

多晶硅表面皮秒激光阵列孔绒面制备

贾天代^{**}, 冯爱新^{*}, 陈欢, 刘勇

温州大学机电工程学院, 浙江 温州 325035

摘要 为了减小多晶硅表面的反射率,采用皮秒激光在多晶硅片表面制备阵列孔绒面,分析了激光参数对制绒深度的作用机理,优选出实验参数:激光功率为 15 W,脉冲频率为 25 kHz,扫描速度为 0.9 m/s,扫描次数为 2。利用优选参数验证了制绒孔距对多晶硅片表面反射率的影响,并通过 PC1D 软件模拟出不同制绒硅片的开路电压和短路电流。结果表明,当孔距为 30 μm 时,多晶硅表面形成的孔最为紧密,形貌最好,其孔密度为 $1.17 \times 10^5 \text{ counts} \cdot \text{cm}^{-2}$,表面反射率为 6.95%,多晶硅电池光-电转化效率提升至 18.45%。

关键词 激光技术; 激光制绒; 阵列孔; 时域有限差分(FDTD); 多晶硅; 反射率

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1002002

Fabrication of Array Pores on Polysilicon Surface by Picosecond Laser

Jia Tiandai^{**}, Feng Aixin^{*}, Chen Huan, Liu Yong

College of Mechanical and Electrical Engineering, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China

Abstract In order to reduce the reflectivity of polysilicon surface, a picosecond laser is adopted to fabricate array pores on the polysilicon surface. The action mechanism of each laser parameter on the texturing depth is analyzed and the optimal experimental parameters with laser power of 15 W, pulse frequency of 25 kHz, scanning speed of 0.9 m/s and scanning times of 2 are chosen. Based on these optimal parameters, the influence of textured pore pitch on the polysilicon surface reflectivity is verified, and the open-circuit voltage and the short-circuit current of different textured silicon wafers are simulated by the PC1D software. The results show that, there exist the most compact pores with the best morphology on the polysilicon surface when the pore pitch is 30 μm . The pore density is $1.17 \times 10^5 \text{ counts} \cdot \text{cm}^{-2}$, the surface reflectivity is 6.95% and the photoelectric conversion efficiency of the polysilicon battery is increased to 18.45%.

Key words laser technique; laser texturing; array pore; finite different time domain (FDTD); polysilicon; reflectivity

OCIS codes 140.3390; 040.6040; 350.6050

1 引 言

光伏发电是新能源结构的组成部分,近年来,其装机容量的年增长速率达到了近 50%^[1]。多晶硅电池的性价比较高,因而其市场占有率最高,但是在太阳能转化为电能的过程中存在多种形式的能量损失^[2],主要包括光学损失和电学损失^[3]。光学损失主要表现为电池表面对入射光的反射,例如多晶硅表面反射所造成的光损失超过 30%^[4],致使光-电转化效率最高仅为 20.4%^[5]。在工业上,常常采用镀膜抗反射膜和制绒来降低电池表面反射率。但是镀

抗反射膜的方式只能降低单一波长的反射^[6],且结合强度较低,反射膜易脱落^[7]。在硅片表面进行结构化处理^[8],可以形成光陷结构,增加入射光的光程,从而达到降低其表面反射率的目的。目前在规模化生产中,化学腐蚀制绒仍占主导地位,但其具有腐蚀液严重污染环境、制绒形貌不易控制及减反效果不明显等缺点^[9]。而激光制绒技术具有非接触式加工、易获得良好的微结构形貌,以及对环境无污染等特点,因此得到了广泛关注。

Ponce 等^[10]基于激光诱导的周期性表面结构的原理,通过对硅片表面反射率进行动态测量,分析

收稿日期: 2018-04-02; 修回日期: 2018-05-08; 录用日期: 2018-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(51505236)

* E-mail: aixfeng@126.com; ** E-mail: 807174790@qq.com

了硅片处理前后周期性结构的刻蚀深度对光谱反射率的影响。Xu 等^[11]利用纳秒脉冲激光照射硅晶片,研究了辅助气体和激光脉冲数量对微结构形态的影响。姚振强等^[12]将整形后的方形光束通过光栅衍射至硅片表面,制备了周期性亚微米结构。该方法通过光束干涉形成的周期性微结构不能在硅片表面均匀分布。吕晓占等^[13]利用皮秒激光在多晶硅表面进行多次重复性线扫描,再经过染色腐蚀形成了微纳双结构的复合绒面。这种方法制备出来的绒面微结构不能沿着激光扫描方向长程有序排列,且均匀性较差,将会影响后续的扩散制结等工艺。潘峰等^[14]通过仿真证明了纳米锥结构的优越性。Parvin 等^[15]利用 193 nm 的 ArF 准分子激光束照射太阳能电池表面诱导微/纳米结构,使得光谱反射率显著降低,电流密度升高。

本文直接利用激光扫描振镜,在多晶硅片表面刻蚀阵列微孔形成光陷结构。首先通过时域有限差分(FDTD)法,模拟了波长为 700 nm 的入射光与孔的相互作用,得出了优化的阵列孔距;然后在多晶硅片表面进行单点打孔实验,分析各因素对多晶硅片表面微观结构的影响,并优选工艺参数;最后比较了此工艺参数下不同孔距的阵列孔形貌及其在 350~

1050 nm 波长范围内的表面反射率。结果表明:阵列孔微结构可以有效地降低表面反射率,提高多晶硅电池的光电转化效率。

2 实验设计和模拟

2.1 实验设备及装置

实验采用的激光器输出波长为 1030 nm,脉冲宽度小于 15 ps,光束质量 M^2 小于 1.3,当选用输出二倍频的激光束时,其谐波转换效率为 50%。扫描振镜的扫描速度为 0~3 m/s,分辨率不大于 15 μ rad,场镜焦距为 163 mm。

激光束经过倍频输出光路系统转为 515 nm 二倍频谐波传递到振镜,经过聚焦垂直辐照到置于纳米加工平台上的硅片表面(聚焦光斑直径为 30 μ m)。激光器工作状态、振镜扫描路径,以及加工平台运动的匹配均由电脑软件编程控制。实验装置工作原理如图 1 所示。

采用日本 OLYMPUS 公司的 OLS4100 型激光共聚焦扫描显微镜对刻蚀前后的硅片表面微结构进行观察分析。采用广州景颐光电科技有限公司的 USB6500-Pro 型光纤光谱仪结合积分球测量硅片表面的反射率,测量波长范围为 350~1050 nm。

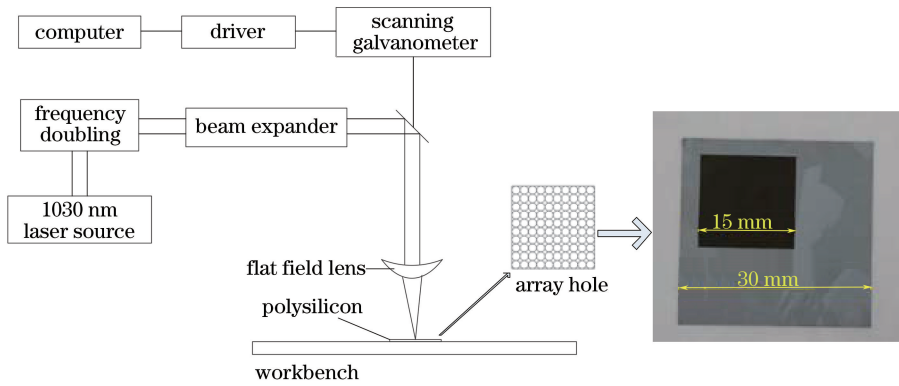


图 1 实验装置及制绒样品示意图

Fig. 1 Schematic of experimental equipment and textured samples

2.2 实验材料及方法

实验选用 p 型 (100) 多晶硅片,尺寸为 156 mm×156 mm,厚度为 (200±20) μ m,电阻率为 1~3 Ω ·cm,少子寿命不小于 2 μ s。如图 1 所示,实验中将多晶硅片切割成 30 mm×30 mm 的样件,其中激光刻蚀区域的尺寸为 15 mm×15 mm。实验前将多晶硅片样品分别在丙酮和乙醇溶液中超声清洗 10 min,并用氮气吹干。

多晶硅片制绒深度与电池转化效率有着密切

的关系^[16]。制绒深度过大将会影响少子寿命,从而降低多晶硅电池的光-电转化效率,因此需要控制激光扫描刻蚀深度。利用上述实验装置在多晶硅表面进行单点刻蚀。采用定量分析法,逐一改变激光功率 P 、脉冲频率 f 、扫描速度 v 和扫描次数 t 等参数,初步设置单点刻蚀参数:激光功率 $P=5$ W,脉冲频率 $f=30$ kHz,扫描速度 $v=900$ mm/s,扫描次数 $t=6$ 。研究各参数对刻蚀多晶硅片深度的影响,选取合适的工艺参数,优化硅

片表面微结构制备工艺。并用质量分数为 10% 的 HF 溶液去除激光刻蚀孔内部及周围的熔渣。

2.3 减反机理模拟分析

利用 FDTD 法建立简化的阵列孔结构模型,对其中的一个微孔单元进行模拟仿真,观察光与微孔单元之间的相互作用,并通过优化得到最优孔距 d 。设置锥孔底部半径为 $15\ \mu\text{m}$,顶角为 69° ,选用波长为 $700\ \text{nm}$ 的平面光源,沿 z 轴负方向入射,并沿 x 轴线偏振。如图 2 所示,入射光在孔内部发生了多次反射和散射,并伴随着透射吸收,进入硅基体,从而有效降低了反射率。

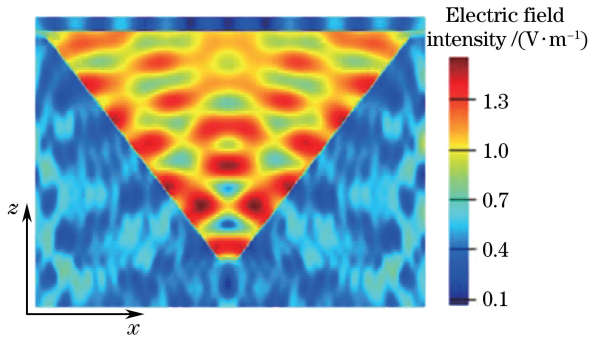


图 2 波长为 $700\ \text{nm}$ 的入射光在微孔中的电场分布
Fig. 2 Electric field distribution of incident light with wavelength of $700\ \text{nm}$ within micro-pores

如图 3 所示,在 $10\sim 60\ \mu\text{m}$ 的孔距范围内,反射率随着孔距的增加呈现出先下降后上升的趋势。当孔距 $d = 30\ \mu\text{m}$ 时,反射率最低,仅为 2.11% ,这主要是因为此时相邻孔边缘相切,孔密度达到最大值;当 $d < 30\ \mu\text{m}$ 时,相邻孔边缘相交,孔壁被破坏,入射光在孔内的反射次数减小,导致反射率增大;当 $d > 30\ \mu\text{m}$ 时,相邻孔之间出现较大的光滑未刻蚀区域,同样不能获得良好的减反效果。因此, $30\ \mu\text{m}$ 为孔距的最优加工距离。

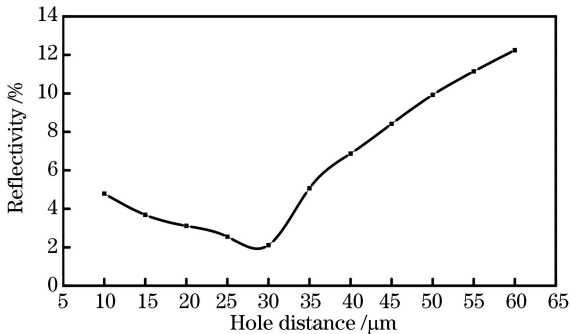


图 3 孔距对反射率的影响

Fig. 3 Effect of different hole distances on reflectivity

3 实验结果与分析

3.1 单点刻蚀实验结果分析

刻蚀实验采用波长为 $515\ \text{nm}$ 的绿激光,其光子能量为 $2.41\ \text{eV}$,大于温度 $300\ \text{K}$ 下的硅带隙宽度 $E_g = 1.124\ \text{eV}$ 。因此,在激光作用下,光子-电子引起库仑爆炸,电子-声子引起相爆炸。这两种爆炸先后发生,可有效刻蚀掉多晶硅的表面^[17]。

如图 4(a)所示,激光功率对多晶硅片凹坑刻蚀深度的影响较大。当激光功率小于 $15\ \text{W}$ 时,凹坑深度与激光功率呈正相关关系;当激光功率大于 $15\ \text{W}$ 时,凹坑深度稳定在 $25\ \mu\text{m}$ 左右。在实验中观察到耀眼的等离子体闪光,说明有等离子体产生,这是因为实验中激光能量密度为 $47\ \text{J}/\text{cm}^2$,满足等离子体产生的条件^[18]。分析认为:等离子体的屏蔽效应是凹坑深度趋于稳定的主要原因。

由图 4(b)可知,当激光脉冲频率小于 $20\ \text{kHz}$ 时,由于单位时间内累积的脉冲能量不能使更多的硅材料产生烧蚀,因此凹坑深度稳定在 $2.83\ \mu\text{m}$ 左右。但是,当激光脉冲频率在 $20\sim 25\ \text{kHz}$ 范围内变化时,凹坑深度发生了明显变化,由 $2.83\ \mu\text{m}$ 快速增大至 $3.71\ \mu\text{m}$,这是因为激光能量迅速累积,导致更多的硅材料产生烧蚀。但是,在此过程中产生了大量的等离子体,损失了大部分能量,致使激光脉冲频率大于 $25\ \text{kHz}$ 时,刻蚀深度再次达到稳定状态。

由图 4(c)可知,随着扫描速度的增大,凹坑深度下降幅度由小变大。这是因为硅片单位面积内获得的能量随着扫描速度的增加而不断减少。

由图 4(d)可知,凹坑深度与扫描次数呈正相关关系。这是因为相邻两次激光扫描之间不相关,每次扫描都会烧蚀掉一定深度的硅材料。随着扫描次数的增加,烧蚀掉的硅材料不断增多,导致刻蚀深度呈线性增加。

通过分析激光功率、脉冲频率、扫描速度和扫描次数去除多晶硅材料的作用机理,可以发现:当激光功率 $P = 15\ \text{W}$ 、脉冲频率 $f = 25\ \text{kHz}$ 时,微凹坑深度均可达到最大值;然而只有在扫描速度达到最大而扫描次数最少时,加工效率最高。但是,当扫描速度最大而扫描次数最少时,微凹坑深度最小。因此,在保证其他参数使微凹坑深度达到最大值的条件下,提高加工效率,以此减少扫描速度和扫描次数对微凹坑深度的影响。综合上述分析,优选 $P = 15\ \text{W}$, $f = 25\ \text{kHz}$, $v = 900\ \text{mm}/\text{s}$, $t = 2$ 进行后续实验。

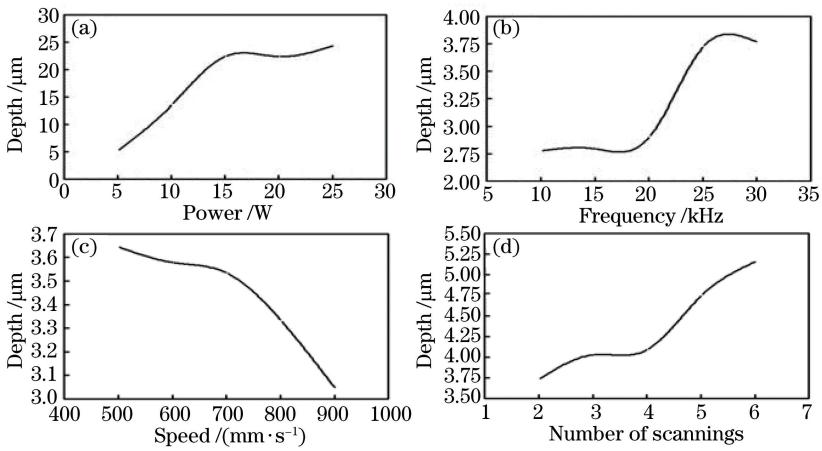


图 4 各工艺参数对多晶硅表面凹坑刻蚀深度的影响。(a)激光功率;(b)脉冲频率;(c)扫描速度;(d)扫描次数
Fig. 4 Effects of each process parameter on pit etching depth on polysilicon surface.
(a) Laser power; (b) pulse frequency; (c) scanning speed; (d) number of scannings

3.2 不同孔距下的多晶硅片表面形貌

利用单点刻蚀实验优选的实验参数进行绒面制备实验,研究孔密度与表面形貌之间的关系。根据孔距接近光斑直径的原则和模拟结果,通过改变相邻孔的间距,达到改变多晶硅片表面孔密度的效果,设置孔距 $d=30, 40, 50, 60 \mu\text{m}$ 。

如图 5(a1)~(d1)所示,当孔距从 $30 \mu\text{m}$ 增加至 $60 \mu\text{m}$ 时,多晶硅表面微结构界限变得越来越清

晰。比较不同孔距下的显微形貌图,可以直观地看出孔密度随着孔距的增加而不断减小。通过测量不同孔距下孔的几何参数,发现孔径大小不随孔距的改变而变化,约等于激光的光斑直径($30 \mu\text{m}$)。如图 5(a2)~(d2)所示,可以看出,经过激光刻蚀得到的孔呈倒三角形。这是由于实验中使用的激光能量呈高斯分布,激光光斑中心能量高,烧蚀掉的材料较多。距光斑中心越远,激光能量越低,烧蚀掉的材料

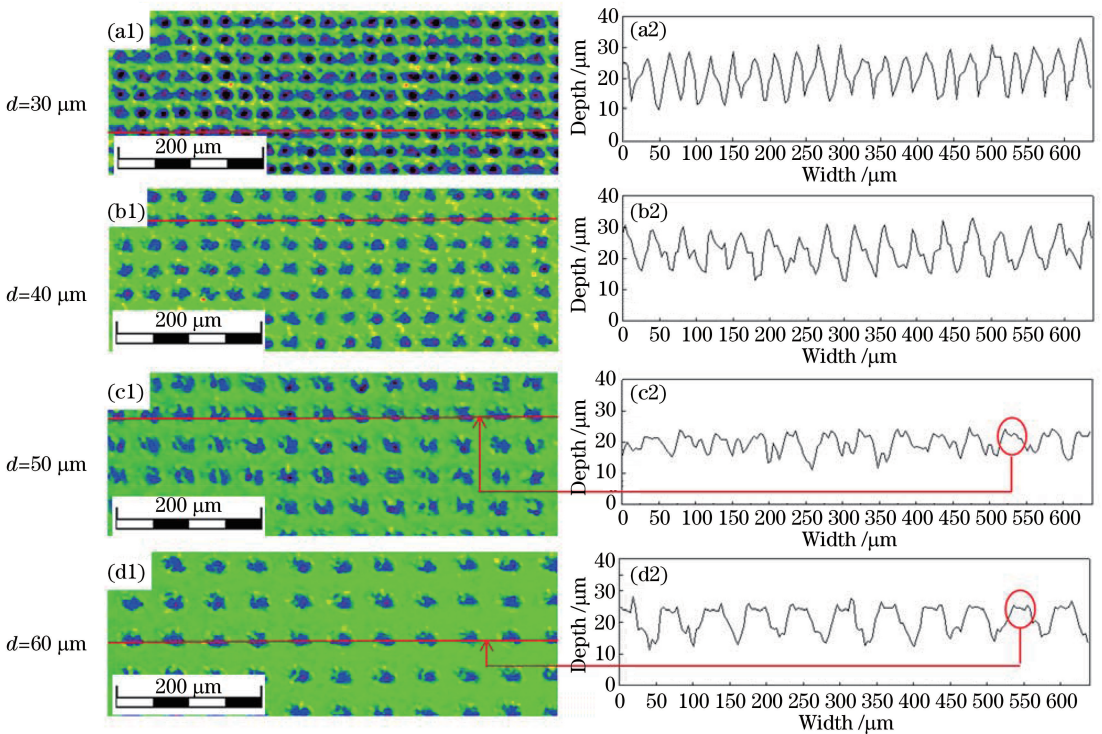


图 5 不同孔距下的激光刻蚀多晶硅样品。(a1)(b1)(c1)(d1)显微形貌;(a2)(b2)(c2)(d2)相应的截面曲线
Fig. 5 Laser-etched polysilicon samples at different pore pitches. (a1)(b1)(c1)(d1) Micro-morphologies; (a2)(b2)(c2)(d2) corresponding curves of cross sections

也就越少。

如图 5(a1)所示,当孔距等于光斑直径时,激光扫描光斑不重合,孔壁没有被破坏。但是当孔距 $d > 30 \mu\text{m}$ 时,刻蚀孔周围就会出现未刻蚀区。当孔距 $d = 40 \mu\text{m}$ 时,刻蚀孔周围开始出现未刻蚀区;当孔距 $d = 50 \mu\text{m}, 60 \mu\text{m}$ 时,刻蚀孔周围出现明显的未刻蚀区,如图 5(c1)、(d1)中红色标记所示。未刻蚀区域的表面比较光滑,不利于减少多晶硅表面的反射。当孔距 $d < 30 \mu\text{m}$ 时,激光扫描光斑重合,激光刻蚀之后相邻孔之间就会出现连通现象,即孔壁因为激光能量的累积而产生熔化。如图 6 所示,当孔距 $d = 20 \mu\text{m}$ 时,孔壁被破坏,激光刻蚀之后相

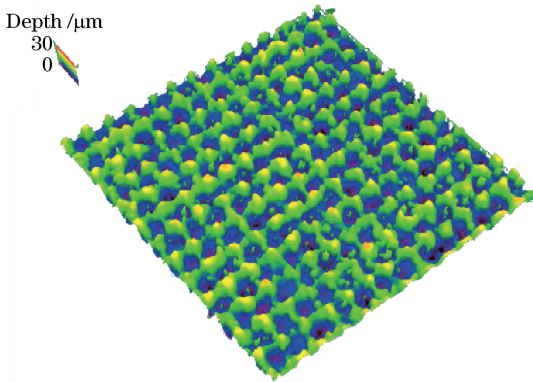


图 6 孔距 $d = 20 \mu\text{m}$ 时激光刻蚀多晶硅样品的三维形貌
Fig. 6 3D topography of laser-etched polysilicon sample at pore pitch $d = 20 \mu\text{m}$

邻孔之间出现蓝色区域连通现象。孔壁被破坏之后,入射光线在孔内的反射次数就会减少,同样不利于多晶硅表面反射率的减小。因此,为了获得良好的减反效果,需要合理控制孔距大小。

通过上述分析可以发现,多晶硅片的表面形貌和激光光斑直径与孔距具有十分密切的关系。激光光斑直径越小,刻蚀孔径就越小,通过改变孔距便可得到最大的孔密度。两者结合将会有效地减小多晶硅片表面的反射率。但是实验条件有限,光斑直径最小为 $30 \mu\text{m}$ 。通过更换场镜来改变聚焦光斑大小,可以获得更小的孔径,从而进一步提高孔密度,减小多晶硅表面的反射率。钱勇等^[19]也证明了多晶硅表面反射率与微结构密度有关。

3.3 光谱反射率测试与分析

对化学腐蚀制绒的多晶硅片样品的反射率和表面形貌进行测试,并与激光刻蚀制绒样品进行比较。如图 7 所示,制绒后的多晶硅片表面的微孔结构使入射光线在孔内形成多次反射,因此增加了入射光线的光程,致使反射率大幅减小。通过对比各样品硅片的反射光谱,可以发现:1)在 $350 \sim 1050 \text{ nm}$ 波长范围内,未制绒硅片的平均反射率为 29.43% ,化学腐蚀制绒硅片的平均反射率则减至 19.59% ,但是反射光谱的波动较大;2)在 $400 \sim 900 \text{ nm}$ 波长范围内,激光制绒硅片的减反效果明显优于化学腐蚀制绒硅片的,反射光谱较稳定;3)激光制绒多晶硅表面的反射率随着孔距的增加而增大,最低反射率从 5.17% 增大至 9.01% 。

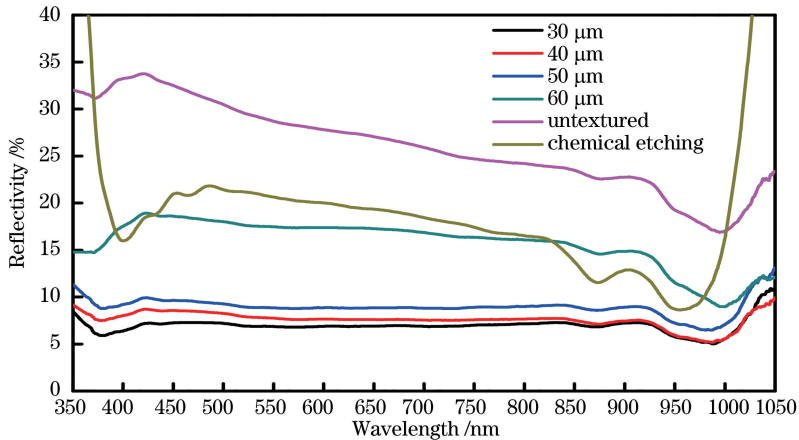


图 7 不同工艺制绒的多晶硅样品的反射率
Fig. 7 Reflectivity of textured polysilicon samples under different surface textures

图 8 所示为多晶硅片样品的激光扫描共聚焦显微镜(LSCM)图。从图 8(a)可以看出,当孔距为 $30 \mu\text{m}$ 时,激光刻蚀硅片的表面形貌十分均匀。图 8(b)所示为激光刻蚀样品单孔的剖视图。由于

化学腐蚀制绒对腐蚀形貌不可控,因此表面呈现出凹凸不均的状态,如图 8(c)所示,这将使后期沉淀形成的钝化膜不能完全覆盖硅片表面而形成气孔等缺陷,从而形成复合中心,降低载流子寿

命^[20]。如图 8(a)所示,孔距为 30 μm 时,硅片的表面形貌十分均匀,其绒度为 100%,经测量计算得到面积比为 2.251,即制绒后硅片表面积是制绒前硅片表面积的 2.251 倍。进一步分析认为,表面积比和绒度大小由孔密度决定,这是因为在孔

的几何参数一定的情况下,孔的数量越多,其硅片的表面积比和绒度也就越大。此时,孔距为 30 μm ,孔密度最大,约为 $1.17 \times 10^5 \text{ counts} \cdot \text{cm}^{-2}$,在 350~1050 nm 波长范围内,其平均反射率为 6.95%。

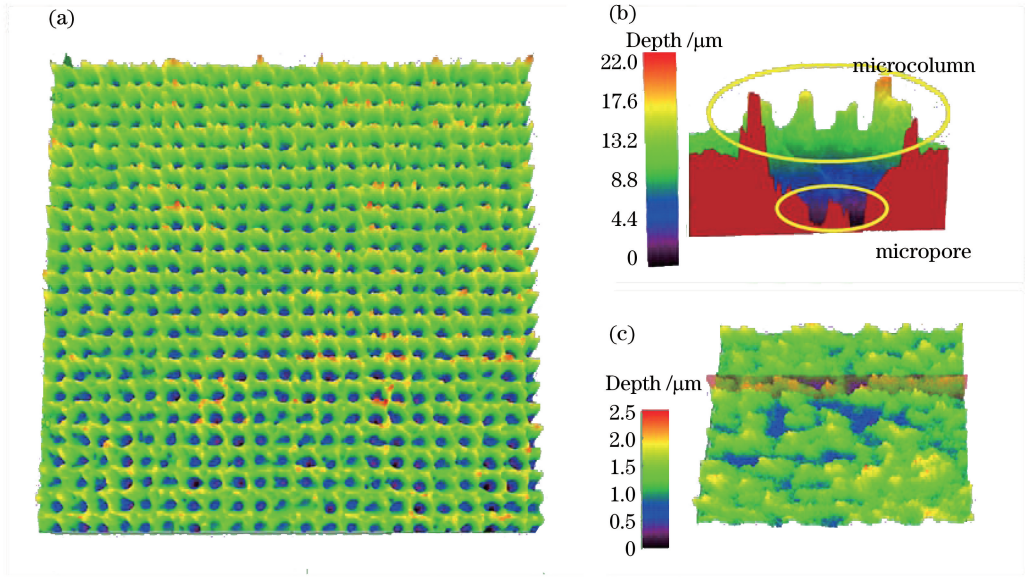


图 8 激光刻蚀与化学腐蚀样品的 LSCM 图。(a)激光刻蚀, $d=30 \mu\text{m}$; (b)激光刻蚀样品单孔的剖视图, $d=30 \mu\text{m}$; (c)化学腐蚀
Fig.8 LSCM images of laser etched and chemically etched samples. (a) Laser etching, $d=30 \mu\text{m}$;
(b) cut-open view for single pore of laser etched sample, $d=30 \mu\text{m}$; (c) chemical etching

通过观察孔距为 30 μm 多晶硅片的单个孔的剖视图[图 8(b)],发现孔边缘存在许多“微柱”,孔的底部分布着“微孔”。分析认为,当激光束照射到硅片表面时,硅材料首先以等离子体的形式去除,随着激光脉冲数量的不断增多,产生热积累效应,硅材料相继发生库仑爆炸和相爆炸,使得硅材料不断飞溅到表面,于是在孔底形成“微孔”,随着熔融的硅材料在孔周围不断积累、冷却凝固,形成“微柱”。孔底部的微孔与微柱的存在形成了特殊的复合结构,增加了入射光的光程,进一步提升了光陷效果。

3.4 电学特性变化

为了衡量激光制绒后多晶硅片表面反射率对太阳能电池电学性能的影响,使用 PC1D 仿真软件进行模拟,研究太阳能电池电学性能的变化特征。PC1D 的仿真条件设置:电池面积为 243.36 cm^2 ,硅片厚度为 200 μm ,体电阻率为 $2 \Omega \cdot \text{cm}$,介电常数设为 11.9,带隙为 1.124 eV,300 K 时硅的本征载流子浓度为 $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$,基体掺杂的粒子数浓度为 $1.242 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,载流子寿命为 25 μs ,正、反面的复合速率分别为 1000 cm/s 和 200 cm/s ,扩散薄层电阻为 85.03 Ω/sq ,p-n 结的深度为 0.38 μm ,掺

杂浓度为 $7.12 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。采用标准测试条件 (STC):大气质量 AM1.5(典型晴天时太阳光照射到一般地面的情况),入射光功率为 0.1 W/cm^2 ,温度为 25 $^\circ\text{C}$ 。

在仿真过程中,输入不同样品的光谱反射率和微结构几何参数,得出相应的开路电压 V_{oc} 、短路电流 I_{sc} 和基极最大输出功率 P_m ,并根据模拟得到的参数计算电池的填充因子 F_F 和光-电转换效率 η 。

如图 9 所示,激光制绒硅片的电学性能明显优于化学腐蚀制绒硅片的。激光制绒硅片的电学性能

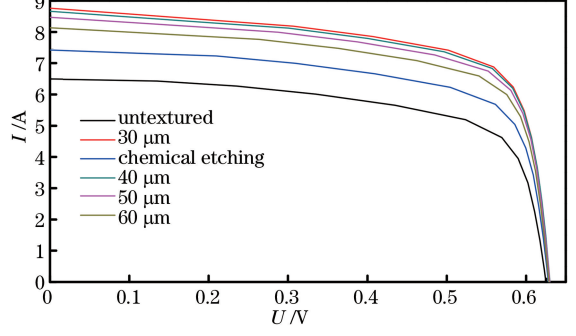


图 9 未制绒、激光制绒及化学腐蚀制绒硅片样品的 $I-U$ 关系
Fig.9 $I-U$ curves of untextured, laser textured, and chemically etched silicon samples

随着孔距的增加而逐渐降低。其中,激光制绒孔距 $d=30\ \mu\text{m}$ 下硅片电学性能最好;与化学腐蚀制绒硅片相比,激光制绒硅片的短路电流和开路电压都明显提高。

由表 1 可知,激光制绒硅片的电池效率随着孔距的增加而不断降低,但与化学腐蚀制绒相比,其仍具有明显优势。与未制绒硅片相比,孔距为 $30\ \mu\text{m}$ 的硅片的短路电流增大了 2.094 A,开路电压增大

了 5.5 mV,电池效率由 13.87% 升高至 18.45%。由于仿真是在理想情况下进行的,因此仿真数据与实际测量值存在一定的误差,但是模拟结果可以定性反映实际情况。而且激光制绒孔距 $d=30\ \mu\text{m}$ 硅片的填充因子高于化学腐蚀制绒硅片的,说明激光制绒得到的电池质量较好。因此,直接利用激光扫描振镜在多晶硅片表面刻蚀阵列微孔形成光陷结构的制绒方法具有明显优势。

表 1 仿真结果

Table 1 Simulation results

Condition	Open circuit voltage /mV	Short circuit current /A	Fill factor /%	Cell efficiency /%
Untextured	624.0	6.511	83.10	13.87
Chemical etching	627.2	7.542	82.57	16.05
$d=30\ \mu\text{m}$	629.5	8.605	82.89	18.45
$d=40\ \mu\text{m}$	629.9	8.527	82.99	18.32
$d=50\ \mu\text{m}$	629.4	8.367	83.21	18.01
$d=60\ \mu\text{m}$	628.5	8.075	83.41	17.39

4 结 论

利用皮秒激光在多晶硅表面制备阵列孔绒面,最终制备出最低反射率为 5.17% 的阵列孔结构绒面,并将电池光-电转化效率提升至 18.45%。研究发现:阵列孔表面结构均匀能够有效减小硅片表面反射率,提高电池效率。激光光斑直径直接影响阵列孔密度,采用更小光斑直径的激光,将会得到更好的减反效果。同时,与掩模光刻、激光连续扫描使硅电离的加工方法相比,直接利用扫描振镜刻蚀硅片形成阵列孔结构的工艺方法能够有效提高效率,为激光制绒提供了一种新的方法。

参 考 文 献

[1] Xing P F, Zhao P Y, Guo J, *et al.* Recovery of cutting slurry waste of solar-grade silicon[J]. Materials Review, 2011, 25(1): 75-79.
邢鹏飞, 赵培余, 郭菁, 等. 太阳能级多晶硅切割废料浆的综合回收[J]. 材料导报, 2011, 25(1): 75-79.

[2] Liu K M, Han S, Wang Y L, *et al.* Principle and application of light conversion material[J]. Practical Electronics, 2013(22): 83.
刘克铭, 韩帅, 王钰蕾, 等. 浅谈光转换材料的原理和应用[J]. 电子制作, 2013(22): 83.

[3] Wang Q Z, Jing X L, Ma Y H, *et al.* Refractive indexes distribution of anti-reflection coatings for high efficiency silicon solar cells[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(6): 669-672.
王全志, 井西利, 马懿恒, 等. 高效硅太阳能电池减

反射膜系折射率分布[J]. 激光与红外, 2011, 41(6): 669-672.

[4] Gao Y F, Zhao Q H, Xu X F, *et al.* Research on reflection properties of silicon based solar cells with parabolic cone array structure[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(8): 0808004.
高永锋, 赵琼华, 许孝芳, 等. 光伏电池表面抛物锥阵列微结构的反射特性研究[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0808004.

[5] Zhou Z Z, Wu Z, Feng K P. A review on surface texturing technology for multicrystalline silicon[J]. Materials Review, 2015, 29(9): 55-61.
周兆忠, 吴喆, 冯凯萍. 多晶硅表面制绒技术研究现状[J]. 材料导报, 2015, 29(9): 55-61.

[6] Zhang Z, Xu Z M, Sun T Y, *et al.* The fabrication of the antireflective periodic nano-array structure on Si surface using nanoimprint lithography and the study on its properties[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(16): 168102.
张铮, 徐智谋, 孙堂友, 等. 硅表面抗反射纳米周期阵列结构的纳米压印制备与性能研究[J]. 物理学报, 2013, 62(16): 168102.

[7] Song Y M, Choi H J, Yu J S, *et al.* Design of highly transparent glasses with broadband antireflective subwavelength structures[J]. Optics Express, 2010, 18(12): 13063-13071.

[8] Shen Z N, Liu B W, Xia Y, *et al.* Research on black poly-silicon material and application on solar cells[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2013, 34(5): 729-733.
沈泽南, 刘邦武, 夏洋, 等. 多晶黑硅材料及其太阳能电池应用研究[J]. 太阳能学报, 2013, 34(5): 729-733.

- [9] Lu Y, Zhang H, Li Z Y, *et al.* Research status and development of the methods for texturization of multicrystalline silicon solar cells[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2015(8): 6-10.
陆燕, 张华, 李志扬, 等. 多晶硅太阳能电池绒面制备方法的研究现状与发展[J]. *现代制造工程*, 2015(8): 6-10.
- [10] Ponce L, Castellanos A, Arronte M, *et al.* Silicon surface texturing by pulsed laser[J]. *Revista de Metalurgia*, 1998, 34(2): 144-147.
- [11] Xu D F, Yin S Q, Xiao Z G, *et al.* Silicon wafer microstructure fabrication using nanosecond laser pulses[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 476/477/478: 1798-1801.
- [12] Yao Z Q, Hu Y X. Direct fabrication of sub-micron sized mirco-structure by interfering nanosecond laser beams[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(6): 122-128.
姚振强, 胡永祥. 基于短脉冲激光束干涉的硅表面亚微米结构加工工艺[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(6): 122-128.
- [13] Lü X Z, Ji L F, Wu Y, *et al.* Fabrication of high performance anti-reflection silicon surface by picosecond laser scanning irradiation with chemical corrosion [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(4): 0403006.
吕晓占, 季凌飞, 吴燕, 等. 皮秒激光化学复合法制备高效减反射晶硅表面微结构研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0403006.
- [14] Pan F, Zhang W, Zhang D. Simulation of anti-reflection and light-trapping property of bio-inspired silicon structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0516002.
潘峰, 张旺, 张获. 仿生纳米硅结构减反射及陷光性能模拟研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0516002.
- [15] Parvin P, Reyhani A, Mehrabi M, *et al.* Efficiency enhancement using ArF laser induced micro/nanostructures on the polymeric layer of solar cell[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 88: 242-249.
- [16] Wang Y M, Cheng Z X, Li Q H, *et al.* A new process for surface texture of multicrystalline silicon[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1216002.
王应民, 程泽秀, 李清华, 等. 多晶硅表面织构化新工艺的研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(12): 1216002.
- [17] Feng A X, Zhuang X H, Xue W, *et al.* Damage characteristics of polysilicon under wavelengths of 1064 nm, 532 nm and 355 nm laser irradiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 461-465.
冯爱新, 庄绪华, 薛伟, 等. 1064 nm、532 nm、355 nm波长脉冲激光辐照多晶硅损伤特性研究[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(2): 461-465.
- [18] Wu C S, Feng G Y, Liu C F. Research on drilling hole of single crystal by pulse laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 140-145.
吴常顺, 冯国英, 刘彩飞. 脉冲激光对单晶硅打孔的研究[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(2): 140-145.
- [19] Qian Y, Feng S M. 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.
- [20] Chen H Y. The fabrication and optimization of femtosecond-laser etched black silicon solar cells[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science & Technology, 2014.
陈宏彦. 基于飞秒激光刻蚀的黑硅太阳能电池的制备及其性能优化[D]. 上海: 上海理工大学, 2014.