

引用格式: LI Tiantian, SUN Yaoning, ZHANG Li, et al. Laser Fabrication and Performance of Periodic Microstructure on Polycrystalline Silicon Surface[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(4):0414002

李甜甜, 孙耀宁, 张丽, 等. 多晶硅表面周期性微结构的激光制备与性能研究[J]. 光子学报, 2021, 50(4):0414002

多晶硅表面周期性微结构的激光制备与性能研究

李甜甜¹, 孙耀宁¹, 张丽¹, 王国建¹, 贾天代², 冯爱新²

(1 新疆大学 机械工程学院, 乌鲁木齐 830047)

(2 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入射光的反射率,提高太阳能电池的光电效率,利用紫外纳秒激光器在多晶硅表面制备不同深度、不同间距的微凹坑点阵绒面,研究织构形貌对反射率及光电转换效率的影响。通过激光频率的改变实现微凹坑深度的变化,通过微凹坑排布方式的改变实现微凹坑间距的变化;使用光纤光谱仪测量多晶硅表面反射率并通过激光共聚焦显微镜观察微凹坑形貌;在PC1D软件中建立多晶硅入射光反射模型并模拟不同点阵间距下的多晶硅短路电流和开路电压,计算光电转换效率和填充因子。研究表明,不同频率(300 kHz、200 kHz、150 kHz、50 kHz)和点阵排布方式(300×300、310×310、350×350、400×400)对多晶硅表面的反射率和光电转换效率影响显著,随着频率增大,多晶硅试样反射率先减小后增加最后保持稳定;随着点阵排布密集程度增加,多晶硅试样光电转换效率逐渐提高。实验结果显示当激光频率为150 kHz,点阵分布为400×400时,多晶硅表面微凹坑成型较好,表面平均反射率为3.32%,多晶硅电池的效率为18.80%,相较于未制绒多晶硅电池提高25.9%。

关键词:表面织构;脉冲激光;反射率;多晶硅;光伏特效应

中图分类号: TN249

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215004.0414002

Laser Fabrication and Performance of Periodic Microstructure on Polycrystalline Silicon Surface

LI Tiantian¹, SUN Yaoning¹, ZHANG Li¹, WANG Guojian¹, JIA Tiandai², FENG Aixin²

(1 School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

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

Abstract: In order to reduce the reflectivity of incident light on the surface of polysilicon and improve the photoelectric conversion efficiency of solar cells, a UV nanosecond laser is adopted to prepare micro-dimples with different depths and pore pitch on the surface of polysilicon, and the effect of texture topography on reflectivity and photoelectric conversion efficiency is studied. The depth of the micro-dimples are controlled by the laser frequency while the pore pitch of the micro-dimples are changed by the arrangement of the micro-dimples. The reflectivity of polysilicon samples and surface morphology of micro-dimples are observed by optical fiber spectrometer and laser scanning confocal microscope, respectively; The reflection model of incident light is established using the PC1D software and the short-circuit current and open-circuit voltage of polysilicon with different pore pitch are simulated, the photoelectric conversion efficiency and fill factor are calculated subsequently. Research shows that different frequencies (300 kHz, 200 kHz, 150 kHz, 50 kHz) and micro-dimples arrangements (300×300, 310×310, 350×350, 400×

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金(No. 2020D01C030)

第一作者: 李甜甜(1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为激光表面改性。Email: galaxy056268@163.com

导师(通讯作者): 孙耀宁(1977—), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为激光表面改性及合金材料的研究。Email: xj_syn@126.com

收稿日期: 2020-09-08; 录用日期: 2020-11-21

<http://www.photon.ac.cn>

400) have significant effects on the reflectivity and photoelectric conversion efficiency of polysilicon. As the frequency increases, the reflectivity of the polysilicon sample decreases first, then increases and finally remains stable; as the density of the lattice arrangement increases, the photoelectric conversion efficiency of the polysilicon sample gradually increases. The experiment result shows that when the laser frequency is 150 kHz and the micro-dimples distribution is 400×400 , the topography of micro-dimples on polysilicon surface are well formed. And the average reflectivity is 3.32%, the photoelectric conversion efficiency of the polysilicon cell is 18.80%, which is 25.9% improvement compared with the untextured polysilicon cell.

Key words: Surface texture; Pulsed laser; Reflectivity; Polysilicon; Photovoltaic effect

OCIS Codes: 140.3390; 160.6030; 140.3298; 220.3740; 220.4241

0 引言

多晶硅太阳能电池是近几十年来光伏领域的热门话题。但是表面反射率产生的光学损耗大大降低了电子、空穴的产生速率,并直接导致太阳能电池效率下降,制约多晶硅电池的进一步发展^[1]。减少多晶硅表面光反射率、提高太阳能电池效率成为发展光伏产业首要解决的问题。

目前通过镀膜技术减少光的反射在工业上已经广泛应用,但是该方法制备的抗反膜只可以减少单一波长的光反射,且抗反膜与基材结合强度低易脱落,严重影响电池性能^[2]。近年来表面织构制备技术发展迅速,将制造业引向微细化微纳加工、多尺度复合和实现多功能需求的新阶段^[3]。将仿生表面微织构概念引入光学学科研究,借鉴飞蛾眼角膜半球状特殊阵列,使用化学腐蚀、激光刻蚀等方法在多晶硅表面加工出陷光结构,使多晶硅表面形成周期性的微结构,如金字塔形、圆锥形、微凹、凹槽坑等,以此增加光程,产生更多的电子-空穴对,提高多晶硅表面吸光率^[4-5]。然而,化学腐蚀技术在加工过程中不仅产生废液、废气污染环境,且其制备的陷光结构形貌不易控制、减反效果不佳,限制了进一步应用^[6-7]。

激光刻蚀技术因非接触、环境友好,且在多晶硅表面制备的微织构周期性强、形貌规则可控、反射率低等优点成为多晶硅光伏领域的关键技术。ZOLPER J C等^[8]用激光在多晶硅表面率先制备出减反微结构,通过控制激光加工参数大大提高了短路电流,将电池效率提高至16.7%。HALBWX M等^[9]通过激光烧蚀在N型参杂硅表面加工四种不同形貌的表面结构,使其光生电流密度提高30%。贾天代等^[10]采用皮秒激光在多晶硅片表面制备凹坑阵列,研究激光辐照工艺参数对凹坑织构深度的影响,结果表明在30 μm孔距下,表面反射率为6.95%,效率提高至18.45%。钱勇等^[11]基于陷光效应基本理论和傅里叶变换研究了微织构形貌、织构分布密度与反射率之间的关系,并通过化学腐蚀实验验证了理论分析。虽然国内外对于多晶硅表面微结构的加工工艺做了大量研究,但是大多集中在研究织构形貌以及工艺参数方面,对于织构的排布方式与织构深度的协同作用研究较少。

为了研究微凹坑点阵的深度、间距对多晶硅太阳能电池的反射率以及效率的影响,本文使用紫外纳秒激光器在P型多晶硅表面制备微凹坑阵列的陷光结构。首先,研究不同频率下微凹坑结构的深度变化,并通过测量反射率确定优选频率;而后在确定的频率下,改变微凹坑点阵排布方式实现微凹坑的间距变化,最后利用PC1D软件结合制备的微凹坑形貌相关数据,仿真出多晶硅电池的开路电压、短路电流两个重要的电学特性参数,并计算出填充因子、光电转换效率。

1 实验及检测方法

1.1 实验设备及加工原理

实验使用的紫外纳秒激光系统购自美国Aptowave Awave公司,激光器的输出波长为710 nm,平均功率为14 W,脉冲宽度为20 ns,最大重复频率为300 kHz。激光束经过倍频输出光路系统转为355 nm的二倍频谐波并传递到扫描振镜,经过聚焦后辐照到置于加工平台的多晶硅片试样(聚焦光斑直径为30 μm)。采用计算机控制高精度的二轴定位平台,沿X-Y轴安装和移动样品,实验装置及激光刻蚀多晶硅样品如图1所示。

1.2 实验材料及方法

实验选用P型(100)多晶硅片,该多晶硅片的厚度是 200 ± 20 μm,尺寸是156 mm × 156 mm,电阻率为

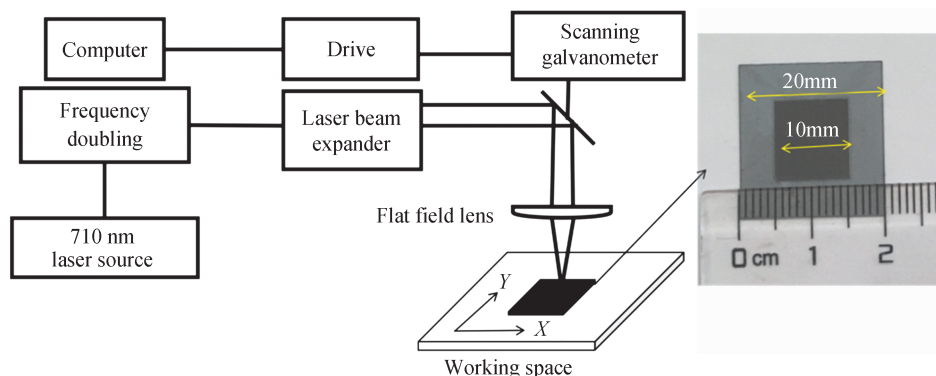


图1 实验装置及激光刻蚀多晶硅样品

Fig.1 Schematic of experiment equipment and laser-textured polysilicon sample

1~3 $\Omega \cdot \text{cm}$, 少子寿命不小于 2 μs 。多晶硅试样的制作过程为:采用激光切割技术制备 20 mm \times 20 mm 的多晶硅小样片(如图 1 所示),并用超声波丙酮溶液、乙醇溶液清洗 15 min 去除损伤层^[12],最后用氮气吹干多晶硅试样备用。

多晶硅表面反射率和光电转换效率与微结构的深度密切相关^[13]。本实验旨在研究在不同的激光工艺参数作用下微凹坑几何参数(深度、间距)对多晶硅表面入射光反射率及光电转换效率的影响。采用定量分析法,首先通过改变激光重复频率(300 kHz、200 kHz、150 kHz、50 kHz)制备出不同深度的微凹坑阵列,使用 10% 的 HF 溶液擦拭多晶硅试样以去除因激光刻蚀带来的微凹坑内部及熔融物堆积^[14]。采用 OLS4100 型激光共聚焦扫描显微镜(Laser Scanning Confocal Microscope, LSCM),观测刻蚀前后的多晶硅及微凹坑表面形貌,并通过 USB6500-Pro 型光纤光谱仪结合积分球测得相关反射率;随后选择反射率最小的激光频率,继续深入研究微凹坑排布方式(400 \times 400、350 \times 350、310 \times 310、300 \times 300)对反射率和效率的影响。根据反着率及微凹坑形貌数据在 PC1D 软件中建立太阳能电池模型,模拟多晶硅太阳能电池板的开路电压、短路电流和输出功率,并且计算其效率和填充因子。

2 试验结果与分析

2.1 显微形貌分析

脉冲激光的激光光子能量计算公式为^[15]

$$E = h\nu = hc/\lambda$$

式中, h 表示普朗克常数, $h=6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ 或 $4.15 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$, ν 表示光的频率, c 表示光速, $c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$, λ 表示入射光波长。实验采用的紫外纳秒激光器波长 $\lambda=355 \text{ nm}$,即激光器产生的光子能量 $E=3.5 \text{ eV}$,大于在 300 K 下硅的禁带宽度 $E_g=1.12 \text{ eV}$,具备产生电子-空穴对的条件。激光作用于多晶硅表面去除材料形成微结构的过程遵循“双温模型”^[16-17],即会发生“光子-电子”相互作用的库伦爆炸^[18]、“电子-声子”相互作用的相爆炸^[19]。图 2 为不同频率下多晶硅试样表面显微形貌和相应的截面曲线。由图可知,在激光平均功率保持 14 W 不变的情况下,微凹坑的深度随频率的改变发生变化。多晶硅表面微凹坑截面图均呈现出“V”字型的倒三角形形态,主要是因为实验中采用的激光器输出的光源成高斯分布,其最显著的特点就是能量分布是中心高,两边低。即激光光斑中心处于高能量区,其扫过的区域材料去除量更多,光斑边缘区域能量相对较低,去除的材料相应减少。而微凹坑的直径在点阵个数变化过程中改变不大,保持相对稳定在 30 μm ,约等于激光光斑直径。图 3 为不同频率下结构的平均深度,当频率从 50 kHz 增加到 300 kHz 时,平均深度先增再减最后趋于稳定,在 150 kHz 频率下平均深度最大,达到 48.09 μm 。深度的变化与单位时间内激光在多晶硅表面累积的能量有关。当激光脉冲频率为 50 kHz 时,凹坑平均深度最小,主要是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。随着频率提高到 150 kHz,单位时间内累积的脉冲能量激增,导致烧蚀的硅材料变多,微凹坑平均深度增大;但是,当频率继续提高时(200 kHz、300 kHz),凹坑平均深度不升反降,主要是因为激光能量迅速累积烧蚀硅材料的同时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 150 kHz 时平均深度下降并趋于稳定状态。

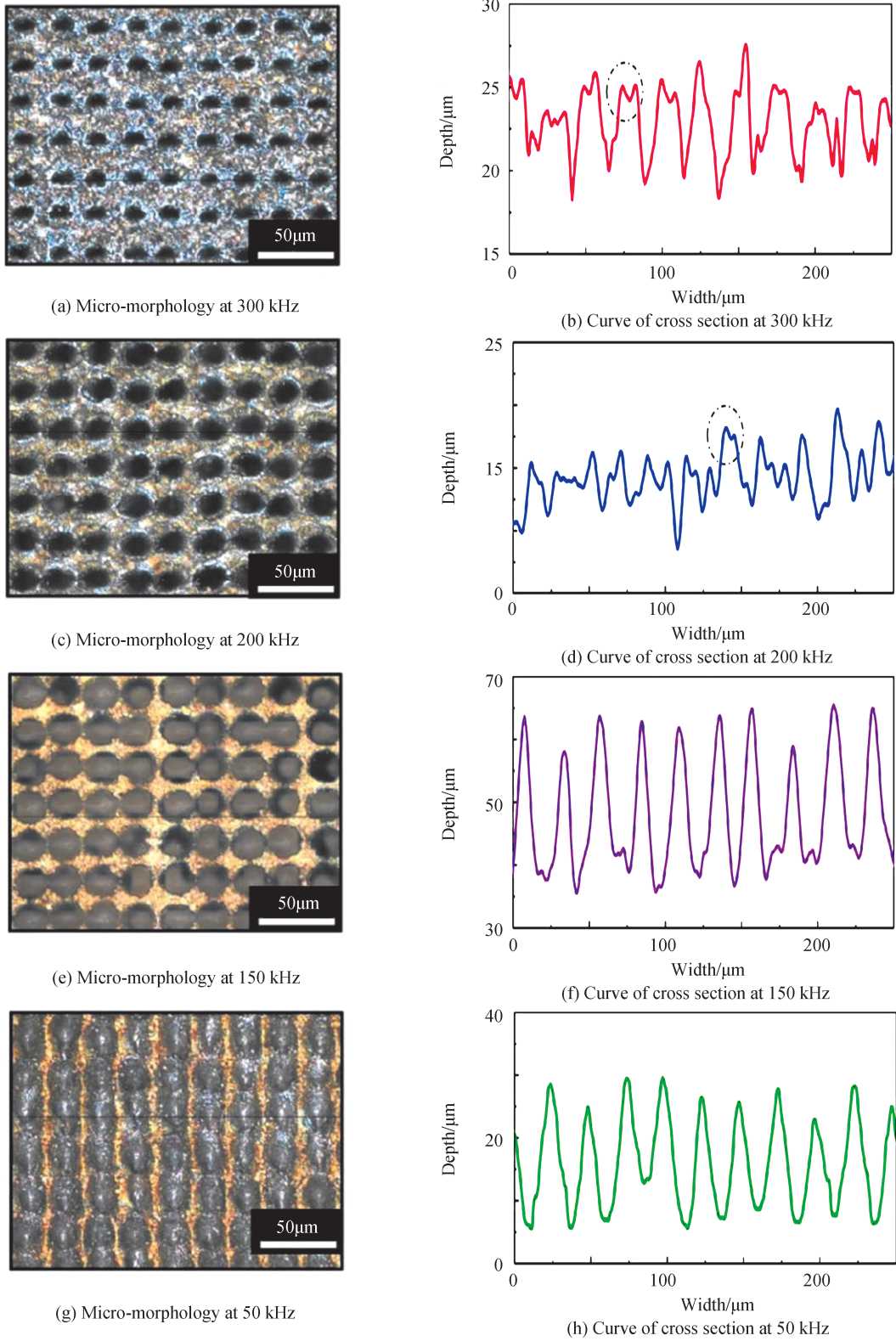


图2 不同频率下激光刻蚀多晶硅样品显微形貌和对应的截面曲线

Fig.2 Micro-morphologies and corresponding curves of cross section of laser-textured polysilicon sample under different frequency

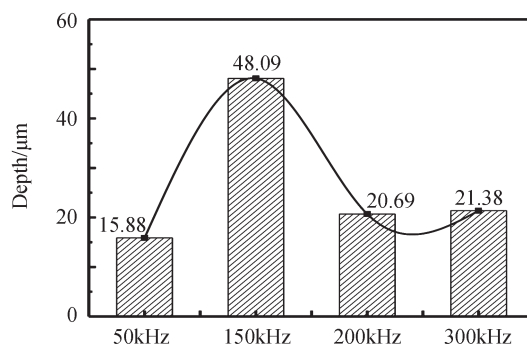


图3 不同频率下多晶硅试样的平均深度

Fig.3 Average depth of polysilicon samples at different frequency

2.2 光谱反射率分析与测试

表面光反射导致的光学损失是阻碍光伏产业发展主要因素^[20]。图4为未织构和不同织构技术下多晶硅反射率的对比。由图4可知,未经处理的表面反射率远远大于化学腐蚀和激光烧蚀后的表面。根据光的反射和折射规律,当光从折射率为 n_1 介质入射到折射率为 n_2 介质,一次反射率 R 可近似表示为

$$R = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \times 100\% \quad (2)$$

其吸光率 A 可表示为

$$A = 1 - R \quad (3)$$

经过 n 次反射、折射后的吸光率可表示为^[4]

$$A_n = (1 - R^n) \times 100\% \quad (4)$$

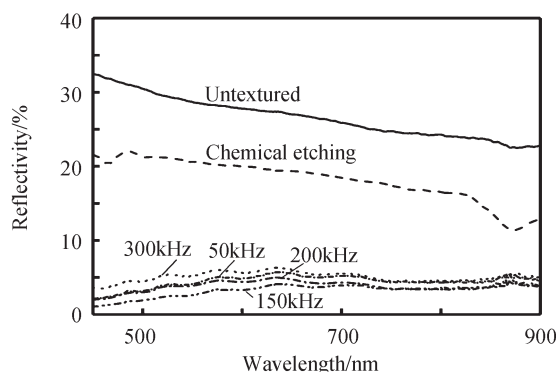


图4 未织构和不同制绒技术多晶硅试样反射率

Fig.4 Reflectivity of untextured and textured polysilicon samples with different technique

当一束光从空气($n_1=1.0$)入射到绒面多晶硅($n_2=3.5$)表面时,根据式(2)~(4)计算可得:入射光经过一次反射、二次反射、三次反射其吸光率分别为69%、90.5%和97%。显然,织构化表面增加了入射光的光程,仅仅三次反射就将吸光率提高40%。相对于平面结构的一次反射与吸收,经过化学腐蚀和激光刻蚀的多晶硅表面形成具有一定深度、宽度的陷光结构,入射光发生多次反射、折射和散射,大大提高光程,确保太阳能电池板吸收更多的光能^[21-22]。

通过图4数据计算可得到450~900 nm波长范围内,激光刻蚀(300 kHz、200 kHz、150 kHz、50 kHz)、化学腐蚀及未织构多晶硅样品的平均反射率,如图5所示。当波长为450~900 nm时,未织构多晶硅试样的平均反射率为26.45%,而经化学腐蚀处理后的多晶硅表面平均反射率为18.06%,相比于未织构表面反射率下降了31%。虽然经化学腐蚀后的多晶硅表面反射率有所下降;但其反射率随着波长的增加而减小,且反射率不稳定,波动较大。激光刻蚀形成的多晶硅表面减反效果显著优于化学腐蚀与未织构表面,不同频率下的反射率走势平稳,总体波动不大。图6为激光刻蚀、化学腐蚀后的表面形貌,由图可知与激光刻蚀形成的

规则、成型效果好的微凹坑相比,化学腐蚀制备的微结构形貌不可控,质量差,织构区域与未织构区域界线不清晰。这是造成化学腐蚀表面反射率不稳定的主要因素。而化学腐蚀后的多晶硅表面反射率高于激光刻蚀表面主要是因为化学腐蚀过后在多晶硅表面产生钝化膜与表面结合不紧密,易产生缺陷形成复合中心,影响载流子寿命^[10]。

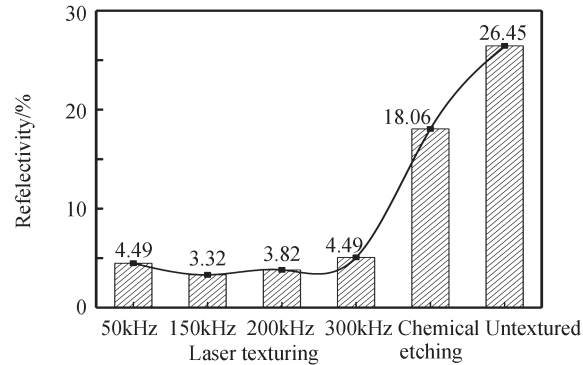


图5 激光刻蚀、化学腐蚀及未织构多晶硅样品的平均反射率

Fig.5 Average reflectivity of laser-textured, chemical etching and untextured polysilicon samples

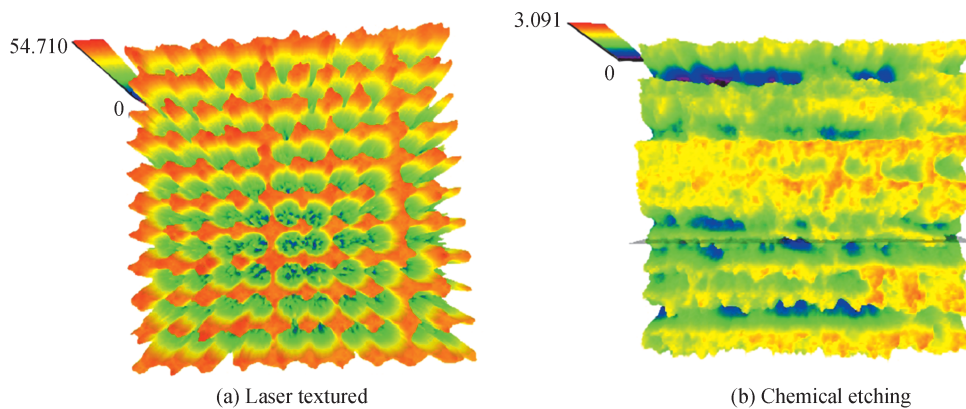


图6 激光刻蚀与化学腐蚀样品的三维形貌

Fig.6 3D topography of laser textured and chemical etching

图5所示,激光频率为150 kHz时平均反射率最低,为3.32%,在微凹坑的宽度保持在30 μm 不变的情况下,结合上述对微凹坑平均深度的分析可知,在频率为150 kHz时微凹坑的深度最大,其深宽比达到最大。研究表明凹坑织构的深宽比对反射率与太阳能电池的效率具有重要影响。微凹坑点阵的深宽比越大,入射光越能均匀散射,而且衍射效果也会更好,进而吸光率提高^[20]。而当频率达到200 kHz和300 kHz时多晶硅表面平均反射率不降反升,除了微凹坑深度下降的原因,还可能与这两种频率下微凹坑周围出现明显的未刻蚀区域有关(图2(b)、(d)虚线圆圈标记所示),未刻蚀区域相较于刻蚀产生的微凹坑更加光滑,减反作用不明显。因此,在本次实验中频率为150 kHz时,制备的微凹坑表面反射率最低。

2.3 电学特性分析

当太阳光或其他光照入射到多晶硅表面时,硅材料能够吸收一部分的光子,当光能大于P-N结的禁带宽度时电子从价带跃迁到导带,从而在P-N结内部产生“电子-空穴对”,在内建电场的作用下,电子向N区移动致使N区带负电;相反,空穴向P区移动使P区带正电。经过一段时间的积累P区和N区聚集的空穴与电子增加,此时产生电势差,即“光生电动势”,图7为光生伏特效应原理。

2.1、2.2节分析了不同频率下多晶硅的显微形貌及反射率,确定了在150 kHz,织构平均深度为48.09 μm 时平均反射率最低为3.32%。现将激光频率确定为150 kHz,改变微凹坑点阵的排布方式(400 \times 400、350 \times 350、310 \times 310、300 \times 300),研究不同微凹坑间距下多晶硅太阳能电池的电化学特性。通过太阳能电池模拟软件PC1D,对激光辐照微凹坑点阵陷光结构的多晶硅试样进行仿真模拟及电学特性分析。PC1D相关仿真

参数和入射光参数分别见表1~2。

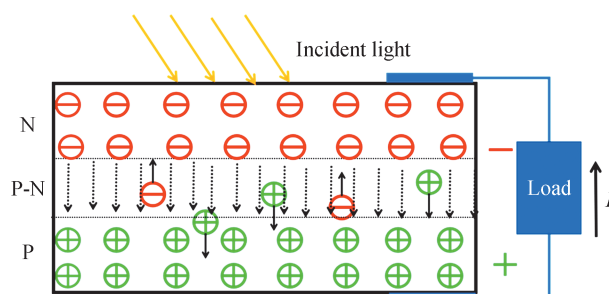


图7 光生伏特效应原理

Fig.7 Structure diagram of photovoltaic effect

表1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameters	Values
Device area/cm ²	243.36
Volume resistivity/(Ω·cm)	2.00
Thickness/μm	200.00
Band gap/eV	1.12
Dielectric constant	11.90
Intrinsic concentration at 300 K/cm ²	1×10 ¹⁰
Refractive index of Si	3.58
P-type background doping/cm ²	1.24×10 ¹⁶
Front diffusion/(cm ⁻³ ·peak)	N-type, 2.94×10 ¹⁶
Bulk recombination /μs	25
Front-surface recombination/(cm·s ⁻¹)	S model, S _n =S _p =1 000
Rear-surface recombination/(cm·s ⁻¹)	S model, S _n =S _p =200

表2 入射光标准测试参数

Table2 Standard test conditions parameter of incident light

Parameter	Values
Temperature/°C	25
Incident light power/(W·cm ⁻²)	0.1
Air-mass	AM1.5

构建PC1D仿真模型主要参数除了表1所列举的,还有织形貌的几何参数(深度、角度和反射率)。通过仿真计算可以获得开路电压 V_{oc} 、短路电流 I_{sc} 和最大输出功率 P_m 三个重要参数。太阳能电池的填充因子 F_F 和效率 η 的计算公式分别为

$$F_F = \frac{P_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{P_m}{I_{sun} \times S} \quad (6)$$

式中, P_{in} 表示入射光功率, I_{sun} 表示入射光强度, S 表示电池面积。

图8是根据仿真计算得到的电流电压参数绘制的未制绒、激光制绒多晶硅样片的 $I-U$ 曲线。显然,激光刻蚀制备的多晶硅样片短路电流远超未织构表面,说明与未织构试样相比,激光织构化多晶硅样片具有更好的电学性能。随着微凹坑点阵个数增多(间距减少),织构化表面的电学性能提高。其中,采用 400×400 的排布方式时,多晶硅样片电学性能最优。

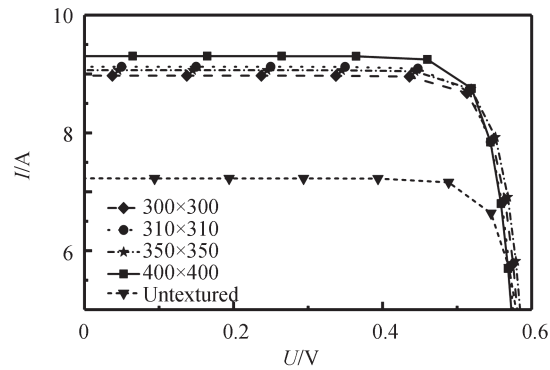
图8 未织构与激光刻蚀样品的 $I-U$ 关系Fig.8 $I-U$ curves of untexture and laser textured polysilicon samples

表3为PC1D软件转换效率仿真结果,可以看出,经激光刻蚀的多晶硅样片其整体电学性能均优于未处理过的多晶硅表面,且当频率一定时,多晶硅绒面的效率随着点阵个数的增加而提高。当点阵排布为 400×400 时具有最大的短路电流与转换效率,与未制绒表面相比, 400×400 的绒面其短路电流增加了2.055 A,提升了28%;多晶硅太阳能电池光电转换效率为18.80%,比未织构提升了25.9%。PC1D仿真过程中选用的各个参数(如入射光参数)是理想情况下的参数,通过模拟结果可以定性地反映多晶硅太阳能电池的实际电学性能,为目前多晶硅电池光电转换效率测试成本高、结果不稳定等难题提供新的思路。

表3 仿真结果

Table3 Simulation results

Type	Simulation results			Calculation results	
	Short-circuit current/A	Max base power/W	Open-circuit voltage/mV	Cell efficiency/%	Fill factor%
Untextured	7.23	3.63	610.5	14.93	82.3
300×300	9.042	4.498	600.1	18.48	82.8
310×310	9.117	4.514	598.1	18.55	82.7
350×350	9.057	4.567	608.1	18.77	82.9
400×400	9.285	4.576	596.1	18.80	82.6

4 结论

本文利用紫外纳秒激光器在多晶硅表面制备微凹坑结构,频率为150 kHz,微凹坑点阵排布方式为 400×400 时多晶硅表面平均反射率最低为3.32%,光电转换效率提升至18.80%,相比未织构表面提高了25.9%。激光加工与化学腐蚀技术相比优势明显,工艺简单,加工效率较高,且其制备的绒面形貌更加规则可控,可为光伏发电领域提供新的思路。

参考文献

- [1] SONG Y M, CHOI H J, YU J S, et al. Design of highly transparent glasses with broadband anti-reflective subwavelength structures[J]. Optics Express, 2010, 18(2): 13063-13071.
- [2] DUTTAGUPTA S, MA F, HOEX B, et al. Optimised antireflection coatings using silicon nitride on textured silicon surfaces based on measurements and multidimensional modelling[J]. Energy Procedia, 2012, 30(15): 78-83.
- [3] ZAHNG Fayun, YE Jianxiang. Texturing of multicrystalline silicon with 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.
- [4] XU Zhilong, XU Xipeng, HUANG Hui, et al. Progress in surface optical functional texture and preparation of crystalline silicon cells[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(9): 166-175.
许志龙, 徐西鹏, 黄辉, 等. 晶体硅电池表面光功能织构及其制备的研究进展[J]. 机械工程学报, 2019, 55(9): 166-175.
- [5] HE Miao, CHEN Jianlin, ZHOU Ting, et al. Applying light trapping structure to solar cells: an overview[J]. Materials

- Reports, 2018, 32(5): 696-707.
- 何苗, 陈建林, 周厅, 等. 陷光结构应用于太阳能电池的研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(5): 696-707.
- [6] ZHANG Zheng, XU Zhimou, SUN Tangyou, 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): 424-430.
- 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): 424-430.
- [7] SALMAN K A. Effect of surface texturing process on the performance of crystalline silicon solar cell[J]. Solar Energy, 2017, 147(38):228-231.
- [8] ZOLPER J C, NARAYARANA S, WENHAM S R, et al. 16.7% efficient, laser textured, buried contact polycrystalline silicon solar cell[J]. Applied Physics Letters, 1989, 55(27): 2363-2365.
- [9] HALBWAX M, SARNET T, DELAPORTE P, et al. Micro and nano-structuration of silicon by femtosecond laser: application to silicon photovoltaic cells fabrication[J]. Thin Solid Films, 2008, 516(20): 6791-6795.
- [10] JIA Tiandai, FENG Aixin, CHEN Huan, et al. Fabrication of array pores on polysilicon surface by picosecond laser[J]. Chinese Journal of Laser, 2018, 45(10): 75-82.
- 贾天代, 冯爱新, 陈欢, 等. 多晶硅表面皮秒激光阵列孔绒面制备[J]. 中国激光, 2018, 45(10): 75-82.
- [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 B, GAO T, LEU P W. Broadband light absorption enhancement in ultra thin film crystalline silicon solar cells with high index of refraction nanosphere arrays[J]. Nano Energy, 2016, 19: 471-475.
- [13] WANG Yingming, CHEN Zexiu, LI Qinghua, et al. A new process for surface texture of multicrystalline silicon[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 184-189.
- 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): 184-189.
- [14] 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.
- [15] CHEN Meng, XINAG Xia, JIANG Yong, et al. Enhancement of laser induced damage threshold of fused silica by acid etching combined with UV laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(6): 1383-1387.
- 陈猛, 向霞, 蒋勇, 等. 酸蚀与紫外激光预处理结合提高熔石英损伤阈值[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(6): 1383-1387.
- [16] ANISIMOV, KAPELIOVICH, PERELMAN. Eletron emission from metal surfaces exposed to ultrashort laser pulses [J]. Journal of Experimental and Theoretical Physics, 1974, 39(2): 375-377.
- [17] BÜCHLER A, BEINERT A, KLUSKA S. Enabling stress determination on alkaline textured silicon using Raman spectroscopy[J]. Energy Procedia, 2017, 124: 18-23.
- [18] 贾天代. 多晶硅激光制绒工艺及并行加工装备关键技术研发[D]. 温州:温州大学, 2019.
- [19] LI Ning, WU Chuang, KANG Shixian, et al. Influence of texture additives to single crystal silicon texturing[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2018, 39(7): 1865-1869.
- 李宁, 吴闯, 康士贤, 等. 制绒添加剂在单晶硅制绒的作用[J]. 太阳能学报, 2018, 39(7): 1865-1869.
- [20] XU Zhaopeng, HUANGFU Huichao, HE Long, et al. Light-trapping properties of the Si-inclined nanowire arrays[J]. Optics Communications, 2017, 382: 332-336.
- [21] CHEN Le, WANG Qingkang, ZHANG Wentao, et al. Research of optical diffraction properties on surface pit arraylight-trapping structure[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2017, 47(12): 1286-1294.
- 陈乐, 王庆康, 张文涛, 等. 表面凹坑阵列陷光结构的光学衍射特征研究[J]. 中国科学:技术科学, 2017, 47(12): 1286-1294.
- [22] ZHANG Anjun, GUO Zhongyi. Efficient light trapping tapered silicon nanohole arrays[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(5): 2861-2865.