

基于空间光调制器的无掩模光学光刻技术研究进展

马延琴¹ 杜惊雷²

(¹西南科技大学理学院, 四川 绵阳 621010; ²四川大学物理科学与技术学院, 四川 成都 610065)

摘要 随着器件特征尺寸的不断减小,传统光刻技术的加工分辨率受限于衍射极限已接近使用化技术的理论极限且成本过高。无掩模光刻技术是解决掩模价格不断攀升而引起成本过高的一种潜在方案,以成本低、灵活性高、制作周期短的特点在微纳加工、掩模直写、小批量集成电路的制作等方面有着广泛的应用。基于空间光调制器的无掩模光学光刻技术在提高分辨率和产出率方面取得了一定的进展,理论和实验上均取得了较好的效果。详细归纳介绍了基于空间光调制器的无掩模光学光刻技术的原理、特点以及研究进展。

关键词 光学制造;无掩模光学光刻;空间光调制器;波带片阵列光刻;表面等离子体激元

中图分类号 TN305.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.070006

Progress of Optical Maskless Lithography Based on Spatial Light Modulator

Ma Yanqin¹ Du Jinglei²

(¹ School of Science, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China)
(² School of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

Abstract As device feature size continues to decrease, the resolution of conventional lithography which is restricted by diffraction limit, have been approaching to the theoretical limit and the cost is very high. Maskless lithography is a potential program to solve the high cost caused by the rising price of the mask. Maskless lithography has been widely used in nanofabrication, mask direct writing and low-volume integrate circuit (IC) production because of its low cost, high flexibility and short production cycle. Currently, spatial light modulator (SLM)-based maskless lithography made some progress in improving the resolution and throughput. Both the theory and experiment of SLM-based maskless lithography achieved good results. A review on the principle, feature and progress of maskless lithography based on SLM is presented.

Key words optical fabrication; optical maskless lithography; spatial light modulator; zone-plate-array lithography; surface-plasmon polartion

OCIS codes 110.3960; 110.4235; 240.6680; 220.3740; 310.6628

1 引言

大规模集成电路的分辨率和制作工艺已精确达到纳米尺度(90,65,45 和 32 nm),随着器件特征尺寸的不断缩小,导致光刻技术必须跟随特征尺寸的变化趋势而不断发展。光刻技术及其应用已经远远超出了传统意义上的范畴,它几乎包括和覆盖了所有微纳米图形的传递、加工和形成过程。光刻技术主要以缩短波长和增大数值孔径为主要手段来实现高分辨率^[1],目前主要采用紫外光源和浸没式物镜,下一步可能会采用极紫外甚至软 X 射线光源来实现 22 nm 节点以下的光刻,但是过高的成本让人望而生畏,仅就掩模的价格也是随着特征尺寸的减小而急剧地增加。无掩模光刻技术^[2,3]是降低光掩模不断飞升的一个潜在解决方案,尽管它不能替代目前的主流光刻技术,如 193 nm 光刻和 EUV 光刻用于大规模集成电路生产中,但由于其成本低、生产周期短、灵活性高主要应用在微纳米加工、小批量特殊应用的集成电路生产、掩模直写等方面,对传统的光刻技术来说是一种补充。另外,随着近些年对超分辨率光学超精密加工新原理、新方法的探索和

收稿日期: 2012-01-31; **收到修改稿日期**: 2012-03-20; **网络出版日期**: 2012-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(10676029,10776028)资助课题。

作者简介: 马延琴(1983—),女,硕士研究生,助教,主要从事微细加工技术和大面积光学元件检测等方面的研究。

E-mail: yanqin_ma@163.com

导师简介: 杜惊雷(1964—),男,博士,教授,主要从事微细加工技术方面的研究。E-mail: DuJL@scu.edu.cn

研究^[4],即使采用可见光甚至红外波段的激光,采用非浸没式光学系统也可以实现纳米尺度的特征尺寸。这两种技术已经引起业界极大的兴趣。

无掩模光刻技术可以分为两类^[5]:1)基于带电离子的无掩模光刻,如电子束光刻、离子束光刻;2)基于光学的无掩模光刻,如干涉光刻、激光直写、基于空间光调制器(SLM)无掩模光学光刻技术等。电子束光刻和离子束光刻可以获得任意形状、极高分辨率的图形,但由于是逐点曝光,所以效率低下,无法适用于大批量的工业生产。本文主要介绍现有基于 SLM 的缩小透镜光刻、波带片阵列光刻以及发展中的表面等离子体激元(SPP)无掩模光学光刻技术的原理、特点及研究进展。

2 现有基于 SLM 的无掩模光学光刻技术

基于 SLM 进行无掩模光学光刻过程^[6~8]是用计算机优化产生的一系列“虚拟”的数字图形控制 SLM 把图形一幅幅地投影到基片上,理论上甚至可通过分析光学检测系统反馈回来的基片光场分布的数字信息,实时优化调控下一时刻数字图形的结构,以获得最佳的光刻图形质量。

2.1 缩小投影光刻

基于 SLM 的缩小透镜光刻系统^[9]主要由激光器、准直器、SLM 及驱动电路、空间滤波器、精密缩小物镜系统、工作台组成,工作原理如图 1(a)所示。激光器发出的光经过准直扩束之后入射到 SLM 上,经 SLM 反射通过透镜并在其焦平面上滤波,经过精密缩小物镜系统缩小之后,在光刻胶上形成任意形状的图形如图 1(b)所示。系统的特点是根据实际需要的图形来控制 SLM 的状态,由 SLM 产生灰度图形,可以称作实时掩模,因此不需“掩模”可以将任意图形直写到光刻胶上。但是系统加工的最小线宽受到缩小物镜系统、曝光深度、栅格效应的影响,随着波长的减小,成本急剧增加。另外系统每次刻蚀的面积有限,若刻蚀大面积图形则涉及拼接问题,要实现高精度的拼接也面临巨大的挑战。

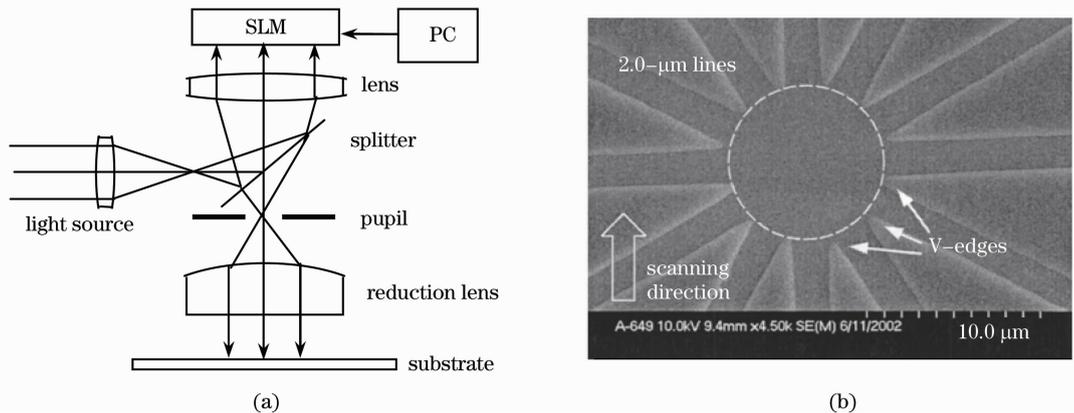


图 1 (a) 缩小物镜光刻系统; (b) 实验结果

Fig. 1 (a) Schematic of imaging reduction system based on SLM; (b) experimental results

国内多家科研团队如中国科学院光电技术研究所^[10],中国科学院上海技术物理研究所^[11]、苏州大学^[12]、西安工程大学^[13]、南昌航空大学^[14]、四川大学^[15,16]等都对 SLM 的特性进行了深入的分析,搭建了缩小投影光刻系统并得到了较高质量的光刻图形。他们从曝光系统的选择、到控制 DMD 的状态与工作台的配合以及缩小物镜的系统的设计做了大量的工作以提高光刻质量和效率,如中国科学院光电技术研究所理论上和实验上分别对比了滤波法、微透镜阵列法以及光束整形元件在消 DMD 栅格效应方面的优缺点;中国科学院上海技术物理研究所为使 SLM 的图形刷新可以与平台运动位置要精确同步对 SLM 控制系统做了深入地分析;西安工程大学利用缩小投影光刻系统制作了复杂微小特征的三维零件;南昌航空大学利用灰阶掩模技术制作了微光学元件;四川大学在原有的缩小透镜光刻系统上正在结合表面等离子体增强效应进行更高分辨率的光刻研究。

2.2 波带片阵列光刻

波带片阵列光刻系统^[17]如图 2(a)所示,该系统主要由光源、SLM、波带片阵列、工作台 4 部分组成。工

作原理:准直后的激光光束经 SLM 反射,入射到波带片阵列上,由波带片聚焦滤波之后成像在涂有光刻胶的基片上,再进一步移动工作平台最终在光刻胶上形成任意形状的图形如图 2(b)所示,点阵的变化受 SLM 的控制。每一个 SLM 直接控制与之对应波带片的一个微小单元,也相当于多个直写系统在同时工作。该光刻技术利用波带片阵列取代了传统光刻中的光刻物镜,而物镜恰恰是最昂贵、最复杂的部分,因而设备成本也大幅度降低。无掩模的灵活性在波带片阵列中也起了很大作用,其生产效率远远大于其他的无掩模光刻。其生产效率依赖于空间光调制器寻址速度和 SLM 的单元数(与波带片阵列的单元数相同),以目前可以达到的 5120 个单元,5 MHz 的寻址速度的 SLM 为例,其产出率可以达到每小时产出 40 片口径为 150 mm 的基片。麻省理工学院(MIT)的纳米结构实验室一直致力于基于波带片阵列无掩模光刻的研究^[17],该研究小组制作出的波带片阵列的数值孔径最高可达 0.95,同时还制作出了有 1000 个波带片的阵列,并利用有 24 个波带片阵列搭建了实验系统。该学院的科研人员不用任何的增强技术,利用 400 nm 的波长的光源获得的最小特征尺寸为 150 nm,同时将独特的对比度增强技术和非线性增强技术相结合的方法应用到了波带片阵列光刻技术中,使得特征尺寸达到 $\lambda/20$ 。而且这种光刻几乎不存在临近效应,它的最小特征尺寸由点扩散函数决定,只要很好地压缩点扩散函数,它的分辨率会很高。

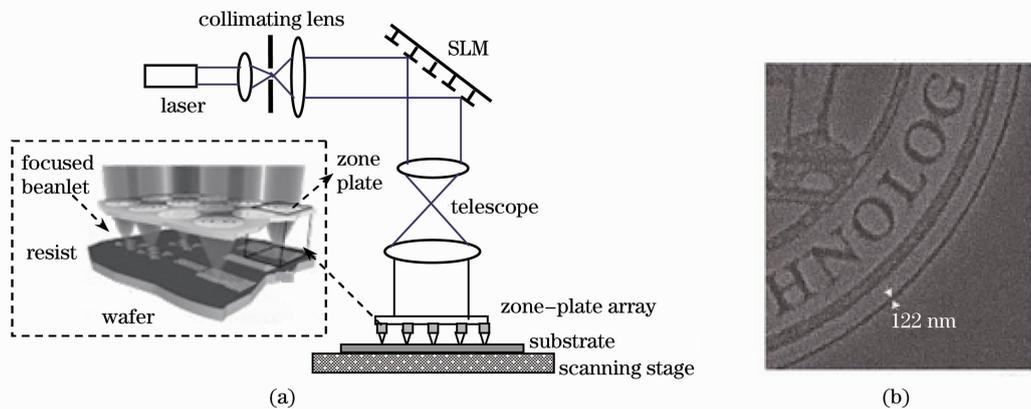


图 2 (a)波带片阵列光刻;(b)实验结果

Fig. 2 (a) Schematic of the zone-plate-array-lithography system; (b) experimental results

波带片阵列也有需要改进的地方,如适用于短波长、大数值孔径的波带片制作难度高,这个直接影响到分辨率的进一步提高;受高阶衍射焦点的影响,使光刻的对比度下降,需要设置互补阻挡层,使得波带片的制作难度进一步增加。虽然采用波带片阵列光刻可以提高生产效率,但是波带片阵列光刻在不用任何分辨率增强技术时难以突破衍射极限。

3 发展中的表面等离子体激元无掩模光学光刻技术

3.1 无掩模表面等离子体基元干涉光刻

当改善金属表面的微结构时,照射到金属表面的光波会引发金属表面的自由电子集体共振,而表面电荷密度的波动会和晶格振动形成的声子耦合而生成激子波,即在金属表面形成表面等离子体激元^[18~20]。SPP 具有表面电磁场的传播性能,它的电场强度在金属与介质的分界面上具有最大值,并且随着垂直于金属表面方向的距离增大而呈指数衰减。SPP 的波长比照明波长短,且对入射光波长,金属表面的结构、介质参数以及环境条件等非常敏感,因此可在化学或生物传感、近场光学技术、纳米光刻等方面有重要应用。

光学衍射极限使得传统光刻难以制作出小于 $1/4$ 波长的特征线条,然而用同样的波长激发出来的 SPP 波长要短得多,因此利用近场激发的 SPP 进行光刻和成像原则上可以突破衍射极限制作出更精细的纳米结构。

中国科学院光电技术研究所的罗先刚等^[18]在 2004 年提出了 SPP 共振干涉光刻技术,并用 436 nm 波长的入射光照射周期为 300 nm 的金属光栅激发短波长的 SPP,在光刻胶上制作除了周期为 100 nm 的图形,该方法为制作纳米周期结构提供了一条新的思路。四川大学郭小伟等^[19]进一步利用波长为 436 nm 的光获得小于 100 nm 的特征尺寸,原理如图 3 所示。当一束光入射到棱镜底部,如果能满足等离子体共振条件,入

射光的大部分能量将不被全反射,而是耦合到金属表面激发出 SPP。SPP 局限在金属表面的近场范围内,近场能量非常强,计算表明它比普通全内反射的隐失波强度高数倍。两束光分别穿过棱镜以一定角度入射到基底上,它们各自激发的 SPP 在金属表面相向传播将会发生干涉,会获得小于 $1/4$ 波长的特征线条。

表面等离子体光刻虽然可以突破衍射极限获得更高的分辨率,由于隐失波在垂直于金属表面的方向上呈指数衰减,所以纳米量级的光斑只存在于微结构附近 (100 nm),要实现高效率高精度的光刻必须设计一种新的系统可以精确控制等离子体与基底之间的缝隙宽度,否则会出现光刻胶被损坏或者是曝光不够。目前有很多种做法来解决这一问题^[21~23],下面介绍几种基于 SLM 的表面等离子体激元直写技术。

3.2 利用表面等离子体飞行透镜实现近场高效无掩模纳米光刻

美国加州大学伯克利分校的研究人员研制出一套利用近场的表面等离子体“飞行透镜”实现纳米光刻的系统^[24,25],该系统在突破衍射极限的同时可实现高效率光刻。所用的等离子体透镜是由一同心环行光栅,其圆环周期数、圆环宽度、Al 膜厚度分别为 250、50、80 nm,可以把波长为 365 nm 的紫外激光光束聚焦成小于 100 nm 的光斑,局部密度比入射光强 100 倍,该系统的结构如图 4 所示。系统中紫外激光经扩束准直系统入射到 SLM,之后被缩小成几个微米的光斑进入等离子体透镜,透镜在旋转基底上将光束聚焦成小于 100 nm 的光斑,根据图形发生器的信号控制 SLM 的状态,写入位置根据圆盘相对于纺锤编码器的角位置与沿辐射方向的压电平台的位置确定,随着平台的移动可以获得任意形状图案如图 5 所示。为实现高速扫描光刻,将等离子体透镜阵列刻蚀在透明的空气轴承下表面,随着基底的旋转,在基底的上表面和空气轴承下表面之间将会产生气流,气流会对空气轴承产生向上的空气动力学升力,此力与悬臂梁对空气轴承的作用力构成一平衡力,使得空气轴承底部的等离子体透镜与基底之间能保持合适的高度,所以空气轴承底部的等离子体透镜阵列被称为“飞行透镜”。所设计高轴向轴承的硬度和小的冲击质量使得自适应方法能使空气轴承不需要反馈回路控制,克服了高速扫描的主要技术障碍,当基底外围的旋转速度为 $4\sim 12$ m/s 时,透镜的飞行高度保持在要求的 (20 ± 2) nm。

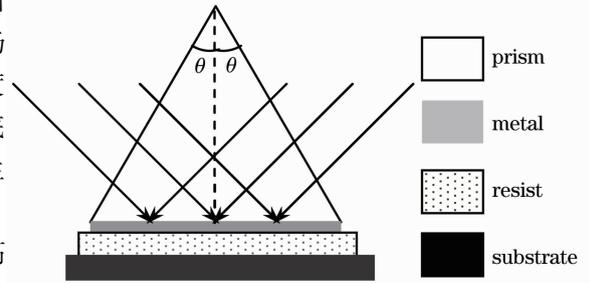


图 3 表面等离子体激元光刻结构示意图
Fig. 3 Schematic of the localized surface plasmon polariton illumination lithography (LSPPIL) process

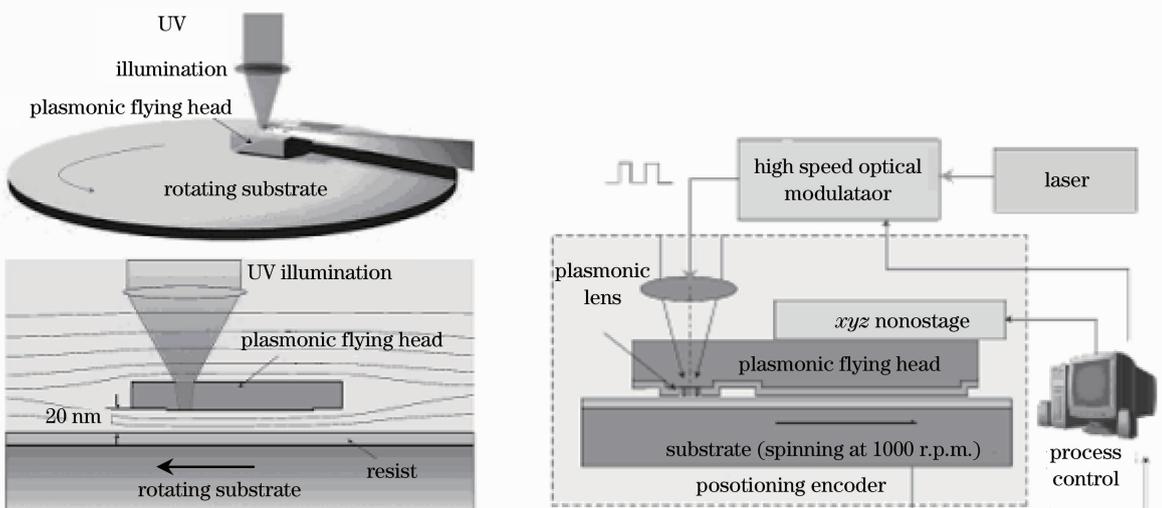


图 4 利用等离子体飞行透镜实现高效率的无掩模光刻系统

Fig. 4 Schematic of high-throughput maskless nanolithography using plasmonic lens

该系统所获得的最小特征尺寸为 80 nm,如果选择波长较短的等离子体,控制导向机制,系统分辨率可达 $5\sim 10$ nm;利用单个等离子体透镜的光刻效率已经高于其他无掩模光刻,使用等离子体透镜阵列可以获

得更高的效率,大约比传统无掩模光刻的效率高出 2~5 个数量级,一个刻有 1000 等离子体透镜阵列,在 10 m/s 的扫描速度下,2 min 可加工出一 12 inch(1 inch=25.4 mm)的基片。

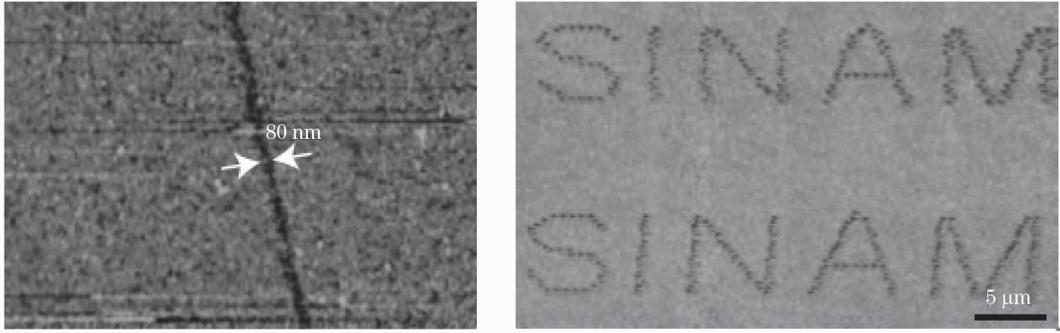


图 5 利用飞行透镜进行近场无掩模光刻的曝光图片

Fig. 5 AFM images obtained with maskless lithography by flying plasmonic lens at near field

3.3 利用蝴蝶型聚焦器件阵列的直写技术

利用纳米尺寸蝴蝶型聚焦器件^[26,27]可突破衍射极限进行纳米光刻,美国 Purdue 大学一研究小组设计了一套光刻系统,其工作原理如图 6(a)所示。首先利用干涉仪控制模板和光刻胶之间高度平行,然后将两者靠近并接触,两者之间有一层厚度约为 10 nm 的润滑剂可以减少两者之间的摩擦,再让波长为 355 nm 的激光由准直扩束经有蝴蝶型聚焦器件阵列聚焦之后,在光刻胶上聚焦为小于 100 nm 的光斑,随着压电平台的移动,就可以获得平行的直条,图 6(b)为获得的最小线宽,如果配合使用 SLM 比如 DMD,就可以获得任意形状的纳米图案。该小组人员在 Cr 膜上利用 FIB 制作了 2×2 外围尺寸为 170 nm×170 nm 中间缝隙为 25 nm 的蝴蝶型聚焦器件阵列,并以 5 μm/s 的扫描速度在 S1805 的光刻胶上获得平行直条纹的特征线宽为 85~90 nm。

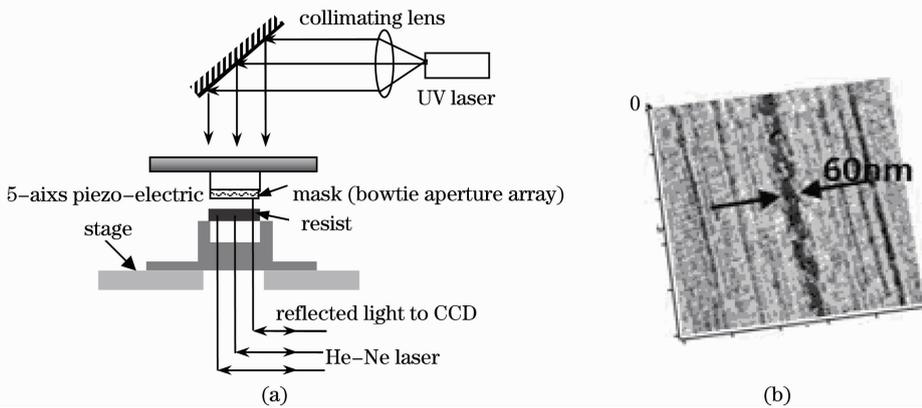


图 6 (a)蝴蝶型聚焦器件阵列光刻装置示意图;(b)曝光照片

Fig. 6 (a) Schematic of Bowtie-shaped ridge aperture nanolithography setup; (b) AFM image

该装置与其它等离子体直写技术相比可以不需要缩小透镜组对入射到蝴蝶型聚焦器件阵列前的光斑进行缩小,但是必须用透明的基底才能用干涉仪实现模版与光刻胶之间的平行度控制,所以在不透明的硅片上进行直写有局限。

3.4 利用双波长曝光的表面等离子体激元辅助直写技术

飞行透镜、蝶型聚焦器件以及二维金属孔阵列都可以满足等离子体聚焦器件与光刻胶之间缝隙小于 100 nm 的苛刻要求。四川大学的纳光子技术研究所的研究人员提出了一种新的双波长曝光的表面等离子体激元辅助直写系统^[28,29],他们利用 441 nm 和 355 nm 波长的激光进行数值模拟,如图 7(b)在厚度为 150 nm 的光刻胶底部获得了 44 nm 的线宽,距底部 50 nm 处的特征尺寸也小于 100 nm,其曝光深度可以达到几百纳米,其结构如图 7(a)所示。激光经准直扩束经 SLM 反射经成像后被二维的倒金子塔阵列(上下底部尺寸分别为 800 nm×100 nm 和 80 nm×100 nm,高度为 120 nm,周期为 1 μm)聚焦成 80 nm 的光斑,金子塔阵列和镀有 50 nm 银膜的基底之间形成一个 SPP 的准法布里-珀罗腔^[30,31],构成新的纳米微结构促成

SPP 的共振以放大入射光的强度,入射波和由银膜反射回来的波形成的驻波穿透深度可达几百纳米,利用两种波长光同时曝光可以获得更均匀的光场分布,控制 SLM 的和工作台移动就可以获得任意纳米图形。与前面几种系统相比该系统的曝光深度大,不需要构建复杂的控制系统。如果利用更短的波长,优化显影时间以及选择其他光刻胶,特征尺寸可以进一步缩小。

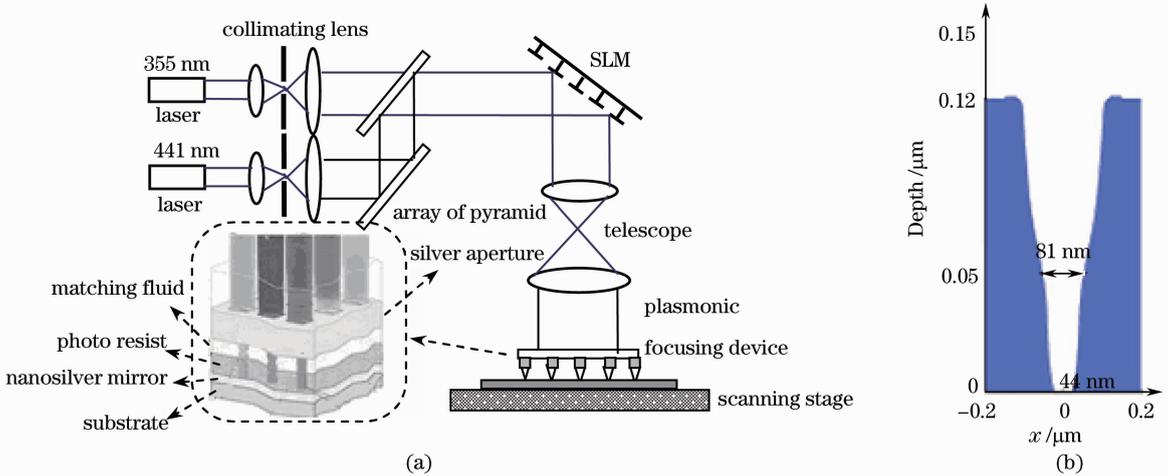


图 7 (a) 双波长曝光的表面等离子体激元辅助光刻系统; (b) 模拟结果

Fig. 7 (a) Schematic of the plasmonic direct writing system constructed by two lasers with different wavelength; (b) simulation result

4 结 论

基于 SLM 的数字光刻技术具有不受限于任意三维面形结构、不需要常规掩模,不存在对位误差、并可对掩模图形实时修改和不需要昂贵设备以及制作周期短等优点,为制作纳米器件提供了一条有效的途径。近场的表面等离子体激元直写技术能突破光学衍射极限可以进一步提高器件的集成度和速度。将几种技术合理地组合后有望解决传统光学光刻所面临的难题,并在降低成本和曝光出高质量的图形方面具有很好的潜力,同时将改善电子束光刻生产效率低下和传统掩模光刻的掩模成本大幅上升之间的矛盾而广泛地应用于纳米技术领域。但也要看到基于 SLM 的无掩模光学光刻技术,在真正产业化之前还面临着一些挑战,如高效率 SLM、光刻线宽控制、图像覆盖和抗缺陷形变以及新的抗蚀涂层的制备。总之,这种廉价、高产方案给出了向下一代纳米制造技术进军的新方向。

参 考 文 献

- Zhou Yuan, Li Yanqiu, Liu Guangcan. Study on pellicle optimization and polarization aberration induced by pellicle in hyper numerical aperture lithography[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0407001
周 远, 李艳秋, 刘光灿. 超大数值孔径光刻中掩模保护膜优化及偏振像差研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0407001
- R. Fabian Pease. Maskless lithography[J]. *Microelectron. Engng.*, 2005, **78-79**: 381~392
- Wang Jenshiang. High Resolution Optical Maskless Lithography Based on Micro-Mirror Arrays[D]. Stanford; Stanford University, 2006. 9~15
- Gan Fuxi, Wang Yang. Breaking through the optical diffraction limits, developing the nano-optics and photonics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900104
干福熹, 王 阳. 突破光学衍射极限发展纳米光学和光子学[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900104
- Cui Zheng. Micro-Nanofabrication Technologies and Applications [M]. Beijing: Higher Education Press, 2009. 107~198
崔 铮. 微纳米加工技术及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009. 107~198
- Larry J. Hornbeck. 128 multiplied by 128 deformable mirror device[J]. *IEEE Trans. Electron Dev.*, 1983, **30**(5): 539
- Huang Dajie, Fan Wei, Lin Zunqi. Spatial laser beam shaping using digital micromirror device[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0502008
黄大杰, 范 薇, 林尊琪. 数字微镜器件用于光束空间整形[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0502008

- 8 Shi Lingna, Pan Yingjun, Dong Guangxian. Projection objective design of grating light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3283~3288
史玲娜, 潘英俊, 董光先. 基于光栅光调制器的投影物镜设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3283~3288
- 9 Kin Foong Chan, Zhiqiang Feng, Ren Yang *et al.*. High-resolution maskless lithography [J]. *J. Microlithogr. Microfabrication, Microsyst.*, 2003, **2**(4): 331~339
- 10 Yanli Li, Wei Yan, Jian Wang *et al.*. Methods of eliminating the grid effect based on DMD technique of maskless lithography[C]. *SPIE*, 2010, **7657**: 1~6
- 11 Huang Xindong, Yin Tao. Key techniques of DMD in laser lithography[J]. *J. Applied Optics*, 2011, **32**(2): 363~366
黄新栋, 尹涛. 激光光刻中数字微镜器件关键技术研究[J]. *应用光学*, 2011, **32**(2): 363~366
- 12 Wu Zhihua, Zhou Xiaohong, Wei Guojun *et al.*. A way of parallel interferential laser direct writing with DMD[J]. *Laser & Infrared*, 2008, **38**(5): 424~428
吴智华, 周小红, 魏国军等. 采用 DMD 并行输入的激光干涉直写方法[J]. *激光与红外*, 2008, **38**(5): 424~428
- 13 Xu Guangshen, Ma Xunming, Luo Shen *et al.*. Novel stereolithography system employing digital micro-mirror device[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1892~1897
胥光申, 马训鸣, 罗声等. 基于数字微反射镜器件的快速成形系统[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1892~1897
- 14 Yufang Rao, Yiqing Gao, Ningning Luo *et al.*. Reserch and design on DMD digital photolithography system[C]. *SPIE*, 2010, **7657**: 1~10
- 15 Guo Xiaowei, Du Jinglei, Luo Boliang *et al.*. Image model for DMD-based gray-tone lithography system[J]. *Acta Photonic Sinica*, 2006, **35**(9): 31~35
郭小伟, 杜惊雷, 罗铂靓等. 基于数字微反射镜灰度光刻的成像模型[J]. *光子学报*, 2006, **35**(9): 31~35
- 16 Guo Xiaowei, Du Jinglei, Chen Mingyong *et al.*. Removal of pixel structures by optimizing the parameters of imaging system in digital photolithography[J]. *Acta Photonic Sinica*, 2007, **36**(3): 462~466
郭小伟, 杜惊雷, 陈铭勇等. 优化成像系统参数去除数字光刻像素栅格[J]. *光子学报*, 2007, **36**(3): 462~466
- 17 Henry I. Smith, R. Menon, A. Patel *et al.*. Zone-plate-array lithography: a low-cost complement or competitor to scanning-electron-beam lithography[J]. *Microelectron. Engng.*, 2006, **83**: 956~961
- 18 X. G. Luo, T. Ishihara. Surface plasmon resonant interference nanolithography technique[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(23): 4780~4782
- 19 Xiaowei Guo, Jinglei Du, Yongkang Guo *et al.*. Large-area surface-plasmon polariton interference lithography[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(16): 2613~2615
- 20 Yukun Zhang, Xiaochun Dong, Jinglei Du *et al.*. Nanolithography method by using localized surface plasmon mask generated with polydimethylsiloxane soft mold on thin metal film[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(13): 2143~2145
- 21 N. Murphy-DuBay, L. Wang, E. C. Kinzel *et al.*. Nanopatterning using NSOM probe integrated with high transmission nanoscale bowtie aperture[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(4): 2584~2589
- 22 Y. Kim, S. Kim, H. Jung *et al.*. Plasmonic nano lithography with a high scan speed contact probe[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(22): 19476~19485
- 23 E. X. Jin, X. Xu. Obtaining super resolution light spot using surface plasmon assisted sharp ridge nano-aperture[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(11): 111106
- 24 Zhaowei Liu, Jennifer M. Steele, Werayut Srituravanich *et al.*. Focusing surface plasmons with a plasmonic lens[J]. *Nano Lett.*, 2005, **5**(9): 1726~1729
- 25 Werayut Srituravanich, Liang Pan, Yuan Wang *et al.*. Flying plasmonic lens in the near field for high-speed nanolithography[J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2008, **3**(12): 733~737
- 26 L. Wang, S. M. V. Uppuluri, E. X. Jin *et al.*. Nanolithography using high transmission nanoscale bowtie apertures[J]. *Nano Lett.*, 2006, **6**(3): 361~364
- 27 Sreemant M. V. Uppuluri, Edward C. Kinzel, Yan Li *et al.*. Parallel optical nanolithography using nanoscale bowtie aperture array[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(7): 7369~7375
- 28 Sha Shi, Zhiyou Zhang, Ruiying Shi *et al.*. Analysis of fabricating arbitrary nanoscale patterns by LSPP direct writing lithography with two-dimensional metal hole-array[J]. *Microelectron. Engng.*, 2011, **88**: 1931~1934
- 29 Sha Shi, Zhiyou Zhang, Jinglei Du *et al.*. Surface-plasmon-polaritons-assisted nanolithography with dual-wavelength illumination for high exposure depth[J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(2): 247~250
- 30 Werayut Srituravanich, Nicholas Fang, Cheng Sun *et al.*. Plasmonic nanolithography[J]. *Nano Lett.*, 2006, **4**(6): 1085~1088
- 31 C. Genet, T. W. Ebbesen. Light in tiny holes[J]. *Nature*, 2007, **455**(7123): 39~46