

# 温度场的分布对多晶硅酸腐蚀绒面形貌的影响

徐华天<sup>1</sup> 冯仕猛<sup>1</sup> 单以洪<sup>1</sup> 雷刚<sup>2</sup> 鞠雪梅<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>上海交通大学物理系, 上海 200240)  
(<sup>2</sup>上海空间电源研究所, 上海 2011092)

**摘要** 通过热传导方程, 根据不同的边界条件, 分别计算了多晶硅酸腐蚀反应时腐蚀坑周围的温度场分布。模拟计算表明: 如在酸腐蚀液中采用制冷措施, 使酸腐蚀液本体温度维持在 15 °C, 会使硅表面腐蚀坑底部与腐蚀坑开口温度差变大, 有利于绒面获得开口小深度大的陷阱坑; 如不控制酸液温度, 则会导致腐蚀坑底部与坑开口温度差较小, 从而使硅片表面产生深度浅、开口大的陷阱坑。在不同的温度下对多晶表面进行酸腐蚀制绒, 样品表面的扫描电子显微镜(SEM)图显示, 低温下绒面腐蚀坑密度大、深度大且开口小, 与模拟分析结果基本相符。

**关键词** 表面光学; 多晶硅; 表面结构; 陷光效应; 温度场

中图分类号 TM914.4 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0424001

## Effect of Temperature Distribution on Acid-Etched Texturing of Multi-Crystalline Silicon

Xu Huatian<sup>1</sup> Feng Shimeng<sup>1</sup> Shan Yihong<sup>1</sup> Lei Gang<sup>2</sup> Ju Xuemei<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Department of Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)  
(<sup>2</sup>Institute of Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

**Abstract** Using heat conduction equation, the temperature distributions around pits on multi-crystalline silicon surface are calculated under different boundary conditions during etching reaction. The simulation results show that the solution temperature of 15 °C controlled by cooling measures can result in an obvious temperature difference between the pits bottoms and multi-crystalline silicon surfaces. This difference is helpful to reduce the pits opening size as well as increase the pits depth. On the other hand, etching the multi-crystalline silicon surface without temperature control will make little temperature difference between the pits bottoms and multi-crystalline silicon surfaces, which produces the trap pits with the shallow and large opening. Silicon surfaces are textured under different temperature conditions in the experiment. Scanning electron microscope (SEM) image of experimental sample surface etched under the low-temperature condition shows the high-density distributions of trap pits with large pits depth and small opening. The experimental results can match the theoretical prediction well.

**Key words** optics at surfaces; multi-crystalline silicon; surface structure; light trap effect; temperature distribution

**OCIS codes** 240.6700; 350.6050; 040.6040

## 1 引 言

为了提高多晶硅太阳能电池转换效率, 让更多的光子进入晶体硅, 一种重要的方法是在硅表面进行修饰, 使硅表面形成绒面结构, 让光能在硅表面多次反射折射, 从而使光有更多的机会进入到晶体硅中, 这就是硅表面陷光效应。要使多晶硅表面均

匀分布 V 型或 U 型陷阱坑, 常用的办法有物理方法和化学方法。物理方法有: 机械刻槽<sup>[1]</sup>、激光刻槽<sup>[2]</sup>和离子蚀刻<sup>[3, 4]</sup>等, 但这些方法需要相对复杂的处理工序和昂贵的加工系统, 会使太阳能电池的成本增加。化学方法也能在多晶硅表面刻蚀出凹凸不平的绒面, 但常使多晶硅的表面陷阱坑分布不均匀, 刻

收稿日期: 2012-10-29; 收到修改稿日期: 2012-12-07

基金项目: 上海航天基金(HTJ10-30)资助课题。

作者简介: 徐华天(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事晶体硅太阳能电池方面的研究。E-mail: skymanx@sjtu.edu.cn

导师简介: 冯仕猛(1964—), 男, 副教授, 主要从事晶体硅表面微结构调节技术和晶体硅太阳能电池等方面的研究。

E-mail: smfeng@sjtu.edu.cn(通信联系人)

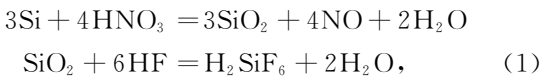
蚀坑深浅不一,导致多晶硅表面陷光效果不稳定。目前比较常用的方法是利用强酸与不同晶体面反应速度一致性对多晶硅表面进行刻蚀。如采用不同浓度配比的 HF/HNO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O 系列溶液,或加少量的添加剂对多晶硅表面进行腐蚀,可使晶体硅表面获得密集分布的陷阱坑<sup>[5~12]</sup>,此外也有在化学方法的基础上结合激光等其他技术的制绒工艺研究<sup>[13,14]</sup>。几乎所有的文献研究都表明:多晶硅陷阱坑表面形貌和分布除了与制绒液配方有关,还与制绒液的温度密切相关。因此,在多晶硅太阳能电池表面制绒的工艺中,腐蚀液的反应温度一直是一个需要严格控制的参数。工业生产中,通常会根据腐蚀液配比和后续工艺要求,将制绒时的腐蚀反应温度控制于 15 ℃~17 ℃之间。但尚未见腐蚀液温度如何影响硅片表面腐蚀坑的深浅、大小以及分布密度等方面的报道。

本文通过热传导方程,根据不同的边界条件,分别计算了多晶硅酸腐蚀反应时腐蚀坑周围的温度场分布,通过实验研究了不同温度条件下经酸溶液腐蚀的多晶硅表面结构,研究发现低温下获得多晶硅表面陷阱坑密度大、反射率低,这对于多晶硅制绒具有一定的意义。

## 2 理论模拟

### 2.1 HF/HNO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O 溶液腐蚀硅反应原理

酸腐蚀液是由 HF、HNO<sub>3</sub> 和 H<sub>2</sub>O 按一定比例混合而成,硅在酸溶液中的反应分两个基本过程:氧化反应和溶解反应。其中 HNO<sub>3</sub> 起到氧化剂作用,提供反应过程中所需空穴,将 Si-Si 键打开,HF 中的 F 离子则与表面断裂了的 Si-Si 键形成 SiF<sub>6</sub><sup>2-</sup> 离子,将其带离硅片表面,从而完成一次腐蚀反应:



该反应是各晶向同性的,从硅片表面某一点开始的腐蚀随反应进行会形成 U 形坑,而事实上该反应会在整个硅片表面进行,随着各腐蚀坑变大,

### 2.2 不同条件下硅片表面温度场的分布

腐蚀中硅片表面附近的情况可由图 1 描述,深浅大小不一的腐蚀坑在表面各处形成并随反应进行而向四周扩大。

由于硅与酸腐蚀反应是放热反应,从腐蚀坑底到腐蚀坑边缘溶液温度空间分布应遵从热传导方程<sup>[15]</sup>

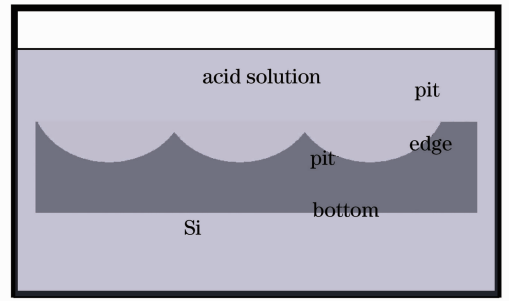


图 1 硅片酸腐蚀示意图

Fig. 1 Schematic diagram of silicon etched in acid solution

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q, \quad (2)$$

式中  $T$  为热力学温度,  $\rho$  为溶液摩尔密度,  $c$  为摩尔热容,  $k$  为热传导系数,  $Q$  为溶液内发热功率,除参加反应的硅片表面外  $Q = 0$ 。只需计算腐蚀坑附近小范围溶液的温度分布,上式中没有考虑液体对流传热的因素。

如果采用制冷措施,使腐蚀液温度保持一个恒量,即远离硅表面的温度可以看成是常量。而在硅表面附近,则存在温度梯度。可以认为远离硅片表面溶液温度保持不变,本文的模拟中假设控温措施可以保证硅片表面 10  $\mu\text{m}$  以外溶液温度不受影响,保持溶液初始温度  $T_0$ ,即距离硅片表面 10  $\mu\text{m}$  处有边界条件

$$T = T_0. \quad (3)$$

假设参与反应的硅片表面及腐蚀坑内壁在反应中提供恒定热量流  $q$ 。为便于模拟,不考虑硅片表面各处反应速率不同引起的  $q$  值变化,计算时统一按照溶液处于初始温度时反应情况处理。于是在硅片表面各处有边界条件

$$k \nabla T = q. \quad (4)$$

根据所使用的溶液,确定(2)式中的各参数,  $\rho = 5.5 \times 10^{-14} \text{ mol}/\mu\text{m}^3$ ;  $c = 75.379 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$ ;  $k = 6 \times 10^{-7} \text{ J}/(\text{K} \cdot \mu\text{m})$ ;  $q$  由反应速率决定。借助数值计算软件 Matlab 软件中的 pde tool 工具可以模拟估算硅片表面腐蚀坑周围稳定后的温度分布情况如图 2 所示(计算中设溶液初始温度  $T_0 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ,腐蚀坑形状为半球形)。图 2 为硅片底部深度约 1.5  $\mu\text{m}$  的腐蚀坑周围溶液的温度分布,图中半球形代表硅片被腐蚀后硅片表面上的陷阱坑。

从图 2 可以看出,如果溶液温度维持为 15  $^\circ\text{C}$ ,远离腐蚀坑的地方温度相对均匀;而在硅片表面附近则存在温度梯度,陷阱坑底部温度高,溶液本体温

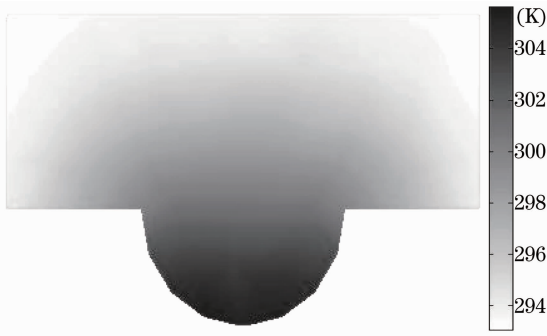


图2 在溶液温度为 15 °C 时硅表面腐蚀坑周围溶液温度分布

Fig. 2 Temperature distribution around pits of Si surface at solution temperature of 15 °C

度最低。腐蚀坑底部与硅片边缘部分温度约有 3.3 K 的温差；腐蚀坑越深，温差越大，即腐蚀坑内温度相对越高。

如果反应过程中不控制溶液温度，使其随反应温度自然变化，采用了 Matlab 软件中 pde tool 获得的温度场分布如图 3 所示。计算中，将(3)式的边界条件改为从硅片表面 200  $\mu\text{m}$  以外起溶液温度不受反应放热影响，保持初始温度  $T_0$ 。图 3 为溶液初始温度为 20 °C 时，1.5  $\mu\text{m}$  深的腐蚀坑周围的温度分布。从图 3 可以看出，如果腐蚀液温度高，在硅片表面附近温度分布比较均匀。进一步分析可以看出，因为腐蚀反应为放热反应，硅片腐蚀坑底部的温度比较高，达到 33 °C，腐蚀坑开口处的温度也达到 32 °C 左右，而远离硅片表面的溶液温度维持在 20 °C。腐蚀坑底部到边缘温度差很小，底部与边缘最大温差不超过 1 K，即腐蚀坑底部接近表面温度，这对形成性能优良的陷阱坑是不利的。

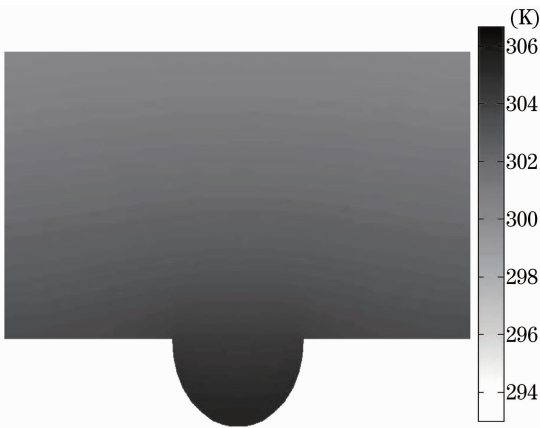


图3 在温度为 20 °C 时腐蚀坑周围的溶液温度分布

Fig. 3 Temperature distribution around pits of Si surface at solution temperature of 20 °C

## 2.3 不同温度场分布对反应速率差的影响

腐蚀坑周围各处不同的温度会造成腐蚀速率差，设腐蚀坑顶部腐蚀反应速率为  $u_1$ ，腐蚀坑底部腐蚀反应速率为  $u_2$ ，定义两者腐蚀速率之比以描述速率差距：

$$R_u = u_2/u_1, \quad (5)$$

式中  $R_u$  越大越有利于腐蚀坑深度发展，并形成陷光效果更优秀的绒面形貌。温度对 HF/HNO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O 溶液腐蚀硅反应速率的影响可以由阿伦尼乌斯方程描述：

$$u = A \exp\left[-\left(\frac{E_a}{RT}\right)\right], \quad (6)$$

式中  $R$  为摩尔气体常量， $T$  为热力学温度， $A$  为指前因子， $E_a$  为反应的活化能， $A$  与  $E_a$  在温度变化范围不大时为常数。

在不考虑硅片表面各处原子活性及各处溶液性质差异(假设溶液各处均匀)的情况下  $R_u$  完全由腐蚀坑内外温度差决定。结合(5)式和(6)式得到

$$R_u(T_0) = \frac{u_2}{u_1} = \frac{\exp\{-E_a/[R(T_0 + \Delta T)]\}}{\exp\{-E_a/[R(T_0)]\}}, \quad (7)$$

(7)式中已经默认(6)式中的指前因子  $A$  在的温度变化范围内为常数。而根据 Schwartz 的研究<sup>[16]</sup>，(6)式中的反应活化能  $E_a$  这一参数在高温时比低温时低，从已有的实验数据得到低温区域(低于 293 K)  $E_a \approx 83.68$  kJ；高温区域(高于 293 K)  $E_a \approx 41.84 \sim 58.58$  kJ。综合以上条件模拟计算  $R_u$  得到结果如图 4 所示。

从图 4 中可看出，温度相同时， $R_u$  随腐蚀坑深度  $h$  增大而增大；随温度升高在约 289 K 处达到极

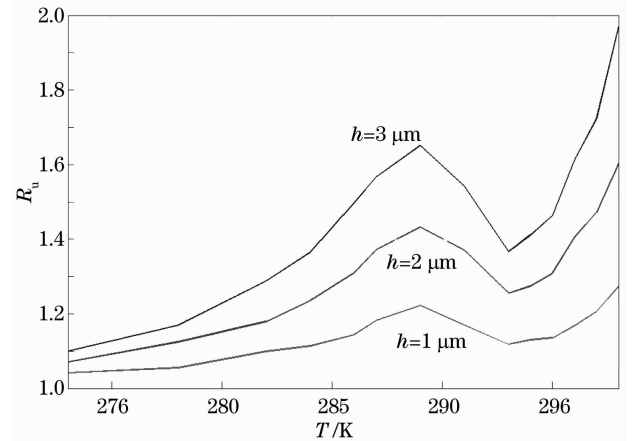


图4 不同反应温度下腐蚀坑内外腐蚀速率比  $R_u$

Fig. 4 Etching speed ratio between the bottom and the edge of pits at different reaction temperatures

值后下降,从 293 K 开始,又随温度单调递增。

根据图 4 中的模拟结果,为了获得更大的  $R_0$ ,理想的反应温度应该为 300 K 或更高。图 4 建立在温度控制措施效果显著、能够满足(3)式的边界条件要求下、腐蚀坑周围温度分布如图 2 时所得到的模拟结果。然而,当温度达到 300 K 或更高时,反应速率随温度升高而显著加快,反应时放出的大量热量已无法保证溶液温度的稳定,此时硅片表面腐蚀坑周围的温度分布反而更接近图 3 中的情况,此时腐蚀坑周围温度差过小,导致  $R_0$  接近于 1,所以图 4 中各图线在 295 K~300 K 部分的模拟是失效的可以不予考虑。因此,多晶硅酸腐蚀溶液制绒的最佳温度约为 289 K,这一理论结果与实际生产中由经

验得出的最佳温度相一致。

图 5 是不同反应速率比对腐蚀坑形貌的影响。从图 5(a)中可以看出,在低温下反应速率比较大,腐蚀坑底部腐蚀反应会更快,导致腐蚀坑向底部发展速率明显高于横向速度,形成比较深的陷阱坑,开口比较小,具有好的陷光效应;图 5(b)是温度稍高反应速率比变小时的腐蚀坑形貌。从图 5(b)中可以看出,腐蚀坑底部反应速率仍大于边缘部,但差距不够显著,形成的陷阱坑相对较浅,开口比较大,陷光效应稍差;图 5(c)是高温下速率比趋近于 1 时的腐蚀坑形貌。从图 5(c)中可以看出,此时腐蚀坑边缘与底部腐蚀速率相当,最终只能在表面形成一些开口很大的浅凹陷。

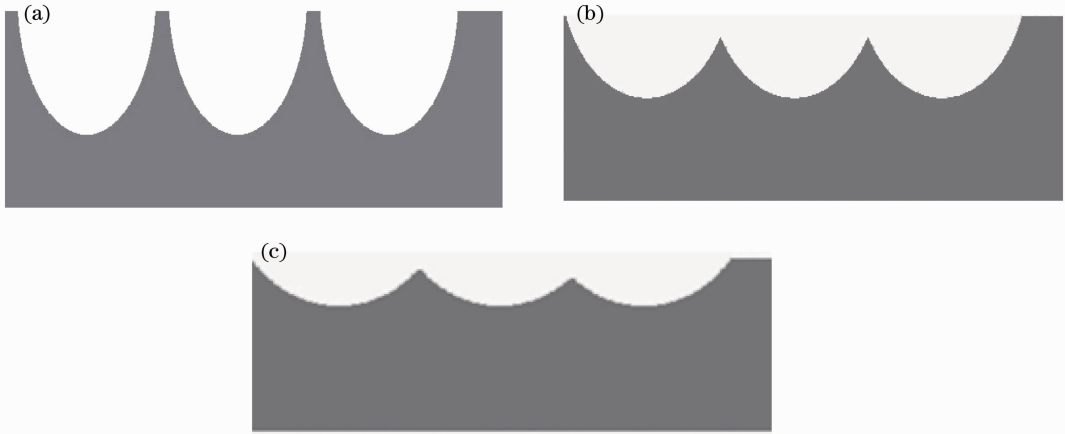


图 5 不同腐蚀反应速率比对腐蚀坑形貌的影响。(a)大  $R_0$  条件下;(b)中等  $R_0$  条件下和(c)  $R_0$  趋近于 1 时的腐蚀坑形貌

Fig. 5 Influence of different etching reaction ratios on the pits shapes of samples. (a) Pits shapes of large  $R_0$ ; (b) medium  $R_0$  and (c)  $R_0$  approaches 1, respectively

### 3 实验与结果

实验中选用 p 型多晶硅片面积为  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ ,厚度为  $180 \sim 200\ \mu\text{m}$ ,电阻率为  $0.5 \sim 1.5\ \Omega \cdot \text{cm}$ ,用型号为 JSM-7401F 的场发射扫描电子显微镜观察其刻蚀的样品表面结构。在实验之前,先去除多晶硅片表面污物,然后把多晶硅片放入 400 mL 的 HF(体积分数 40%)/ $\text{HNO}_3$ (体积分数 68%)溶液中进行腐蚀,反应时间为 130 s。腐蚀完成后用去离子水清洗,然后将样品在稀 NaOH 溶液中浸泡 1 min,再用去离子水清洗,最后烘干。用传统的 HF/ $\text{HNO}_3$ / $\text{H}_2\text{O}$  溶液,在  $15\text{ }^\circ\text{C} \sim 25\text{ }^\circ\text{C}$  的温度区间内进行腐蚀反应,然后研究在不同温度条件下制绒硅片的扫描电子显微镜(SEM)图。

实验最后选定了溶液体积比为  $V_{\text{HNO}_3} : V_{\text{HF}} = 1 : 5$

和  $V_{\text{HNO}_3} : V_{\text{HF}} = 1 : 6$  的腐蚀液进行腐蚀,溶液初始反应温度为  $20\text{ }^\circ\text{C}$ 。图 6 为硅与酸在室温无控温措施自然反应条件下获得的多晶硅绒面的 SEM 图,从图 6(a)、(b)中可以看到绒面上腐蚀坑大而浅,其中最大开口达  $14\ \mu\text{m}$ ,而且腐蚀坑很浅。这是因为多晶硅与酸溶液反应时,腐蚀液的温度快速升高,且反应时硅片表面各区域温度分布趋向相同,与模拟图的分析基本一致。

图 7(a)、(b)分别为多晶硅与酸溶液( $V_{\text{HNO}_3} : V_{\text{HF}} = 1 : 6$ )在温度  $20\text{ }^\circ\text{C}$  和  $15\text{ }^\circ\text{C}$  时反应所得的表面结构。从图 7(a)中可以看到腐蚀坑开口仍然较大,多数腐蚀坑开口达  $4 \sim 8\ \mu\text{m}$ ,其中最大开口达  $10\ \mu\text{m}$ 。从图 7(b)中可以看出,当温度降低到  $15\text{ }^\circ\text{C}$  时,硅表面腐蚀坑密度大大增加,腐蚀坑开口变小,其最大开口为  $3\ \mu\text{m}$ ,同时腐蚀坑深度增加。实验结



果说明反应温度降低后，腐蚀坑底部与表面产生明显温差。相对于边缘温度，腐蚀坑底部温度稍高，

导致底部反应速度大，从而使腐蚀坑越来越深，这与模拟图的分析结果基本相同。

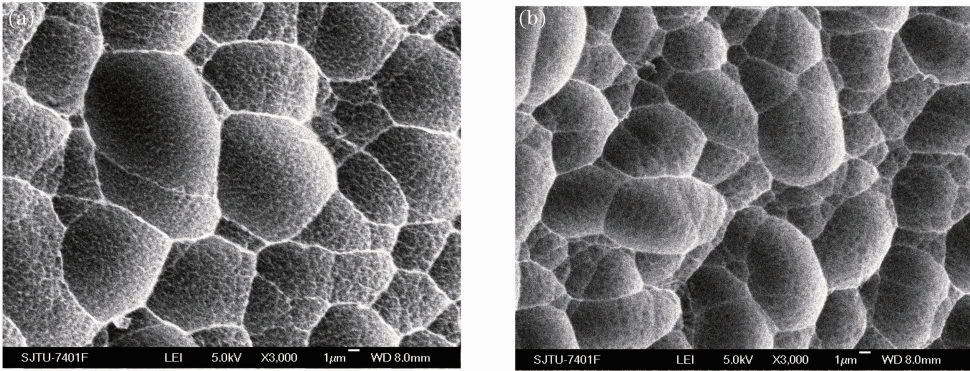


图 6 无温度控制时(a)  $V_{\text{HNO}_3}:V_{\text{HF}}=1:5$ 和(b)  $V_{\text{HNO}_3}:V_{\text{HF}}=1:6$ 的酸溶液中腐蚀的多晶硅表面 SEM 图

Fig. 6 SEM images of sample surface etched in acid solution with (a)  $V_{\text{HNO}_3}:V_{\text{HF}}=1:5$  and (b)  $V_{\text{HNO}_3}:V_{\text{HF}}=1:6$  when temperature is not controlled

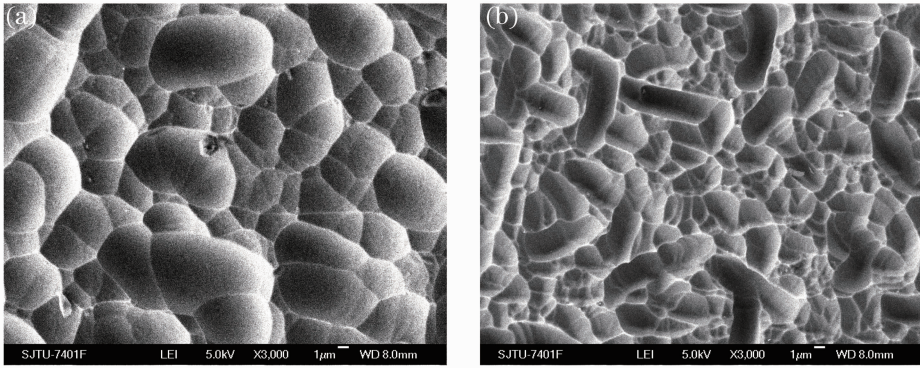


图 7 不同温度时  $V_{\text{HNO}_3}:V_{\text{HF}}=1:5$ 腐蚀液腐蚀样品的 SEM 图。(a) 24 °C；(b) 15 °C

Fig. 7 SEM images of sample surface in  $V_{\text{HNO}_3}:V_{\text{HF}}=1:5$  solution under different temperatures. (a) 24 °C；(b) 15 °C

图 8(a)、(b)为  $V_{\text{HNO}_3}:V_{\text{HF}}=1:6$ ，酸液温度分别为 24 °C 和 15 °C 的条件下反应得到的硅表面结构图。从图 8(a)中可以看出，腐蚀坑开口仍然较大，多数腐蚀坑开口达 3~7  $\mu\text{m}$ ，最大开口可达 9  $\mu\text{m}$ 。从图 8(b)中可以看出，当溶液温度降低到 15 °C 时，

硅表面腐蚀坑密度大大增加，腐蚀坑开口变小，其最大开口约为 3  $\mu\text{m}$ ，同时腐蚀坑深度增加。这是由于腐蚀坑表面与底部出现了明显温差导致反应速率比变大而产生的，这与模拟图的分析结果吻合。

图 9 是  $V_{\text{HNO}_3}:V_{\text{HF}}=1:6$ 的溶液在不同温度下

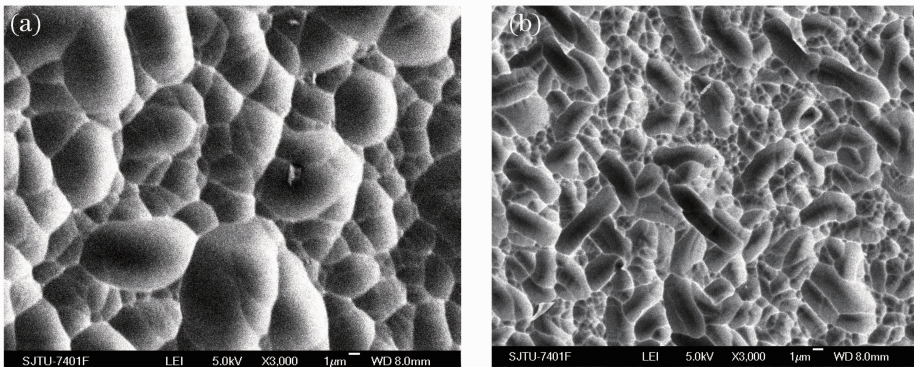


图 8 不同的温度下  $V_{\text{HNO}_3}:V_{\text{HF}}=1:6$ 腐蚀液中刻蚀样品的表面 SEM 图。(a) 24 °C；(b) 15 °C

Fig. 8 SEM images of textured surface in  $V_{\text{HNO}_3}:V_{\text{HF}}=1:6$  solution under different temperatures. (a) 24 °C；(b) 15 °C

腐蚀的多晶硅样品的反射率曲线。图9中a是在腐蚀过程中无温度控制制备的样品表面反射率曲线,其在300~1000 nm波长段内平均反射率约为30.23%;图9中b是在溶液温度为24℃时腐蚀样品的反射率曲线,其在300~1000 nm波长段内平均反射率约为26.24%;图9中c是在溶液温度为15℃时腐蚀绒面的反射率曲线,在300~1000 nm波长段内平均反射率约为21.28%。对比3条曲线,不难发现,低温溶液下制备的绒面反射率低。

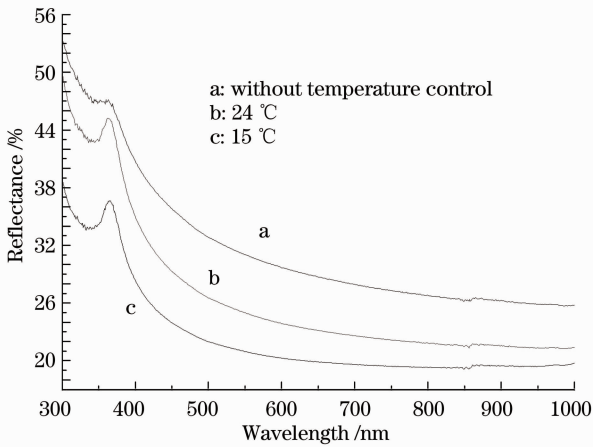


图9 体积比  $V_{\text{HNO}_3} : V_{\text{HF}} = 1:6$  的溶液在不同温度条件下制绒硅片表面反射率曲线

Fig.9 Reflectance curves of sample etched in  $V_{\text{HNO}_3} : V_{\text{HF}} = 1:6$  solution under different temperatures

## 4 结 论

利用热传导方程,分别计算了不同条件下多晶硅酸腐蚀反应时腐蚀坑周围的温度场分布。模拟计算表明:如将酸腐蚀液本体温度维持在15℃,则会使硅表面腐蚀坑底部与腐蚀坑开口处温度差变大,有利于绒面获得开口小深度大的陷阱坑;如不控制酸制绒温度,则会导致腐蚀坑底部与开口温度差小,从而在硅表面产生深度浅、开口大的陷阱坑;实验证明在受控低温条件下酸腐蚀多晶硅表面,其表面陷阱坑密度大、深度大且开口小,表面反射率比较低,与模拟分析结果基本吻合,这对于多晶硅制绒是有一定意义的。

## 参 考 文 献

1 M. Spiegel, C. Gerhards, F. Huster *et al.*. Industrially attractive front contact formation methods for mechanically V-textured multicrystalline silicon solar cells[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2002, **74**(1-4): 175~182

2 L. A. Dobrzanski, A. Drygala. Laser texturisation of crystalline silicon for solar cells [C]. 13<sup>th</sup> International Scientific Conference on Achievements in Mechanical and Materials Engineering, 2005, 127~130

3 J. Yoo. Reactive ion etching (RIE) technique for application in crystalline silicon solar cells [J]. *Solar Energy*, 2010, **84**(4): 730~734

4 W. A. Nositschka, C. Beneking, O. Voigt *et al.*. Texturisation of multicrystalline silicon wafers for solar cells by reactive ion etching through colloidal masks[J]. *Sol. Energy. Mat. Sol. C.*, 2003, **76**(2): 155~166

5 Zhigang Liu, Tietun Sun, Jing An. Silicon etching in  $\text{HF}/\text{HNO}_3/\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}/\text{H}_2\text{O}$  system [J]. *J. Electrochem. Soc.*, 2007, **154**(1): D21~D29

6 S. W. Park, J. Kim, LEE Soo Hone. Application of acid texturing to multi-crystalline silicon wafers[J]. *J. Korean Phys. Soc.*, 2003, **43**(3): 423~426

7 Lin Yuqiong, Feng Shimeng, Wang Kunxia *et al.*. Effects of a fluorinated surfactant on the microstructure of textured surfaces of mc-Si wafers [J]. *J. Materials Science & Engineering*, 2011, **29**(4): 502~505

林育琼, 冯仕猛, 王坤霞等. 含氟表面活性剂对多晶硅绒面微结构的影响[J]. *材料科学与工程学报*, 2011, **29**(4): 502~505

8 B. Gonzalez-Diaz, R. Guerrero-Lemus, B. Diaz-Herrera *et al.*. Optimization of roughness reflectance and photoluminescence for acid textured mc-Si solar cells etched at different  $\text{HF}/\text{HNO}_3$  concentrations [J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2009, **159-160**(15): 295~298

9 Milind S. Kulkarni, Henry F. Erk. Acid-based etching of silicon wafers: mass-transfer and kinetic effects[J]. *J. Electrochem. Soc.*, 2000, **147**(1): 176~188

10 Yuang-Tung Cheng, Jyh-Jier Ho, Song-Yeu Tsai *et al.*. Efficiency improved by acid texturization for multi-crystalline silicon solar cells [J]. *Solar Energy*, 2011, **85**(1): 87~94

11 Qian Yong, Feng Shimeng. Effect of multi-crystalline silicon pit-trap shape on the optical reflectance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0224001

钱勇, 冯仕猛. 多晶硅表面陷阱坑形貌对表面光反射率的影响 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 0224001

12 Wang Kunxia, Feng Shimeng, Xu Huatian *et al.*. Relation between the multicrystalline silicon surface structure and the pit-trap effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0324001

王坤霞, 冯仕猛, 徐华天等. 多晶硅不同晶面陷阱坑形貌与陷光效应的关系 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(3): 0324001

13 Yuan Genfu, Yao Yansheng, Chen Xuehui *et al.*. Experimental study on the quality of material surface applied laser-chemical combined etching [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 281~283

袁根福, 姚燕生, 陈雪辉等. 激光和化学复合刻蚀加工表面质量的实验研究 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 281~283

14 Jiang Yurong, Qin Ruiping, Bian Changxian *et al.*. Texturing of silicon nanowire arrays by post-treatment in alkali solution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(8): 0816002

蒋玉荣, 秦瑞平, 边长贤等. 碱溶液修饰硅纳米线阵列绒面 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(8): 0816002

15 Zhao Zhennan. Heat Transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. 6

赵镇南. 传热学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2008. 6

16 B. Schwartz, H. Robbins. Chemical etching of silicon, III, a temperature study in the acid system [J]. *J. Electrochem. Soc.*, 1961, **108**(4): 365~472

栏目编辑: 韩峰