

文章编号 1004-924X(2015)01-0149-08

应用微波技术抑制光刻胶图形的坍塌与黏连

于明岩^{1,2}, 施云波², 赵士瑞¹, 郭晓龙¹, 徐昕伟¹, 景玉鹏^{1*}, 陈宝钦¹

- (1. 中国科学院微电子研究所 中国科学院微电子器件与集成技术重点实验室, 北京 100029;
2. 哈尔滨理工大学 测控技术与通信工程学院 测控技术与仪器黑龙江省高校重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:针对显影工艺中水的表面张力导致的高高宽比抗蚀剂图形的坍塌及黏连, 提出了一种基于微波加热的干燥技术来有效改善纳米抗蚀剂图形的干燥效果。该方法利用微波穿透光刻胶结构直接加热光刻胶图形间隙中残存的去离子水, 水分子吸收微波的光子能量迅速蒸发, 从而有效地抑制光刻胶图形的坍塌与黏连现象。利用提出的基于微波加热的干燥方法, 成功获取了高 260 nm、宽 16 nm 的光刻胶线条组和直径为 20 nm 的光刻胶柱形阵列, 其中高高宽比线条组和由 15 625 根柱子组成的柱形阵列结构没有出现坍塌及黏连情况, 验证了在微波产生的交变电场作用下, 可以减小水分子团簇, 降低水的表面张力。

关键词:电子束光刻; 光刻胶图形; 坍塌; 黏连; 高高宽比; 微波加热

中图分类号: TN305.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152301.0149

Suppression of collapse and adhesion of photoresist based on microwave heating

YU Ming-yan^{1,2}, SHI Yun-bo², ZHAO Shi-rui¹, GUO Xiao-long¹,
XU Xin-wei¹, JING Yu-peng^{1*}, CHEN Bao-qin¹

(1. Key Laboratory of Microelectronics Devices & Integrated Technology,
Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. The Higher Educational Key Laboratory for Measuring &
Control Technology and Instrumentation of Heilongjiang Province,
Institute of Measurement-control Technology & Communication Engineering,
Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

* Corresponding author, E-mail: jingyupeng@ime.ac.cn

Abstract: For the collapse and adhesion of photoresist with nano-structures due to the surface tension of deionized water in electron beam lithography, a drying method based on microwave heating is proposed to improve the quality of the photoresist with nano-structures. The method makes use of the microwave penetrate the photoresist to heat the water stored between resist patterns directly, and the water will evaporate with absorbing energy of microwave. Thus the collapse and adhesion of the

收稿日期: 2014-06-05; 修订日期: 2014-07-13.

基金项目: 国家科技重大专项资助项目 (No. 2009ZX02037-007); 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2006CB932600); 国家自然科学基金资助项目 (No. 61078060)

photoresist with nano-structures can be avoided. The proposed method is used for drying photoresist lines with a height of 260 nm, width of 16 nm and photoresist pillars with the diameter of 20 nm in electron beam lithography and development. The results show that the lines and the array containing of 15 625 pillars are no collapse and adhesion, which demonstrates that the microwave with an alternating electric field can reduce the sizes of water clusters and the tension of deionized water dramatically.

Key words: electron beam lithography; photoresist; collapse; adhesion; high aspect ratio; micro wave heating

1 引言

微机电系统和大规模集成电路的微纳米制造工艺中,去离子水一直是最常用的清洗媒介,但是随着半导体工艺进入 22 nm 节点,如何抑制由于水的表面张力引发的光刻胶图形结构坍塌与黏连现象逐渐成为光刻工艺中的难点。尤其是应用于亚 22 nm 的电子束光刻工艺时,会不可避免地遇到高高宽比的纳米结构光刻胶图形在去离子水的表面张力作用下发生图形断裂、坍塌及黏连现象。近年来,针对不同种类的光刻胶,研究人员从不同角度建立模型,对水的表面张力导致的纳米图形结构的破坏进行建模及仿真分析^[1-6],同时也提出了多种防止图形坍塌与黏连的方法,例如采用低表面张力的溶剂^[7];超临界干燥法^[8-9];冷冻干燥法^[10];此外,还有改善光刻胶的机械性能,提高其杨氏模量的方法^[11]等。但是这些方法都存在一定的局限性,例如低表面张力溶剂的溶胀作用会影响纳米图形边缘的平直度;超临界干燥方法对于压力和温度的应用条件过于严苛;冷冻干燥法会导致图形产生形变等。因此,有必要进一步探索直接降低水表面张力的新技术。

通常情况下,水分子并不以单个形式存在,而是通过彼此间的氢键作用结合为分子簇,这是水具有表面张力的根本原因。分子运动包括直线运动和旋转运动^[12],常温常压状态下,水分子做杂乱无章的布朗运动,属直线运动。

本文提出一种利用 2.45 GHz 微波加热水并使其快速蒸发的干燥法,用于电子束曝光、显影和去离子水置换之后的带有纳米光刻胶结构图形基片的干燥。此方法还可以应用于光栅、波带片、光

子筛的制作^[13-14],深通孔以及碳纳米管内壁的清洗,或者转移石墨烯的样品表面的清洗等。

2 实验

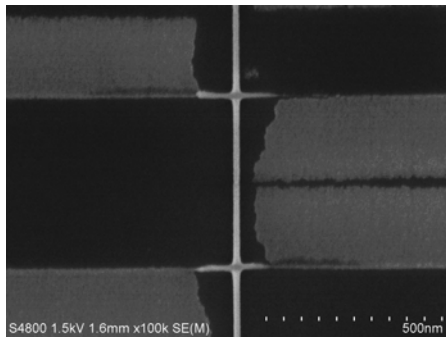
实验采用的 hydrogen silsesquioxane (HSQ) FOX-16 光刻胶,为一种低介电常数材料,具有良好的狭缝填充性能及平面度特性的高分辨率电子光刻胶,其显影剂为水溶性,且能与传统的硅工艺相匹配^[15-16]。实验中,先将 3 片完全相同的硅片在热板上预前烘 2 min,热板温度为 120℃;然后将硅片放进甩胶机空甩 1 min,接着以 3 000 r/min 的转速把 HSQ 旋涂到硅片上,时间为 1 min;最后将涂有 HSQ 的硅片放在热板上进行前烘,热板温度为 120℃,时间为 2 min。

在超净室环境下,利用 JEOL 公司的 JBX-6300FS 纳米电子束光刻系统进行曝光。曝光后,用 MF-CD26 显影,显影时间为 4 min,显影结束后,用去离子水置换显影液。其中 1# 硅片采用实验室中传统干燥方法,即利用微细的氮气流吹干;2# 硅片直接从去离子水中取出,在超净工作台自然干燥;3# 硅片用微波干燥,即将仍然保持光刻胶图形部分浸没在去离子水中的硅片置于 2.45 GHz 微波产生的交变电场内,去离子水受热蒸发实现干燥。实验结果采用日立公司生产的 S-4800 扫描电子显微镜进行观察。

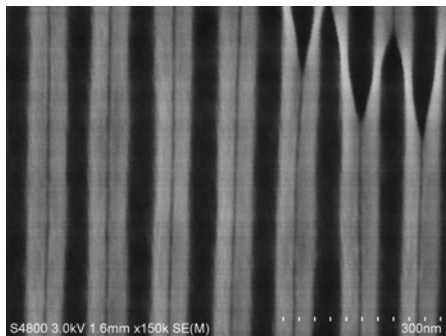
3 结果与讨论

3.1 干燥效果的对比分析

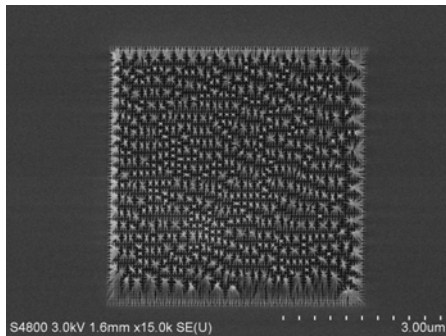
图 1 所示为传统方法干燥后,工艺中所出现的一些坍塌和黏连现象,成为废片,影响后续工艺。



(a) 微细氮气流动导致高 260 nm, 宽 16 nm 光刻胶线条断裂和坍塌
 (a) Fracture and collapse of lines with 260 nm high and 16 nm wide caused by N₂ flow



(b) 自然晾干导致高 260 nm, 宽 16 nm 光刻胶线条顶部成对地黏连
 (b) Adhesion at tops of lines with 260 nm high and 16 nm wide with drying naturally



(c) 高 260 nm, 直径 20 nm 光刻胶纳米柱阵列顶端黏连
 (c) Adhesion of pillars with 260 nm high and 20 nm diameter

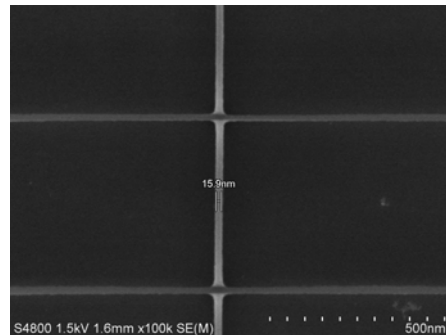
图 1 水表面张力造成的线条坍塌及阵列的黏连

Fig. 1 Collapse and adhesion caused by surface tension of water

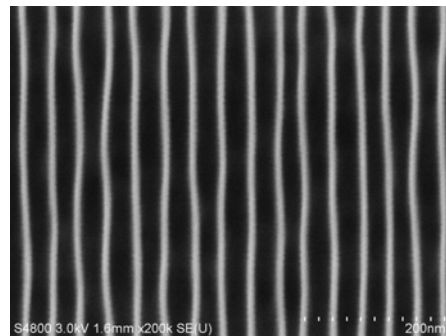
其中,图 1(a)所示为 1# 硅片上,高 260 nm, 宽 16 nm 的高高宽比线条断裂和坍塌情况,在实验室常用的氮气干燥过程中,气流使薄而高的光刻胶梁产生断裂,并且在水表面张力的拉伸作用下产生坍塌并黏在基板上;图 1(b)所示为 2# 硅片

在超净工作台中自然干燥,大部分高高宽比线条由于水表面张力的作用,顶部成对地黏连在一起;图 1(c)所示为 2# 硅片上直径 20 nm,高 260 nm 的密集的高高宽比光刻胶纳米柱阵列由于水的表面张力作用,在顶端黏连为一束的情况。

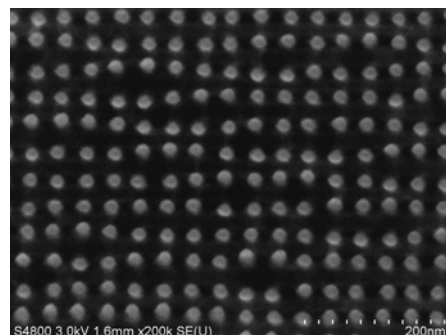
图 2 所示为采用新方法微波干燥 3# 硅片的结果,可以看到经微波干燥后有显著的改善。



(a) 高 260 nm, 宽 16 nm 光刻胶交叉线条没有断裂坍塌
 (a) Cross lines with 260 nm high and 16 nm wide are not collapse



(b) 高 260 nm, 宽 16 nm 光刻胶单根线条顶端没有成对的黏连
 (b) Single lines with 260 nm high and 16 nm wide are not adhesion



(c) 高 260 nm, 直径 20 nm 光刻胶阵列顶端没有黏连
 (c) Pillars with 260 nm high and 20 nm diameter are not adhesion

图 2 微波干燥结果

Fig. 2 Drying results of electromagnetic wave

其中,图 2(a)所示为高 260 nm,宽 16 nm 的高高宽比光刻胶交叉线条,线条保持完好,没有断裂坍塌;图 2(b)所示为高 260 nm,宽 16 nm 光刻胶单根线条顶部没有产生黏连现象;图 2(c)所示为直径为 20 nm,高为 260 nm 的柱形阵列,纳米柱子顶端没有黏在一起,也没有倒覆。

3.2 光刻胶线条及纳米柱形阵列倒塌黏连模型

上述实验结果分析表明,使用传统干燥方法时,水的表面张力作用会使得高高宽比的光刻胶细线条发生拉伸变形,甚至从根部断裂及坍塌。图 3 所示为高高宽比线条坍塌模型, H 为线条高度, L 为线宽, D 为线条长度, A 为深宽比(H/L), ω 为线条单位长度上所受的力, δ_{\max} 为最大形变量, E 为杨氏模量, I 为截面的惯性矩, EI 为抗弯刚度, p 为线条间去离子水产生的压强, R 为液面半径, σ 为水的表面张力。 δ_{\max} 和 I 的表达式为:

$$\delta_{\max} = \frac{\omega H^4}{8EI}, \quad (1)$$

$$I = \frac{1}{12}DL^3, \quad (2)$$

$$\delta_{\max} = 1.5 \frac{\omega}{ED}HA^3, \quad (3)$$

$$\omega = pD, \quad (4)$$

$$P = \sigma/R. \quad (5)$$

公式(4),(5)带入到(3)中得出 δ_{\max} 与表面张力的关系式^[17-18]为:

$$\delta_{\max} = 1.5 \frac{\sigma}{RE}HA^3. \quad (6)$$

由式(6)可知,最大形变量与水的表面张力成正比。通常在干燥过程中,硅片上没有光刻胶图形部分的水首先流失,残留的去离子水集中在密集图形结构的内部,因此密集图形部分更容易被破坏。

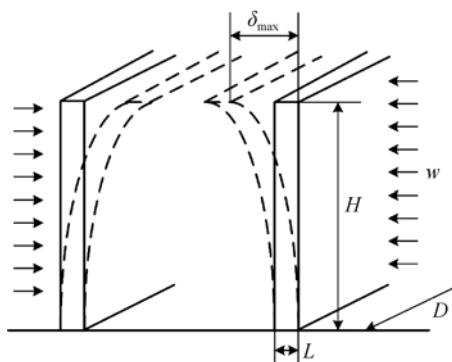
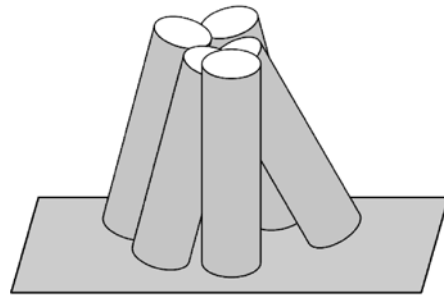


图 3 光刻胶线条坍塌模型
Fig. 3 Schematic diagram of line collapse

图 4 所示为光刻胶柱形阵列黏连示意图及黏连模型,分析两个柱子的受力情况,它们之间的毛细力为^[19]:

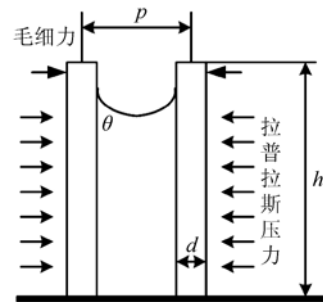
$$F_c = -\frac{\partial W_c}{\partial p} = -\frac{\pi\sigma d^2 \cos^2 \theta}{2\sqrt{p^2 - d^2}}, \quad (7)$$

其中: W_c 为两个柱子间的相互作用能, d 为柱子的直径, p 为柱子的中心距, σ 为水的表面张力, θ 为接触角。柱子间的毛细力与水的表面张力成正比,即表面张力越大,柱子受到的毛细力越大,越容易在顶端黏连在一起。因此,对于光刻胶线条和光刻胶柱形阵列,如果在干燥过程中降低水的表面张力,可以有效改善坍塌及黏连情况。



(a) 光刻胶阵列黏连示意图

(a) Schematic diagram of pillars adhesion



(b) 两个柱子受力分析

(b) Force analysis of two pillars

图 4 光刻胶阵列黏连及受力模型

Fig. 4 Adhesion of pillars and force analysis

在显影过程结束后,除表面张力外,其他参数均为定值。对于杨氏模量 E ,曝光剂量越大,显影后光刻胶的杨氏模量越大,当电子束曝光的剂量从 $19.4 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 变化至 $2\,000 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 时,显影后 HSQ 杨氏模量 E 将从 0.5 GPa 变化至 2 GPa ^[20]。这是由于在大剂量曝光的区域,受电子束曝光时高能电子轰击的作用,光刻胶的绝大部分的 H 变

成氢气释放出来,光刻胶中留下 O 和 Si,变成比较纯的无定性 SiO_2 ,使杨氏模量增大。实验采用的曝光剂量最低值为 $500 \mu\text{C}/\text{cm}^2$,最大曝光剂量为 $2\ 000 \mu\text{C}/\text{cm}^2$,通过电子束曝光、显影和传统的去离子水清洗、自然干燥后的样品,在显微镜下观察,发现曝光剂量在 $500\sim 800 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 的情况下,设计宽度值为 50 nm 以下的线条基本倒覆,甚至从根部折断而漂离,设计宽度值为 100 nm 以上的线条不发生倒覆现象(因为深宽比较小)。而曝光剂量在 $1\ 000\sim 2\ 000 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 的情况下,设计值为 50 nm 以下的线条倒覆的图形有显著减少,这是由于曝光剂量增大后,显影后的线条变粗,深宽比减小,同时也有杨氏模量变大的缘故。但是杨氏模量的增大并不是防止光刻胶微细结构倒塌和黏连的主要因素。

3.3 微波对水分子运动形式的影响

通常情况下,液态水中的水分子是以分子簇形式存在的,由于分子团簇的结构,使得水具有表面张力。表面张力与温度基本呈负相关,常压下,在恒温 20°C 的超净室,水的表面张力为 $72.74 \text{ mN}/\text{m}$;沸点为 100°C ,此时水的表面张力降低到 $58.92 \text{ mN}/\text{m}$,说明水加热后,水的表面张力会随着温度升高而降低,加热到沸点,开始快速蒸发。但是,即使在沸腾的情况下仍然有比较大的张力(在采用表面活性剂干燥的实验中,醇类等表面活性剂的表面张力在 $10\sim 30 \text{ mN}/\text{m}$ 之间^[21])。为此,进行了热板加热干燥的实验。热板加热是从底部开始受热,加热到一定程度后,首先从底部出现气泡,逐渐变大,以后又受流体对流的影响,而且热板加热的时间要比微波加热长得多,得到的实验结果很不理想,仍然有坍塌与黏连现象,并且出现明显的漂胶现象。

从图 2 中可以看出,采用微波干燥法干燥后的光刻胶线条及纳米柱子阵列效果明显,这说明在微波作用下,一方面微波的热效应使水温度升高,另一方面微波的非热效应使水分子产生旋转运动,破坏了部分水分子间的氢键,使大分子团簇分解为小分子团簇,从而有效地降低了水的表面张力。

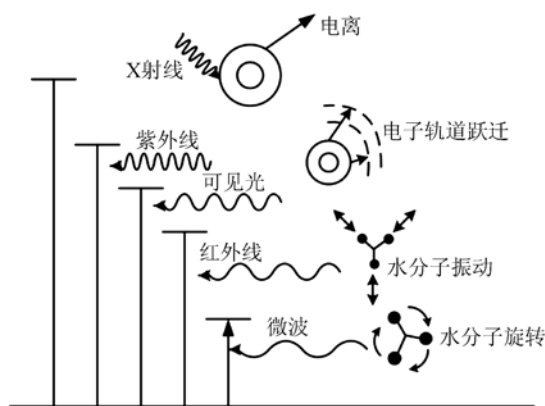


图 5 不同频率的微波对水分子运动形式的影响

Fig. 5 Effect of electromagnetic waves with different frequencies on water molecules with different motions

图 5 所示为不同频率的微波对水分子运动形式的影响^[22]。在微波干燥纳米图形过程中,采用 2.45 GHz 的微波,其光子能量约为 $1\times 10^{-5} \text{ eV}$,这个量级的光子能量会使水分子产生旋转及扭转。将显影后的光刻胶图形置于微波产生的交变电场中时,微波会穿透光刻胶直接作用于纳米图形间隙中残留的水,由于水是极性分子,因此水分子的极性会跟随交变电场方向变化而重新排列。在 2.45 GHz 的高频交变电场中,水分子会由初始的杂乱无章运动,最终达到快速旋转状态,在水分子不断旋转升温过程中,彼此间碰撞,摩擦,由于分子间氢键的键能比化学键的键能要弱的多,因此旋转运动有可能导致分子键氢键断裂,从而使水分子簇变小。失去周围水分子限制的小水分子簇或者单一的水分子,它们的偶极矩方向随着外加交变电场方向的不断变化而变化,内能增加,温度升高,迅速膨胀,然后蒸发。在这个过程中,微波能量转化为水的内能^[23]。

微波在水中的穿透深度^[24]:

$$D_p = \frac{\lambda}{2\pi \times \tan \delta \sqrt{\epsilon_r'}}, \quad (8)$$

其中: λ 为微波波长; $\tan \delta$ 为 L_f 与 ϵ_r' 的比值; L_f 为损耗系数; ϵ_r' 为相对介电常数。对频率为 2.45 GHz 的微波,假设开始加热时,水的温度为 25°C ,此时 $\epsilon_r' = 78$, $L_f = 12$, $\tan \delta = 0.15$,因此得出 $D_p = 1.4 \text{ cm}$;而对于频率更高的红外线及可见光等波段的电磁波,例如在红外波段,硅的禁带宽度为 1.1 eV ,即对应的吸收波长为 $1.1 \mu\text{m}$,所以波长大于 $1.1 \mu\text{m}$ 的电磁波才能穿透硅片直接给

抗蚀剂图形内部的水加热。对于波长 $1.1 \sim 14 \mu\text{m}$ 的红外波段, 相同条件下的穿透深度 D_p 为 $0.13 \sim 1.69 \mu\text{m}$, 这一深度远小于微波的穿透深度, 而对于频率更高的波段, 穿透深度会更小。

因此可以得出, 对于红外及更高波段的电磁波, 主要通过热传递的方式逐渐加热水域, 无法起到穿过水域直接加热抗蚀剂图形内部去离子水的作用。

表 1 不同方法制备的高高宽比图形对比

Tab. 1 Comparison of patterns with high aspect ratios fabricated by different methods

	实验方法	工作结果
Keith J Morton 等 ^[25]	纳米压印+反应离子刻蚀	高宽比为 60 的硅纳米线
E. Chubarova 等 ^[26]	电子束曝光+反应离子刻蚀	高宽比为 10.6 的铂波带片, 高宽比为 6 的铂光栅
Xuhan Dai 等 ^[27]	光刻技术+磁粉与高分子聚合物	高宽比为 10 的磁性高聚物
Seung A. Woo 等 ^[28]	紫外曝光+表层光刻胶显影+反应离子刻蚀	高宽比为 3.4 的 S-8
Changqing Xie 等 ^[29]	电子束曝光+X 射线曝光+电镀	高宽比为 14 的金光栅
本文	电子束曝光+微波干燥	高宽比为 16 的 HSQ 线条, 高宽比为 20 的 HSQ 点阵

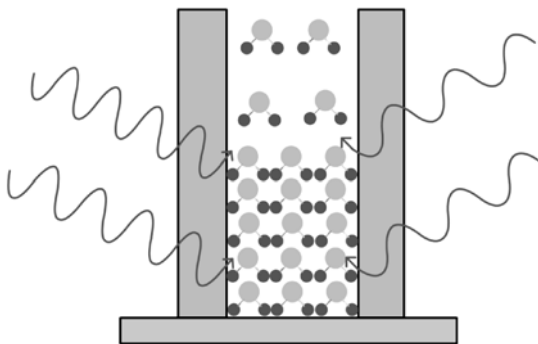


图 6 微波加热光刻胶结构中的去离子水示意图

Fig. 6 Schematic diagram of deionized water in resist lines heated by electromagnetic wave

表 1 所示为本文结果与其他研究人员所取得实验结果的对比。实验结果表明, 微波能量可以有效降低水的表面张力。随着分子簇逐渐减小, 水的表面张力降低, 水作用在纳米图形上的力也随之减小, 可以较好地完成纳米图形的干燥。微波加热过程中, 光刻胶之间的水作为一个整体被加热, 即各部分同时被加热, 而热板加热的热量是从底部逐渐扩散到内部的热传递和热对流的加热方式, 所以称微波加热为“内部加热”, 加热机理如

图 6 所示。但微波加热也存在局限性, 例如图 2 微波干燥结果的电子显微镜照片中可以看到, 虽然高高宽比的线条和纳米柱阵列光刻胶结构图形没有坍塌和黏连现象, 但是仍然可以看到光刻胶线条和纳米柱阵列的顶部有不同程度的倾斜和弯曲, 干燥结果仍然不够理想。同时, 在实际工艺中如何控制微波的能量、时间以及如何把握加热温度的问题, 有待进一步的摸索。

4 结 论

本文采用一种基于微波加热的干燥技术, 有效地改善了纳米抗蚀剂图形的干燥效果, 成功干燥了深宽比分别为 16 和 13 的线条和点阵。实验结果表明, 在 2.45 GHz 微波产生的交变电场作用下, 通过改变极性水分子的运动方式, 使其快速升温并且蒸发, 可以有效降低水的表面张力。随着半导体工艺关键尺寸的降低, 这种方法为纳米尺度抗蚀剂图形的干燥, 深通孔及碳纳米管内壁的清洗或者转移石墨烯的样品表面清洗提供了一种新思路。

参考文献:

[1] PARK J, PARK J H, KIM E, *et al.*. Conformable solid-index phase masks composed of high-aspect-ratio micropillar arrays and their application to 3D

nanopatterning[J]. *Advanced Materials*, 2011, 23 (7): 860-864.

[2] SURESH R, MUKTI A, HU W C. Stability of HSQ nanolines defined by e-beam lithography for Si nanowire field effect transistors[J]. *Journal of*

- Vacuum Science and Technology B*, 2008, 26: 2247-2251.
- [3] FINN A, LU B, KIRCHNER R, *et al.*. High aspect ratio pattern collapse of polymeric UV-nanoimprint molds due to cleaning[J]. *Microelectronic Engineering*, 2013, 110: 112-118.
- [4] DUAN H, YANG J K W, BERGGREN K K. Controlled Collapse of High-Aspect-Ratio Nanostructures [J]. *Small*, 2011, 7(18): 2661-2668.
- [5] AKIRA K, NORIO M. Analysis of pattern collapse of ArF excimer laser resist by direct peeling method with atomic force microscope tip [J]. *Microelectronic Engineering*, 2001, 57-58: 683-692.
- [6] GORELICK S, VILA-COMAMALA J, GUZENKO V A, *et al.*. High aspect ratio nanostructuring by high energy electrons and electroplating [J]. *Microelectronic Engineering*, 2011, 88 (8): 2259-2262.
- [7] YAMASHITA Y. Sub-0.1 μm Patterning with High Aspect Ratio of 5 Achieved by Preventing Pattern Collapse [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1996, 35: 2385-2386.
- [8] GOLDFARB D, PABLO J J, NEALEY P F, *et al.*. Aqueous-based photoresist drying using supercritical carbon dioxide to prevent pattern collapse[J]. *J. Vac. Sci. Tech. B*, 2000, 18: 3313-3317.
- [9] SHINODA N, SHIMIZU T, CHANG T F M, *et al.*. Filling of nanoscale holes with high aspect ratio by Cu electroplating using suspension of supercritical carbon dioxide in electrolyte with Cu particles [J]. *Microelectronic Engineering*, 2012, 97: 126-129.
- [10] SCHMITT M, BACKEN A, FÄHLER S, *et al.*. Freely movable ferromagnetic shape memory nanostructures for actuation [J]. *Microelectronic Engineering*, 2012, 98: 536-539.
- [11] SHIBATA T, ISHII T, NOZAWA H, *et al.*. High-aspect-ratio nanometer-pattern fabrication using fullerene-incorporated nanocomposite resists for dry-etching application[J]. *Japanese journal of applied physics*, 1997, 36(12S): 7642.
- [12] SKINNER J L. Following the motions of water molecules in aqueous solutions [J]. *Science*, 2010, 328: 985-986.
- [13] 谢常青,朱效立,牛洁斌,等. 微纳金属光学结构制备技术及应用 [J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900128.
- XIE C Q, ZHU X L, NIU J B, *et al.*. Micro- and Nano-Metal Structures Fabrication Technology and Applications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900128. (in Chinese)
- [14] XIE CH Q, ZHU X L, LI H L, *et al.*. Toward two-dimensional nanometer resolution hard-X-ray differential-interference-contrast imaging using modified photon sieves[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(4): 749-751.
- [15] HENSCHER W, GEORGIEV Y M, KURZ H. Study of a high contrast process for hydrogen silsesquioxane as a negative tone electron beam resist[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2003, 21: 2018-2025.
- [16] CHANDRA D, SHU Y. Stability of high-aspect-ratio micropillar arrays against adhesive and capillary forces[J]. *Accounts of Chemical Research*, 2010, 43(8): 1080-1091.
- [17] KIMIYOSHI D, KAZUNORI M, TETSUYOSHI I, *et al.*. Patterning characteristics of a chemically-amplified negative resist in synchrotron radiation lithography[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1992, 31: 2954.
- [18] TOSHIHIKO T, MITSUAKI M, NOBUFUMI A. Mechanism of resist pattern collapse[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1993, 32: 6059.
- [19] CHANDRA D, YANG S. Stability of high-aspect-ratio micropillar arrays against adhesive and capillary forces[J]. *Accounts of Chemical Research*, 2010, 43(8): 1080-1091.
- [20] MATHIEU L, LU B R, CHEN Y F, *et al.*. Patterning the mechanical properties of hydrogen silsesquioxane films using electron beam irradiation for application in mechano cell guidance [J]. *Thin Solid Films*, 2011, 519: 2003-2010.
- [21] SEAN P D, JI S X, PAUL F N. Mechanical properties of polymeric nanostructures fabricated through directed self-assembly of symmetric diblock and triblock copolymers[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2012, 30: 06F204.
- [22] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/mod4.html#c1>.
- [23] KAATZE U. Hydrogen Network Fluctuations and the Microwave Dielectric Properties of Liquid Water [J]. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, 2000, 1(4): 377-391.
- [24] <http://www1.lsbu.ac.uk/water/microwave.html>.
- [25] MORTON K J, NIEBERG G, BAI S, *et al.*. Wa-

- fer-scale patterning of sub-40 nm diameter and high aspect ratio ($> 50 : 1$) silicon pillar arrays by nanoimprint and etching [J]. *Nanotechnology*, 2008, 19(34): 345301.
- [26] CHUBAROVA E, NILSSON D, LINDBLOM M, *et al.*. Platinum zone plates for hard X-ray applications[J]. *Microelectronic Engineering*, 2011, 88(10): 3123-3126.
- [27] DAO X, MIAO X, SHAO G, *et al.*. A novel fast and low cost replication technology for high-aspect-ratio magnetic microstructures [J]. *Microsystem technologies*, 2013, 19(3): 403-407.
- [28] WOO S A, PARK J Y, KIM S M, *et al.*. Interface imaging process for high resolution and high aspect ratio patterning [J]. *European Polymer Journal*, 2013, 49(6): 1707-1713.
- [29] XIE CH Q, ZHU X L, LI H L, *et al.*. Fabrication of X-ray diffractive optical elements for laser fusion applications [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(3):033402.

作者简介:



于明岩(1987—),女,黑龙江伊春人,博士研究生,2009年7月于哈尔滨理工大学获得学士学位,2009年9月进入哈尔滨理工大学测控技术与通信工程学院硕博连读。主要从事电子束光刻工艺问题的研究。E-mail: yumingyan@ime. ac. cn



景玉鹏(1963—),男,陕西西安人,博士,研究员,主要从事二氧化碳超临界流体/半导体绿色无水清洗技术/MEMS气敏传感器方向的研究。E-mail: jingyupeng@ime. ac. cn

(版权所有 未经许可 不得转载)