

文章编号:1002-2082(2019)01-0138-05

# 亚波长光栅偏振片的纳秒脉冲激光损伤特性

史帅凯<sup>1,2</sup>, 焦宏飞<sup>1,2</sup>, 马彬<sup>1,2</sup>, 程鑫彬<sup>1,2</sup>, 张锦龙<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 先进微结构材料教育部重点实验室, 上海 200092;

2. 同济大学 物理科学与工程学院 精密光学工程技术研究所, 上海 200092)

**摘要:**偏振片在诸多光学系统中有着重要的应用。亚波长介质光栅可用作正入射偏振片, 在高能激光系统中有着广泛的应用前景。为了探究波长为 1 064 nm 的纳秒脉冲激光对于亚波长全介质光栅的诱导损伤特性, 使用了粒子群优化算法结合严格耦合波分析设计了光栅的几何参数, 计算表明亚波长光栅偏振片在入射光波长 1 064 nm 附近带宽 0.5 nm 内, 平均消光比为 1 500。使用了紫外曝光配合离子束刻蚀的工艺制备了  $\text{HfO}_2$  光栅, 并对其纳秒脉冲激光损伤阈值进行了测试。测试结果表明 S 光损伤阈值约为 P 光损伤阈值的 5 倍, 且都大于  $5 \text{ J/cm}^2$ 。结果表明亚波长全介质光栅偏振片可广泛用于正入射激光系统中。

**关键词:**偏振; 亚波长光栅; 损伤阈值; 激光系统

**中图分类号:** TN247; O436

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.5768/JAO201940.0107002

## Nanosecond pulse laser damage characteristics of sub-wavelength gratings polarizers

SHI Shuaikai<sup>1,2</sup>, JIAO Hongfei<sup>1,2</sup>, MA Bin<sup>1,2</sup>, CHENG Xinbin<sup>1,2</sup>, ZHANG Jinlong<sup>1,2</sup>

(1. MOE Key Laboratory of Advanced Micro-Structured Materials, Shanghai 200092, China; 2. Institute of Precision Optical Engineering, School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Polarizers are important components for many optical systems. Sub-wavelength dielectric gratings can be used as polarizers under normal incidence, and these have broad application prospects in high-energy laser systems. In order to investigate the induced damage characteristics of nanosecond pulse laser with wavelength of 1 064 nm for subwavelength all dielectric gratings, the particle swarm optimization algorithm was used to design the geometric parameters of the grating with rigorous coupled wave analysis. The calculation results show that the subwavelength grating polarizer has 0.5 nm bandwidth and a theoretical extinction ratio of 1 500 at wavelength of 1 064 nm. This grating was fabricated by ultraviolet (UV) exposure and ion beam etching, and its nanosecond pulsed laser damage threshold was tested. The test results show that the laser induced damage threshold of S polarized light is about 5 times of that of P polarized light, and all of them are greater than  $5 \text{ J/cm}^2$ . The results indicate that the sub-wavelength all dielectric grating polarizers can be widely used in laser system under normal incidence.

**Key words:** polarization; sub-wavelength grating; laser-induced damage threshold; laser systems

**收稿日期:** 2018-08-10; **修回日期:** 2018-09-28

**基金项目:** 国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金 (U1430130, U1630124); 国家自然科学基金 (91536111, 61235011)

**作者简介:** 史帅凯 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事亚波长光栅器件与应用方面的研究。

E-mail: shishuaikai@tongji.edu.cn

**通信作者:** 张锦龙 (1982—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事低损耗薄膜, 激光薄膜设计、制备、检测, 激光与物质相互作用研究。E-mail: jinlong@tongji.edu.cn

## 引言

偏振是电磁波的基本特性,偏振技术在诸多方面有着重要的应用。例如,偏振成像<sup>[1]</sup>可减少物体反射光,增加图像饱和度;光学存储<sup>[2]</sup>利用光的不同偏振态记录信息;弹光效应<sup>[3]</sup>由透过被测物的偏振光推测被测物内部应力分布以及3D电影的放映。线偏振器是这些光学系统中的核心部件,通常使用以下器件作为偏振片:双折射晶体<sup>[3]</sup>,由于双折射晶体对于不同偏振方向的线偏振光有着不同的折射率,通过此原理可设计得到双折射棱镜作为偏振片,但是这种棱镜往往体积较大,不适用于集成光学与大口径光学系统;线栅型偏振片<sup>[4-5]</sup>,由于其内部包含金属,往往存在显著的欧姆损耗,仅可用于低能量光学系统中;作为光学薄膜中的重要分支,偏振薄膜在光电调制中扮演着不可替代的角色。由膜系设计理论<sup>[6]</sup>可设计得到高透过率、高消光比、极低损耗的偏振片。但是由于光束在正入射时的旋转对称性,此类偏振片仅能工作在光束斜入射情形下。

为了获得低损耗、高透过率、高消光比且能工作在正入射情况下的偏振片, Lee 等人提出由亚波长硅光栅设计偏振片<sup>[7]</sup>,并且在实验上得到工作于不同波段,性能优异的亚波长光栅型偏振片<sup>[8]</sup>。此类偏振片有望应用于高能激光系统中,本文设计并且制备了材料为氧化铪的亚波长光栅,并且针对入射光波长为 1 064 nm 的纳秒脉冲激光对于亚波长光栅的损伤特性进行了研究,用以探究其在高能激光系统中的应用。

## 1 理论分析设计方法

通常情况下,亚波长光栅的 0 级次反射效率比较低,但在有“导模共振<sup>[9]</sup>”存在时,光栅内部的高级次倏逝波以泄漏模的形式与入射光耦合,使得能量重新分布,致使 0 级次反射效率在某些分立的波长处接近于 100%。在光束正入射时,因为一维光栅表面各项异性,对不同偏振态的入射光有着不同的振幅响应,就一维光栅来说导模共振效应通常是偏振敏感的。例如,入射介质与光栅间隙为空气,光栅介质为  $\text{HfO}_2$  ( $n_{\text{HfO}_2} = 1.9$ ),基底为  $\text{SiO}_2$  ( $n_{\text{SiO}_2} = 1.45$ )。在光束正入射情形下,使用严格耦合波分析<sup>[10-11]</sup>计算其 0 级反射效率。如图 1 所示,横坐标为入射光的归一化波长,纵坐标为光

栅归一化厚度。由导模共振效应产生的反射峰在不同偏振光入射时峰值位于不同波长处。选取图上不同位置的几何参数即可得到目标偏振片。

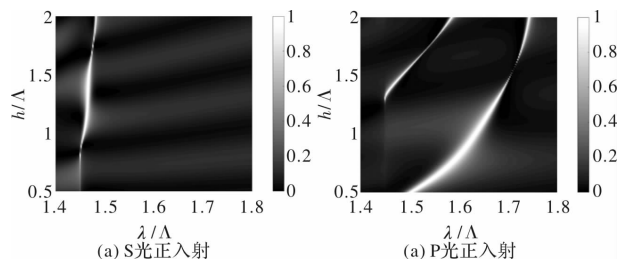


图 1 不同偏振光正入射时光栅 0 级反射效率

Fig. 1 0 order efficiency of different polarized lights at normal incidence

首先是光栅材料选择,为了探究亚波长光栅偏振片在高能激光系统中的应用,选取在 1 064 nm 波段低吸收金属氧化物  $\text{HfO}_2$  作为光栅材料。基底使用石英片 ( $n = 1.45$ )。由于制备光栅时刻蚀工艺的限制,要获得高深宽比,侧壁陡直的  $\text{HfO}_2$  光栅比较困难<sup>[12-13]</sup>。为此本文直接设计带剩余层的梯形  $\text{HfO}_2$  光栅,如图 2 所示。此类光栅刻蚀深度浅,且不要求侧壁陡直,易于刻蚀,制作成品率高。梯形光栅需要设计的几何参数如下:周期  $\Lambda$ 、光栅顶部占空比  $F_{\text{top}}$ 、光栅底部占空比  $F_{\text{bot}}$ 、光栅厚度  $D_{\text{up}}$  以及剩余层厚度  $D_{\text{sub}}$ 。

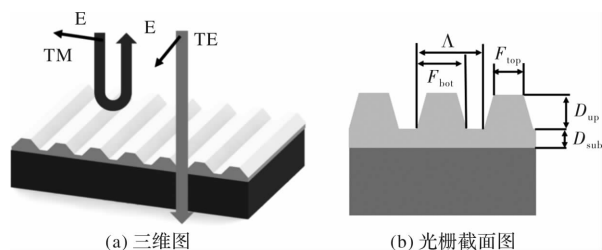


图 2 梯形光栅

Fig. 2 Diagrams of trapeziform grating structure

使用粒子群优化算法配合严格耦合波分析设计光栅的几何参数。使用均方根评价函数:

$$MF = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{\lambda_i} [(1 - T_{0\text{TE}}(\lambda_i))^2 + T_{0\text{TM}}(\lambda_i)^2] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

通过最小化评价函数,得到对应几何参数如下:  $\Lambda = 704 \text{ nm}$ 、 $F_{\text{top}} = 0.325$ 、 $F_{\text{bot}} = 0.852$ 、 $D_{\text{up}} = 241 \text{ nm}$ 、 $D_{\text{sub}} = 146 \text{ nm}$ 。不同偏振光正入射时,透射光谱如图 3 所示。计算表明亚波长光栅偏振片在入射光波长 1 064 nm 附近带宽 0.5 nm 内,平均消光比可达 1 500。

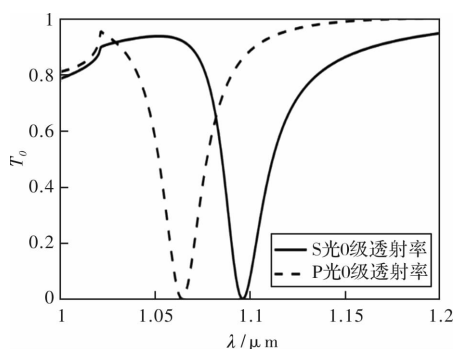


图3 理论计算光栅0级次透射光谱

Fig. 3 Theoretical calculation of 0 order transmission spectra of grating

## 2 光栅制备流程

光栅制备流程主要包括电子束蒸发镀制  $\text{HfO}_2$  单层膜与离子束刻蚀  $\text{HfO}_2$  单层膜两部分。具体流程示意图如图4所示。首先使用光驰公司的

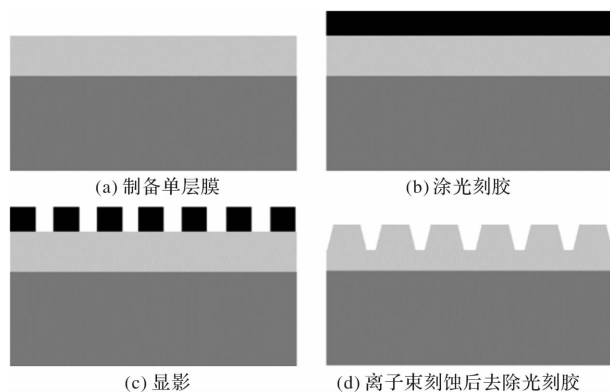


图4 光栅制备工艺流程图

Fig. 4 Flow chart of fabrication of etching grating

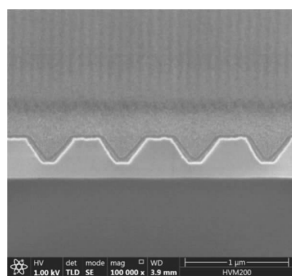


图5 光栅横截面扫描电镜图

Fig. 5 Cross-sectional SEM image of grating

OTFC 电子束蒸发镀膜机在直径 30 mm、厚度 1.5 mm 的石英基板上制备了单层  $\text{HfO}_2$  薄膜,如图4(a)所示。后通过旋涂法在单层膜表面旋涂一层 AZ1350 光刻胶,如图4(b)所示。使用紫外线对光刻胶进行曝光,经过显影液显影后制得光刻胶光栅为刻蚀  $\text{HfO}_2$  时的掩模,如图4(c)所示。后使用

Ar 作为工作气体对  $\text{HfO}_2$  进行离子束刻蚀,去除光刻胶后得到最终的  $\text{HfO}_2$  光栅如图4(d)所示。制备光栅后对光栅横截面拍摄了扫描电镜图片,如图5所示。由扫描电镜所测量的光栅几何尺寸与设计值基本一致。

## 3 光栅测试实验及分析

### 3.1 透射光谱测试

制备光栅样品后使用安捷伦 Cary5000 型光谱仪分别测试光栅处于  $0^\circ$  入射时的 S 光透射效率以及 P 光透射效率。测试时,波长间隔 1 nm,扫描速度 600 点/min。由测试结果反演得到光栅面透射率,即除去基板背面反射。实验光谱与理论计算光谱对比如图6所示。在光栅制备过程中刻蚀产物的再沉积以及光刻胶掩膜的变形等因素导致了最终光栅几何参数与设计值的偏差。在实际测试时,入射光束不是严格的平行光,有一定的入射角。这些原因都导致了最终测试光谱的偏移,影响了光栅偏振片的性能。

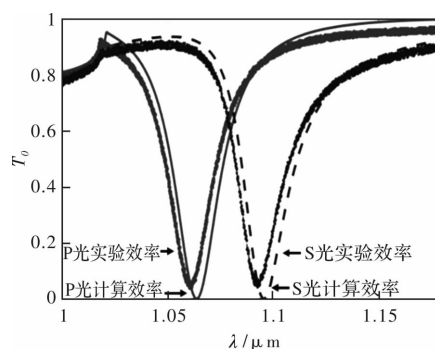


图6 实测光谱与理论计算光谱对比

Fig. 6 Comparison between measured spectra and theoretical calculation spectra

### 3.2 激光诱导损伤阈值测试

测试透射光谱后,接着使用纳秒脉冲激光测试了光栅的激光诱导损伤阈值。采用 S-on-1 测试方法,单个脉冲持续时间 10 ns,频率 10 Hz,TEM00 模式, $0^\circ$  入射。分别测试了 S 光、P 光辐照时的损伤阈值,在光栅样品上各取 20 个点,每点辐照 1 000 次。为了探究表面清洗工艺对于光栅激光损伤阈值的影响,分别取经过擦拭与未擦拭的光栅样品进行损伤阈值测试实验。光栅样品测试前后表面典型形貌,原子力显微镜测试结果如图7所示。图7(a)、图7(b)分别为损伤测试前光栅未清洗与清洗表面形貌。未清洗前光栅样品存在明

显的表面残留物,如未去除干净的光刻胶、灰尘等其他脏物,如图 7(a)中白色区域所示。经过无尘布蘸取无水乙醇与乙醚的混合液擦拭后,表面已无明显残留物,光栅结构也更加清晰,如图 7(b)所示。

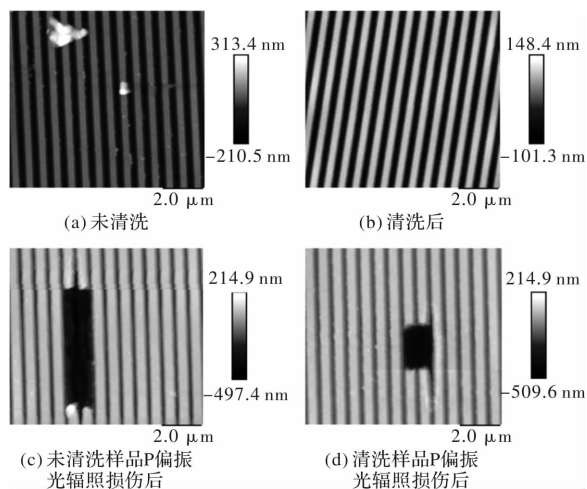


图 7 光栅表面形貌图

Fig. 7 Grating surface topography

经过 P 偏振光激光辐照损伤后,表面典型形貌如图 7(c)、图 7(d)所示。由原子力显微镜扫描结果可知,经过激光辐照损伤后,发生损伤位置处光栅已全部掉落,甚至石英基底也有部分掉落。未清洗样品经过激光辐照后光栅掉落面积大且断裂部分不整齐,如图 7(c)所示。清洗后样品经过激光辐照后,光栅掉落面积小且断裂部分整齐,如图 7(d)所示。这可能是由于未清洗样品表面残留物吸收系数较大,在激光辐照测试时存在明显吸收,使得激光对未清洗样品的烧蚀作用远大于经过清洗后的样品。

经过统计损伤测试过程中不同激光能量使光栅样品发生损伤的概率,经过线性拟合,如图 8 所示。选取损伤几率为零的最高激光能量作为其损伤阈值。从结果可以得出清洗过程可将损伤阈值提高约 20%。S 光损伤阈值约为 P 光的 5 倍。

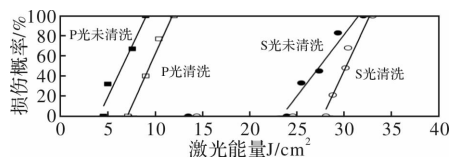


图 8 S-on-1 损伤测试结果

Fig. 8 Measurement results of S-on-1 damage

在波长为 1 064 nm 激光的纳秒损伤过程中,通常认为激光损伤阈值与电场强度负相关。为此

计算了在波长为 1 064 nm 线偏振光照射下光栅内部电场强度分布,入射光电场振幅归一化设为 1,结果如图 9 所示。P 光入射时,电场强度峰值已经超过 30,而 S 光对应峰值仅为 10 左右。且在 P 光入射时,电场强度峰值分布于光栅与基板交界处,如图 9(a)所示,可推测此处为激光辐照时最容易发生损伤的位置。这与损伤测试后 AFM 扫描深度相比较为一致,如图 7(c)、图 7(d)中深度标注所示,由此可判断光栅与基板交界处的烧蚀导致了光栅的整体掉落。

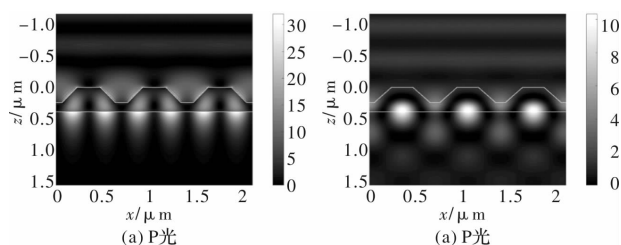


图 9 电场强度分布入射光分别为(a)P光(b)S光

Fig. 9 Electric field intensity distribution: (a) P polarized light and (b) S polarized light

## 4 结论

针对亚波长介质光栅在高能激光系统中的应用,设计并且制备了槽型为梯形的  $\text{HfO}_2$  单层光栅。对其透射光谱进行了测试,所得结果与理论计算光谱较为符合。探究了光栅偏振片的纳秒脉冲激光损伤特性,并且仿真了其电场强度分布,损伤形貌与电场强度分布预测损伤位置基本一致,这表明强电场增强了光栅以及基板亚表面中的缺陷吸收,最后产生热应力作用破坏了光栅结构。光栅的制备精度以及对应的损伤阈值还有待提高。此光栅型偏振片结构紧凑,易于刻蚀,在高能量激光系统中有广泛的应用前景。

## 参考文献:

- [1] LI Shujun, JIANG Huilin, ZHU Jingping, et al. Development status and key technologies of polarization imaging detection[J]. Chinese Optics, 2013, 6(6): 803-809.  
李淑军, 姜会林, 朱京平, 等. 偏振成像探测技术发展现状及关键技术[J]. 中国光学, 2013, 6(6): 803-809.
- [2] KIMEL A V, KIRILYUK A, RASING T. Femto-second opto-magnetism: ultrafast laser manipulation

- of magnetic materials[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2007, 1(3):275-287.
- [3] MAX B, EMIL W. Principles of optics[M]. 7th ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2006:699-701.  
马科斯·玻恩, 埃米尔·沃尔夫. 光学原理[M]. 7 版, 杨葭荪, 译. 北京: 电子工业出版社, 2006:699-701.
- [4] 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.
- [5] TAMADA H, DOUMUKI T, YAMAGUCHI T, et al. Al wire-grid polarizer using the s-polarization resonance effect at the 0.8-microm-wavelength band[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(6):419-421.
- [6] TANG Jinfa, GU Peifu, LIU Xu, et al. Modern optical thin film technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2007:167-171.  
唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州, 浙江大学出版社, 2007:167-171.
- [7] LEE K J, CURZAN J, SHOKOOH-SAREMI M, et al. Resonant wideband polarizer with single silicon layer [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98 (21): 211112.
- [8] LEE K J, GIESE J, AJAYI L, et al. Resonant grating polarizers made with silicon nitride, titanium dioxide, and silicon: design, fabrication, and characterization [J]. *Optics Express*, 2014, 22 ( 8 ): 9271-9281.
- [9] WANG S S, Magnusson R. Theory and applications of guided-mode resonance filters[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(14):2606-2613.
- [10] MOHARAM M G, GAYLORD T K. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1981, 71 (7):811-818.
- [11] MOHARAM M G, POMMET D A, GRANN E B, et al. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1995, 12 ( 5 ): 1077-1086.
- [12] WANG Xudi, XU Xiangdong, LIU Ying, et al. Ion beam etching of  $\text{HfO}_2$  film[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2004, 12(5):454-458.  
王旭迪, 徐向东, 刘颖, 等.  $\text{HfO}_2$  薄膜的离子束刻蚀特性研究[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(5):454-458.
- [13] XU Xiangdong, LIU Ying, QIU Keqiang, et al. Ion beam etching of multilayer dielectric pulse compressor gratings with top layer of  $\text{HfO}_2$  [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(23): 165-172.  
徐向东, 刘颖, 邱克强, 等.  $\text{HfO}_2$  顶层多层介质膜脉宽压缩光栅的离子束刻蚀[J]. *物理学报*, 2013, 62 (23):165-172.