

引用格式: XU Yu-ting, XU Qi-feng, SONG Qian-yun, *et al.* A Strip Sub-wavelength Radial Polarization Grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(3):0305001

许玉婷,徐启峰,宋倩芸,等.一种条形亚波长径向偏振光栅[J].光子学报,2020,**49**(3):0305001

# 一种条形亚波长径向偏振光栅

许玉婷<sup>1</sup>,徐启峰<sup>1</sup>,宋倩芸<sup>2</sup>,黄奕钒<sup>1</sup>

(1 福州大学 电气工程与自动化学院,福州 350116)

(2 国网山东电力公司建设公司,济南 250300)

**摘要:**提出并设计了一种条形亚波长铝金属径向偏振光栅,用电子束直写方法制成,可以将偏振光偏振面的旋转直接转换为光斑的水平移动,通过定位光斑位移实现旋光角的测量.光栅由 12 000 个单元水平排列组成,每个单元宽  $1\ \mu\text{m}$ ,中心单元的格栅方向为  $0^\circ$ ,左右相邻单元的格栅分别按逆时针和顺时针方向依次旋转  $30''$ ,最终实现  $\pm 50^\circ$  旋光角的测量范围.基于琼斯矩阵建立了光栅的理论模型,并运用严格耦合波理论分析了光栅的偏振特性与光栅脊厚、周期、占空比、入射光波长之间的关系,确定了光栅的最优结构.实验与仿真结果表明,光栅 TM 波的透过率大于  $80\%$ 、整体消光比大于  $26\ \text{dB}$ .这一测量模式不受光功率波动的影响,可以构成无机械旋转的新型旋光仪,或不需要旋转图像平移转换的电力光学传感器.

**关键词:**亚波长径向偏振光栅;偏振特性;严格耦合波理论;琼斯矩阵;旋光角

中图分类号:TN25

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204903.0305001

## A Strip Sub-wavelength Radial Polarization Grating

XU Yu-ting<sup>1</sup>, XU Qi-feng<sup>1</sup>, SONG Qian-yun<sup>2</sup>, HUANG Yi-fan<sup>1</sup>

(1 College of Electric Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

(2 State Grid Shandong Electric Power Company Construction Company, Jinan 250300, China)

**Abstract:** A strip sub-wavelength radial polarization grating is designed in this paper. It is fabricated by beam direct write lithography, which can convert a rotation of polarization plane into the horizontal displacement of facula directly, so a linear measurement of rotation angle is achieved by locating the facula displacement. The grating consists of 12 000 units are arranged horizontally, the direction of the central unit is  $0^\circ$ , and the right or the left ones are rotated in turn by  $30''$  in counterclockwise or clockwise directions respectively and finally achieve a measurement range of  $\pm 50^\circ$  optical rotation angle. The theoretical model of the grating is established based on the Jones Matrix, and the relationship among the polarization characteristics and the grating ridge height, the period, the duty ratio, the incident light wavelength, the incident angle, and the temperature is analyzed by using the rigorous coupled-wave theory. The experimental and simulation results show that the grating TM wave transmittance is greater than  $80\%$ , and the extinction ratio is better than  $26\ \text{dB}$ . It achieves the optical power independent measurement of the optical rotation angle, which can be employed to build a new type of polarimeter with no mechanical rotating device or optical transducers with no rotary translation converter.

**Key words:** Sub-wavelength radial polarization grating; Polarization characteristics; Strict coupled wave theory; Jones matrix; Optical rotation angle

基金项目:国家自然科学基金(Nos.51807030,51977038)

第一作者:许玉婷(1996-),女,硕士研究生,主要研究方向为光学互感器.Email:595260020@qq.com

导师(通讯作者):徐启峰(1959-),男,教授,博导,主要研究方向为电力系统测量新技术以及人工智能.Email:ranger123098@163.com

收稿日期:2019-09-25;录用日期:2019-12-05

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

旋光现象指当线偏振光透射某些透明介质时,入射光的偏振面沿着传播方向旋转.旋光仪是一种用于测量旋光角的仪器,随着偏振测量技术的发展,旋光仪已广泛应用于医疗保健,生物医学分析和制糖业等领域<sup>[1-2]</sup>.通常基于消光法测量旋光角,需要手动或机械调节起偏器以确定最大或最小消光位置.例如利用步进电机旋转起偏器<sup>[3]</sup>获得最大消光位置的方法,原理简单、成本低,但灵敏度低、测量精度低、无法实现高速实时测量.基于光弹调制(Photo-elastic Modulation, PEM)的旋光测量需要手动调节起偏器<sup>[4]</sup>,受双折射和光功率损失的影响,其稳定性和准确性不高.为了避免旋转器件的影响提出的静态测量方案,如双 PEM 旋光仪<sup>[5]</sup>利用散射效应测量葡萄糖浓度,要求两个 PEM 具有完全相同光学特性,这一点很难满足.基于闭环的双波长旋光测量<sup>[6-7]</sup>能够满足高灵敏度的血糖测量要求,但依赖于较多的光学设备,稳定性差.基于双折射棱镜实现的旋光仪<sup>[8]</sup>不需要旋转光学器件,但具有光功率依赖性,测量结果容易受到光源波动的影响.

在电力测量领域,光学电流传感器(Optical Current Transducer, OCT)或光学电压传感器(Optical Voltage Transducer, OVT)因具有体积小、重量轻、绝缘性能好等优点,具有重要的应用前景<sup>[9]</sup>.现有光学传感器的测量原理是将电流或电压的变化转化为入射线偏振光偏振面的旋转,再借助于马吕斯定律转化为出射光强的周期性波动,对出射光强的非线性解调得到旋光角<sup>[10-12]</sup>.由于存在光功率依赖性,出射光强易受光源波动的影响;OCT 与 OVT 还需要将旋光角控制在很小的范围内(例如 $\leq 1^\circ$ ),以实现近似线性,测量范围受到限制.环形亚波长径向偏振光栅(Radial Polarization Grating, RPG)<sup>[13-14]</sup>实现了旋光角的线性解调与光功率无关性,但是只能得到旋转光斑.在工程应用中,对旋转光斑的定位存在诸多困难,需要借助于图像转换器将旋转光斑转换为平移光斑以便于应用线阵图像传感器<sup>[15]</sup>,导致分辨率与测量范围受到限制.

亚波长光栅具有体积小、偏振性能优异、易于集成等特点<sup>[16-17]</sup>.光栅的偏振消光方向取决于光栅矢量的方向,因此可以形成任意的偏振分布.本文提出并设计了一种条形径向偏振光栅(Sub-wavelength Radial Polarization Grating, SRPG),其光栅矢量呈径向分布,栅条沿水平排列,可以将偏振旋转直接转化为光斑的直线位移,通过对光斑的定位实现旋光角的线性测量.与 RPG 相比,SRPG 的占空比固定,偏振解调的一致性更好,不存在旋转光斑平移转换的问题,测量范围更大.因此,可以用 SRPG 构成无机械旋转的新型旋光仪,或无旋转图像转换的 OCT 和 OVT.

## 1 SRPG 的物理结构

通常,光栅的周期小于入射光波长时构成亚波长偏振光栅.光栅中与栅条方向平行的 TE(Transverse Electric)光波分量被反射或吸收,与栅条方向垂直的 TM(Transverse Magnetic)光波分量直接透过.亚波长光栅的偏振透过方向取决于栅条方向,将栅条方向按一定的规则排列得到 SRPG,如图 1 所示.本文提出的 $\pm 50^\circ$ 的 SRPG 由 12 000 个单元平行排列组成,中心单元的格栅方向为 $0^\circ$ ,左右相邻单元的格栅分别按逆时

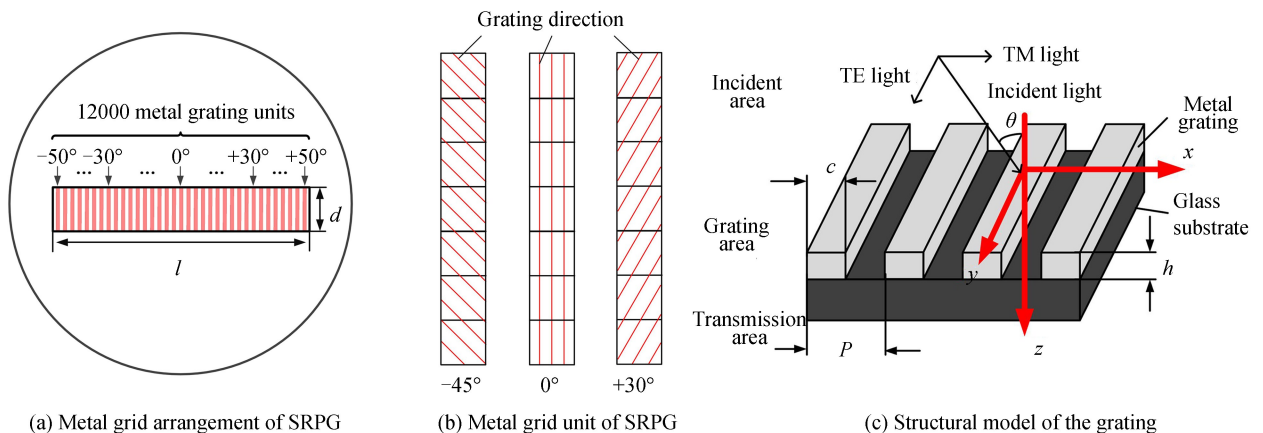


图 1 SRPG 结构示意图  
Fig.1 Structure diagram of SRPG

针和顺时针方向依次旋转  $30^\circ$  直至  $\pm 50^\circ$ ,  $l, d$  分别是光栅的长和高.图 1(c)为光栅的结构模型,可分为三个区域,  $z < 0$  为入射区,  $0 < z < h$  为光栅区,  $z > h$  为透射区,其中  $c$  表示光栅脊宽,  $P$  表示光栅周期,  $h$  表示光栅的脊高,  $z$  方向为光栅的法线方向,即透光方向.此外,  $xy$  表示光栅所在的平面,金属栅条单元平行于  $y$  轴,入射光波矢与  $z$  轴所构成平面为入射面,入射角为  $\theta$ .

根据矢量衍射理论<sup>[18-19]</sup>,入射光通过 SRPG 的过程可以用一个随空间变化的琼斯矩阵来表示

$$\mathbf{G}(x, y) = \mathbf{T}[\varphi(x, y)] \mathbf{G}[\kappa(x, y)] \mathbf{T}^{-1}[\varphi(x, y)] \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{T}[\varphi(x, y)]$  为旋转矩阵,  $\varphi$  为金属栅条方向(在  $-50^\circ \sim 50^\circ$  之间变化).  $\mathbf{G}[\kappa(x, y)]$  可以用对角矩阵表示为

$$\mathbf{G}[\kappa(x, y)] = \begin{bmatrix} t_{\text{TE}} & 0 \\ 0 & t_{\text{TM}} \exp(j\xi) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $t_{\text{TM}}, t_{\text{TE}}$  分别是 TM 波和 TE 波透射分量的衍射效率(简称为透过率);  $\xi$  为两个光波之间的相位差.由于光栅具有很高的消光比( $t_{\text{TE}} \ll t_{\text{TM}}$ ),  $t_{\text{TE}}$  可忽略不计.因此,可以将 SRPG 描述为透光轴垂直于  $\varphi$  的线性偏振片,式(1)改写为

$$\mathbf{G}(\varphi) = \mathbf{T}(\varphi) \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{T}^{-1}(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & t_{\text{TM}} \exp(j\xi) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} = t_{\text{TM}} \exp(j\xi) \cdot \begin{bmatrix} \sin^2 \varphi & -\sin \varphi \cos \varphi \\ -\sin \varphi \cos \varphi & \cos^2 \varphi \end{bmatrix} \quad (3)$$

设定入射线偏振光偏振面的方向与系统  $x$  轴夹角为  $\theta$ , 振幅为 1, 则入射光矢的琼斯矩阵为

$$\mathbf{E}_{\text{in}} = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

经过 SRPG 后,出射光矢的琼斯矩阵为

$$\mathbf{E}_{\text{out}}(\varphi) = \mathbf{G}(\varphi) \cdot \mathbf{E}_{\text{in}} = t_{\text{TM}} \cdot \exp(j\xi) \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta \cdot \sin^2 \varphi - \sin \theta \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi \\ \sin \theta \cdot \cos^2 \varphi - \cos \theta \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (5)$$

以  $\pm 50^\circ$  的 SRPG 为例,得到出射光强表达式为

$$I_{\text{out}} = \mathbf{E}_{\text{out}}^* \cdot \mathbf{E}_{\text{out}} = t_{\text{TM}}^2 \exp(2j\xi) \cos^2(\varphi - \theta) \quad (6)$$

长度为  $l$  的光栅对应的旋转角测量范围为  $\pm 50^\circ$ , 则光斑位移量  $\Delta x$  与旋光角度  $\theta$  的关系

$$\frac{\Delta x}{l} = \frac{\theta}{100^\circ} = \frac{9\theta}{5\pi} \quad (7)$$

则有

$$\theta = \frac{5\pi \Delta x}{9 l} \quad (8)$$

带入式(6),得

$$I_{\text{out}} = \mathbf{E}_{\text{out}}^* \cdot \mathbf{E}_{\text{out}} = t_{\text{TM}}^2 \exp(2j\xi) \cos^2\left(\varphi - \frac{5\pi \Delta x}{9 l}\right) \quad (9)$$

基于 Matlab 仿真得到 SRPG 检偏后的出射光强分布,如图 2 所示.可见光斑随旋光角的变化同步平移,通过测量光斑的平移即可实现旋光角的直接线性测量.

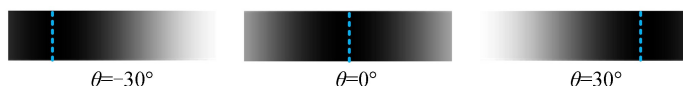


图 2 经 SRPG 后出射光强分布

Fig.2 Out-of-light intensity distribution after SRPG

## 2 SRPG 的理论分析

### 2.1 严格耦合波理论

严格耦合波理论(Rigorous Coupled-wave Analysis, RCWA)方法是由 Moharam 等提出的数值计算方法,理论基础为麦克斯韦方程组和电磁场的边界连续条件.

当线偏振光通过 SRPG 时, TM 波的磁场矢量与金属栅条方向平行, 归一化的入射磁场  $H_{in,y}$  表示为<sup>[20]</sup>

$$H_{in,y} = \exp[-jk_0 n_1 (x \sin \theta + z \cos \theta)] \quad (10)$$

式中,  $k_0 = 2\pi/\lambda$  表示真空中的入射光矢,  $\lambda$  为入射光的波长,  $n_1$  为入射区折射率。

SRPG 入射区和透射区的电场  $E$  表达式可由 Maxwell 方程得到

$$\mathbf{E} = \left( \frac{-j}{\omega \epsilon_0 n^2} \right) \nabla \times \mathbf{H} \quad (11)$$

式中,  $\omega$  为入射光角频率,  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $n$  为折射率。光栅区中有金属和衬底这两种不同介质, 可将其相对介电常数作傅里叶级数展开

$$\epsilon(x) = \sum_q \epsilon_q \exp\left(\frac{j2\pi q}{P}\right) \quad (12)$$

$\epsilon_q$  表示第  $q$  级傅里叶分量,  $P$  为光栅周期。

在光栅区将切向磁场和横向电场按空间谐波傅里叶展开代入麦克斯韦方程, 得到耦合波方程矩阵形式

$$\begin{bmatrix} \partial U_y / \partial(z') \\ \partial S_x / \partial(z') \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{E} \\ \mathbf{B} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_y \\ S_x \end{bmatrix} \quad (13)$$

在 SRPG 光栅层与入射层的边界处 ( $z=0$ ) 以及透射层的边界处 ( $z=h$ ), 磁场和电场分量连续, 分别得矩阵形式

$$\begin{bmatrix} \delta_{10} \\ j \cos \theta \delta_{10} / n_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I \\ -Z_I \end{bmatrix} [\mathbf{R}] = \begin{bmatrix} \mathbf{W} & \mathbf{W}\mathbf{X} \\ \mathbf{V} & -\mathbf{V}\mathbf{X} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c^+ \\ c^- \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{W}\mathbf{X} & \mathbf{W} \\ \mathbf{V}\mathbf{X} & -\mathbf{V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c^+ \\ c^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ j\mathbf{Z}_{II} \end{bmatrix} [\mathbf{T}] \quad (15)$$

式中,  $\mathbf{W}$  为矩阵  $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{B}$  组成的特征向量矩阵,  $\mathbf{V} = \mathbf{E}^{-1} \mathbf{W}\mathbf{Q}$ ,  $\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{X}$ 、 $\mathbf{Z}_I$  和  $\mathbf{Z}_{II}$  都为对角矩阵。联立式(14)和式(15)可求得矩阵  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{T}$ 。则 SRPG 的 TM 波反射分量和透射分量的衍射效率  $r_{TM}$  和  $t_{TM}$  为

$$\begin{cases} r_{TM} = \mathbf{R}_i \mathbf{R}_i^* \operatorname{Re} [k_{1,zi} / (k_0 n_1 \cos \theta)] \\ t_{TM} = \mathbf{T}_i \mathbf{T}_i^* \operatorname{Re} [k_{III,zi} n_{III} / (k_0 n_{III}^2 \cos \theta)] \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $k_{1,zi}$ ,  $k_{III,zi}$  分别为 SRPG 入射区和透射区中第  $i$  级衍射波波矢的  $z$  分量,  $n_{III}$  为透射区折射率。

对于 TE 波, 其电场垂直于入射面, 同理得到归一化的入射电场方程为

$$E_{in,y} = \exp[-jk_0 n_1 (x \sin \theta + z \cos \theta)] \quad (17)$$

以及 TE 波反射分量和透射分量的衍射效率

$$\begin{cases} r_{TE} = \mathbf{R}_i \mathbf{R}_i^* \operatorname{Re} [k_{I,zi} / (k_0 n_1 \cos \theta)] \\ t_{TE} = \mathbf{T}_i \mathbf{T}_i^* \operatorname{Re} [k_{II,zi} / (k_0 n_1 \cos \theta)] \end{cases} \quad (18)$$

基于上述公式, 可以利用 Matlab 分析 SRPG 的 TM 波透过率和消光比, 并优化各项参数。

## 2.2 等效介质理论

等效介质理论 (Equivalent Medium Theory, EMT) 对亚波长光栅在物理层面上的近似分析具有较高的精度<sup>[21]</sup>。根据这一理论, SRPG 的 TM 波和 TE 波的等效折射率分别为

$$\begin{cases} n_{TM} = \sqrt{\frac{(n_1 + jk_1)^2 + (n_2 + jk_2)^2}{f(n_2 + jk_2)^2 + (1-f)(n_1 + jk_1)^2}} \\ n_{TE} = \sqrt{\frac{(n_1 + jk_1)^2 + (n_2 + jk_2)^2}{f(n_1 + jk_1)^2 + (1-f)(n_2 + jk_2)^2}} \end{cases} \quad (19)$$

式中,  $f$  为光栅的占空比,  $n$ 、 $k$  分别为光栅材料折射率的实部与虚部, 下标 1、2 分别为光栅材料与空气。对于常见的金属材料, 其折射率的虚部一般大于实部, 大部分 TM 波被透射, 大部分 TE 波被反射和吸收。

本文将运用 EMT 对 SRPG 的 TM 波透过率和消光比做定性分析。

## 3 SRPG 参数的优化

### 3.1 SRPG 金属材料的选择

SRPG 由镀膜金属材料和石英玻璃基底构成。作为偏振器件, 光栅透射光中只能存在零级衍射, 故要求

光栅的周期小于阈值周期  $P_{th}^{[22]}$

$$P_{th} = \lambda k / (n_{III} \pm \sin \theta) \quad (20)$$

式中,  $\lambda$  为入射光波长,  $\theta$  为入射角,  $k$  为光波的衍射级次, 当  $k = 1$  时只存在零级衍射,  $n_{III}$  是基底材料的折射率.

当入射光波长为 632.8 nm, 基底材料为石英玻璃, 带入式(20)求得 SRPG 阈值周期  $P_{th}$  约为 389 nm. 考虑实际制作过程中加工的难度、成本等因素, 仿真暂定 SRPG 的周期为  $P = 200$  nm、光栅脊高为  $h = 150$  nm、占空比为  $f = 0.5$ . 当 SRPG 镀膜金属材料分别选择铝(Al)、银(Ag)和金(Au)时, 仿真结果如图 3 所示. 当  $\lambda$  在 600~1 000 nm 时, 铝光栅 TM 波的透过率大于 80%, 消光比大于 26 dB 在整个波段铝光栅的表现均最优. 而 Ag 和 Au 的折射率相近, 所以两者变化曲线相似. 综上分析, 选取 Al 为 SRPG 的镀膜材料.

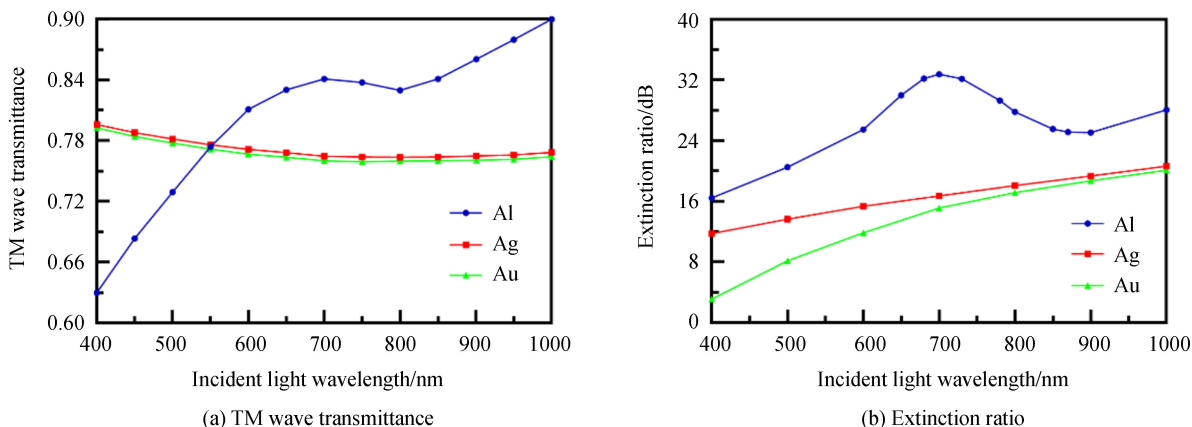


图 3 Al、Ag、Au 金属光栅的透过率和消光比

Fig.3 Transmittance and extinction ratio of Al, Ag, Au metal gratings

### 3.2 SRPG 的偏振特性与光栅脊高的关系

根据 RCWA 理论, 光栅脊高  $h$  和入射区磁场  $H_{1,y}$  和透射区磁场  $H_{III,y}$  满足

$$\begin{cases} H_{1,y} = H_{in,y} + \sum_i R_i \exp[-j(k_{xi}x - k_{1,zi}z)] \\ H_{III,y} = \sum_i T_i \exp\{-j[k_{xi}x + k_{III,zi}(z - h)]\} \end{cases} \quad (21)$$

式中,  $R_i$  是第  $i$  个反射波的归一化磁场幅度;  $T_i$  是第  $i$  个透射波的归一化磁场幅度;  $k_{xi}$  是第  $i$  级衍射波波矢的  $x$  分量;  $k_{1,zi}$ ,  $k_{III,zi}$  分别为入射区和透射区中第  $i$  级衍射波波矢的  $z$  分量. 根据式(21), 脊高  $h$  变化会影响  $R_i$  与  $T_i$ , 结合式(16), 进而改变 TM 波的反射率和透射率. 同理带入式(18)得 TE 波的衍射参数与  $h$  的相关. SRPG 偏振特性是  $h$  的隐函数, 可以借助于 Matlab 进行相关的分析计算. 取  $\lambda = 632.8$  nm, SRPG 的周期  $P = 200$  nm, 占空比  $f = 0.5$ , 设 SRPG 脊高  $h$  的变化范围为 50~250 nm, 计算结果如图 4 所示. 可见 SRPG

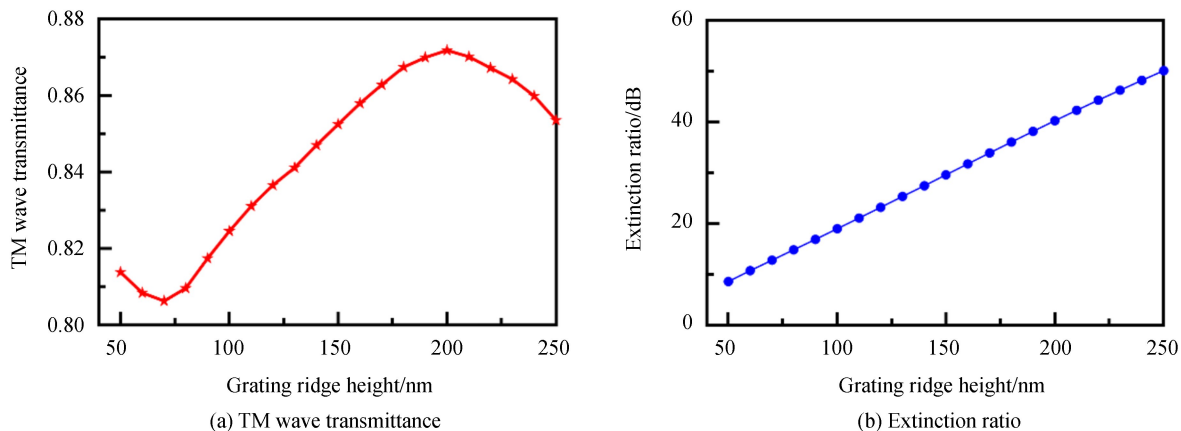


图 4 光栅偏振特性与脊高的关系

Fig.4 Relationship between grating polarization characteristics and ridge height

的 TM 波透过率整体呈上升趋势且大于 0.80。脊高趋近 0 时,光栅仅剩余石英玻璃,其 TM 波透过率接近 1。当脊高  $>200$  nm 时,受铝栅条深度的影响,入射光的衍射效率下降, TM 波透过率降低。由于随着光栅脊高的增加,铝栅条对 TE 波的吸收率提高,光栅脊高增加带来的 TE 波透过率的减小远大于 TM 波透过率的减小<sup>[23]</sup>,因此消光比则随脊高增加而提高。但是随着光栅脊高的增加,制作难度与成本大幅增加<sup>[24]</sup>,基于对性价比的权衡,本文选  $h=150$  nm。

### 3.3 SRPG 的偏振特性与占空比及周期的关系

根据式(12),光栅介电常数与周期有关,对于图 1(c)所示光栅结构,式(12)的傅里叶分量可由式(22)决定。

$$\begin{cases} \epsilon_0 = \epsilon_g^2 f + \epsilon_c^2 (1-f) & q=0 \\ \epsilon_q = (\epsilon_g^2 - \epsilon_c^2) \frac{\sin(\pi q f)}{\pi q} & q \neq 0 \end{cases} \quad (22)$$

式中,  $\epsilon_g$ 、 $\epsilon_c$  表示光栅脊和光栅槽的相对介电常数;  $f$  是光栅的占空比。因此光栅介电常数也与  $f$  相关。结合 RCWA 理论,介电常数变化改变光栅区的切向磁场和横向电场<sup>[25]</sup>,带入式(16)和式(18),可以分析  $f$  与  $P$  对 SRPG 偏振特性的影响。取  $\lambda=632.8$  nm,  $h=150$  nm,图 5 给出了基于 Matlab 仿真得到的不同占空比条件下 SRPG 偏振特性与周期的关系。 $f=0.2$  时 TM 波透过率较高( $>0.8$ ),但消光比很低;  $f=0.8$  时消光比很高( $>60$  dB),但 TM 波透过率低于 0.5;  $f=0.5$  时 TM 波透过率( $>0.8$ )和消光比( $>30$  dB)均保持较高水平。

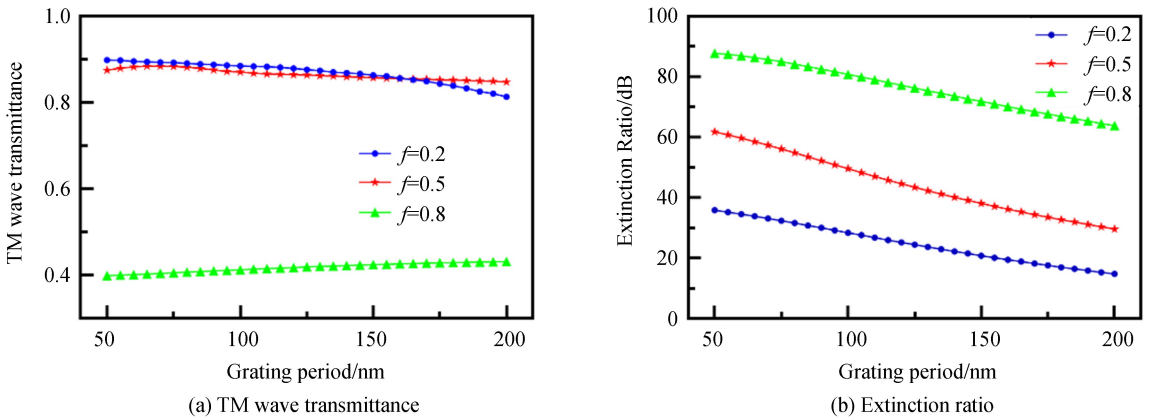


图 5 不同占空比条件下 SRPG 偏振特性与周期的关系

Fig.5 Relationship between polarization characteristics and period of grating with different duty ratios

结合式(19)对上述现象进行分析,由于光栅缝隙中为空气,即  $k_2=0$ ,铝金属为导体,即  $k_1$  趋于  $\infty$ ,因此可简化为

$$\begin{cases} n_{\text{TM}} = n_2 \sqrt{\frac{1}{1-f}} \\ n_{\text{TE}} = \sqrt{f} \end{cases} \quad (23)$$

由式(23)可知,光栅 TM 波和 TE 波的等效折射率与  $f$  有关。对于 TE 波,光栅折射率只有虚部,因此大部分 TE 波被反射和吸收;对于 TM 波,光栅折射率只有实部,因此大部分 TM 波被透射。当  $f$  由 0.2 变化至 0.5,  $n_{\text{TM}}$  的虚部无变化,因此 TM 波透过率变化很小;而  $n_{\text{TE}}$  虚部单调上升,即 TE 波透过率变小,因此消光比增加。当  $f$  由 0.5 变化至 0.8,由于金属栅条面积增加,导致 TM 波透过率降低;TE 波透过率继续降低,且降低程度远大于 TM 波,因而消光比继续增大。

同理,取  $\lambda=632.8$  nm,  $h=150$  nm,图 6 给出了不同周期条件下 SRPG 偏振特性与占空比的关系。可见当  $P$  在 100~200 nm 变化时, TM 波透过率最大变化了 8%,消光比变化了 13.05%,可见周期变化对性能影响较小。

综合考虑制作难度和成本,选定 SRPG 的周期为 200 nm,占空比为 0.5。

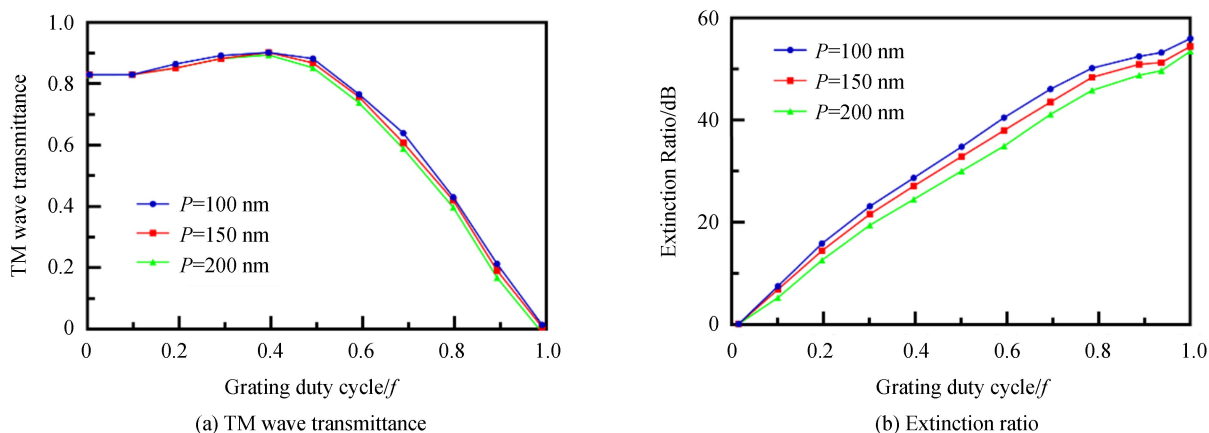


图 6 不同周期条件下 SRPG 偏振特性与占空比的关系

Fig.6 Relationship between polarization characteristics of grating and duty cycle under different periodic conditions

### 3.4 SRPG 的偏振特性与入射光波长的关系

介质折射率受到入射光波长的影响,以铝(Al)金属为例,通过计算<sup>[26-29]</sup>得到折射率实部、虚部与λ的关系如图 7 所示.

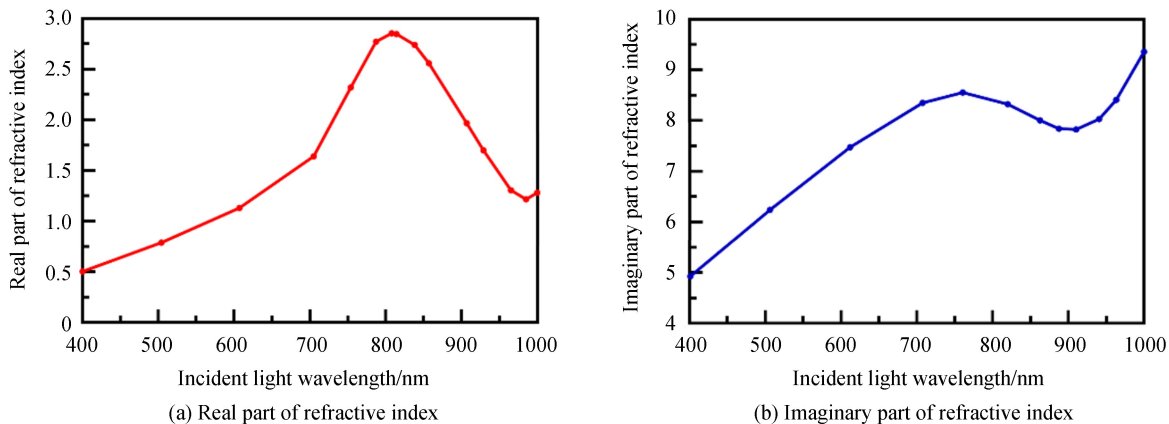


图 7 铝金属的折射率

Fig.7 Refractive index of Al

根据 RCWA 理论可知 λ 对 SRPG 的影响为<sup>[25]</sup>

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{24}$$

$$k_{xi} = k_0 [n_1 \sin \theta + j(\lambda/P)] \tag{25}$$

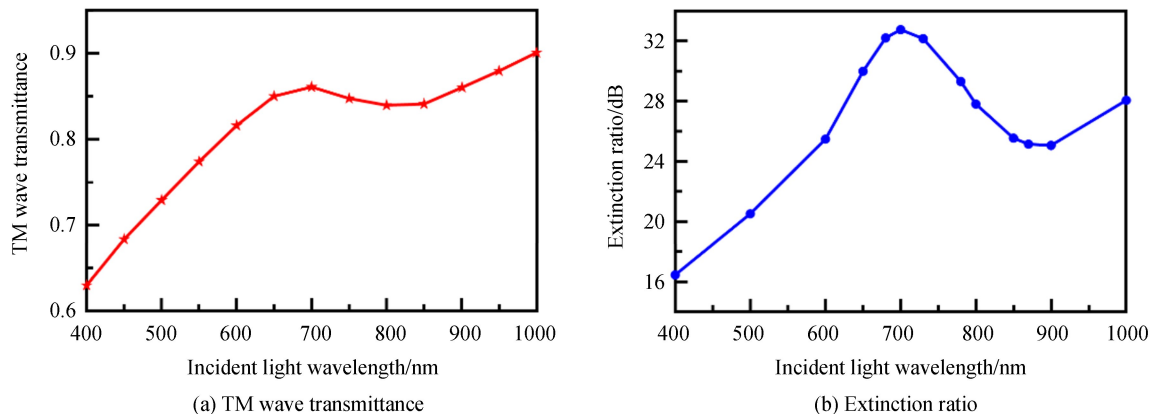


图 8 光栅偏振特性与入射光波长的关系

Fig.8 Relationship between grating polarization characteristics and incident light wavelength

式中,  $k_0$  表示真空中的入射光光矢;  $k_{xi}$  是第  $i$  级衍射波波矢的  $x$  分量. 结合式 (21),  $\lambda$  的改变影响  $k_{xi}$  和  $k_0$ , 再代入式 (16) 和式 (18), 得到  $\lambda$  与 SRPG 偏振特性的关系. 取  $P=200\text{ nm}$ ,  $f=0.5$ ,  $h=150\text{ nm}$ , 当  $\lambda$  在  $400\text{ nm}$  到  $1000\text{ nm}$  范围内变化时, 仿真得到 SRPG 的偏振特性如图 8 所示.  $\lambda > 600\text{ nm}$  时, TM 波透过率大于 0.80, 消光比大于 26 dB.

## 4 SRPG 的制备与性能测试

### 4.1 SRPG 的制备

通常光栅的制备流程分为母版制作与图形转移, 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的图像转移到玻璃基底上. 这一方式的优点是利于批量生产并降低制作成本.

本文设计的 SRPG 仅用于研究, 没有考虑制作成本与批量生产的问题, 因此委托丹麦国家微纳米技术研究中心用电子束直写方法制成. SRPG 的加工误差为  $\pm 5\text{ nm}$ , 光栅均匀性良好. SRPG 的实物如图 9 所示, 长度  $l=12\text{ mm}$ , 高  $d=1.5\text{ mm}$ , 光栅周期为  $200\text{ nm}$ , 占空比为 0.5, 光栅脊高为  $150\text{ nm}$ , 12 000 个铝金属栅条单元平行排列, 每个单元宽  $1\text{ }\mu\text{m}$ 、栅条方向依次变  $30^\circ$ .

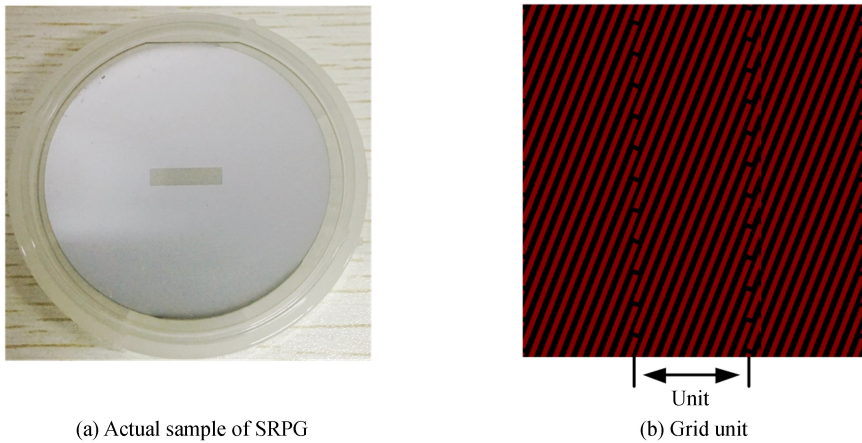


图 9 SRPG 实物及金属格栅图样  
Fig.9 Actual sample and metal grating unit of SRPG

### 4.2 SRPG 的性能测试

SRPG 的 TM 波透过率和消光比实验系统如图 10 所示, 包括激光源、起偏器、半波片、光阑、SRPG 和光电探测器. 其中激光源的型号是 SPL-HN8.0R, 波长为  $632.8\text{ nm}$ , 光阑用来调整光斑尺寸, 光电探测器的型号为 PM100A, 精度为纳瓦级. 通过旋转半波片调整入射光的偏振方向, 检测出射光功率的最大值和最小值, 其中最大值对应 TM 波的偏振透射光强. 为了验证 SRPG 的一致性, 分别测试了光栅四个不同位置的输出光强, 并多次测量取平均值, 结果如表 1 所示. 可见光栅的 TM 透过率为  $0.80\sim 0.85$ , 消光比为  $28\sim 30\text{ dB}$ , 与仿真结果一致.

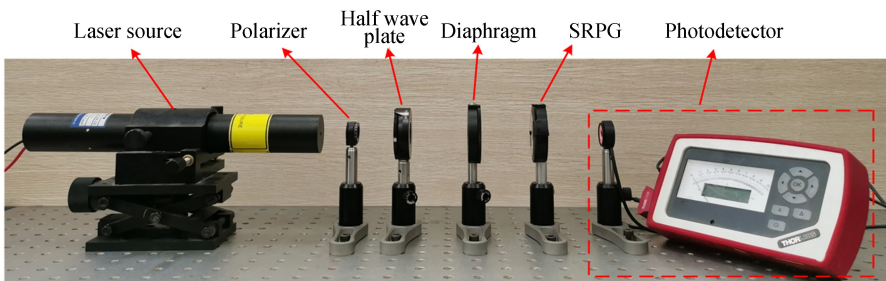


图 10 SRPG 的 TM 透过率和消光比实验装置图  
Fig.10 TM transmittance and extinction ratio experimental device diagram of SRPG



表 1 光栅偏振特性测试结果

**Table 1 Grating polarization performance test results**

Test point	TM wave transmittance	Extinction ratio/dB
1	0.85	30.4
2	0.80	28.3
3	0.81	28.9
4	0.82	29.2

SRPG 的径向偏振性能实验系统如图 11 所示,包括激光源、起偏器、半波片、扩束镜、SRPG 和 CCD 图像传感器,其中 CCD 传感器的型号为 MV-1300UM,分辨率为  $1\ 280 \times 1\ 024$ ,调整半波片的快轴方向与起偏器的透光轴方向平行,经扩束镜放大和 SRPG 检偏后,由 CCD 采集光斑图像如图 12 所示。

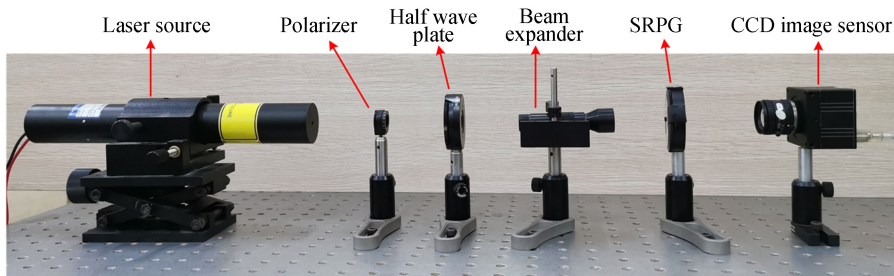


图 11 SRPG 的径向偏振性能实验装置图

Fig.11 Radial polarization performance experimental device diagram of SRPG

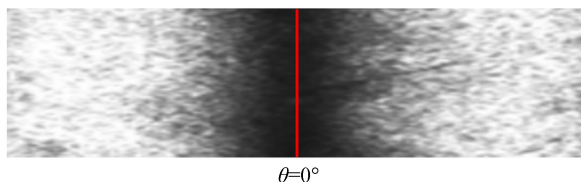


图 12 SRPG 检偏后的出射光强分布图

Fig.12 Outburst light intensity distribution after SRPG detection

设光斑暗条纹初始位置为 0,则旋光角与暗纹位移量之间满足

$$\Delta x = 21.6 \frac{\alpha}{\pi} (\text{mm}) \tag{26}$$

调节半波片的快轴方向,顺时针为“+”,逆时针为“-”,使线偏振光偏振面分别旋转  $+\pi/4$ 、 $+\pi/6$ 、 $+\pi/8$ 、 $-\pi/8$ 、 $-\pi/6$  和  $-\pi/4$ ,经 CCD 传感器检测光斑的位移量如表 2 所示,在  $\pm 45^\circ$  范围内线对偏振光旋转角的测量误差小于 1%。

表 2 SRPG 径向偏振性能测试

**Table 2 SRPG radial polarization performance test**

Rotation angle	Theoretical displacement/mm	Measured displacement/mm	Deviation/%
$+\pi/4$	5.40	5.41	0.19
$+\pi/6$	3.60	3.63	0.83
$+\pi/8$	2.70	2.71	0.37
$-\pi/8$	2.70	2.72	0.74
$-\pi/6$	3.60	3.58	-0.56
$-\pi/4$	5.40	5.45	0.93

## 5 SRPG 与 RPG 的对比

虽然 RPG(环形径向偏振光栅)和 SRPG(条形径向偏振光栅)都是亚波长铝金属光栅,但在结构、设计成本与应用效果方面有很大的区别:

1)结构对比:RPG 的栅条宽度固定,导致光栅外径大于内径,光栅外径的占空比小于内径的占空比,使

光栅内径的消光比大于外径的消光比, 偏振解调的一致性差. SRPG 的占空比固定, 偏振解调的一致性好.

2) 设计成本: RPG 的图形设计简单、易于实现, 基于 AutoCAD 平台, 20~30 min 便可以完成. SRPG 有 12 000 个图形、每个图形的线条方向相差 30°, 图形设计必须手工完成. SRPG 的设计工作历时两年, 累计投入工时 20 000 多个, 绘制了 6 000 个像素图形(0~50°), 使用了 HPZ4G4 图形工作站.

3) 应用价值: RPG 需要借助图像转换器将光斑的旋转转换为平移, 以利用线阵图像传感器对光斑定位. 其测量分辨率受图像转换器光纤数量的限制. SRPG 直接将旋光角的旋转转换为光斑的水平移动, 简单易行.

## 6 结 论

提出并设计了一种条形亚波长铝金属径向偏振光栅(SRPG), 其金属栅条由 12 000 个单元水平排列组成, 每个单元宽 1  $\mu\text{m}$ , 中心单元的格栅方向为 0°, 左右相邻单元的格栅分别按逆时针和顺时针方向依次旋转 30°, 最终实现  $\pm 50^\circ$ . 运用琼斯矩阵建立了光栅的理论模型, 并基于严格耦合波理论分析了光栅的偏振特性与光栅脊厚、周期、占空比、入射光波长之间的关系. 分析结果表明, 光栅的最优结构为脊高 150 nm, 周期 200 nm, 占空比 0.5, 在 400~1 000 nm 波长范围内 TM 波透过率大于 80%, 消光比大于 26 dB. 基于 SRPG 可以将法拉第磁致旋光角的旋转直接转化为条形光斑的同步平移, 解决了电力光学传感器旋光角的非线性测量、光功率依赖性、旋转光斑平移转换等问题. 此外, 基于 SRPG 还可以构成无可动器件的旋光测量仪.

## 参 考 文 献

- [1] BUNGAY A, SVIRKO Y, ZHELUDEV N. Equivalency of the Casimir and the Landau-Lifshitz approaches to continuous-media electrodynamics and optical activity on reflection[J]. *Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics*, 1993, **47**(18): 11730-11735.
- [2] FIRDOUS S, FUZAIL M, ATIF M, *et al.* Polarimetric characterization of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) for bone substitute biomaterials[J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2011, **122**(2): 99-104.
- [3] LIU Jin-jing, LIU Dao-ya, DONG Jian-feng, *et al.* Study on precise measurement of the optical activity of plane chiral structure[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2014, **25**(9): 1732-1735.  
刘锦景, 刘道亚, 董建峰, 等. 平面手征结构的旋光度精密测量[J]. *光子学报*, 2014, **25**(9): 1732-1735.
- [4] LI Ke-wu, WANG Zhi-bin, CHEN You-hua, *et al.* High sensitive measurement of optical rotation based on photo-elastic modulation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(18): 184206.  
李克武, 王志斌, 陈友华, 等. 基于弹光调制的高灵敏旋光测量[J]. *物理学报*, 2015, **64**(18): 184206.
- [5] MUKHERJEE P, HAGEN N, OTANI Y. Glucose sensing in the presence of scattering by analyzing a partial Mueller matrix[J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2019, **180**: 775-781.
- [6] BILAL H, GERARD L. Real-time, closed-loop dual-wavelength optical polarimetry for glucose monitoring[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2010, **15**(1): 017002.
- [7] YU Zhen-fang, QIU Qi, ZHANG Tian-hang, *et al.* Dual-modulation multi-wavelength polarimetry for monitoring glucose concentration in anterior chamber of eye phantoms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(11): 218-224.  
余振芳, 邱琪, 张天航, 等. 双调制多波长旋光法检测人工前房内葡萄糖的浓度[J]. *光学学报*, 2016, **36**(11): 218-224.
- [8] RIBEIRO L, ROHWEDDE J, PASQUINI C. A new approach to polarimetric measurements based on birefringent crystals and diode lasers[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2013, **771**: 1-6.
- [9] XIAO Zhi-hong. Study and comment of the optical transformers in power system[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, **42**(12): 148-154.  
肖智宏. 电力系统中光学互感器的研究与评述[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, **42**(12): 148-154.
- [10] KUCUKSARI K. Complete model development for an optical current transformer[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012, **27**(4): 1755-1762.
- [11] KUMADA A, HIDAKA K. Directly high-voltage measuring system based on pockels effect[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2013, **28**(3): 1306-1313.
- [12] ZHANG Wen-jing, ZHANG Zhi-wei, SUN Yun-qiang, *et al.* Polarization display and measurement experiment of elliptically polarized beam[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(5): 50-56.  
张文静, 张志伟, 孙运强, 等. 偏振显示及椭圆偏振光测量实验[J]. *光子学报*, 2017, **46**(5): 50-56.
- [13] TAN Qiao, XU Qi-feng, XIE Nan, *et al.* An optical current sensor based on radial grating-polarizer detection[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, **16**(15): 5927-5933.
- [14] TAN Qiao, XU Qi-feng, XIE Nan, *et al.* A new optical voltage sensor based on radial polarization detection[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2016, **66**(1): 1-7.

- [15] WU Hua, PENG Li, YUAN Shou-cai, *et al.* Design of wavefront controller based on subwavelength high-contrast grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(10): 1023005.  
武华, 彭莉, 袁寿财, 等. 基于亚波长高对比度光栅的波前调控器设计[J]. 光子学报, 2017, **46**(10): 1023005.
- [16] ZHAO Hua-jun, YANG Shou-liang, ZHANG Dong, *et al.* Design of polarizing beam splitters based on subwavelength metal grating [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(9): 6236-6234.  
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): 6236-6234.
- [17] GUO Chu-cai, YE Wei-min, YUAN Xiao-dong, *et al.* Research on sub-wavelength grating polarization 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.
- [18] ZHOU Guo-zun, TIAN Wei-jian. Generation of cylindrical vector beams by using subwavelength grating polarizer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, **48**(3): 177-185.  
周国尊, 田维坚. 使用亚波长光栅器件产生圆柱型矢量光束[J]. 红外与激光工程, 2019, **48**(3): 177-185.
- [19] LIU Quan, WU Jian-hong, GUO Pei-liang, *et al.* Fabrication of convex blazed grating with high diffraction efficiency [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, **46**(3): 312-316.  
刘全, 吴建宏, 郭培亮, 等. 高衍射效率凸面闪耀光栅的研制[J]. 中国激光, 2019, **46**(3): 312-316.
- [20] MOHARAM M, GRANN E, POMMET D. 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.
- [21] JING Xu-feng, JIN Yun-xia. Transmittance analysis of diffraction phase grating[J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(9): C11-C18.
- [22] KANG Guo-guo, TAN Qiao-feng, CHEN Wei-li, *et al.* Design and fabrication of sub-wavelength metal wire-grid and its application to experimental study of polarimetric imaging[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **1**: 337-343.  
康果果, 谭峭峰, 陈伟力, 等. 亚波长金属线栅的设计、制备及偏振成像实验研究[J]. 物理学报, 2011, **1**: 337-343.
- [23] WANG Zhi-wen. Research of integrated polarization navigation sensor based on nanowire gratings[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.  
王志文. 基于金属纳米光栅的集成偏振导航传感器研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [24] ZHANG Xi. Research on subwavelength gratings and its applications[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.  
张曦. 亚波长光栅及其应用的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [25] ZHOU Yun. Design and fabricate the color filter and the polarizer based on the subwavelength grating[D]. Suzhou: Suzhou University, 2013.  
周云. 亚波长光栅偏振和滤光器件设计与制备[D]. 苏州: 苏州大学, 2013.
- [26] RAKIC D. Algorithm for the determination of intrinsic optical constants of metal films- application to aluminum[J]. *Applied Optics*, 1995, **34**(22): 4755-4767.
- [27] LI Chao, LIN Han, XU Qi-feng. New design of OCT with faraday rotation angle linear measurement[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, **30**(24): 46-54.  
李超, 林韩, 徐启峰. 线性测量法拉第旋转角的新型 OCT 设计[J]. 电工技术学报, 2015, **30**(24): 46-54.
- [28] BOYDEN S, ZHANG Yu-wen. Temperature and wavelength-dependent spectral absorptivities of metallic materials in the infrared[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2006, **20**(1): 9-15.
- [29] XU Can-hua, XU Qi-feng, MA Jing, *et al.* Research on the polarization and temperature characteristics of subwavelength aluminum gratings[J]. *Journal of Optics*, 2014, **16**(10): 105711.