

文章编号:1004-4213(2010)05-0792-5

SPPs 光刻曝光显影模拟研究*

郑宇^{1,2}, 王景全¹, 李敏¹, 牛晓云¹, 杜惊雷^{1,†}

(1 四川大学 物理科学与技术学院, 成都 610064)

(2 武警成都指挥学院 教研部, 成都 610213)

摘 要:基于薄层抗蚀剂的曝光模型,建立了普遍适应于表面等离子体激元光刻的抗蚀剂曝光模型. 选用 AZ1500 和 AR3170 两种抗蚀剂对表面等离子体激元干涉光刻曝光显影过程进行计算对比,获得表面等离子体激元光刻显影的最终轮廓. 由此得出工艺优化的条件,对表面等离子体激元光刻的进一步工作和实验开展有着重要的意义.

关键词:SPPs 光刻; 干涉光刻; 曝光潜像; 显影轮廓

中图分类号:O436.1

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103905.0792

0 引言

由于传统光学系统的成像分辨率或聚焦光斑的直径不能突破光学衍射极限,目前已不能满足集成光学对光学元器件纳米尺度化发展的需要^[1-5]. 获得各种纳米级的高效光耦合器、光波导、光调制器及全光集成电路,成为目前纳米光子学领域的一大研究热点. 表面等离子体激元(Surface Plasmon Polaritons, SPPs)是由外部电磁场(如光波)诱导金属表面自由电子集体振荡,从而形成一种沿着金属导体表面传播的电荷疏密波^[6]. SPPs 具有近场增强和波长较短的特性,使用 SPPs 光刻可突破衍射极限,获得高对比度的纳米尺度阵列图形,在制作大面积纳米光子晶体等光子器件方面有广阔的应用前景^[7-8],并受到学界的关注和重视. 由于 SPPs 是一种表面波,不同于普通光的传播,其近场增强且沿深入方向上指数衰减,故 SPPs 的曝光过程使用传统薄层抗蚀剂的曝光模型不能正确描述. 本文建立了 SPPs 抗蚀剂的曝光模型,选用两种抗蚀剂对 SPPs 干涉光刻曝光显影过程进行了计算分析和对比,并根据所得不同工艺条件下抗蚀剂显影轮廓的优劣,给出工艺优化条件,对多束 SPPs 光刻的进一步工作和实验开展都有着重要的意义.

1 SPPs 光刻曝光模型

光激发 SPPs 光刻一般需要如图 1 的三层结构^[9],区域 0 为激励光入射层,区域 1 为金属层,

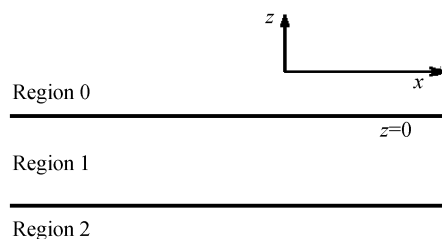


图 1 三层介质结构

Fig. 1 Three-tier structure of media

SPPs 在区域 2 内产生,通过严格的解析推导,其电场分量可表示为

$$\begin{aligned} E_{x2} &= -\frac{k_{z2}}{\omega\epsilon_2} T_{012} H_0 e^{ik_x x} e^{-\kappa z} \\ E_{z2} &= -\frac{k_x}{\omega\epsilon_2} T_{012} H_0 e^{ik_x x} e^{-\kappa z} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 E_{x2} 、 E_{z2} 在 z 方向上指数衰减,其衰减因子为 $\kappa = \frac{i\omega}{c} \sqrt{\epsilon_2^2 / (\epsilon_1(\omega) + \epsilon_2)}$,则 SPPs 总光强为

$$\begin{aligned} I_{\text{SPPs}} &= E_{z2}^2 + E_{x2}^2 = [(-k_{z2})^2 + (-k_{x2})^2] \cdot \\ &\quad \left(\frac{T_{012} H_0 e^{ik_x x}}{\omega\epsilon_2} \right)^2 e^{-2\kappa z} \end{aligned} \quad (2)$$

可见,其光强与波矢、介质属性等多种因素有关,与普通光的强度 $I = E^2$ 区别很大,式中包含 $e^{-2\kappa z}$ 项,此为光强衰减因子,致使光强沿 z 方向极快衰减,因此 SPPs 是一种典型的表面波. 通常薄胶光刻过程模拟,首先基于成像模型计算得到抗蚀剂表面的空间像,如果空间像的焦深较大,可认为光线是垂直地进入抗蚀剂中,如不考虑驻波效应,在抗蚀剂内的光场分布和 PAC 浓度分布可由 Dill 曝光模型快速计算求得. 但对于 SPPs 光刻,由于光场沿 z 方向严重衰减,如沿用已有的成像和曝光过程的计算方法则需要对 Dill 曝光模型作适当修改. 这里考虑 SPPs 的光强衰减在 Dill 模型中增加了一个修正项,

*国家自然科学基金(60676024)和教育部博士点基金(20060610006)资助

† Tel.:028-85412983

Email:dujl@scu.edu.cn

收稿日期:2009-06-29

修回日期:2009-11-25

并建立了抗蚀剂 SPPs 曝光模型,以简化计算.

$$\begin{cases} \frac{\partial I(z,t)}{\partial z} = -I(z,t)[AM(z,t)+B+2\kappa] \\ \frac{\partial M(z,t)}{\partial t} = -I(z,t)M(z,t)C \end{cases} \quad (3)$$

式中 I 为 SPPs 在抗蚀剂中的光强,其衰减由 $AM(z,t)+B$ 和 2κ 共同决定, κ 即为 SPPs 的衰减因子.此模型适用于 SPPs 光刻曝光过程分析,当 Dill 参量 A 、 B 、 C 为 0 时此方程组给出的光场分布还原为式(2).曝光计算中,抗蚀剂表面的空间像为

$$I_{\text{aerial image}} = I_{\text{SPPs}}|_{z=0} = |E_z^2 + E_x^2|_{z=0} \quad (4)$$

通过此模型即可对 SPPs 曝光过程进行分析.

如就干涉光刻而言,式中

$$I_{\text{aerial image}} \propto (|E_{z1} + E_{z2} + \dots + E_{zn}|)^2|_{z=0} + (|E_{x1} + E_{x2} + \dots + E_{xn}|)^2|_{z=0} \quad (5)$$

式(5)可分为 $I_z \propto (|E_{z1} + E_{z2} + \dots + E_{zn}|)^2|_{z=0}$ 和 $I_x \propto (|E_{x1} + E_{x2} + \dots + E_{xn}|)^2|_{z=0}$ 两部分,它们都将使抗蚀剂曝光,其中 I_x 是干扰量,不能对曝光质量产生实质影响.

2 SPPs 光刻曝光潜像分布

因为不同的抗蚀剂在不同工艺条件下的参量不

同,所以选择合适的抗蚀剂尤为重要.由于 SPPs 强度高、分辨率高、传播距离很短,选用 AZ Electronic Materials 公司的 AZ1500 和 AR 公司的 AR 3170 型抗蚀剂,此两种抗蚀剂均为薄型抗蚀剂,比较适合于 SPPs 光刻^[10].两种抗蚀剂在一定厚度和一定工艺条下曝光参量 A 、 B 、 C 的测试结果,如表 1.

表 1 抗蚀剂在一定工艺条下的曝光参量 ABC

Resist	AZ1500	AR3170
Thickness/ μm	0.150(Diluted)	0.150
$A/(\mu\text{m}^{-1})$	1.013 3	0.687 0
$B/(\mu\text{m}^{-1})$	0.217 7	0.070 0
$C/(\mu\text{m}^{-1})$	0.023 9	0.020 1

确定入射光波长为 i 线 365 nm,激励光束总的能量密度为 $2 \text{ mJ}/\text{cm}^2$,胶厚 150 nm.由于 SPPs 指数衰减,传播距离不足 150 nm,此时不考虑由反射产生的驻波效应.曝光模拟结果:图 2 为双束 SPPs 干涉曝光在抗蚀剂中所得潜像.可以看到,PAC 浓度分布与干涉的 SPPs 场分布所得结果完全一致,光场明纹处 PAC 浓度很低,而未曾曝光处则接近 100%,而且在 X 方向上 PAC 浓度变化的周期约为 120 nm,已达到纳米级曝光程度.其中图 2(a)、

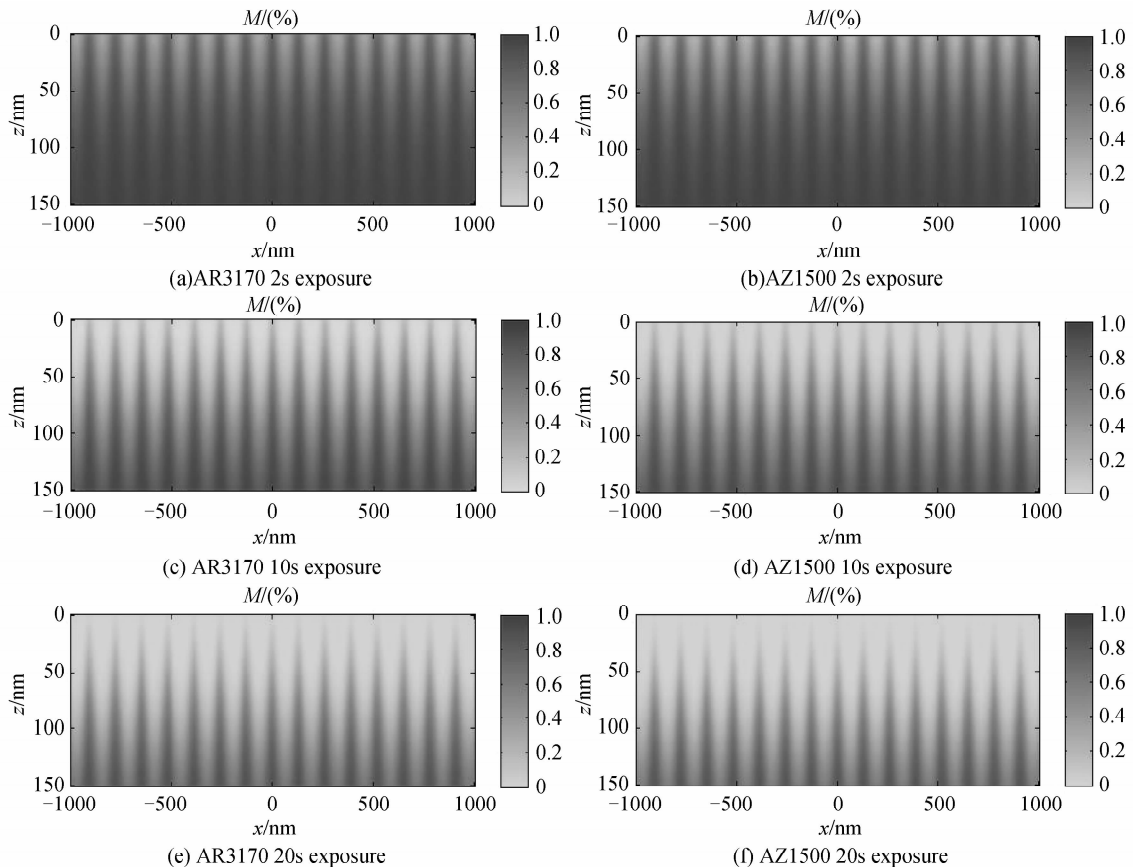


图 2 双束 SPPs 曝光潜像分布对比

Fig. 2 Comparison of potential image after 2 beam SPPs exposure

(c)、(e)为 AR3170 型分别曝光 2 s、10 s、20 s 后的 PAC 浓度分部图, (b)、(d)、(f)为 AZ1500 型分别曝光 2 s、10 s、20 s 后的 PAC 浓度分布图, 通过对比发现, 虽然两种抗蚀剂的曝光参量完全不一样, 但曝光结果极为相似, 人眼无法分辨, 这是由于 SPPs 传播距离短, 抗蚀剂对光强的吸收很小; 而且, 两种抗蚀剂曝光参量中 C 的值比较相近, 也最终促使了两种型号的抗蚀剂曝光潜像相似。

由图 2(a)可见深入抗蚀剂 100 nm 后 PAC 浓度都很高, 说明其曝光严重不足; 而图 2(e)曝光时间仅为 20 s 就略有过量, 说明 SPPs 曝光所需时间很短, 一般在 15s 内即可达到曝光效果. 造成此结果的第一个原因是由于 SPPs 的近场增强的作用, 使得电场强度增大数倍^[9], 这一方面极大地节约了曝光时间, 提高了曝光效率; 但另一方面说明在实验中应对曝光时间进行严格控制, 细微的偏差就会使得曝光过量或不足, 这与本文最初的设想一致. 第二个原因正是由于曝光干扰量 E_x , 在一定曝光时间内, PAC 浓度分布清晰, 说明 E_x 未对曝光质量产生大的负面影响, 应该是由 E_x 在数值上比 E_z 要小一些的缘故, 但随着曝光时间的增加, 这种影响会不断加剧. 从图中可看出, 曝光时间越长, PAC 浓度分布的对比度就越低, 当曝光时间超过 15 s 时, 抗蚀剂表面的 PAC 浓度的周期性分布几乎消失殆尽, 这更加说明在实验中曝光时间必须严格控制. 对于此两种抗蚀剂, 当激励光能量密度为 2 mJ/cm^2 时, 曝光时间 5~10 s 为最优。

最终发现由于 SPPs 在 Z 方向上指数衰减, 使得 PAC 浓度分布在 Z 方向上形成了逐渐增加的“渐变”现象, 这与普通光刻时抗蚀剂内 PAC 浓度分

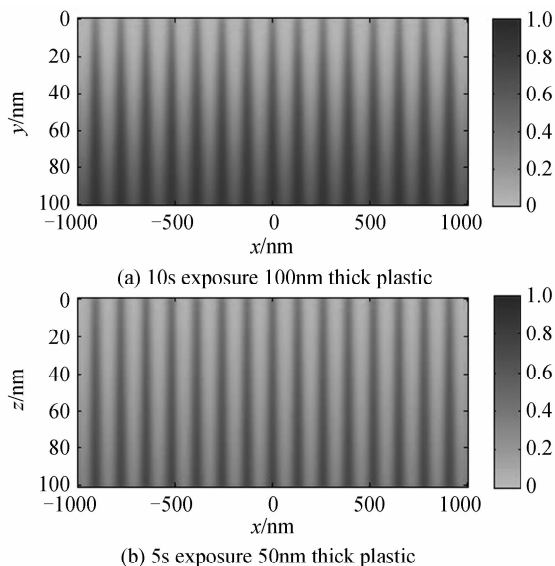


图 3 双束 SPPs 曝光潜像分布
Fig. 3 Potential image after 2 beam SPPs exposure

布不同^[11], 这种浓度上的“渐变”会使得最终的 SPPs 干涉光刻显影轮廓与普通干涉光刻有很大不同. 为了使得抗蚀剂内部 PAC 浓度分布上下趋于一致, 最好的方式是使胶层更薄, 使用 AR3170 型抗蚀剂, 当其胶厚 100 nm 曝光 10 s 和 50 nm 曝光 5 s 时, 曝光效果较好, 模拟结果如图 3。

3 SPPs 显影模拟

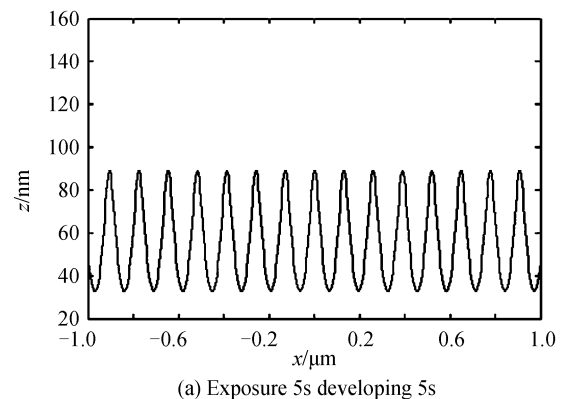
抗蚀剂由 SPPs 曝光后, 其内部各点的 PAC 的浓度发生了变化, 在抗蚀剂中形成潜像, 经显影液溶解后, 即可获得抗蚀剂浮雕图形. 从模型的准确度和易用性两方面考虑, Mack 显影模型具有无可比拟的优势, 当前很多抗蚀剂生产厂商都能提供抗蚀剂的 Mack 显影参量^[9]. 综合看来, 对于 SPPs 的曝光潜像, 使用 Mack 模型能够快速准确地模拟. 抗蚀剂的显影模型确定了 PAC 浓度与局部的显影速率之间的响应关系, 也就是得到了抗蚀剂曝光后其内部各处的显影速率, 要进一步得到抗蚀剂的显影轮廓还必须采用一定的计算机模拟方法, 使速率分布转化为实际的轮廓图形. 本文利用微小单元格去除法 (Cell-Removal) 实现显影过程^[11].

在显影模拟中, 仍选用 AZ1500 型抗蚀剂和 AR3170 型抗蚀剂, 其显影参量如表 2.

表 2 两种抗蚀剂的显影参量

Resist	AZ1500	AR3170
Thickness/ μm	≤ 0.150 (Diluted)	≤ 0.150
$R_{\text{max}}/(\text{nm} \cdot \text{s}^{-1})$	145.33	38.2
$R_{\text{min}}(\text{nm} \cdot \text{s}^{-1})$	0.00	0.099
Mth	-76.07	-0.06
n	2.51	5.1

对双束 SPPs 干涉光刻的显影轮廓进行模拟, 首先选用 AZ1500 型抗蚀剂, 其结果如图 4, 其中图 4(a)为曝光时间 5 s, 显影 5 s 的抗蚀剂轮廓可见显影轮廓周期为 120 nm, 刻槽深度约为 60 nm, 深宽比约为 0.50; 其中图 4(b)为曝光时间 5 s, 显影 50 s



(a) Exposure 5s developing 5s

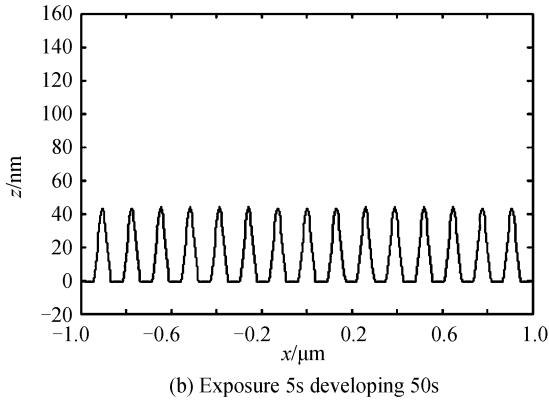


图 4 AZ1500 型抗蚀剂双束 SPPs 曝光显影轮廓
Fig. 4 AZ1500-based dual-beam resist exposure SPPs profile image

的抗蚀剂轮廓,可见显影轮廓周期为 120 nm 不变,刻槽深度约为 45 nm.

结果表明,SPPs 干涉光刻所需显影时间比较短,这是由于 SPPs 干涉光刻的抗蚀剂比较薄,且 AZ1500 抗蚀剂显影速率相对较快,其完全曝光后的速率为 $R_{max} = 145.33 \text{ nm/s}$. 所以,使用 AZ1500 型抗蚀剂制作纳米级结构,显影时间要求很短,并一定要精确控制. 而且, SPPs 干涉光刻显影的最大特点在于显影后的抗蚀剂轮廓与干涉光强分布很相似. 这正是因为在一节所提到的 SPPs 在 Z 方向上指数衰减,同一条纹的 PAC 浓度分布在 Z 方向上逐渐增加. 根据 Mack 显影速率公式计算可知,越深的地方由于 PAC 浓度越大,其显影速率就越小,所需显影时间就越长,经过相同的时间,较深地方由于显影速率慢,所需时间长,显影液横向侵蚀的作用就很小,最终使得显影轮廓与光强的分布一致.

选用 AR3170 型抗蚀剂进行模拟,由于 AR3170 型抗蚀剂是一种很薄的光刻胶,其均匀胶厚大约在 30~150 nm 之间,更适于 SPPs 传播距离短的特点. 首先模拟胶厚为 100 nm 的情况,其结果如图 5. 从图中可以看出,选用 AR3170 型抗蚀剂仍然具备 SPPs 干涉光刻在显影后的抗蚀剂轮廓与干涉光强分布很相似的特点,但刻槽底部较平整. 图 5(a)、

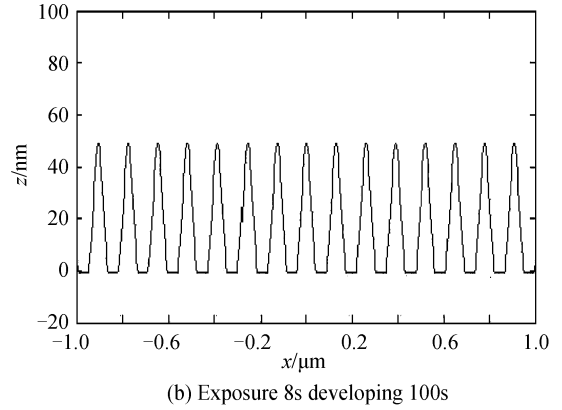
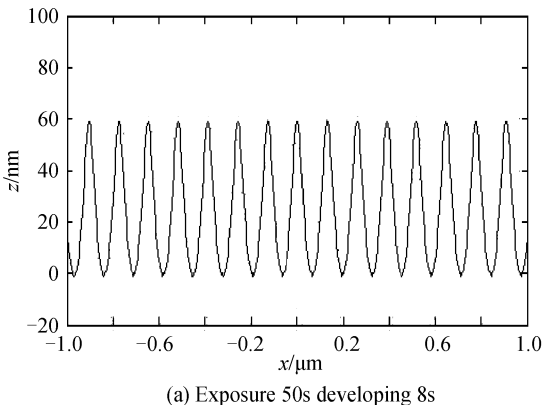


图 5 AR3170 型抗蚀剂双束 SPPs 曝光显影轮廓,胶厚 100 nm
Fig. 5 AR3170-based dual-beam resist exposure SPPs contour enhancement, plastic thickness 100 nm

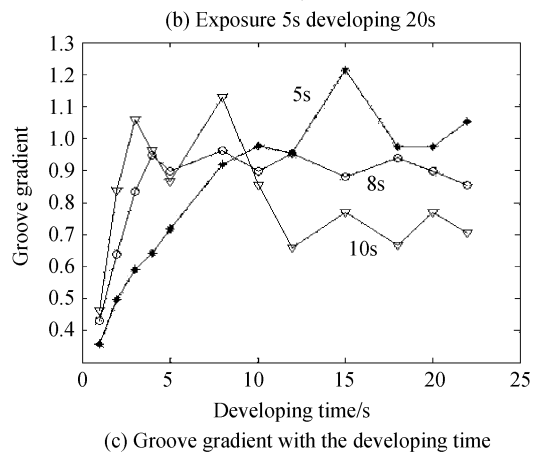
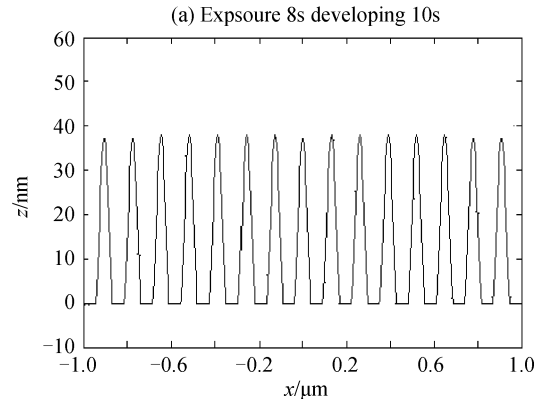
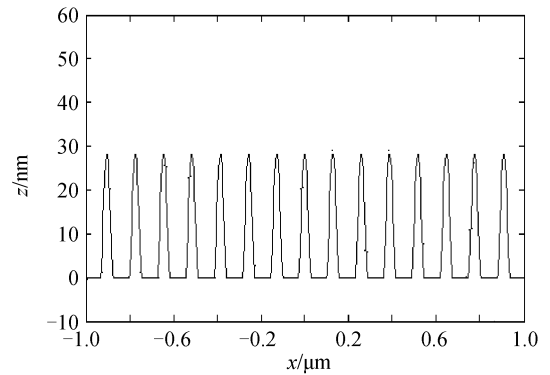


图 6 AR3170 型抗蚀剂双束 SPPs 曝光显影轮廓,胶厚 50 nm
Fig. 6 AR3170-based dual-beam resist exposure SPPs contour enhancement, plastic thickness 50 nm

(b)分别是是抗蚀剂曝光 8 s,显影时间分别为 50 s 和 100 s 时的轮廓,刻槽较 AZ1500 胶更陡直;图 6 (a)、(b)是当胶厚为 50 nm 时的显影轮廓,与图 5 对比发现,刻槽底部平整,此特点在图 4(b)和图 5(b)也有见到,这一方面是由于显影液把底部抗蚀剂完全溶解所致,更重要的是由于胶越薄,光场衰减越少,使得 PAC 浓度分布上下更均匀,因此在图 6 中刻槽不但底部平整,而且陡边更加陡直.图 6(c)是曝光 5 s、8 s、10 s 后,刻槽陡度(陡边的正切值)随显影时间的变化,可见显影时间在 5~20 s 内为最优.

4 结论

由于 SPPs 具有近场增强和沿传播方向指数衰减的等特点,与普通光场强度不同,常见 Dill 模型不能适用.在薄层抗蚀剂的曝光模型基础上,建立了普遍适用于 SPPs 光刻的抗蚀剂曝光模型,并且针对 SPPs 干涉光刻的曝光显影进行了计算模拟,得到 SPPs 曝光显影后抗蚀剂独特的 PAC 浓度分布和最终的显影轮廓,根据 SPPs 曝光显影的结果,得出:1)抗蚀剂的胶厚应小于 150 nm,50 nm 左右效果最佳;2)曝光显影时间应严格控制,激励光能量密度为 2 mJ/cm^2 时,其最优曝光时间在 5~10 s,显影时间由抗蚀剂性质决定,对于 50 nm 厚的 AR3170 型抗蚀剂,显影时间 5~20 s 为最优;3)建议使用高反差的抗蚀剂,轮廓将更好.

参考文献

- [1] CUI Zheng. Micro-nanofabrication technologies and applications[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005, 1-86.
崔铮. 微纳米加工技术与应用[M]. 北京: 高等教育出版社,

- 2005, 1-86.
[2] ZHAO Wei-liu, QI Huo-wei, ZHANG Xiang. Surface plasmon interference nanolithography[J]. *Nano Letters*, 2005, **5**(5): 957-961.
[3] LEI Ming, YAO Bao-li. Theoretical and experimental studies on multi-beam interference by using pyramid lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 757-762.
雷铭, 姚保利. 多棱锥镜产生多光束干涉场的理论与实验研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 757-762.
[4] YANG Yi, ZHANG Su-huai, WANG Guo-ping. Fabrication of two-dimensional metalodielectric quasicrystals by single-beam holography[J]. *Appl Phys Lett*, 2006, **88**: 251104.
[5] ZHANG Jin, FENG Bo-ru, GUO Yong-kang, et al. Laser interference photolithography for fabricating periodic patterns in large area[J]. *Opto-Elec Engineering*, 2001, **28**(6): 20-23.
张锦, 冯伯儒, 郭永康, 等. 用于大面积周期性图形制造的激光干涉光刻[J]. *光电工程*, 2001, **28**(6): 20-23.
[6] LUO Xian-gang, ISHIHARA T. Surface plasmon resonant interference nanolithography technique[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **84**(23): 4780-4782.
[7] GUO X, DU J, GUO Y. Large-area surface-plasmon polariton interference[J]. *Opt Lett*, 2006, **17**(31): 2613-2615.
[8] ZHAO Hua-wei, HUANG Xu-guang, SU Hui. A novel Y-branch waveguide based on surface plasmon polaritons[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1649-1652.
赵华伟, 黄旭光, 苏辉. 基于表面等等离波子的新型 Y 分支波导[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1649-1652.
[9] FANG Liang, DU Jing-lei. Study on SPPs interference lithography based on ATR coupling [D]. Chengdu: Sichuan University, 2008, 5-46.
方亮, 杜惊雷. 厚层抗蚀剂成像特性研究[D]. 成都: 四川大学, 2008, 5-46.
[10] FANG N, ZHANG X. Imaging properties of a metamaterial superlens[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **82**(2): 161-163.
[11] XIAO Xiao, DU jing-lei. Study on imaging characteristics of thick photoresists in lithography [D]. Chengdu: Sichuan University, 2003, 9-42.
肖啸, 杜惊雷. 厚层抗蚀剂成像特性研究[D]. 成都: 四川大学, 2003, 9-42.

Resist Exposure Developing Simulation Study of SPPs Lithography

ZHENG Yu^{1,2}, WANG Jing-quan¹, LI Ming¹, NIU Xiao-yun¹, DU Jing-lei¹

(1 Institute of Physics Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

(2 Department of Teaching and Research, Chengdu Command College of Chinese Armed Police, Chengdu 610213, China)

Abstract: Based on the models of thin-layer resist exposure and developing, the SPPs resist exposure model is established. Two kinds of resist of AZ1500 and AR3170 are chosen to simulate the process of exposure and developing, and the final profile of SPPs lithography is obtained. Some craft optimization conditions are also concluded. The research results are for experiment and future work of SPPs lithography.

Key words: SPPs lithography; Interference lithography; Exposed latent image; Image contours



ZHENG Yu was born in 1981. Now he is a M. S. degree candidate at Physics Department of Sichuan University. And he is also a lecturer at Chengdu Command College of Chinese Armed Police. His research interests focus on lithography and production of nano-scale photonic crystal device.



DU Jing-lei was born in 1964. Now he is a professor and Doctoral Supervisor, and his research interests focus on photo-electronic signal processing, lithography, and production of nano-scale photonic crystal device.