

文章编号 1004-924X(2011)01-0124-08

用于热机械微纳加工的掺 Al 多晶硅加热器

荣 皓, 赵 钢, 褚家如

(中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 合肥 安徽 230027)

摘要:针对热机械式微纳米结构的加工,提出了一种以掺 Al 多晶硅为材料,集成于微悬臂梁上的加热器。采用 Al 诱导退火晶化(AIC)方法,在 750 K 对 Al/a-Si:H 复合薄膜低温晶化 18 h,制备出掺 Al 多晶硅。通过低温退火,使复合薄膜的拉曼特征峰由 478 cm^{-1} 移至 520 cm^{-1} ,完成由非晶硅向多晶硅的转变;由四探针仪测得室温下样品的电阻率由退火前的 $10^{10}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ 降至 $16.8\times 10^{-3}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$,实现了多晶硅的 Al 掺杂;在扫描电镜下观测到退火后 Al 与 a-Si:H 层的界限消失并形成一层均匀的薄膜;这些结果表明得到了晶化程度很高的 Al 掺杂多晶硅。继而研究了掺 Al 多晶硅与氮化硅悬臂梁的集成工艺,采用微加工方法将掺 Al 多晶硅制成微加热器。使用 ANSYS 软件仿真加热器的工作过程,在 10 V, 0.3 μs 脉冲驱动下,加热器升温至 782.8 K,降温时间约 1 μs 。仿真分析显示,采用 AIC 法制得的掺 Al 多晶硅具有良好的热电特性,符合用于对高分子材料进行热机械微纳加工的微加热器的性能要求。

关键词:热机械加工;微加热器;Al 诱导退火晶化(AIC);多晶硅

中图分类号:TN305 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111901.0124

Al doped poly-Si micro-heater for thermomechanical fabrication of micro/nano structure

RONG Hao, ZHAO Gang, CHU Jia-ru

(*Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China*)

Abstract: For thermomechanical fabrication of the micro/nano structure, a micro-heater made of Al doped poly-Si was fabricated. The Al doped poly-Si film was prepared by annealing from Al/a-Si:H compound film under 750 K for 18 h on a Si_3N_4 substrate using Aluminium Induced Crystallization (AIC) process, and the characteristics of the transformation caused by annealing were analyzed by Raman scattering spectroscopy, scanning electron microscopy and a resistivity meter. It was shown that the boundary between an Al layer and an a-Si:H layer disappears after annealing, and a uniform film is formed. After annealing, the Raman spectral peak shifts from 478 cm^{-1} to 520 cm^{-1} , which means the film surface changes from the a-Si:H to the highly-crystallized poly-Si. Meanwhile, the resistivity of the film declined is from over $10^{10}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ to $16.8\times 10^{-3}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ at 300 K for doping of Al atoms. The results indicate that the bilayer film (Al/a-Si:H) has been changed into a uniform Al doped highly-crystallized poly-Si film. Furthermore, the integration of the Al doped poly-Si micro-heater and

收稿日期:2010-03-26;修订日期:2010-06-22.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50805137)

Si_3N_4 cantilever was also discussed. Simulated by ANSYS, the micro-heater is heated to 782.8 K under a periodic electrical pulse with a voltage of 10 V and duration of 0.3 μs . When the pulse disappears, its temperature cools down to 420 K within 1 μs . The simulation results show that the Al doped poly-Si micro-heater has good thermoelectric properties, and it is well suitable for the thermo-mechanical micro/nano structure fabrication.

Key words: thermomechanical fabrication; micro-heater; Al-induced Crystallization (AIC); poly-Si

1 引 言

随着微加工技术的不断改进,对高分子材料的热机械式微纳米结构加工已经成为一个研究热点。其中基于压膜图案的纳米压印技术^[1]和基于微探针的超高密度存储技术^[2-5]是发展较为迅速的两种技术。纳米压印技术是将带有微纳米图案的刚性压膜压印在软化后的高分子层上,从而使压膜图形转移到聚合物层上实现图形加工的一种技术。基于 AFM 探针的超高密度数据存储是通过操纵带有微加热器的探针阵列在材料薄膜表面进行热辅助机械式刻写^[6],因其可以对阵列中的单根探针进行操作而能加工出更为复杂的图形,相对于纳米压印技术具有更优的灵活性和高效性,这种用于热机械式微纳结构加工的探针的关键部件是微加热器。

微加热器的加热电阻通常选用金属薄膜或硅扩散电阻。金属薄膜^[7-8](如 Pt)因制作成本高、工艺复杂、热处理温度高及与 MEMS 材料粘附性差等问题而受到一定限制,所以目前的研究多倾向于用硅扩散电阻^[9]制备微加热器。硅扩散电阻与 IC 工艺兼容性好,但也有其局限性。一方面,硅作为半导体,用作热电型微加热器必须通过掺杂将其改性为导体,而掺杂过程不但引入缺陷还需要在高温下进行退火再分布,此过程复杂耗时且重复性较差;另一方面,从探针的制备考虑,因单晶硅薄膜不易沉积,故必须使用 SOI 晶片的顶层硅经掺杂制备微加热器,这使得悬臂梁局限于单晶硅材料,不利于深入研究热机械加工中不同材料对热传导性能的影响。

本文采用 Al 诱导晶化(AIC)方法,将 Al/a-Si:H 薄膜在低温下诱导晶化,制备出低电阻率

的 Al 掺杂多晶硅。这种掺 Al 多晶硅薄膜能够在非硅基底上通过先沉积后退火的方法制备,可以不用 SOI 晶片实现 Si 的掺杂,从而提高了衬底材料的可选择性。AIC 法制备的掺 Al 多晶硅,相当于 P 型掺杂^[10-11],既降低了电阻率又略去了掺杂过程,很大程度地提高了材料的制备效率。

2 Al 掺杂多晶硅的制备

2.1 方法介绍

20 世纪 90 年代初,Ashtikar, M. S 等^[12]发现将一些金属如 Al, Cu, Au, Ag, Ni 等沉积在 a-Si:H 上或离子注入到 a-Si:H 薄膜的内部,能够降低 a-Si:H 向 poly-Si 转变的相变能量,之后对金属/a-Si:H 薄膜进行退火处理可以得到晶化率较高的多晶硅薄膜,晶化温度可以低于 770 K。晶化的效果取决于采用的诱导金属,目前用得最多的是 Al 诱导晶化(AIC)。本实验采用 Al 实现了对 a-Si:H 薄膜的诱导退火晶化。

Al 诱导晶化(AIC)过程中 Si 层与 Al 层间交换的主要动力在于 a-Si 的高能量态。在 750 K 时, Si 在 Al 中的溶解度要大于 Al 在 Si 中的溶解度, Si 在 Al 中的过饱和度能大大降低整个体系的自由能, Si 原子能很快地扩散入铝层。因而在诱导过程中,晶核通过持续扩散到 Al 层中的 Si 原子不断生长直到形成多晶硅。相反,由于 Al 在 Si 中的溶解度小, Al 原子从 Si 晶粒中释放出来。Al 充当 Si 形核及生长的固相媒介,诱导 a-Si 向多晶硅的转化^[13]。

2.2 样品制备

由于微加热器集成于氮化硅悬臂梁上,故先在 5.08 cm(2 in)的 P 型(100)Si 片上使用日本

Samco 公司的 PD-220 型等离子体增强化学气相沉积设备(PECVD)沉积一层 500 nm 的氮化硅薄膜作为微加热器的衬底材料,沉积条件为:硅烷(SiH_4 10%, Ar 90%)流量 $47 \text{ cm}^3/\text{min}$, NH_3 流量 $80 \text{ cm}^3/\text{min}$, N_2 流量 $400 \text{ cm}^3/\text{min}$, 沉积压力 95 Pa, 衬底温度 570 K, 辉光功率 35 W, 沉积时间 50 min。接着使用中国科学院微电子中心生产的 SP-2 型磁控溅射仪在氮化硅衬底上沉积铝膜,沉积条件为:Ar 流量 $120 \text{ cm}^3/\text{min}$, 功率 150 W, 时间 5 min, 厚度约 250 nm。然后将样品在空气中暴露 24 h, 在铝膜表面形成自然氧化层。W. Knaepen^[14] 和 Masashi Kurosawa^[15] 提到氧化铝膜的存在有助于获得大晶粒的多晶硅, 这对降低多晶硅电阻率有益。再用 PECVD 在样品上沉积 a-Si:H 薄膜, 沉积条件为:硅烷(SiH_4 10%, Ar 90%)流量 $100 \text{ cm}^3/\text{min}$, 沉积压力 133 Pa, 衬底温度 470 K, 辉光功率 60 W, 沉积时间 10 min, 非晶硅厚度约 500 nm。最后将制备的非晶硅薄膜样品在室温下放入 KSL 系列箱式高温烧结炉中, 以 10 K/min 的速度升温至 750 K, 进行恒温退火处理, 退火时间为 18 h, 待炉温自然冷却后取出样品。

3 Al 掺杂多晶硅性能表征

3.1 Al 掺杂多晶硅的拉曼(Raman)光谱分析

图 1 为 Al/a-Si:H 复合薄膜在退火前后的 Raman 图谱。Raman 特征峰的位置反应材料的

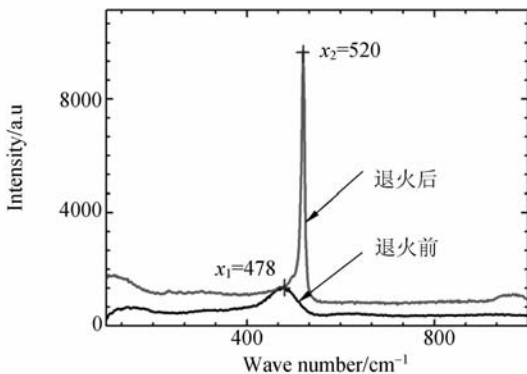


图 1 退火前后 Raman 图谱

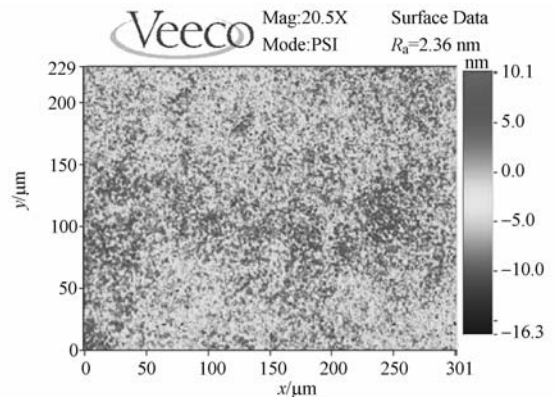
Fig. 1 Raman spectra before and after annealing

属性,其强度反应晶格损伤的程度,强度越高表明材料的晶格损伤越小,越接近晶格有序态。非晶硅的 Raman 散射表现为在 480 cm^{-1} 处出现不尖锐的散射峰位,通常以该峰位作为非晶硅微结构的标志。对于晶体硅,其散射峰的位置在 520 cm^{-1} 处^[16]。由图 1 可知,退火前样品在 478 cm^{-1} 处出现强度为 600 的散射峰位,薄膜明显地表现为非晶结构;退火后,样品在 520 cm^{-1} 处有很尖锐的散射峰位,强度接近 10 000,而在 480 cm^{-1} 处没有观察到 a-Si 的特征峰,说明经过退火,样品表面由非晶硅转化为晶化程度很高的多晶硅。

3.2 Al 掺杂多晶硅的形貌分析

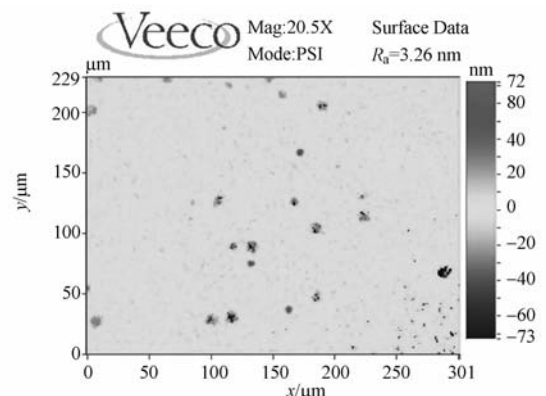
对于薄膜材料,微加工过程与其形貌有着密切的关系,故使用 Veeco 公司的 WykoNT1100 型光学轮廓仪和 Raith 公司的扫描电子显微镜(SEM)分别表征样品的表面及截面形貌,如图 2 所示。

图 2 中,(a)、(b)为光学轮廓仪对样品退火前后的表面表征结果。退火前样品是多层膜结构,



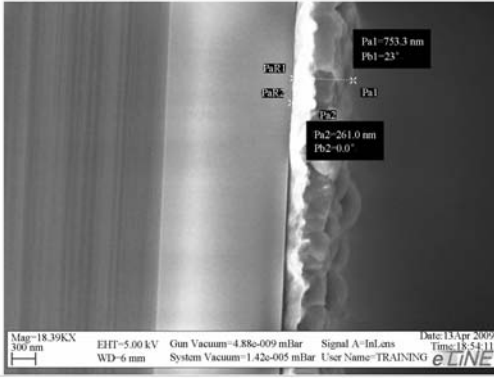
(a)退火前表面形貌

(a) Optical profiler image before annealing



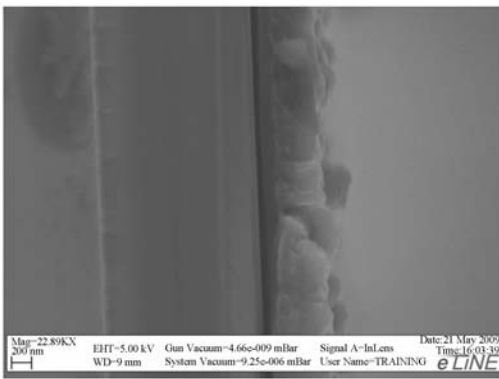
(b)退火后表面形貌

(b) Optical profiler image after annealing



(c) “基底 Al/a-Si:H”结构退火前截面图

(c) SEM cross section image before annealing



(d) “基底 Al/a-Si:H”结构退火后截面图

(d) SEM cross section image after annealing

图 2 退火前后形貌分析图

Fig. 2 Surface and cross-section characteristics before and after annealings

由 Si 晶片向上依次为 Si_3N_4 层、Al 和 Al 的自然氧化层、a-Si:H 层,上表面粗糙度 R_a 为 2.36 nm,退火后其值略增至 3.26 nm,这表明退火后由于 Al 的诱导作用使得非晶硅由无定形态形核、晶化,导致表面存在晶粒、晶界以及部分缺陷,使得表面粗糙度变大。但能看出薄膜表面依旧连续,整体均匀性好。图 2(c),(d)为样品退火前后的 SEM 截面图。退火前,因 Al 与 a-Si:H 层导电性不同而导致 SEM 图像亮度不同,Al 层明显可见,厚度为 260.0 nm,薄膜总厚度为 753.3 nm,与预计厚度一致。样品经过退火,Al 层与 a-Si 层的界面消失,薄膜电学性能趋于一致,形成一层均匀的多晶硅层,这些与 Raman 分析结果和 AIC 的动力学过程相符。由于 Al 层的存在,使得在最终形成的多晶硅中掺杂有 Al 原子,这也是多

晶硅电阻率得到大幅度改善的一个重要原因。

3.3 电阻率

电阻率是热电型微加热器的一个重要参数,直接影响加热器的功耗和发热量。为了研究加热器的瞬时热电响应,将 Al 诱导退火后的样品在不同温度下使用 SZ-82 数字式四探针测试仪测量其电阻率,如表 1 所示。作为对比,表中同时列出了磷掺杂单晶硅的电阻率^[17]。

非晶硅的本征电阻率大于 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 。AIC 法制备的掺 Al 多晶硅电阻率相对其下降了 13 个数量级,与磷掺杂单晶硅的电阻率相当。表明 Al 原子对多晶硅起到了 P 型掺杂的作用,使得其电学性能发生改变而成为导体,为将其制成微加热器提供了可行性。

表 1 不同温度下的电阻率

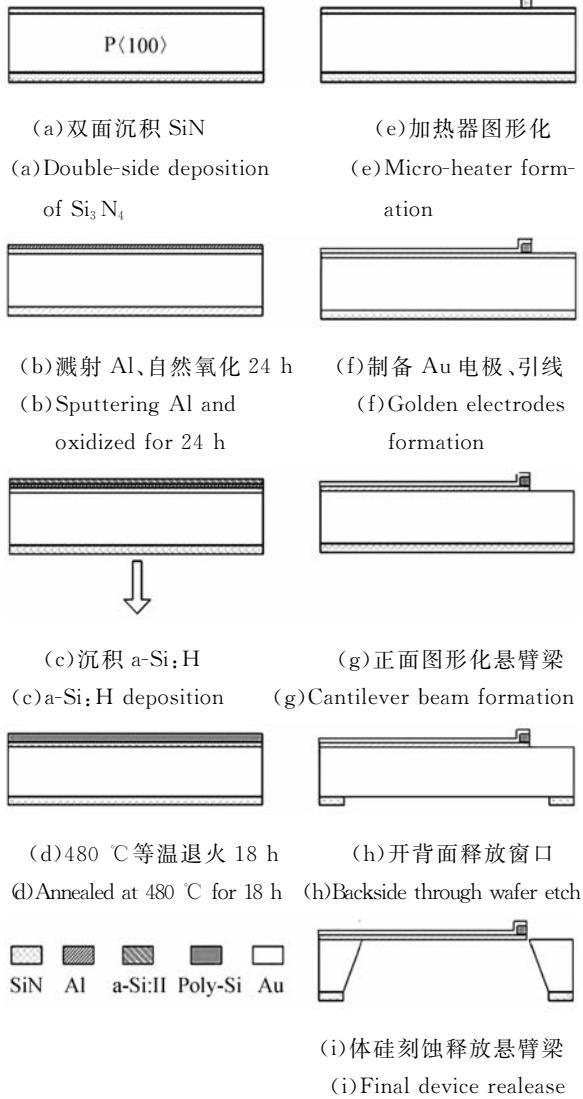
Tab. 1 Resistivity at different temperatures

温度 T/K	掺 Al 多晶硅	磷掺杂单晶硅
	电阻率 $\rho/\Omega \cdot \text{cm}$	电阻率 $\rho/\Omega \cdot \text{cm}$
300	16.8×10^{-3}	3.2×10^{-3}
400	20.3×10^{-3}	3.6×10^{-3}
500	24.2×10^{-3}	4.1×10^{-3}
600	28.3×10^{-3}	4.7×10^{-3}
700	32.8×10^{-3}	5.4×10^{-3}
800	37.5×10^{-3}	6.2×10^{-3}

4 集成功艺

为了将 AIC 法制备的 Al 掺杂多晶硅用于微加热器,文中研究了掺 Al 多晶硅与氮化硅悬臂梁的集成工艺。具体工艺过程如图 3 所示。

首先,在 P 型 $\langle 100 \rangle$ 晶片上使用 PECVD 双面沉积氮化硅,正面氮化硅厚度 500 nm,用作悬臂梁材料,背面氮化硅用作释放时的掩模,约 $1 \mu\text{m}$ 。然后,按照 2.2 中所述在正面氮化硅上制备 Al 掺杂多晶硅。接着,用干法刻蚀将掺 Al 多晶硅图形化为微加热器。然后,真空蒸发一层 Au 并通过 Lift-Off 工艺制备引线及电极。接着,用干法刻蚀将氮化硅悬臂梁图形化,完成正面微加热器、电极和引线与悬臂梁的集成。最后,通过湿法刻蚀将悬臂梁从背面释放,形成可以独立工作的器件阵列。

图 3 带有微加热器的 Si_3N_4 探针制备工艺Fig. 3 Fabrication process of Si_3N_4 probes with microheater

5 加热器性能仿真

为了研究 Al 掺杂多晶硅微加热器的热电特性,文中使用有限元分析软件 ANSYS 对所设计的探针进行建模和瞬态热电特性分析。带有微加热器的悬臂梁为层状三维结构,如图 4 所示,底层为氮化硅梁体,向上依次为多晶硅加热器与金属电极和引线。文中忽略针尖,且由于各层膜的厚度相对于长宽的尺寸都很小,可对悬臂梁进行二维简化,图 5 为 2D 模型及其尺寸。为了保证加热器具有较低的功耗及较短的降温时间,仿真中在 Au 电极上加载 10 V 的脉冲电压,脉冲时间为 $0.3 \mu\text{s}$,整个周期为 $5 \mu\text{s}$ 。

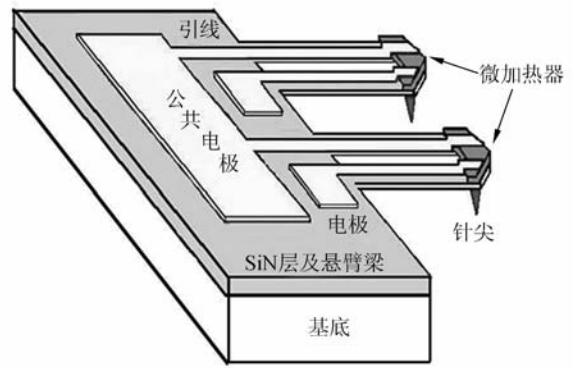


图 4 微纳探针结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of thermomechanical probes

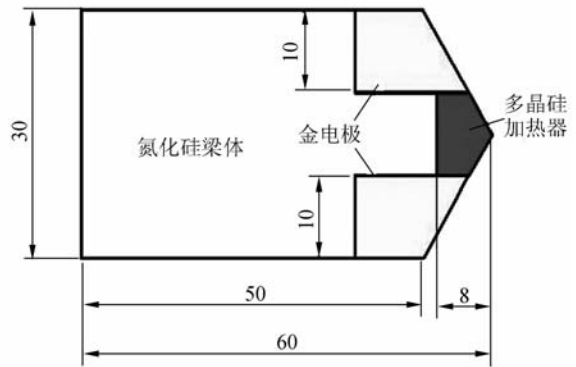
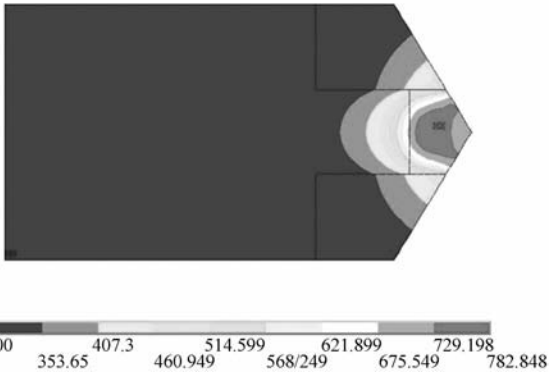
图 5 ANSYS 仿真 2D 模型(单位: μm)

Fig. 5 Two-dimension model of finite element simulation

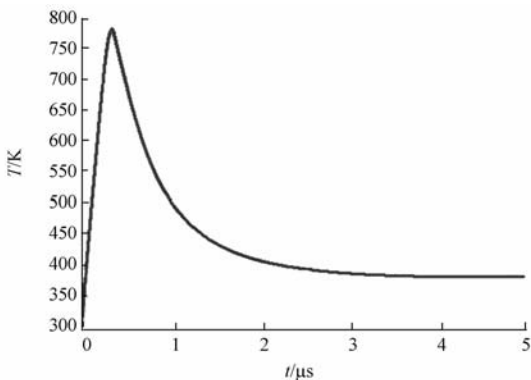
后处理结果如截图 6(a),它表示加热器温度升至最高时悬臂梁的整体温度分布。可以看到,最高温度 $T_{\max} = 782.8 \text{ K}$,高于 PMMA 薄膜的玻璃转化温度,且高温集中在加热器处,而梁体仍为 300 K ,有温度变化的范围不到整个梁体的 $1/3$ 。这说明,掺 Al 多晶硅微加热器仅使得悬臂梁自由端处获得高温,而对其余梁体无影响。

接着,对微加热器中心处的节点进行时间历程后处理,结果见图 6(b)。它显示了加热器在脉冲电压作用下随时间而发生的升降温过程,能够反映加热器的最高温度、升温降温时间等重要参数。由图 6(b)可知,单个节点的升温时间基本与加载电压的脉冲时间相重合,脉冲结束时节点温度升至最高,并迅速开始降温过程,降温时间约为 $1 \mu\text{s}$,能够满足热机械微纳探针写入速度的要求。

由 ANSYS 仿真得出,掺 Al 多晶硅微加热器升降温迅速,在 $0.35 \mu\text{s}$ 内可升温至 782.8 K ,这个温度能够用来对高分子材料进行表面修饰,且高温区域集中,对其它部件的影响可以降到最

(a) 后处理结果 ($t = 0.35 \mu\text{s}$)

(a) Result of post processing



(b) 微加热器中心节点时间历程处理结果

(b) Time history of postprocessing at central node

图 6 ANSYS 仿真分析结果

Fig. 6 Results of finite element simulation by ANSYS

小。这些结果说明 AIC 法制备的 Al 掺杂多晶硅可以成为一种制备微加热器的新材料,也体现出

微加热器的局部加热性能能够用于高分子材料的热机械式微纳米结构加工。

6 结 论

本文采用 Al 诱导退火晶化(AIC)方法,将 Al/a-Si:H 复合薄膜在 750 K 下退火 18 h,通过拉曼光谱和光学轮廓仪对薄膜进行了表面分析,结果表明,经过退火,薄膜表面在 Al 层的作用下由非晶硅晶化为表面连续、粗糙度较低的多晶硅。通过 SEM 观察薄膜截面,发现退火后 Al 层消失,Al 原子均匀地融入多晶硅层,产生 P 型掺杂效应,致使薄膜的室温电阻率由 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 降至 $16.8 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 。采用 AIC 法制备的多晶硅具有 3 个明显的优势:(1)退火为低温过程,与 MEMS、IC 工艺兼容性好;(2)能够获得大而均匀的多晶硅晶粒,薄膜质量高;(3)退火后形成 P 型 Al 掺杂多晶硅,电学性能得到改良。进而利用其较高的表面质量和良好的电学性能,以掺 Al 多晶硅为材料并结合 MEMS 工艺加工出微加热器并与微悬臂梁集成。

为了研究这种掺 Al 多晶硅微加热器的性能,文中使用 ANSYS 对其进行了二维有限元仿真。得到如下结果:在 10 V, $0.3 \mu\text{s}$ 脉冲电压驱动下,加热器局部升温至 782.8 K,降温时间约 $1 \mu\text{s}$ 。这种微加热器具有低功耗,升、降温迅速,温度集中等特点,满足对高分子材料进行表面修饰的要求。仿真结果进一步表明 AIC 法制备的掺 Al 多晶硅可以作为一种制备微加热器的新材料。

参考文献:

- [1] 申溯,周雷,魏国军,等. 微区微纳米压印技术及设备[J]. 光学精密工程,2009,17(4):807-812.
SHEN S, ZHOU L, WEI G J, *et al.*. Design of distributed micro-area micro/nano-imprinting lithographic system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(4):807-812. (in Chinese)
- [2] DRECHSLER U, BURER N, DESPONT M, *et al.*. Cantilevers with nano-heaters for thermomechanical storage application [J]. *Microelectronic*

Engineering, 2003,67-68:397-404.

- [3] DESPONT M, BRUGGER J, DRECHSLER U, *et al.*. VLSI-NEMS chip for parallel AFM data storage [J]. *Sensors and Actuators*, 2000, 80: 100-107.
- [4] KIM Y S, JANG S, LEE C S, *et al.*. Thermo-piezoelectric Si_3N_4 cantilever array on CMOS circuit for high density probe-based data storage [J]. *Sensors and Actuators A*, 2007,135:67-72.
- [5] 杨尊先,于映,林丽华,等.基于 NEMS 技术的硅基纳机电探针阵列器件研究[J]. 传感技术学报,2005,

- 18(4):766-770.
- YANG Z X, YU Y, LIN L H, *et al.*. Nanomechanical electro-thermal probe array based on NEMS technology [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2005,18(4):766-770. (in Chinese)
- [6] 赵钢. 基于 SPM 的超高密度信息存储关键技术研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2007.
- ZHAO G. *Research on key technologies of SPM-based ultra-high-density data storage* [D]. Hefei, University of Science and Technology of China, 2007. (in Chinese)
- [7] 肖素艳,车录锋,李昕欣,等. 基于柔性 MEMS 皮肤技术温度传感器阵列的研究[J]. *光学精密工程*, 2005,13(6):674-680.
- XIAO S Y, CHE L F, LI X X, *et al.*. A temperature sensor array based on flexible MEMS skin technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(6):674-680. (in Chinese)
- [8] 闫卫平,朱剑波,马灵芝,等. 金属薄膜加热器的研究[J]. *传感技术学报*, 2004,17(4):615-618.
- YAN W P, ZHU J B, MA L ZH, *et al.*. Research of metal membrane heater [J]. *Journal of Transduction Technology*, 2004,17(4):615-618. (in Chinese)
- [9] 张凤田,唐祯安,于隽,等. 恒温式微热板电阻真空传感器[J]. *光学精密工程*, 2008,16(7):1253-1257.
- ZHANG F T, TANG ZH A, YU J, *et al.*. Constant temperature thermal vacuum sensor based on micro-hotplate [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(7):1253-1257. (in Chinese)
- [10] 王瑞春,杜丕一,翁文剑,等. Al/a-Si:H 复合薄膜的电导性能[J]. *半导体学报*, 2002,23(10):1067-1072.
- WANG R CH, DU P Y, WENG W J, *et al.*. Conductive behavior of Al/a-Si:H bilayer thin films [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2002,23(10):1067-1072. (in Chinese)
- [11] PIHAN E, SLAOUI A, CABARROCAS P R, *et al.*. Polycrystalline silicon films by aluminum-induced crystallization-growth process vs. silicon deposition method[J]. *Thin Solid Films*, 2004,451:328-333.
- [12] 杨晟,夏东林,徐曼,等. 金属铝诱导低温晶化非晶硅薄膜研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2006,28(6):7-9.
- YANG SH, XIA D L, XU M, *et al.*. Study on aluminum-induced crystallization of amorphous silicon thin films at low temperature[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2006,28(6):7-9. (in Chinese)
- [13] TANG ZH X, SHEN H L, HUANG H B, *et al.*. Preparation of high quality polycrystalline silicon thin films by aluminum-induced crystallization [J]. *Thin Solid Films*, 2009,517:5611-5615.
- [14] KNAEPEN W, DETAVERNIER C, MEIRHAE-GHE R L V, *et al.*. In-situ X-ray diffraction study of metal induced crystallization of amorphous silicon [J]. *Thin Solid Films*, 2008,516:4946-4952.
- [15] MASASHI K, NAOYUKI K, TAIZOH S, *et al.*. Orientation-controlled Si thin films on insulating substrates by Al-induced crystallization combined with interfacial-oxide layer modulation[J]. *Applied Physics Letters*, 2009,95(13):132103-132103-3.
- [16] ROJAS-LOPEZ M, GAYOU V L, PEREZ -EL-ANCO R E, *et al.*. Raman studies of aluminum induced micro crystallization of n (+) Si:H films produced by PECVD [J]. *Thin Solid Films*, 2003,445(1):32-37.
- [17] AARON A, NILADRI S, MATTHEW E, *et al.*. Electrothermal properties and modeling of polysilicon microthermal actuators [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2003,12(4):513-523.

作者简介:



荣 皓(1985—),女,河南濮阳人,博士研究生,2008年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事基于微探针的热机械高分子纳米结构加工机理的研究。E-mail:hrong@mail.ustc.edu.cn



赵 钢(1977—),男,河北人,博士,讲师,2001年、2007年于中国科学技术大学分别获得学士和博士学位,主要从事微纳机电系统、纳米结构加工等方面的研究。E-mail:fvc@ustc.edu.cn

导师简介:



褚家如(1963—),男,安徽人,博士,教授,博士生导师,1985年、1988年和1997年于中国科学技术大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事微机电系统、超精密测量和精密天文光学仪器等方面的研究。E-mail:jrchu@ustc.edu.cn

● 下期预告

氮稀释高效电激励连续波 HF/DF 化学激光器

王红岩,张焯喆,李 强,肖 楠,华卫红,司 磊
(国防科技大学 光电科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

低温吸附泵有望代替传统的机械真空泵和洗消装置,大幅降低电激励连续波 HF/DF 化学激光器的体积和重量。采用该技术的前提是将常用的氮稀释剂替换为氮稀释剂,一般认为这将引起激光器效率的大幅下降。为提高氮稀释剂激光器效率,研制了周期 4 mm 间隔排列的狭缝-列孔超音速阵列喷管,以代替传统的单通道燃料流横向注入增益发生器。以 HF 激光为例的实验表明:前者在放电管电极间距仅为后者一半的条件下,单管激励出的光功率由后者的 25 W 提高到 90 W,电光转换效率由 0.8% 提升到 5.9%,燃料利用效率从仅为氮稀释剂运转情形的一半变为略高于氮稀释剂情形,整体提升近 4 倍。此结果为迄今为止该激光器国内外公开报道的最高水平。