@nanoctr.cn

# 本文共同第一作者

无损检测<sup>[9-14]</sup>,但往往不能实时检测物光相位,而采用偏振片阵列能够克服这一问题,因此可被应用于实时相移数字全息<sup>[15]</sup>、实时三维显微观测<sup>[16]</sup>等方面。

目前掌握像素偏振片阵列制作工艺的国家为美国和日本,但对我国禁运像素偏振片阵列芯片.因此我们课题组在国内率先开展了像素偏振片阵列的制作研究.像素偏振片阵列的每个单元尺寸与所需要搭配使用的感光元件(电荷耦合器件(CCD)或互补金属氧化物半导体(CMOS))的像素尺寸相一致,并在组装时将偏振片阵列的单元与感光元件的像素单元一一对应.像素偏振片阵列中每相邻 $2 \times 2$ 个单元的透偏振方向分别为 $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$ .根据偏振材料不同,像素偏振片阵列可分为以下三种类型:基于金属纳米光栅的偏振片阵列<sup>[17,18]</sup>,基于光控取向液晶材料的偏振片阵列<sup>[19]</sup>以及基于含碘化物薄膜的偏振片阵列<sup>[20]</sup>,其中以基于金属纳米光栅的偏振片阵列的偏振特性最好.本文第二部分介绍了基于金属纳米光栅的偏振片阵列的参数设计以及制作流程;第三部分采用扫描电子显微镜和光学显微镜对偏振片阵列进行了表征测试;第四部分分析了偏振片阵列的性能参数:偏振透射率和消光比,并绘制了透射率随入射偏振角变化曲线;第五部分将偏振片阵列与CCD芯片集成在一起,并将其应用于偏振图像增强。

## 2 偏振片阵列的光栅参数设计与制作工艺

### 2.1 光栅参数设计

为了制备基于金属纳米光栅的偏振片阵列,首先选定偏振片阵列的制作参数.1)金属材料:铝.不同金属材料的光栅具有不同的最大偏振透射率和消光比,选择合适的金属是首要问题.微电子机械系统加工工艺中常用的几种金属材料为铝、铬、金、铂,其中铝的最大偏振透射率和消光比都是很高的,综合性能最佳<sup>[21]</sup>,因此选用铝作为制作光栅的金属材料.2)光栅的面型:矩形.光栅通常有以下几种面型:矩形、锯齿形、三角形、梯形、正弦型,不同面型的光栅具有不同的偏振透射率和消光比.其中矩形光栅的消光比最高,偏振透射率也较高<sup>[22]</sup>,因此选用矩形面型光栅.3)光栅的结构参数:周期140 nm,占空比0.5,深度100 nm.决定光栅性能(偏振透射率和消光比)的关键参数是光栅

周期与入射光波长的关系.当光栅周期大于入射光波长时,光栅具有多级衍射波,此时光栅可用作衍射光栅<sup>[23-26]</sup>或波导光栅<sup>[27]</sup>,但不能作为偏振器;当光栅周期远小于入射光波长时,光栅只有零级衍射波,偏振性很强,可作为良好的偏振器使用.因此,金属光栅的零级透射率存在临界周期点,且临界周期的产生几乎是随波长成线性关系<sup>[28]</sup>,为了使得可见光波段的光都能够满足临界透射条件,周期需尽可能小,制备时选用140 nm作为光栅周期.纳米光栅偏振器的透射效率随占空比增大而增大,消光比随占空比增大而减小,最佳占空比选为0.5<sup>[29]</sup>.随着光栅深度增加,透射率减小,消光比增加,且制作工艺越困难<sup>[29]</sup>,综合考虑选择光栅深度为100 nm.4)偏振片阵列单元尺寸:7.4  $\mu\text{m}$ .由于偏振片阵列需要与CCD(或CMOS)组合使用,偏振片阵列的单元尺寸需要与CCD(或CMOS)像素单元尺寸一致.同时单元尺寸太小会使得单元接收到的光强不够,信噪比不高,太大会增加制作成本.综合考虑选用常用CCD像素单元尺寸7.4  $\mu\text{m}$ 作为偏振片阵列的单元尺寸.另外,为了减少偏振片阵列与CCD集成后单元之间的串扰,在单元周边预留1  $\mu\text{m}$ 宽的非透光区域。

### 2.2 光栅制作工艺

由于金属光栅的周期只有140 nm,受到光的衍射极限的限制,不能采用传统的掩膜版光刻技术进行制备.目前制备金属纳米光栅的工艺有干涉光刻(或全息光刻)<sup>[11]</sup>和电子束曝光技术<sup>[30-33]</sup>等.这两类方法同样适用于制备具有四个栅线方向的像素偏振片阵列,但各有优缺点:1)干涉光刻或全息光刻需要采用两束相干紫外光进行干涉曝光,工艺复杂,而电子束曝光技术工艺简单;2)采用干涉光刻或全息光刻技术,获得具有四个偏振方向的像素偏振片阵列,需要进行四次干涉曝光,而电子束曝光技术只需要一次曝光;3)采用干涉光刻或全息光刻技术,偏振片阵列四个偏振方向的单元为多次曝光得到的,处于四个不同平面上,一致性差,而电子束曝光技术获得的偏振片阵列四个偏振方向的单元只通过一次曝光,处于同一个平面上,一致性好;4)干涉曝光时的光强分布服从正弦分布,因此获得的光栅结构难以满足理想的矩形面型,而电子束曝光技术能够获得较为理想的矩形面型的光栅结构;5)干涉光刻(或全息光刻)技术的成本相对于电子束曝光技术成本低.综合考虑以上几个部分,

我们选用电子束曝光技术来制备较高偏振性能的金属纳米光栅的像素偏振片阵列。

采用电子束曝光技术制备基于金属纳米光栅的像素偏振片阵列的工艺如图 1 所示。首先选用高透光性玻璃作为基底材料, 双面抛光后清洗, 如图 1(a) 所示。在玻璃基底上溅射一层厚度 100 nm 的 Al 作为光栅的结构层, 如图 1(b) 所示。之后旋涂一层正性电子束光刻胶 ZEP 520, 并用热板 180 °C 烘烤, 如图 1(c) 所示。采用电子束曝光设备 (Vistec EBPG 5000+ES) 对光刻胶进行曝光, 显影后得到具有四个偏振方向的偏振片阵列图形, 如图 1(d) 所示。利用图 1(d) 得到的 ZEP 520 图形作掩膜, 采用 ICP 反应离子刻蚀设备 (Sentech PTSA ICP-RIE Etcher SI 500) 刻蚀金属 Al 层将纳米光栅结构转移到 Al 上, 如图 1(e) 所示。最后去除光刻胶层形成 Al 纳米光栅的像素偏振片阵列, 如图 1(f) 所示。

### 3 像素偏振片阵列表征测试

采用电子束曝光技术先后制备了像素数为  $40 \times 40$  和  $320 \times 120$  的基于金属纳米光栅的像素偏振片阵列, 其扫描电子显微镜下拍摄的整体图像如

图 2(a) 所示。由图可见, 制备的像素偏振片阵列的整体形状规则, 无单元损坏, 各个单元也满足标准正方形结构。图 2(b) 展示了偏振片阵列中相邻的  $2 \times 2$  个单元, 单元尺寸为  $7.4 \mu\text{m}$ , 其金属栅线方向不同, 分别为  $\pi/2, \pi/4, 0, 3\pi/4$ , 其透偏振方向与栅线方向垂直, 分别为  $0, 3\pi/4, \pi/2, \pi/4$ 。金属纳米光栅栅线无断线、无交叉、无杂物污染。图 2(c) 为偏振片阵列的局部放大示意图, 光栅周期 140 nm, 占空比 0.5, 栅线结构平直, 厚度均匀, 满足理想的矩形面型。

偏振片阵列光栅周期的完整性、均匀性及栅线的边缘粗糙度直接影响偏振片阵列的性能, 而边缘粗糙度也会影响光栅周期和均匀性, 因此如何更好地控制栅线的边缘粗糙度至关重要。电子束曝光比普通光刻有更好的分辨率, 同时光刻所使用光源的场不均匀及场畸变会影响光栅结构的均匀性和周期完整性, 而电子束曝光不存在这个问题, 因此使用电子束曝光工艺能制备性能更优的偏振片阵列。制备时, 误差主要来自电子束曝光工艺参数、金属 Al 膜的晶粒尺寸和刻蚀工艺控制。电子束曝光时束流的选择和电子束移动步进大小影响电子束胶的图形质量, 束流越大, 电子束的束斑越大, 选择大

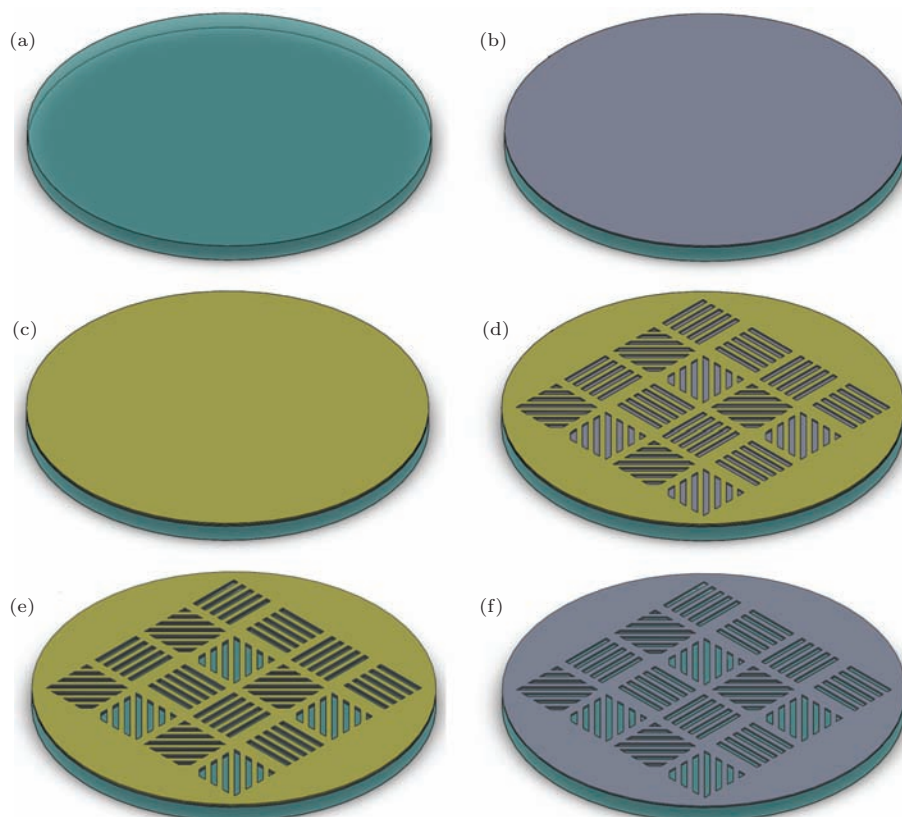


图 1 像素偏振片阵列制作工艺流程 (a) 清洗双面抛光的高透光性玻璃基底; (b) 在玻璃基底上溅射 100 nm 厚的铝层; (c) 在铝层上旋涂 ZEP 520 并烘烤; (d) 对 ZEP 520 进行电子束曝光显影; (e) 刻蚀金属 Al; (f) 去除 ZEP 520, 得到 Al 纳米光栅



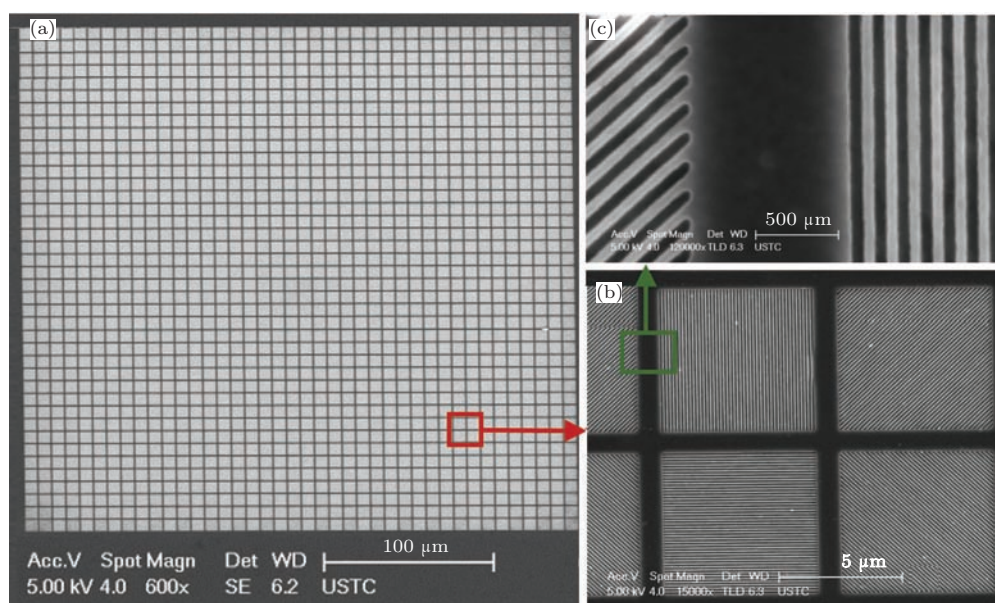


图2 像素偏振片阵列的扫描电子显微镜照片 (a)  $40 \times 40$  偏振片阵列扫描电子显微镜整体图片; (b) 偏振片阵列内相邻  $2 \times 2$  个单元的扫描电子显微镜照片; (c) 偏振片阵列局部放大示意图

的步进时, 线条边缘粗糙度越大, 图形质量变差. 为提高曝光效率, 希望选择大的步进, 所以需要选择合适的曝光步进, 一般不大于  $5 \text{ nm}$ . 由于金属 Al 膜的晶界和晶粒的刻蚀速度不一致, 大的晶粒组成的膜刻蚀后, 线条边缘粗糙度更大, 考虑到 Al 是低熔点金属, 镀膜工艺很难得到均匀的小晶粒 Al 膜, 目前我们已将晶粒尺寸控制在  $20 \text{ nm}$  左右. 刻蚀工艺中能否将电子束胶图形精确陡直地转移到 Al 膜上对光栅制备影响很大, 我们可将刻蚀陡直度控制在近  $90^\circ$ .

为了观察像素偏振片阵列的偏振特性, 将偏振片阵列放入光学显微镜下, 采用透射光观察, 照明光选用线偏振光, 获得的偏振片阵列的整体图像如图 3 所示. 由图可见, 像素偏振片阵列的整体形状规则, 都具有很好的偏振特性, 各个单元均满足标准正方形结构.

将像素偏振片阵列分别旋转  $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$ , 使得偏振片单元的透偏振方向与线偏振照明光源夹角发生偏转, 获得四幅不同夹角时的图像, 截取内部相应的  $9 \times 9$  个单元, 如图 4 所示 (图中斑点为显微镜镜头上的污斑, 并非偏振片阵列的缺陷). 可见, 偏振片阵列单元的透光区域满足理想方形结构, 并且随着偏振片阵列单元透偏振方向与线偏振照明光源的夹角发生变化时, 偏振片单元的透射率也相应地发生变化. 当偏振片阵列单元透偏振方向与线偏振照明光源的夹角为  $0$  时, 透射光强最大, 此时获得的单元图像最亮; 当偏振片阵列单元透偏振方向与线偏振照明光源的夹角为  $\pi/2$  时, 透

射光强最弱, 此时获得的单元图像最暗; 当偏振片阵列单元透偏振方向与线偏振照明光源的夹角为  $\pi/4$  或  $3\pi/4$  时, 透射光强居中, 此时获得的单元图像灰度居中.

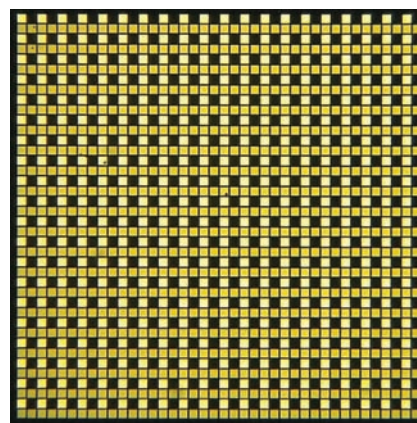


图3 偏振光照明下偏振片阵列的光学显微镜图片

#### 4 像素偏振片阵列性能参数

评价像素偏振片阵列的性能参数主要为最大偏振透射率和消光比. 对于一个偏振片, 当入射偏振光沿偏振片的透光轴时, 沿偏振片透光轴出射的偏振光的透射率为最大偏振透射率  $T_{\parallel}$ , 沿偏振片消光轴方向的透射率为最小偏振透射率  $T_{\perp}$ , 最大透射率  $T_{\parallel}$  与最小透射率  $T_{\perp}$  的比值为消光比  $\tau$ . 为了消除环境杂光的不稳定性对实验结果的影响, 实验在暗室进行, 测得的环境杂光和相机本底直流分量

的灰度平均值为0, 因此可以忽略不计, 从而降低了环境杂光不稳定性对实验结果的影响. 由于同一金属纳米光栅结构对不同波长入射光具有不同的消光比及透射率, 因此本文分别采用红光(620 nm 波长)、绿光(530 nm 波长)和蓝光(460 nm 波长)三种颜色光作为照明光源, 测量了金属纳米光栅在不同光波长下的消光比和最大偏振透射率.

#### 4.1 消光比和最大偏振透射率 $T_{\parallel}$

1) 将像素偏振片置于显微镜的载物台上, 采用光强均匀分布的线偏振红光光源照明, 调节像素偏振片的位置使其清晰聚焦. 调节线偏振照明光源的方向, 使其某一个方向单元的透偏振方向与照明光源的偏振方向平行, 拍摄图像, 如图 4(a) 所示, 获得此时的灰度图像, 其中亮区为透射率最高区域, 灰度统计直方图见图 5(b), 灰度平均值  $I_{\parallel\text{-red}}$  为 97.8182 gray level.

2) 像素偏振片阵列保持不变, 将照明光源偏振方向旋转  $90^\circ$ , 使得透射率最高区域变为透射率最低区域, 拍摄图像, 如图 4(c), 获得此时的灰度图像, 其中暗区为透射率最低区域, 灰度统计直方图见图 5(a), 灰度平均值  $I_{\perp\text{-red}}$  为 0.2153 gray level. 因此纳米光栅结构对红光的消光比为

$$\begin{aligned} \tau_{\text{red}} &= \frac{I_{\parallel\text{-red}}}{I_{\perp\text{-red}}} \\ &= \frac{97.8182}{0.2153} = 454. \end{aligned} \quad (1)$$

3) 将像素偏振片阵列移除, 拍摄图像, 其灰度统计直方图见图 5(c), 灰度平均值  $I_{\text{all-red}}$  为 127.5121 gray level.

因此, 最大偏振透射率为

$$\begin{aligned} T_{\parallel\text{-red}} &= \frac{I_{\parallel\text{-red}}}{I_{\text{all-red}}} \\ &= \frac{97.8182}{127.5121} = 76.7\%. \end{aligned} \quad (2)$$

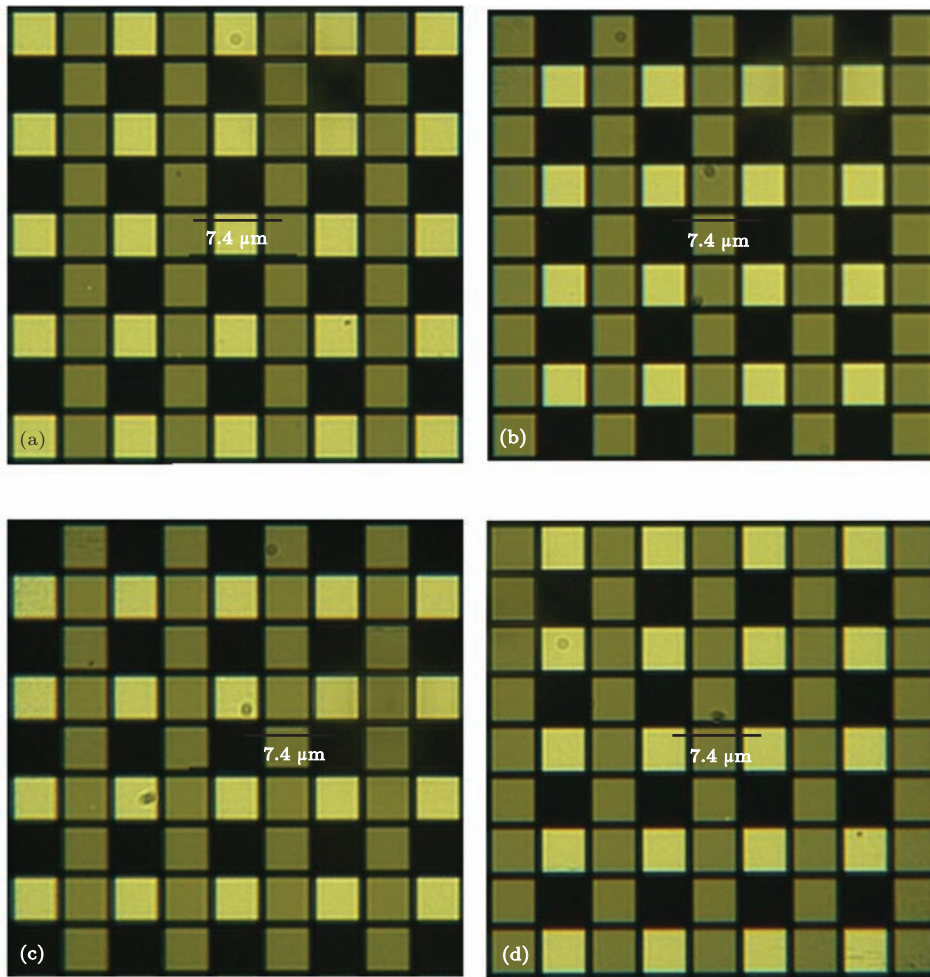


图 4 不同偏振角度时像素偏振片阵列的显微光学图像 (a) 偏振角度为 0 时的图像; (b) 偏振角度为  $\pi/4$  时的图像; (c) 偏振角度为  $\pi/2$  时的图像; (d) 偏振角度为  $3\pi/4$  时的图像

4) 重复步骤1)–3), 照明光源采用绿光和蓝光, 分别获得了纳米光栅结构对绿光和蓝光的消光比和透射率:

$$\tau_{\text{green}} = \frac{I_{\parallel\text{-green}}}{I_{\perp\text{-green}}} = \frac{110.4851}{0.3029} = 365, \quad (3)$$

$$T_{\parallel\text{-green}} = \frac{I_{\parallel\text{-green}}}{I_{\text{all-green}}} = \frac{110.4851}{139.3693} = 79.3\%, \quad (4)$$

$$\tau_{\text{blue}} = \frac{I_{\parallel\text{-blue}}}{I_{\perp\text{-blue}}} = \frac{84.7509}{0.6715} = 126, \quad (5)$$

$$T_{\parallel\text{-blue}} = \frac{I_{\parallel\text{-blue}}}{I_{\text{all-blue}}} = \frac{84.7509}{129.4484} = 65.5\%. \quad (6)$$

因此, 制备的金属纳米光栅的像素偏振片阵列对红光、绿光和蓝光的消光比分别为454, 365和126, 最大偏振透射率百分比为76.7%, 79.3%和65.5%. 而采用干涉光刻或全息光刻制作的像素偏振片阵列的消光比约为20<sup>[34]</sup>, 因此电子束曝光技术获得的像素偏振片阵列的消光比远优于干涉光刻或全息光刻制作的纳米光栅的消光比. 采用干涉光刻或全息光刻制作的像素偏振片阵列的偏振透射率为70%左右<sup>[35,36]</sup>, 因此采用电子束曝光技术

获得的像素偏振片阵列的最大偏振透射率略优于干涉光刻或全息光刻.

### 4.2 透射率随入射偏振角的变化

若像素偏振片阵列单元为理想偏振片, 则其透射率随偏振片单元的透偏振方向与线偏振照明光的夹角之间的关系应满足:

$$T = T_{\perp} + \frac{1 + \cos(2\theta)}{2}(T_{\parallel} - T_{\perp}), \quad (7)$$

其中  $T$  为透射率,  $\theta$  为偏振片单元的透偏振方向与线偏振照明光的夹角,  $T_{\parallel}$  为该波长下的最大透射率,  $T_{\perp}$  为该波长下的最小透射率.

选用线偏振红光作为照明光源. 采用电动精密旋转平台, 将显微镜的入射偏振光的角度每隔5°旋转一次(旋转精度±0.1°), 记录像素偏振片阵列一个单元的灰度平均值随偏转角的变化, 绘制如图6所示曲线. 由图可见, 在0°和180°时透射率最高, 在90°时透射率最低, 实验值基本满足(7)式的函数变化趋势.

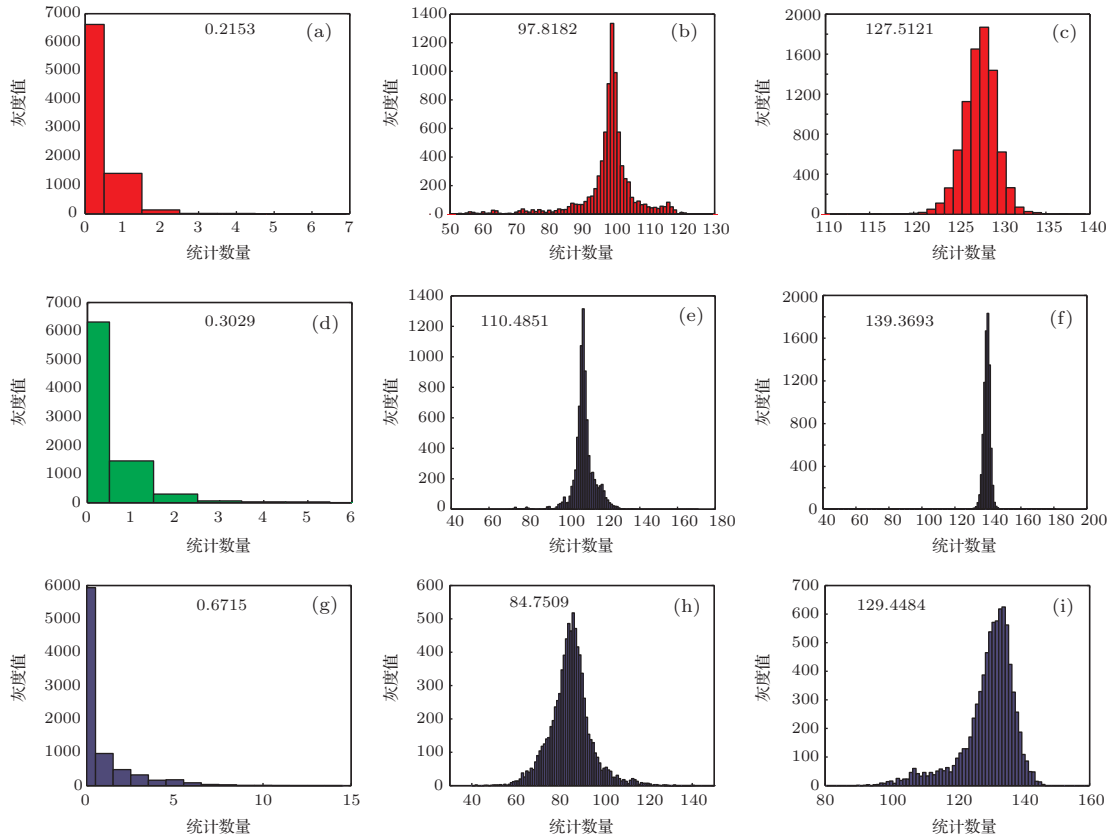


图5 灰度统计直方图, 横坐标为灰度值, 纵坐标为统计数量 (a)—(c) 为采用线偏振红光光源时测得的灰度统计直方图, 其平均灰度分别为  $I_{\perp\text{-red}} = 0.2153$ ,  $I_{\parallel\text{-red}} = 97.8182$ ,  $I_{\text{all-red}} = 127.5121$ ; (d)—(f) 为采用线偏振绿光光源时测得的灰度统计直方图, 其平均灰度分别为  $I_{\perp\text{-green}} = 0.3029$ ,  $I_{\parallel\text{-green}} = 110.4851$ ,  $I_{\text{all-green}} = 139.3693$ ; (g)—(i) 为采用线偏振蓝光光源时测得到灰度统计直方图, 其平均灰度分别为  $I_{\perp\text{-blue}} = 0.6715$ ,  $I_{\parallel\text{-blue}} = 84.7509$ ,  $I_{\text{all-blue}} = 129.4484$



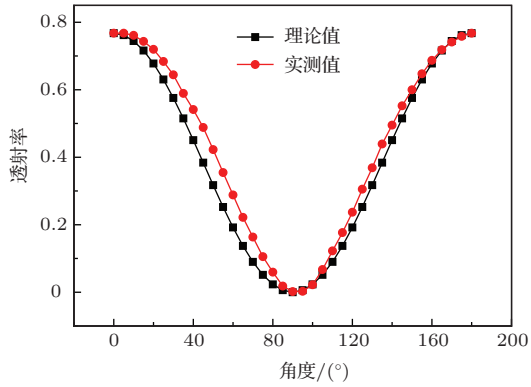


图6 红光偏振光经过像素偏振片阵列单元后的透射率随入射偏振光与偏振片阵列单元透偏振方向夹角的关系

### 5 像素偏振片阵列应用于偏振图像的增强

将制备的像素偏振片与相同单元尺寸的CCD芯片集成在一起,如图7所示.具体步骤如下:1)将CCD芯片的防尘玻璃盖板移除;2)在CCD芯片靶面上涂紫外敏感胶;3)将像素偏振片阵列的铝层表面与CCD芯片靶面紧贴在一起;4)调节像素偏振片阵列的位置和角度,使得像素偏振片阵列单元与CCD芯片单元一一对准;5)紫外灯曝光,将CCD芯片与像素偏振片阵列固定集成在一起;6)采用紫外敏感胶将CCD芯片的防尘玻璃盖板重新粘合上去.

像素偏振片阵列应用于偏振图像增强原理如图8所示.由集成具有四个偏振方向的像素偏振片阵列的相机拍摄单帧图片,将图片中相同透偏振方向单元像素分别取出,可重新组合为四幅图片.其

中图8(a)为集成了像素偏振片阵列的相机拍摄的单帧图像,将四种透偏振方向的图像灰度值取出,重新组合为四幅图像,如图8(b)所示,分别代表透偏振方向为 $0, \pi/4, \pi/2$ 和 $3\pi/4$ 时CCD所采集到的图像,其光强值分别为 $I(0), I(\pi/4), I(\pi/2)$ 和 $I(3\pi/4)$ .图像前三项斯托克斯参量( $S_0, S_1, S_2$ )可由四幅图像对应光强值获得:

$$S_0 = I(0) + I(\pi/2), \quad (8)$$

$$S_1 = I(0) - I(\pi/2), \quad (9)$$

$$S_2 = I(\pi/4) - I(3\pi/4), \quad (10)$$

其中 $S_0$ 表示像素前未加偏振片阵列时CCD芯片单元所采集到的光强值,因此 $S_0$ 图像表示普通相机拍摄的效果图像.采集图像的线偏振度(degree of linear polarization, DoLP)可表示为

$$DoLP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}. \quad (11)$$

对于线偏振光,其线偏振角(angle of linear polarization, AoLP)为

$$AoLP = \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{S_2}{S_1} \right). \quad (12)$$

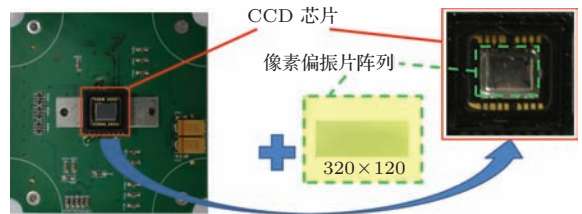


图7 像素偏振片阵列与CCD芯片集成示意图

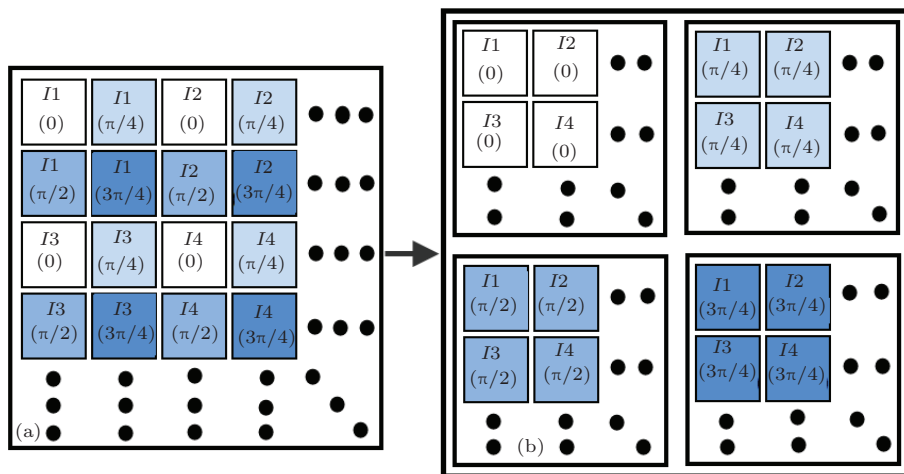


图8 像素偏振片阵列应用于图像增强的原理

图9为像素偏振片阵列应用于偏振图像增强实例,被拍摄物体为由六块方形偏振片组成的偏振片样品阵列和一个表面光滑的金属圆片,背景为粗糙墙面。六块方形偏振片的材质相同,透偏振方向略有不同。由相机拍摄的单幅图像可以分为四幅图像,分别为 $I(0)$ ,  $I(\pi/4)$ ,  $I(\pi/2)$ 和 $I(3\pi/4)$ ,从而可以计算出 $S_0$ 和 $DoLP$ 。 $S_0$ 代表未集成像素偏振片阵列的相机所应拍摄的效果图。 $DoLP$ 为图像的线偏振度,其范围为0到1(见图9中 $DoLP$ 色标),图中用灰度来表示线偏振度的强度,灰度越高,则代表的线偏振度强度也越高。对于 $DoLP$ 值大于0.2的像素,计算 $AoLP$ 。 $AoLP$ 为图像的线偏振角度,其范围为 $0^\circ$ 到 $180^\circ$ (见图9中 $AoLP$ 伪彩色标),图中颜色与线偏振角度一一对应。结果表明,六块偏振片透射的光为线偏振光,因此偏振度较高,且计算得到的偏振角因偏振片透射角度不同而不同;光滑金属圆片表面反射的光具有明显的线偏振性,因此线偏振度较高,且因表面较平整,偏振角基本一致;背景墙面和偏振片框架表面较粗糙,其反射的光不具有明显偏振特性,因此线偏振度接近于0,也就不需计算线偏振角信息。

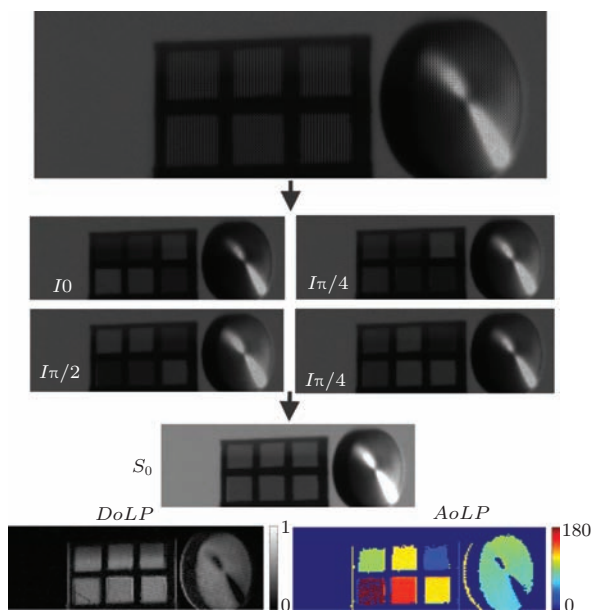


图9 (网刊彩色) 偏振增强实验结果

## 6 结 论

本文采用电子束曝光技术,成功制备了基于金属铝纳米光栅的像素偏振片阵列。阵列每相邻 $2 \times 2$ 个单元透偏振方向分别为 $0$ ,  $\pi/4$ ,  $\pi/2$ ,  $3\pi/4$ 。单元形状为规则的矩形,光栅栅线无断线、无交叉、

无污染。偏振片阵列具有优良的偏振特性,偏振透射率可达到79.3%,最大消光比可达到454。将像素偏振片阵列集成到CCD芯片上,成功应用于偏振图像增强技术中,除了可以获得普通相机的拍摄效果外,还可以实时得到物体的线偏振度信息和线偏振角信息,因此可以应用于动态物体测量,在反隐身等方面有重要应用。另外,像素偏振片阵列对于开展实时相移数字全息等方面的研究也具有重要的意义。

## 参考文献

- [1] Frish V K 1949 *Experientia* **5** 142
- [2] Collett M, Collett T S, Bisch S, Wehner R 1998 *Nature* **394** 269
- [3] Labhart T 1999 *J. Exp. Biol.* **201** 757
- [4] Shashar N, Rutledge P, Cronin T W 1996 *J. Exp. Biol.* **199** 2077
- [5] Chu J, Zhao K, Zhang Q, Wang T 2008 *Sens. Actuators A: Phys.* **148** 75
- [6] Chu J K, Wang Z W, Zhang Y J, Wang Y L 2012 *Opt. Precision Eng.* **20** 2237 (in Chinese) [褚金奎, 王志文, 张英杰, 王寅龙 2012 光学精密工程 **20** 2237]
- [7] Nordin G P, Meier J T, Deguzman P C, Jones M W 1999 *J. Opt. Soc. Am. A* **16** 1168
- [8] Brock N J, Kimbrugh B T, Millierd J E 2011 *Proc. of SPIE San Diego, California, USA, August 21, 2011* p81600W-1
- [9] Li X D, Tao G, Yang Y Z 2011 *Opt. Laser Eng.* **33** 53
- [10] Ma Z C, Xu Z M, Peng J, Sun T Y, Chen X G, Zhao W Y, Liu S S, Wu X H, Zou C, Liu S Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 039101 (in Chinese) [马智超, 徐智谋, 彭静, 孙堂友, 陈修国, 赵文字, 刘思思, 武兴会, 邹超, 刘世元 2014 物理学报 **63** 039101]
- [11] Kang Y L, Qiu Y, Lei Z K, Hu M 2005 *Opt. Laser Eng.* **43** 847
- [12] Lei Z K, Kang Y L, Qiu Y, Hu M, Cen H 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 1377
- [13] Zhang Z, Zhang Q, Cheng T, Gao J, Wu X 2013 *Opt. Eng.* **52** 103109
- [14] Wang M, Cen Y W, Yu X L, Hu X F, Zhu P P 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6202 (in Chinese) [汪敏, 岑豫皖, 余晓流, 胡小方, 朱佩平 2008 物理学报 **57** 6202]
- [15] Tahara T, Shimozato Y, Xia P, Ito Y, Awatsuji Y, Nishio K, Ura S, Matoba O, Kubota T 2012 *Opt. Express* **20** 19806
- [16] Creath K, Goldstein G 2012 *Biomed. Opt. Express* **3** 2866
- [17] Gruev V 2011 *Opt. Express* **19** 24361
- [18] Zhang Q C, Zhang Z G, Zhao Y, Cheng T, Wu X P 2013 *Chinese Patent* 201310030039.1 (2013-01-25) (in Chinese) [张青川, 张志刚, 赵旻, 程腾, 伍小平 2013 中国专利专利申请号: 201310030039.1 [2013-01-25]]
- [19] Zhao X, Boussaid F, Bermak A, Chigrinov V G 2011 *Opt. Express* **19** 5565



- [20] Gruev V, Ortu A, Lazarus N, Spiegel J V, Engheta N 2007 *Opt. Express* **15** 4994
- [21] Yang Z Y, Lu Y F 2007 *Opt. Express* **15** 9510
- [22] Meng F T, Chu J K, Han Z T, Guo Q 2009 *Acta Photon. Sin.* **38** 951 (in Chinese) [孟凡涛, 褚金奎, 韩志涛, 郭庆 2009 光子学报 **38** 951]
- [23] Luo Q, Huang L H, Gu N T, Rao C H 2012 *Chin. Phys. B* **21** 094201
- [24] Wang J P, Jin Y X, Ma J Y, Shao J D, Fan Z X 2010 *Chin. Phys. B* **19** 104201
- [25] Yu D, Wang H, Liu H P, Wang J, Jiang Y Y, Sun X D 2011 *Chin. Phys. B* **20** 114217
- [26] Zhang W F, Kong W J, Yun M J, Liu J H, Sun X 2012 *Chin. Phys. B* **21** 094218
- [27] Pan P, An J M, Wang H J, Wang Y, Zhang J S, Wang L L, Dai H Q, Zhang X G, Wu Y D, Hu X W 2014 *Chin. Phys. B* **23** 044210
- [28] Bokor N, Shechter R, Davidson N, Friesem A A, Hasman E 2001 *Appl. Opt.* **40** 2076
- [29] Zhang N, Chu J K, Zhao K C, Meng F T 2006 *Chin. J. Sens. Actuat.* **19** 1739 (in Chinese) [张娜, 褚金奎, 赵开春, 孟凡涛 2006 传感技术学报 **19** 1739]
- [30] Xie H M, Kishimoto S, Shinya N 2000 *Opt. Laser Technol.* **32** 361
- [31] Xie H M, Kishimoto S, Li Y J, Liu Q J, Zhao Y P 2009 *Microelectron. Reliab.* **49** 727
- [32] Zhao Y R, Lei Z K, Xing Y M 2014 *Exp. Mech.* **54** 45
- [33] Xie H M, Dai F L, An B Z, Zhang W 2000 *Opt. Tech.* **26** 526 (in Chinese) [谢惠民, 戴福隆, 岸本哲, 张维 2000 光学技术 **26** 526]
- [34] Gruev V, Perkins R 2010 *IEEE International Symposium on Circuits and Systems* Paris, France, May 30–June 2, 2010 p629
- [35] Gruev V, Perkins R, York T 2010 *Opt. Express* **18** 19087
- [36] Gruev V, Spiegel J V, Engheta N 2010 *Opt. Express* **18** 19292

# Fabrication of pixelated polarizer array and its application in polarization enhancement\*

Zhang Zhi-Gang<sup>1)</sup> Dong Feng-Liang<sup>2)</sup># Zhang Qing-Chuan<sup>1)</sup>† Chu Wei-Guo<sup>2)</sup>‡  
Qiu Kang<sup>1)</sup> Cheng Teng<sup>1)</sup> Gao Jie<sup>1)</sup> Wu Xiao-Ping<sup>1)</sup>

1) (CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

2) (Nanofabrication Laboratory, National Center for Nanoscience and Technology, Beijing 100190, China)

( Received 26 February 2014; revised manuscript received 10 April 2014 )

## Abstract

Pixelated polarizer array can be used in the real-time measurement of Stokes parameters. In this paper, pixelated polarizer array based on the aluminum nano-grating is designed and fabricated, and the fabrication technology is electron beam exposure technology. The size of each unit is  $7.4\ \mu\text{m}$ , and the polarization directions of each adjacent  $2 \times 2$  units in the polarizer array are  $0$ ,  $\pi/4$ ,  $\pi/2$ , and  $3\pi/4$ . The period, duty cycle, depth and surface type of the grating are  $140\ \text{nm}$ ,  $0.5$ ,  $100\ \text{nm}$  and rectangle type, respectively. The scanning electron micrographs of the pixelated polarizer array show that there is no disconnection, cross and pollution on the fabricated metal nano-grating lines. The nano-grating lines are straight and uniform in thickness, and the surface type of the grating is ideal rectangular type. The polarization optical micrographs show that the pixelated polarizer array has good polarization characteristics. The maximum polarization transmissivity can reach  $79.3\%$ , and the extinction ratio can arrive at  $454$ . Furthermore, the pixelated polarizer array is integrated with the charge coupled device chip, and the Stokes parameters can be calculated from one frame, then the degree of linear polarization and angle of linear polarization can be obtained. Thus, the polarization enhancement of image is achieved, which can be used in the anti-stealth and recognition.

**Keywords:** pixelated polarizer array, metal nanometer grating, polarization transmissivity, extinction ratio

**PACS:** 42.25.Ja, 42.87.Bg, 81.16.Nd

**DOI:** [10.7498/aps.63.184204](https://doi.org/10.7498/aps.63.184204)

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2011CB302105), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11332010, 11102201, 11372300), and the Instrument Developing Project of the Chinese Academy of Science (Grant No. YZ201265).

† Corresponding author. E-mail: [zhangqc@ustc.edu.cn](mailto:zhangqc@ustc.edu.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [wgchu@nanoctr.cn](mailto:wgchu@nanoctr.cn)

# Equal contribution for this paper