

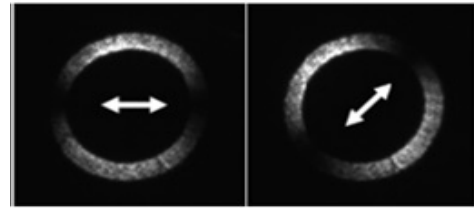


亚波长径向偏振光栅的设计

谭巧^{1,2*}, 徐启峰¹, 谢楠¹

¹福州大学电气工程与自动化学院, 福州 350108;

²福建信息职业技术学院电子工程系, 福州 350012



摘要: 针对现有电力光学电流传感中法拉第旋转角的非线性测量、解调模式的光强依赖性问题, 本文设计了一种环型亚波长偏振光栅, 其光栅矢量径向分布, 可将偏振光的偏振分布转化为光斑强度分布并与偏振面同步旋转。应用琼斯矩阵对其偏振特性进行分析, 运用严格耦合波理论对光栅进行仿真分析与优化设计, 并制备了辐射状的环型铝金属光栅。测试结果表明, 光栅 TM 光的透过率大于 80%, 整体消光比大于 100, 可实现对光偏振态的直接检测, 并具有线性测量范围大、测量结果不依赖于光的绝对强度等优点, 可用于基于图像分析的偏振检测技术。

关键词: 光栅; 亚波长金属光栅; 径向偏振光; 偏振检测

中图分类号: TN253

文献标志码: A

Design of sub-wavelength radially polarized grating

Qiao Tan^{1,2*}, Qifeng Xu¹ and Nan Xie¹

¹College of Electric Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; ²Department of Electronic Engineering, Fujian Polytechnic of Information Technology, Fuzhou 350012, China

Abstract: A new type of radially polarized grating is designed to solve the problems of nonlinear measurement of Faraday rotation existing in the power optical sensing. The distribution of the grating vector is in accordance with the special method, so that the polarization distribution of the polarized light can be transformed into the distribution of light intensity, which rotates synchronously with polarization plane. The theory of polarization detection is analyzed by using Jones matrix, and the parameters of the grating are simulated by rigorous coupled wave theory. Finally, the grating is fabricated and tested. The results show that the TM transmittance of the grating is greater than 80%, the extinction ratio is greater than 100, and the detection of the polarization state can be realized. It has the advantages of large linear measurement range and measurement results independent on the absolute intensity, so that it will be a new detection technology of polarization based on the image method.

Keywords: grating; sub-wavelength metal grating; radially polarized light; polarization detection

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.03.010

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, 44(3): 345-350

1 引言

偏振器件既可以作为起偏器产生偏振光, 也可以作为检偏器检测光的偏振状态, 是偏振光技术中不可

或缺的重要器件。亚波长金属光栅因其具有体积小、通光面积大、结构紧凑、偏振性能好、易于集成等特点, 是制作偏振器件的理想材料^[1-2]。不同于一般的偏振器件, 光栅的偏振消光方向取决于光栅矢量的方向, 在亚波长金属光栅的设计制作过程中, 控制光栅矢量方向可以形成任意的偏振分布。早在 2001 年, Bomzon

收稿日期: 2016-08-05; 收到修改稿日期: 2016-11-27

*E-mail: tqfeiji@163.com

Zeev 等人^[3-4]利用计算全息技术制作了光栅周期以及光栅矢量方向空间变化的亚波长金属光栅,能够将入射的圆偏振光转化为轴对称偏振光束,其偏振态随空间变化并具有轴对称性。然而,受限于激光衍射,其光栅周期远大于 $1\ \mu\text{m}$ 。近年来,运用电子束直写与等离子体刻蚀技术可将光栅的周期降低至几百纳米,并将工作波长扩展至近红外的 $1.55\ \mu\text{m}$ ^[5]和 $1.064\ \mu\text{m}$ ^[6],甚至可见光范围。2010年,周哲海等人^[7]用电子束直写和反应离子刻蚀技术制作了偏振级次为 1、2、3、4 的偏振光束转换器件,获得了偏振纯度为 94.8% 的径向偏振光。2011年 Ghadyani 等人^[8]研究了周期为 200 nm 的同心环金属光栅,其工作波长为 632.8 nm,可以产生可见光范围内的径向偏振光。

现有电力光学电流传感器的基本原理是通过法拉第磁旋光效应将电流的变化转化为入射线偏振光偏振面的旋转,再利用马吕斯定律将偏振面的旋转转化为出射光强的周期性波动,因而测量结果具有光功率相关性,易受光源波动、传输损耗、光电转换等因素的影响,且必须将法拉第旋转角限制在很小的范围内来获得近似线性的检测结果。针对此类问题,本文设计了一种应用在可见光及近红外范围的亚波长径向偏振光栅,其光栅矢量径向分布,可以将偏振光的偏振分布转化为光斑强度分布,并与偏振面同步旋转,使得透过光功率保持恒定,通过对光斑的定位直接测量法拉第旋转角,形成一种新的偏振检测技术。这种技术的优点是线性测量范围大、测量结果不依赖于光的绝对强度,可实现对偏振信息长期稳定的测量,在椭圆偏振测量、电力光学传感等领域具有潜在的应用价值。本文基于琼斯矩阵研究了径向偏振光栅的理论模型和偏振检测原理,运用严格耦合波理论设计了光栅参数,应用电子束直写、纳米压印以及等离子体光刻等技术制备了辐射状的铝金属光栅;并对其性能进行了测试和分析。

2 亚波长径向偏振光栅的理论研究

基于亚波长金属光栅高 TM 波透过率、高 TE 波反射率的特性可知,为了得到轴对称偏振光束,实现径向光偏振,需要光栅矢量沿着圆环以纳米的间距径向均匀分布,其结构如图 1 所示,图中黑色刻线部分为光栅刻槽,呈辐射状,并在一个圆环内等角度分布; R_1 、 R_2 分别是光栅的内、外半径。

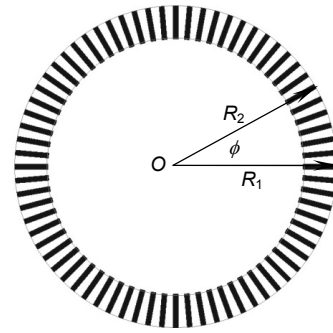


图 1 径向偏振光栅示意图。

Fig. 1 Schematic diagram of radially polarized grating.

2.1 理论模型

假设该光栅在其透光轴径向和角向(即分别表示 TE 光和 TM 光)的平均透过率分别为 t_r 和 t_ϕ , 两个方向的相位延迟为 δ , 在其自身径向和角向坐标系下的琼斯矩阵为

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} t_r & 0 \\ 0 & t_\phi \exp(i\delta) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

由于光栅具有高的消光比,在后续分析中 t_r 忽略不计。

在整个系统坐标下,光栅可描述为透光轴方向垂直于方位角 ϕ 的线性偏振片。相当于其坐标轴旋转了 ϕ 角。因此,光栅在系统坐标下的琼斯矩阵为

$$\begin{aligned} \mathbf{G}_T &= \mathbf{T}(\phi) \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{T}(-\phi) = \\ & \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & t_\phi \exp(i\delta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} = \\ & t_\phi \exp(i\delta) \cdot \begin{bmatrix} \sin^2 \phi & -\sin \phi \cos \phi \\ -\sin \phi \cos \phi & \cos^2 \phi \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2)$$

假设光源发出的光经起偏器后形成偏振方向与系统 x 轴夹角为 θ 的线偏振光,再入射至光栅,此时入射光矢为

$$\mathbf{E}_{\text{in}} = A \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

经过光栅后,出射光矢为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{\text{out}} &= \mathbf{G}_T \cdot \mathbf{E}_{\text{in}} = A \cdot t_\phi \exp(i\delta) \cdot \\ & \begin{bmatrix} \cos \theta \cdot \sin^2 \phi - \sin \theta \cdot \sin \phi \cdot \cos \phi \\ \sin \theta \cdot \cos^2 \phi - \cos \theta \cdot \sin \phi \cdot \cos \phi \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (4)$$

光功率计接收到的光强表达式为

$$\mathbf{I}_{\text{out}} = (\mathbf{E}_{\text{out}})^+ \cdot \mathbf{E}_{\text{out}}. \quad (5)$$

式中光矢上标“+”表示对光矢的厄米运算。

2.2 偏振检测原理

假定入射线偏振光的偏振方向 θ 为 0° , 根据式(5)可得到其透射光场的光强分布如图 2(a)。光斑中水平方向的暗纹表示光栅的刻槽方向平行于线偏振光的偏

振平面，而垂直方向的亮纹则表示光栅刻槽方向垂直于线偏振光的偏振平面，光斑的整体光强呈对称分布。

改变线偏振光的偏振方向 θ ，径向偏振光栅的出射光斑将随着入射光偏振平面的旋转等角度旋转，因此新型径向偏振光栅可以将原本无法被直接检测的偏振光旋转问题转化为图像光强分布检测问题。

图2亦给出了不同线偏振光方位角入射下的出射光斑。当入射光的偏振面沿着传输方向旋转时，光斑整体随之旋转，并且保持着原有的强度分布，因此可以在全角度范围内实现对旋转角的线性测量。

3 亚波长径向偏振光栅的参数设计

亚波长光栅作为偏振器件，透过率能反映器件对光的利用率，消光比可以衡量偏振效果。采用严格耦合波方法^[9]对铝金属光栅的TM波透过率和消光比进行分析研究，确定光栅的各项参数。

3.1 光栅性能与光栅脊厚度的关系

假定入射光波长为780 nm，铝金属光栅平均周期为150 nm，令光栅脊厚度变化范围为50 nm~200 nm，得到不同占空比下光栅性能随厚度的变化情况，如图3所示。可见，光栅的透过率和消光比整体上随厚度

增加而增大，但考虑到光栅脊厚度过大易坍塌，故选取厚度为100 nm。

3.2 光栅性能与光栅占空比的关系

考虑到径向偏振光栅沿径向的光栅周期和占空比是逐渐变化的，仿真时光栅周期范围定为50 nm~250 nm，并假定入射光波长为780 nm，光栅脊厚度为100 nm，图4给出了在不同占空比情况下光栅性能随光栅周期的变化情况。可见，占空比为0.2时，TM波透过率在整个光栅周期变化范围内几乎不变，且高于0.8，但其消光比却是三者中最小的；占空比为0.5时，TM波透过率会随着光栅周期增大而略有降低，其消光比会随着光栅周期增大而降低；占空比为0.8时，TM波透过率在整个变化范围内都非常低，其消光比却是三者中最大的。

同理，假定入射光波长780 nm，光栅脊厚度100 nm，令光栅占空比变化范围为0~1，得到在不同光栅周期下光栅性能随占空比的变化情况，如图5所示。可见，TM波的透过率随占空比的增大而减小，且减小到0，这是因为占空比趋近于1时，无光栅刻槽，即无TM波透过；而消光比随着占空比的增大而增大；周期变化对性能影响较小。

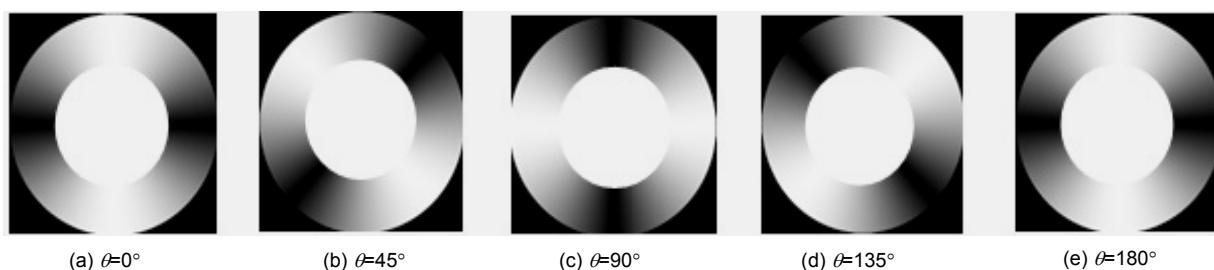


图2 不同线偏振光方位角入射下的出射光斑。

Fig. 2 Output facula in different azimuth angles of the linearly polarized light.

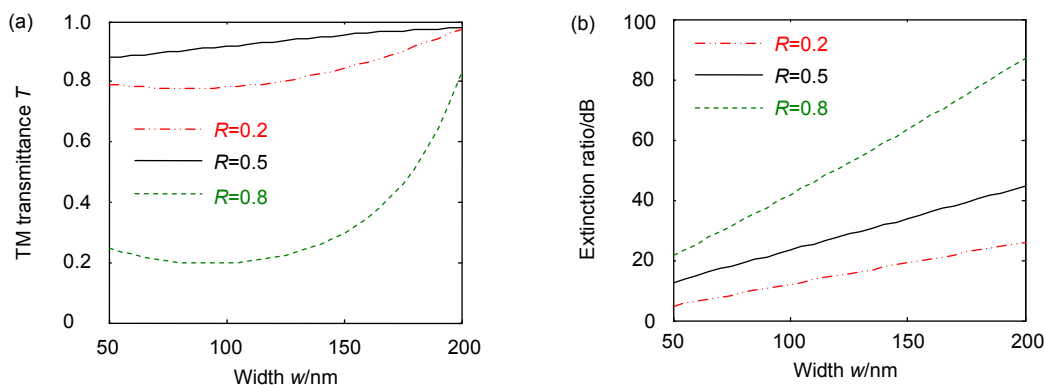


图3 光栅透过率和消光比随光栅脊厚度的变化。

Fig. 3 The transmittance and extinction under different depths.

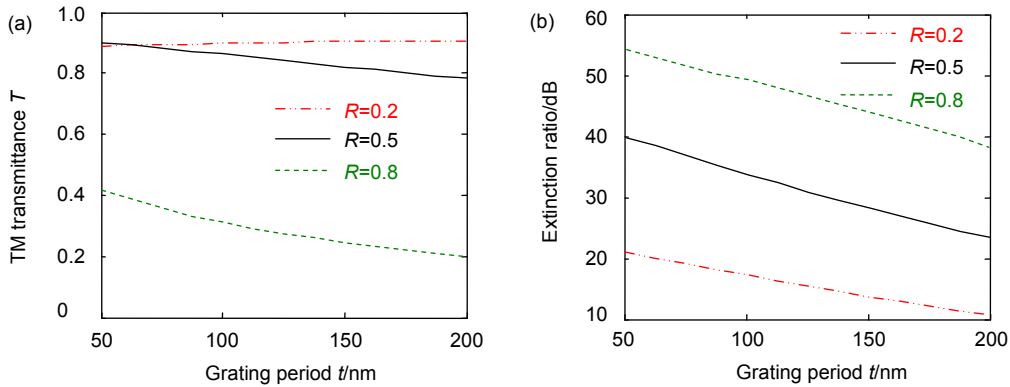


图4 不同占空比下光栅性能随周期的变化。

Fig. 4 The transmittance and extinction under different periods.

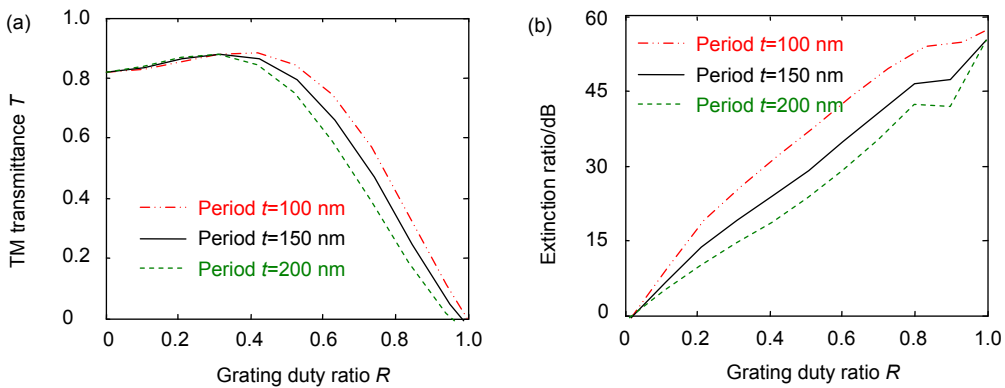


图5 不同周期下光栅性能随占空比的变化。

Fig. 5 The transmittance and extinction under different duty ratios.

由图4和图5可知占空比对光栅性能的影响比光栅周期的影响显著。综合考虑,选定铝金属光栅内外径的周期范围为100 nm~200 nm,占空比为0.25~0.5。

4 亚波长径向偏振光栅的制备与性能测试

4.1 光栅的制备

光栅的各项参数最终确定为:铝金属光栅脊宽 $L_1=L_2=50$ nm、光栅脊厚度 $H=100$ nm、内径周期 $D_1=100$ nm、占空比为0.5、外径周期 $D_2=200$ nm、占

空比为0.25,光栅内径 $R_1=8$ mm、外半径 $R_2=10$ mm,如图6所示。光栅委托丹麦国家微纳米技术研究中心进行制作,主要分为母版制作与图形转移两个过程。首先利用电子束直写制作母版,再应用纳米压印和等离子体刻蚀将母版上图像转移到玻璃基底上。光栅的实际外观和电子显微镜图样如图7所示,其误差为 ± 5 nm,光栅均匀性较好。

应用严格耦合波方法分析了该光栅外径(周期为200 nm,占空比为0.25)和内径处(周期为100 nm,占空比为0.5)的光谱响应,如图8所示。当光波长在600

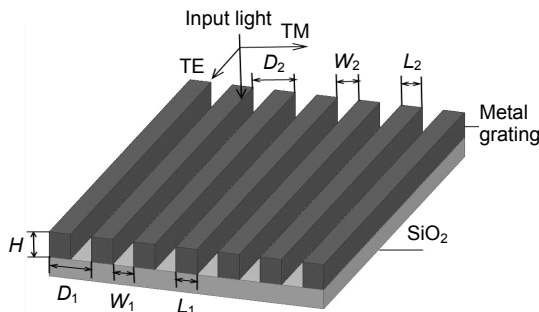


图6 光栅各参数示意图。

Fig. 6 Illustration of grating's parameters.

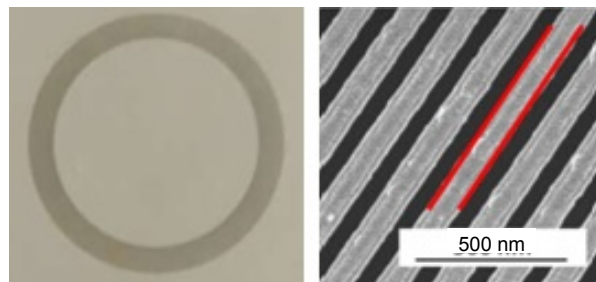


图7 光栅实物及电子显微镜扫描图样。

Fig. 7 The entity and SEM image of grating.

nm 到 1600 nm 范围内变化时, TM 波透射率在 80%~88%之间变化, 整体上随波长增加变化不大; 光栅内径处的消光比在整个波段内都大于 30 dB, 而外径处消光比则大大降低, 在整个波段内仅为 20 dB~26 dB; 在可见和近红外区, 光栅具有大于 80%的透射率和较高的消光比。

4.2 透过率和消光比测试

对光栅的相关性能进行测试的实验光路如图 9 所示。光源为 780 nm 的激光器, 光斑大小为 3 mm, 光电探测器的精度为纳瓦级别。光源发出的光经过起偏器、半波片、光阑及光栅后到达探测器, 其中光阑用来调整光斑尺寸。通过旋转半波片, 改变光的偏振方向, 可以测定透射光功率的最大值和最小值, 其中最

大值对应 TM 偏振透过光强, 最小值对应 TE 偏振透过光强。

实验时让入射光垂直入射, 分别测量了该光栅四个不同位置处的输出光强, 且多次测量取平均值, 测量结果如表 1 所示。其中初始光强是指经光阑后的出射光强, 为 85.20 μ W。

由表 1 可见, 当入射光波长为 780 nm 时, 光栅的 TM 光透过率在 0.78~0.85 之间, 消光比在 218~800 之间。从图 10 所示的光谱响应曲线可知, 在光波长为 780 nm 时, 光栅内外径的 TM 光透过率分别为 0.84 和 0.87, 消光比分别为 3162(35 dB)和 126(21 dB), 光栅四个位置的测量值均与理论值相符。

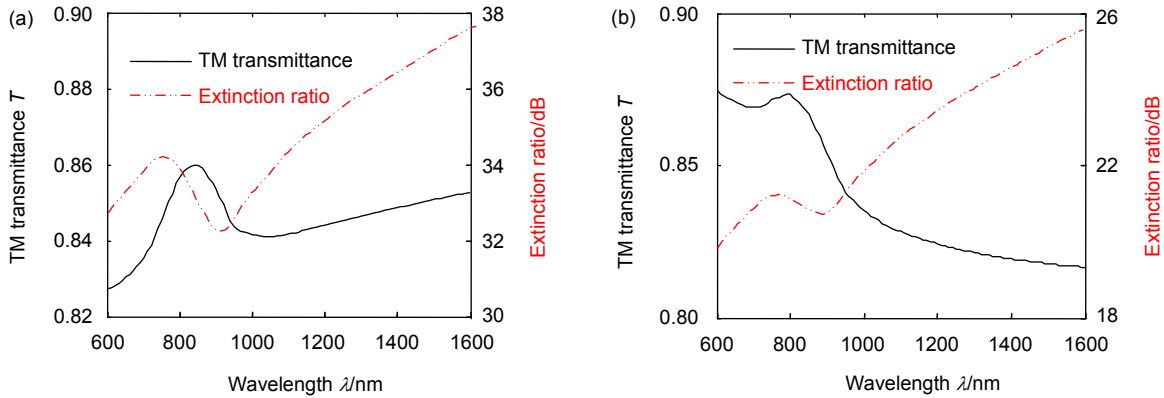


图 8 光栅的光谱响应仿真。(a) 光栅内径。(b) 光栅外径。

Fig. 8 Spectral response simulation of grating. (a) Inner diameter of grating. (b) Outer diameter of grating.

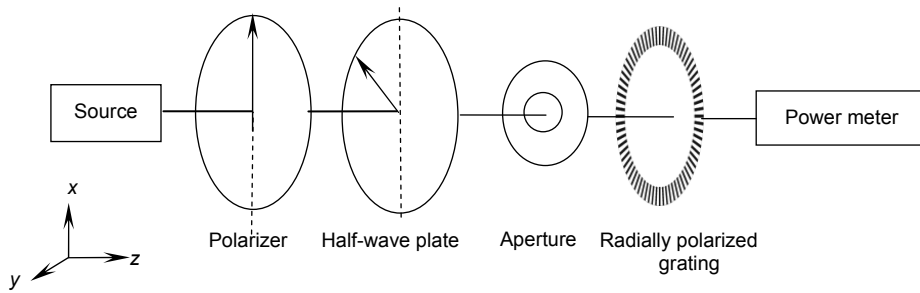


图 9 光栅性能测试光路。

Fig. 9 Experimental setup for grating performance measurement.

表 1 光栅性能测试数据。

Table 1 Experimental data for grating performance.

Testing point	$I_0/\mu W$	$I_{TM}/\mu W$	I_{TE}/nW	TM light transmittance	Extinction ratio
1	85.20	72.45	332	0.85	218(23.4 dB)
2	85.20	69.86	213	0.82	328(25.2 dB)
3	85.20	68.14	145	0.80	470(26.7 dB)
4	85.20	66.47	83	0.78	800(29.0 dB)

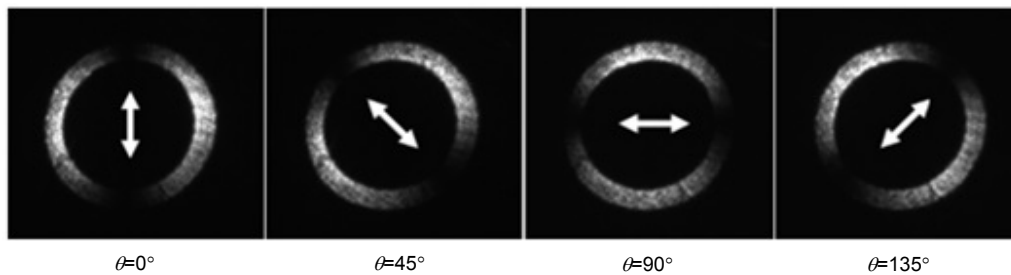


图 10 径向偏振光栅的检偏结果。

Fig. 10 Detection results by the radially polarized grating.

4.3 径向偏振性能测试

测试光路与图 9 相似,需将光阑改为扩束镜,使入射光束形成直径为 30 mm 的光斑,再平行入射至光栅,成像在纸屏上并用 CCD 相机进行观察。

测试时,先将半波片的快轴置于 x 方向,即与起偏器的透光轴方向平行,此时光束经光栅检偏后,得到 x 方向(即 0° 方向)为暗条纹的环形光斑。调节半波片的快轴方向,即改变 θ 角,当 θ 角分别为 22.5° 、 45° 和 67.5° 时,线偏光的偏振方向分别旋转了 45° 、 90° 和 135° 。经光栅检偏后,得到的光强条纹图像分布如图 10 所示,图中白色箭头表示光的偏振方向。可见,该径向偏振光栅能够测量光的偏振态,能直接测量偏振光旋转角,因而可实现对电力光学传感中法拉第旋转角的线性测量。

5 结论

设计了一种新型的亚波长径向偏振光栅,其光栅矢量沿着圆环以纳米间距径向均匀分布。运用琼斯矩阵方法建立了偏振光栅的理论模型并论证了其偏振检测原理。利用严格耦合波理论研究了入射光波长为 780 nm 时,光栅的占空比、周期、厚度和入射角等不同参数对 Al 金属光栅性能的影响。通过电子束直写、纳米压印以及等离子体刻蚀技术制作出圆环内外半径分别为 8 mm 和 10 mm 的等刻槽线宽的辐射形 Al 金属光栅,经测试,光栅在 600 nm~1600 nm 光谱范围内 TM 光的透过率在 80% 以上,消光比在 100 以上,并能实现对光偏振态的检测,直接测量偏振光的旋转角。基于这种新型结构的光栅,可以解决现有电力光学电流传感中法拉第旋转角非线性测量、光功率相关等问题,并构成一种基于图像分析的偏振检测新技术,具有线性测量范围大、光功率无关等优点,可应用于椭圆偏振测量、偏振检测等领域。

基金项目

国家自然科学基金(51177016)资助课题。

参考文献

- 1 Zhao Huajun, Yang Shouliang, Zhang Dong, *et al.* Design of polarizing beam splitters based on subwavelength metal grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(9): 6236–6242.
赵华君, 杨守良, 张东, 等. 亚波长金属偏振分束光栅设计分析[J]. *物理学报*, 2009, **58**(9): 6236–6242.
- 2 Guo Chucai, Ye Weimin, Yuan Xiaodong, *et al.* Research on sub-wavelength grating polarizing beam splitter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2690–2695.
郭楚才, 叶卫民, 袁晓东, 等. 亚波长光栅偏振分束器的研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2690–2695.
- 3 Bomzon Z, Kleiner V, Hasman E. Formation of radially and azimuthally polarized light using space-variant subwavelength metal stripe gratings[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, **79**(11): 1587–1589.
- 4 Hasman E, Bomzon Z, Niv A, *et al.* Polarization beam-splitters and optical switches based on space-variant computer-generated sub-wavelength quasi-periodic structures[J]. *Optics Communications*, 2002, **209**(1–3): 45–54.
- 5 Mohammed W S, Mehta A, Pitchumani M, *et al.* Selective excitation of the TE₀₁ mode in hollow-glass waveguide using a subwavelength grating[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, **17**(7): 1441–1443.
- 6 Lerman G M, Levy U. Generation of a radially polarized light beam using space-variant subwavelength gratings at 1064 nm[J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(23): 2782–2784.
- 7 Zhou Zehai. Formation, properties and applications of axially symmetric polarized beams[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010: 18–41.
周哲海. 轴对称偏振光束的生成、特性及应用[D]. 北京: 清华大学, 2010: 18–41.
- 8 Ghadyani Z, Vartiainen I, Harder I, *et al.* Concentric ring metal grating for generating radially polarized light[J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(16): 2451–2457.
- 9 Moharam M G, Grann E B, Pommet D A, *et al.* Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1995, **12**(5): 1068–1076.