

# 基于 $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$ 的热模光刻图形化研究

池家豪

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2025年4月1日; 录用日期: 2025年5月1日; 发布日期: 2025年5月8日

## 摘要

激光热模光刻是基于激光直写光刻, 采用特殊的光刻材料发展起来的一种新型光刻技术。该技术可以实现超分辨微纳结构制备, 具有工艺简单、成本低等优势。 $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$ 因其稳定的相态保持与优异的相变特性, 在热敏光刻胶领域极具发展潜力。文章深入探讨了 $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$ 的光刻性能, 研究内容涵盖了 $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$ 的薄膜特性、湿法显影特性。使用COMSOL Multiphysics软件对 $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$ 的曝光热场进行了数值模拟, 分析了曝光功率对热场特性的影响。并设计了系列实验, 验证了仿真结果, 首次优化了对 $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$ 正性显影特性的图形化工艺优化, 最终实现光刻胶图形向硅衬底的图形转移。

## 关键词

热模光刻,  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$ , 显影, ICP刻蚀, 热场

# Research on Patterning Based on $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$ for Heat-Mode Lithography

Jiahao Chi

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 1<sup>st</sup>, 2025; accepted: May 1<sup>st</sup>, 2025; published: May 8<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

Laser heat-mode lithography is a novel lithographic technique developed from laser direct writing, utilizing specialized photoresist materials. This technology enables the fabrication of ultra-high-resolution micro-nano structures and offers advantages such as a straightforward process and low costs.  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$ , owing to its stable phase retention and exceptional phase-change characteristics, holds significant developmental potential in the field of thermosensitive photoresists. This study provides an in-depth exploration of the lithographic performance of  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$ , covering research

on its thin-film properties and wet development characteristics. Numerical simulations of the exposure thermal field for  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  were conducted using COMSOL Multiphysics software, allowing for an analysis of how exposure power affects thermal field characteristics. A series of experiments were designed to validate the simulation results, resulting in the first optimization of the graphical process for positive development characteristics of  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$ . Ultimately, this work achieved the successful transfer of photoresist patterns onto silicon substrates.

## Keywords

Heat-Mode Lithography,  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$ , Development, ICP Etching, Thermal Field

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

半导体光刻技术是现代集成电路制造中至关重要的步骤，近年来随着科技的不断进步，这一领域也取得了显著的发展。目前主流的投影式光刻技术能够实现极高的分辨率和精度，但其高昂的成本也是不容忽视的。在此背景下，更低成本的无掩膜激光直写光刻技术应运而生。激光直写光刻技术是一种直接利用激光束在光刻胶上进行图案化的光刻技术，具有不依赖掩膜、环境要求低、灵活性高的特点。但受限于激光光斑尺寸的衍射极限( $D = 1.22 \lambda/\text{NA}$ )限制，传统激光直写光刻技术难以实现分辨率低于 500 nm 的高分辨刻写，在高精度制备方面存在一定的局限性。

在此背景下，结合热敏光刻胶的激光直写热模光刻技术应运而生。热模光刻技术是一种利用激光束的能量功率对薄膜材料进行热处理，从而实现图形转移的先进光刻技术。由于激光光斑能量通常呈现高斯分布，当激光聚焦于热敏材料表面时，能使其在局部区域内迅速升温，从而引发材料的相变或化学反应，从而形成所需的图形结构。因此，热模激光直写光刻能突破衍射光斑的限制，完成更高分辨尺度的图形刻写要求。

$\text{GeSbTe}$  (GST)是一种典型的热致相变型合金材料，凭借其稳定的相态保持与优异的相变特性，被广泛应用于 PCRAM 与光储存领域，同时也是激光热模光刻领域的首选光刻胶材料。2004 年 Shintani 等人采用 NaOH 作为显影液[1]，对  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  的湿法刻蚀展开研究，开创了 GST 系列合金作为热模光刻胶的先河。此后，Lin 等使用 30 wt% 的强碱对  $\text{Ge}_1\text{Sb}_2\text{Te}_4$  进行刻蚀[2]，实现了负性显影特性；Kim 等研究人员对  $\text{Ge}_5\text{Sb}_7\text{Te}_{20}$  的刻蚀性能进行了研究[3]，发现其在 NaOH 溶液显影过程中展现出正性显影特性。然而，上述研究结果均属于先验性研究，主要集中在热模光刻技术的可行性探索上，而未深入探讨其实际实验中的显影性能。因此研究过程中所制备的结构表面粗糙、边缘模糊，且刻蚀的选择性较差，距离实际应用还有一定距离。

基于 GST 的卓越特性，本文选用了构成结构简单的  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  作为热模光刻材料，结合热场模拟仿真，首次开展了基于  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  的正性图形化工艺研究，最终制备出了高质量的微结构图形。并且探索了  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  作为光刻胶向硅衬底的图形转移研究。实际制备结果优于目前已报道的研究。

## 2. 实验原理及方法

### 2.1. 热模光刻原理

热模光刻技术是近年来新提出的一种无掩膜光刻技术，与传统的激光直写光刻技术不同，热模光刻

主要是结合了热敏型光刻胶，利用光热反应完成了图形刻写，成功突破了传统激光直写光刻所面临的衍射极限限制，能够实现超越光学衍射极限的微纳结构曝光。图 1 展示了激光直写热模曝光的原理图，如图 1 所示， $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  薄膜在聚焦激光束的辐照下，曝光区受到激光光子的照射而吸收光能，这一过程导致薄膜内部产生电子激发，这种激发会引起原子的运动增加，从而促使材料局部温度迅速上升。一旦温度达到材料的相变阈值，原子间的势能关系发生显著变化，热能的输入使得原子获得足够的动能，克服了短程有序结构的能量壁垒，促使原子以更加有序的方式排列，形成晶体结构[4]。

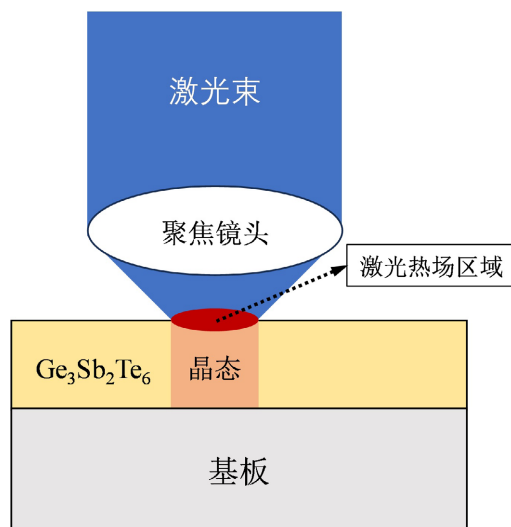


Figure 1. Schematic of the laser heat-mode lithography  
图 1. 热模式曝光系统示意图

## 2.2. 实验方法

本文在仿真部分使用 COMSOL Multiphysics 仿真计算软件的热传导模块，对  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  的瞬态热传导进行了模拟计算。建模尺寸  $3\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m} \times 1.2\ \mu\text{m}$ ，网格划分最小单元为  $0.0005\ \mu\text{m}$ ，设定激光脉冲宽度为 10 纳米。

本文具体实验部分流程如下：采用磁控溅射技术完成  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  薄膜的沉积，溅射功率 80 w，溅射气压 0.5 Pa，氩气流量 90 sccm。曝光部分由自制激光直写系统完成，曝光光源 405 nm，数值孔径 NA 值为 0.8。使用 Oxford 生产的 PlasmaPro 100 Cobra 型 ICP 刻蚀系统完成  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  图形结构的硅干法刻蚀转移，ICP 功率 370 W，RF 功率 50 W，腔室气压 8mTorr， $\text{C}_4\text{F}_8/\text{SF}_6$  气体流量比为 35 sccm:15 sccm。形貌测试部分则由 Zeiss 生产的 Sigma 300 型电镜与 Bruker 的 Dimension Icon 型原子力显微镜完成测试。

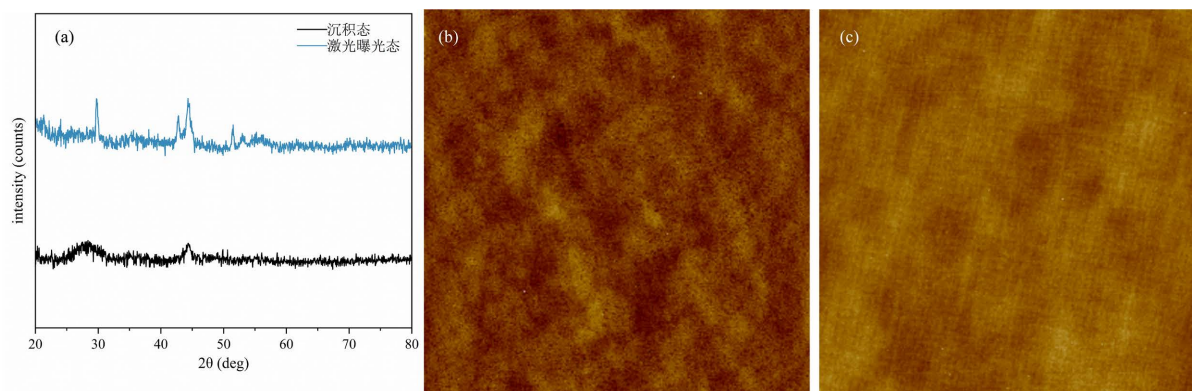
## 3. 分析与讨论

### 3.1. 曝光特性研究

曝光特性是衡量光刻胶质量的首要指标，决定了刻写图案的精度和质量。因此，必须对  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  在激光辐照后的热致相变能力进行系统测试。

为了验证  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  的晶化性质，图 2(a) 对沉积态与经激光辐照后的  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  薄膜进行了 X 射线衍射(XRD)分析。结果显示，沉积态薄膜并未出现明显的衍射峰，表明溅射沉积的  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  薄膜呈现非晶态，这与前人的研究结果相吻合[5] [6]。在激光辐照后， $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  薄膜的衍射谱中显现出多个衍射峰，

这一现象清晰表明经激光辐照后,  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  薄膜经历了从非晶态向晶态的转变过程。为了进一步观察  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  的晶化状态, 图 2(b) 与图 2(c) 分别展示了沉积态与激光曝光态的  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  原子力显微镜(AFM)测试图像。通过对比可发现, 经激光曝光后的  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  薄膜表面形貌呈现出具有一定规律性的细微方框结构。这一现象的产生归因于在晶态结构中, 原子按照规则的晶格排列, 从而显著提高了填充效率, 导致单位体积发生收缩, 相较于沉积态(非晶态)表现出更为紧凑的结构特征。



**Figure 2.** (a) XRD patterns of as-deposited and laser-irradiated  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  thin films; (b) AFM image of the  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  thin film before laser exposure; (c) AFM image of the  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  thin film after laser exposure

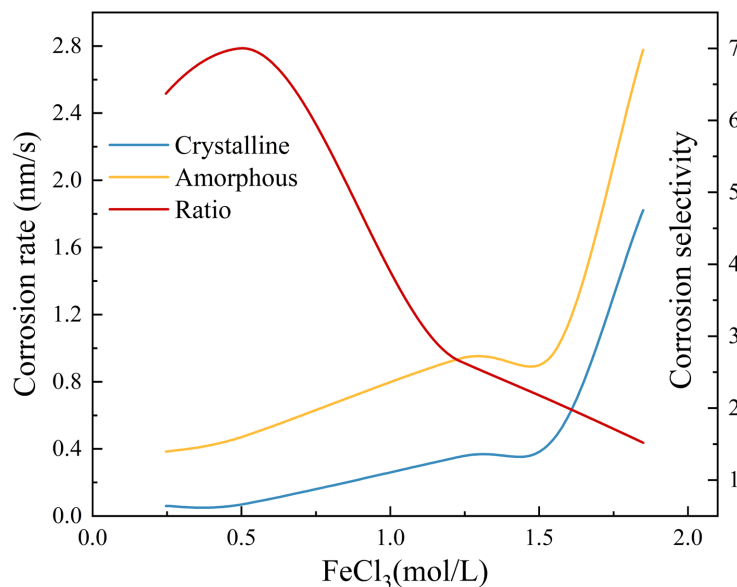
**图 2.** (a) 沉积态与经激光辐照后的  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  XRD 测试结果; (b) 激光曝光前的  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  薄膜的原子力显微镜图像; (c) 激光曝光后的  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  薄膜的原子力显微镜图像

### 3.2. 显影特性研究

在确定了  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  的曝光性能后,  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  的湿法显影特性是评估其图形化能力的另一个关键指标, 较高的选择比有助于获得高宽比和陡直的图形结构, 这对于微纳制造至关重要。为控制变量, 本研究的显影工作均在  $24^\circ\text{C}$  环境下进行, 实验样品规格统一, 采用浸没式显影方法, 样品置于定量溶液内静置显影。

氧化性盐溶液通常能对 PCM 光刻胶呈现良好选择性显影特性, 其中氯化铁溶液( $\text{FeCl}_3$ )作为一种强氧化剂, 能够与多种金属发生反应, 因此本文选取氯化铁溶液对  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  的湿法选择性显影特性展开研究。在显影过程中, 氯化铁溶液的主要活性成分为三价铁离子  $\text{Fe}^{3+}$ , 其作为强氧化性阳离子, 能够接受电子并将金属氧化为金属离子, 从而促使金属材料溶解[7], 同时,  $\text{Cl}^-$  离子与生成的金属离子结合, 形成稳定的络合物, 进一步增强了金属的溶解能力, 使显影区域被有效去除。

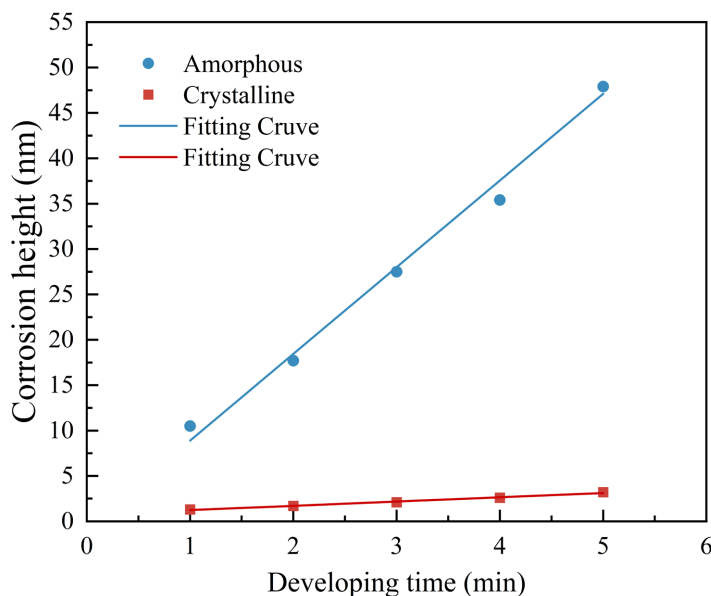
因此, 控制氯化铁溶液中  $\text{Fe}^{3+}$  的浓度是优化湿法显影效果的关键因素, 图 3 得到了不同氧化性盐浓度下的显影速度和刻蚀选择比的关系。从图 3 中可以明显看出, 不同浓度的氯化铁对晶态与非晶态  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  薄膜的湿法刻蚀表现出显著的差异。具体而言, 晶态  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  的刻蚀速率始终低于非晶态  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$ ; 并且, 随着氯化铁浓度的不断增加, 两者的刻蚀速率均提升且整体上呈现逐渐接近的趋势。这是因为随着氯化铁浓度的增加, 溶液中的  $\text{Fe}^{3+}$  离子数量增加, 增强了其氧化能力, 从而提高了对两相的刻蚀速率。高浓度氯化铁虽然能提高整体刻蚀速率, 但可能导致不同相态间的刻蚀速率差距减小, 造成刻蚀选择性降低, 影响制程的精确性。因此, 图 3 可以看到不同浓度氯化铁溶液的湿法刻蚀比展示出 U 型变化趋势: 随着氯化铁浓度的提升, 最初的刻蚀选择比呈上升趋势, 当氯化铁溶液浓度为  $0.4932 \text{ mol/L}$  时, 刻蚀选择比达到 7.03, 之后又逐步下降。因此, 本文最终选用摩尔浓度为  $0.4932 \text{ mol/L}$  的氯化铁溶液作为  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  的正性湿法刻蚀液, 这一浓度可以实现对  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  的高效选择性正性刻蚀, 不仅能够确保良好的选择性, 还能有效维护曝光结构的完整性。



**Figure 3.** Corrosion rates and development selectivity of different phases of  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  in solutions of ferric chloride at various concentrations

**图 3.** 不同浓度的氯化铁溶液对  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  不同相态的腐蚀速率及显影选择比

图 4 显示曝光区和非曝光区不同显影时间下的蚀刻速率，结果表明，非曝光区蚀刻深度随时间的延长呈近似线性增长趋势，约 9.55 nm/min，而曝光区的蚀刻深度远低于非曝光区(约 0.47 nm/min)，可以得出  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  晶态与非晶态的湿法蚀刻选择比约 19.36，即  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  在 0.4932 mol/L 的氯化铁溶液显影中呈现良好的正胶选择性。



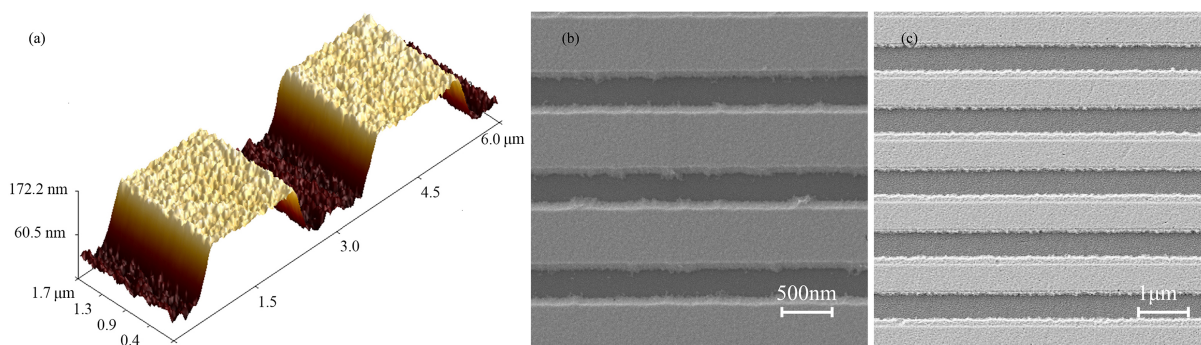
**Figure 4.** Corrosion rate of  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  in 0.4932 mol/L  $\text{FeCl}_3$  solution with different development times

**图 4.** 0.4932 mol/L 氯化铁溶液在不同显影时间对  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  的腐蚀速率

使用原子力显微镜对氯化铁显影样品进行了测试，结果如图 5(a)所示。从 AFM 三维结构图中可以观察到，显影后的结构在边缘处存在一个斜坡，即存在陡直度不足的问题，这表明在曝光结构的线边缘处



存在一定的残留物质,导致 AFM 扫描得到类似缓坡的结构形貌。为了更深入地研究显影结构的线边缘形态,本研究在 Si 基片和 Cr 基片上采用氯化铁溶液进行了显影,并利用扫描电子显微镜(SEM)对其进行了分析,测试结果分别为图 5(b)、图 5(c)所示。通过 SEM 的高分辨率成像,可以清晰观察到在刻蚀区边缘部分存在有大量附着生成物,这些生成物使显影结构的线边缘光滑度和陡直度直线降低,影响了整体形貌。这些生成物的存在可能源于显影过程中的化学反应或物理沉积现象,因在刻蚀过程中发生反应产生沉积,最终在显影结构上形成了显影缺陷。



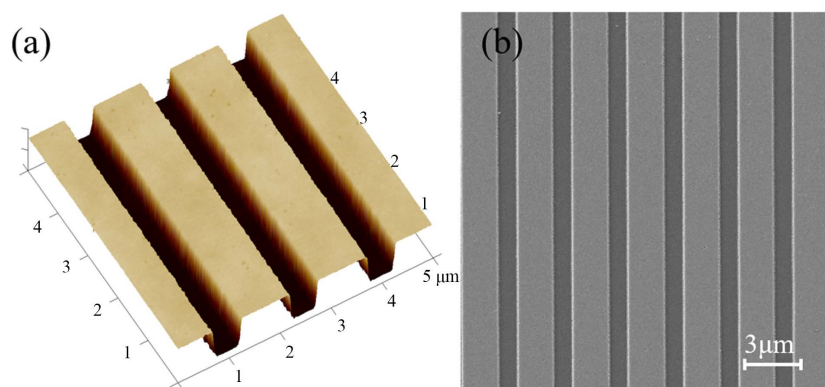
**Figure 5.** Development effect in  $\text{FeCl}_3$  solution: (a) AFM three-dimensional image; (b) SEM images of development effect on silicon substrate; (c) SEM images of development effect on chromium metal

图 5. 氯化铁溶液显影效果: (a) AFM 三维测试图像; (b) 在硅基片上的显影效果 SEM 图像; (c) 在金属铬上的显影效果 SEM 图像

实际上,这种缺陷可能是由氯化铁溶液的水解反应所引起的。由于其  $\text{Fe}^{3+}$  离子在水中具有较强的酸性,能够与水分子反应生成氢氧化铁  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  和氢离子  $\text{H}^+$ , 导致溶液酸性减弱。随着水解反应的进一步进行,氢氧化铁的沉淀逐渐形成,并附着在结构边缘,最终导致显影缺陷的产生。此外,在高浓度的条件下,水解反应的速率会加快,使得氯化铁溶液更加不稳定,从而容易发生水解现象。



为了维持氯化铁溶液的稳定性，可以通过添加盐酸(HCl)来抑制水解反应。盐酸能提供额外的  $\text{H}^+$  离子，这些  $\text{H}^+$  离子能够与  $\text{Fe}^{3+}$  离子结合，形成更为稳定的复合物，从而有效抑制氢氧化铁的沉淀生成。此外，盐酸的存在还会增强溶液的酸性环境，降低  $\text{Fe}^{3+}$  与水分子反应生成氢氧化物的倾向，防止水解反应的进一步发生。



**Figure 6.** Development effect of mixed solution of  $\text{FeCl}_3$  and  $\text{HCl}$  on  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$ : (a) AFM three-dimensional image; (b) SEM flat image

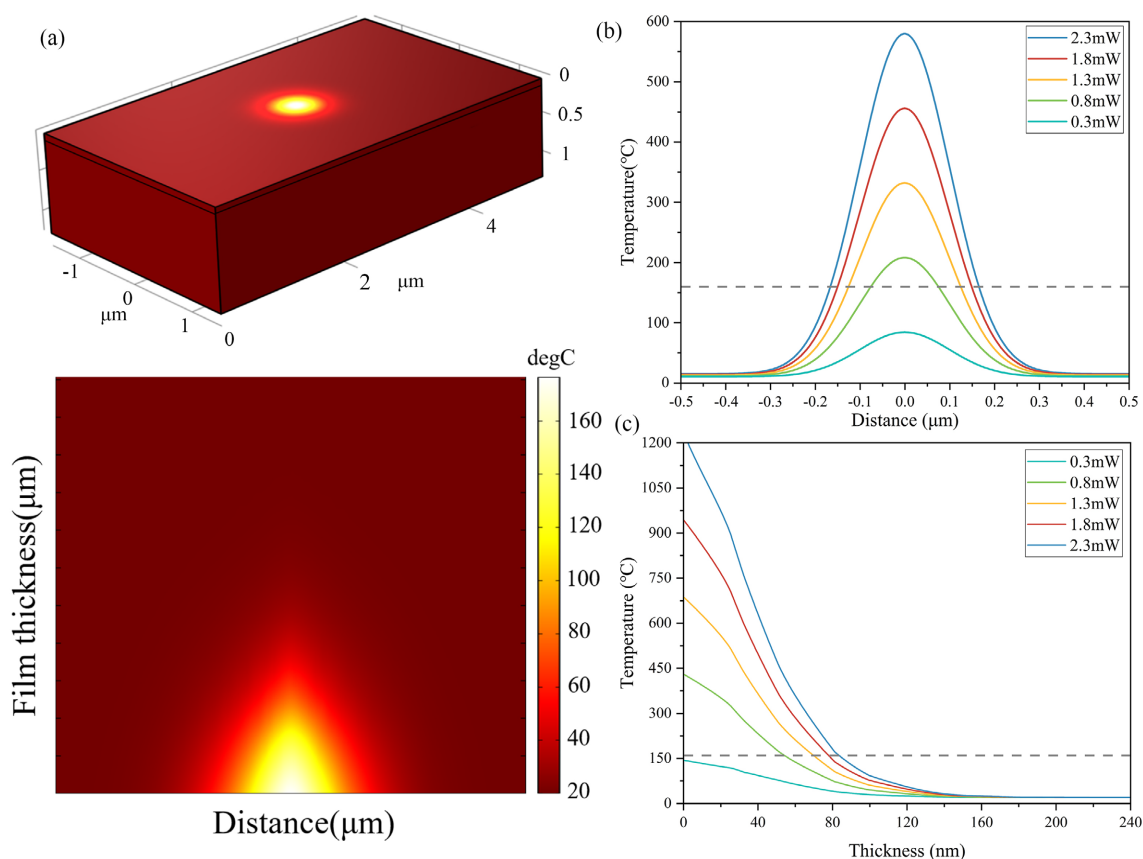
图 6. 氯化铁与盐酸混合溶液对  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  的显影效果: (a) AFM 三维图像; (b) 平面 SEM 图像

图6显示了在0.4932 mol/L的氧化性盐溶液中添加HCL到0.0325 mol/L时的混合溶液显影结果,此时混合溶液比例约为2:50:1( $\text{FeCl}_3/\text{H}_2\text{O}_2/\text{HCl}$ )。由图6(a)、图6(b)可以看出,加入HCL后, $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$ 的正性显影结构边缘处不再出现附着物,轮廓清晰且晶态区被彻底去除,没有局部显影不足或过度显影的情况,显影均匀,结构面表面均方根粗糙度 $\text{RMS} = 0.543 \text{ nm}$ ,槽部为 $0.582 \text{ nm}$ 。显影质量显著优于目前已报道的其他元素比例的GST合金( $\text{Ge}_5\text{Sb}_7\text{Te}_{20}$  [3]、 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  [8])。

### 3.3. 图形化工艺研究

曝光特性与显影性能是一套工艺的基础,若想实现成熟的 $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$ 图形化制备工艺还需对多个关键因素进行更为细致的研究。本文重点研究了激光能量对线宽和蚀刻深度的影响机制,并对 $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$ 的图形化工艺进行了仿真计算与实验验证。

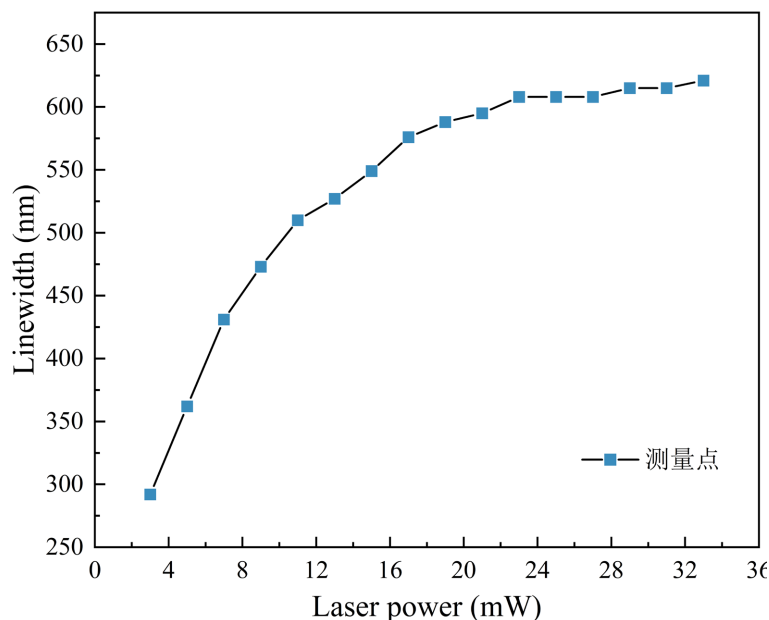
采用COMSOL Multiphysics软件进行有限元法分析,以探讨光刻胶的热分布特征。设定激光脉冲宽度为10纳秒, $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$ 薄膜的厚度为60纳米。 $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$ 的材料参数来自文献[9]-[11],其中 $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$ 的晶化阈值约为 $160^\circ\text{C}$ 。图7(a)展示了在固定激光能量(0.8 mW)条件下, $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$ 薄膜的温度场分布,清晰地揭示了厚度方向与半径方向的热扩散情况。图7(b)和图7(c)分别显示了不同激光能量下,光刻胶在半径和厚度方向的温度分布,由图可知随着激光能量的增加,热场的直径和穿透深度均显著增大,这一现象与激光光斑的高斯分布以及热模光刻胶的非线性吸收效应密切相关。



**Figure 7.** Simulation results of the thermal field distribution of metals: (a) Metal temperature field distribution diagram when the laser energy is fixed at 0.8 mW; (b) Temperature distribution of metals in the plane direction under different laser energies; (c) Temperature distribution of metals in the thickness direction under different laser energies

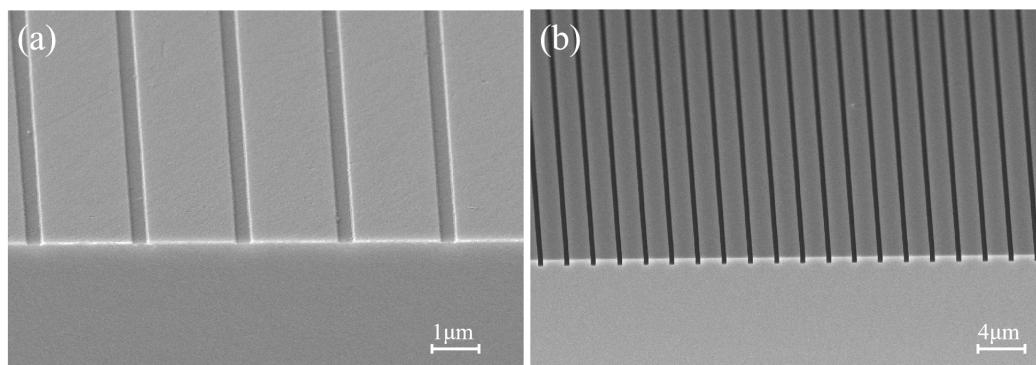
**图7.** GST热场分布仿真结果: (a) 固定激光能量为0.8 mW时的 $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$ 温度场分布图; (b) 不同激光能量下 $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$ 在平面方向的温度分布; (c) 不同激光能量下 $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$ 在厚度方向的温度分布

通过仿真计算可知, 激光曝光功率对  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  的热致晶化区域的大小有着显著影响, 为了验证曝光功率对  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  图形特征尺寸的影响, 图 8 测试了曝光功率从 3 mW 到 33 mW 时  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  的特征线宽变化。从图中可以看出,  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  的图形特征线宽随着曝光功率的增加而同步增长, 但这种线宽增长的速率并不是线性的, 表现为初期快速增加, 后期增速减缓。这是因在较低的曝光功率下,  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  的热吸收率相对较低, 增加曝光功率会迅速提高  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  的热场强度, 从而加速相变的产生, 导致特征尺寸迅速增加。而刻写激光的光斑大小受分辨率限制, 光斑能量分布遵循高斯曲线, 因此光斑边缘的热累积效率低于中心部分。所以当线宽尺寸增加至接近刻写光斑尺寸时, 激光曝光的特征线宽增加速率减缓。



**Figure 8.** The effect of different laser energies on the actual exposure writing linewidth  
**图 8.** 不同激光能量对实际曝光刻写线宽影响

### 3.4. 硅转移研究



**Figure 9.** SEM images of grating cross-sections of  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  before and after ICP etching: (a) After wet development; (b) After ICP etching

**图 9.** ICP 刻蚀前后的  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  光栅截面 SEM 图像: (a) 显影后; (b) ICP 刻蚀后

光刻胶的主要功能是将设计图案转移到基材上, 以上研究展示了  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  材料在热模光刻应用过程中优异可控的图形化能力。为了进一步拓展这些图形结构的应用范围, 对  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  材料的表面图形结



构转移至其他衬底材料上的深入研究尤为重要。

硅凭借其优良的半导体特性、丰富的材料体系以及良好的热导性[12], 被广泛应用于微纳器件制造、集成电路和光学器件等领域。因此, 本工作开展了向硅衬底图形转移的研究。

图 9(a)展示了本工作通过激光直写热模光刻在 Si 基片上制备的  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  薄膜光栅结构, 其显影形貌优良、边缘清晰、槽部干净无残胶。对该样品进行 ICP 干法刻蚀, 实际刻蚀效果如图 9(b)所示。可以看出, 光栅结构完整地转移至 Si 基片, 光栅周期和占空比保持不变, 表面均匀光滑, 陡直度较高。Si 刻蚀深度约为 230 nm, 即  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  对 Si 的刻蚀选择比约为 1:6.65, 刻蚀选择比适中, 表明  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  在硅基半导体或光电功能器件中具有实用化的潜力。

#### 4. 总结

综上所述, 我们简单介绍了激光直写热模光刻技术的工作原理, 该技术可以实现超分辨微纳结构制备, 具有工艺简单、成本低等优势。 $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  相变合金材料凭借其较快的相变速度, 以及合适且稳定的相变温度阈值, 非常适用作为热敏光刻胶用于热模光刻领域。本文深入探讨了  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  的光刻性能, 对  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  的薄膜特性进行了分析, 首次开展了对  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  的正性显影特性研究。并使用 COMSOL Multiphysics 软件对激光曝光的热场分布进行了数值模拟, 通过实验验证了其热扩散规律。最后将制备的  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  光栅结构进行了硅衬底的图形转移, 表明  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  在硅基微纳器件加工领域具有广阔的应用前景。

#### 参考文献

- [1] Shintani, T., Anzai, Y., Minemura, H., Miyamoto, H. and Ushiyama, J. (2004) Nanosize Fabrication Using Etching of Phase-Change Recording Films. *Applied Physics Letters*, **85**, 639-641. <https://doi.org/10.1063/1.1775889>
- [2] Lin, Y., Hong, M.H., Chong, T.C., Lim, C.S., Chen, G.X., Tan, L.S., et al. (2006) Ultrafast-Laser-Induced Parallel Phase-Change Nanolithography. *Applied Physics Letters*, **89**, Article ID: 041108. <https://doi.org/10.1063/1.2235855>
- [3] Kim, J., Lim, J. and Lee, J. (2007) Wet-Etching Characteristics of GeSbTe Phase-Change Films for High Density Media. *Optical Data Storage*, Portland, 20 May 2007. <https://doi.org/10.1364/ods.2007.wc5>
- [4] Chew, L.T., Zhou, X., Simpson, R., Dong, W., Liu, H., Valiyaveedu, S.K., et al. (2017) Chalcogenide Active Photonics. *Active Photonic Platforms IX*, **10345**, 103451(B). <https://doi.org/10.1117/12.2273732>
- [5] Matsunaga, T., Kojima, R., Yamada, N., Kifune, K., Kubota, Y. and Takata, M. (2007) Structural Investigation of  $\text{E}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$ , an Intermetallic Compound in the GeTe-Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> Homologous Series. *Applied Physics Letters*, **90**, Article ID: 161919. <https://doi.org/10.1063/1.2728030>
- [6] Da Silva, J.L.F., Walsh, A. and Lee, H. (2008) Insights into the Structure of the Stable and Metastable  $(\text{GeTe})_m(\text{Sb}_2\text{Te}_3)_n$  Compounds. *Physical Review B*, **78**, Article ID: 224111. <https://doi.org/10.1103/physrevb.78.224111>
- [7] 姜晓霞, 田云川. 金相侵蚀剂侵蚀能力的研究[J]. 理化检验(物理分册), 1988, 22(1): 15-18.
- [8] Chen, X., Chen, L., Sun, L., Wei, T., Ling, Y., Hu, J., et al. (2023)  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  Thin Film as a Promising Heat-Mode Resist for High-Resolution Direct Laser Writing Lithography. *Physica Status Solidi (RRL)—Rapid Research Letters*, **17**, Article ID: 2300262. <https://doi.org/10.1002/pssr.202300262>
- [9] Liu, B., Zhang, T., Xia, J., Song, Z., Feng, S. and Chen, B. (2004) Nitrogen-Implanted  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  Film Used as Multi-level Storage Media for Phase Change Random Access Memory. *Semiconductor Science and Technology*, **19**, L61-L64. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/19/6/101>
- [10] Chen, Z., Zhang, R., Zhou, Z., Nie, R., Pan, Z. and Song, Z. (2024) Broadband Airy Beam for Mid-Infrared Wave Enabled by  $\text{Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_6$  Metasurface. *Annalen der Physik*, **536**, Article ID: 2300459. <https://doi.org/10.1002/andp.202300459>
- [11] Horii, H., Yi, J.H., Park, J.H., et al. (2003) A Novel Cell Technology Using N-Doped GeSbTe Films for Phase Change RAM. *Proceedings of the 2003 Symposium on VLSI Technology Digest of Technical Papers*, Kyoto, 10-12 June 2003, 177-178.
- [12] Ma, C. and Liu, Z. (2010) A Super Resolution Metalens with Phase Compensation Mechanism. *Applied Physics Letters*, **96**, Article ID: 183103. <https://doi.org/10.1063/1.3427199>