

基于全息光刻系统制备 528 nm 周期孔阵图形

叶 镇 王 勇* 高占琦 刘丹丹 庄允益 张思源 王晓华

长春理工大学, 高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022

摘要 基于 GaAs 衬底采用全息光刻和湿法刻蚀技术制备周期孔阵图形。得出全息光刻双曝光最优曝光时间为 60 s。采用 $H_3PO_4:H_2O_2:H_2O=1:1:10$ 配比的刻蚀液, 得出最佳刻蚀时间为 30 s。扫描电子显微镜(SEM)和原子力显微镜(AFM)测试图片显示, 孔阵周期为 528 nm, 刻蚀深度为 124 nm, 具有完美的表面形貌及良好均匀性和周期性。

关键词 光学制造; 全息光刻; 双曝光; 周期孔阵

中图分类号 O469

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0809003

Preparation of 528 nm Periodic Hole Array Based on Holographic Lithography System

Ye Zhen Wang Yong Gao Zhanqi Liu Dandan Zhuang Yunyi

Zhang Siyuan Wang Xiaohua

National Key Lab on High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract The periodic hole array is fabricated on GaAs substrate by holographic lithography and wet etching. The double exposure in holographic lithography is adopted with optimized exposure time of 60 s. Wet etching solution with 1:1:10 volume ratio of H_3PO_4 , H_2O_2 and H_2O is adopted to etch the hole array for 30 s. Images of scanning electron microscopy (SEM) and atomic force microscopy (AFM) show that the hole array has a period of 528 nm, etching depth of 124 nm, with perfect surface morphology, good fringe continuity and uniformity.

Key words optical fabrication; holographic lithography system; double exposure; periodic hole array

OCIS codes 090.4220; 050.1970; 120.2880

1 引 言

作为半导体器件的重要制造工艺,光刻技术得到了越来越广泛的关注^[1-3]。全息光刻即是近年来得到飞速发展的光刻技术手段。与投影曝光光刻相比克服了象场尺寸和分辨率的限制。与电子束光刻相比无需在真空环境中工作,记录速度和生产效率更高,可以用于大批量生产。与无掩模激光干涉光刻相比,不会用激光直接作用衬底而破坏衬底表面结构,更适合半导体器件加工。同时全息光刻也是制备周期性结构的最有利工具之一,在微光学、微系统等学科正在发挥越来越重要的作用。因此有必要采用效率高,更适合制作半导体器件周期结构的全息光刻技术来研究、制作孔阵图形。衬底孔阵图形特别适合大面积高分辨周期图形的器件制作,在场发射平板显示器件^[4]、高密度磁存储阵列^[5]、制作二维光子晶体^[6]等方面有着非常广泛的应用前景。

近年来对周期阵列的研究已成为新热点,中外多名学者进行相关的研究分析。2003年张锦等^[7]研究激光干涉光刻技术,从理论到实际应用系统的介绍利用干涉光刻技术制作周期阵列的技术。但制作出的阵列图形周期为 1 μm 。2004年 Koerkamp 等^[8]用电子束光刻在金薄膜上制作了周期为 425 nm 的周期孔阵。2006年贺德春等^[9]更加细致地介绍多光束干涉的理论基础,光强分布。但没有总结制作周期阵列的方法及给出阵列结构

收稿日期: 2015-02-02; 收到修改稿日期: 2015-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(11474036)

作者简介: 叶 镇(1987—),男,硕士研究生,主要从事半导体激光器工艺方面的研究。E-mail: yezhenleaf@126.com

导师简介: 王 勇(1978—),男,硕士,副研究员,主要从事光电子器件方面的研究。E-mail: eeywang@gmail.com(通信联系人)

图片。2006年 Suh 等^[10]利用电子束光刻分别在 Au-VO₂ 和 Ag-VO₂ 膜上制作 240 nm 和 300 nm 周期孔阵。2007 年吉林大学任琳^[11]研究干涉光刻技术,大篇幅地给出了制作出的周期阵列结构,图片数量大,质量高,但是依然没有突破微米级周期,周期为 1~3 μm 不等。2011 年, Huang 等^[12]利用金属银制作掩模进行 lift-off 工艺,制作出微米级的 H 形状孔阵图形。2013 年长春理工大学王一聪对激光干涉的极限尺寸进行研究^[13],模拟出了更好地图像,采用激光直写的方法等到了清晰 2 μm 周期光栅结构。本次实验则是采用具有条纹锁定的全息光刻系统,利用双光束双曝光全息光刻的技术手段,制作出更为精细的 528 nm 的周期孔阵结构。

2 具有条纹锁定的全息光刻系统

全息光刻是利用一个多光束干涉系统,将多个相干光束进行组合,在干涉场内对各相干激光束之间进行光强度分布的强弱调制,光强调制后重新分布的激光能量,在材料表面经过一次或多次曝光产生微纳米级周期的条纹、点阵或孔阵结构。

全息光刻系统制作图形精细到几十纳米,对环境要求相当高,环境中的微扰,轻微的震动都会直接影响光刻出衬底图形的质量,造成光栅周期不稳定,图像有缺陷等一系列影响图形衬底质量的问题。实验选用苏州维格光电的 SVG-GL240 光刻系统,在传统的全息光刻系统的基础上引入了条纹锁定系统,在衬底制备光栅或阵列图形之前,先在基片台上方放置一块玻璃板制作莫尔光栅,经显影处理后把莫尔光栅在光路上复位,此时光路中两相干光产生的干涉条纹与玻璃片上制作的莫尔光栅相叠加产生莫尔条纹^[14]。实验中通过锁定莫尔条纹来控制干涉条纹,通过条纹锁定软件控制压电陶瓷位移,使得干涉条纹的位置保持不变,从而实现对光程进行补偿、降低环境干扰和条纹锁定,达到提高衬底图形质量的目的。具有条纹锁定的全息光刻系统如图 1 所示,主要光学元件为:1 He-Cd 激光器;2 半反半透镜;3 曝光开关;4 半反半透镜;5 全反镜;6 压电陶瓷反射镜;7 紫外扩束镜;8 准直透镜;9 基片台;10 CCD 探头;11 取样反射镜;12 功率探测器;13 控制计算机。

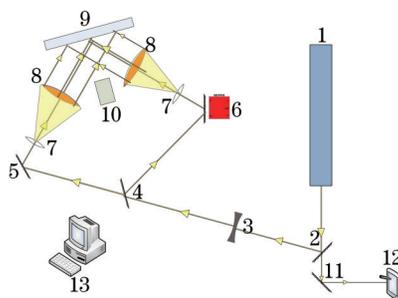


图 1 全息光刻系统光路图

Fig.1 Optical path of holographic photolithography system

实验采用双光束双曝光的技术手段区别于经典双光束单次曝光的光栅图形^[15],比以往经典的全息光刻单次曝光工艺更为复杂,成像条件更为苛刻。全息曝光单次全息曝光后形成光栅结构,光强得到重新分布,光强的极小值形成暗条纹,光强的极大值形成亮条纹。

根据双光束干涉曝光原理,光强分布垂直与 X 轴的光强分布为:

$$I(X) = 2I_0 \{1 + \cos[kx(\sin \theta_1 + \sin \theta_2)]\}, \quad (1)$$

式中 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, θ_1, θ_2 分别为入射激光与法线的夹角,所以 $\theta_1 = \theta_2$ 。

$$I(X) = 2I_0 [1 + \cos(2kx \sin \theta)], \quad (2)$$

当入射激光波长为 λ , 干涉条纹周期为 d 时,满足如下关系:

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}, \quad (3)$$

所以

$$I(X) = 2I_0 \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi x}{d}\right)\right]. \quad (4)$$

第一次曝光结束然后将衬底基片不显影,直接绕法线方向旋转 90° 后进行第二次全息曝光,形成两次光

栅结构相叠加的效果。

在理想条件下,干涉场的光强分布为:

$$I_{\text{double}} = 2I_0 \{ [2 + \cos(2kx \sin \theta) + \cos(2ky \sin \theta)] \}. \quad (5)$$

两次曝光过程中曝光剂量的极大值相叠加形成最大光强 $I_{\text{MAX}} = 8I_0^2$, 两次曝光剂量的极小值相叠加形成最小光强 $I_{\text{MIN}}=0$, 一次曝光剂量的极大值与一次曝光剂量的极小值相叠加形成中等光强 $I_{\text{MAX}} = 4I_0^2$ 。两次曝光制作的光栅叠加光强的重新分布产生了新的结构,如图2所示,白色区域为最小光强,灰色区域为中等光强,黑色区域为最大光强^[7]。

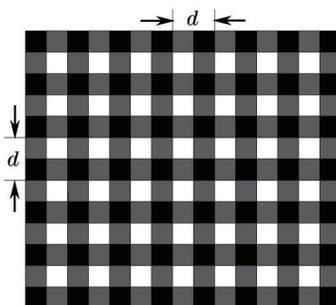


图2 光强分布示意图

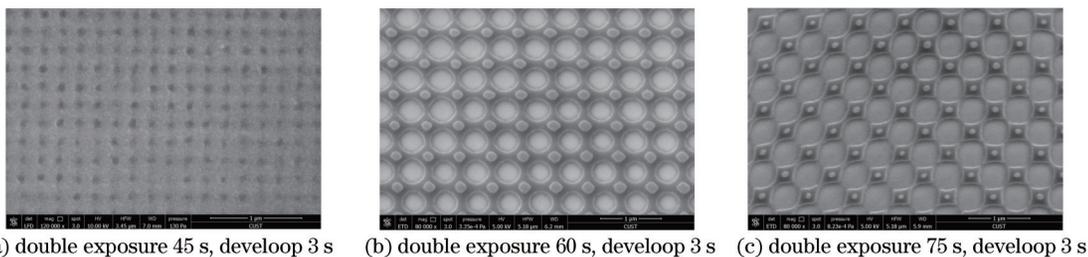
Fig.2 Image of intensity distribution

由于曝光前衬底片已制作好光刻胶层,不同的曝光剂量会在光刻胶层记录产生不同的光刻图形。所以通过控制两次的曝光剂量的多少就能得到不同的图形。在正胶情况下,增加曝光剂量,使中等光强已达到光刻胶层的阈值,而最小光强没有达到光刻胶层的阈值,所产生的结构即为点阵图形。若严格控制曝光剂量,使最小光强及中等光强都没有达到光刻胶层的阈值,而仅有最大光强达到光刻胶层的阈值,则产生的图形为孔阵图形。实验采用基于具有条纹锁定的全息光刻系统,极大地克服环境对成像质量的影响及双曝光的光强分布的不稳定性,较成熟地得到了稳定高质量的528nm孔阵图形。

3 制作周期为528 nm孔阵图形

实验中全息光刻系统的光源为日本KIMMON生产ZK3501型号的He-Cd激光器,输出波长为325 nm,功率为50 mW。选用GaAs为实验衬底。首先对衬底片进行清洗、前烘、匀胶等工艺。实验选用国产瑞红稀释胶,瑞红R2J-304正胶,经过配比得到约为260 nm的胶厚。制作周期528nm孔阵图形需采用双曝光,对曝光剂量的要求更为严格。所以建立探究性实验,选择45、60、75 s三组曝光剂量进行对比,同时选用瑞红R2J-304正胶显影液,最优显影时间3 s。

如图3(a)光刻胶孔阵不规则,周期性不好,反应为曝光时间不足。图(b)孔阵周期均匀完整,结构清晰适中。反映为曝光时间最优。图(c)周期孔阵不完整,孔阵不连续,趋向于点阵,反映为曝光时间过大。不同的曝光时间,对光刻胶层的影响非常大,由于实验采用双曝光工艺,第一次曝光结束后将基片旋转后进行再次曝光,两次曝光剂量的叠加不确定为线性叠加,所以对曝光剂量的控制更加困难。通过采用对比实验得出曝光明显不足如图3(a),曝光明显过量如图3(c)两个特殊临界时间,进而选择最佳曝光时间区间得到最优曝光时间。综上,(b)组为最优曝光时间。选择最优双曝光均为60 s带光刻胶衬底进行坚膜工艺,坚膜工艺温度



(a) double exposure 45 s, develop 3 s (b) double exposure 60 s, develop 3 s (c) double exposure 75 s, develop 3 s

图3 曝光时间对比图片

Fig.3 Image of exposure dose contract

为 115 ℃, 坚膜 5 min。坚膜工艺后进行刻蚀, 实验选用的刻蚀方法为湿法腐蚀, 所用的刻蚀液为 $H_3PO_4:H_2O_2:H_2O=1:1:10$ 配比的溶液^[16-18]。刻蚀时间为优化完毕后的刻蚀 30 s。刻蚀工艺完毕后将衬底经行去光刻胶层工艺, 最后将试验片清洗烘干, 以备测试。

4 测试与分析

采用 QUANTA 型号为 FEG250 的 SEM(扫描电子显微镜)对最优条件得出的孔阵图形经行测试, 选用模式为高真空模式, 在 1 μm 视角下拍摄的 SEM 图片。将衬底片再次经行 AFM(原子力显微镜)测量, 采用本原 SPM5500 在接触模式下经行测量得到衬底表面三维形貌图及表面剖面分析图。

如图 4 所示, SEM 图片显示表面平整形貌均匀周期完整, 表示出刻蚀时间合适, 如图 3(b)在光刻胶层的保护下, 刻蚀液充分与未被光刻胶层遮盖的区域充分反应, 刻蚀出周期均匀的孔阵图形。虽然湿法腐蚀液有各向同性的缺点, 但此实验通过光刻胶层上孔阵图形的制作, 克服了湿法腐蚀工艺的缺点, 得到了优秀的孔阵图形。从图 4 中可以看出, 实验衬底上形成完整 528 nm 周期的孔阵图形, 刻蚀表面平整, 刻蚀孔均匀整齐周期性好。

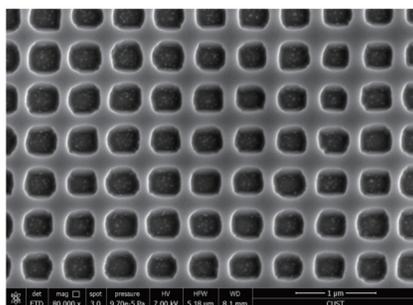


图 4 SEM 孔阵表面形貌图片

Fig.4 SEM image of pore array in the surface profile

如图 5(a)所示, AFM 三维图片显示三维表面结构周期性强, 刻蚀面积大, 周期孔阵结构完整均匀, 说明之前制作的光刻胶层结构完整, 曝光剂量适中, 在光刻胶层上已大面积得出孔阵结构。如图 5(b)所示, 连续的 10 个周期刻蚀孔阵的深度均匀, 约为 124 nm, 每个周期 528 nm 周期准确无误, 剖面分析最大表面深度为 124.81 nm, 倾斜角度为 -34.56° , 粗糙度为 6.04 nm。孔阵图形表面均匀光滑, 刻蚀 30 s 刻蚀效果充分, 刻蚀液选用优良, 得到周期均匀深度统一适中的孔阵图形。

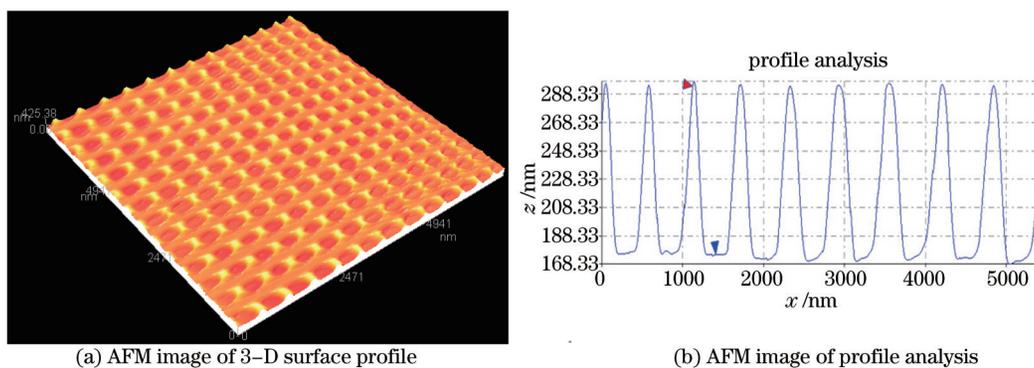


图 5 AFM 图片
Fig.5 AFM image

通过 SEM 及 AFM 的测试很清晰直观地观测出周期孔阵的形貌及结构, 以此说明之前的全部实验设计、实验步骤均正确可靠。通过利用全息光刻双曝光的技术手段成功制备出了衬底图形精度为 528 nm 的周期孔阵图形。

5 结 论

实验采用 GaAs 作为实验衬底, 利用全息光刻的技术手段成功制作出 528 nm 周期孔阵图形。通过对比

探究实验得出了全息光刻双曝光时间均为 60 s, 显影时间为 3 s, 配比 $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:1:10$ 溶液湿法腐蚀时间 30 s 等制备工艺的关键参数。通过 SEM 和 AFM 图片显示出孔阵图形具有完整的二维及三维周期结构, 形貌完整, 均匀深度为 124 nm, 达到了预期设计的要求。

参 考 文 献

- 1 Xiao Yufei, Zhang Weiping, Huang Haihua, *et al.*. Influence of function of metal grating shape on surface plasmon resonance[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1114001.
肖钰斐, 张卫平, 黄海华, 等. 金属光栅结构对表面等离子体共振的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1114001.
- 2 Hu Jin, Pu Donglin, Wei Guojun, *et al.*. A method of dot-matrix holography based on the diffraction grating and spatial light modulator[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0609001.
胡 进, 浦东林, 魏国军, 等. 基于衍射光栅和空间光调制器的点阵全息光刻方法[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0609001.
- 3 Mindaugas Andruievicius. Methods and applications of optical holography[J]. Materials Science (Medziagotyra), 2011, 17(4): 371-375.
- 4 Ke Chunhe, Peng Zi'an, Chen Qilue, *et al.*. Advance in field emission display[J]. Vacuum Science And Technology, 1997, 17(2): 119-128.
柯春和, 彭自安, 陈其略, 等. 场发射平板显示器件的进展[J]. 真空科学与技术, 1997, 17(2): 119-128.
- 5 Liu Yanbo, Min Guoquan, Song Zhitang, *et al.*. $\text{Si}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ based ultra-high-density PCRAM arrays fabricated by UV-IL[J]. Micronanoelectronic Technology, 2009, 46(1): 45-49.
刘彦伯, 闵国全, 宋志棠, 等. 压印技术制备超高密度 $\text{Si}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 基相变存储阵列[J]. 微纳电子技术, 2009, 46(1): 45-49.
- 6 Zhang Dongmei. Fabrication of 2D Photonic Crystal Templates by Holographic Lithography and Soft Lithography[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007: 1-33.
张冬梅. 基于全息光刻及软刻蚀技术制备二维光子晶体模板[D]. 杭州: 浙江大学, 2007: 1-33.
- 7 Zhang Jin. Study on Laser Interferometric Lithography[D]. Chengdu: Sichuan University, 2003: 3-25, 109-115.
张 锦. 激光干涉光刻技术[D]. 成都: 四川大学, 2003: 3-25, 109-115.
- 8 K J Klein Koerkamp, S Enoch, F B Segerink, *et al.*. Strong influence of hole shape on extraordinary transmission through periodic arrays of subwavelength holes[J]. Physical Review Letters, 2004, 92(18): 183901.
- 9 He Dechun, Han Zhenhai. Study on multi-beam interference[J]. Editorial Department of Hexi University, 2006, 22(2): 42-44.
贺德春, 韩振海. 多光束干涉的研究[J]. 河西学院学报, 2006, 22(2): 42-44.
- 10 J Y Suh, E U Donev, R Lopez, *et al.*. Modulated optical transmission of subwavelength hole arrays in metal- VO_2 films[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(13): 133115.
- 11 Ren Lin. Study on Laser Interferometric Lithography Technology[D]. Jilin: Jinlin University, 2007: 23-57
任 琳. 基于多光束相干的激光干涉光刻技术研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2007: 23-57.
- 12 Haofu Huang, Yuwei Jiang, Hung Hsin Chen, *et al.*. Localized shape resonance on silver film perforated by H-shaped and more complex shape hole arrays[J]. Optics Express, 2011, 19(6): 5225-5231.
- 13 Wang Yichong. Research on the Limiting Feature Sizes of Laser Interference Lithography[D]. Jilin: Changchun University of Science and Technology, 2013: 7-18.
王一聪. 激光干涉光刻的极限尺寸研究[D]. 吉林: 长春理工大学, 2013: 7-18.
- 14 Li Wenhao, Zhang Chengshan, Ba Yingxige, *et al.*. Study on precisely controlling the grating constant of holographic grating with Moire patter method[J]. Chinese J Scientific Instrument, 2013, 34(12): 2867-2873.
李文昊, 张成山, 巴音格希格, 等. 莫尔条纹法精确控制全息光栅光栅常数的研究[J]. 中国仪器仪表学报, 2013, 34(12): 2867-2873.
- 15 Liu Dandan, Wang Yong, Ye Zhen, *et al.*. Grating fabrication of 808 nm distributed feedback semiconductor laser by holographic photolithography[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0202008.
刘丹丹, 王 勇, 叶 镇, 等. 全息光刻制备 808 nm 分布反馈半导体激光器的光栅[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0202008.
- 16 A R Clawson. Guide to references on III±V semiconductor chemical etching[J]. Materials Science and Engineering, 2000, 31(2001): 48-54.
- 17 Zhang Jian. Design, Growth and Fabrication of Near Infrared Semiconductor Laser Based on GaAs[D]. Jilin: University of Chinese Academy of Sciences, 2013: 77-89.
张 建. GaAs 基近红外半导体激光器的设计、生长和制备研究[D]. 吉林: 中国科学院大学, 2013: 77-79.
- 18 Yang Jianyi, Wang Minghua, Jiang Xiaoqing, *et al.*. Selective etching of GaAs substrate[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 1998, 9(1): 51-53.
杨建义, 王明华, 江晓清, 等. GaAs 衬底层选择性腐蚀技术[J]. 光电子·激光, 1998, 9(1): 51-53.

栏目编辑: 刘丰瑞