

文章编号 1004-924X(2024)21-3147-10

一维亚波长红外偏振光栅全息光刻加工

陆天石¹, 邓富元¹, 李星辉^{1,2*}

(1. 清华大学 深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055;

2. 清华-伯克利深圳学院, 广东 深圳 518055)

摘要:亚波长光栅作为一种体积小,易于集成,消光比高的偏振选择器件,在遥感探测、材料应力探测和抗散射成像等领域有着丰富的应用前景。本文设计了高消光比,高透过率的一维亚波长光栅偏振选择器件,并实现其高效的加工方式。首先,基于等效介质理论和有限时域差分对光栅进行设计和仿真,设计了一种对全息干涉加工友好的双层金属结构的一维亚波长光栅偏振器件,具有占空比稳定及易于图形转移的优势。之后搭建了全息激光光刻系统,完成 800 nm 周期的 30 mm×30 mm 一维光栅的加工,较于传统方法,在加工效率、成本和周期可调节性上具有较大优势。通过刻蚀硅基底和镀金属膜实现了光刻胶图形向金属光栅的转移。制成的光栅对 3~15 μm 的红外光有着超过 45% 的平均透过率和 30 dB 的最大消光比。

关键词:全息光刻;双层金属光栅;亚波长光栅;偏振选择

中图分类号:TH74;TN305.7 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20243221.3147

Holographic lithography of one-dimensional subwavelength infrared polarization gratings

LU Tianshi¹, DENG Fuyuan¹, LI Xinghui^{1,2*}

(1. Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China;

2. Tsinghua-Berkeley Shenzhen Institute, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China)

* Corresponding author, E-mail: li.xinghui@sz.tsinghua.edu.cn

Abstract: Subwavelength gratings, as compact, easily integrable polarization-selective devices with high extinction ratios, hold significant potential for applications in remote sensing, material stress detection, anti-scattering imaging, and related fields, garnering widespread attention. In this study, we design a one-dimensional subwavelength grating polarization-selective device with high extinction ratios and high transmittance, along with an efficient fabrication method. Utilizing the effective medium theory and finite-difference time-domain simulations, we developed and modeled a one-dimensional subwavelength grating device featuring a double-layer metal structure optimized for holographic interference processing. This design offers robust duty cycle tolerance and facilitates the direct transfer of photoresist patterns. A holographic laser lithography system was constructed to fabricate one-dimensional gratings with dimensions of 30 mm×30 mm and a period of 800 nm. Compared to conventional techniques, this approach demonstrates significant advantages in processing efficiency, cost-effectiveness, and tunable periodicity. The transfer of photo-

收稿日期:2024-06-13;修订日期:2024-07-19.

基金项目:广东省基础与应用基础研究基金资助项目(No. 2021B1515120007)

resist patterns to metal gratings was achieved via silicon substrate etching and metal film deposition. The resulting gratings exhibit an average transmittance exceeding 45% and a maximum extinction ratio of 30 dB for infrared wavelengths in the range of 3-15 μm .

Key words: hololithography; double-layer metal grating; subwavelength grating; polarization selection

1 引言

亚波长光栅是指光栅周期小于入射光波长的光栅结构。不同于传统光栅的衍射现象,亚波长光栅的高阶衍射光均表现为倏逝波,而只有零级衍射光可以传播至远场^[1]。亚波长光栅属于典型的各向异性光学二维器件,对不同偏振方向的入射光表现出强烈的选择性^[2]。相较于传统的偏振器件,亚波长金属光栅具有出色的偏振性能和高稳定性^[3]。2002年,Bomzon等通过理论计算设计特定的亚波长介质光栅结构,使用制备得到的镀铬掩模,利用光刻和电子回旋共振反应离子刻蚀将图案转移至砷化镓衬底上。测试结果显示在 10.6 mm 波长处产生了偏振纯度为 99.2% 的光束,实现对光束的偏振控制,验证了偏振光栅用于偏振态实时分析这一性质^[4]。2017年,白云峰等使用波长为 325 nm 的光源,采用激光干涉光刻的方法制作了光栅周期为 300 nm、槽深为 100 nm 的光栅。他们利用二氧化硅作为硬掩模,改善了光栅的图形质量^[5]。2019年,晁银银利用剥离工艺,在锗基底上制作了适用于 3~15 μm 波段的单/双层金属银偏振片,实测消光比达到 27.5 dB^[6]。2021年,杨江涛团队设计了针对可见光的双层铝光栅方案,采用纳米压印工艺实现了 48% 的透过率和最高 50 dB 的分辨率^[7]。

常用的光栅加工方法主要包括机械刻划、投影曝光光刻、纳米压印、电子束光刻、聚焦离子束光刻和激光干涉光刻等。其中,机械刻划采取直接物理刻划的方式制造光栅结构,具有刻线深度高等优点,更适合加工三角槽形和梯形槽形的光栅,一般较难加工较小周期的矩形光栅^[8-9]。投影曝光光刻是使用掩模版将预先设计的结构投影到光刻胶上从而形成光刻图案^[10],优点是精度高、自由度高,但高度依赖掩模版的制作,整体成本较高。纳米压印是利用机械压力将掩模版上的图案转移到压印胶上的方法^[11],该方法不受光

学衍射极限限制,分辨率高、自由度高,但掩膜成本高且寿命有限。电子束光刻、聚焦离子束光刻都属于逐点加工的工艺手段,拥有分辨率高、自由度高特点^[12],但是其加工耗时长,成本高,无法应用到大规模生产中。全息光刻技术是利用相位差恒定的两束相干平面波光束,在基板平面上形成明暗相交的干涉条纹,并诱发对该波段敏感的光刻胶中的光敏剂发生局域化学反应从而易于被显影液洗去,从而形成与干涉条纹周期相同的光刻胶条纹结构^[13-18]。相比于传统的机械刻划法,电子束曝光等加工方式,有着周期一致性高、效率高,周期可调节,可加工一维^[19-20]、二维光栅^[21-27],成本低^[28-30]等显著优势,在偏振成像^[31]、光栅测量^[32]等领域有较好的应用前景。

上述方法具有较好的图案化能力,但是基于其加工功能器件,还需要考虑转移等工艺,涉及相应的材料可加工性等,需要对结构进行优化设计和性能测试。因此,本文对光栅结构的设计,加工系统的搭建,光刻胶图形的转移等进行研究,研制出兼顾性能和可加工性的一维双层金属光栅结构。

2 亚波长光栅及加工

2.1 亚波长金属光栅偏振选择原理分析

亚波长光栅属于典型的各向异性光学二维器件,对于光栅周期远小于入射光波长的情况^[33],一般可用等效介质理论解释它对不同偏振方向的入射光的选择性^[34-35]。

一阶等效介质理论中,将亚波长光栅等效为复折射率各项异性的薄膜材料,由于光栅周期远小于入射光波长,只需考虑材料在各方向的平均电磁学性质。

为简化模型,只考虑垂直入射的情况,此时光线的偏振方向矢量处于光栅平面内,因此,可将入射光的偏振方向正交分解为垂直栅线和平

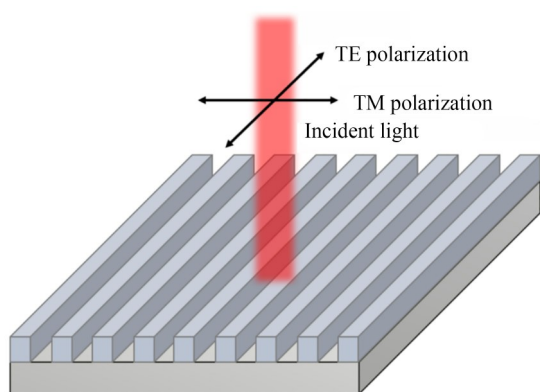


图 1 正入射光的两种偏振分量

Fig. 1 Two polarization components of normal incident light

行栅线方向的矢量和。规定偏振方向和栅线方向平行的为 TE 波,偏振方向和栅线方向垂直的为 TM 波,如图 1 所示。对于 TE 波,其电场方向的平均电通量密度 D_{TE} 为:

$$D_{TE} = [(1 - \eta)\epsilon_1 + \eta\epsilon_g] E_{TE}, \quad (1)$$

其中: η 是光栅的占空比, ϵ_1 , ϵ_g 分别是间隙和光栅材料的介电常数, E_{TE} 是入射光电场强度。其等效介电常数 ϵ_{TE} 为:

$$\epsilon_{TE} = \frac{D_{TE}}{E_{TE}} = (1 - \eta)\epsilon_1 + \eta\epsilon_g. \quad (2)$$

光栅的常见材料为非磁性材料,其折射率只受介电系数影响,关系为:

$$n_{TE} = \epsilon_{TE}^{\frac{1}{2}} = [(1 - \eta)n_1^2 + \eta n_g^2]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

其中 n_1 和 n_g 分别是间隙和光栅材料的折射率。

对于 TM 波,其电场方向的平均电通量密度 D_{TM} 为:

$$D_{TM} = [(1 - \eta)^{-1}\epsilon_1^{-1} + \eta^{-1}\epsilon_g^{-1}]^{-1} E_{TM}. \quad (4)$$

同理,其折射率为:

$$n_{TM} = \frac{n_1 n_g}{\sqrt{(1 - \eta)n_g^2 + \eta n_1^2}}. \quad (5)$$

若间隙为透明电介质材料,吸收系数为 0,即 n_1 为实数;若光栅材料为完美金属吸收材料,即 $\text{Im}(n_g) \rightarrow \infty$,在此极限下,可以得出:

$$n_{TM} = \frac{n_1}{\sqrt{1 - \eta}}, \quad (6)$$

$$n_{TE} = i \text{Im}(n_g) \sqrt{\eta}. \quad (7)$$

由此可见,亚波长光栅对于 TM 波表现为透明材料的性质,而对于 TE 波表现为吸收材料的

性质,因此展现出强偏振选择性。亚波长光栅的偏振选择性能来自于周期性交替排布的金属和介电材料(空气),而不同种类的介电材料交替排布则几乎没有偏振选择效果。所以,这里只关注金属和电介质材料构成的光栅结构,而忽略由不同电介质材料构成的光栅状几何结构。

2.2 全息光刻技术

为了确保相干光束之间的相位差恒定从而获得稳定的干涉条纹,本文使用洛埃镜在平面波末端对光束进行分束,以确保尽量短的非共光路光程。采用洛埃镜进行分光时,入射光偏振方向相对于入射平面的几何关系分为:偏振矢量垂直入射平面(TE 偏振)和偏振矢量平行入射平面(TM 偏振)。激光器发出的激光为水平偏振,采用 TE 偏振入射,按图 2 中方案一垂直布置洛埃镜;采用 TM 偏振入射,则按方案二竖直布置洛埃镜和前序反射镜系统(图 2 中反射镜 1,2)。

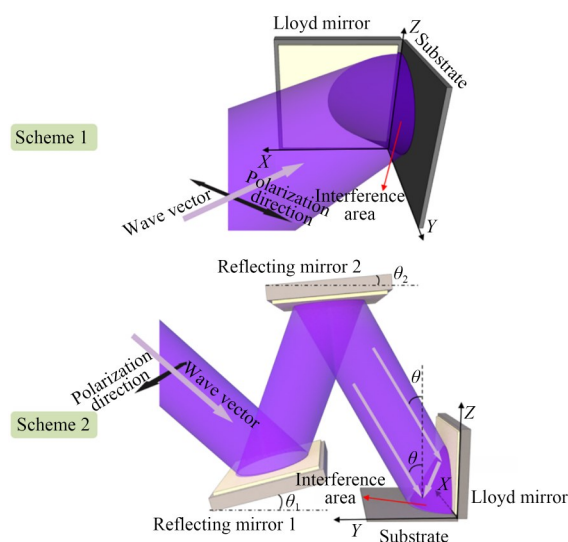


图 2 两种干涉光路结构比较

Fig. 2 Comparison of two types of interference optical paths

在全息干涉曝光中,干涉条纹的对比度对于光刻胶图形的质量起着决定性作用,因此,需要获得稳定的高对比度的干涉条纹,以确保加工质量。

对反射光的偏振态进行追迹分析,并使用标

量场理论对基底处干涉条纹的对比度进行仿真计算,得出两种方案下的干涉对比度和入射角度的关系如图 3 所示。

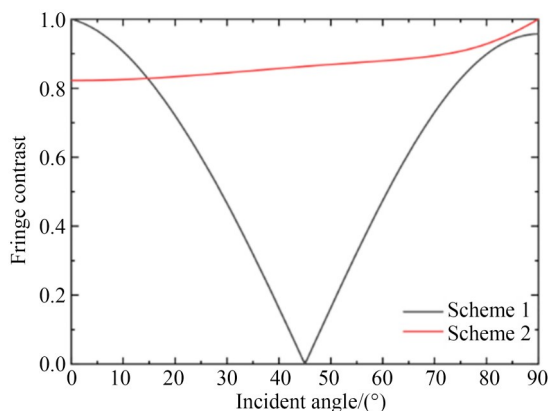


图 3 两种干涉光路的对比度

Fig. 3 Contrast of two interfering optical paths

由图 3 可见,采用方案二时,对比度受入射角度的影响较小,拥有较大的周期自由度,在加工不同周期的一维光栅时更具优势。同时,方案二中载物台和位移台可水平布置,减少了重力造成的基底形变、移动等潜在问题。因此,采用方案二的设计搭建光路系统。

3 仿真与实验

3.1 一维亚波长光栅偏振消光性能仿真

首先,对光栅结构参数对偏振选择性能的影响进行分析。由于等效折射率理论是一阶近似理论,其预测结果与实际情况存在相对较大的误差,本文从电磁学的基本原理出发,进行电磁场的有限时域差分法仿真(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)以实现麦克斯韦方程组的高效严格求解^[36]。针对最简单的单层矩形光栅在不同材料,厚度和占空比的光学性能进行仿真。还对两种常见的金属反射材料铝和银,以及两种半导体电介质材料硅和锗的不同组合构成的亚波长光栅对于不同入射波长的透过率和消光比进行了仿真,结果如图 4 所示。综合透过率和消光比两个参数,光栅材料选用铝和硅的组合。

接着,使用 FDTD 仿真进一步探究光栅周期以及金属层厚度和消光比的关系,这里选取 0.5

的占空比,结果如图 5 所示。然后,进一步探究金属占空比对消光比和透过率的影响,金属厚度固定为 100 nm,周期为 800 nm,入射光波长为

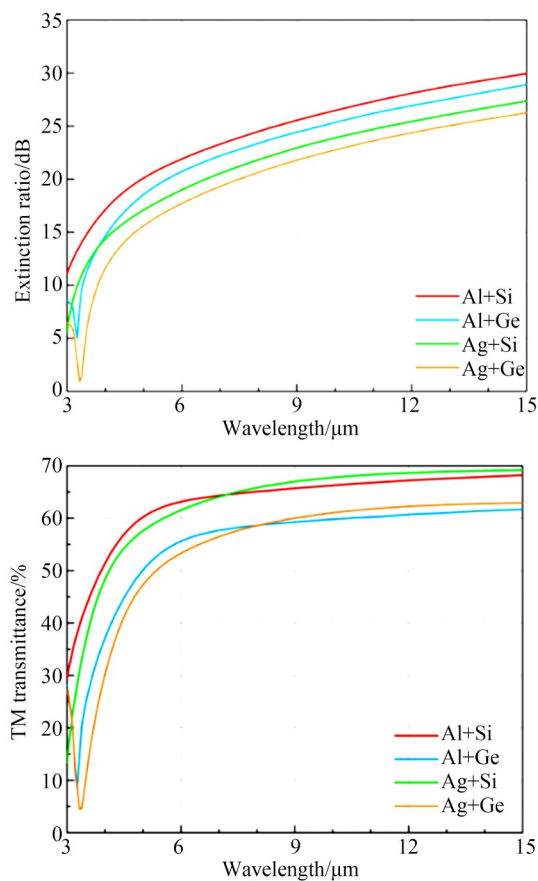


图 4 不同材料组合的对比

Fig. 4 Comparison of different material combinations

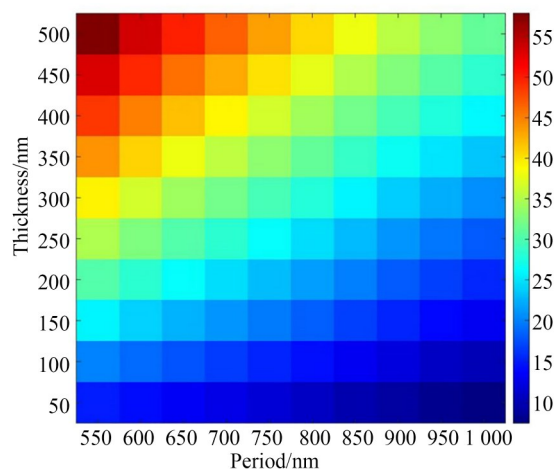


图 5 金属厚度和周期对消光比的影响

Fig. 5 Effect of period and metal thickness on extinction ratio

9 μm , 结果如图 7 所示。由此可见, 消光比和透过率随占空比的变化和等效介质理论中式(6)和式(7)得到的趋势相吻合。

在此基础上, 本文提出了双金属层的亚波长偏振选择光栅(后文简称双层金属光栅), 如图 6 所示, 其结构上下金属层的占空比为互补关系。根据式(6)和式(7)的理论分析, 在其他条件不变时, 消光比随金属材料的占空比单调递增, 而透过率则为单调递减, 且两者都随占空比变化显著。然而, 全息干涉加工光栅的占空比受到匀胶厚度、曝光时间、加工光功率、显影时间、显影液浓度、刻蚀功率与选择比等众多因素的影响, 在实验室条件下难以获得占空比稳定的金属光栅。与单层光栅不同, 上下层占空比互补的结构使得占空比变化时上下两层光栅结构的消光比、透过率的变化相互抵消, 双层金属光栅的光学性能更好, 占空比更稳定。为进一步验证, 对不同占空比的单双层金属光栅的消光比和透过率进行了 FDTD 仿真, 结果如图 7 所示, 两种光栅的周期都选为 800 nm, 金属层总厚度都为 100 nm, 入射光波长为 9 μm 。在占空比接近 0.5 时, 单双层光栅的透过率相当, 但双层金属光栅的消光比有显著优势, 且消光比、透过率随占空比的变化显著降低。

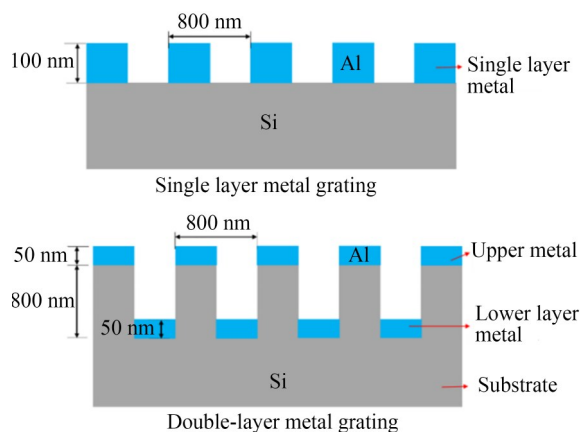


图 6 单双层金属光栅的结构

Fig. 6 Structure of double layer metal grating

这一结构在完成光刻胶图形的制备后, 以光刻胶为掩膜对硅基底进行刻蚀后镀一层金属膜即可完成。因为相对于金属层, 硅基底的刻蚀工艺更加成熟, 稳定性更高, 所以由光刻胶结构转

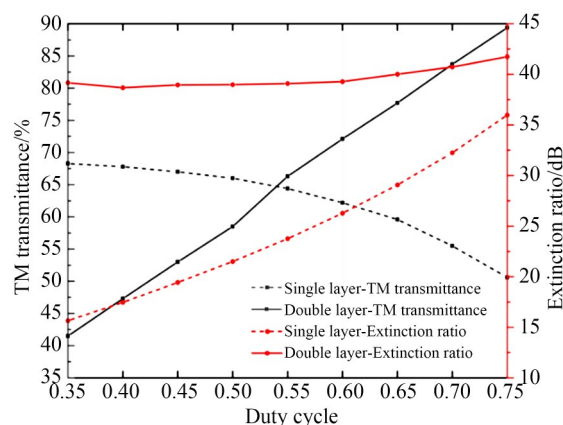


图 7 单双层光栅性能对比

Fig. 7 Comparison of performance of single and double layer gratings

移为硅结构的图形转移工艺更容易实现。

对这一结构进行仿真并与单层结构进行对比, 发现其在消光比表现中拥有明显的优势, 具体数据如图 7 所示。

3.2 干涉光刻加工流程

应用全息光刻制备光刻胶图案的流程主要包括基底准备, 匀胶, 前烘, 曝光, 显影, 后烘等步骤。具体步骤如下: (1) 基底准备: 在对 30 mm×30 mm 单晶硅基底涂胶之前, 依次使用丙酮、无水乙醇、去离子水对基底进行清洗, 并去除水分, 置于热板上 145 $^{\circ}\text{C}$ 烘烤 30 min, 待冷却至室温; (2) 匀胶: 采用正性光刻胶 S1805, 与溶剂 PGMEA 按照 1:1 的比例混合, 以降低光刻胶黏性。然后以 1 000 r/min 预涂 3 s, 6 000 r/min 的参数旋涂 30 s 获得约 150 nm 厚度的光刻胶膜; (3) 前烘: 对涂完胶的基片在 105 $^{\circ}\text{C}$ 下烘烤 5 min, 以去除光刻胶中的溶剂, 消除膜层中的内应力; (4) 曝光: 在黄光环境下, 将制备好的基片转移至加工系统中进行曝光; (5) 显影: 利用显影液 ZX-238 对基片进行浸泡显影 18 s, 再置于去离子水中清洗, 氮气吹干; (6) 坚膜: 将显影完的基片在 115 $^{\circ}\text{C}$ 下烘烤 5 min, 使得光刻胶更加牢固地粘附在基片表面, 增强抗刻蚀性。

3.3 实验系统搭建与曝光

使用 441.6 nm, 功率为 180 mW 的氦-镉准分子激光器搭建全息光刻加工系统, 如图 8 所示。激光经过 40 倍显微物镜聚焦后, 在焦点处通过直

径为 15 μm 的小孔实现空间滤波,经光阑和准直透镜后转化为直径 10 cm 的圆柱形平面波。经测量,其经洛埃镜反射后的干涉场平均亮度约为 1.6 mW/cm^2 。多次实验后发现,40 s 曝光得到的光刻胶光栅形貌的对比度最佳。

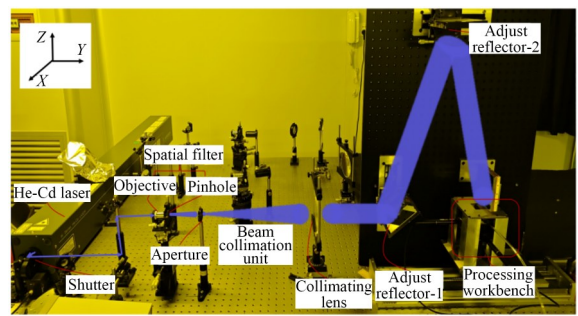


图 8 全息光刻系统

Fig. 8 Hololithography system

显影后得到的一维光刻胶光栅,其显微图像如图 9 所示。

3.4 光刻胶图形的转移

在获得光刻胶条纹结构后,还需通过图形转移的手段将光刻胶图案转化为硅基底和其表面金属的微结构,以实现亚波长光栅的光学功能,具体流程如图 10 所示。

首先,以光刻胶作为掩膜对硅基底进行刻蚀。这里选用电感耦合等离子体刻蚀,其优势是可以独立控制反应离子的密度和能量,从而具有刻蚀速率高、各向异性高的优点,以获得较为陡

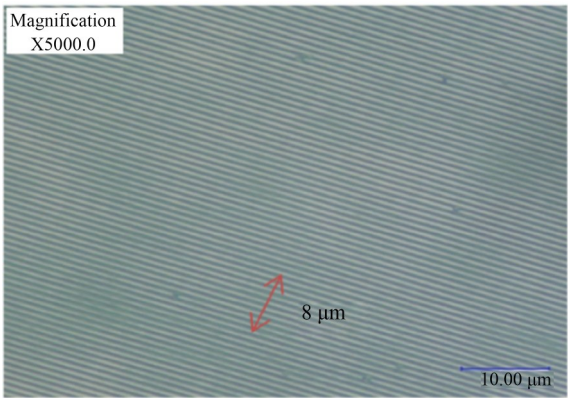


图 9 一维光刻胶光栅显微图

Fig. 9 Micrograph of one-dimensional photoresist grating

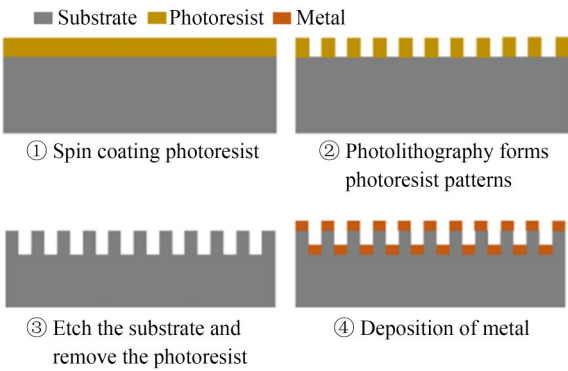


图 10 图形转移流程示意图

Fig. 10 Flow chart of graphic transfer

直的结构。使用 SF_6 和 O_2 作为反应气体,Ar 作为惰性保护气体将剩余的反应气体排除,刻蚀步骤和参数如表 1 所示。

表 1 硅刻蚀流程

Tab. 1 Silicon etching process

参 数	稳定压力	去除残胶	通反应气体	反应离子刻蚀	排反应气体
Time(s)	20	10	10	25	60
Pressure(mTorr)	8	8	30	30	50
Ar(500 mL/min)	0	0	0	0	200
O ₂ (300 mL/min)	50	50	40	40	0
SF ₆ (200 mL/min)	0	0	90	90	0
SrcRF power(W)	0	100	0	600	0
BiasRF power(W)	0	20	0	30	0

刻蚀完成后,对硅基底沉积铝金属膜。这里选用电子束蒸镀技术,以 0.07 nm/s 的速度进行

沉积,得到的最终结构的 SEM 图像如图 11 所示。

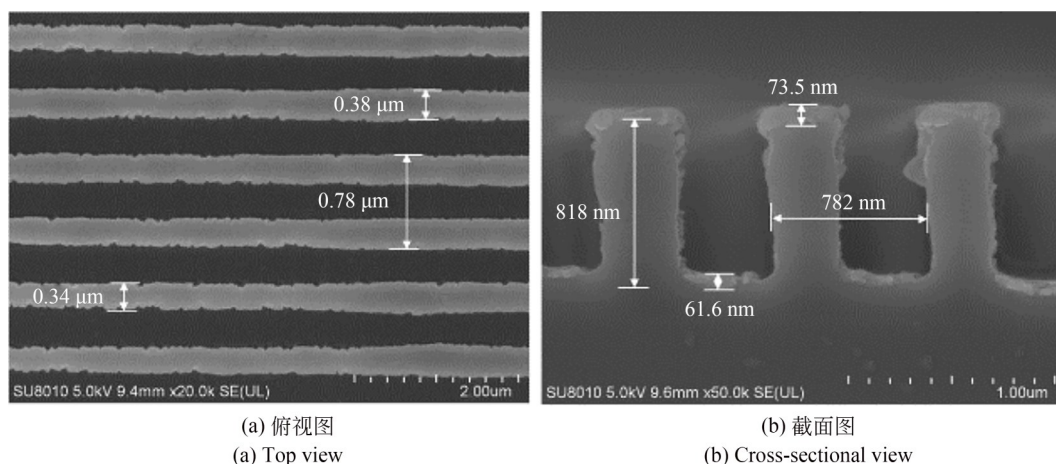


图 11 双层光栅的 SEM

Fig. 11 SEM images of double-layer grating

4 性能测试

对亚波长双层金属光栅偏振器件的透过率和消光比等性能进行测试,测试装置如图 12 所示。

这里采用傅里叶红外光谱仪对上述参数进行测试。为了分离硅基底本身对透过率的影响,对透过率进行归一化处理,即线栅透过率:

$$T_g = \frac{T_{\text{Total}}}{\sqrt{T_{\text{Si}}}}, \quad (8)$$

其中: T_{total} 为硅基底亚波长偏振光栅的整体透过率, T_{Si} 为无线栅结构的硅基底的透过率。测试结果如图 13 所示。归一化的 TM 波在 3~15 μm 的

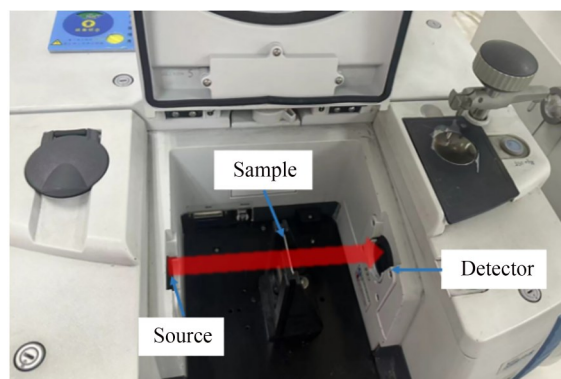


图 12 双层金属光栅的光学性能测试

Fig. 12 Optical performance test of double-layer metal grating

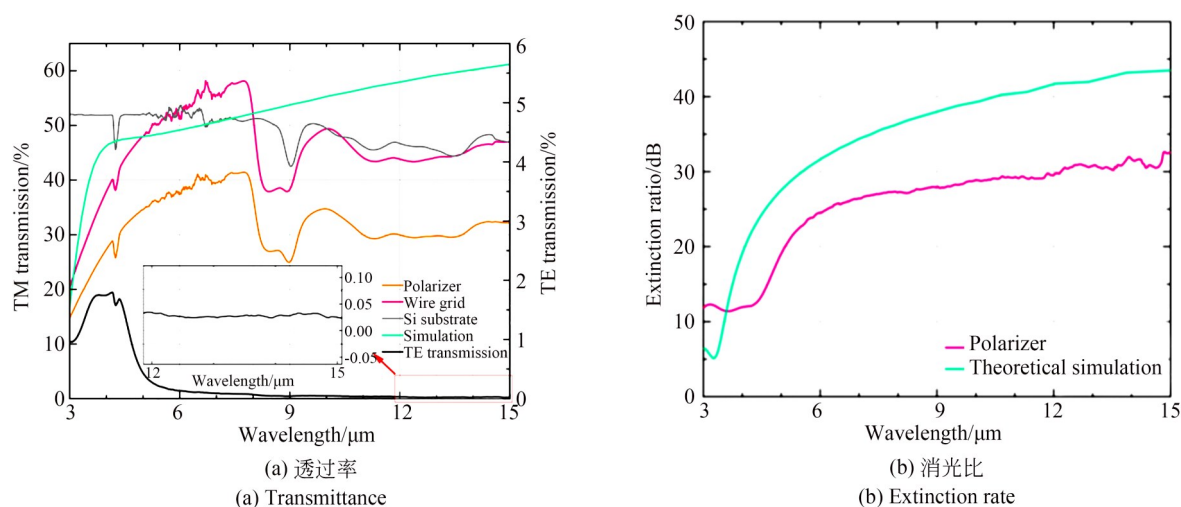


图 13 双层光栅的偏振选择性能

Fig. 13 Polarization selectivity performance of double-layer gratings

工作区间的平均透过率超过 45%, 最大消光比超过 30 dB。

5 结 论

本文设计并制作了一维亚波长光栅微偏振片, 采用等效介质理论对亚波长光栅的偏振选择性进行理论分析, 使用 FDTD 算法进行数值模拟, 最终确定周期为 800 nm 的双层金属光栅结

构。该光栅具有图形转移工艺成熟, 消光比受占空比变化影响小的特征, 十分适合使用全息光刻技术进行加工。之后设计并搭建了全息干涉光刻系统, 结合刻蚀, 镀膜等工艺对设计出的微偏振片进行了加工, 得到了面积为 30 mm × 30 mm 的亚波长光栅结构。经过测试, 其 3~15 μm 工作波段下平均透过率超过 45%, 并具有最大超过 30 dB 的消光比, 表明双层金属光栅具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] SCHRÖTER U, HEITMANN D. Surface-plasmon-enhanced transmission through metallic gratings [J]. *Physical Review B*, 1998, 58 (23): 15419-15421.
- [2] 张志刚. 基于微偏振片阵列的实时偏振和相位信息测量技术[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015. ZHANG ZH G. *Real-time Polarization and Phase Information Measurement Technology Based on Micro-polarizer Array* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)
- [3] LI X H, LU H O, ZHOU Q, *et al.* An orthogonal type two-axis lloyd's mirror for holographic fabrication of two-dimensional planar scale gratings with large area [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8 (11): 2283.
- [4] BOMZON Z, BIENER G, KLEINER V, *et al.* Radially and azimuthally polarized beams generated by space-variant dielectric subwavelength gratings [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(5): 285-287.
- [5] 白云峰, 范杰, 邹永刚, 等. 激光干涉光刻制备 976 nm 分布反馈式激光器光栅[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(12): 120501. BAI Y F, FAN J, ZOU Y G, *et al.* Fabrication of gratings used in 976 nm distributed feedback lasers based on laser interference lithography [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54 (12): 120501. (in Chinese)
- [6] CHAO Y Y, ZHOU Q, NI K, *et al.* Wideband infrared metal wire grating polarizer using holographic lithography and lift-off process [C]. *Nanophotonics and Micro/Nano Optics V*. October 20-23, 2019. Hangzhou, China. SPIE, 2019.
- [7] 杨江涛, 王健安, 王银, 等. 亚波长金属光栅偏振器制备技术研究[J]. 红外技术, 2021, 43(1): 8-12.
- [8] YANG J T, WANG J A, WANG Y, *et al.* Fabrication technology of a subwavelength metal grating polarizer [J]. *Infrared Technology*, 2021, 43(1): 8-12. (in Chinese)
- [9] ZHANG S W, MI X T, ZHANG Q, *et al.* Groove shape characteristics of echelle gratings with high diffraction efficiency [J]. *Optics Communications*, 2017, 387: 401-404.
- [10] MI X T, ZHANG S W, QI X D, *et al.* Ruling engine using adjustable diamond and interferometric control for high-quality gratings and large echelles [J]. *Optics Express*, 2019, 27(14): 19448-19462.
- [11] ROGERS J A, PAUL K E, JACKMAN R J, *et al.* Using an elastomeric phase mask for sub-100 nm photolithography in the optical near field [J]. 1997, 70(20): 2658-2660.
- [12] GUO L J. Nanoimprint lithography: methods and material requirements [J]. *Advanced Materials*, 2007, 19(4): 495-513.
- [13] VIEU C, CARCENAC F, PÉPIN A, *et al.* Electron beam lithography: resolution limits and applications [J]. *Applied Surface Science*, 2000, 164 (1/2/3/4): 111-117.
- [14] WOLFERENHENK V, LEON A. Laser Interference Lithography. [J]. *Lithography: Principles, Processes and Materials*. 2011 P113-148 ISBN: 978-1-61761-873-6.
- [15] 王翀宇. 高性能大面积红外线栅偏振片的设计与制作[D]. 北京: 清华大学, 2023. WANG ZH Y. *Design and Fabrication of High-Performance Large-area Infrared Grid Polarizer* [D]. Beijing: Tsinghua University, 2023. (in Chinese)
- [16] 晁银银. 中长波红外金属线栅偏振片设计与制作[D]. 北京: 清华大学, 2020.

- CHAO Y Y. *Design and Fabrication of Medium to Long Wave Infrared Metal Grating Polarizers* [D]. Beijing: Tsinghua University, 2020. (In Chinese)
- [16] BRUECK S R J. Optical and interferometric lithography-nanotechnology enablers [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2005, 93(10): 1704-1721.
- [17] LUO L B, SHAN S N, LI X H. A review: laser interference lithography for diffraction gratings and their applications in encoders and spectrometers [J]. *Sensors*, 2024, 24(20): 6617.
- [18] AIHARA R, LI X, CAI Y, *et al.* Biaxial diffraction grating processing using a three-axis Lloyd mirror interferometer [C]. *Proceedings of JSPE Semestrial Meeting*, 2015: 299-300. DOI: 10.11522/PSCJSPE.2015A.0_299.
- [19] XUE G P, ZHAI Q H, LU H O, *et al.* Polarized holographic lithography system for high-uniformity microscale patterning with periodic tunability [J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2021, 7: 31.
- [20] LI X H, ZHOU Q, ZHU X W, *et al.* Holographic fabrication of an arrayed one-axis scale grating for a two-probe optical linear encoder [J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 16028-16039.
- [21] LI X H, GAO W, SHIMIZU Y, *et al.* A two-axis Lloyd's mirror interferometer for fabrication of two-dimensional diffraction gratings [J]. *CIRP Annals*, 2014, 63(1): 461-464.
- [22] XUE G P, LU H O, LI X H, *et al.* Patterning nanoscale crossed grating with high uniformity by using two-axis Lloyd's mirrors based interference lithography [J]. *Optics Express*, 2020, 28(2): 2179.
- [23] LI X H, LU H O, ZHOU Q, *et al.* An orthogonal type two-axis lloyd's mirror for holographic fabrication of two-dimensional planar scale gratings with large area [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(11): 2283.
- [24] CHUA J K, MURUKESHAN V M. Patterning of two-dimensional nanoscale features using grating-based multiple beams interference lithography [J]. *Physica Scripta*, 2009, 80(1): 015401.
- [25] 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.
- [26] PANG L, NAKAGAWA W, FAJMAN Y. Fabrication of two-dimensional photonic crystals with controlled defects by use of multiple exposures and direct write [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(27): 5450.
- [27] XUE G P, LIN L Y, ZHAI Q H, *et al.* Modulation of dielectric film on two-axis Lloyd's mirrors for patterning high-uniformity nanoscale grating [C]. 2021 *International Conference on Optical Instruments and Technology: Micro/Nano Photonics: Materials and Devices*. April 8-10, 2022. Online Only, China. SPIE, 2022.
- [28] BYUN I, KIM J. Cost-effective laser interference lithography using a 405 nm AlInGaN semiconductor laser [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2010, 20(5): 055024.
- [29] LI X H, SHIMIZU Y, ITO S, *et al.* Fabrication of scale gratings for surface encoders by using laser interference lithography with 405 nm laser diodes [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2013, 14(11): 1979-1988.
- [30] FUCETOLA C, KORRE H, BERGGREN K. Low-cost interference lithography [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2009, 27: 2958-2961.
- [31] 朱树旺, 赵开春. 分焦平面偏振图像传感器信噪比标定 [J]. *光学精密工程*, 2023, 31(7): 1012-1021.
- ZHU SH W, ZHAO K CH. Calibration of signal-to-noise ratio of sub focal plane polarization image sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(7): 1012-1021. (in Chinese)
- [32] 李星辉, 崔璨. 光栅干涉精密纳米测量技术 [J]. *光学精密工程*, 2024, 32(17): 2591-2611.
- LI X H, CUI C. Grating interferometric precision nanometric measurement technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(17): 2591-2611. (in Chinese)
- [33] JING X F, JIN Y X. Transmittance analysis of diffraction phase grating [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(9): C11-C18.
- [34] 颜树华. 衍射微光学设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- YAN SH H. *Design of Diffractive Micro-optics* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [35] 王志文, 褚金奎, 王倩怡. 单层亚波长金属光栅偏振器透射机理研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35

(7): 65-71.

WANG ZH W, CHU J K, WANG Q Y. Transmission analysis of single layer sub-wavelength metal gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7):

65-71. (in Chinese)

[36] TEIXEIRA F L, SARRIS C, ZHANG Y, *et al.* Finite-difference time-domain methods[J]. *Nature Reviews Methods Primers*, 2023, 3: 75.

作者简介:



陆天石(1996—),男,江苏南京人,博士研究生,2020年于澳大利亚国立大学获得学士学位,主要从事全息光刻光栅的研究。E-mail: luts21@mails.tsinghua.edu.cn

通讯作者:



李星辉(1985—),男,河南洛阳人,副教授,博士生导师,2008年于武汉大学获得学士学位,2011年于西安交通大学获得硕士学位,2014年于日本东北大学获得博士学位,主要从事信息光学与衍射光栅、微纳光学制造、光栅干涉与光谱分析、结构光三维重建、智能视觉检测的研究。E-mail: li.xinghui@mails.tsinghua.edu.cn