

基于多变量纳米线栅复合结构的可见光偏振调控

李亚红 李满 魏文浩 褚金奎 邹念育 姜珊

Polarization control of visible light based on composited multivariable nanowire gratings structure

LI Yahong, LI Man, WEI Wenhao, CHU Jinkui, ZOU Nianyu, JIANG Shan

引用本文:

李亚红, 李满, 魏文浩, 等. 基于多变量纳米线栅复合结构的可见光偏振调控[J]. 应用光学, 2024, 45(4): 700–708. DOI: 10.5768/JAO202445.0401005

LI Yahong, LI Man, WEI Wenhao, et al. Polarization control of visible light based on composited multivariable nanowire gratings structure[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(4): 700–708. DOI: 10.5768/JAO202445.0401005

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0401005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

金催化的硅纳米线的可控制备及光学特性研究

Research on controllable preparation and optical properties of gold catalysed silicon nanowires

应用光学. 2019, 40(5): 738–745 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0501004>

振动辅助纳米压印制备大面积光栅结构

Preparation of large-area grating structure by vibration-assisted nanoimprint

应用光学. 2022, 43(1): 124–130 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0105001>

基于液晶偏振光栅的大口径激光光束扫描系统

Large-aperture laser beam scanning system based on liquid crystal polarization grating

应用光学. 2024, 45(3): 557–567 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0310010>

近红外偏振无关超透镜研究

Research on near-infrared polarization-independent metalens

应用光学. 2020, 41(3): 591–596 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0305001>

亚波长光栅偏振片的纳秒脉冲激光损伤特性

Nanosecond pulse laser damage characteristics of sub-wavelength gratings polarizers

应用光学. 2019, 40(1): 138–142 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0107002>

基于介质超表面的圆偏振复用全息

Circular polarization multiplexing holography based on dielectric metasurface

应用光学. 2024, 45(3): 630–636 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0302002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 04-0700-09

基于多变量纳米线栅复合结构的可见光偏振调控

李亚红¹, 李 满¹, 魏文浩¹, 褚金奎², 邹念育¹, 姜 珊¹

(1. 大连工业大学 信息科学与工程学院, 辽宁 大连 116034; 2. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 偏振调控技术能够直接满足偏光显微镜在可见光波段快速、高精度识别检测的需求, 其关键是, 在提高偏振消光比的同时, 具有较高的光利用率。基于等效介质理论和谐振腔的共振增强机理, 设计了一种多变量纳米线栅复合结构; 采用时域有限差分方法, 通过数值仿真, 分析了纳米线栅各结构参数和偏振调控的变化关系, 能够实现可见光波段宽角度入射、高透过率和高消光比的偏振快速调控功能; 结合实验室现有条件, 采用纳米压印技术进行样品制备和实验验证。实验和仿真结果表明: 在入射角度 $\pm 35^\circ$ 内, TM 模偏振光的透射率和消光比分别高于 60% 和 35 dB; 并且在 532 nm 激光源垂直入射时, TM 模偏振光的透射率和消光比与仿真结果误差范围为 4%。与现有偏振显微镜设备中偏振器相比, 所设计的纳米线栅偏振调控在保证高透过率的同时, 消光比提升了 1.5 倍。

关键词: 偏振调控; 纳米线栅; 等效介质理论; 时域有限差分; 偏振显微镜

中图分类号: O436

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0401005

Polarization control of visible light based on composited multivariable nanowire gratings structure

LI Yahong¹, LI Man¹, WEI Wenhao¹, CHU Jinkui², ZOU Nianyu¹, JIANG Shan¹

(1. School of Information Science and Engineering, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China;

2. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The polarization regulation technology can effectively fulfill the requirements of rapid and precise identification and detection in the visible light range for polarization microscopes. The key lies in enhancing the polarization extinction ratio and achieving the optimal utilization of light. A composited multivariable nanowire gratings structure was designed based on the equivalent medium theory and the resonance enhancement mechanism of the resonator. The relationship between the structure parameters and polarization property of the structure was analyzed by numerical simulation using the finite-difference time-domain (FDTD) method, which could realize the polarization regulation function of wide angle incidence, high transmittance and high extinction ratio in the visible light band. Combined with the existing conditions of the laboratory, the nano-imprint technology was used for sample preparation and experimental verification. The experimental and simulation results show that the transmittance and extinction ratio of TM mode are higher than 60% and 35 dB respectively within the incident angle of $\pm 35^\circ$, and the error range is about 4% at the vertical incidence of 532 nm laser source. Compared with polarizers in existing polarization microscopes, the designed structure of polarization regulation ensures high transmittance while increasing the extinction ratio by 1.5 times.

Key words: polarization regulation; nanowire gratings; equivalent medium theory; finite-difference time-domain; polarization microscope

收稿日期: 2023-10-19; 修回日期: 2024-01-04

基金项目: 国家自然科学基金 (11904044); 辽宁省教育厅面上项目 (JYTMS20230424)

作者简介: 李亚红 (1990—), 女, 博士, 副教授, 主要从事光学系统设计、微纳光学、偏振光谱成像等研究。

E-mail: liyahong@dlpu.edu.cn

通信作者: 邹念育 (1964—), 女, 工学博士, 教授, 主要从事激光和光纤测试技术、半导体光源和应用产品测试技术及标准化研究。E-mail: n_y_zou@dlpu.edu.cn

引言

作为一种无标记、无损伤的光学检测技术, 偏振显微成像在微观结构观察、病理诊断、病灶分析等可见光领域展示出良好的应用前景^[1-4]。其中, 偏振显微镜在观察微观结构中发挥着重要作用, 尤其是对亚波长微观结构敏感, 具备无需对样品染色, 直接获取样品偏振特征参数, 信息量丰富, 数据维度多等优势, 被广泛应用于精准区分不同病变微观结构特征种类和分布。

偏振显微镜是利用物质的“各向异性”区分不同结构的物质, 为了使观察效果更清晰、更明显, 在光路的照明端与成像端之间增设偏振片, 从而实现偏振调控^[5]。然而, 这种方式会损失大约 50% 的入射光, 降低了整个光路的光利用率, 导致样本特征不能高亮显示。随着微纳加工技术的不断发展, 亚波长金属光栅对光的偏振特性具有灵活而精确的调控能力, 并且消光效果好、透过率高、光接收角度大等, 可以适用于多个光谱范围^[6-9], 具有替代传统光学偏振元器件的潜力。例如, ITSUNARI Y^[10] 等人利用双光束干涉和反应离子刻蚀制备了光栅结构周期为 400 nm、深度为 300 nm、占空比为 0.6 的钨化硅光栅, 能够在 4 μm ~5 μm 工作波段得到高于 80% 的透过率, 大于 20 dB 的消光比。WEBER T^[11] 等人针对紫外波段设计, 采用电子束光刻和反应离子刻蚀技术制备了周期为 140 nm、高度为 80 nm 的非晶硅线栅偏振器, 在 350 nm~450 nm 波段得到 42% 的透过率和 19.5 dB 的消光比。HE W^[12] 等人设计了在远红外波段的多层金属纳米线超表面阵列传感器, 模拟了周期为 300 nm, 金属介质叠加高度为 250 nm 的多模双曲型超材料周期阵列结构, 通过改变结构的数量和排列方式, 实现了在 1 250 nm~3 000 nm 接近 75% 的反射率。近几年, 纳米压印技术在纳米线栅制备领域具有高效率、高精度、低成本、良好的工艺稳定性等特点, 对于亚波长光栅的制备提供了新的方式^[13-15]。

它可以直接利用机械力将模板上的图形转移到压印胶上, 相比于现有价格昂贵的光刻技术, 突破了光学光刻技术最短曝光波长的物理极限, 从而获得高产率、低成本的压印光栅^[15]。

本文首先结合实验制备条件, 利用入射光中横磁模(transverse magnetic mode, 简称 TM 模)偏振光在光栅结构中形成的类法布里-珀罗谐振腔(Fabry-Pérot resonator, 简称 F-P 谐振腔)的谐振增强机理和金属-介质界面产生的表面等离子体共振效应, 设计了一种多变量纳米线栅偏振调控复合结构, 确定光栅的周期、占空比等结构参数。然后, 运用时域有限差分的方法分析线栅高度差、深宽比、以及入射角度等结构变量对偏振透过率和消光比的影响, 在此基础上, 对各结构变量进行最优值选取。最后, 采用纳米压印技术对优化后的复合结构进行实物制备和偏振性能检测, 获取在可见光波段具备高透射率和高偏振消光比的纳米线栅复合结构。可应用于偏振显微镜中, 以降低偏振片引起的光能损耗, 使检测样品成像效果更好, 提高了检测精度和速度。

1 理论设计与分析

1.1 结构模型设计

本文设计的多变量纳米线栅复合结构如图 1 所示。它是由一层介质膜层上覆盖一层金属-介质-金属光栅构成, 金属光栅的材料为铝, 其中厚度为 d 的介质膜层相当于一层增透膜层, 可以减少入射光的反射损失, 从而提高光强透射率。金属-介质-金属光栅以线宽为 W , 周期为 P , 金属栅条脊高为 H , 嵌入介质栅条与金属栅条高度差为 h 的结构参数镶嵌组合而成。 x 方向为垂直于金属栅条方向, y 方向为平行于金属栅条方向, z 方向为光栅的法线方向, 由 x - y 平面形成光入射面横电模(transverse electric mode, 简称 TE 模), 横磁模偏振光沿 z 轴方向出射偏振光。金属-介质-金属光栅类似于一个 F-P 谐振腔, TM 模偏振光从介质入射到金属

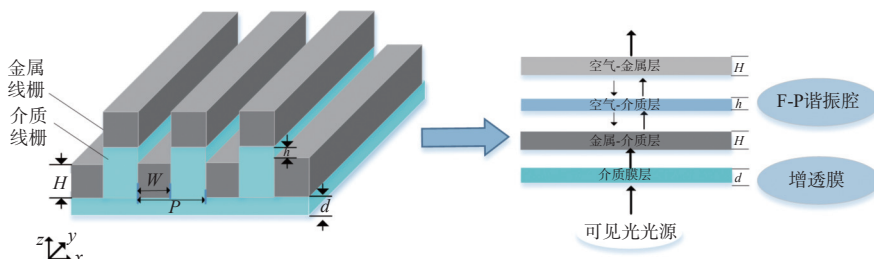


图 1 结构模型及等效图

Fig. 1 Structural model and equivalent diagram

产生表面等离子体波,并在腔内产生驻波^[16-17]。通过调整光栅高度,实现波导内包含驻波周期的个数,进而调制其透射光谱产生周期性变化。

当光栅周期远小于入射波长时,可利用等效介质理论近似分析,将这种金属-介质-金属周期性结构等效为3层均匀介质,便于理解结构的偏振特性。根据 Maxwell 方程边界条件,等效介质层对 TM 模和 TE 模入射偏振光的等效折射率分别为^[18]

$$n_{TE} = \sqrt{n_1^2 f + (1-f)n_2^2} \quad (1)$$

$$n_{TM} = \sqrt{\frac{n_1^2 + n_2^2}{n_2^2 f + (1-f)n_1^2}} \quad (2)$$

式中: n_1 和 n_2 分别是光栅材料、介质材料的折射率; f 是占空比,且 $f = W/P$ 。对第1层结构,可将 n_1 和 n_2 看成介质光栅和金属光栅,第2层结构可看作介质光栅和空气,第3层结构可看作金属光栅和空气。为了更好地说明这一特性,以第3层金属光栅铝和空气层为例,将铝^[19-20]的折射率 $n_1 = 0.6264 + 5.5059i$ ($\lambda = 450$ nm), 空气的折射率 $n_2 = 1$, 占空比 $f = 0.5$ 代入上式,得到:

$$n_{TE} = 0.4504 + 3.8293i \quad (3)$$

$$n_{TM} = 1.4372 + 0.0054i \quad (4)$$

由此可以看出,对 TE 模偏振光,光栅折射率可近似为只有虚部,等效为一层金属膜。因为不是完美导体,故大部分 TE 模偏振光被反射和吸收。对 TM 模偏振光,虚部接近于零,实部较大,可等效为一层均匀介质薄膜,故大部分 TM 模偏振光能被透射,从而实现高 TM 模透射,TE 模反射。另外,还可以看出,其等效折射率与光栅材料和占空比相关,并且需要满足光栅周期远小于入射波长的一阶近似前提^[21]。然而,在进行纳米级光栅结构参数优化时,传统的标量衍射理论由于入射光的偏振态在分析计算时存在较大误差,已不再适用,故采用矢量衍射理论进行分析。目前,常用的矢量衍射理论是严格耦合波分析法(rigorous coupled wave analysis, RCWA)^[22]和时域有限差分法(finite-difference time-domain, FDTD)^[23]。其中时域有限差分法突出的优点是,直接在时域中用差分代替微分求解 Maxwell 方程组,可以更精准模拟非均匀、形状复杂的介质内电磁场变化^[15]。故本文借助 FDTD 软件(lumerical FDTD solutions software, Version 7.5.3),结合实验室具体制备水平,对所设计结构参数进行优化,以实现良好的偏振调控性能。

1.2 仿真设计与分析

在 FDTD 软件中构建如图1所示的三维结构

模型。设置 x, y 方向为周期性(periodic)边界条件^[23], z 方向为完美匹配层(perfectly matched layer, PML)边界条件^[24],以减少边界反射。分别用 TM 模、TE 模偏振光从介质膜层下表面入射,波长范围设置为 450 nm~750 nm,网格精度设置为 1 nm,进行参数优化,可得到步长为 1 nm 的清晰传输特性曲线。仿真结果以高 TM 模偏振光透射率来反映设计结构的光能利用率,并引入消光比 ER 来衡量设计结构的偏振特性强弱, $ER = 10 \times \log_{10}(I_{TM}/I_{TE})$ 。其中 I 表示透过光强,下标 TM、TE 分别表示 TM 模、TE 模偏振光。

由于实验室具备的条件有限,现有的纳米压印模版是光栅周期为 200 nm,占空比为 0.5,金属光栅高度为 100 nm,压印胶材料为透明介质聚甲基丙烯酸甲酯 PMMA($n = 1.5$ @ $\lambda = 450$ nm),故考虑到加工工艺,将介质光栅和介质膜层的材料选为 PMMA 进行结构参数优化^[25]。除此之外,需要考虑线栅深宽比的大小。深宽比(aspect ratio)是指线栅高度与线宽的比值,一般情况下,大的深宽比会使光栅加工工艺难度上升,所制成品畸形误差较大。目前国内外研究者在设计和制作线栅时,通常将深宽比控制在 2:1 甚至 1:1 之内,文中金属光栅线宽 $W = 100$ nm,金属光栅高度 $H = 100$ nm,所以介质光栅的高度最高可设为 200 nm,即金属介质线栅高度差 h 优化范围可确定为 0~100 nm。在考虑到纳米级别光栅制备的工艺误差,会使理论设置值与实际制备光栅参数存在差异,导致偏振性能有所偏差,故本文采用等高线图(接纳工艺容差)进行仿真分析。

2 结构参数影响分析

结合实际加工工艺确定初始结构参数及优化范围,分析介质膜层厚度 d 、线栅高度差 h 、入射角度 θ 等结构参数变化对 TM 模偏振光透射率和消光比的影响,并确定结构参数最优值。

2.1 参数 d 对偏振特性的影响

由上述第1节可知,介质膜层在整个结构中作为一层增透膜层,可减少光波反射,其不同厚度直接影响光波反射效果。基于薄膜干涉原理^[26],光波在薄膜上、下2个面上反射的光程差恰好等于半个波长,便可以互相抵消,减少反射,这时膜的厚度等于入射光波长的 1/4。由于本文考虑的是 450 nm~750 nm 连续入射波,所以需要优化确定最佳值,使其在整个波段的增透效果最好。

入射波长在 450 nm~750 nm 范围内不同厚度

d 时 TM 模偏振光透射率 (T_{TM}) 变化等高线图如图 2 (a) 所示, 其他结构参数为 $P=200$ nm, $DC=0.5$, $W=100$ nm, $h=20$ nm, $H=100$ nm。从图 2(a) 可以看出, 在整个 450 nm~750 nm 波长范围内, 介质膜层的加入 ($d \neq 0$) 可使 TM 模透射率明显提高 (彩图见网络版)。厚度 d 从 0 增加到 30 nm 时, TM 模透射率低于 50% 的波段越来越窄 (深蓝色部分); 从 30 nm 增加到 60 nm 时, TM 模的透射率高于 80% 的波段 (橙色部分) 先变宽后变窄; 最显著的是在 $d=45$ nm 左右时, 在中心波长 600 nm 附近透射率达到最高值 83%。这样可以理解为介质膜层厚度为 45 nm 时, 薄膜干涉效应最为强烈。图 2 (b) 为在 450 nm~750 nm 波长范围内, 厚度 d 从 0~60 nm 的变化对消光比 (ER) 的影响。从图 2(b) 可以看出, 厚度 d 从 0~30 nm 变化时, ER 大于 55 dB 的波段越来越宽; 厚度 d 超过 30 nm 时, ER 大于 57 dB 的波段越来越宽; 但厚度 d 超过 45 nm 时, 在整个波长范围内 ER 变化并不明显。因此, 以长波段高 TM 模的透射率和大消光比为衡量指标, 介质膜层厚度为 45 nm 时为最佳值。

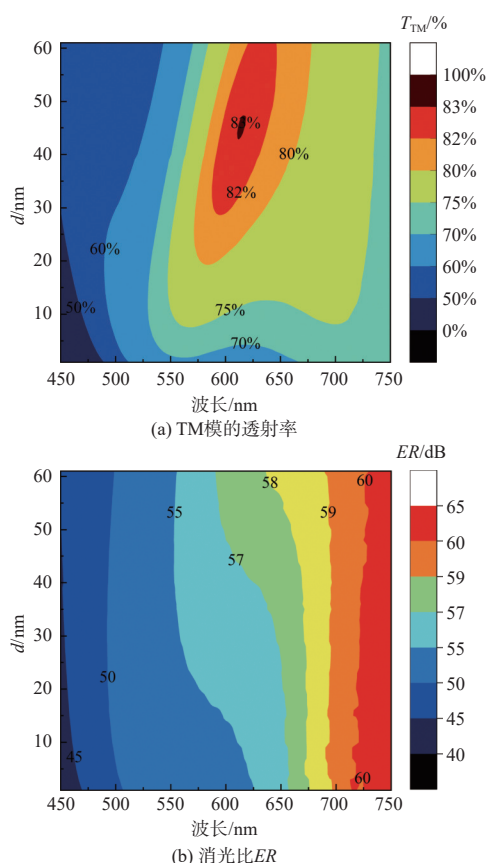


图 2 介质膜层厚度 d 对偏振性能的影响

Fig. 2 Effect of thickness of dielectric film (d) on polarization performance

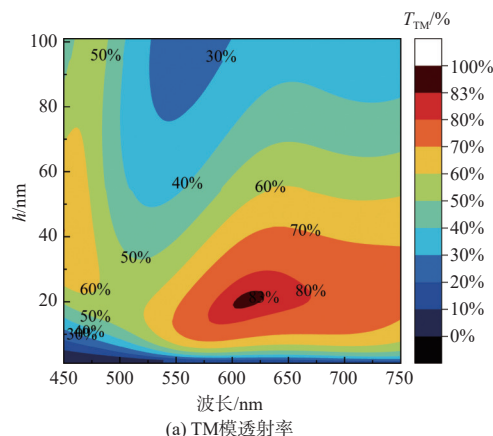
2.2 参数 h 对偏振特性的影响

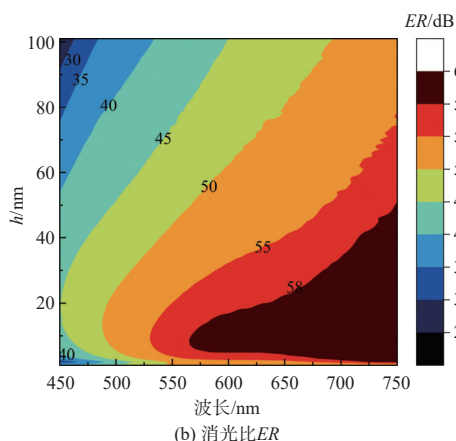
金属-介质-金属光栅结构可等效为一个类 F-P 谐振腔, 其中第 1 层为金属介质层, 第 2 层是高度为 h 的介质空气层, 第 3 层为金属空气层。将第 1 层和第 3 层等效成金属层, 视为腔体, 第 2 层视为波导, 厚度 h 视为腔长, 那么光从第 1 层射向第 3 层过程中会产生多次反射, 在波导层产生干涉共振, 导致透射异常^[27,28]。根据 Fabry-Perot 光束干涉理论, 该类 F-P 谐振腔在正入射情况下, 若要共振增强, 则谐振腔内折射率 n_{eff} 和谐振腔长度 h 需满足下式:

$$\frac{m\lambda}{n_{\text{eff}}} = 2(h + \delta) \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (5)$$

式中: λ 为入射波长; m 为光束干涉级数; δ 为基底的介电常数对类 F-P 谐振腔长度的影响。因此, 波导层厚度 h 决定光波入射时在类 F-P 谐振腔中的共振增强程度, 是影响偏振特性调控的关键参数之一。

在可见光范围内, 线栅高度差 h 对所设计结构模型偏振性能的影响如图 3 所示。图 3(a) 为高度差 h 随波长变化的 TM 模的透射率 (T_{TM}), 图 3(b) 为高度差 h 随波长变化的消光比 ER 。从图 3 可以看出: h 在 20 nm 附近时, TM 模的透射率可达最大值 83%, ER 整体高于 45 dB。从图 3 (a) 可以看出, h 在 0~20 nm 范围内变化时, TM 模透射率最高值随着波长在变大的同时右移; h 在 20 nm~100 nm 范围内变化时, TM 模的透射率最高值在变小的同时向左偏移, 这可以理解为波导层厚度引起类 F-P 谐振腔在特定波长产生共振增强效应导致透射异常。通过图 3 (b) 可以发现, h 增加会使 ER 值在整个波段内持续变小。因此, 可以确定线栅高度差 $h=20$ nm 左右时, 能够取得较好的偏振效果。



图3 线栅高度差 h 对偏振性能的影响Fig. 3 Effect of height difference (h) of nanowire gratings on polarization performance

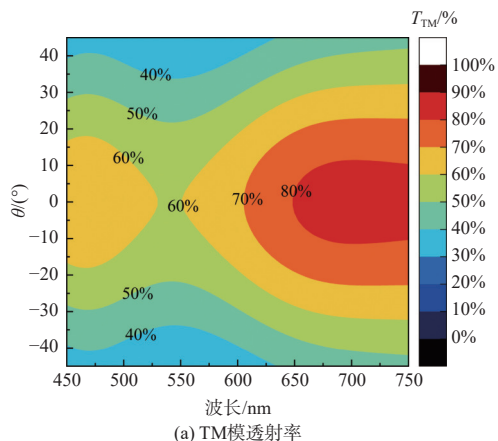
2.3 参数 θ 对偏振性能的影响

为探究结构参数 θ 对纳米线栅复合结构偏振的调控影响,进一步优化设计结构,对入射角度 θ 进行分析。本文引入表面等离子共振条件方程解释透射率曲线变化,共振条件为

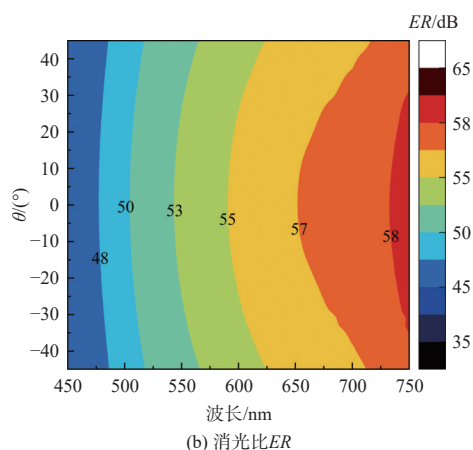
$$k_0 \varepsilon_d \sin \theta + m \frac{2\pi}{P} = \pm k_0 \sqrt{\frac{\varepsilon_d \varepsilon}{\varepsilon + \varepsilon_d}} \quad (6)$$

式中: $m > 0$ 取+号, $m < 0$ 取-号; $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为真空中的波数; ε_d 和 ε 分别为介质和金属光栅材料介电常数; P 为光栅周期; θ 为入射角度。

满足上式共振条件,会激发金属介质表面的等离子共振,引起 TM 模透射率在特定波段异常变化,进而实现偏振特性的调控。本文中介质和金属光栅分别为 PMMA 和 Al, 周期为 200 nm 时,入射角度 θ 在 $\pm 45^\circ$ 范围内对 TM 模偏振透射率的影响如图 4 (a) 所示。随着入射角度 θ 从 $0^\circ \sim 45^\circ$ 增大, TM 模的透射高峰逐渐降低并发生红移。但在 $\pm 35^\circ$ 范围内, TM 模的透射率在整个波段都大于 50%。入射角度对消光比的影响如图 4 (b) 所示。



(a) TM 模透射率

图4 入射角度 θ 对偏振性能的影响Fig. 4 Effect of incident angle (θ) on polarization performance

从图 4(b)可以看出, θ 在 $\pm 35^\circ$ 区间内, ER 最高能够达到 58 dB 以上。因此,在实际使用所设计偏振调控结构时,入射角度 θ 应该选择 0° , 即垂直入射时偏振效果最佳。

2.4 截面场模拟分析

通过以上优化分析,以目前实验制备条件为前提,确定纳米线栅复合结构。实现偏振调控的结构参数为:周期为 200 nm, 占空比为 0.5 的金属 Al 和 PMMA 作为金属-介质-金属光栅的材料,其中金属线栅高度为 100 nm,金属介质线栅高度差为 20 nm;介质膜层采用厚度为 45 nm 的 PMMA。在可见光范围内,可以实现 TM 模的偏振光透过率高达 83% 和消光比 ER 为 61 dB。

为了更好地展现这种 TM 模的透射增强, TE 模的透射抑制的机制,以 600 nm 波长处偏振透射最强 ($T_{TM}=83\%$, $ER=56$ dB) 的偏振光作为入射光,对 TM 模和 TE 模偏振光的电磁场和波印廷矢量进行仿真分析。TM 模偏振光入射时,电场截面分布如图 5 (a) 所示。TM 模偏振光 ($y=0$) 由介质膜层射出,使金属介质线栅表面的电荷产生强烈振荡,激发表面等离子体共振效应产生共振异常^[28]。由于垂直方向上表面电荷的不连续性,在金属线栅四角处产生电荷堆积,因此电场分量出现显著增强。又因金属介质线栅高度差形成波导层,金属空气线栅组成的类 F-P 谐振腔共同调制,腔内电磁场再次振荡,使金属空气层的四角电场更强,金属线栅上、下表面电场更少。TM 模偏振光入射时的波印廷矢量分布如图 5 (b) 所示,可以看出, TM 模光束在偏振功能层出现显著变化,使 TM 模偏振光透射异常^[29]。

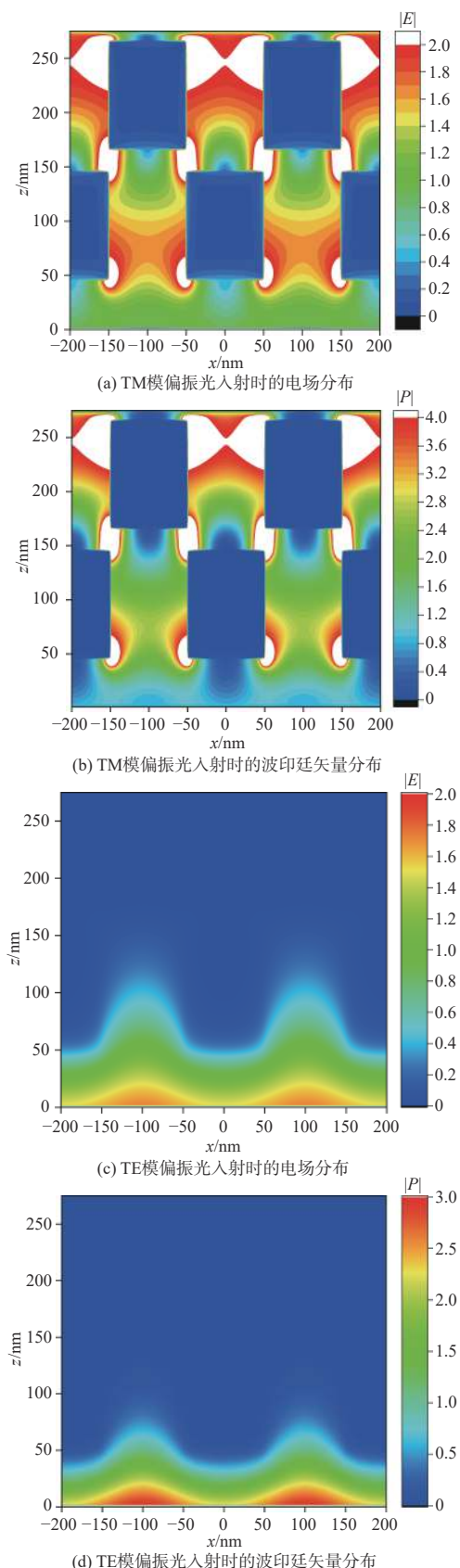


图5 TM模和TE模偏振光入射时的结构截面场分布

Fig. 5 Field distribution of structural cross-section at vertical incidence of TM mode and TE mode polarization light

TE模偏振光入射时, 电场分布图如图5(c)所示。光束由介质膜层($y=0-45\text{ nm}$)入射到光栅层, 没有垂直金属截面电场分量, 不产生表面等离子体, 金属内电子只在水平方向自由振荡, 与金属内部原子碰撞后衰减, 并反射回介质膜层; 垂直方向上只沿介质线栅有微量光束透过, 再经上层金属线栅反射, 最终出射电场分量接近零, 实现TE模偏振光几乎都被反射, 无透射光束^[30]。TE模偏振光波印廷矢量如图5(d)所示, 可以看出, 光束基本都集中在介质膜层内。

3 制备与性能测试

3.1 纳米线栅复合结构的制备

结合纳米压印技术^[31]制作设计的纳米线栅复合结构。为克服光电器件崎岖不平表面大面积纳米结构的加工瓶颈, 使用纳米压印机, 采用气体施压联合紫外曝光的自适应工艺, 将周期为 200 nm 的IPS软模板表面纳米线栅图形转移到压印胶表面, 沉积铝材料后, 采用氧等离子灰化工艺去除残余压印胶, 同时完成大面积铝纳米线栅结构制造。具体制造工艺流程如图6所示。

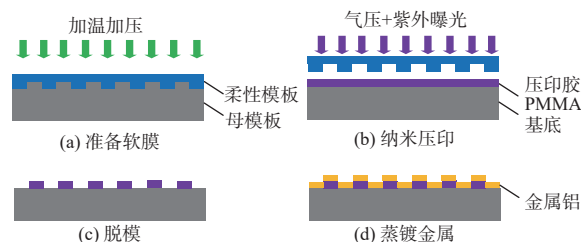


图6 纳米线栅复合结构制造工艺流程图

Fig. 6 Flow chart of manufacturing process of composite structure with nanowire gratings

首先采用热纳米压印方法, 将母模板纳米线栅图形转移到IPS(intermediate polymer stamp)柔性模板表面, 如图6(a)所示; 然后在基底表面旋涂压印胶PMMA, 采用气体施压联合紫外曝光工艺, 将IPS软模板表面的纳米线栅图形转移至压印胶表面, 如图6(b)所示; 进行脱模处理, 获得大面积纳米线栅结构, 如图6(c)所示; 最后在其表面热蒸镀沉积金属铝, 获得复合纳米线栅, 如图6(d)所示。最终实现了光栅周期为 200 nm 、占空比为 0.5 和光栅脊高为 120 nm 的复合纳米线栅, 样品面积为 $1.3\text{ mm} \times 1.3\text{ mm}$ 。制备样品的实物图及其扫描电子显微镜图如图7所示。从图7可以看出, 制备的光栅各栅条平行排列, 表面平滑, 没有凹凸, 制备效果与理论值基本保持一致。

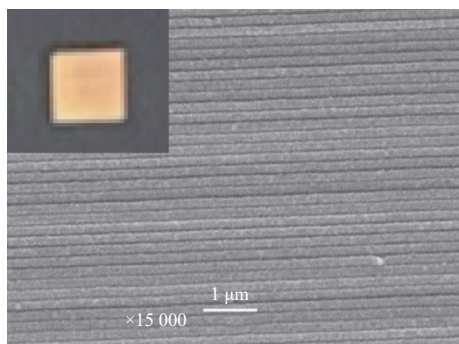
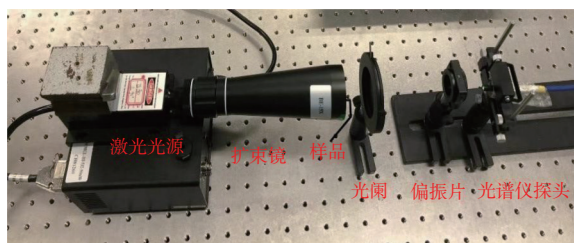


图7 制备样品实物图与扫描电子显微镜图

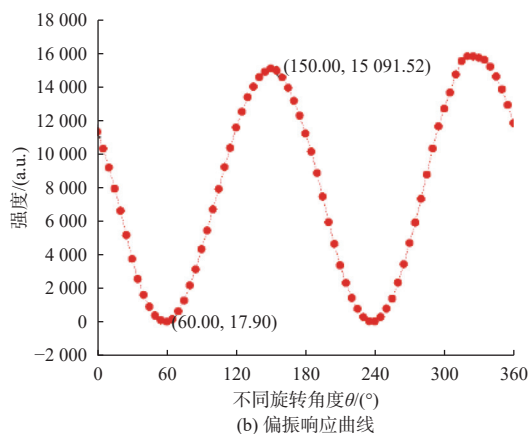
Fig. 7 Physical image and scanning electron microscope image of prepared sample

3.2 复合结构的偏振特性测试

通过搭建如图8(a)所示的实验装置,对制备的纳米线栅复合结构样品进行了TM模、TE模偏振光透过率和消光比的测量。图8中仪器设备依次是:激光光源、复合光栅、光阑、偏振片、光纤光谱仪。其中激光光源选用的型号是新产业公司的MGL-532-50 mW,波长为532 nm,光阑被用来限制通过复合光栅样品的光线,光纤光谱仪的型号是FX-200。在实验测量时,需要保持光线在同一水平线上,通过周期性旋转线性偏振片,可以得到不同角度下的透射光强,测量结果如图8(b)所示。



(a) 偏振特性测量实验装置



(b) 偏振响应曲线

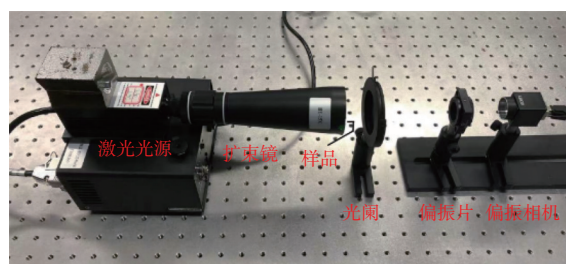
图8 偏振特性测量实验装置和结果

Fig. 8 Diagram of experimental apparatus for measurement of polarized characteristics and results

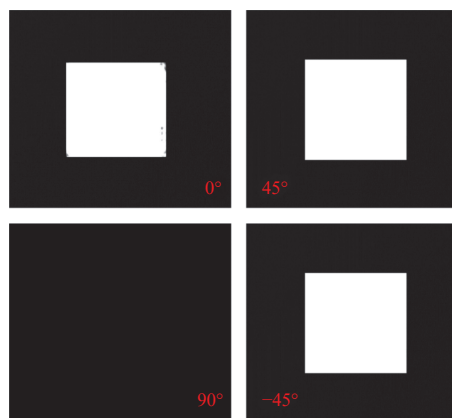
图8(b)中呈现的偏振响应曲线近似正弦曲线,这表明制备的样品基本符合马吕斯定律,其偏振性能得到很好验证,最大值(150.00, 15091.52)对应TM模偏振光的偏振透过光强,最小值(60.00, 17.90)对应TE模偏振光的偏振透过光强,代入消光比公式,可得偏振消光比为29.2 dB。分别撤去偏振片和复合光栅样品,用光纤探头测得相对光强为23217.76(a.u.),与TM模的透过光强相比,可得TM模的透射率为64.99%。

仿真结果中,在532 nm波长处偏振的TM模透射率为68%,消光比为51 dB。由此可以计算得到,仿真和实验结果中TM透射率和消光比的误差分别为4%和42%。造成这一误差的原因,一方面,可能是因为金属-介质光栅自身会有一部分吸收,而纳米层级的加工也会使制备的光栅存在工艺误差;另一方面,表面金属线栅层的自然氧化和实验过程中存在测量误差等因素。但是,仿真与实验之间的误差仍然是令人满意的。

此外,采用偏振相机代替光纤光谱仪,保持偏振片的角度为图8实验中对应该光强最大处的角度不变,旋转复合光栅从0°~90°,观察复合光栅在不同角度下的偏振消光情况。实验装置如图9(a)所



(a) 采用偏振相机的测量实验装置



(b) 不同角度的偏振消光图

图9 偏振相机下测量实验装置及结果

Fig. 9 Diagram of experimental apparatus for measurement about polarization camera and results

示,测量结果如图9(b)所示。从图9可以看出,0°时所测透过光强最大,从0°~±45°变化过程中,光强明显削弱,90°时出现完全消光,可见该复合光栅的偏振效果比较好。

4 结论

本文运用时域有限差分的方法设计和优化了一种应用在可见光波段的纳米线栅复合结构,该纳米线栅由一层PMMA增透层和一层镶嵌而成的金属-介质-金属线栅组成,实现了在可见光波段的高透过率和高消光比。优化结果表明,光栅周期为200 nm,占空比为0.5,金属与介质线栅高度差为20 nm,增透层厚度为45 nm,在450 nm~750 nm波长范围内TM模偏振光透过率大于50%,消光比大于30 dB。结合纳米压印的方式制备该纳米线栅复合结构后,搭建了测试实验装置。实验结果表明,该结构能够在入射激光波长为532 nm时,实现TM模的偏振透过率高达64.99%,消光比高达29.2 dB,与仿真结果基本一致。因此,在可见光领域获取偏振消光的方式,不仅能达到高透过率,而且能达到大消光比,这对于目前追求高亮、超薄的偏光显微镜进行偏振调控,提供了一种新的参考。

参考文献:

- [1] 马颖娴, Chayanis Sutcharitchan, 蒙倩, 等. 基于偏振光显微镜与 λ 波长补偿器联用在生药显微鉴别中的应用研究[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2022, 24(9): 3364-3374.
MA Yingxian, CHAYANIS Sutcharitchan, MENG Qian, et al. Application of polarized light microscope and λ wavelength compensator in the microscopic identification of crude drugs[J]. World Science and Technology-Modernization of Traditional Chinese Medicine, 2022, 24(9): 3364-3374.
- [2] 蔡梦玲. 偏振光显微镜在木斯塘档案纸张纤维检测中的运用[J]. 文物保护与考古科学, 2021, 33(2): 52-60.
CAI Mengling. Application of polarized light microscope in the detection of paper fibers in Mustang archives[J]. Conservation and Archaeological Science, 2021, 33(2): 52-60.
- [3] 汪志琦, 郭宝华, 徐军. 偏振光学显微成像技术在高分子结晶结构表征中的应用[J]. 高分子学报, 2023, 54(1): 130-150.
- WANG Zhiqi, GUO Baohua, XU Jun. Application of polarization optical microscopy in characterization of polymer crystal structure[J]. Acta Polymerica Sinica, 2023, 54(1): 130-150.
- [4] RAMELLA-ROMAN J C, SAYTASHEV I, PICCINIC M. A review of polarization-based imaging technologies for clinical and preclinical applications[J]. Journal of Optics, 2020, 22(12): 123001-.
- [5] IVANOV I E, YEH L H, PEREZ-BERMEJO J A, et al. Correlative imaging of the spatio-angular dynamics of biological systems with multimodal instant polarization microscope[J]. Biomedical Optics Express, 2022, 13(5): 3102-3119.
- [6] 吴芳, 步扬, 刘志帆, 等. 深紫外双层金属光栅偏振器的设计与分析[J]. 物理学报, 2021, 70(4): 184-194.
WU Fang, BU Yang, LIU Zhifan, et al. Design and analysis of deep ultraviolet double-layer metal grating polarizer[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(4): 184-194.
- [7] 钟可君, 伏燕军, 江光裕. 一种提高 OLED 基底出光效率的亚波长光栅设计[J]. 应用光学, 2018, 39(5): 701-706.
ZHONG Kejun, FU Yanjun, JIANG Guangyu. Design of sub-wavelength grating for improving efficiency of OLED substrate[J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(5): 701-706.
- [8] SASAKI T, KUSHIDA H, SAKAMOTO M, et al. Liquid crystal cells with subwavelength metallic gratings for transmissive terahertz elements with electrical tenability[J]. Optics Communications, 2018, 431: 63-67.
- [9] MINH D N, DASOL L, JUNSUK R. Control of light absorbance using plasmonic grating based perfect absorber at visible and near-infrared wavelengths[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 2611.
- [10] ITSUNARI Y, JUNJI N, MITSUNORI S. Modeling, fabrication, and characterization of tungsten silicide wire-grid polarizer in infrared region[J]. Applied Optics, 2008, 47(26): 4735-4738.
- [11] WEBER T, KÄSEBIER T, SZEGHALMI A, et al. High aspect ratio deep UV wire grid polarizer fabricated by double patterning[J]. Microelectronic Engineering, 2012, 98: 433-435.
- [12] HE W, FENG Y, HU Z, et al. Sensors with multifold nanorod metasurfaces array based on hyperbolic metamaterials[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(4): 1801-

- 1806.
- [13] AHN S, LEE K, KIM J. Fabrication of a 50 nm half-pitch wire grid polarizer using nanoimprint lithography[J]. *Nanotechnology*, 2005, 16(9): 1874-1877.
 - [14] 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.
YANG Jiangtao, WANG Jian'an, WANG Yin, et al. Study on preparation technology of subwavelength metal grating polarizer[J]. *Infrared Technology*, 2021, 43(1): 8-12.
 - [15] WANG Y, FU X H, CHEN Y Y, et al. The development progress of surface structure diffraction gratings: from manufacturing technology to spectroscopic applications[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(13): 6503.
 - [16] 褚金奎, 王倩怡, 王志文, 等. 双层金属纳米光栅的 TE 偏振光异常透射特性[J]. *物理学报*, 2015, 64(16): 274-280.
CHU Jinkui, WANG Qianyi, WANG Zhiwen, et al. Abnormal transmission characteristics of TE polarized light in double-layer metal nanogratings[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(16): 274-280.
 - [17] WU C L, HSUEH C H, LI J H. Surface plasmons excited by multiple layer grating[J]. *Optics Express*, 2019, 27(2): 1660-1671.
 - [18] JING X F, JIN Y X. Transmittance analysis of diffraction phase grating[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(9): C11-C18.
 - [19] RAKIC A D. Algorithm for the determination of intrinsic optical constants of metal films: application to aluminum[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(22): 4755-4767.
 - [20] XU C, XU Q, MA J, et al. Research on the polarization and temperature characteristics of subwavelength aluminum gratings[J]. *Journal of Optics*, 2014, 16(10): 105711.
 - [21] 康果果, 谭峤峰, 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, 60(1): 337-343.
KANG Guoguo, TAN Qiaofeng, CHEN Weili, et al. Experimental study on the design, fabrication and polarization imaging of subwavelength wire grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(1): 337-343.
 - [22] MOHARAM G M, GRANN B E, POMMET A D, 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*, 1995, 12(5): 1068-1076.
 - [23] NAVARRO E, GIMENA B, CRUZ J. Modelling of periodic structures using the finite difference time domain method combined with the Floquet theorem[J]. *Electronics Letters*, 1993, 29(5): 446-447.
 - [24] SUN J G, ZHENG C X. Numerical scattering analysis of TE plane waves by a metallic diffraction grating with local defects[J]. *Journal of the Optical Society of America. A-Optics, Image Science, and Vision*, 2009, 26(1): 156-162.
 - [25] FIONNUALA M, JING Q, KELSEY G, et al. Structural, optical, and electrical properties of silver gratings prepared by nanoimprint lithography of nanoparticle ink[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 537: 147892.
 - [26] ELISEEV A A, RAVODINA V O. Optics and spectroscopy principle for the design of interference light filters with two multilayers[J]. *Russian Physics Journal*, 1999, 41(10): 996-1000.
 - [27] HONKANEN M, KETTUNEN V, KUITTINEN M, et al. Inverse metal-stripe polarizers[J]. *Applied Physics B-Lasers and Optics*, 1999, 68(1): 81-85.
 - [28] EBBESEN W T, LEZEC J H, GHAEMI F H, et al. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays[J]. *Nature: International Weekly Journal of Science*, 1998, 391(6668): 667.
 - [29] 谈春雷, 易永祥, 汪国平. 一维金属光栅的透射光学特性[J]. *物理学报*, 2002(5): 1063-1067.
TAN Chunlei, YI Yongxiang, WANG Guoping. Transmission optical properties of one-dimensional metal grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002(5): 1063-1067.
 - [30] CAO Q, LALANNE P. Negative role of surface plasmons in the transmission of metallic gratings with very narrow slits[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 88(5): 057403.
 - [31] 孙宝玉, 许济琛, 谷岩, 等. 振动辅助纳米压印制备大面积光栅结构[J]. *应用光学*, 2022, 43(1): 124-130.
SUN Baoyu, XU Jichen, GU Yan, et al. Preparation of large-area grating structure by vibration-assisted nanoimprint[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(1): 124-130.