

# 多晶硅表面陷阱坑形貌对表面光反射率的影响

钱 勇<sup>1,2</sup> 冯仕猛<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 上海交通大学物理系, 上海 200240)  
(<sup>2</sup> 上海航天技术研究院, 上海 201109)

**摘要** 利用光学傅里叶变换研究多晶硅绒面微结构形貌与反射率之间的关系。理论分析表明:多晶硅绒面反射率与表面微结构形貌、单位面积上陷阱坑数量有关。如绒面由 V 字型槽或坑构成,则绒面反射率比较高;如多晶硅表面上密集布满 U 字形坑或槽、内表面绒面化,这种结构构成的绒面反射率低。实验上用不同比例的酸液刻蚀多晶体表面,用扫描电镜(SEM)观察多晶硅表面 SEM 图,测量了其表面反射率,分析表面结构形貌与反射率的关系。实验结果与理论分析相吻合。

**关键词** 太阳能电池;多晶硅;形貌;陷光效应;反射率

**中图分类号** TM914.4<sup>+</sup>1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0224001

## Effect of Multi-Crystalline Silicon Pit-Trap Shape on the Optical Reflectance

Qian Yong<sup>1,2</sup> Feng Shimeng<sup>1</sup>

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

**Abstract** The shape of trap-pit strongly affects the reflective characters of multi-crystalline silicon (mc-Si) surface. Using Fourier transform, a model how the trap-pit shape affects the textured surface reflectance is investigated, and a simple expression for calculation of the etched surface reflectance is given. The theoretical analysis shows the strong dependence of reflectance on the textured shape and the trap-pit density. It is found that the reflectance is low for the etched surface covered with U-deep trap pit, but it is high for the etched surface full of V-shallow trap-pit. In experiments, mc-Si was textured in the acid solution with different concentration, sample's surface was scanned by SEM and the reflection spectrum was measured in the 350~1100 nm wavelength range. The experimental results fit the theoretical analysis well.

**Key words** solar cell; multi-crystalline silicon; textured surface; trap light effect; reflectance

**OCIS codes** 350.6050; 240.6700; 040.6040

## 1 引 言

目前,多晶硅太阳能电池光伏产业快速发展,但多晶硅太阳能电池的转换效率没有单晶硅太阳能电池转换效率高,原因是多晶硅绒面反射率比较高和少数载流子寿命较低。因此太阳电池的生产工艺中,设法降低硅片表面的光反射率是多晶硅太阳电池亟待解决的关键技术。

为了提高多晶体硅太阳能转换效率,须要设法让更多的太阳光进入晶体硅。一个有效的办法是在晶体硅表面镀上折射率交替变化周期性多层膜,如果多层膜的层数足够多,选材合理,理论上可以保证 100%太阳光能进入晶体硅,但这样的方法会导致晶体硅太阳能电池成本增加,不利于工业化生产;另一种办法是在硅表面进行修饰,使硅表面布满称为陷

**收稿日期**: 2011-07-26; **收到修改稿日期**: 2011-08-22

**作者简介**: 钱 勇(1982—),男,硕士研究生,工程师,主要从事太阳能电池方面的研究。E-mail: bbqianyong@163.com

**导师简介**: 冯仕猛(1964—),男,博士,副教授,主要从事硅表面微结构调节技术以及太阳能电池等方面的研究。

E-mail: smfeng@sjtu.edu.cn

阱坑的坑或槽,它们能让光在硅表面多次反射折射,从而降低光的表面反射率,称之为硅表面陷光效应。关于研究多晶体陷光效应的文献,主要研究如何用酸液腐蚀多晶硅表面以获得低反射率的绒面<sup>[1~12]</sup>以及采用其它技术获得高转换效率的太阳能电池<sup>[13~15]</sup>。多晶硅表面采用酸刻蚀技术,可以在硅表面获得蚯蚓状的坑或槽,这种坑或槽能使光在其表面多次反射折射,从而降低多晶硅表面反射率。但酸刻蚀的多晶硅表面,表面陷进坑形貌差异大,对应的表面反射率波动大,不利于提高多晶硅太阳能电池转换效率。采用物理方法制备多晶硅绒面,如用机械刻槽、反应离子刻蚀以及光刻技术等,能获得低反射率的绒面。如文献报道陷阱坑深度为  $6\ \mu\text{m}$ 、直径约  $14\sim 16\ \mu\text{m}$  没有加减反射膜反射率降低到  $20\%$ <sup>[16,17]</sup>;采用激光刻蚀和表面碱腐蚀技术获得陷阱坑深度为  $20\ \mu\text{m}$  左右时<sup>[18]</sup>,表面反射率降低到  $20\%$ 。但理论上研究绒面结构的形貌、大小、分布与表面反射率的关系,文献报道不多。

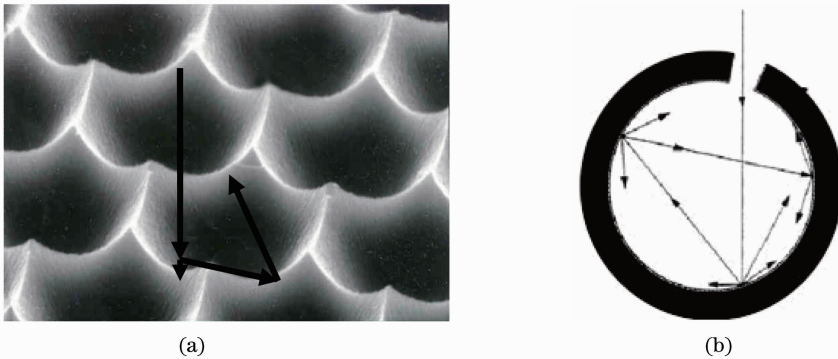


图1 多晶硅绒面结构以及光在其表面反射模拟图。(a)多晶体硅理想化的绒面结构图;(b)光在陷阱里光反射模型  
Fig. 1 Textured surface of multicrystalline silicon and the model of trap light. (a) Idealized textured surface of multicrystalline silicon; (b) simple trap-light model

为了更好研究多晶硅表面腐蚀坑的陷光效应,把光在腐蚀坑内反折射用一个简单小孔模型来分析[如图1(b)所示]。设想一个光子进入一个开小孔的球形空腔,光进入如图1(b)的小孔后,空腔内表面的任何一个点都可以成为一反射点,相当于一个新的子波源,每个子波源向空间发射电磁波,则在空腔内除子波源外的任意一点总电场强度为

$$E(x, y, z) = \iint_S A(x', y', z') \frac{\exp(ikr)}{r} ds', \quad (1)$$

式中  $E(x, y, z)$  是空腔内某点  $(x, y, z)$  电场强度,  $A(x', y', z')$  是空腔内子波源的振幅因子,  $ds'$  是  $(x', y', z')$  处附近的微元面积,  $r$  是空腔内某点位置  $(x, y, z)$  到子波源  $(x', y', z')$  之间距离,  $k$  是波矢值。则空腔内某点  $(x, y, z)$  光强度为

$$I(x, y, z) = E(x, y, z)E^*(x, y, z) = \left[ \iint_S A(x', y', z') \frac{\exp(ikr)}{r} ds' \right] \left[ \iint_S A(x', y', z') \frac{\exp(ikr)}{r} ds' \right]^*, \quad (2)$$

式中  $S$  是代表空腔内表面积。根据图1所示,球形空腔内光的总强度应该是空腔内所有点光强度的叠加,所

为了研究多晶硅表面陷阱坑形貌对其表面陷光效应和相应的硅表面反射率的影响,以及它们之间的对应关系,本文利用光学傅里叶变换分析了多晶硅表面形貌与绒面反射率的半定量关系,提出了多晶硅表面低反射率绒面优化模型,分析了陷阱坑的深度和形状对表面反射率的影响。用不同的工艺制备了多晶硅绒面,用扫描电镜(SEM)分析了其表面结构,测量不同陷阱坑形貌的表面反射率,讨论了不同绒面形貌对反射率的影响。

## 2 多晶硅绒面陷光效应的基本理论

多晶硅表面制绒主要是让光滑的晶体硅表面密集分布有一定深度的凹坑[如图1(a)所示],这种凹坑的作用是当光照射到晶体硅表面时,使光在凹坑内多次反射和折射,从而使光有更多的机会进入晶体硅中。但凹坑的深度与光在陷阱坑里往返次数有关,一般地陷阱坑深度越深,光在硅表面反折次数越多,光进入硅的机会越大。

以空腔内总光强度可以表示为

$$I = \sum I(x, y, z) = \iint I(x, y, z) dS = \oint_S \left[ \iint_S A(x', y', z') \frac{\exp(ikr)}{r} ds' \right] \left[ \iint_S A(x', y', z') \frac{\exp(ikr)}{r} ds' \right]^* dS, \quad (3)$$

式中  $dS$  是  $(x, y, z)$  处附近的微元面积,  $S$  是空腔内表面。如此, 凹坑开口处逃逸光强度为

$$I' = \iint_{S_0} I(x, y, z) dS = \iint_{S_0} \left[ \iint_S A(x', y', z') \frac{\exp(ikr)}{r} ds' \right] \left[ \iint_S A(x', y', z') \frac{\exp(ikr)}{r} ds' \right]^* dS, \quad (4)$$

式中  $S_0$  是小孔面积, 则光子从空腔内逃逸的概率  $P$  可近似处理为

$$P = \frac{I'}{I+I'} = \frac{\iint_{S_0} \left[ \iint_S A(x', y', z') \frac{\exp(ikr)}{r} ds' \right] \left[ \iint_S A(x', y', z') \frac{\exp(ikr)}{r} ds' \right]^* dS}{\oint_S \left[ \iint_S A(x', y', z') \frac{\exp(ikr)}{r} ds' \right] \left[ \iint_S A(x', y', z') \frac{\exp(ikr)}{r} ds' \right]^* dS + \iint_{S_0} \left[ \iint_S A(x', y', z') \frac{\exp(ikr)}{r} ds' \right] \left[ \iint_S A(x', y', z') \frac{\exp(ikr)}{r} ds' \right]^* dS}. \quad (5)$$

对于图 1(b) 中的小孔模型, 当若干光子进入小孔后, 光子在小孔内多次反射和折射, 很容易使小孔内表面任意位置单位面积上反射的光子数相等, 即与(5)式中  $A(x', y', z')$  相同; 按经典的光学理论, 对于小孔内某点反射的光子, 到达小孔内其它点时, 达到该点概率与反射点距离的平方成反比关系。因为小孔比较小, 为了讨论方便, 假设反射点与到达点的距离是常量。如此, (5)式可以近似为

$$P \approx \frac{S_0}{S + S_0}. \quad (6)$$

如小孔内是绒面结构, 则空腔内总的表面积会增加, 假如内表面积增加到  $nS$ , 则光子逃离的概率变为

$$P = \frac{S_0}{nS + S_0}, \quad (7)$$

式中  $P$  是光子离开陷阱坑的概率,  $n$  是内表面呈绒面时表面积的增大系数, 则进入多晶硅总光强度可表示为

$$I_T = I_0 S_0 - \frac{I_0 S_0^2}{nS + S_0} = \frac{I_0 n S_0 S}{nS + S_0}, \quad (8)$$

式中  $S_0$  是开孔面积,  $I_0$  是入射光强度,  $I_T$  进入晶体硅的光强度。如果一光滑面积为  $S'_0$  的表面被分为  $N$  个 U 形坑, 则每个凹型坑开口面积为  $S'_0/N$ , 则由(8)式可以推导出进入多晶硅的光强度为

$$I'_T = I_0 S'_0 - N \frac{S'_0}{N} \frac{I_0}{nS + \frac{S'_0}{N}} = \frac{I_0 n N S'_0 S}{nNS + S'_0}. \quad (9)$$

由(9)式可以看出: 多晶硅绒面呈 U 字形陷阱坑越多,  $N$  越大, 则进入硅内光强度越多; 在 U 字形陷阱坑数量  $N$  一定的条件下, 坑内表面积越大, 即  $S$  越大, 进入硅中光强度也越大; U 字形陷阱坑要达到一定的深度, 内表面呈凹凸点绒面, 如图 2(a) 中的所示的绒面结构, 则同时能保证  $S$ 、 $n$  大, 使进入多晶硅中的光强度增加, 表面反射率低; 图 2 中(b)的陷阱坑内表面光滑,  $n$  比较小, 其表面反射率大。但陷阱坑不能太深, 太深会导致栅极接触电阻增大, 降低太阳能电池的转换效率。

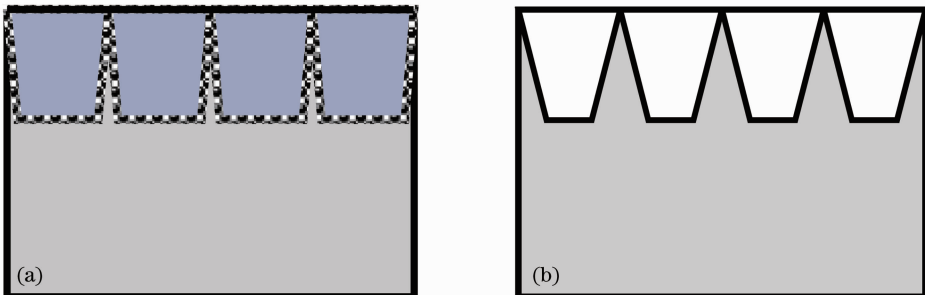


图 2 多晶硅表面理想化的具有低反射率的绒面模拟图

Fig. 2 Simulated textured surface of idealized multicrystalline silicon with the low reflectance

### 3 实验结果与讨论

实验选用面积为  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ , 厚度  $180 \sim 200\ \mu\text{m}$ , 电阻率为  $0.5 \sim 1.5\ \Omega \cdot \text{cm}$  掺 B 的 p 型多晶硅片。在绒面制作前, 先除表面污物。硅片表面形貌图由型号为 JSM-7401F 的场发射扫描电子显微镜观察, 放大倍数是 3000; 反射率由上海致东光电科技有限公司提供的型号为 D8(KD-D807-2) 的积分反射仪测量。

样品用传统配方 HF-HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O (体积比例为  $V[\text{HF}(40\%)] : V[\text{HNO}_3(68\%)] : V[\text{H}_2\text{O}] = 50\text{ mL} : 250\text{ mL} : 150\text{ mL}$ ) 腐蚀液在温度为  $20\text{ }^\circ\text{C}$ , 腐蚀时间为 2 min。腐蚀结束后, 用大量蒸馏水冲洗, 再用二次去离子水在清洗槽中洗净, 晾干。将刻蚀的多晶硅样品切割成  $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$  大小, 依次放置在 SEM 测试样品金属台上, 用型号为 HTCY/JS-1600 的小型离子喷金仪对样品进行喷金, 时间为 30 s。喷金主要是使得样品导电, 用金层复形样品表面, 提高观测倍率以提高信号产额, 提高图像信噪比。喷金完成后, 用场扫描电镜观察样品的表面形貌可以获得样品的 SEM 图 (见图 3)。从图 3(a) 中可看出传统酸配方腐蚀呈现各向同性腐蚀, 硅片表面分布着均匀的腐蚀坑。但腐蚀坑表面形貌坑浅, 开口大, (9) 式中就  $S$  小, 而且单位面积腐蚀坑密度低, 即  $N$  小, 这种绒面结构使 (9) 式中  $I_{\text{T}}$  值小。即光在腐蚀坑里往返次数少, 光子逃逸表面概率大, 绒面反射率高, 实验样品平均测量反射率高达  $36.7\%$  (见图 5 中曲线 a)。

酸腐蚀系统是由 HF, HNO<sub>3</sub> 和 H<sub>2</sub>O 溶液按一定比例混合而成, 其中 HNO<sub>3</sub> 是强氧化剂, HF 是络

合剂, 与反应的中间产物发生反应生成另一种络合物以促使反应进行, 整个腐蚀反应过程为: HNO<sub>3</sub> 与 Si 发生反应在硅片表面形成了一层 SiO<sub>2</sub>。这层 SiO<sub>2</sub> 在 HF 酸的作用下形成可溶性络合物 H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>。显然 HF 的作用使反应产物 SiO<sub>2</sub> 不断溶解, 否则所生成的 SiO<sub>2</sub> 就会阻碍腐蚀反应的进行。因此, 在 HNO<sub>3</sub>、HF 体系下, 硅腐蚀是遵循氧化→溶解过程这个顺序进行的。如在多晶硅的表面获得低反射率的陷阱坑, 要求硅与硝酸的反应速度与 SiO<sub>2</sub> 溶解在 HF 中的速度要匹配。研究发现: 在 HF、HNO<sub>3</sub> 体系下, 当  $V(\text{HNO}_3) : V(\text{HF})$  小于一定的比例, 多晶硅表面会形成完美的球形腐蚀坑 [图 3(a)], 但腐蚀凹坑较浅, 凹坑尺寸明显偏大; 当  $V(\text{HNO}_3) : V(\text{HF})$  大于一定的比例, 容易得到呈镜面的表面, 腐蚀起到了化学抛光的效果。因此合适的  $V(\text{HF})$  与  $V(\text{HNO}_3)$  的配比, 对于获得好的绒面结构是非常重要的。

图 3(a) 显示的刻蚀效果不理想。为了获得更好的陷阱坑, 适当降低硝酸的含量, 增加氢氟酸的含量, 使氧化硅能与快速溶解在氢氟酸中, 从而获得低反射率的陷进坑。实验中酸液 HF-HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O 比例调整为  $V[\text{HF}(40\%)] : V[\text{HNO}_3(68\%)] : V[\text{H}_2\text{O}] = 200\text{ mL} : 150\text{ mL} : 150\text{ mL}$ , 刻蚀温度控制在  $20\text{ }^\circ\text{C}$ 、腐蚀时间为 2.2 min。腐蚀的多晶硅绒面 SEM 图如图 3(b) 所示。从图 3(b) 中可以看出, 刻蚀温度降低后, 单位面积腐蚀坑密度增加, 即  $N$  增加, 但腐蚀坑深度浅、开口呈 V 字型喇叭口, 这种结构使 (9) 式中  $S$  小, 对应的表面反射率高, 样品的平均测量反射率 ( $31.7\%$ , 如图 5 中曲线 b 所示) 也证明了这一结论。

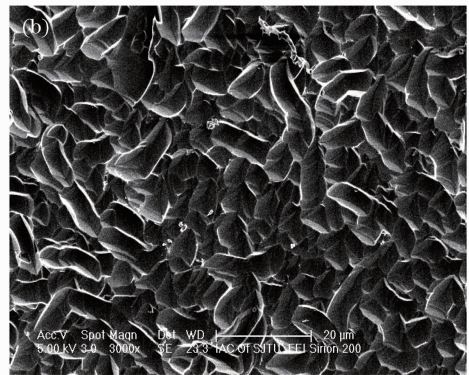
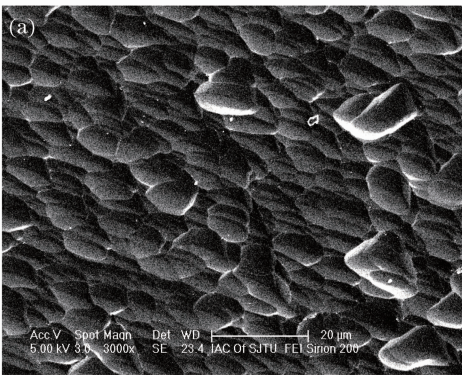


图 3 传统酸液配方 HF-HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O 腐蚀的多晶硅表面 SEM

Fig. 3 SEM of multicrystalline silicon surface etched in acid solution of HF-HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O

单纯的硝酸、氢氟酸和水组成的刻蚀溶液, 优化配方也很难在多晶硅表面上刻蚀出低反射率的绒面。原因是硝酸根离子的氧化能力强。在酸刻蚀过

程中, 如硝酸的浓度高, 硅与硝酸的反应生成物 SiO<sub>2</sub> 很难完全快速地溶解在 HF 中, 使反应物聚结在硅表面附近, 从而降低硅与酸的反应速度。因为



多晶硅与酸的氧化反应首先是在机械损伤处或晶界处开始,刚开始这些位置的反应速度很快,但因为反应物堆积在硅表面附近,这些位置的反应速下降,使机械损伤裂纹或晶界很难向纵深进行;而其它位置刚开始反应速度慢,但没有反应聚积,能维持一定的反应速度,此消彼长的结果使多晶硅表面呈浅的陷阱坑。如氢氟酸的浓度高,硅与硝酸的反应生成物  $\text{SiO}_2$  能快速地溶解在 HF 中,不影响硅的氧化反应速度,能使机械损伤裂纹或晶界向纵深扩展,如此在多晶硅表面上刻蚀出有一定形貌的陷阱坑,如图 3(b)所示。但是硝酸与硅的反应速度以及氧化硅与氢氟酸的反应速度很快,而且对浓度、温度比较敏感,浓度、温度稍有波动,获得的陷阱坑形貌就不相同,所以单靠调整酸的比例是很难获得低反射率的陷阱坑。

继续优化实验配方,把酸液的配比调整为



$V[\text{HF}(40\%)] : V[\text{HNO}_3(68\%)] : V(\text{H}_2\text{O}) = 300 \text{ mL} : 100 \text{ mL} : 150 \text{ mL}$ ,另再加入 0.5 g  $\text{NaNO}_2$ 。加入亚硝酸钠是基于  $\text{NO}_2^-$  的氧化能力要比  $\text{NO}_3^-$  弱,形成的  $\text{SiO}_2$  速度慢,容易使氧化反应的速度与溶解过程的速度有合适的配比,从而有利于形成形貌规则的陷阱坑。图 4(a)是上述配方的腐蚀液在温度为  $20^\circ\text{C}$ 、腐蚀 2.3 min 下刻蚀的多晶硅绒面图。从图 4(a)中可看出改良后酸液呈现各向同性腐蚀,多晶硅表面分布着均匀的腐蚀坑。仔细观察,有的腐蚀坑浅,有的腐蚀坑深,但浅的腐蚀坑远比深的腐蚀坑多。就单个腐蚀坑陷光效应来看,浅腐蚀坑陷光效应比深腐蚀坑的陷光效应差。虽然图 4(a)上有一些深的腐蚀坑,但密度不高,样品平均测量反射率为 27.8%(如图 5 中曲线 d 所示),表面陷光效应不很理想。

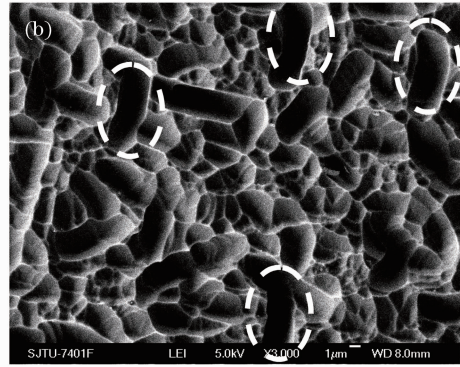


图 4 改良后  $\text{HF-HNO}_3\text{-H}_2\text{O}$  腐蚀液刻蚀的多晶硅表面 SEM

Fig. 4 SEM of multicrystalline silicon surface etched in optimized acid solution of  $\text{HF-HNO}_3\text{-H}_2\text{O}$

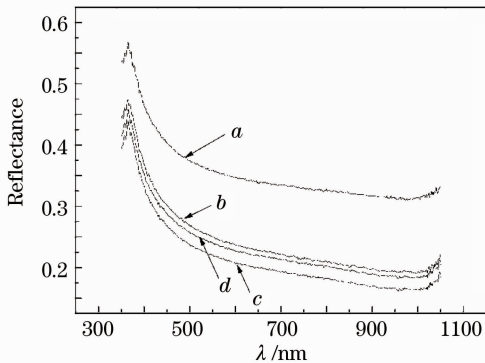


图 5 化学腐蚀后没有减反射膜的多晶硅片表面的反射谱

Fig. 5 Reflection spectra of the sample etched in the acid solution without antireflective film

为了优化陷阱坑,刻蚀液中完全取消了硝酸,用亚硝酸钠取而代之。理由是基于亚硝酸根离子比硝酸根离子的氧化能力弱。在刻蚀过程中,亚硝酸钠

的反应速度相对比较慢,反应形成  $\text{SiO}_2$  能很快被 HF 溶解,机械损伤裂纹和晶界处的反应就会向底部和四周进行而形成陷阱坑。同时,亚硝酸的反应速度相对比较慢,对浓度不是很敏感,刻蚀过程中容易获得稳定酸液配方。调整的酸液配比为:  $\text{HF}(40\%, 300\text{ml}), \text{NaNO}_2(1.2\text{g}), \text{H}_2\text{O}(120 \text{ mL})$ ,温度控制在  $20^\circ\text{C}$ ,腐蚀时间为 2.5 min,刻蚀的多晶硅片绒面如图 4(b)所示。从图 4(b)可以看出,多晶硅表面有非常致密如蚯蚓状深度较大的陷阱坑,而且绝大多数的腐蚀坑呈 U 字形形貌,如图 4(b)中白色的点曲线围成的陷进坑。如此,则(9)式中  $S, N$  值大,使(9)式中  $I_1$  值大,所以这种绒面的反射率比较低。实验用积分反射仪器测量其表面反射率为 24.8%(如图 5 曲线 c 所示),与模型中获得的结论基本吻合。

实验 SEM 和反射率曲线表明:用亚硝酸取代

硝酸能在多晶硅上刻蚀出具有低反射率的陷阱坑。

综上所述,普通的酸液很难在多晶硅上刻蚀出具有良好陷光效应的绒面,在刻蚀液中利用亚硝酸钠取代硝酸制备的多晶硅绒面布满了 U 字型陷阱坑,陷阱坑密度大、绒面反射率低。

## 5 结 论

本文研究了多晶硅表面低反射率的绒面结构模型,利用光学傅里叶变换分析了硅绒面光反射与陷阱坑形状的关系。理论研究表明:多晶硅表面的反射率与其绒面上凹形坑的形貌有关,如多晶硅表面上布满 U 字形坑或 U 字形槽,槽内表面由许多大小不一的凹凸点构成,这样的绒面结构有极低的反射率。用不同比例的酸液刻蚀多晶硅表面,分析其表面结构与其测量反射率曲线,发现多晶硅绒面呈 V 字型浅腐蚀坑,则反射率比较高。实验用亚硝酸钠取代硝酸在多晶硅上刻蚀出具有 U 字型陷阱坑的绒面,表面测量反射率低。实验结果与理论模型基本吻合,这对多晶硅太阳能电池的研究具有一定的意义。

## 参 考 文 献

- 1 O. Powell, H. B. Harrison. Anisotropic etching of {100} and {110} planes in (100) silicon [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2001, **11**(3): 217~220
- 2 J. Rentsch, N. Kohn, F. Bamberg *et al.*. Isotropic plasma texturing of mc-Si for industrial solar cell fabrication [C]. Photovoltaic Specialists Conference, 2005. Conference Record of the Thirty-first IEEE, 2005, 1316~1319
- 3 M. A. Gonsálvez, R. M. Nieminen. Surface morphology during anisotropic wet chemical etching of crystalline silicon [J]. *New J. Phys.*, 2003, **5**: 100.1~100.28
- 4 Guo Zhiqu, Liu Xiyun, Shen Hui *et al.*. Isotropic texturing of multicrystalline silicon [J]. *J. Mater. Sci. Engng.*, 2007, **25**(1): 95~98  
郭志球, 柳锡运, 沈 辉 等. 各向同性腐蚀法制备多晶硅绒面 [J]. *材料科学与工程学报*, 2007, **25**(1): 95~98
- 5 Wang Tao, Wang Zhengzhi. Summary on acidic texturing of multicrystalline silicon solar cells [J]. *Chinese J. Power Sources*, 2006, **30**(12): 1020~1022  
王 涛, 王正志. 多晶硅太阳能电池的酸腐蚀绒面技术 [J]. *电源技术*, 2006, **30**(12): 1020~1022
- 6 Xiao Wenming, Tan Baimei, Liu Yuling *et al.*. Research on texturing of multi-crystalline silicon solar cells with acid etch [J].

- Micronanoelectronic Technology*, 2009, **46**(10): 627~631  
肖文明, 檀柏梅, 刘玉岭 等. 多晶 Si 太阳能电池表面酸腐蚀制绒的研究 [J]. *微纳电子技术*, 2009, **46**(10): 627~631
- 7 L. A. Dobrzański, A. Drygała. Processing of silicon surface by Nd:YAG laser [J]. *J. Achievements Mater. Manuf. Engng.*, 2006, **17**(1-2): 321~324
  - 8 O. Schultz, G. Emanuel, W. Glunz *et al.*. Texturing of multicrystalline silicon with acidic wet chemical etching and plasma etching [C]. 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan, 2003, 1360~1366
  - 9 P. Panek, M. Lipiński, J. Dutkiewicz. Texturization of multicrystalline silicon by wet chemical etching for silicon solar cells [J]. *J. Mater. Sci.*, 2005, **40**(6): 1459~1463
  - 10 Zhang Fayun, Ye Jianxiang. Texturing of multicrystalline silicon with acidic etching [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2): 222~226  
张发云, 叶建雄. 多晶硅表面酸腐蚀制备绒面研究 [J]. *光子学报*, 2011, **40**(2): 222~226
  - 11 Shao Jungang, Liao Hua, Huang Xiaodong *et al.*. Influence of acidic solution on the texturization of multi-silicon [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2010, **31**(12): 1563~1567  
邵俊刚, 廖 华, 黄小龙. 酸腐蚀液对多晶硅表面织构的影响 [J]. *太阳能学报*, 2010, **31**(12): 1563~1567
  - 12 Y. Nishimoto, T. Ishihara, K. Namba. Investigation of acidic texturization for multicrystalline silicon solar cells [J]. *J. Electrochem. Soc.*, 1999, **146**(2): 457~461
  - 13 Zhou Zhou, Zhou Jian, Sun Xiaowei *et al.*. Design of an irregularly shaped BDR for thin film solar cells [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0731002  
周 舟, 周 健, 孙晓玮 等. 薄膜太阳能电池异型布拉格背反射结构设计制作 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0731002
  - 14 Wang Yunfeng, Li Ming, Lin Wenxian *et al.*. Performance analysis on solar cell modules of flat-plate and trough concentrating photovoltaic system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2287~2292  
王云峰, 李 明, 林文贤 等. 平板式与槽式聚光太阳能电池组件性能分析 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2287~2292
  - 15 Li Guoliang, Li Ming, Wang Liuling *et al.*. Analysis of output characteristics of super cells serial module with partial shading [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0125001  
李国良, 李 明, 王六玲 等. 阴影遮挡下空间太阳能电池串联组件输出特性分析 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0125001
  - 16 L. A. Dobrzański, A. Drygala, K. Golombek *et al.*. Laser surface treatment of mc Si for enhancing optical properties [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2008, **201**: 291~296
  - 17 U. Gangopadhyay, S. K. Dhungel, P. K. Basu *et al.*. Comparative study of different approaches of multicrystalline silicon texturing for solar cell fabrication [J]. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2007, **91**(4): 285~289
  - 18 Jae Beom Park, Jong Sik Oh, Elly Gil *et al.*. Plasma texturing of multicrystalline silicon for solar cell using remote-type pin-to-plate dielectric barrier discharge [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2009, **42**(21): 1~6

栏目编辑: 韩 峰