

文章编号 1004-924X(2011)11-2731-05

用于分布反馈光栅的纳米压印模板制作

王定理^{1,3*}, 刘 文^{1,2,3}, 周 宁^{1,3}, 徐智谋²

(1. 武汉光迅科技股份有限公司, 湖北 武汉 430074;

2. 华中科技大学 武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074;

3. 新一代光纤通信技术和网络国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 高质量、低成本的压印模板的获得是采用纳米压印技术制作分布反馈光栅的难点, 本文采用双层金属掩模及 lift-off 金属剥离方法制作了适用于紫外压印技术的石英基压印模板。首先, 采用电子束光刻技术在镀钛的石英基片表面直写出 DFB 光栅的光刻胶图形, 接着, 在其表面溅射一层金属镍并进行金属剥离得到与光刻胶相对的图形, 最后采用电感耦合等离子体(ICP)干法刻蚀技术将光栅图形转移到石英基片上, 并对模板的表面进行了防粘连处理。所制作的 DFB 光栅压印模板周期为 200 nm, 光栅中间具有 $\lambda/4$ 相移结构, 适用于 1 310 nm 波长的相移型 DFB 半导体激光器光栅的制作。

关键词: 纳米压印; 压印模板; 分布反馈光栅

中图分类号: TN305.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111911.2731

Nanoimprint stamp fabrication for DFB gratings

WANG Ding-li^{1,3*}, LIU Wen^{1,2,3}, ZHOU Ning^{1,3}, XU Zhi-mou²

(1. Accelink Technologies Co., LTD, Wuhan 430074, China;

2. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technologies, 430074 Wuhan, China;

3. State Key Laboratory for New Optical Communication Technologies and Networks, Wuhan 430074, China)

* Corresponding author, E-mail: dingli.wang@163.com

Abstract: It is difficult to obtain a nanoimprint stamp with low cost and high quality in fabrication of Distributed Feedback(DFB)gratings. In this paper, the quartz stamp for semiconductor DFB gratings was fabricated by using double-layer metal mask and lift-off lithography. Firstly, the photoresist pattern of a DFB grating was written on a Ti coated quartz substrate by electron beam lithography, then a layer of metal Ni was sputtered on it to obtain a corresponding pattern by metal lift-off technology. Finally, the Inductively Coupled Plasma(ICP) dry etching was used to transfer the pattern on the quartz substrate. The scanning electron microscope image of the fabricated stamp shows good uniformity with sufficiently low line edge roughness. The stamp is suitable to fabricate DFB grating for

收稿日期: 2010-11-03; 修订日期: 2011-01-29.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2009AA03Z418)

1 310 nm semiconductor laser diodes using UV nanoimprint lithography.

Key words: nanoimprint; nanoimprint stamp; Distributed Feedback(DFB)grating

1 引言

随着半导体技术的飞速发展,对光刻的极限分辨率越来越高,但分辨率小于 100 nm 的光刻成本也越来越高。自 1995 年发展起来的纳米压印光刻技术,因其小于 100 nm 的超高分辨、高产量以及低成本的特点,近年来得到了快速的发展^[1],并已被国际半导体蓝图组织列入制作 32, 22 以及 16 nm 线宽的下一代光刻技术之一。该技术可广泛用于纳米电子器件、纳米光学器件、纳米光电器件等器件的制造,有望成为一种工业化的生产技术。

纳米压印光刻通常是将预先制备好的带有纳米图案的压印模板在高温高压下压入旋涂在基片表面的光刻胶上,接着移去压印模板,模板上的纳米图案便转移到基底表面的光刻胶上。完成压印之后,可直接用干法刻蚀或者湿法腐蚀将图案继续转移到基片上,这样便可以在基片上得到与模板相对应的纳米结构图形;也可以采用金属剥离技术获得与光刻胶上图形相对应的金属图形,然后再用金属作为刻蚀掩膜将图形转移到基片上,这样在基片上得到的图形与模板的图形将完全一致。

目前,纳米压印技术已经获得越来越多的关注^[4-7],但整体上还处于研发阶段,主要原因之一是压印模板的来源问题和成本^[8]。尽管纳米压印设备成本相对于其它光刻设备要低,但是要完成纳米压印工艺,首先必须设计并制作出带有纳米图案的压印模板,而压印模板的制作需要一个完整的微加工实验室才能完成。因此,如何制作高质量的压印模板成为我国发展纳米压印技术亟待解决的问题。

压印模板的制作通常采用电子束光刻结合干法刻蚀的技术,但这样制得的压印模板为负型模板,而我们希望得到正型压印模板。基于此,本文采用双层金属掩模以及金属剥离技术进行了图形反转,最终获得了用于紫外压印的石英基正型模板。

2 半导体激光器 DFB 光栅

高性能分布反馈(DFB)半导体激光器芯片是光通信系统中发射机的核心器件,其关键技术之一是半导体激光器 DFB 光栅的制作。通常采用双光束干涉曝光法制作半导体激光器光栅,但双光束干涉曝光法无法制作具有相移结构的复杂 DFB 光栅,而且采用双光束干涉法制作出的光栅线条边缘的平直性较差,光栅形状、占空比重复性不好,而采用电子束曝光的方法制作成本又太高。日本住友电子公司于 2009 年报道了采用纳米压印技术制作 DFB 激光器光栅的方法,并制作出 1 550 nm 波长的 DFB 激光器芯片^[9]。

本课题组已采用热压印技术实现具有相移结构的 DFB 光栅的压印,并分别通过湿法腐蚀和干法刻蚀的方法转移压印图形,最终在 InP 基片上获得了均匀性好、线条边缘平直的对应于 1 550 nm 波长的 DFB 光栅图形^[10]。

但是热压印工艺过程中需要较高的温度和压力,这很可能造成 InP 基片的损伤甚至破碎,因此,本课题组希望采用紫外压印工艺制作 DFB 光栅,首先就需要获得高质量的正型压印模板。本文采用电子束光刻结合金属剥离和干法刻蚀技术进行适合于紫外压印的对应于 1 310 nm 波长的 DFB 压印模板的制作。

3 压印模板的制作

用于压印制作半导体激光器 DFB 光栅的石英模板的制作工艺过程如图 1 所示。

3.1 电子束光刻与金属剥离

紫外压印模板选用高纯的熔融石英材料,因为石英材料对紫外光具有很好的透过率,而且其热膨胀系数很低。由于石英材料不导电,若直接采用电子束光刻技术在其表面涂覆的 PMMA 光刻胶上写光栅图形,电子束会在 PMMA 表面形成电荷积累而严重影响光刻的分辨率,因此本文首先在石英基底上溅射一薄层金属钛膜,厚度为 10 nm(图 1(a))。然后再涂覆 PMMA 电子束光

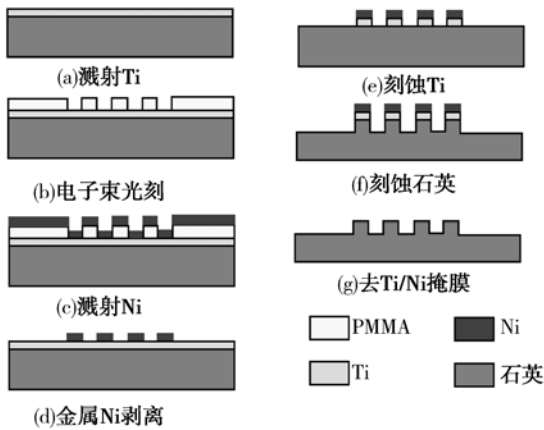


图 1 石英压印模板的制作过程示意图

Fig. 1 Schematic fabrication process of quartz stamp

刻胶,并进行电子束光刻直写出光栅图形(图 1(2))。如果直接用电子束光刻写出的 PMMA 光

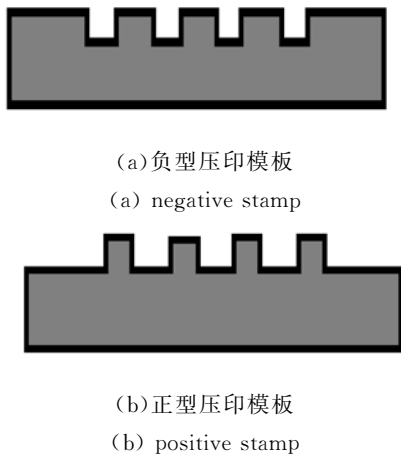


图 2 负型与正型压印模板示意图

Fig. 2 Schematic diagram of negative and positive stamp

刻胶图形作为掩膜刻蚀 Ti 以及石英衬底,最终所制得的压印模板为负型模板(如图 2(a)所示)。为了得到如图 2(b)所示的正型压印模板,本文采用金属剥离工艺进行了图形反转,即在电子束直写出 PMMA 光栅图形后,再在其表面溅射一层金属镍膜,厚度为 40 nm(图 1(c))。然后采用金属剥离工艺将 PMMA 光栅图形反转,即整个石英衬底表面只是光栅区域有 Ti/Ni 金属线条凸起,其它区域均覆盖有一薄层金属钛膜(图 1(d))。最终,在石英衬底表面所制作出的金属镍的光栅图形波长扫描电镜图如图 3 所示,光栅周期为 200 nm,对应于为 1 310 nm 波长的 DFB 激光器。

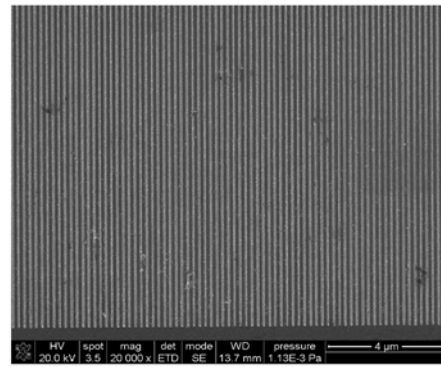
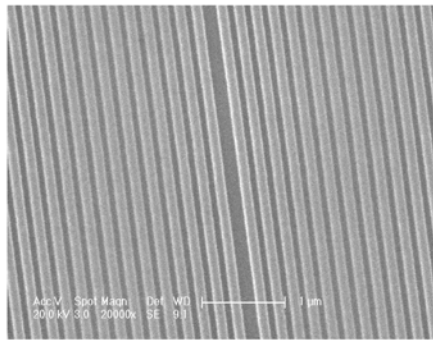


图 3 石英衬底表面金属镍光栅 SEM 图

Fig. 3 SEM image of nickel grating on quartz surface

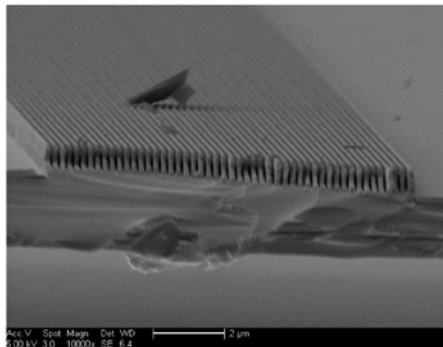
3.2 干法刻蚀转移图形

采用电子束光刻结合金属剥离工艺后,在石英衬底的表面得到金属镍的 DFB 光栅图形(图 3)。为了得到所需要的压印模板,还需采用干法刻蚀技术将金属图形转移到石英衬底上。首先采用金属镍作为掩膜,刻蚀覆盖在石英衬底表面的薄层金属钛膜(图 1(e)),然后再以镍/钛双层金属作为掩膜刻蚀石英衬底(图 1(f))。由于金属钛与石英衬底的刻蚀工艺相似,因此钛与石英的刻蚀可以一起完成。刻蚀中所采用的气体为 CHF_3 与 O_2 ,其体积比为 100 : 4,工作压强约为 4 Pa,RIE 刻蚀功率为 150 W,此工艺条件下金属钛的刻蚀速率约为 4 nm/min,石英衬底的刻蚀速率约为 20 nm/min。刻蚀工艺结束后,表面的 Ti/Ni 掩膜采用化学方法腐蚀干净。图 4(a)和 4(b)分别是采用 RIE 刻蚀转移到石英衬底的 DFB 光栅表面和侧面图形。图 4(a)所示的压印模板光栅周期为 200 nm,中间区域包含有凹下的 $\lambda/4$ 相移结构,其总宽度约为 180 nm,较设计宽度偏小。图 4(b)所示的光栅专门用于检测压印模板的侧面刻蚀效果,其光栅栅条长度足够长(10mm),但不含有 $\lambda/4$ 相移结构。从图 4 中可看出所制作的石英模板上 DFB 光栅表面均匀性良好,光栅线条平直,其线宽为 120 nm,深度约 600 nm,侧壁垂直度接近 90 度。在压印模板制作中,模板的刻蚀深度要根据压印过程的光刻胶厚度确定,通常要求压印模板的刻蚀深度小于光刻胶的厚度,这样压印模板才不致于接触到基片而受到损坏。



(a) 光栅表面 SEM 图

(a) SEM of grating surface



(b) 光栅侧面 SEM 图

(b) SEM of grating profile

图 4 石英压印模板的 DFB 光栅 SEM 图

Fig. 4 SEM image of DFB grating on quartz stamp

3.3 防粘连处理

在进行纳米压印工艺过程中,如果直接将未

经处理的模板与压印光刻胶进行接触,压印模板与光刻胶很容易粘连在一起造成脱膜困难,从而破坏压印出的光栅图形,并使得压印模板粘附光刻胶而受到污染,为此需要在压印模板表面涂覆一层抗粘层。本文在压印模板表面涂敷了一层高分子化合物全氟癸基三氯硅烷,其分子式为 $\text{CF}_3(\text{CF}_2)_7(\text{CH}_2)_2\text{SiCl}_3$,它能在石英模板表面形成一薄层表面自由能较低的分子层,以利于压印模板与压印光刻胶的分离。经过防粘连处理的压印模板,其表面能小于光刻胶的表面能,因而压印脱膜时,压印模板上沾染的脏点会更容易残留在压印光刻胶里,从而使得压印模板具有自清洁的功能,提高其使用寿命^[11]。

4 结 论

高质量、低成本且使用寿命长的压印模板的获得已成为目前纳米压印技术推广应用的关键。本文采用双层金属掩膜以及金属剥离和干法刻蚀技术在石英基片上制作了用于紫外压印的高质量压印模板,所制作的 DFB 光栅模板大面积均匀性良好,光栅周期为 200 nm,线宽约 120 nm,侧壁垂直度接近 90°,在光栅中间具有 $\lambda/4$ 相移结构,为实现纳米压印技术制作半导体激光器的 DFB 光栅,以及低成本高性能半导体激光器芯片的量产奠定了良好的基础。

参考文献:

- [1] CHOU S Y, KRAUSS P R, RENSTROM P J, *et al.*. Imprint of sub-25nm vias and trenches in polymer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, 67 (21): 2114-2116.
- [2] CHOU S Y, KRARRA P P, ZHANG W, *et al.*. Sub-10 nm imprint lithography and applications [J]. *J Vac. Sci. Technol. B*, 1997, 15 (6): 2897-2904.
- [3] COLBURN M S, JOHNSON S, STEWART M, *et al.*. Step and flash imprint lithography: an alternative approach to high resolution patterning [J]. *SPIE*, 1999, 3676:379-389.
- [4] 张鸿海,胡晓峰,范细秋,等. 纳米压印光刻技术的研究 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(12): 57-59.
- [5] ZHANG H H, HU X F, FAN X Q, *et al.*. Nanoimprint lithography technology [J]. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Nature Science Edition)*, 2004, 32(12): 57-59. (in Chinese)
- [6] 陈芳,高宏军,刘忠范. 热压印刻蚀技术 [J]. 微纳电子技术, 2004, 41 (10): 1-9.
- [7] CHEN F, GAO H J, LIU ZH F. Hot embossing lithography [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2004, 41 (10): 1-9. (in Chinese)
- [8] 孙洪文,刘景全,陈迪,等. 纳米压印技术 [J]. 电子工业技术, 2004, 25 (3): 93-98.
- [9] SUN H W, LIU J Q, CHEN D, *et al.*. Nanoimprint technology [J]. *Electronics Process Technolo-*

- gy, 2004, 25 (3): 93-98. (in Chinese)
- [7] 魏正英,熊孝东,杜军,等. 常温微压印中抗蚀剂流动的研究及工艺优化 [J]. 光学精密工程, 2010, 18 (8): 1822-1832.
WEI Z Y, XIONG X D, DU J D, *et al.*. Flow behavior of resist in room-temperature micro-imprinting and its process optimization [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8): 1822-1832. (in Chinese)
- [8] 兰红波,丁玉成,刘红忠,等. 纳米压印光刻模具制作技术研究进展及其发展趋势[J]. 机械工程学报, 2009, 45 (6): 1-13.
LAN H B, DING Y C, LIU H Z, *et al.*. Review of template fabrication for nanoimprint lithography [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45 (6): 1-13. (in Chinese)
- [9] MASAKI Y, YUKIHIRO T, HIROYUKI Y, *et al.*. Application of nanoimprint lithography to fabrication of distributed feedback laser diodes [J]. *Japanese Applied Physics*, 2009, 48: 06FH111-4.
- [10] 王定理,周宁,王磊,等. 纳米压印制作半导体激光器光栅工艺研究[J]. 微纳电子技术, 2009, 47 (1): 1-4.
WANG D L, ZHOU N, WANG L, *et al.*. Study of nanoimprint lithography in fabrication DFB gratings for semiconductor laser diodes [J]. *Micronano-electronic Technology*, 2009, 47 (1): 1-4. (in Chinese)
- [11] 范东升,谢长青,陈大鹏. 纳米压印光刻模板制作技术[J]. 电子工业专用设备, 2005, 3 (2): 26-32.
FAN D SH, XIE CH Q, CHEN D P. Stamp fabrication in nanoimprint lithography [J]. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*, 2005, 3 (2): 26-32. (in Chinese)

作者简介:



王定理 (1971—),男,湖北阳新人,博士,高级工程师,1996年、1999年、2010年于武汉大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事半导体光电子器件以及微纳制造技术的研究。E-mail: dingli.wang@163.com



刘文 (1960—),男,湖北人,博士,教授级高级工程师,博士生导师,教育部“长江学者”特聘教授,1983年、1989年于中国科技大学分别获学士和博士学位,主要从事光通信、传感器件,微纳制造工艺的研究。E-mail: wen.liu@accelink.com



周宁 (1963—),女,湖北武汉人,学士,教授级高级工程师,1985年于华中科技大学获得学士学位,主要从事半导体光电子器件的研究与开发。E-mail: ning.zhou@accelink.com



徐智谋 (1971—),男,湖南岳阳人,博士,教授,博士生导师,1993年于西安理工大学获得学士学位,1995年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,2000年于华中科技大学获得博士学位,主要从事光电子技术与新材料等方面的研究。E-mail: xuzhimou2001@yahoo.com.cn