

基于深紫外激光器的大面积干涉光刻装置研究

张 岭, 胡海峰, 顾亮亮, 詹其文

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 搭建了基于 266 nm 波长深紫外光源的干涉光刻装置, 使用平顶光整形器将高斯光整形成平顶光束, 在硅基底上制备出面积为 8.9 mm×25.4 mm、周期为 407 nm 的一维光栅结构图形和周期为 860 nm 的二维孔洞结构。使用扫描电子显微镜 (SEM) 测量了平顶光产生的一维干涉结构的线宽、周期等参数, 并与高斯光产生的一维干涉结构参数进行对比。实验结果表明, 加入了平顶光整形器的干涉光刻装置产生的周期性光栅结构图形均匀性提升了 21.36%。

关键词: 激光干涉光刻; 平顶光; 深紫外激光; 光栅结构; 微纳加工
中图分类号: TN 05 **文献标志码:** A

Large-area interference lithography setup based on deep ultraviolet laser

ZHANG Ling, HU Haifeng, GU Liangliang, ZHAN Qiwen

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The setup based on deep ultraviolet light source with a wavelength of 266 nm was built for interference lithography and a flat-top beam shaper was used to turn Gaussian light into a flat-top beam. Both a one-dimensional grating structure pattern with an area of 8.9 mm×25.4 mm and period of 407 nm, and a two-dimensional hole structure with a period of 860 nm were successfully achieved on silicon substrate. The linewidth, period and other parameters of the one-dimensional interference structure generated by flat-top beam with SEM were measured, and also a comparison was made with the parameters of the one-dimensional interference structure generated by Gaussian light. The experimental results show that the interference lithography setup with flat top beam shaper can produce periodic grating structure patterns with better uniformity, which is increased by 21.36%.

Keywords: laser interference lithography; flat-top beam; deep UV laser; grating structure; micro-nano processing

收稿日期: 2022-12-02

基金项目: 上海市科委部分地方院校能力建设项目 (19060502500)

第一作者: 张 岭 (1998-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 微纳加工. E-mail: 203590627@st.usst.edu.cn

通信作者: 詹其文 (1974-), 男, 教授. 研究方向: 光场调控理论与方法、微纳制造. E-mail: qwzhan@usst.edu.cn

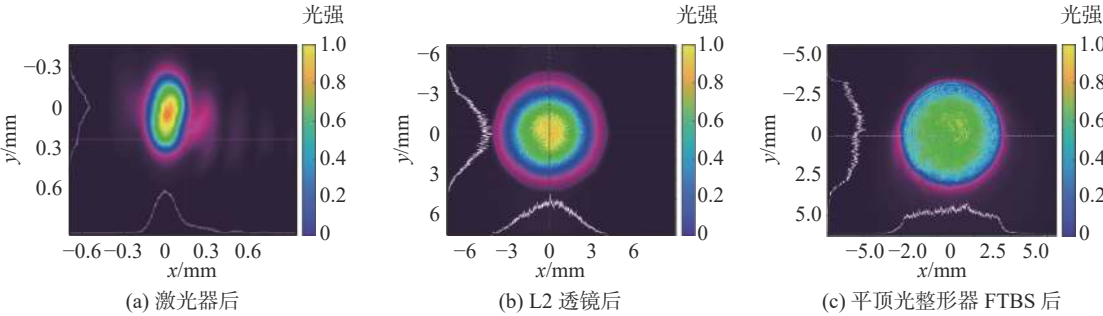


图2 不同位置 CCD 相机采集的图像

Fig.2 Images acquired by CCD cameras in different positions

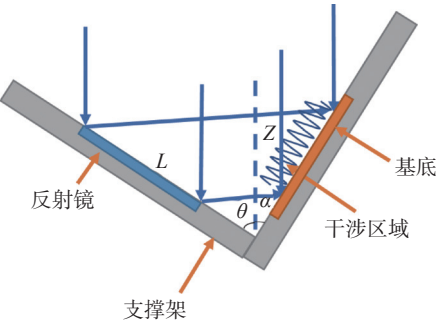


图3 Lloyd 干涉仪的结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of Lloyd's interferometer

θ 为入射光和反射镜之间的夹角。

干涉曝光区域的尺寸可以通过式(2)进行计算。

$$Z = \frac{L \sin \theta}{\sin (2\theta + \alpha)} \tag{2}$$

式中： Z 为曝光区域的横向长度； L 为反射镜的横向尺寸， $L=25.4\text{ mm}$ ； α 为入射光和样品台的夹角。

当两臂垂直时，即 $\theta+\alpha=90^\circ$ ，式(2)可以化简为

$$Z = L \times \tan \theta \tag{3}$$

因此，干涉结构的周期与激光光源波长 λ 以及入射角 θ 的角度有关， λ 越小，则周期越小。本文使用的 266 nm 深紫外激光器在理论上可以实现最小周期为 133 nm 的光栅结构，同时增加 θ ，可以减小周期并增大曝光面积。

1.2 干涉周期结构制备工艺

制备周期性的干涉结构还需要一系列的工艺。第1步，硅片的清洁，采用丙酮进行超声清洗 5 min ，去除表面油脂等污染物，再使用去离子水冲洗 3 min ；第2步，采用热板去除硅片表面的水蒸气；第3步，硅片表面滴胶，用匀胶机旋涂光刻胶；第4步，将匀胶后的硅片取出，此时光刻胶已经形成薄膜，将其放在热板上前烘；第5步，使用样品台真空吸附硅片并调整好角度进行干涉曝光；第6步，硅片取下后烘(对于大部分正

性光刻胶可以忽略此步骤)；第7步，显影液显影并用去离子水冲洗，光刻胶产生干涉结构图案^[17]。

为了证明装置的普适性，实验了2种不同类型的光刻胶，分别是 I-line 负性光刻胶 SU8 2000.5 和 KrF 正性光刻胶 HTK1062。对于 SU8 2000.5 光刻胶，在 4000 r/min 转速下匀胶 30 s ，得到 500 nm 胶厚，然后在热板上 95°C 前烘 60 s ，在 2.3 mW/cm^2 的强度下曝光 30 s ，后烘 60 s 并显影 30 s ，获得较好的曝光图形质量。为了实验不同的周期性结构，光刻胶曝光后将硅片进行旋转并再次进行曝光，其他步骤相同。对于 HTK1062 光刻胶，在 4000 r/min 转速下匀胶 40 s ，得到 242 nm 的胶厚，在热板上 95°C 前烘 90 s ，在 16.4 mW/cm^2 的强度下曝光 1 s ，显影 20 s ，获得了较好的曝光图形质量。

2 结果与讨论

2.1 周期性结构的种类

SU8 2000.5 光刻胶在干涉光刻装置曝光显影后的显微镜和扫描电镜照片如图4所示，其中，图4(a)和(b)为 500 倍光学显微镜照片，图4(c)和(d)为扫描电子显微镜(SEM)照片。由于干涉光场存在强弱分布，负性光刻胶与达到曝光阈值的光(干涉光场的亮条纹区域)发生反应，显影后固化；没有达到曝光阈值的光(干涉光场的暗条纹区域)则会被显影液洗去，因此，光刻胶一次曝光将会产生一维光栅结构。对于二次曝光，是一次曝光按旋转角度的光强叠加效果。产生的二维点阵结构是一维光栅结构以一定角度在光刻胶上叠加形成的。随着曝光次数的增加，需要将每次的曝光时间减半，才能保持与一维光栅相同的曝光剂量^[18]。图4(a)和(c)显示干涉结构的周期为 860 nm ，与曝光时选择的入射光和反射镜夹角 8.8° 的计算结果基本一致。图4(b)和(d)是一次曝光后硅片旋转

53 °得到的二维孔洞结构, 干涉结构周期同样是 860 nm。实验结果显示, 无论是一维还是二维周

期结构, 图案都没有失真, 脊条和孔洞的形状都保持一致, 条纹清晰。

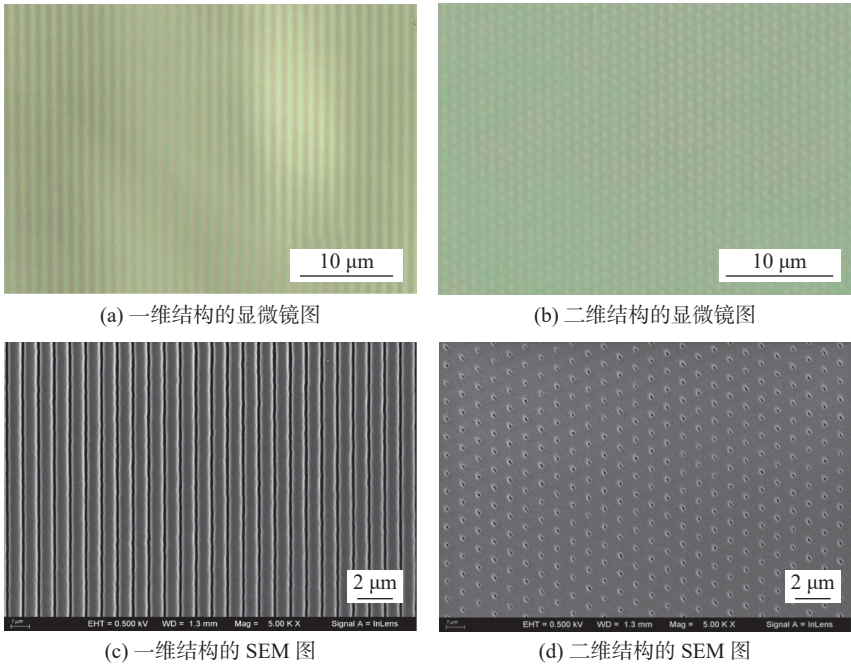


图 4 SU8 2000.5 光刻胶的一维和二维周期性结构图像
Fig.4 Images of 1D and 2D periodic structures of photoresist SU8 2000.5

2.2 平顶光整形对图形的影响

高斯光的光强分布特点是中心强、边缘弱。在实际进行光刻加工中, 会导致中心区域受到的曝光剂量超过边缘区域, 因此, 常出现中心区域的光刻胶正常曝光时, 边缘光刻胶出现曝光不足的现象。特别是对于工艺窗口小的光刻胶, 会导致中心区域过曝, 而边缘曝光不足的情况。占空比是光栅图形线宽和周期的比值, 对于负性光刻胶, 将出现中心区域的光栅结构占空比大而边缘区域的占空比小, 对于正性光刻胶则相反。

平顶光是一种中心强度分布均匀的光场, 在边缘处光强迅速下降到零。因此, 在中间区域进行光刻时, 所受到的曝光剂量几乎是一致的, 因此, 会获得线宽均匀性非常好的光栅结构。在曝光装置中去除平顶光整形器, 使用 HTK1062 光刻胶进行对比实验, 分别选取曝光区域的 3 个位置使用扫描电镜观察, 其中, 区域 A 为曝光区域中心, 区域 B 和区域 C 为区域 A 上下各移动 12 mm 选取的区域, 结果如图 5 所示。图 5 中的一维光栅结构的周期均为 407 nm, 是由入射光和反射镜夹角为 19.1°产生的干涉条纹曝光得来。光栅线条出现小幅度的弯曲是由于入射光照射光刻胶产生

部分反射光, 两者互相干涉引起的驻波效应导致, 可以通过在硅衬底预先匀涂一层抗反射涂层进行改善。对 SEM 图像中的所有光栅结构计算占空比并且选取平均值以减少误差, 如表 1 所示。光栅结构线宽的均匀性利用式(4)计算。

$$H = 1 - \frac{Max - Min}{2Adv} \times 100\% \tag{4}$$

式中: H 表示均匀度; Max 表示数据的最大值; Min 表示数据的最小值; Adv 表示数据的平均值。

由此可得, 使用高斯光曝光的区域一维光栅结构的线宽均匀度为 69.54%, 使用平顶光曝光区域的线宽均匀度为 90.90%, 相比提升了 21.36%。

2.3 不同光刻胶的区别

SU8 光刻胶是 I-line 负性光刻胶, 曝光中心波长是 365 nm, 对于 266 nm 的曝光光源具有相对较低的敏感性, 因此, 需要更大的曝光剂量, 同时对光路的稳定性要求也更高。SU8 系列光刻胶的作用机理是遇光产生自由基分子热交联形成钝化性很强的环氧树脂^[19], 去胶困难, 故在结构转移时需要考虑这一问题。

HTK1062 是一款 KrF 正性光刻胶, 曝光中心波长是 248 nm, 与光源波长接近, 因此, 有着更

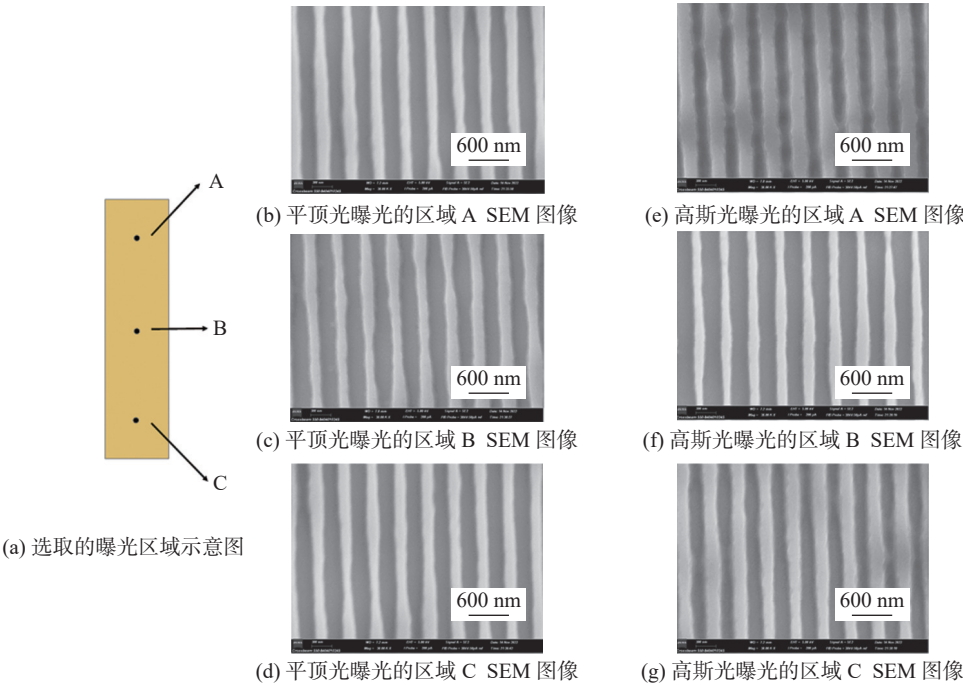


图 5 不同区域不同类型光的扫描电镜图像

Fig.5 SEM images of different types of light in different areas

表 1 不同区域的占空比
Tab.1 Duty cycles for different regions

光源	占空比		
	区域A	区域B	区域C
高斯光	0.6068	0.3091	0.5501
平顶光	0.3861	0.3395	0.4082

高的曝光敏感度，曝光时间很短，振动对其影响小，因此，可以更稳定地产生小图形结构，但是，工艺窗口也因此变小，操作时需注意控制曝光时间。在不稀释的情况下，HTK1062 具有更薄的厚度，传统的去胶液丙酮就可以完成对 HTK1062 的去胶操作，对于后续图形的转移有很大优势。

3 结 论

成功搭建了基于 266 nm 深紫外激光器的 Lloyd 干涉光刻装置，实验了 SU8 2000.5 和 HTK 1062 这 2 种不同类型的光刻胶，均实现了 8.9 mm×25.4 mm 的大面积曝光；通过一次和二次曝光获得了良好的一维光栅结构和二维点阵结构，证明了该装置具有普适性。在装置中加入了平顶光整形器，显著提高了光栅结构线宽的均匀性，对实现大面积、高线宽均匀性的光栅结构具有指导意义。

参考文献：

[1] 李华, 麻艳娜, 谷付星. 基于机器视觉的高精度微纳光纤直径实时测量 [J]. 光学仪器, 2022, 44(1): 1–8.

[2] 王彦平, 陈希. 彩色钙钛矿太阳能电池的 Fano 微纳砷化铝光栅模拟设计 [J]. 光学仪器, 2021, 43(3): 45–51,59.

[3] 张灿, 祁影霞. 微纳尺寸微通道流动与换热研究综述 [J]. 能源研究与信息, 2020, 36(3): 154–161.

[4] SUSLIK L, SKRINIAROVA J, KOVAC J, et al. Complex analysis of emission properties of LEDs with 1D and 2D PhC patterned by EBL[J]. Coatings, 2020, 10(8): 748–757.

[5] MIN S Y, LI S J, ZHU Z Y, et al. Gradient wettability induced by deterministically patterned nanostructures[J]. Microsystems & Nanoengineering, 2020, 6(1): 1–9.

[6] GU L, CHENG D W, WANG Q W, et al. Design of a uniform-illumination two-dimensional waveguide head-up display with thin plate compensator[J]. Optics Express, 2019, 27(9): 12692–12709.

[7] CAO K Q, CHEN L, WU H C, et al. Large-area commercial-grating-quality subwavelength periodic ripples on silicon efficiently fabricated by gentle ablation with femtosecond laser interference via two cylindrical lenses[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 131: 106441.

[8] KHORASANINEJAD M, CHEN W T, DEVLIN R C, et al. Metalenses at visible wavelengths: Diffraction-limited focusing and subwavelength resolution imaging[J]. Science, 2016, 352(6290): 1190–1194.

[9] LUTTGE R. Massively parallel fabrication of repetitive

- nanostructures: nanolithography for nanoarrays[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, 42(12): 123001.
- [10] 李艳丽, 刘显和, 伍强. 先进光刻技术的发展历程与最新进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(9): 0922006.
- [11] CAI J X, ZHU Z Y, ALKEMADE P, et al. 3D volumetric energy deposition of focused helium ion beam lithography: visualization, modeling, and applications in nanofabrication [J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2018, 5(12): 1800203.
- [12] GUO L J. Nanoimprint lithography: methods and material requirements[J]. *Advanced Materials*, 2007, 19(4): 495–513.
- [13] GUERFI Y, CARCENAC F, LARRIEU G. High resolution HSQ nanopillar arrays with low energy electron beam lithography[J]. *Microelectronic Engineering*, 2013, 110: 173–176.
- [14] VAN WOLFEREN H, ABELMANN L. Laser interference lithography[M]//HENNESSY T C. *Lithography: Principles, Processes and Materials*. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2011: 133–148.
- [15] YUE G, LEI Y, DIE J H, et al. Fabrication of 4-inch nano patterned wafer with high uniformity by laser interference lithography[J]. *Chinese Physics Letters*, 2018, 35(5): 054207.
- [16] KIM H, JUNG H, LEE D H, et al. Period-chirped gratings fabricated by laser interference lithography with a concave Lloyd's mirror[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(2): 354–359.
- [17] 吴庭溪, 王强. 多次光刻晶圆涂胶工艺的实验研究 [J]. *大学物理实验*, 2018, 31(5): 31–35.
- [18] GAN Z F, FENG H T, CHEN L Y, et al. Spatial modulation of nanopattern dimensions by combining interference lithography and grayscale-patterned secondary exposure[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 89.
- [19] 张笛, 王英, 瞿敏妮, 等. SU-8 光刻胶去胶工艺研究 [J]. *微电子学*, 2020, 50(6): 910–913.

(编辑: 石 瑛)



[上接第 539 页]

- [10] HE K M, ZHANG X Y, REN S Q, et al. Deep residual learning for image recognition[C]//Proceedings of 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Las Vegas: IEEE, 2016: 770–778.
- [11] ZHANG H, ZU K K, LU J, et al. EPSANet: an efficient pyramid squeeze attention block on convolutional neural network[EB/OL]. (2021-05-30)[2022-11-11]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.14447>.
- [12] 茅前, 江旻珊, 魏静. 基于改进 U-Net 的视盘视杯分割方法的研究 [J]. *光学仪器*, 2021, 43(1): 21–27.
- [13] SIVASWAMY J, KRISHNADAS S, CHAKRAVARTY A, et al. A comprehensive retinal image dataset for the assessment of glaucoma from the optic nerve head analysis[J]. *JSM Biomedical Imaging Data Papers*, 2015, 2(1): 1004.
- [14] IOFFE S, SZEGEDY C. Batch normalization: accelerating deep network training by reducing internal covariate shift[C]//Proceedings of the 32nd International Conference on Machine Learning. Lille: JMLR. org, 2015: 448–456.
- [15] CHEN L C, ZHU Y K, PAPANDREOU G, et al. Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation[C]//Proceedings of the 15th European Conference on Computer Vision. Munich: Springer, 2018: 833–851.
- [16] ZILLY J, BUHMANN J M, MAHAPATRA D. Glaucoma detection using entropy sampling and ensemble learning for automatic optic cup and disc segmentation[J]. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 2017, 55: 28–41.
- [17] YU S, XIAO D, FROST S, et al. Robust optic disc and cup segmentation with deep learning for glaucoma detection[J]. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 2019, 74: 61–71.
- [18] XU Y L, LU S, LI H X, et al. Mixed maximum loss design for optic disc and optic cup segmentation with deep learning from imbalanced samples[J]. *Sensors*, 2019, 19(20): 4401.

(编辑: 丁红艺)