

# 基于光强轮廓结构的偏振无关高衍射效率 二维光栅(特邀)

姜岩秀<sup>1</sup>, 王瑞鹏<sup>1,2</sup>, 孙雨琦<sup>1</sup>, 王新宇<sup>1</sup>, 李文昊<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

<sup>2</sup>中国科学院大学大珩学院, 北京 100049

**摘要** 针对目前二维光栅设计结构单一、与实际结构不匹配的问题,提出一种金属-介质二维光栅。该光栅不仅具有优异的偏振无关性和高衍射效率,而且其结构更符合实际制备的形貌。基于双光束正交曝光单周期干涉场强度分布,构建基于光强轮廓的二维光栅设计结构,采用傅里叶模态法和粒子群算法对光栅进行优化设计。结果表明,最优参数下,设计的二维光栅在波长为 780 nm 处以 Littrow 角入射时,横电、横磁偏振光的衍射效率均大于 95%,并且具有优异的偏振无关性和较大的制备容差。此外,对比同结构参数下传统圆台、棱台结构的二维光栅衍射效率,结果表明光栅结构的微小变化对二维光栅衍射效率的影响较大,基于光强轮廓的设计结构可有效提高光栅设计与实际的匹配度。研究工作可为位移测量领域高精度二维光栅的研制提供理论基础。

**关键词** 二维光栅; 偏振无关; 光栅设计; 位移测量

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP241609

## Polarization-Independent Two-Dimensional Grating with High Diffraction Efficiency Based on Light Intensity Profile Structure (Invited)

Jiang Yanxiu<sup>1</sup>, Wang Ruipeng<sup>1,2</sup>, Sun Yuqi<sup>1</sup>, Wang Xinyu<sup>1</sup>, Li Wenhao<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;

<sup>2</sup>Daheng College, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** To solve the problem wherein the structure of a two-dimensional (2D) grating is single and does not match the actual structure, a 2D metal-medium grating is proposed that has excellent polarization independence and high diffraction efficiency and wherein the grating structure is more consistent with the actual topography. Based on the intensity distribution of a two-beam orthogonal exposure single-period interference field, a 2D grating structure based on a light intensity profile is constructed, and the grating is optimized using a Fourier mode method and particle swarm optimization algorithm. Results show that, under optimal parameters, the transverse electric and transverse magnetic polarized light diffraction efficiencies are greater than 95% when the designed 2D grating is incident at the Littrow angle at a 780-nm wavelength, and it exhibits excellent polarization independence and large preparation tolerance. In addition, a comparison of the diffraction efficiencies of traditional round and prism gratings with the same structural parameters reveal that a small change in the grating structure significantly affects the diffraction efficiency of the 2D grating. Finally, the designed structure based on a light intensity profile can effectively improve the matching degree between the design and actual grating. This research provides a theoretical basis for the development of high precision 2D grating in the displacement measurement field.

**Key words** two-dimensional grating; polarization independent; grating design; displacement measurement

收稿日期: 2024-07-01; 修回日期: 2024-08-20; 录用日期: 2024-08-27; 网络首发日期: 2024-09-03

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFF0715802)、国家自然科学基金青年科学基金(12105288)、中国科学院青年创新促进会(2022218)、吉林省自然科学基金(20210101139JC)、国家自然科学基金联合项目(U21A20509)

通信作者: \*liwh@ciomp.ac.cn

# 1 引言

精密位移测量技术在现代工业中发挥着重要作用,广泛应用于半导体工业、精密制造、光刻技术、计量仪器等诸多领域<sup>[1-5]</sup>,决定着现代工业制造的水平。精密位移测量技术主要包括激光干涉测量法和光栅干涉测量法。激光干涉测量法以激光波长为测量基准<sup>[6-7]</sup>,测量精度高,具有非接触、高动态、测量结果可直接溯源等优点。但激光干涉测量法对空气折射率较敏感,测量精度容易受环境中湿度、温度、气压变化的影响。光栅干涉测量法基于高线密度光栅<sup>[8]</sup>,根据衍射干涉测量原理,以光栅常数为测量基准,测量精度受环境影响小,几乎不受激光行程增大的影响,在复杂工况下可获得极高的精度,具有大量程和高分辨率的特点。近年来,基于二维光栅的干涉测量系统因其强大的优势被广泛研究<sup>[9]</sup>。由于二维光栅在两个方向上都具有周期性,其与一维光栅相比能在多个维度上进行高精度的位移测量,且能消除阿贝误差,提高测量精度。二维光栅是二维位移测量系统的核心元器件,其光栅性能直接影响测量系统的性能指标。

目前,研究人员针对二维光栅的设计与制备进行了一些研究。Chen 等<sup>[10]</sup>提出一种偏振无关二维金属-介质光栅,设计结构为侧壁倾角为  $85^\circ$  的圆台,使用正交全息曝光和离子束刻蚀制备光栅,波长为  $780\text{ nm}$  的光以 Littrow 角度入射时横电(TM)和横磁(TE)偏振光的  $(-1,0)$  级衍射效率为  $74.8\%$  和  $68.2\%$ 。Mao 等<sup>[11]</sup>研制一种用于平面编码器的镀 Al 交叉光栅,设计结构为四方棱台,采用正交全息曝光和离子束刻蚀制备光栅,在波长为  $650\text{ nm}$  处 4 个 1 级衍射阶的衍射效率为  $\sim 14\%$ 。Zhou 等<sup>[12]</sup>研制一种四分束的镀 Ag 二维光栅,设计结构为侧壁倾角为  $70^\circ$  的圆台,采用正交全息曝光和电子束蒸发镀膜制备光栅,在波长为  $1550\text{ nm}$  处 4 个 1 级衍射阶的衍射效率均达到  $22\%$  以上。后续该研究团队使用相同的结构及制备方法研制一款二维偏振分束光栅<sup>[13]</sup>,并使用圆台结构设计一款金属-介质二维光栅<sup>[14]</sup>。Xie 等<sup>[15]</sup>提出一种镀 Au 二维光栅,设计结构为侧壁倾角为  $70^\circ$  的圆台,使用正交扫描干涉曝光和离子束刻蚀制备光栅,4 个 1 级衍射效率大于  $21.8\%$ ,总衍射效率大于  $88.8\%$ 。Zhang 等<sup>[16]</sup>采用正交全息曝光和扫描反应离子束刻蚀制备  $85\text{ mm} \times 85\text{ mm}$  的大尺寸镀 Al 二维光栅,其线密度为  $1200\text{ line/mm}$ ,设计结构为侧壁倾角为  $70^\circ$  的圆台,在波长为  $780\text{ nm}$  处 TE 和 TM 偏振光以 Littrow 入射的平均衍射效率分别为  $58.0\%$  和  $57.2\%$ 。Lin 等<sup>[17]</sup>研制一款用于外差光栅干涉仪的镀 Au 交叉光栅,在正入射条件下,波长为  $632.8\text{ nm}$  处 TE 和 TM 的等效效率可达  $18.32\%$ 。Huang 等<sup>[18-19]</sup>、Kang 等<sup>[20]</sup>和 Li 等<sup>[21]</sup>采用圆柱或圆孔结构设计一系列二维光栅,但并未对其进行制作。综上所述,双光束正交曝光是制备二维光栅

的主流曝光方法,但目前光栅设计结构全部为圆台或者棱台,这样的设计结构可能与实际结构不匹配,无法准确指导光栅制备。因此,针对双光束正交曝光方式制备二维光栅的设计模型还需改进。

针对双光束干涉曝光制备二维光栅时设计结构与实际结构不匹配的问题,提出一种基于曝光光强轮廓结构的金属-介质二维光栅,波长为  $780\text{ nm}$  的光以 Littrow 角度入射时,光栅具有优异的偏振无关性和宽带高衍射效率。首先基于双光束正交曝光单周期干涉场强度分布构建光栅设计模型,定义占宽比为光栅底部图案中心宽度与周期的比值,将占宽比与光栅底部形状关联,能较准确地描述不同占宽比下二维光栅的形貌特征。然后采用傅里叶模态法(FMM)和粒子群(PSO)算法对光栅结构进行优化设计,优化结果表明光栅在具有优异性能的同时具有较大的制备容差。最后将设计结构与传统的圆台和棱台设计结构进行衍射效率的对比,说明二维光栅结构的微小变化对衍射效率有较大影响,提出的结构可有效提高光栅设计与实际结构的匹配度,且可扩大光栅的制备工艺容差。

## 2 光栅设计模型

使用双光束干涉曝光制备二维光栅时,需要对光刻胶涂敷的基片进行正交的两次曝光,因此光刻胶内部记录的光强图案为双光束干涉的光强分布在两个垂直方向上的叠加。光刻胶内部记录二维周期性强弱分布的光强后,经过显影及刻蚀工艺得到最终的二维光栅槽形。使用双光束干涉制备的二维光栅的掩模槽形<sup>[22]</sup>如图 1 所示,其中  $b$  为光栅结构的线宽,可以看出随着线宽的减小,二维光栅的掩模在不同显影程度下具有不同的形貌:当占宽比较大时,光栅的实际图形接近菱形;当占宽比逐渐缩小时,菱形的四角逐渐变得圆滑,光栅实际图形由菱形向圆形过渡。利用刻蚀工艺将图案进行转移后,刻蚀槽形也基本保持掩模的轮廓规律。因此,对于双光束干涉曝光制备二维光栅,须构建一种设计模型,使不同的占宽比具有不同的光栅图案特征,以提升设计结构与实际结构的匹配度。

二维光栅显影后底部轮廓图形与光刻胶记录的干涉场光强有关。图 2(a)为使用双光束干涉在正交两次曝光后单个周期光刻胶内部记录的光强分布。将菱形内部光强进行归一化,随着光强等值线的数值由小到大,等值线轮廓从圆形逐渐过渡到菱形,这与双光束干涉曝光制备的二维光栅掩模的演化规律基本一致。因此,提出基于光强等值线轮廓图形作为光栅的基本设计结构,以提升设计结构与实际结构的匹配度。定义光强的等值线表示的数值大小为光栅的底部形状因子  $\delta$ ,如图 2(b)所示,随着  $\delta$  逐渐增大,光栅底部的图案从圆形逐渐变为菱形,不同的占宽比具有不同的光栅形貌。

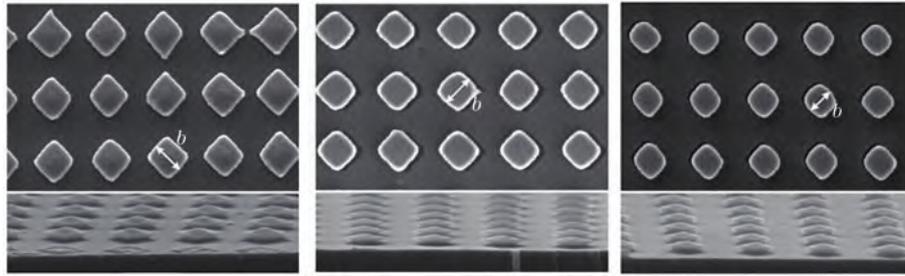


图 1 双光束正交曝光制备二维光栅掩模时光栅底部图案从菱形到圆形的演变

Fig. 1 Evolution of grating bottom pattern from diamond to circle in the fabrication of a two-dimensional grating mask by two-beam orthogonal exposure

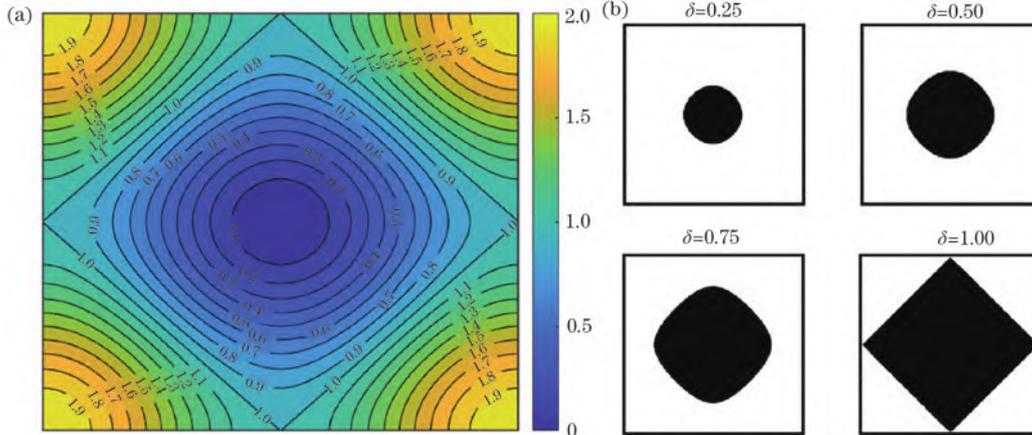


图 2 二维光栅显影后底部轮廓图形与干涉场光强的关系。(a) 双光束正交曝光单个周期内的光强分布；(b) 不同形状因子的二维光栅底部轮廓

Fig. 2 Relationship between bottom contour pattern and light intensity of interference field after two-dimensional grating development. (a) Distribution of light intensities in a single period of two-beam orthogonal exposure; (b) bottom contours of two-dimensional grating with different form factors

提出的光栅结构为金属-介质二维光栅, 波长为 780 nm 的光以 Littrow 角度入射,  $(-1, 0)$  级衍射光以 Littrow 角度出射, 如图 3(a) 所示。为使光栅能量利用率最高, 需抑制 1 级以外的高阶衍射, 由光栅方程可知, 光栅周期  $\Lambda$  应该被控制在  $\lambda \sim \sqrt{2} \lambda$ 。设计的二维光栅线密度为 1200 line/mm, 波长为 780 nm 的光入射时只有  $(-1, 0)$  级衍射光和  $(0, 0)$  级反射光。基于双光束正交曝光单周期干涉场强度分布, 二维光栅的三维设计形貌如图 3(b) 所示, 其俯视图如图 3(c) 所示。二维光栅底部形状因子  $\delta$  与实际占宽比  $f$  之间有一定偏差, 在光栅设计前需考虑  $\delta$  与  $f$  的换算。图 3(d) 为设计的光栅截面示意图, 显示了光栅各层的材料组成。无机玻璃在很宽的温度范围内具有极低的热膨胀系数, 是作为衬底的最佳选择。Au 的化学性质稳定, 不易被氧化, 且其在近红外区域具有很高的宽带反射率, 因此采用 Au 作为反射金属层。光栅层材料为五氧化二钽 ( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ), 经刻蚀后形成侧壁倾角为  $\theta$ 、深度为  $d$  的光栅结构, 在设计时保留刻蚀残余层, 整体厚度为  $h_1$ 。在光栅层和 Au 薄膜之间插入一层由熔融二氧化硅 ( $\text{SiO}_2$ ) 制成的匹配层, 厚度为  $h_2$ 。Au、 $\text{SiO}_2$  和  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜在工

作波长为 780 nm 时的折射率分别为  $0.12913 + 4.8693i$ 、1.4537 和 2.0978。

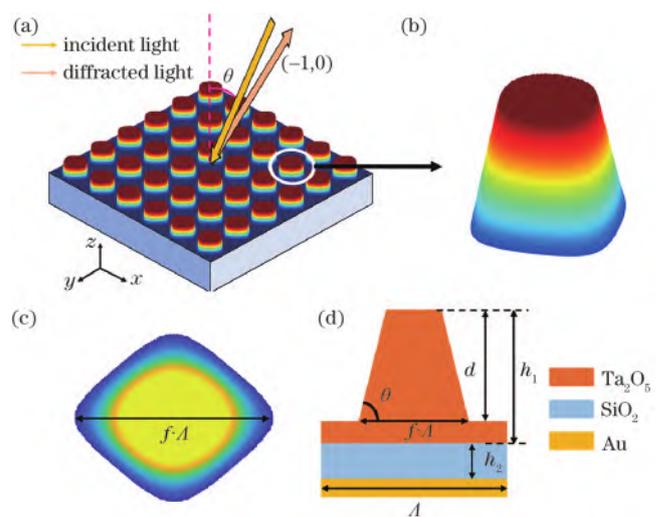


图 3 二维光栅示意图。(a) 光栅使用条件；(b) 光栅三维形貌；(c) 光栅俯视图；(d) 光栅截面图

Fig. 3 Schematic diagram of two-dimensional grating. (a) Grating use condition; (b) three-dimensional morphology of grating; (c) top view of grating; (d) cross-section of grating

### 3 优化结果与分析

金属-介质二维光栅的几何参数对衍射效率有着极大的影响,因此需要对光栅结构进行多参数优化设计。此光栅需要优化的结构参数有底部形状因子  $\delta$ 、 $\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜厚度  $h_1$ 、刻蚀深度  $d$ 、 $\text{SiO}_2$  薄膜厚度  $h_2$ ,底部 Au 膜作为高反射基底不参与优化过程。侧壁倾角  $\theta$  根据刻蚀经验设置为  $80^\circ$ ,这个角度较符合离子束刻蚀后槽形的侧壁倾角,后续将对工艺容差进行评估。

有限元法(FEM)或时域有限差分法(FDTD)都可用于二维光栅的衍射效率计算,但两者均需进行三维网格划分,计算需要花费大量的时间,当计算精度提升时,计算时间和所需内存急速增加。另外,商用软件限制了自由结构光栅多参数寻优的自由度。

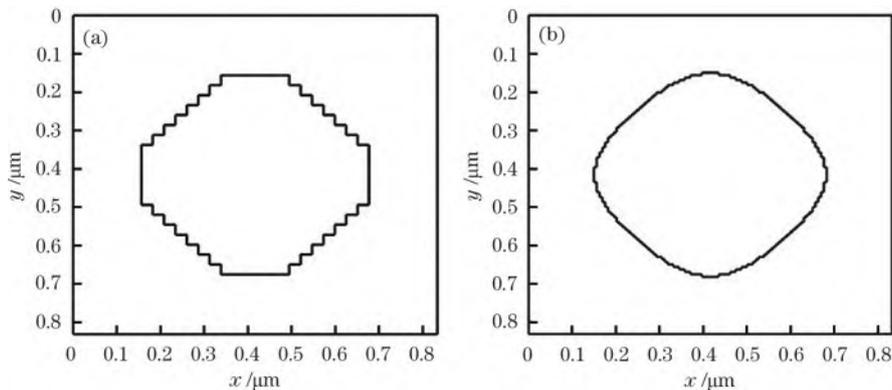


图4 FMM中不同的图形采样精度。(a)采样点数目为32;(b)采样点数目为128

Fig. 4 Different graphic sampling accuracies in FMM. (a) Number of sampling point is 32; (b) number of sampling point is 128

为使光栅在 780 nm 波长处具有最高的 TE 和 TM 偏振衍射效率,采用 PSO 算法<sup>[28]</sup>对  $\delta$ 、 $h_1$ 、 $h_2$  和  $d$  进行优化。PSO 算法从随机解出发,用适应度函数来评价解的品质,通过迭代找到最优解。PSO 算法与遗传算法、模拟退火算法等都属于启发式智能算法,可进行多参量最优化。相比于其他最优化方法,PSO 的优点在于实现容易、精度高、收敛快。评价函数定义为

$$F = (1 - \eta_{(-1,0),\text{TE}})^2 + (1 - \eta_{(-1,0),\text{TM}})^2, \quad (1)$$

式中:  $\eta_{(-1,0),\text{TE}}$  和  $\eta_{(-1,0),\text{TM}}$  分别为 TE 和 TM 偏振的 Littrow  $(-1,0)$  级衍射效率。

经优化设计得到最佳光栅结构参数。当  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  厚度为 430.14 nm、刻蚀深度为 261.92 nm、 $\text{SiO}_2$  厚度为 89.61 nm、底部形状因子为 0.707 时,TE 偏振衍射效率为 95.8%,TM 偏振衍射效率为 95.6%,此时光栅具有优异的偏振无关性能,其衍射效率相比前期报道制备出的二维光栅的衍射效率具有巨大的提升。并且在此参数下,TE 和 TM 偏振的  $(0,0)$  级反射效率不足 0.1%,避免了 0 级反射光对测量系统产生的干扰。

为进一步评估此光栅的性能,对光栅的波长和入

FMM 是一种严谨、快速、适用于求解亚波长二维周期结构中麦克斯韦方程组的数值模拟方法。根据 Li<sup>[23]</sup> 已发表的研究成果,将 FMM 在 Matlab 中进行实现,并使用并行计算加快计算速度。在研究所提计算中引入法向矢量法<sup>[24-25]</sup> 及自适应分辨率(ASR)技术<sup>[26-27]</sup>,用于加快二维光栅的收敛速度和提高计算精度。在计算过程中,FMM 首先将三维结构在竖直方向上进行水平分层,将每一层二维光栅图形的介电函数离散化,然后进行介电函数的傅里叶展开,最后通过联立边界条件求解特征值方程得到最终衍射效率。如图 4(a) 所示,建模过程中过少的采样点数目会使光栅图案与实际结构产生偏离,因此如图 4(b) 所示,在计算中将采样点数目提高到 128,在竖直方向上分层数为 15 即可满足计算需求,且具有合适的计算速度和精度。

射角带宽进行分析。在优化得到的最佳光栅结构参数下,在 Littrow 角入射时 TE、TM 衍射效率随波长的变化趋势如图 5(a) 所示,可以看出,TE 偏振和 TM 偏振在波长范围为 775~790 nm 时均具有大于 80% 的衍射效率,足以应对测量系统产生的波长漂移。图 5(b) 为入射角对衍射效率的影响,可以看出入射角范围为  $25^\circ \sim 30^\circ$  时,TE 和 TM 偏振的衍射效率均大于 80%, $26^\circ \sim 30^\circ$  范围内均大于 90%,提高了系统安装的误差容限。但当波长为 791.5 nm 时,TE 偏振光产生异常衍射,衍射效率仅有 24%,大于此波长时,衍射效率提升至 80%,表明光栅在此波长处触发了等离子体共振<sup>[29-31]</sup>。对于此现象,为解释其衍射机理,在工作波长为 780 nm 和共振波长为 791.5 nm 下,对光栅的近场进行计算与分析。

以 TE 偏振为例,通过电场分析解释其衍射特性。图 6(a) 为光栅电场计算的三维示意图,分别在光栅入射面  $x-z$  和与其垂直的  $y-z$  平面进行计算。在工作波长为 780 nm 处,光栅具有极高的  $(-1,0)$  级反射衍射效率,从图 6(b) 可以看出在入射光所在的  $x-z$  平面内,光栅具有明显的向入射方向后方的  $(-1,0)$  级衍

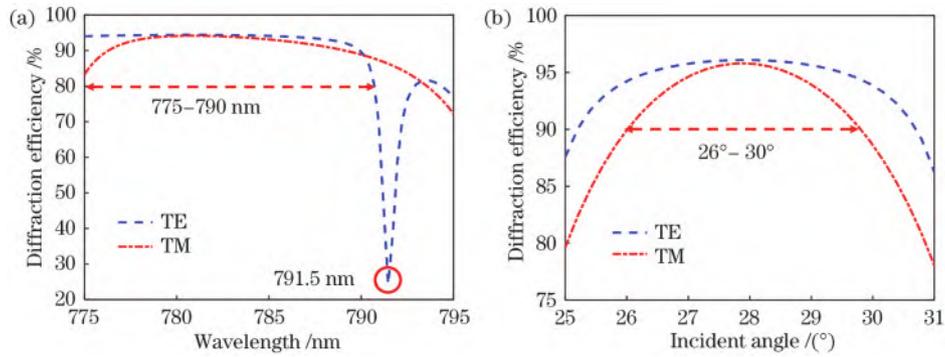


图 5 光栅衍射效率随波长和入射角的变化。(a)波长;(b)入射角

Fig. 5 Variation in diffraction efficiency of grating with wavelength and incident angle. (a) Wavelength; (b) incident angle

射,光场具有驻波的特性,导致电场在传播方向上的强弱分布。如图 6(c)所示,在垂直于光栅入射面的  $y-z$  平面,光栅的电场强弱在  $z$  方向平行分布,为图 6(b)在垂直方向上的截面,与  $x-z$  平面的分布符合。而在共振波长为 791.5 nm 处,如图 6(d)所示,由于  $(-1,0)$  级

能量骤减,在入射平面内几乎不存在  $(-1,0)$  级向后的衍射,强电场几乎全部集中在金属和介质表面以及光栅脊内部,产生表面等离子体效应,光栅吸收大部分能量。在此波长下,0 级反射衍射效率只有 22%,表面等离子体共振的触发导致损失  $\sim 54\%$  的能量。

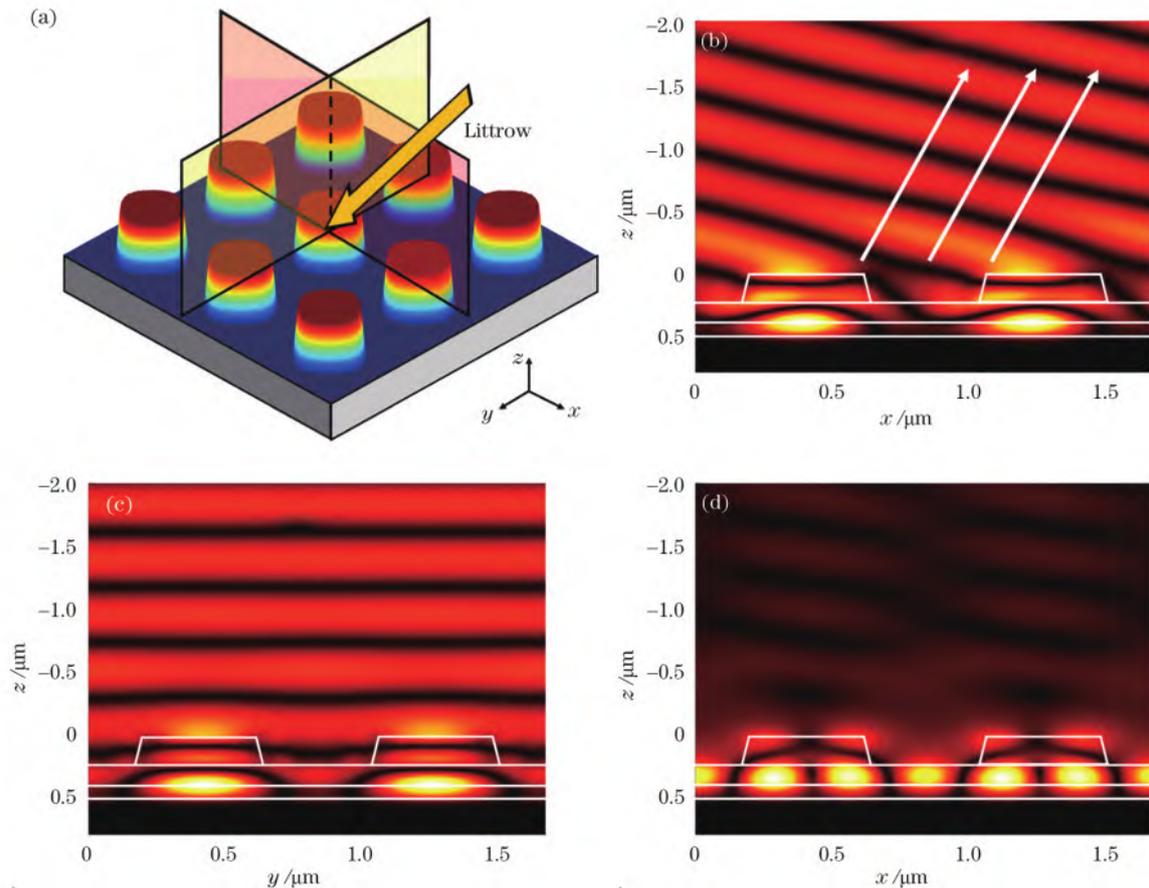


图 6 光栅的电场分布。(a)三维示意图;(b)780 nm 处  $x-z$  平面电场分布;(c)780 nm 处  $y-z$  平面电场分布;(d)791.5 nm 处  $x-z$  平面电场分布

Fig. 6 Electric field distribution of grating. (a) Schematic diagram of three-dimensional; (b) electric field distribution in  $x-z$  plane at 780 nm; (c) electric field distribution in  $y-z$  plane at 780 nm; (d) electric field distribution in  $x-z$  plane at 791.5 nm

#### 4 工艺容差分析

如前文所述,金属-介质二维光栅的制作往往使用全

息曝光及反应离子束刻蚀工艺,占宽比和刻蚀深度是光栅制作时需要首要关心的参数,需根据实际工艺对这些参数进行实时调整。图 7 为在最优结构参数时扫描刻蚀

深度  $d$  以及光栅占宽比  $f$  对衍射效率的影响, 设置的形状因子范围为 0.60~0.80 时, 光栅对应的实际占宽比应为 0.56~0.71。图中实线为衍射效率大于 90% 的区间。可以看出 TE 偏振和 TM 偏振在衍射效率大于 90% 时

有足够大的工艺容差区间, 占宽比的容差达到 0.13, 刻蚀深度的容差达到 35 nm, 较大的占宽比和刻蚀深度容差意味着在制作过程中针对不同的占宽比参数可对刻蚀深度实时调整, 以达到高衍射效率的工艺区间。

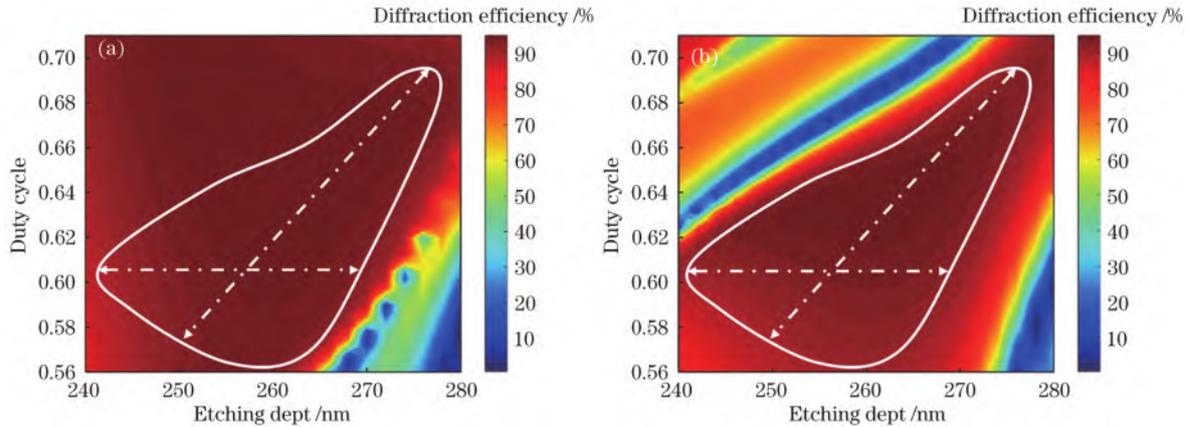


图 7 刻蚀深度和占宽比容差。(a) TE 偏振; (b) TM 偏振

Fig. 7 Tolerances of etching depth and duty cycle. (a) TE polarization; (b) TM polarization

光栅制作过程中除了需要控制占宽比和刻蚀深度, 制作前  $Ta_2O_5$  和  $SiO_2$  的镀膜厚度也会对最终的高衍射效率区间产生影响, 因此在制作前需要对两层介质的镀膜厚度做容差评估。图 8 为在最佳结构参数下, 两层镀膜厚度的变化对 TE、TM 偏振态 (-1, 0) 级衍射效率的影响。可以看出, 两层介质的镀膜厚

度都具有较大的容差。在  $SiO_2$  膜厚范围为 70~110 nm、 $Ta_2O_5$  膜厚范围为 418~440 nm 时, TE 和 TM 衍射效率均大于 90%。而 TE 和 TM 衍射效率大于 95% 时,  $Ta_2O_5$  镀膜厚度容差为 ~10 nm,  $SiO_2$  镀膜厚度容差为 ~30 nm, 这为光栅制备提供了较大的工艺容差。

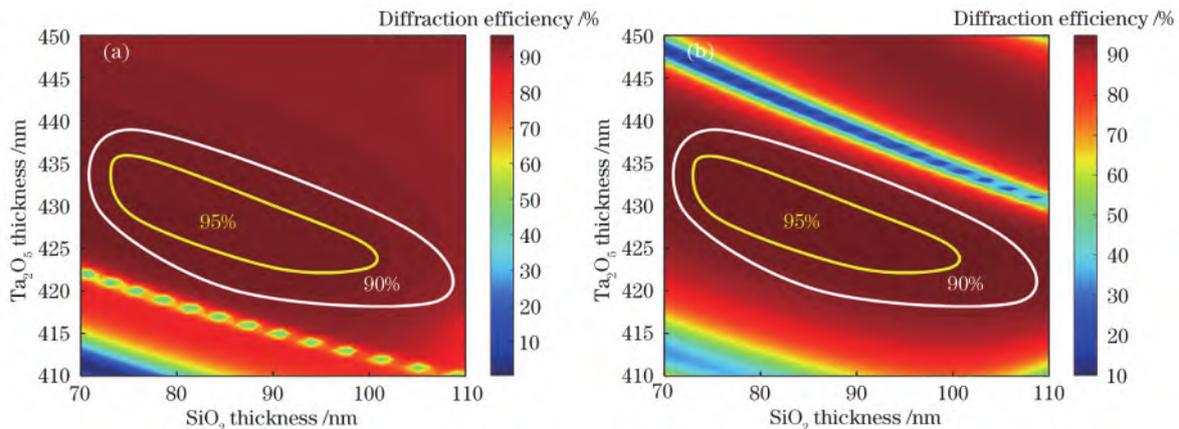


图 8  $Ta_2O_5$  和  $SiO_2$  镀膜厚度容差。(a) TE 偏振; (b) TM 偏振

Fig. 8 Tolerances of thickness for  $Ta_2O_5$  and  $SiO_2$  coatings. (a) TE polarization; (b) TM polarization

在光栅制作过程中, 光刻胶显影的非线性会影响光刻胶掩膜侧壁倾角的均匀性, 导致刻蚀后侧壁倾角与设计值存在误差, 影响最终衍射效率, 因此需要对光栅的占宽比和侧壁倾角进行工艺容差评估。图 9 为 TE、TM 偏振下占宽比  $f$  和侧壁倾角  $\theta$  的工艺容差, 可以看出在 TE 偏振时具有相当大的形状因子和侧壁倾角容差, 衍射效率大于 95% 时, 侧壁倾角范围为  $77^\circ \sim 83^\circ$ , 占宽比范围为 0.58~0.66。对于 TM 偏振, 衍射效率大于 95% 的区间相比于 TE 偏振有所缩小, 但仍存在占宽比容差为 0.08、侧壁倾角容差为  $6^\circ$  的平行四

边形容差区间, 这足够制备时对实际形貌进行调控。针对 90% 以上的衍射效率, 光栅具有更大的占宽比和侧壁倾角容差。因此在制作过程中, 当刻蚀深度参数稳定时, 光栅侧壁倾角的变化在  $10^\circ$  以内对衍射效率的影响不大, 具有较大占宽比和侧壁倾角工艺容差的光栅有利于实际制作。

为验证传统设计结构与实际结构之间的差异对衍射效率的影响, 将基于光强轮廓结构的二维光栅与相同材料、镀膜厚度参数下的传统设计结构进行衍射效率对比。图 10 为传统的圆台设计结构与棱台设计结

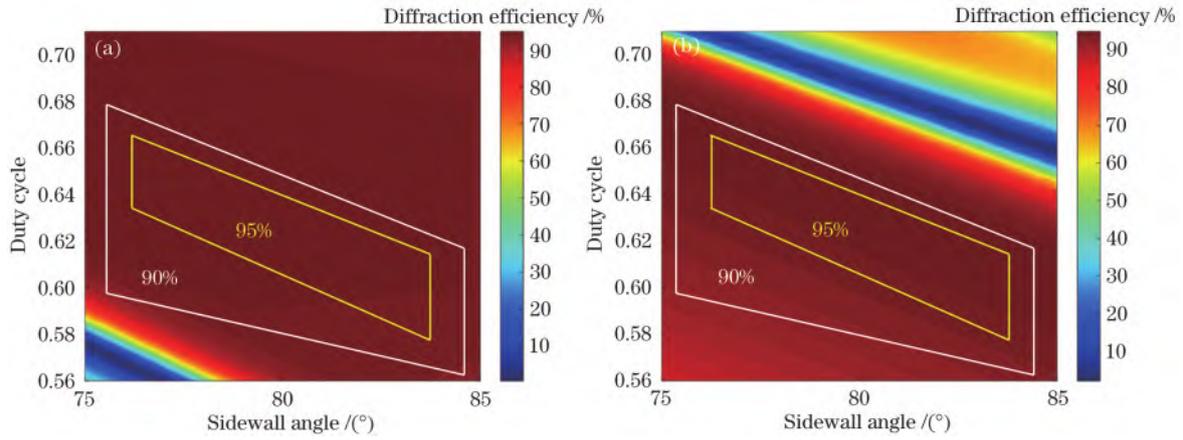


图 9 占宽比和侧壁倾角的容差。(a) TE 偏振; (b) TM 偏振  
Fig. 9 Tolerances of duty cycle and sidewall angle. (a) TE polarization; (b) TM polarization

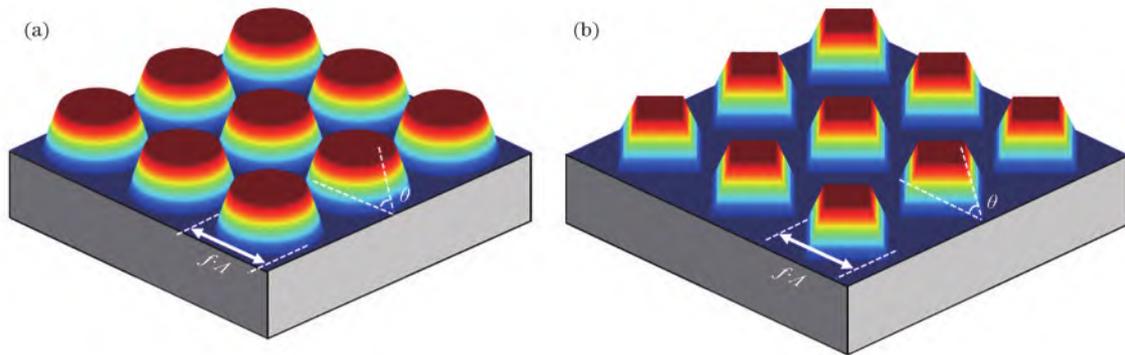


图 10 传统设计结构。(a)圆台; (b)棱台  
Fig. 10 Traditional design structure. (a) Round table; (b) prism table

构的三维模型示意图,若以圆台或者棱台结构对光栅进行设计寻优,当占宽比过小或过大时,光栅设计结构会与实际结构产生偏差。占宽比越大光栅形貌越接近菱形,占宽比越小光栅形貌越接近圆形,因此只使用圆台或只使用棱台无法准确描述整个占宽比范围内光栅的实际形貌。

在同样占宽比和槽深下,对圆台和棱台结构进行

工艺容差分析,评估其占宽比和槽深对衍射效率的影响程度。光强轮廓结构的形状因子范围为 0.60~0.80 时,对应圆台或棱台的实际占宽比为 0.56~0.71,更换结构后需重新设置占宽比扫描范围。对于圆台结果,光强轮廓结构形状因子为 0.71 时圆台实际占宽比为 0.63,此时圆形形貌占主导地位,TE 偏振的衍射效率为 95.9%,TM 偏振的衍射效率

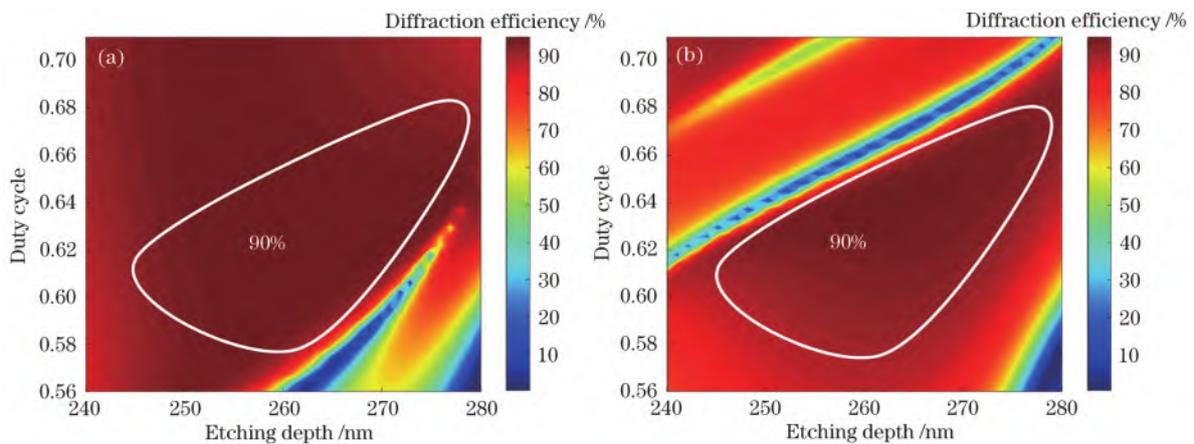


图 11 圆台结构的刻蚀深度和占宽比的容差。(a) TE 偏振; (b) TM 偏振  
Fig. 11 Tolerances of etching depth and duty cycle for round table structure. (a) TE polarization; (b) TM polarization

95.1%。如图 11 所示,虽然在最佳结构参数处衍射效率仍大于 95%,但对比图 7 可看出, TM 偏振的高衍射效率区间变小,主要表现为低衍射效率的共振区域向右下角移动,导致占宽比区间减小。当占宽比变得更大的时候(大于 0.80),实际图案将趋于菱形,圆形的设计模型将与实际结构偏差更大。对于棱台结果,如图 12 所示,在使用最佳参数时, TE 衍射效率降到 52.1%, TM 衍射效率降到 80.5%,衍射效率的波动十分明显。TE 偏振的高衍射效率区间向左上角移动,大部分区域的衍射效率低于 70%, TM 偏振的高

衍射效率区间向上移动,衍射效率出现显著降低,大部分区域低于 70%。这主要是因为占宽比偏小的区间,光栅形貌特征主要为圆形,棱台与实际结构差异较大,导致衍射效率急剧下降。可以看出,在占宽比和槽深参数一定时,不同占宽比时只使用圆台或棱台与实际结构的衍射效率会产生较大差异,从而影响实际光栅制备,在光栅设计时,需要考虑设计结构与实际结构的匹配度。提出的光栅设计模型相比传统圆台以及棱台结构更准确,高衍射效率工艺容差区间也有所扩大。

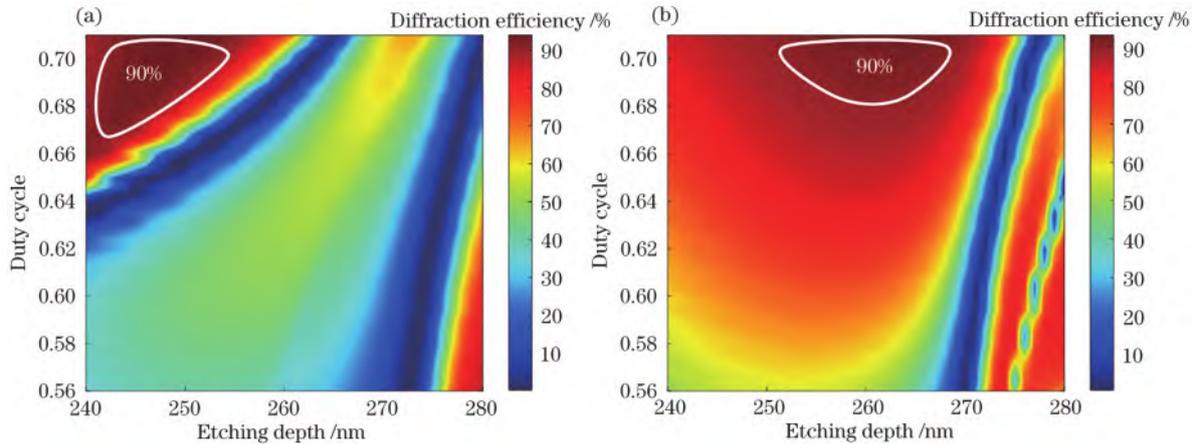


图 12 棱台结构的刻蚀深度和占宽比的容差。(a) TE 偏振;(b) TM 偏振

Fig. 12 Tolerances of etching depth and duty cycle for prism table structure. (a) TE polarization; (b) TM polarization

## 5 结 论

基于双光束干涉曝光单周期光强分布,提出一种基于光强轮廓结构的偏振无关高衍射效率金属-介质二维光栅。光栅设计结构通过关联不同占宽比的光栅形貌,从而提高设计结构与实际结构的匹配度。采用 FMM 和 PSO 对光栅结构进行优化设计,结果表明光栅具有优异的偏振无关性,以及较宽的波长、角度带宽。此外,将设计结构与同参数下传统的圆台结构和棱台结构的衍射效率进行对比,结果表明光栅设计结构的微小变化对衍射效率的影响很大,基于光强轮廓的二维光栅设计结构可扩大光栅制备容差,使二维光栅的设计更准确。提出的二维光栅具有制造的可行性,在高精度位移测量中作为光栅尺具有很大的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] 朱俊豪,汪盛通,李星辉. 面向光刻机晶圆台的超精密光栅定位技术[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922019.  
Zhu J H, Wang S T, Li X H. Ultraprecision grating positioning technology for wafer stage of lithography machine[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922019.
- [2] Yin Y F, Liu Z W, Jiang S, et al. High-precision 2D

grating displacement measurement system based on double-spatial heterodyne optical path interleaving [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 158: 107167.

- [3] Zhou W Y, Li W H, Liu L, et al. Bidirectional two-degree-of-freedom grating interferometer with biased Littrow configuration[J]. Optics Communications, 2024, 557: 130333.
- [4] Zhou W Y, Liu Z W, Sun Y J, et al. Bidirectional Littrow double grating interferometry for quadruple optical interpolation[J]. Optics & Laser Technology, 2024, 175: 110751.
- [5] 刘林,刘兆武,于宏柱,等. 大量程高性能光栅位移测量技术[J]. 计测技术, 2023, 43(1): 81-90.  
Liu L, Liu Z W, Yu H Z, et al. Large range and high performance grating displacement measurement technology [J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(1): 81-90.
- [6] Lou Y T, Yan L P, Chen B Y, et al. Laser homodyne straightness interferometer with simultaneous measurement of six degrees of freedom motion errors for precision linear stage metrology[J]. Optics Express, 2017, 25(6): 6805-6821.
- [7] Zhang E Z, Chen B Y, Zheng H, et al. Laser heterodyne interferometer with rotational error compensation for precision displacement measurement[J]. Optics Express, 2018, 26(1): 90-98.
- [8] Yu H Y, Chen X L, Liu C J, et al. A survey on the

- grating based optical position encoder[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 143: 107352.
- [9] 刘红忠, 史永胜, 尹磊, 等. 平面反射式二维光栅测量系统研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(3): 0312018.
- Liu H Z, Shi Y S, Yin L, et al. Research on reflective two-dimensional grating measurement system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(3): 0312018.
- [10] Chen J M, Zhang Y B, Wang Y L, et al. Polarization-independent two-dimensional diffraction metal-dielectric grating[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(4): 041905.
- [11] Mao X Y, Zeng L J. Design and fabrication of crossed gratings with multiple zero-reference marks for planar encoders[J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(2): 025204.
- [12] Zhou B, Jia W, Xiang C C, et al. Polarization-independent  $2 \times 2$  high diffraction efficiency beam splitter based on two-dimensional grating[J]. *Optics Express*, 2021, 29(20): 32042-32050.
- [13] Zhou B, Jia W, Xiang C C, et al. Two-dimensional polarization beam splitter based on cylindrical nano grating [J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 163: 109332.
- [14] Zhou B, Jia W, Sun P, et al. Polarization-independent high diffraction efficiency two-dimensional grating based on cylindrical hole nano arrays[J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 28810-28818.
- [15] Xie Y F, Jia W, Xiang C C, et al. High-efficiency polarization-independent gold-coated crossed grating under normal incidence[J]. *Optics Communications*, 2021, 483: 126669.
- [16] Zhang W, Li W H, Zhang T, et al. A large-size and polarization-independent two dimensional grating fabricated by scanned reactive-ion-beam etching[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(21): 4649-4657.
- [17] Lin C B, Yan S H, Du Z G, et al. High-efficiency gold-coated cross-grating for heterodyne grating interferometer with improved signal contrast and optical subdivision[J]. *Optics Communications*, 2015, 339: 86-93.
- [18] Huang Z S, Wang B. Nano-cylindrical hole metamaterials for high-efficiency ultra-bandwidth two-dimensional diffraction [J]. *Optical Materials*, 2022, 125: 112065.
- [19] Huang Z S, Wang B. Polarization-insensitive high-efficiency two-dimensional metal-dielectric grating by nanodisks arrays [J]. *Physica Scripta*, 2021, 96(12): 125518.
- [20] Kang S H, Zhou B, Xie Y F, et al. Polarization beam splitter based on 2D transmissive grating[J]. *Optics Express*, 2024, 32(12): 20589-20599.
- [21] Li X X, Wang J, Jia W, et al. Polarization-independent two-dimensional dielectric grating for  $3 \times 3$  beam splitter [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 177: 108158.
- [22] Wang S W, Zeng L J. Controlling the duty cycle of holographic crossed gratings by in situ endpoint detection during development[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(10): 2657-2663.
- [23] Li L F. New formulation of the Fourier modal method for crossed surface-relief gratings[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, 14(10): 2758-2767.
- [24] Deng H, Chen S Q. Convergence improvement of the Fourier modal slice absorption method for crossed gratings[J]. *Optik*, 2015, 126(24): 5310-5315.
- [25] Schuster T, Ruoff J, Kerwien N, et al. Normal vector method for convergence improvement using the RCWA for crossed gratings[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2007, 24(9): 2880-2890.
- [26] Nekuee S A H, Faghihifar E. A regularized adaptive spatial resolution technique for fast and accurate analysis of metal-dielectric crossed gratings[J]. *Journal of Computational Electronics*, 2019, 18(2): 689-695.
- [27] Wang L, Fang D B, Jin H B, et al. 2D rigorous coupled wave analysis with adaptive spatial resolution for a multilayer periodic structure[J]. *Optics Express*, 2022, 30(12): 21295-21308.
- [28] Zhu C L, Jiao Q B, Tan X, et al. Design of a subwavelength all-metal grating for generating azimuthally polarized beams based on modified particle swarm optimization[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(15): 4052-4058.
- [29] Tian X Y, Qiu X J, Cao Z Z, et al. UV-visible broadband polarization-independent metamaterial absorber based on two-dimensional Au grating[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 157: 108729.
- [30] Biswas V, Vijaya R. Large-period plasmonic grating with sinusoidal profile for monitoring water quality with high sensitivity[J]. *Photonics and Nanostructures -Fundamentals and Applications*, 2024, 58: 101199.
- [31] Al Mahmud R, Sagor R H, Khan M Z M. Surface plasmon refractive index biosensors: a review of optical fiber, multilayer 2D material and gratings, and MIM configurations[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 159: 108939.