材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20260126004

Si粉和过硫酸铵对湿法刻蚀制备隔离腔的影响

郭耀祖[1*]，杨正兵[1]，潘　祺[1]，杜　江[1]，雷　凯[1]，周文斌[2]，舒　平[1]

（1. 中国电子科技集团第二十六研究所，重庆 400060；2. 南京大学 电子科学与工程学院，南京 210046）

摘　要： 基于标准CMOS工艺的微测辐射热计具有传感器与读出电路可一体化集成、工艺简单、成本低以及适合大规模成像阵列制备的优势，其中post-CMOS是制备该类微测辐射热计热隔离腔的关键工艺。文章系统研究了湿法刻蚀工艺中，Si粉和过硫酸铵含量对制备热隔离腔的影响。研究发现，当使用5 wt%的四甲基氢氧化铵溶液刻蚀衬底Si时，在溶液中加入Si粉能有效抑制金属Al电极的腐蚀，添加过硫酸铵能够抑制刻蚀过程中产生的氢气泡对刻蚀进程的阻碍作用，从而显著提高衬底Si的刻蚀表面的平整度。实验结果表明，在四甲基氢氧化铵溶液中，Si粉的最佳浓度为16×10^{-3} g/mL，过硫酸铵的最佳浓度为4×10^{-3} g/mL。通过该优化后的刻蚀溶液，成功制备了具有良好悬空效果的CMOS微测辐射热计阵列结构，为后续器件性能的提升提供了重要工艺保障。

关键词： 微测辐射热计；post-CMOS；湿法刻蚀；隔离腔

中图分类号： TN305.7　**文章编号：** 1001－5868(2026)03－0496－06

Effect of Silicon Powder and Ammonium Persulfate on Wet Etching for Fabricating Isolation Cavities

GUO Yaozu[1], YANG Zhengbing[1], PAN Qi[1], DU Jiang[1], LEI Kai[1], ZHOU Wenbing[2], SHU Ping[1]

(1. China Electronics Technology Group Corporation Twenty-Sixth Research Institute, Chongqing 400060, CHN; 2. Nanjing University, School of Electronic Science and Engineering, Nanjing 210046, CHN)

Abstract: A microbolometer based on standard CMOS technology enables the monolithic integration of sensors and readout circuitry, offering a simplified fabrication process and low cost; therefore, it is well suited for large-format imaging array fabrication. Post-CMOS processing is a critical step for forming a thermally isolated cavity in this type of microbolometer. In this study, the effects of the additions of silicon powder and ammonium persulfate in a wet-etching process on the fabrication of the thermal isolation cavity were investigated. The results showed that, when the silicon substrate was etched in a 5 wt.% tetramethylammonium hydroxide (TMAH) solution, the addition of silicon powder effectively suppressed the corrosion of the Al electrodes, whereas the incorporation of ammonium persulfate mitigated the hindering effect of hydrogen bubbles generated during etching, thereby significantly improving the planarity of the etched Si surface. The optimal concentrations in the TMAH solution were 16×10^{-3} g/mL for silicon powder and 4×10^{-3} g/mL for ammonium persulfate. Ultimately, a CMOS microbolometer array structure with well-suspended membranes was successfully fabricated using the optimized etching solution.

Key words: microbolometer; post-CMOS; wet etch; isolation cavity

收稿日期：2026－01－26.

*通信作者：郭耀祖

0　引言

微测辐射热计是一种可在室温工作的被动式红外热探测器，具有体积小、功耗低、成本低等优点，被广泛应用于夜视侦察、安防监控、疾病检查等领域[1]。近年来，随着信息化和人工智能的快速发展，微测辐射热计逐渐向高集成度、大阵列、低成本方向发展。基于标准CMOS工艺的微测辐射热计，其传感器与读出电路可一体化集成，且工艺简单、成本低，适合大规模阵列制备[2]。该类探测器主要包括标准CMOS和post-CMOS工艺，其中标准CMOS工艺负责完成信号处理电路的制备，技术成熟且工艺稳定；而post-CMOS工艺是通过微机械加工制备隔离腔，释放温度传感器结构，直接影响器件的热隔离性能与温度响应速度，是该类探测器制备的关键工艺[3-5]。

在post-CMOS工艺中，湿法刻蚀技术因操作简便、成本低且对Si衬底具有良好的各向异性刻蚀效果，被广泛用于去除器件下方的Si衬底制备隔离腔[6]。然而，在基于CMOS工艺的基础上，使用湿法刻蚀工艺仍面临两大核心技术难点：(1)四甲基氢氧化铵(TMAH)溶液呈强碱性，对微测辐射热计中的金属Al电极具有强烈的腐蚀作用，不仅会导致芯片电路失效，还会造成衬底Si刻蚀表面不均匀，影响器件的电学性能与结构完整性；(2)TMAH溶液与Si衬底反应过程中会产生氢气，部分氢气形成气泡易附着在衬底表面，阻碍刻蚀进程与产物排出，显著减慢刻蚀速率，进而影响器件结构一致性。尽管在MEMS工艺中，已有研究尝试通过调整刻蚀温度、溶液浓度等参数改善刻蚀效果[7-8]，但在基于标准CMOS工艺制备的器件结构上进行微加工，还未能从根本上解决上述问题。

针对上述问题，本文聚焦post-CMOS工艺中的湿法刻蚀工艺，研究在TMAH溶液中加入Si粉抑制金属Al电极腐蚀，同时添加过硫酸铵($(NH_4)_2S_2O_8$，AP)作为氧化剂，减少氢气生成并改善刻蚀表面平整度。通过设计对照实验，探究Si粉与AP的最佳含量，明确其作用机理，最终形成优化后的湿法刻蚀工艺，并成功制备出了具有良好悬空效果的CMOS微测辐射热计阵列结构。该研究不仅为小型化、轻重量、低功耗、高性能、低成本红外探测器的发展和制备提供了新的思路，而且为制备类似微结构器件的工艺提供实验与理论参考，推动微型传感技术的进一步发展[9]。

1　实验过程

为研究TMAH溶液中Si粉浓度对金属Al膜腐蚀抑制作用的影响，本文设计了方案一的6组实验对照组：首先，配制300 mL浓度为5 wt%的TMAH溶液，然后将其平均分为6组，分别加入不同含量的Si粉，接着在50℃恒温下搅拌溶解直至溶液澄清，最后将温度升高至80℃，分别放入实验用Si片，并持续腐蚀1 h后取出清洗并烘干，进行实验结果表征可获得Si粉浓度最佳的溶液。在Si粉浓度最佳的溶液基础上，继续设计实验方案二的6组实验对照组：首先将上述含有Si粉的溶液温度升至80℃，分别加入一定量的过硫酸铵，待溶液澄清后分别放入实验Si片，最后刻蚀1 h后将硅片取出并清洗烘干，进行结果表征可获得过硫酸铵浓度最佳的溶液。待实验方案一和方案二结束后，最终获得具有最佳浓度的Si粉和过硫酸铵的TMAH湿法刻蚀溶液，具体的加入Si粉和过硫酸铵的浓度如表1所示。

表1　实验方案及加入Si粉和过硫酸铵的浓度表

实验组	添加剂	浓度/($\times10^{-3}$ g/mL)					
实验方案一	Si粉	4	8	12	16	20	24
实验方案二	过硫酸铵	2	3	4	5	6	7

2　实验结果与分析

2.1　Si粉含量对金属Al膜腐蚀抑制作用的影响

研究所使用的自制实验Si片如图1所示，其中黑色区域为衬底Si区域，白色区域为金属Al膜保护区域，沉积Al膜厚度为0.58 μm。

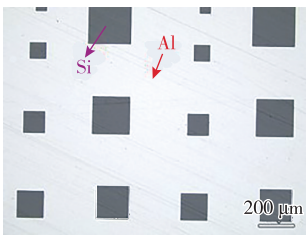
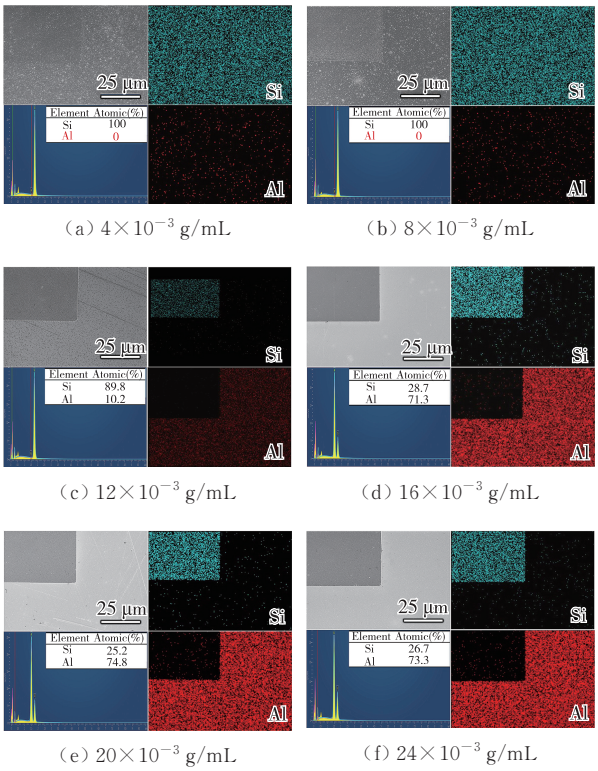


图1　自制实验Si片的显微图

在实验片进行腐蚀的过程中，衬底Si区域用光刻胶进行保护，待腐蚀结束后进行去胶清洗，然后选择正方形刻蚀区域与金属Al膜边界处，用扫描电子显微镜(SEM)和能量色散光谱(EDS)进行观察，结果如图2所示。从图2(a)和(b)中可以看出，当Si粉浓度为4×10^{-3} g/mL和8×10^{-3} g/mL时，衬底

Si和Al膜区域的分界线并不明显，而EDS显示此时的样品表面主要是Si元素，Al元素含量为0，这说明金属Al已经被腐蚀，该含量的Si粉不能对金属Al膜腐蚀起到抑制作用。当加入Si浓度为12×10^{-3} g/mL时，可以清晰看到衬底Si和Al膜区域的分界线，并且元素分布图显示样品表面已经开始有10.2 at.%的Al元素分布，这说明该浓度的Si粉已经开始对金属Al膜的腐蚀起到抑制作用，但是效果依然较差，具体如图2(c)所示。当Si粉浓度大于等于16×10^{-3} g/mL时，通过SEM图可知，衬底Si和Al膜区域的分界线更加清晰，并且Al膜区域的表面光滑平整；从EDS能谱分析发现，当Si粉浓度为16×10^{-3} g/mL，20×10^{-3} g/mL和24×10^{-3} g/mL时，Al元素的原子百分比分别达到71.3 at.%，74.8 at.%和73.3 at.%，具体如图2(d)～(f)所示。该结果说明，在浓度为5 wt%的TMAH溶液中加入Si粉的浓度不低于16×10^{-3} g/mL时，可以较好地抑制刻蚀溶液对金属Al膜的腐蚀。



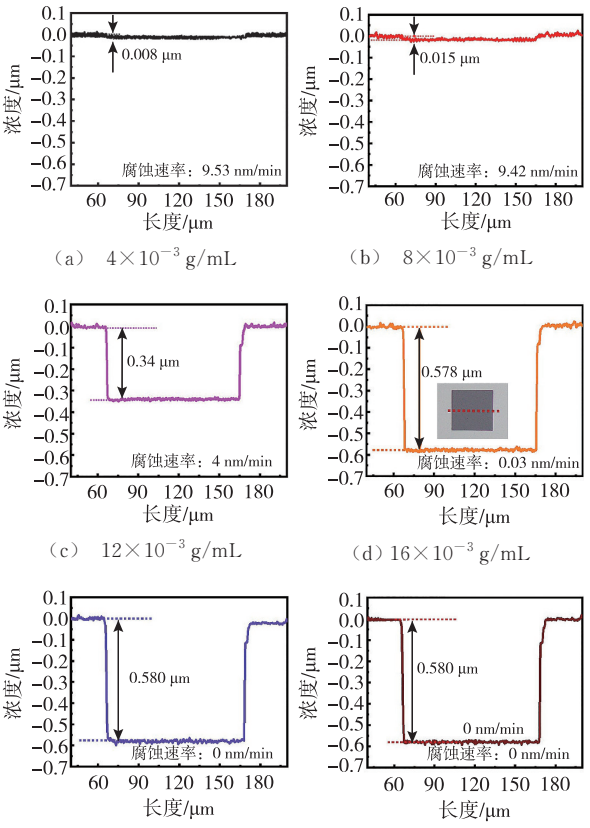
(a) 4×10^{-3} g/mL (b) 8×10^{-3} g/mL

(c) 12×10^{-3} g/mL (d) 16×10^{-3} g/mL

(e) 20×10^{-3} g/mL (f) 24×10^{-3} g/mL

图2 不同Si粉含量的TMAH溶液中刻蚀样品表面的SEM和EDS图

图3是在不同Si粉浓度的溶液刻蚀金属Al后，Si衬底与金属Al膜区域的台阶深度测试数据，其中图3(d)插图中的虚线代表台阶仪扫描路径。可以看出，当Si粉浓度为4×10^{-3}和8×10^{-3} g/mL时，金属Al区域和Si衬底区域的深度分别为0.008和0.015 μm，腐蚀速率分别为9.53和9.42 nm/min；当Si粉浓度增加至12×10^{-3} g/mL时，深度增加至0.34 μm，此时腐蚀速率降低至4 nm/min；当Si粉浓度增加至16×10^{-3} g/mL时，深度增加至0.578 μm，腐蚀速率降低至0.03 nm/min，接近于0；当浓度继续增加至20×10^{-3}和24×10^{-3} g/mL时，深度增加至0.580 μm，腐蚀速率降低至0 nm/min。由此可知，当Si粉浓度不低于16×10^{-3} g/mL时，刻蚀溶液对金属Al不再形成显著的腐蚀作用。



(a) 4×10^{-3} g/mL (b) 8×10^{-3} g/mL

(c) 12×10^{-3} g/mL (d) 16×10^{-3} g/mL

(e) 20×10^{-3} g/mL (f) 24×10^{-3} g/mL

图3 不同Si粉浓度的TMAH溶液中刻蚀样品后的膜厚测试曲线

产生上述效果的原因是TMAH溶液的主要成分为四甲基氢氧化铵($(CH_3)_4NOH$)，该溶液对Si衬底具有较好的各向异性刻蚀作用，即(100)面的刻蚀速率远大于(111)面的刻蚀速率。与Si的主要化学反应如下：

$$2(CH_3)_4NOH+Si+H_2O\rightarrow\left[(CH_3)_4N\right]_2SiO_3+2H_2\uparrow \quad (1)$$

从该反应式可以看出TMAH溶液和衬底Si反应，主要生成四甲基硅酸铵和氢气。其中四甲基硅酸铵易溶于水，氢气也易于排出液体，因此在刻蚀过程中不会产生多余的副产物。而加入一定量的Si粉可以抑制金属Al电极的腐蚀，主要是因为加入Si粉不仅可以降低TMAH溶液的PH值，而且与TMAH溶液反应所生成的产物在遇到Al电极后，会在表面快速反应形成一层很薄的硅酸铝化合物，这种化合物在中度碱性溶液中很难溶解，起到了抑制金属Al腐蚀的作用。主要发生的化学反应如下：

$$Si + 2OH^- + H_2O \rightarrow SiO_3^{2-} + H_2\uparrow \quad (2)$$

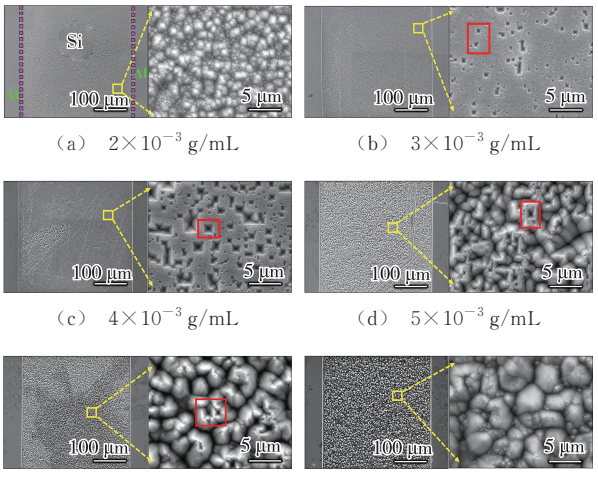
$$2Al + 3SiO_3^{2-} \rightarrow Al_2(SiO_3)_3 + 6e^- \quad (3)$$

而最终在Al电极表面形成的硅酸铝化合物极易水解，可以通过去离子水快速洗涤去除。但是在TMAH溶液中加入Si粉的含量对抑制金属Al电极的腐蚀具有重要的影响，当Si粉含量较少时，在Al电极表面不能形成完整的硅酸铝保护膜，无法起到抑制金属Al电极腐蚀的作用；当Si粉含量较多时，TMAH溶液的PH值大幅度降低，会导致衬底Si的刻蚀速率快速下降或停止[10-11]。为了不影响溶液的刻蚀效果，Si粉的最佳浓度应该为16×10^{-3} g/mL。

2.2　AP含量对衬底Si刻蚀表面的影响

由前面所述可知，当衬底Si在TMAH溶液中被刻蚀时，会产生易于排除的氢气。然而，在实际刻蚀过程中，衬底Si表面产生的氢气并不能全部自行快速地从刻蚀溶液中排除，而是有少量的氢气小气泡附着在衬底Si表面，形成局域的“微掩模”，阻碍了溶液继续刻蚀路径和刻蚀产物的及时排除，最终导致在氢气泡下方形成突起的“小丘”。在反应初始时，刻蚀表面的“小丘”很小而且数量较少，不会影响刻蚀速率。但随着反应持续进行，“小丘”逐渐增多并且不断叠加，导致整个(100)面被“小丘”覆盖，只有(111)面暴露在刻蚀溶液中，此时衬底Si的刻蚀速率会快速下降。为了避免该现象的发生，提高刻蚀表面的平整度，在TMAH溶液中添加过硫酸铵(AP)，取代反应式(1)中的水做为氧化剂，可以尽可能减少氢气的产生[12]，避免“小丘”堆积现象，提高刻蚀表面的平整度。

在不同浓度AP含量的溶液中进行刻蚀后，SEM结果如图4所示。在图4(a)中，粉色虚线的中间是衬底Si刻蚀区域，两侧是金属Al掩模区域。可以看出，当AP浓度不超过4×10^{-3} g/mL时，刻蚀表面的粗糙度宏观上无显著变化，如图4(a)～(c)左图所示。当AP浓度不低于5×10^{-3} g/mL时，刻蚀表面在宏观上可以看出突起的颗粒逐渐变大，如图4(d)～(f)左图所示。在刻蚀表面选取微小区域进行观察发现，当加入AP浓度为2×10^{-3} g/mL时，在刻蚀表面可以清晰地观察到大小不一的“小丘”突起，如图4(a)右图所示。当AP浓度为3×10^{-3} g/mL和4×10^{-3} g/mL时，刻蚀表面发生了明显变化，此时没有出现“小丘”突起，表面平整而且有明显的倒金字塔刻蚀坑，如图4(b)和(c)右图所示，并且当AP浓度为4×10^{-3} g/mL时，刻蚀坑明显变大，如图中红色选区所示。这是因为在TMAH溶液中加入少量的AP会加快刻蚀速率。当AP浓度继续增加至5×10^{-3} g/mL和6×10^{-3} g/mL时，刻蚀表面又开始出现尺寸较大的“小丘”，如图4(d)和(e)右图所示。但此时在部分“小丘”顶部依然有平整的(100)面和倒金字塔刻蚀坑，不同之处是图4(e)中的(100)面普遍减少，只有少数“小丘”顶部可以观察到倒金字塔刻蚀坑，如图中红色选框所示。随着AP浓度继续增加至7×10^{-3} g/mL时，此时的“小丘”已经成大块状，“小丘”顶部已经很难观察到平整的(100)面和倒金字塔刻蚀坑，如图4(f)所示。



(a)　2×10^{-3} g/mL　　(b)　3×10^{-3} g/mL

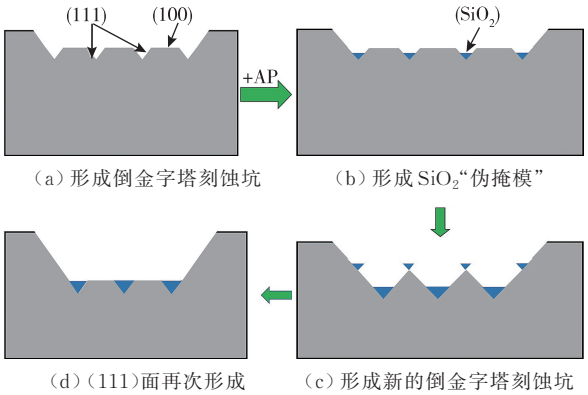
(c)　4×10^{-3} g/mL　　(d)　5×10^{-3} g/mL

(e) 6×10^{-3} g/mL　　(f) 7×10^{-3} g/mL

图4　不同AP浓度的TMAH溶液中刻蚀样品表面的SEM图

衬底Si的刻蚀表面之所以出现上述变化主要与AP对TMAH溶液刻蚀机理的影响有关，具体如图5所示。当TMAH溶液刻蚀衬底Si时，首先会在衬底Si的(100)面形成小的倒金字塔刻蚀坑，并逐渐开始扩大，如图5(a)所示。当不加AP时，随着刻蚀坑增加和变大，相邻的刻蚀坑会相遇，此时(100)

面消失，暴露出(111)面，TMAH溶液会沿着金字塔顶部和(111)面缓慢向下刻蚀，所以此时会在表面形成很多凸起的“小丘”，刻蚀速率也会大幅度降低。当加入具有氧化性的AP后，AP与衬底Si表面具有反应活性的硅(一般为金字塔小丘交接区域)作用形成了不易被TMAH溶液刻蚀的SiO_2，类似于“伪掩模”保护了该区域，而其余区域会继续沿(100)面刻蚀，如图5(b)所示。待刻蚀一段时间后，新的倒金字塔结构形成，此时曾被SiO_2覆盖的区域形成了新的金字塔顶，SiO_2“伪掩模”脱落，如图5(c)所示。然后刻蚀从金字塔顶开始，逐渐消除塔顶和塔底之间的高度差，最后形成新的(100)面，如图5(d)所示。接着刻蚀再从(100)面进行，如此反复循环，使刻蚀表面保持平整。因此，加入适量的AP会使刻蚀表面始终存在平整的(100)面和倒金字塔刻蚀坑，在宏观上刻蚀表面平整，在微观上(100)面和刻蚀坑的位置交替出现，既保证了刻蚀速率又保证了表面粗糙度。



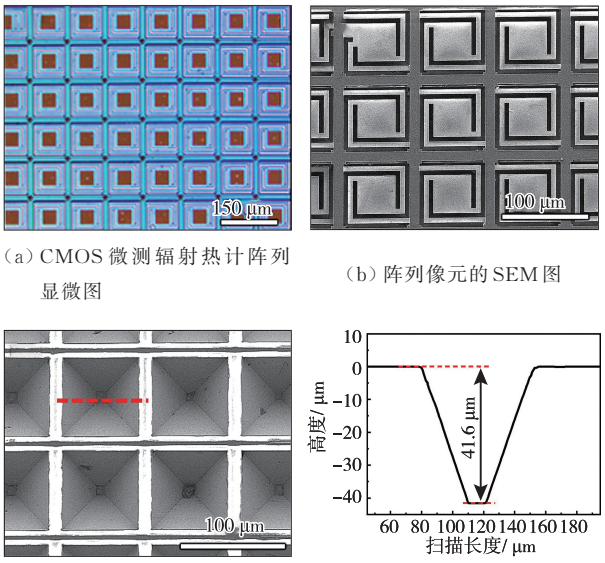
(a) 形成倒金字塔刻蚀坑　(b) 形成SiO_2“伪掩模”

(d) (111)面再次形成　(c) 形成新的倒金字塔刻蚀坑

图5　过硫酸铵对湿法刻蚀衬底Si的影响机理示意图

然而，当AP含量过多时，TMAH溶液的刻蚀速率会变快，此时先形成的刻蚀坑会很快变大，而SiO_2“伪掩模”也只是在较少的区域形成并对该区域进行保护，所以会观察到如图4(d)和(e)所示的局部平面和刻蚀坑共存的现象。随着AP含量持续增多，先形成的刻蚀坑会急速变大并彼此连接，此时又一次形成了(111)面完全暴露的现象，刻蚀速率快速减慢，而且因为AP含量较高，氧化性较强，所以暴露出来的(111)面也会形成一层氧化物，最终导致刻蚀停止[13-14]，表面会形成如图4(f)所示的大块凸起的“小丘”。由上述分析可知，在TMAH溶液中加入AP的浓度为4×10^{-3} g/mL，不仅有利于提高衬底Si刻蚀表面的平整度，而且可以保持衬底Si的刻蚀速率。

将设计好的版图利用标准CMOS工艺进行流片并使用post-CMOS工艺对感光像元区域进行简单加工，待制备工艺完成后，感光像元阵列的显微图如图6(a)所示。可以看出，像元表面的金属掩模去除干净，像元结构完整，未出现掉落或损坏。将芯片浸入上述优化后的刻蚀液中进行湿法刻蚀，刻蚀4 h后取出芯片清洗烘干并用SEM观察，结果如图6(b)和(c)所示，其中扫描路径如图(c)中红色虚线所示。可以看出，刻蚀后CMOS芯片上的微测辐射热计结构依然清晰完整，底部热隔离腔的棱角清晰可见，微测辐射热计的悬空效果良好，热隔离腔呈倒金字塔形且腔壁平滑。利用台阶仪对热隔离腔深度进行测量，结果如图6(d)所示，热隔离腔的深度约为41.6 μm，上部宽度约80 μm，底部宽度约为10 μm，由此可计算得出该刻蚀溶液在刻蚀过程中的平均刻蚀速率为0.17 μm/min。



(a) CMOS微测辐射热计阵列显微图　(b) 阵列像元的SEM图

(c) 像元底部的热隔离腔SEM图　(d) 热隔离腔的深度测试曲线

图6　经过刻蚀后的CMOS成像阵列与底部隔离腔图

3　结束语

本文主要研究了在post-CMOS工艺中，TMAH溶液中加入Si粉和过硫酸铵对湿法刻蚀制备热隔离腔的影响及最佳浓度。结果表明，在TMAH溶液中加入Si粉的最佳浓度为16×10^{-3} g/mL，此时Al电极的腐蚀抑制效果显著且不影响刻蚀速率。在该优化后的刻蚀溶液中继续加入过硫酸铵，当浓度为4×10^{-3} g/mL时，可有

效减少氢气泡生成的“伪掩模”效应，衬底Si刻蚀表面平整，并出现明显的倒金字塔刻蚀坑。使用最终优化后的TMAH刻蚀溶液完成湿法刻蚀后，成功制备出热隔离腔，CMOS微测辐射热计阵列结构的棱角清晰、腔壁平滑、悬空效果良好，刻蚀深度约41.6 μm。本研究为基于标准CMOS工艺的微测辐射热计热隔离腔制备及性能提升提供了可靠工艺基础。

参考文献：

[1] 任霄峰. TMAH湿法腐蚀工艺制备微台面结构[J]. 微纳电子技术，2018，55(7)：526-531.
Ren Xiaofeng. Preparation of micro-mesa structure using TMAH wet etching process [J]. Micronanoelectronic Technology，2018，55(7)：526-531.

[2] 杨成财，鞠国豪，陈永平. 基于HV-CMOS工艺集成PIN光敏元的CMOS传感器设计[J]. 半导体光电，2019，40(3)：333-337，363.
Yang Chengcai，Ju Guohao，Chen Yongping. Design of CMOS sensor integrated with PIN photodiodes by HV-CMOS process [J]. Semiconductor Optoelectronics，2019，40(3)：333-337，363.

[3] 张慧慧，李令英，钱　波，等. 面向MEMS应用的PMN-PT压电单晶的湿法刻蚀工艺研究[J]. 压电与声光，2025，47(6)：1071-1077.
Zhang Huihui，Li Lingying，Qian Bo，et al. Wet etching process of PMN-PT piezoelectric single crystals for MEMS applications [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics，2025，47(6)：1071-1077.

[4] 李俊伍. CMOS后处理中体硅正面释放及保护技术的研究[D]. 南京：东南大学，2010. Li Junwu. Study on the frontside release and protection technology of bulk siliconin post-cmos process. Nanjing：Southeast University，2010.

[5] 闫施锦，王丙寅，王志强，等. 压力传感器湿法腐蚀敏感膜的工艺研究[J]. 压电与声光，2025，47(1)：63-68.
Yan Shijin，Wang Bingyin，Wang Zhiqiang，et al. Process study of wet etching sensitive film for pressure sensors [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics，2025，47(1)：63-68.

[6] 舒　平，李桦林，梁柳洪，等. 空气隙型横向激励薄膜体声波滤波器工艺研究[J]. 压电与声光，2025，47(2)：220-224.
Shu Ping，Li Hualin，Liang Liuhong，et al. Research on the fabrication of air-gap lateral excitation XBAR filters [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics，2025，47(2)：220-224.

[7] Tabata O. pH-controlled TMAH etchants for silicon micromachining [J]. Sensors and Actuators A：Physical，1996，53(1-3)：335-339.

[8] Tang Q，Shen H，Yao H，et al. Formation mechanism of inverted pyramid from sub-micro to micro scale on c-Si surface by metal assisted chemical etching temperature [J]. Applied Surface Science，2018，455：283-294.

[9] 代少升，吴　帅，贺自强，等. 红外点元探测器扫描成像方法研究[J]. 半导体光电，2022，43(5)：923-929.
Dai Shaosheng，Wu Shuai，He Ziqiang，et al. Research on infrared point element detector scanning imaging method [J]. Semiconductor Optoelectronics，2022，43(5)：923-929.

[10] Adamo R，Anopchenko A，Bettotti P，et al. Low dimensional silicon structures for photonic and sensor applications [J]. Applied Surface Science，2008，255(3)：624-627.

[11] Chen P H，Peng H Y，Hsieh C M，et al. The characteristic behavior of TMAH water solution for anisotropic etching on both Silicon substrate and SiO_2 layer [J]. Sensors and Actuators A：Physical，2001，93(2)：132-137.

[12] Sundaram K B，Vijayakumar A，Subramanian G. Smooth etching of silicon using TMAH and isopropyl alcohol for MEMS applications [J]. Microelectronic Engineering，2005，77(3-4)：230-241.

[13] Imaeda K，Bessho K，Shikida M. Design and fabrication of differently shaped Pyramids on Si {100} by anisotropic wet etching [J]. Microsystem Technologies，2016，22(12)：2801-2809.

[14] Smiljanić M M，Lazić Ž，Radjenović B，et al. Evolution of Si crystallographic planes-etching of square and circle patterns in 25 wt% TMAH[J]. Micromachines，2019，10(2)：102.

作者简介：

郭耀祖(1991—)，男，博士，主要从事MEMS声表滤波器件和COMS光电器件的设计和工艺等方面的研究工作。