

# 基于全介质共振域光栅的偏振器件设计与制备

魏张帆<sup>1,2</sup>, 胡敬佩<sup>1,2\*</sup>, 张冲<sup>1,2</sup>, 董延更<sup>1,2</sup>, 曾爱军<sup>1,2\*\*</sup>, 黄惠杰<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

**摘要** 基于共振域光栅的特性,采用商用绝缘硅片设计并制备了一种用于近红外通信波段的高性能偏振器件。在 1.460~1.625  $\mu\text{m}$  的波长范围内,利用时域有限差分算法设计了一种周期为 0.98  $\mu\text{m}$  的全介质共振域光栅,该光栅的消光比最大值为 55 dB。根据设计结果,采用电子束直写曝光技术对该偏振光栅进行了实验制备,并进行偏振性能测试。结果表明,该光栅的横向磁场偏振光透过率约在 80% 以上,消光比在 20 dB 以上,最大值可达到 32 dB,与仿真结果基本一致。相比于传统亚波长金属光栅的周期需要小于 1/4 入射光波长才能起偏的性质,该偏振光栅在周期为近波长的条件下即有较好的偏振性能,在制备上降低了光刻工艺的难度。此外,该偏振器件是基于商用绝缘硅片制备,与现有的成熟半导体工艺兼容,具有较强的集成性和实用性。

**关键词** 光学器件; 偏振器; 绝缘硅片; 共振域光栅; 透过率; 消光比

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1201005

## Design and Fabrication of Polarizer Based on All-Dielectric Resonance-Domain Grating

Wei Zhangfan<sup>1,2</sup>, Hu Jingpei<sup>1,2\*</sup>, Zhang Chong<sup>1,2</sup>, Dong Yangeng<sup>1,2</sup>, Zeng Aijun<sup>1,2\*\*</sup>,  
Huang Huijie<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Information Optics and Optoelectronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Based on the characteristics of resonance-domain grating, a high performance polarizer for near-infrared communication band is designed and fabricated using commercial silicon-on-insulator(SOI). In the wavelength range of 1.460  $\mu\text{m}$  to 1.625  $\mu\text{m}$ , an all-dielectric resonance-domain grating with a period of 0.98  $\mu\text{m}$  is designed by use of finite difference time domain method. The maximum extinction ratio of the grating is up to 55 dB. According to the results of the design, the polarization grating is experimentally fabricated by electron beam lithography and the polarization performance of grating is measured. Experimental results show that the transmission of transverse magnetic polarized light of grating exceeds 80%, the extinction ratio of the polarization grating is more than 20 dB, and the maximum value can reach up to 32 dB, agreeing well with the simulation results. Compared with the polarization characteristics of the traditional sub-wavelength metal grating whose period requires less than a quarter of the incident light wavelength, the polarization grating exhibits good polarization performance with near wavelength grating period, reducing the difficulty of lithography in fabrication. Moreover, the polarizer is fabricated based on commercial SOI, which is compatible with the existing mature semiconductor technology and has strong integration and practicability.

**Key words** optical devices; polarizer; silicon-on-insulator; resonance-domain grating; transmission; extinction ratio

**OCIS codes** 230.3990; 050.1940; 230.1950

收稿日期: 2020-07-02; 修回日期: 2020-07-22; 录用日期: 2020-07-30

基金项目: 国家自然科学基金(61805264)、上海市扬帆计划(18YF1426500)、上海市自然科学基金(19ZR1464300)、江苏省重点实验室开放性课题(KJS1713)

\*E-mail: hujingpei@siom.ac.cn; \*\*E-mail: aijunzeng@siom.ac.cn

# 1 引 言

偏振器件作为红外夜视仪、偏振光谱仪及偏振成像相机等偏振光学系统中的关键器件之一<sup>[1-3]</sup>,受到了学者们越来越多的关注。传统的偏振器件包括二向色性偏振器、相位调制器、双折射晶体棱镜以及玻璃片堆等<sup>[4-6]</sup>,它们成本低,但结构一般比较笨重,且入射光束需要满足特定条件才能工作,不利于光学系统的小型化和稳定性。随着光刻技术的不断发展,可以制备出周期为亚波长的光栅偏振器件,其结构小巧、适合集成化,具有较好的偏振性能,因此其在偏振控制光学系统中得到了广泛的应用<sup>[7-10]</sup>。

目前,大多数亚波长光栅偏振器件是基于金属材料的表面等离子共振效应来实现入射光偏振分量的选择,其金属光栅周期一般需要小于1/4入射光的波长,因此在近红外以及可见光波段对加工工艺要求较高,难以制备。此外,金属光栅偏振器件存在固有的本征吸收,机械稳定性和温度稳定性较差。近些年来,全介质光栅以其几乎不存在的本征吸收、较高的抗外力和温度稳定性等优点引起了学者们的关注<sup>[11]</sup>。Yamada等<sup>[12]</sup>在双面镀有SiO<sub>2</sub>的硅片上制备了周期为400 nm的钨化硅(WSi)光栅,在4~5 μm的波长范围内,其横向磁场偏振光的透过率为90%左右,消光比约为24 dB。通过减小光栅周期至230 nm,该光栅的工作波长范围调整到1~1.6 μm,横向磁场偏振光透过率为80%左右,消光比降至20 dB左右。虽然以上所述的介质光栅具有较好的透过率和偏振性能,但其光栅周期较小,且选用的介质材料在现有的半导体工艺中不常用,因此该类偏振器件的实用价值受到了一定的限制。

为解决光栅偏振器件的制备工艺与现有的成熟半导体工艺兼容的难题,本文采用全介质商用绝缘硅片(SOI)设计并制备了一种用于近红外通信波段的高性能偏振器件。利用时域有限差分(FDTD)算法对全介质共振域光栅进行设计及仿真,并对设计的偏振光栅进行实验制备及偏振性能测试,结果表明,在1.460~1.625 μm的波长范围内,该偏振器件有着较高的横向磁场偏振光透过率和偏振消光比,与仿真结果基本一致。此外,该偏振器件采用的绝缘硅片为商用的半导体材料,在光通信等领域具有较高的应用价值。

# 2 全介质共振域光栅的优化设计与仿真

## 2.1 全介质共振域光栅的单元设计

本文选用的绝缘硅片各层的参数如下:硅基底层的厚度为675 μm,埋氧层的厚度为3 μm,硅光栅层的厚度为0.22 μm。图1为本文设计的全介质共振域光栅结构示意图,该结构可由刻蚀绝缘硅片的单晶硅光栅层得到,其中,光栅周期为P,宽度为W,硅光栅层和埋氧层的厚度分别为H<sub>2</sub>和H<sub>1</sub>。利用基于时域有限差分法的软件(Lumerical FDTD solutions, Canada)对该光栅的结构参数和偏振性能进行优化设计及仿真,对x和y轴方向上的边界使用周期性边界条件(PBC),对z轴方向上的边界使用完美匹配层边界条件(PML)<sup>[13]</sup>。其中,硅光栅层、埋氧层及硅基底层的介电常数均采用Palik。设定入射光波长范围为1.3~1.7 μm,横向磁场偏振光(以下简称TM偏振光)和横向电场偏振光(以下简称TE偏振光)沿着z轴正方向垂直于硅基底层入射,以提高该光栅的TM偏振光透过率及消光比为目标进行优化。

其中,消光比定义为<sup>[14]</sup>

$$f_{ER} = 10 \lg(T_{TM}/T_{TE}), \quad (1)$$

式中:T<sub>TM</sub>和T<sub>TE</sub>分别为光栅的TM和TE偏振光透过率。

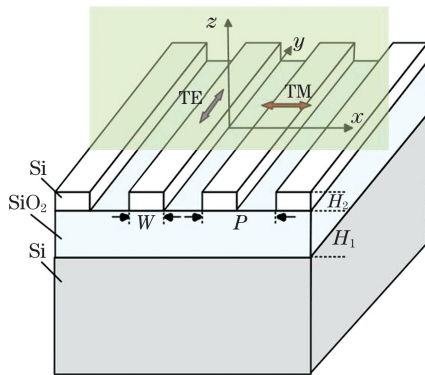


图1 基于绝缘硅片的共振域光栅结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of resonance-domain grating structure based on SOI

## 2.2 全介质共振域光栅中周期的优化

为了分析在近红外通信波段范围内该全介质共振域光栅的偏振性能,在1.3~1.7 μm的波长范围内仿真了不同的光栅周期P对光栅的TM和TE偏振光透过率及消光比的影响。为了使仿真结果易于分析,其他结构参数(H<sub>1</sub>=3 μm, H<sub>2</sub>=220 nm,

$W=340\text{ nm}$ )在优化过程中保持不变。仿真结果如图 2 所示,实线和虚线分别代表 TM 和 TE 偏振光。由图 2(a)可知,随着光栅周期  $P$  的增大, TM 偏振光透过率曲线的谷值和 TE 偏振光透过率曲线的峰值均发生了红移现象,受其影响,消光比曲线的峰值和谷值也发生了红移现象,如图 2(b)所示。出现该现象的原因是,当 TM 和 TE 偏振光与具有周期性

折射率的硅光栅层耦合时,会出现不同模式的波,其在介质内部发生干涉相消或相长的现象。这些干涉相消或相长的波段会受光栅层厚度、光栅周期和占空比( $W/P$ )的影响,导致共振波长的漂移<sup>[15]</sup>。在通信波段范围内对图 2(b)的消光比曲线进行分析,最终设定该光栅的周期  $P=0.98\ \mu\text{m}$ ,容差范围为  $\pm 5\text{ nm}$ 。

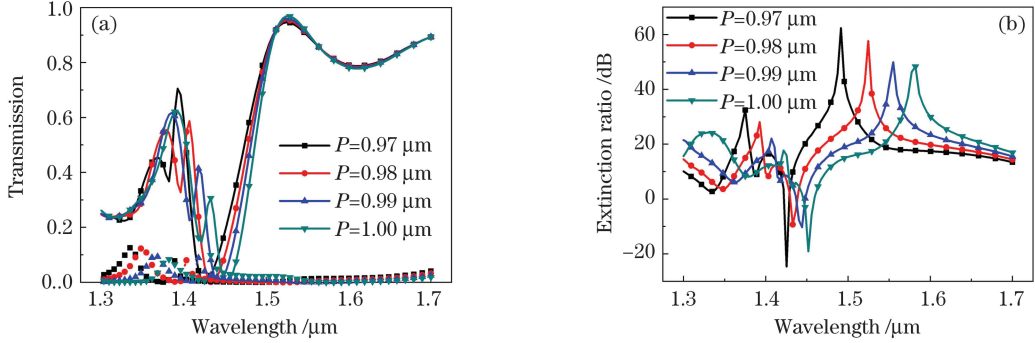


图 2 不同光栅周期的全介质共振域光栅透过率和消光比变化曲线。(a)透过率曲线;(b)消光比曲线

Fig. 2 Transmission and extinction ratio variation curves of all-dielectric resonance-domain grating with different grating periods. (a) Transmission curves; (b) extinction ratio curves

### 2.3 全介质共振域光栅中宽度的优化

和 2.2 节类似,光栅结构参数  $P=0.98\ \mu\text{m}$ ,  $H_1=3\ \mu\text{m}$ ,  $H_2=220\text{ nm}$  保持不变,在  $1.3\sim 1.7\ \mu\text{m}$  的波长范围内仿真了不同的光栅宽度  $W$  对光栅的 TM 和 TE 偏振光透过率及消光比的影响,如图 3 所示,实线和虚线分别代表 TM 和 TE 偏振光。由图 3(a)可知,当光栅宽度  $W$  在  $0.32\sim 0.38\ \mu\text{m}$  范围内时,随着光栅宽度的增大, TM 偏振光的透过率曲线整体发生了红移现象,且峰值增大,谷值减小;

TE 偏振光的透过率曲线发生了蓝移现象。出现该现象的原因是,光栅的占空比随着光栅宽度的增大而增大,导致 TM 和 TE 偏振光透过率曲线干涉相消的波段发生了变化。由图 3(b)可知,消光比曲线的有效工作波段随着光栅宽度的增大而减小,这是由于 TM 偏振光透过率曲线的谷值(约为  $1.42\ \mu\text{m}$ )发生了红移现象。因此,为了保证一定的工作波段和消光比,最终设定该光栅的宽度  $W=0.34\ \mu\text{m}$ ,容差范围为  $\pm 10\text{ nm}$ 。

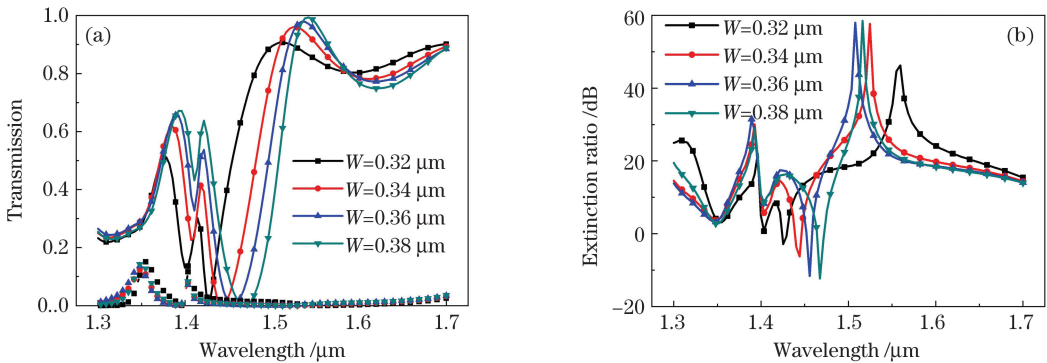


图 3 不同光栅宽度的全介质共振域光栅透过率和消光比变化曲线。(a)透过率曲线;(b)消光比曲线

Fig. 3 Transmission and extinction ratio variation curves of all-dielectric resonance-domain grating with different grating widths. (a) Transmission curves; (b) extinction ratio curves

### 2.4 硅光栅层刻蚀深度对光栅偏振性能的影响

本小节分析硅光栅层的不同刻蚀深度对光栅的 TM 和 TE 偏振光透过率及消光比的影响。在仿真

过程中,设置刻蚀深度的基准为  $0.22\ \mu\text{m}$ ,光栅结构参数  $P=0.98\ \mu\text{m}$  和  $W=0.34\ \mu\text{m}$ ,设置不同的刻蚀深度进行仿真。仿真结果如图 4 所示,其中,  $D$

表示基准与实际刻蚀深度的差值,实线和虚线分别代表 TM 和 TE 偏振光。图 4(a)为光栅的 TM 和 TE 偏振光透过率随不同刻蚀深度的变化曲线。由图 4(a)可知,当刻蚀深度为  $0.195\ \mu\text{m}$ ,即硅光栅层的残留厚度为  $25\ \text{nm}$  时, TM 偏振光透过率曲线出现了下降的趋势,同时 TE 偏振光透过率曲线的谷值出现了紊乱的变化,在通信工作波段范围内( $1.45\sim$

$1.6\ \mu\text{m}$ )光栅几乎没有偏振性。当刻蚀深度大于基准 ( $D<0$ ),即出现过度刻蚀时, TM 和 TE 偏振光透过率曲线基本不变,然而,消光比对 TE 偏振光透过率的敏感性导致了图 4(b)中消光比曲线的峰值随着刻蚀深度的增大而减小,并且发生了蓝移现象。因此,在光栅制备过程中,刻蚀深度作为一个严格的指标需要尽可能保证其精度,容差范围为  $-10\sim 0\ \text{nm}$ 。

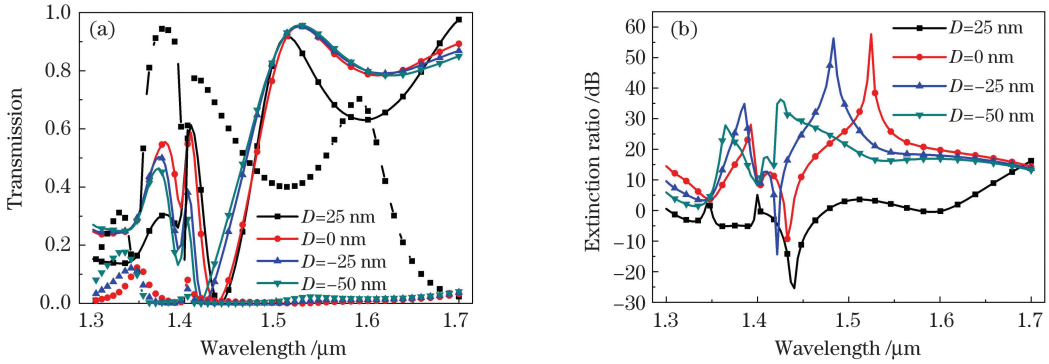


图 4 不同刻蚀深度的全介质共振域光栅透过率和消光比变化曲线。(a)透过率曲线;(b)消光比曲线

Fig. 4 Transmission and extinction ratio variation curves of all-dielectric resonance-domain grating with different etch depths. (a) Transmission curves; (b) extinction ratio curves

### 3 全介质共振域光栅的偏振效应机理分析

为了研究全介质共振域光栅在近红外波段 ( $1.3\sim 1.7\ \mu\text{m}$ ) 范围内的偏振效应机理,根据优化后的光栅结构参数 ( $P=0.98\ \mu\text{m}, W=0.34\ \mu\text{m}, H_1=3\ \mu\text{m}, H_2=0.22\ \mu\text{m}$ ),对当 TM 和 TE 偏振光正入射时,光栅的透过率、反射率和吸收率随不同入射光波长的变化进行了仿真,变化曲线如图 5(a)和 (b)所示,其中,  $T$ 、 $R$ 、 $A$  线分别代表光栅的透过率、反射率和吸收率变化曲线。在通信波段范围内,由图 5(a)可知,当 TM 偏振光正入射时,大部分光可以透过光栅传输,小部分光被反射,几乎没有被吸收;由图 5(b)可知,当 TE 偏振光正入射时,绝大部分光被光栅反射,极少部分光可以透过光栅传输,同样几乎没有被吸收。此外,为了研究 TM 和 TE 偏振光与全介质共振域光栅不同的耦合作用,分别仿真了波长为  $1.53\ \mu\text{m}$  的两种偏振光正入射时光栅内部的电场横截面分布,如图 5(c)和 (d)所示,在光栅消光比最大处即波长为  $1.53\ \mu\text{m}$  时, TM 与 TE 偏振光正入射在光栅内部引起的电场分布有显著的区别。由图 5(c)可知,当 TM 偏振光正入射时,仅在硅光栅层区域周围形成了强电场,电场能量几乎可以透过硅光栅层传输;由图 5(d)可知,当 TE 偏

振光正入射时,与 TM 偏振光入射的情况相反,全部电场能量几乎都被限制在硅光栅层和埋氧层区域。由 TM 和 TE 偏振光与共振域光栅相互作用的电场分布可知,不同的偏振光在光栅中的干涉模式不同,选取特定的光栅结构参数使 TM 偏振光透过率曲线干涉相长的波段和 TE 偏振光透过率曲线干涉相消的波段重合,从而得到高消光比的偏振器件。此外,由图 5(c)和 (d)可以清晰地观察到, TM 和 TE 偏振光都可以在埋氧层和硅基层产生干涉条纹的现象,这是由硅光栅层和埋氧层之间的界面以及埋氧层和硅基层之间的界面共同形成的法布里-珀罗干涉效应所引起的,该效应在一定程度上会降低光栅的偏振性能。

### 4 全介质共振域光栅的实验研究

为了验证理论设计结果的准确性,根据设计结果,对全介质共振域光栅进行实验制备。实验选用的绝缘硅片为英国 IceMOS 公司产品,对绝缘硅片的硅基层进行抛光后,在硅光栅层上旋涂一层电子束光刻胶(厚度为  $100\ \text{nm}$ ),然后采用电子束直写曝光机进行曝光,最后进行显影、刻蚀和清洗,得到所设计的全介质共振域光栅。为降低刻蚀深度偏差的影响,在刻蚀过程中先使用陪片进行了刻蚀速率的精确测试。图 6 为制备的全介质共振域光栅扫描



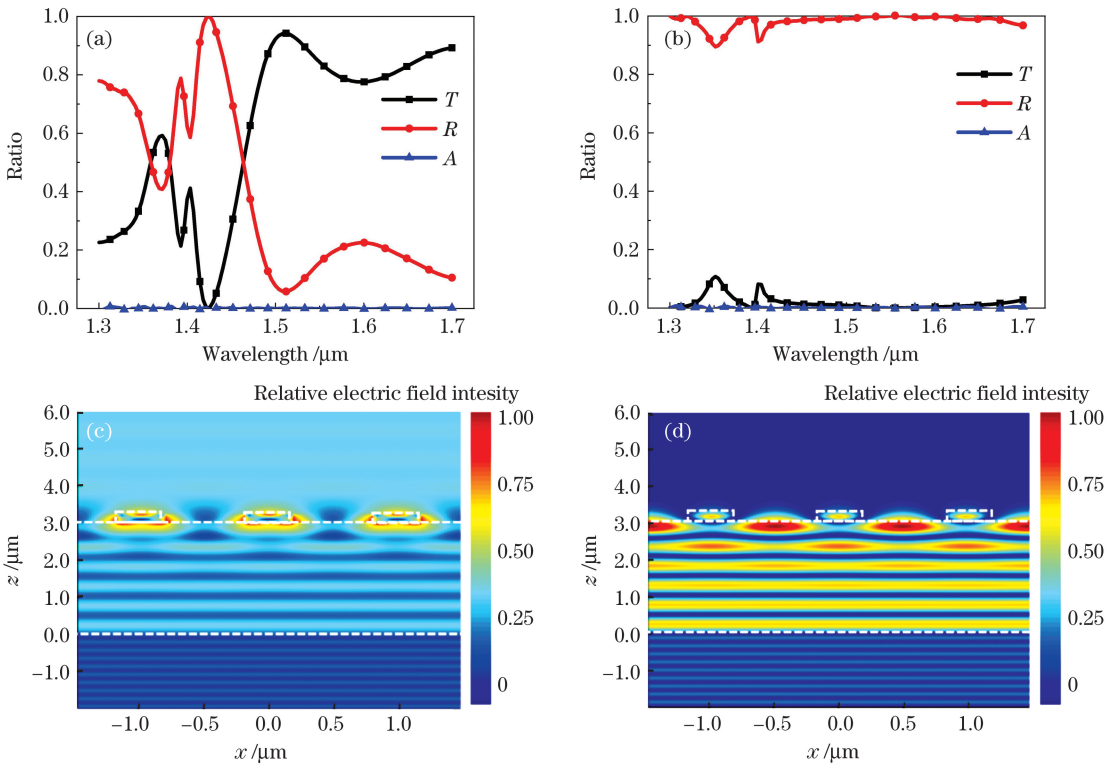


图 5 全介质共振域光栅在不同偏振光正入射时透过率、反射率和吸收率随不同入射光波长的变化曲线及在  $1.53 \mu\text{m}$  入射波长下,光栅内部的电场横截面分布。(a)(c) TM 偏振光;(b)(d) TE 偏振光

Fig. 5 Transmission, reflection, and absorption variation curves of all-dielectric resonance-domain grating with different incident light wavelengths and cross section distributions of electric field inside grating at wavelength of  $1.53 \mu\text{m}$  under the normal incidence of different polarized lights. (a) (c) TM polarized light; (b) (d) TE polarized light

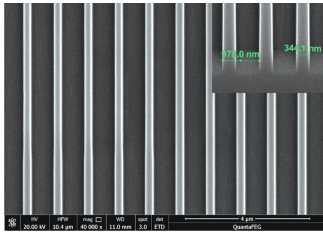


图 6 全介质共振域光栅偏振器件的扫描电镜图

Fig. 6 Scanning electron micrograph of all-dielectric resonance-domain grating polarizer

电镜图,其中,右上方的插图为分析得到的光栅结构参数( $P=0.978 \mu\text{m}, W=0.3441 \mu\text{m}$ ),与设计结构参数( $P=0.98 \mu\text{m}, W=0.34 \mu\text{m}$ )基本相同。

为了验证制备的全介质共振域光栅偏振性能,搭建测试装置对其进行透过率测试。测试装置原理图如图 7 所示,激光器发出的连续光谱经单色仪分光,再通过准直系统和红外偏振片后入射到光栅上,光束透射通过光栅后由能量探测器接收。利用实验测试结果与上述优化仿真曲线进行了对比分析,如图 8 所示,其中,仿真曲线的参

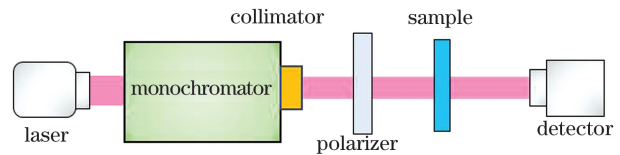


图 7 全介质共振域光栅偏振器件的偏振性能测试原理图  
Fig. 7 Schematic of polarization performance measurement for all-dielectric resonance-domain grating polarizer

数如下: $P=0.98 \mu\text{m}, W=0.34 \mu\text{m}, H_1=3 \mu\text{m}, H_2=0.22 \mu\text{m}$ 。图 8(a)为 TM 和 TE 偏振光分别通过制备的光栅后透过率测试结果(方点、圆点)与仿真曲线,图 8(b)为基于透过率测试结果得到的消光比结果(圆点)与仿真曲线。由图 8(a)和(b)可知, TM 和 TE 偏振光透过率测试值与仿真值基本一致,但是,消光比测试值与仿真值相比有所减小,尤其峰值出现了比较明显的减小并且发生了蓝移现象。出现该现象的原因是,测试结果受到测试过程中探测器灵敏度的影响,即当探测得到的 TE 偏振光光强低于探测器的灵敏度时,它会被探测器的背景噪声所淹没,导致消光比峰值的减小。

此外,在制备过程中出现过度刻蚀也会导致消光比

的峰值发生蓝移现象。

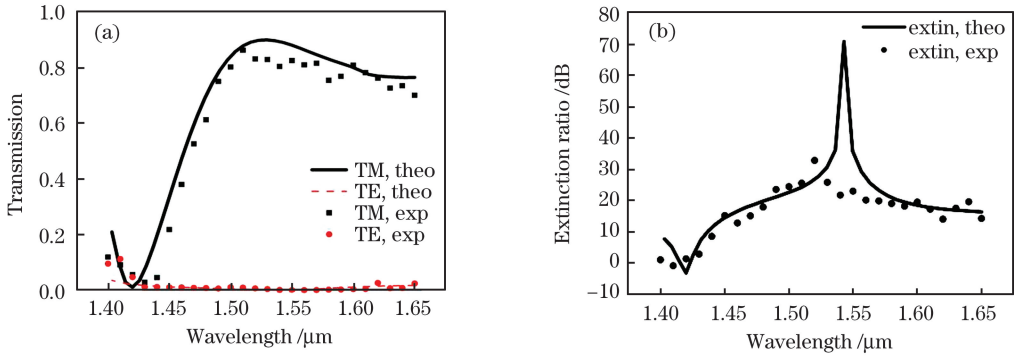


图 8 全介质共振域光栅偏振器件的实验测试结果与仿真曲线。(a) TM 和 TE 偏振光透过率;(b)消光比

Fig. 8 Experimental results and simulation curves of all-dielectric resonance-domain grating polarizer. (a) Transmission of TM and TE polarized light; (b) extinction ratio

## 5 结 论

本文基于全介质共振域光栅设计并制备了一种用于近红外通信波段的高性能偏振器件。在 1.460~1.625 μm 的波长范围内,通过 FDTD 优化设计及仿真,该全介质共振域光栅的周期为 0.98 μm,宽度为 0.34 μm,刻蚀深度为 0.22 μm,消光比最大值可达到 55 dB。根据设计的光栅结构参数,对该偏振光栅进行了实验制备和偏振性能测试,结果表明,光栅周期和宽度与设计值基本一致,光栅的 TM 偏振光透过率约在 80% 以上,最大消光比为 32 dB,具有较好的偏振性能,验证了仿真结果的准确性。此外,该全介质共振域光栅是基于商用的绝缘硅片进行设计与制备,与现有的成熟半导体工艺兼容性强,对近红外超薄偏振器件的集成化和产品化具有较高的应用价值。

## 参 考 文 献

[1] Korte E H, Roseler A. Infrared spectroscopic ellipsometry: a tool for characterizing nanometer layers[J]. *Analyst*, 1998, 123(4): 647-651.

[2] Vollmer M, Henke S, Karstädt D, et al. Identification and suppression of thermal reflections in infrared thermal imaging[J]. *InfraMation*, 2004, 5: 287-298.

[3] Wu Z, Powers P E, Sarangan A M, et al. Optical characterization of wiregrid micropolarizers designed for infrared imaging polarimetry[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(15): 1653-1655.

[4] Ren H W, Fan Y H, Wu S T. Prism grating using polymer stabilized nematic liquid crystal[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(19): 3168-3170.

[5] Soares L L, Cescato L. Metallized photoresist grating as a polarizing beam splitter[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(32): 5906-5910.

[6] Fellows N, Sato H, Lin Y, et al. Dichromatic color tuning with InGaN-based light-emitting diodes[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(12): 121112.

[7] Jin Q F, Liu Q, Wu J H, et al. Design and fabrication of nanowire-grid polarizer in near-infrared broadband[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8556: 85561F.

[8] Ekinci Y, Solak H H, David C, et al. Bilayer Al wire-grids as broadband and high-performance polarizers[J]. *Optics Express*, 2006, 14(6): 2323-2334.

[9] Li M K, Xiang X S, Zhou C H, et al. Two-dimensional grating fabrication based on ultra-precision laser direct writing system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 0905001.

李民康, 向显嵩, 周常河, 等. 基于超精密激光直写系统制作二维光栅[J]. *光学学报*, 2019, 39(9): 0905001.

[10] Shen C, Wei S, Yu H X, et al. Model of liquid crystal on silicon device with sub-wavelength grating structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(3): 0305001.

沈川, 韦穗, 虞海秀, 等. 基于亚波长光栅结构的硅基液晶器件模型研究[J]. *光学学报*, 2020, 40(3): 0305001.

[11] Weber T, Kroker S, Käsebier T, et al. Silicon wire grid polarizer for ultraviolet applications[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(34): 8140-8144.

[12] Yamada I, Fukumi K, Nishii J, et al. Near-infrared polarizer with tungsten silicide wire grids[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2011, 50(1): 012502.

- [13] Zhang C, Hu J P, Zhou R Y, et al. Design and analysis of inverse polarization grating devices for deep ultraviolet light[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0301005.  
张冲, 胡敬佩, 周如意, 等. 深紫外光栅反常偏振器件的设计与分析[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0301005.
- [14] Ye Y, Zhou Y, Zhang H, et al. Polarizing color filter based on a submicron metal grating[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0405003.  
叶燕, 周云, 张恒, 等. 金属光栅型偏振彩色滤光片[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0405003.
- [15] Karagodsky V, Sedgwick F G, Chang-Hasnain C J. Theoretical analysis of subwavelength high contrast grating reflectors[J]. Optics Express, 2010, 18(16): 16973-16988.