

文章编号 1004-924X(2016)12-2962-07

用于强激光系统的光栅偏振器

刘全^{1,2*}, 吴建宏^{1,2}, 郭培亮¹

- (1. 苏州大学 物理与光电·能源学部 苏州纳米科技协同创新中心, 江苏 苏州 215006;
2. 苏州大学 江苏省先进光学制造技术重点实验室 教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006)

摘要:针对强激光系统中常用的1 053 nm激光器进行了偏振光栅结构的优化设计。利用严格耦合波理论分析了光栅偏振器的衍射特性及消光比,分析显示偏振光栅周期为600 nm,占宽比为0.535~0.55,槽形深度为1 395 nm~1 420 nm时,可保证其在1 053 nm波长下,透射率高于95%,消光比大于1 500。基于分析结果,利用全息光刻技术制作了高质量光刻胶光栅掩模,并采用倾斜转动的离子束刻蚀结合反应离子束刻蚀的方法对该光刻胶光栅掩模进行图形转移,制作了底部占宽比为0.54,槽形深度为1 400 nm的光栅偏振器。实验测量显示其透射率为92.9%,消光比达到160。与其他制作光栅偏振器方法相比,采用单光刻胶光栅掩模结合倾斜转动的离子束刻蚀工艺,不但简化了制作工艺,而且具有激光损伤阈值高、成本低的优点。由于该技术可制作大面积光栅,特别利于在强激光系统中应用。

关键词:高功率激光系统;光栅偏振器;严格耦合波理论;全息光刻;离子束刻蚀

中图分类号:O436.1;O436.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162412.2962

Grating polarizers for high power laser systems

LIU Quan^{1,2*}, WU Jian-hong^{1,2}, GUO Pei-liang¹

- (1. *College of Physics, Optoelectronics and Energy & Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China;*
2. *Key Laboratory of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province, Key Laboratory of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, Soochow University, Suzhou 215006, China*)
* *Corresponding author, E-mail: liuquan@suda.edu.cn*

Abstract: The structure of a grating polarizer in common 1053 nm lasers was optimized for high power laser systems. The diffraction characteristics and extinction ratio of the grating polarizer were investigated by using rigorous coupled-wave theory. The results show when the grating period, duty cycle and the groove depth of the grating are 600 nm, 0.535–0.55 and 1 395–1 420 nm at a wavelength of 1053 nm, respectively, the extinction ratio could be more than 1500, and the optical transmittance of the TM-polarized wave could be over 95%. Based on the above analysis, a high quality photoresist grating mask was made by holographic lithography. Then, it was transferred to the fused silica substrate by tilted rotating ion beam etching and reactive ion beam etching to fabricate a grating polarizer with the period of 600 nm, bottom duty cycle of 0.54 and the groove depth 1 400 nm. Experimental

收稿日期:2016-09-27;修订日期:2016-12-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60907017);上海市全固态激光器与应用技术重点实验室开放课题资助项目(No. 2014ADL02)

measurements on the grating polarizer show that the optical transmittance is 92.9% and the extinction ratio is 160. Compared with other fabricating methods for the grating polarizer, the proposed method only requires a single layer of photoresist grating mask, which simplifies the fabricating process, enjoys low costs and guarantees the high damage threshold of the grating. As the method can fabricate large scale gratings, it is suitable for applications to the high power laser systems.

Key words: high power laser system; grating polarizer; rigorous coupled-wave theory; holographic lithography; ion beam etching

1 引 言

在强激光系统中会大量使用各种偏光器件。例如美国“国家点火装置”中使用的大口径偏振片,其和大口径等离子体电极普克尔斯盒共同构成光隔离器^[1]。偏振片通常有双折射晶体、偏振分光膜和高分子膜 3 种实现方法^[2-4];自然界存在的双折射晶体具有偏振分光功能,但天然的双折射晶体数量较少且价格昂贵;多层膜技术是目前实现偏振的最常用技术,但不同膜层所用的材料不同,精确控制每层膜的厚度,其工艺复杂,成本较高;高分子膜起偏器/检偏器是将需要的偏振光透过,把不需要的偏振光吸收,对所透过的偏振光存在较大的吸收损耗。同时,偏振片具有越高的消光比,相应的成本也越高。

光栅作为一种常用的光学元件,在各类光学系统中起着重要作用^[5-7]。当光栅的周期尺寸接近或者小于入射光波长时,将表现出较强的偏振特性,利用光栅的偏振特性,可制作各种偏光器件,如偏振光检测器、偏振分束器、相位延迟器和各种波片等^[8-9]。同时在强激光系统中,熔石英光栅具有几乎等同于熔石英材料本身的高损伤阈值。可见熔石英亚波长光栅可以设计出针对任意波长的偏振光栅;具有较高的激光损伤阈值;可集成化和小型化;制作成本相对较低等,具有广阔的应用前景。

现有的亚波长光栅的制作技术,根据所使用的波段主要分为两大类:一、在可见光波段,由于光栅周期一般要小于 250 nm,故使用电子束直写制作光栅掩模,再利用反应离子刻蚀(RIE)或者反应离子束刻蚀(RIBE)将光栅结构转移到基片上,如 T. Glaser 等人^[10]设计制作了 543~633 nm 波段的偏振光栅,使用电子束直写制作掩模,采用 CF₄ 反应离子束刻蚀进行深槽制作,实验获

得最大消光比为 135;二、在近红外波段,除了可以使用电子束直写制作光栅掩模外,还可以利用全息光刻来制作光栅掩模,再利用反应离子刻蚀(RIE)将光栅结构转移到基片上,如周常河等人^[11]设计制作了 1 550 nm 的偏振分束光栅,就是使用全息光刻制作掩模,采用感应耦合等离子体刻蚀深槽形,实验获得最大消光比为 145。在深槽刻蚀制作时,为了获得更好的刻蚀选择比,一般都使用双层掩模,即光刻胶掩模和金属铬掩模。

本文针对强激光系统中常用的 1 053 nm 激光器,进行了偏振光栅结构的优化设计。实验上采用全息光刻技术制作高质量光栅掩模;再使用倾斜转动的离子束刻蚀结合反应离子束刻蚀进行高深宽比结构的刻蚀。实验证明所采用的高质量单层光刻胶掩模,在保证实现偏振光栅的高深宽比结构要求的同时,简化了制作工艺,具有激光损伤阈值高、操作简便和成本低等优点。

2 光栅偏振器的设计

图 1 所示为偏振光栅结构示意图, n_1 和 n_2 分别为空气和石英的折射率, Λ 为光栅的周期, a 为线宽, d 为槽深。占宽比 $f = a/\Lambda$ 。入射平面波以 Littrow 角入射,TE、TM 波将被分别衍射到 -1 级和 0 级。消光比 C_0 定义为 TM 波的 0 级透射率除以 TE 波的 0 级透射率。 C_{-1} 定义为 TE 波的 -1 级衍射除以 TM 波的 -1 级衍射。

针对强激光系统的使用条件,采用严格耦合波理论^[12-14]优化设计了偏振光栅槽形结构,分析了偏振光栅的衍射特性及消光比,详细分析了制作过程中可能带来的结构变化对偏振光栅特性的影响。特别需要考虑 TM 波的 0 级透射率要尽量高,同时消光比 C_0 也要尽量大。

决定光栅偏振衍射特性的关键因素是光栅周期与入射波长的关系,当周期远大于入射波长时,

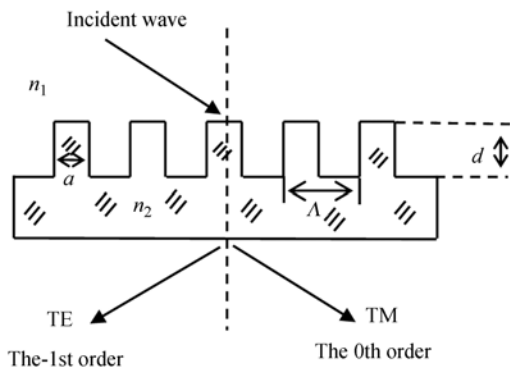


图 1 偏振光栅结构示意图

Fig. 1 Structure of polarization grating

光栅不具有偏振特性；当周期小于入射波长时，光栅表现出明显的偏振特性。对于波长为 1 053 nm 的激光，初步选定光栅周期 $\Lambda < 1\ 000\ \text{nm}$ 。

首先，分析占宽比为 0.5 时衍射效率随周期和槽深变化的情况，如图 2 所示。可以看出当光栅周期位于 570~620 nm，槽深位于 1 200~1 350 nm 时，TM 波的 0 级透射率和消光比 C_0 都较高。

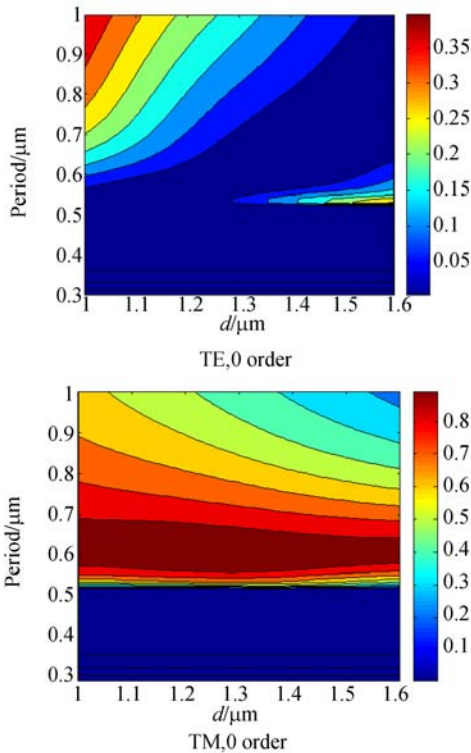


图 2 衍射效率和周期、槽深的关系 ($f=0.5$)

Fig. 2 Diffraction efficiencies of polarization grating with different groove depths and periods ($f=0.5$)

在此基础之上，分析了周期为 600 nm 时，衍射效率和消光比与槽深变化的关系，如图 3、图 4 所示。

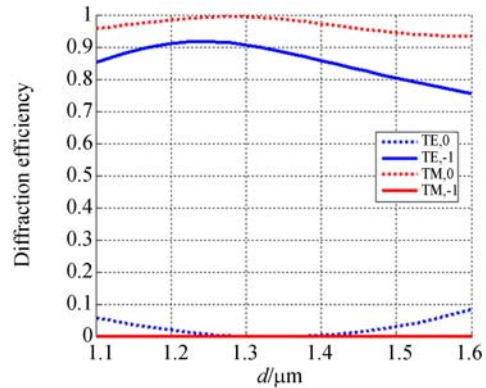


图 3 衍射效率和槽深的关系

Fig. 3 Diffraction efficiency as a function of groove depth

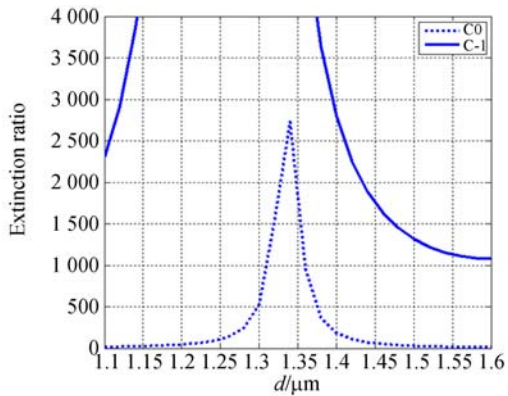


图 4 消光比和槽深的关系

Fig. 4 Extinction ratio as a function of groove depth

可见，当槽深在 1 300~1 380 nm，0 级(TM) 的透射率大于 95%，消光比在 500 以上。当槽深为 1 340 nm 时，0 级(TM) 的透射率在 99% 附近，-1 级(TE) 的衍射效率接近 90%，相应的消光比 $C_0=2\ 700$ ； $C_{-1}=7\ 500$ 。

对于深刻蚀光栅，由于离子束刻蚀过程中再沉积等效应，实现小于 0.5 的占宽比会非常困难，故接着分析占宽比为 0.6 时，衍射效率随周期和槽深变化的情况，如图 5 所示。可以看出，当周期在 590~610 nm，槽深在 1 500~1 600 nm 时，TM 波的 0 级透射率和消光比都比较高。在此基础之上，分析了周期为 600 nm 时，衍射效率和消光比与槽深变化的关系如图 6、图 7 所示。

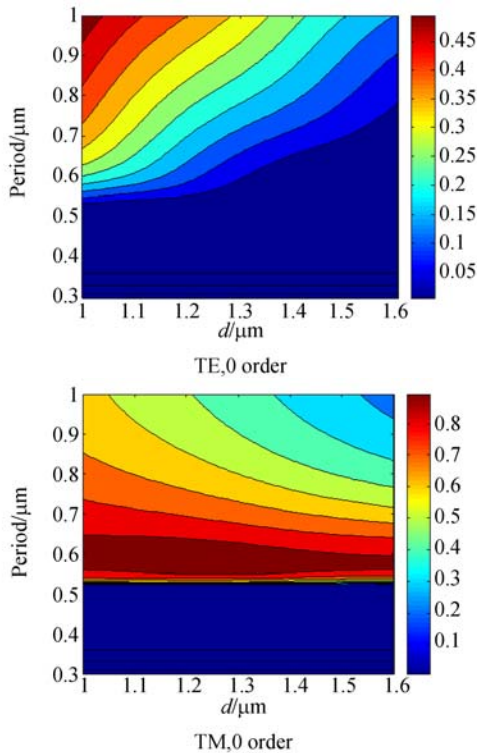


图 5 衍射效率和周期、槽深的关系 ($f=0.6$)

Fig. 5 Diffraction efficiencies of polarization grating with different groove depths and periods ($f=0.6$)

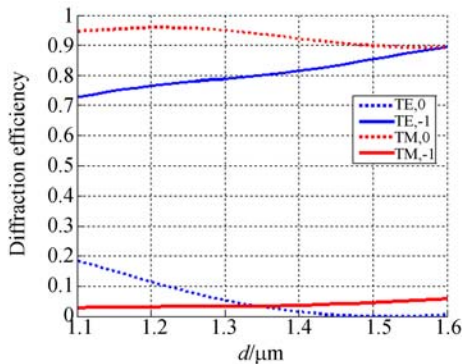


图 6 衍射效率和槽深的关系

Fig. 6 Diffraction efficiency as a function of groove depth

由图 6 和图 7 可以看出,当槽深为 1 500~1 550 nm 时,消光比 C_0 仍可在 1 000 以上,0 级(TM)的透射率在 90%附近。

基于以上分析,对于 1 053 nm 的激光光源,为了实现高消光比和高能量利用率,选择周期为 600 nm,分析了衍射效率随占宽比和槽深变化的情况,如图 8 所示。

从图 8 可以看出,当光栅占宽比为 0.44~

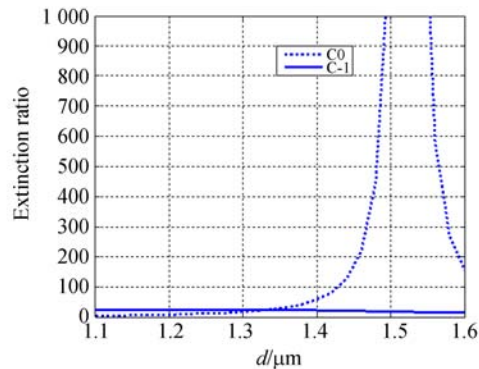


图 7 消光比和槽深的关系

Fig. 7 Extinction ratio as a function of groove depth

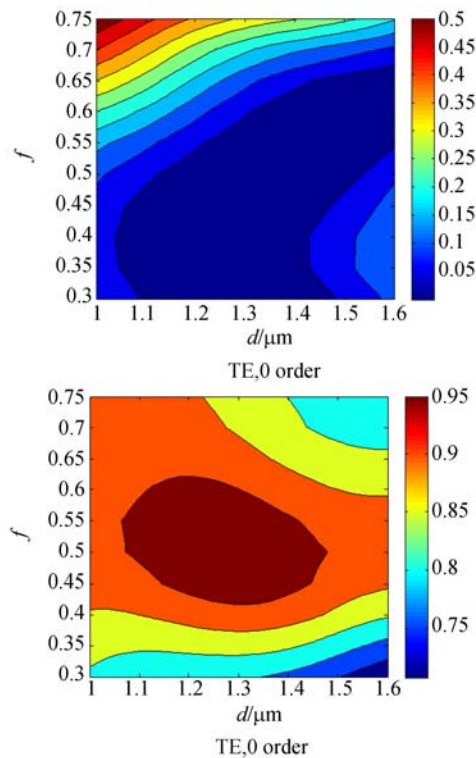


图 8 衍射效率和占宽比、槽深的关系 ($\Lambda=600$ nm)

Fig. 8 Diffraction efficiencies with different duty cycle and groove depths ($\Lambda=600$ nm)

0.55,槽深位于 1 220~1 420 nm 时,0 级(TM)的透射率大于 95%,同时具有较好的消光比 C_0 。为了明确 C_0 的分布情况,图 9 给出了计算结果,可以发现,消光比 C_0 大于 500 的光栅槽形结构分布在一条带中,而消光比 C_0 大于 1 500 时,要求的光栅槽形结构占宽比为 0.535~0.55;槽深为 1 395~1 420 nm。

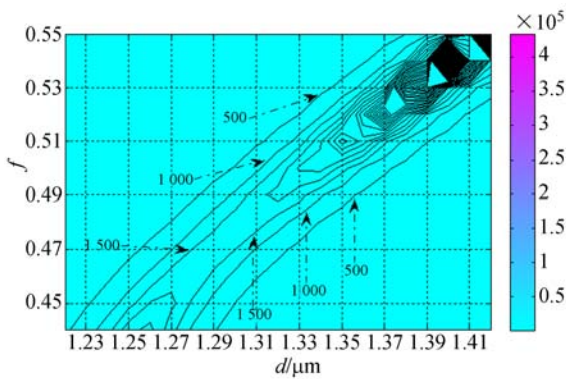


图 9 消光比和占宽比、槽深的关系

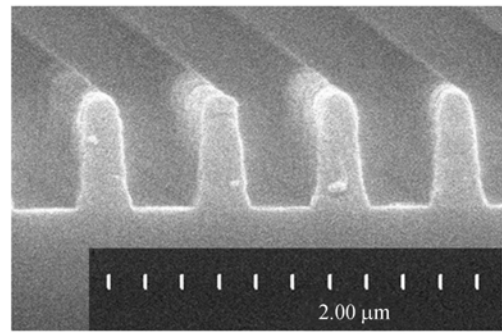
Fig.9 Extinction ratio with different duty cycle and depths

3 实验结果及讨论

偏振光栅利用微纳加工技术,通过全息光刻、显影、离子束刻蚀等多步工艺在熔石英基板上加工而成。首先需要制作高质量的光刻胶光栅掩模,掩模的高度要尽量高,以保证在后续的刻蚀过程中能够实现深刻蚀,实验上制作了周期为 600 nm 的光栅掩模,掩模高度在 600 nm 附近。其次采用倾斜转动的离子束刻蚀结合反应离子束刻蚀的方法,实现了对深刻蚀光栅槽形的精确控制,实验中 Ar 离子束刻蚀的工作参数:工作气压为 2×10^{-2} Pa,加速电压为 240 V,离子束流为 140 mA,离子能量为 400 eV。CHF₃ 反应离子束刻蚀的工作参数为:工作气压为 1.3×10^{-2} Pa,加速电压为 240 V,离子束流为 110 mA,离子能量为 400 eV。

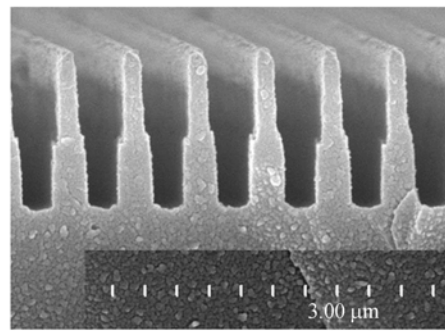
图 10(a)所示为光刻胶光栅掩模,其槽深是 600 nm,底部占宽比是 0.45;10(b)所示为采用倾斜转动的离子束刻蚀结合反应离子束刻蚀得到的刻蚀光栅,槽深为 1 400 nm,底部占宽比为 0.54,槽形侧壁陡直。但是由于在选择刻蚀倾斜角时,无法保证始终能够刻蚀到深槽结构的槽底,造成了部分时刻刻蚀到深槽结构的侧壁,形成了图 10 (b)所示的 2 台阶结构。

最后,在 Littrow 条件下,使用 1 053 nm 的激光测试了光栅偏振器的偏振性能。使用偏振分束棱镜将激光光束分成 TE、TM 两束,分别测试各自的 0 级透射率,测量装置如图 11 所示。测量得到 0 级(TM)透射率为 92.9%,0 级(TE)透射率为 0.58%,消光比达到 160。与理论分析结果(图 9)比较,透射率接近理论值,而消光比相差较大,



(a)光刻胶光栅掩模

(a) SEM photograph of photoresist grating



(b)刻蚀光栅

(b) SEM photograph of etched grating

图 10 偏振光栅的电镜照片

Fig.10 SEM photograph of grating polarizer

主要原因是理论上的计算模型是理想矩形槽形,而实际槽形由于制作中在选择刻蚀倾斜角时,无法保证始终能够刻蚀到深槽结构的槽底,在此过程中造成了部分时刻刻蚀到深槽结构的侧壁,形成了 2 台阶结构。

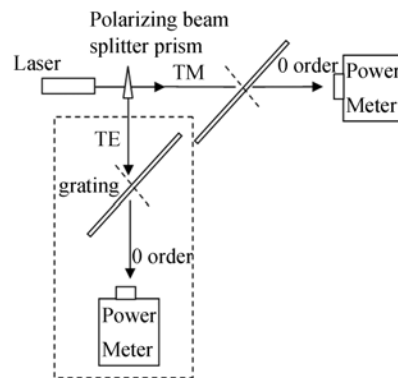


图 11 透射率测试系统

Fig.11 Experimental setup for measuring the transmittance

4 结 论

本文针对强激光系统中常用的 1 053 nm 激光器,利用严格耦合波理论优化设计了 1 053 nm 波长下光栅偏振器的微结构,得到偏振光栅周期为 600 nm,占宽比为 0.535~0.55,槽形深度在 1 395~1 420 nm 时,才能保证透射率高于 95%,同时消光比大于 1 500。实验上采用全息光刻技术制作高质量光栅掩模;再使用倾斜转动的离子束

刻蚀结合反应离子束刻蚀进行高深宽比结构的刻蚀。制作了底部占宽比为 0.54,槽形深度为 1 400 nm 的光栅偏振器。实验测量结果表明:透射率为 92.9%,消光比达到 160。偏振性能可以满足强激光系统的需求。实验证明所采用的高质量单层光刻胶掩模,在保证实现偏振光栅的高深宽比结构要求的同时,简化了制作工艺,具有激光损伤阈值高、操作简便和成本低等优点。特别是该技术可以实现大面积光栅制作,利于强激光系统应用。

参考文献:

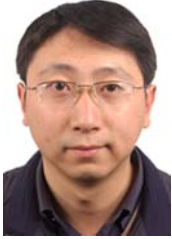
- [1] 董云,郑奎兴. 用于大型激光系统的机械光束隔离器[J]. 激光与光电子学进展, 2001, 38(2): 11-17.
DONG Y, ZHENG K X. Mechanical light beam isolator for large powerful laser system [J]. *Las. Optoelect. Prog.*, 2001, 38(2): 11-17. (in Chinese)
- [2] 廖廷彪. 偏振光学[M]. 北京:科学出版社,2003.
LIAO Y B. *Polarization Optics*[M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
- [3] 赖廷清,蒋良兴,田忠良,等. 液晶显示器用偏光片[J]. 激光与光电子学进展,2007,44(7):46-51.
LAI Y Q, JIANG L X, TIAN ZH L, *et al.*. Polarizer used for liquid crystal display[J]. *Las. Optoelect. Prog.*, 2007, 44(7): 46-51. (in Chinese)
- [4] LI L, DOBROWOLSKI J. High-performance thin-film polarizing beam splitter operating at angles greater than the critical angle[J]. *Appl. Opt.*, 2000, 39: 2754-2771.
- [5] BOKOR N, SHECHER R, DAVIDSON N, *et al.*. Achromatic phase retarder by slanted illumination of a dielectric grating with period comparable with the wavelength[J]. *Appl. Opt.*, 2001, 40(13): 2076-2080.
- [6] 李欣,施政,贺树敏,等. 微机电可调硅基三族氮化物光栅[J]. 光学精密工程,2014,22(11):2945-2949.
LI X, SHI ZH, HE SH M, *et al.*. MEMS-tunable III-nitride grating on silicon substrate [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11): 2945-2949. (in Chinese)
- [7] 姜岩秀,巴音贺希格,赵旭龙,等. 自由电子激光器用极紫外波段平面变栅距光栅[J]. 光学精密工程, 2015, 23(8):2117-2124.
JIANG Y X, BAYANHESHIG, ZHAO X L, *et al.*. Plane holographic varied-line - space grating for DCLS in EUV region [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(8): 2117-2124. (in Chinese)
- [8] SOARES L L, CESCATO L. Metallized photoresist grating as a polarizing beam splitter [J]. *Appl. Opt.*, 2001, 40(32): 5906-5910
- [9] PAJEWSKI L, BORGHI R, SCHETTINI G, *et al.*. Design of a binary grating with subwavelength features that acts as a polarizing beam splitter [J]. *Appl. Opt.*, 2001, 40(32): 5898-5905.
- [10] GLASER T, SCHRÖTER S, BARTELT H, *et al.*. Diffractive optical isolator made of high-efficiency dielectric gratings only[J]. *Appl. Opt.*, 2002, 41(18): 3558-3566.
- [11] WANG B, ZHOU CH H, WANG SH Q, *et al.*. Polarizing beam splitter of a deep-etched fused-silica grating [J]. *Opt. Lett.*, 2007, 32(10): 1299-1301.
- [12] MOHARAM M G, GRANN E B, POMMET D A, *et al.*. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1995, A12(5): 1068-1076.
- [13] 刘全,吴建宏. 光栅的标量衍射理论与耦合波理论的分析比较[J]. 激光杂志,2004,25(2):31-34.

LIU Q, WU J H. Analysis and comparison of the scalar diffraction theory and coupled-wave theory about grating [J]. *Laser Journals*, 2004, 25(2): 31-34. (in Chinese)

[14] 樊叔维. 任意槽形光栅衍射特性的矢量理论分析与计算[J]. *光学 精密工程*, 2000, 8(1):5-10.

FAN SH W. Vector theory analysis and numerical calculation for any shape profile dielectric gratings [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(1): 5-10. (in Chinese)

作者简介:



刘 全(1978—),男,安徽滁州人,博士,副研究员,2001年于安徽师范大学获得学士学位,2004年于苏州大学获得硕士学位,2013年于苏州大学获得博士学位,主要从事微纳光学、衍射光学、微纳制造技术等方面的研究。E-mail: liuquan@suda.edu.cn



吴建宏(1960—),男,江苏苏州人,研究员,博士生导师,1982年于苏州大学获得学士学位,1988年于苏州大学获得硕士学位,2005年于上海理工大学获得博士学位,主要从事全息学、光信息处理、全息光学元件等方面的研究。E-mail: jhwu@suda.edu.cn