



Key Techniques on Preparing High Aspect Ratio Micro and Nano Structures

Jian, Zhao; Lianhe, Dong; Xiaoli, Zhu; Changqing, Xie; Baoqin, Chen; Shi, Peixiong

Published in:
Wei-Na Dianzi Jishu

Link to article, DOI:
[10.13250/j.cnki.wndz.2016.10.008](https://doi.org/10.13250/j.cnki.wndz.2016.10.008)

Publication date:
2016

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Jian, Z., Lianhe, D., Xiaoli, Z., Changqing, X., Baoqin, C., & Shi, P. (2016). Key Techniques on Preparing High Aspect Ratio Micro and Nano Structures. *Wei-Na Dianzi Jishu*, 53(10), 685-690. DOI: 10.13250/j.cnki.wndz.2016.10.008

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

大高宽比微纳结构制备关键技术

赵 健^{1,2}, 董连和¹, 朱效立², 谢常青², 陈宝钦², 史佩雄³

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022; 2. 中国科学院 微电子研究所
微电子器件与集成技术重点实验室, 北京 100029; 3. 丹麦工业大学 DANCHIP
实验室, 丹麦 灵比 2800)

摘要: 利用 HSQ 具有的高分辨率、高反差和低边缘粗糙度等突出的优点并通过大量的工艺实验, 摸索出电子束曝光剂量、显影液配比、显影时间和显影温度等优化条件, 对电子束曝光剂量与线条宽度的关系进行了探索, 有效消除了由于散射电子和背散射电子产生的电子束曝光邻近效应的影响; 通过显影液掺适量氯化钠的溶液配比的显影技术有效提高了图形对比度并且分析了氯化钠与 HSQ 的作用机理; 利用二氧化碳超临界干燥法来抑制气液界面毛细管表面张力作用导致的抗蚀剂结构的坍塌和粘连。实验得到了高宽比为 12 : 1、侧壁陡直性良好的大面积密集纳米结构。

关键词: HSQ; 电子束光刻; 抗蚀剂工艺; CO₂ 超临界干燥; 大高宽比结构

中图分类号: TN305.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4776 (2016) 10-0685-06

Key Techniques on Preparing High Aspect Ratio Micro and Nano Structures

Zhao Jian^{1,2}, Dong Lianhe¹, Zhu Xiaoli², Xie Changqing², Chen Baoqin², Shi Peixiong³

(1. *School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China*; 2. *Key Laboratory of Microelectronic Devices & Integrated Technology, Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*; 3. *DTU DANCHIP, Technical University of Denmark, Lyngby 2800, Denmark*)

Abstract: The HSQ has the advantages of high resolution, high contrast and low edge roughness. Through a lot of process experiments, the optimization conditions of the electron beam exposure dose, the proportion of the developer, the developing time and the developing temperature were explored. The relationship between electron beam exposure dose and line width was explored. The electron beam proximity effect in exposure generated by scattered electrons and back-scattered electrons was effectively eliminated. Through adding appropriate NaCl in the conventional developer, the graphic contrast was improved effectively. The mechanism of action between NaCl and HSQ was analyzed. The collapse and adhesion of resist structure due to the effect of gas-liquid interfacial capillary surface tension were suppressed by the CO₂ supercritical drying

收稿日期: 2016-06-17

基金项目: 国家青年科学基金资助项目 (61308078)

通信作者: 朱效立, E-mail: zhuxiaoli@ime.ac.cn

method. Large-area dense nano-structures with the aspect ratio of 12 : 1 and good steep sidewalls were obtained.

Key words: hydrogen silsesquioxane (HSQ); electron beam lithography; resist process; CO₂ supercritical drying; high aspect ratio structure

DOI: 10.13250/j.cnki.wndz.2016.10.008 **EEACC:** 2550G

0 引言

在微纳米加工技术中,高分辨率和高反差电子束抗蚀剂的应用技术是一个十分关键的工艺技术问题。HSQ (hydrogen silsesquioxane) 是一种有代表性的高分辨率和高反差负性电子束抗蚀剂,它是由 Dow Corning 公司开发的一种新型的高分辨率 (10 nm) 电子束灵敏材料,是基于二氧化硅的无机类化合物 (主要成分是 Si, O 和 H) 材料^[1],属氢硅氧烷倍半体或称氢倍半硅氧烷,其化学式为 $(\text{HSiO}_{3/2})_n$ 。它原本是作为介质使用的一种材料,后来发现它在电子束曝光后, H 键断裂,在碱性显影液作用下释放出氢气,抗蚀剂中保留下 Si 和 O 的成分增大,从而在基片表面生成含有非晶态的二氧化硅为主体成分的纳米结构抗蚀剂图形。虽然它灵敏度很低,但分辨率很高,所以它是电子束光刻亚 50 nm,乃至亚 10 nm 极限加工能力实验中比较理想的电子束感光材料^[2]。根据抗蚀剂的浓度差异,其产品代号分别为:FOX12, FOX13, FOX14, FOX15, FOX16 和 FOX24 等^[3]。匀胶烘烤后 FOX12 胶厚度约为 50 nm, FOX13 胶厚度约为 100 nm, FOX16 胶厚度约为 400 nm, FOX24 是另外一个系列的抗蚀剂。

HSQ 在纳米制造中是一种比较理想的电子束抗蚀剂,它具有许多优点:如具有极高分辨率,可以达到 5 nm;高反差,容易制备剖面陡直的大高宽比结构;由于是收缩性的抗蚀剂,显影后线条边缘笔直;还具有与基片黏附力好、韧性好和不易断裂等良好的物理性质^[4];由于 HSQ 曝光、显影后在基片上留下非晶态的二氧化硅图形,本身就是很好的刻蚀硅的掩模材料,同时在空气中的氧还会继续置换抗蚀剂图形中残留的氢,二氧化硅结构更致密,在纳米结构制造中得到很好的应用;显影工艺中使用的是碱性水溶性的显影液,易于清洗、操作方便,显影后稳定性好;由于曝光、显影后抗蚀剂

图形主要成分是非晶态的二氧化硅,与衬底硅具有较大的反差,电子显微镜观察性能好,不需要镀金,有利于精细结构的测量^[5];经电子束或 X 射线曝光后所形成非晶态的氧化硅,在扫描电镜下抗蚀剂不容易挥发变形、机械稳定性及抗刻蚀性能良好。当然,也有比较突出的缺点:如电子束曝光灵敏度很低、曝光时间很长;抗蚀剂存储有效期较短,需要低温密封保存,HSQ 暴露在空气中很容易胶冻固化,涂胶过程中从存储容器中用滴管取出的抗蚀剂 10 min 就会产生大量的胶粒,涂胶质量很差,若暴露在空气中约 1 h 就会氧化成“果冻”状透明固体,无法再使用,同时,特别注意,它不能分装在玻璃瓶或其他塑料瓶中,同样也会变成“果冻”,如果采用某些溶剂稀释必须马上涂胶,否则也会马上变成“果冻”;曝光、显影后基片容易留下许多纳米级残余胶粒,要求快速涂胶,涂胶后的基片也不易存放时间太长,应及时放入电子束光刻系统腔体内,在真空状态下可以有效减少残留胶粒。

近年来,麻省理工学院 (MIT) 研究机构利用 HSQ 制作了 4.5 和 7 nm 的密集线结构,其厚度分别为 15 和 35 nm^[6]。荷兰的某研究机构利用 HSQ 制作了线宽为 6 nm 的孤立线,厚度为 10 nm,以及线宽为 7 nm、间距为 20 nm、厚度为 10 nm 的密集线结构^[7]。中国科学院微电子研究所采用 HSQ 在 JBX6300FS 电子束光刻系统上制备出线宽 5 nm 清晰的格栅结构,厚度为 50 nm,格栅间隔为 100 nm。但上述这些高分辨率的微纳结构实验多采用非常薄的 HSQ 胶 (厚度为 10 ~ 50 nm),其原因是高宽比超过 5 : 1 的抗蚀剂结构图形容易产生坍塌和粘连的现象。但过于薄的抗蚀剂图形不耐刻蚀、也无法在电镀或剥离等图形转移技术中应用,进而影响后续的图形转移^[8]。鉴于 HSQ 诸多的优良特性,本文仍然通过工艺技术优化实验,探索厚胶条件下实现高分辨率、大高宽比

纳米结构制造的可能性。本文通过图形结构的可制造性设计、HSQ 抗蚀剂工艺技术的摸索、电子束变剂量曝光、显影液配比和干燥方法等系列实验，探索电子束抗蚀剂 HSQ 在大高宽比纳米结构制造中的应用。

1 实验

在实验中为抑制电子束光刻纳米结构抗蚀剂图形的断裂、坍塌及粘连等现象发生，采取了如下的措施：①首先在版图设计方面，在器件结构的允许下进行可制造性设计，在图形中增加一些辅助图形，对梁形抗蚀剂结构进行加固处理，如线段增加拐点、十字结构、蜂窝结构、砌砖结构和格栅结构等；②电子束光刻用的基片对曝光结果也有十分重要的影响，建议使用〈100〉晶向的硅基片作为衬底，与 HSQ 胶有比较好的亲和力，曾经使用过〈111〉晶向的硅基片，细线条容易脱落，效果不好；③针对不同的线条宽度要求，选择不同浓度的抗蚀剂，一般需要控制胶厚与所需要曝光线条的宽度比不要超过 5:1，否则容易产生坍塌及粘连现象。用于刻蚀掩蔽层、剥离工艺牺牲层或电镀膜层，要求比较厚的胶膜，需要采取防坍塌及粘连的措施；④涂胶前，需要对基片进行加热去湿处理，涂胶后，通常需要热板烘烤，烘烤温度不易过高，实验证明，HSQ 胶涂胶后可以不烘烤，效果更好；⑤由于纳米电子束曝光变数很大，不同的衬底、不同的图形形状、不同的线宽和不同的图形密度所需要的曝光剂量差别非常大，甚至相差两个数量级，如根据实验结果，抗蚀剂 HSQ 的曝光剂量范围大体如下：10 nm 级的单根线条需要 1 000 ~ 15 000 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 的面曝光剂量，100 nm 级的单根线条需要 500 ~ 1 000 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 的面曝光剂量，1 000 nm 级比较大的线条只需要 300 ~ 500 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 的面曝光剂量。密集图形结构和更大面积图形甚至只需要 100 ~ 300 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 的面曝光剂量就可以感光。对于亚 20 nm 结构，建议使用零宽度线曝光方式，而单根零宽度线条需要 7.0 ~ 8.0 nC/cm 的线曝光剂量；间隔比较近的双根零宽度线条及斜线结构只需要 3.5 ~ 4.0 nC/cm 的线曝光剂量；密集零宽度线结构图形需要的线曝光剂量更小。通常在进行电子束曝光前必须进行变剂量曝光实验，以便

优化参数；⑥显影液浓度、显影液温度和显影时间的选择也很关键，还需要和曝光剂量相匹配，一般选择曝光剂量使显影时间控制在 2 ~ 4 min 比较合适，显影时间太短，HSQ 残留物比较多，显影时间长，容易获得比较细的线条；⑦对于厚胶来说，干燥方法是防止产生坍塌及粘连现象的关键，也是本文介绍的重点。

本文实验的具体工艺参数如下：采用经过抛光和清洁处理的〈100〉晶向的硅基片作为衬底；将 HSQ Fox15 旋涂在衬底上，旋涂转速为 4 000 r/min，旋涂时间为 60 s，然后放到热板上进行前烘，温度为 80 $^{\circ}\text{C}$ ，时间为 4 min，胶厚为 420 nm；采用 JBX-9500FSZ 光刻系统进行曝光，加速电压为 100 kV，束流为 6 nA，选择曝光步距为 2.5 nm；选择不同的电子束曝光剂量，分别为 11 000, 12 000, 13 000, ..., 20 000 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ，进行变剂量曝光实验；在常规的显影液 MF-CD26 中加入质量分数为 4% 的 NaCl，配置成混合显影液，显影温度为 35 $^{\circ}\text{C}$ ，时间为 3 min。在显影液中注入去离子水置换残留显影液，达到定影目的，温度为 30 $^{\circ}\text{C}$ ，时间为 40 s，然后再用异丙醇 (IPA) 置换掉去离子水；用处于超临界状态的 CO_2 置换 IPA，进行烘干，温度为 37 $^{\circ}\text{C}$ ，最大压强为 1 100 psi (1 psi = 6 894.76 Pa)。最后，用热板进行坚膜处理，温度为 140 $^{\circ}\text{C}$ ，时间为 2 min。

2 结果和讨论

利用光刻胶制作大高宽比结构图形一直都是一个难题，由于器件工艺的需要，为制作大高宽比结构，需要采用增厚的负性电子抗蚀剂胶 HSQ，在厚胶的情况下，电子束曝光大面积密集图形结构，由于密集的散射电子和背散射电子的叠加，加重了电子束曝光邻近效应的影响^[9]，容易造成大高宽比结构图形深处显影不干净的现象，所以需要通过电子束变剂量曝光实验，寻找最合适的曝光剂量。同时，因为大高宽比结构的抗蚀剂图容易发生坍塌及粘连现象，尤其在显影工艺中，由于水的表面张力导致的大高宽比抗蚀剂图形的坍塌及粘连现象尤为严重，需要探索抑制坍塌及粘连现象的显影工艺及烘干方法。

2.1 电子束变剂量曝光实验

由于电子束光刻系统的电子束斑束流分布为高斯分布，本身就具有一定的尺寸（2~4 nm），电子束与抗蚀剂的原子相互作用，电子在抗蚀剂层产生散射（称之为前散射）。前散射电子的扩展作用，主要影响线条的宽度。电子束进入衬底后，电子与衬底材料原子相互作用，产生的散射电子有部分通过衬底界面返回到抗蚀剂中，称之为背散射电子，背散射电子的强度虽然比较弱，但波及范围可达到数十微米，对大面积密集图形的邻近效应起主要作用。通常在图形尺寸跨度比较大、最小图形尺寸在20 nm以下的大面积密集图形结构的情况下，需要采用BEAMER软件对其图形数据进行复杂的邻近效应校正处理。本实验的主要目的是讨论如何抑制坍塌及粘连现象的问题，对于原设计线宽为45 nm、周期为90 nm的光栅结构图形，只需要对周期性图形进行简单的线宽几何修正，设置图形每边收缩5 nm，所以实际图形曝光宽度修正为35 nm。采用变剂量曝光实验，分别为11 000，12 000，13 000，……，20 000 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 共十个不同的曝光剂量。实验结果显示较合适的剂量为15 000 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 。图1和图2所示分别为曝光剂量为13 000和15 000 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 的显影结果。图3和图4分别为曝光剂量14 000 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 下线宽25和35 nm的显影结果。从图1和图2对比，可以看出在相同的显影条件下，曝光剂量为13 000 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 的情况，由于曝光剂量不足，显影结果线条偏细，高宽比增大，容易产生粘连，而曝光剂量为15 000 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 的结果比较理想。从图3和图4对比，可以看出在

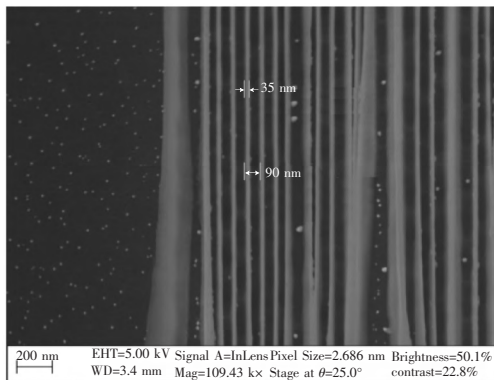


图1 曝光剂量为13 000 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 时的显影结果

Fig. 1 Developing result using the exposure dose of 13 000 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$

相同的显影条件和相同曝光剂量（14 000 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ）的条件下，由于几何修正太大，线宽为25 nm的线条，呈现曝光剂量不足，显影结果线条偏细，高宽比增大，图形变形较大。而曝光线宽修正为35 nm的线条显影结果比较理想。

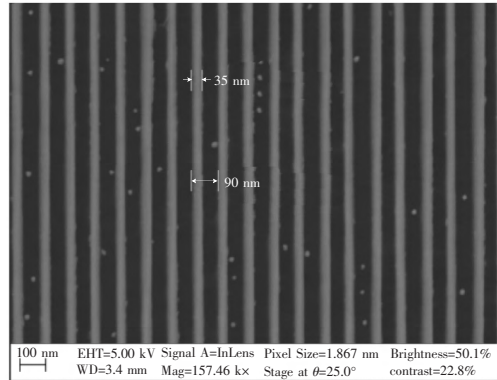


图2 曝光剂量为15 000 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 时的显影结果

Fig. 2 Developing result using the exposure dose of 15 000 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$

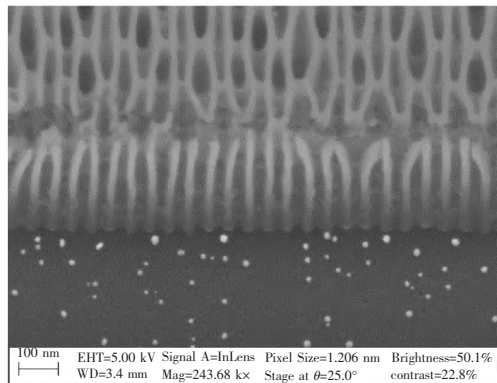


图3 曝光剂量为14 000 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 下线宽25 nm的显影结果

Fig. 3 Developing result of the 25 nm linewidth under the exposure dose of 14 000 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$

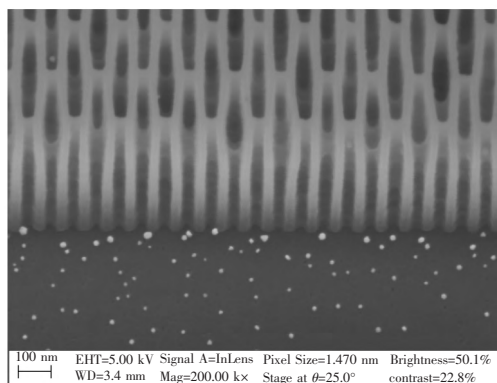


图4 曝光剂量为14 000 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 下线宽35 nm的显影结果

Fig. 4 Developing result of the 35 nm linewidth under the exposure dose of 14 000 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$

2.2 显影方法

在实验中, 采用在常规的 HSQ 显影液 MF-CD26 原液中加入质量分数为 4% 的 NaCl 配制成的混合显影液, 同时, 显影液温度控制在 35 °C, 显影时间为 3 min。在碱性溶液中加入氯化钠 (NaCl) 配置成的显影液可有效提高显影后 HSQ 抗蚀剂图形的对比度和显影速度, 这种改良的显影液对于制作大高宽比微纳结构十分关键, 由于溶液中添加的钠离子有类似酸的作用, 它与 Si-O 中的氧原子发生反应, 弱化了 Si-O 之间的化学键强度, 促使显影液中氢氧根 (OH^-) 加快溶解没有被电子束曝光的抗蚀剂 HSQ^[10], 盐溶液也加快了 HSQ 中原子间化学键的断裂速度, 使化学反应过程中化学键的断裂快于化学键的重组, 促进深槽中化学反应过程, 从而提高了 HSQ 的对比度^[11], 并且有助于降低抗蚀剂图形边缘粗糙度。此外, 由于 HSQ 在常温下, 采用 MF-CD26 原液显影速度相当慢, 适当提升显影液的温度有助于提高显影速度。根据实验, 显影液水浴温度控制在 35 °C 比较理想, 但温度不宜过高, 将显影温度提升到 50 °C, 发现 HSQ 溶解速度过快, 显影时间不好掌握, 同时抗蚀剂减薄严重, 降低了抗蚀剂图形的质量。

2.3 干燥方法

大高宽比微纳结构制备过程中, 在显影后的干燥步骤中由于液体的表面张力作用, 极易发生纳米结构胶图形断裂、坍塌及粘连, 所以找到合适有效的干燥方法十分重要。实验室条件下, 常规的干燥方法是用微细的氮气枪气流吹干或者甩干, 对于含有纳米尺寸抗蚀剂图形的基片不可取, 氮气枪气流容易促使抗蚀剂图形断裂或倒伏。而采用洁净工作台台中自然凉干的方法, 可以避免抗蚀剂图形断裂和移位脱落现象, 但对其中大高宽比的图形结构, 由于水珠逐渐缩小, 表面张力越来越大, 仍然避免不了坍塌及粘连的现象。和传统的工艺相比, 超临界流体 CO_2 干燥具有显著的优势。超临界条件下 CO_2 的气液界面消失, 不存在表面张力, 避免了由于毛细表面张力作用导致的微观结构变化^[12]。本实验中采用 CO_2 超临界干燥的方法进行干燥, 温度为 37 °C, 最大压强为 1 100 psi, 获得了较为理想的效果。图 5 和图 6 分别为传统的干燥和 CO_2 超临界干燥的 45° 倾斜电子显微镜照片, HSQ 胶厚为 420 nm、

周期为 90 nm、胶梁宽度为 35 nm, 高宽比为 12 : 1。

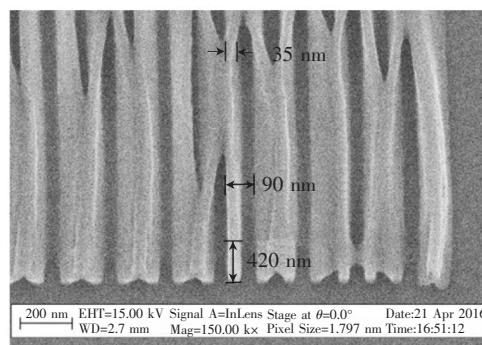


图 5 传统干燥方法得到的结果

Fig. 5 Results obtained by using the conventional drying method

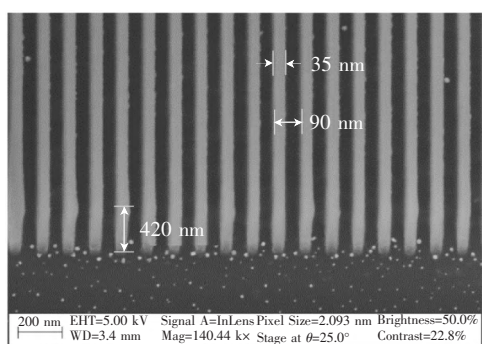


图 6 超临界 CO_2 干燥后获得的结果

Fig. 6 Results obtained by using the supercritical CO_2 drying method

3 结 论

基于二氧化硅的无机类化合物材料 HSQ 是一种在纳米制造中比较理想的高分辨率、高反差负性电子束抗蚀剂。在利用电子束光刻技术制备大面积、高密度、大高宽比微纳结构的工艺中, 最棘手的问题是抑制电子束曝光邻近效应影响的问题和防止抗蚀剂纳米结构图形坍塌和粘连的问题。本实验从工艺技术角度开展了 HSQ 电子抗蚀剂在大高宽比微纳结构制备中的关键技术的研究。重点介绍了 HSQ 电子抗蚀剂的性能; 电子束变剂量曝光实验和曝光剂量的优化; 在传统的 MF-CD26 显影液中添加质量分数为 4% 的 NaCl 提高 HSQ 抗蚀剂的对比度的显影方法; CO_2 超临界干燥防止大高宽比纳米结构坍塌和粘连的方法。根据上述实验获得了侧壁陡直性良好的高宽比达 12 : 1 的微纳结构。

参考文献:

[1] 赵琨, 陈宝钦, 刘明, 等. HSQ 用于电子束曝光的性能分析 [J]. 微细加工技术, 2008 (4): 10-13.

[2] MILLER M A, POPPE W J, NEUREUTHER A R, et al. Pattern noise in electron beam resists: PMMA, KRS-XE, TOK, HSQ [J]. Vac Sci Technol, 2004, B24 (6): 3025-3030.

[3] HU W, SARVERSWARAN K, LIEBERMAN M, et al. Sub-10 nm electron beam lithography using cold development of poly (methylmethacrylate) [J]. Vac Sci Technol, 2004, B22 (4): 1711-1716.

[4] ROMMEL M, WEIS J. Hydrogen silsesquioxane bilayer resists-combining high resolution electron beam lithography and gentle resist removal [J]. Vac Sci Technol, 2013, B31 (6): 1021-1025.

[5] YANG J K W, BERGGREN K K, DUAN H G, et al. In situ study of hydrogen silsesquioxane dissolution rate in salty and electrochemical developers [J]. Vac Sci Technol, 2011, B29 (6): 11-15.

[6] YANG J K W, BERGGREN K. Using high-contrast salty development of hydrogen silsesquioxane for sub-10-nm half-pitch lithography [J]. Vac Sci Technol, 2007, B25 (6): 2025-2029.

[7] GRIGORESCU A E, van der KROGT M C, KRUIT P, et al. 10 nm lines and spaces written in HSQ, using electron beam lithography [J]. Microelectronic Engineering, 2007, 84 (5): 822-824.

[8] HEEREN A, FLEISCHER M, PEISERT H, et al. Influence of temperature on HSQ electron-beam lithography [J]. Vac Sci Technol, 2007, B25 (6): 2045-2048.

[9] 陈宝钦. 电子束光刻与图形数据处理技术 [J]. 微纳电子技术, 2011, 48 (6): 345-352.

[10] YANG J K W, BERGGREN K K, CORD B, et al. Understanding of hydrogen silsesquioxane electron resist for sub-5-nm-half-pitch lithography [J]. Vac Sci Technol, 2009, B27 (6): 2622-2627.

[11] YAN M, LEE J, OFUONYE B, et al. Effects of salty-developer temperature on electron-beam-exposed hydrogen silsesquioxane resist for ultradense pattern transfer [J]. Vac Sci Technol, 2010, B28 (6): 23-27.

[12] 胡惠康, 甘礼华, 李光明, 等. 超临界干燥技术 [J] 实验室研究与探索, 2000, 19 (2): 33-35.



作者简介:

赵健 (1991—), 男, 吉林长春人, 硕士研究生, 主要从事微纳米衍射光学元件的研制;



董连和 (1953—), 男, 吉林农安人, 教授, 博士生导师, 主要从事先进光学制造技术方面的教学和研究工作;

朱效立 (1977—), 男, 山东定陶人, 博士, 中国科学院微电子研究所副研究员, 现主要从事微纳加工、新器件集成技术和 X/EUV 光学元件的研究。

(上接第 684 页)

[8] DECK L, de GROOT P. High speed non-contact profiler based on scanning white light interferometry [J]. Appl Opt, 1995, 33 (31): 7334-7338.

[9] SINCLAIR M B, HAALAND D M, TIMLIN J A, et al. Hyperspectral confocal microscope [J]. Applied Optics, 2006, 45: 6283-6291.

[10] KINO G S, CHIM S C. Mirau correlation microscope [J]. Applied Optics, 1990, 29 (26): 3775-3783.

[11] WILSON T, CARLINI A R. Effect of detector placement in confocal imaging systems [J]. Appl Opt, 1988, 27 (18): 3781-3799.

[12] 雷李华, 邹子英, 李源, 等. 纳米台阶标准样板的制备和表征 [J]. 微纳电子技术, 2011, 48 (9): 600-604.

[13] ISO 5436-1 2000 geometrical product specifications (GPS) — surface texture: profile method. Measurement standards—part 1: material measures [S].



作者简介:

邵杨锋 (1991—), 男, 浙江绍兴人, 硕士研究生, 主要研究方向为白光干涉和共聚焦测量的上位机软件开发;



雷李华 (1985—), 男, 畲族, 浙江丽水人, 工程师, 主要研究方向为微纳米标准样板的测量与溯源性研究, 发表国内外研究学术论文 20 余篇, 在微纳米计量研究成果中, 曾获国家质检总局科技兴检三等奖 2 次, 获上海市科技进步二等奖 1 次、三等奖 1 次。