DOI: 10.3901/JME.2019.09.166

晶体硅电池表面光功能织构及其制备的研究进展*

许志龙^{1,2} 徐西鹏¹ 黄 辉¹ 谭援强¹

(1. 华侨大学制造工程研究院 厦门 361021;

2. 集美大学机械与能源工程学院 厦门 361021)

摘要: 表面功能织构研究已逐步发展到多学科交叉整体性设计和制造科学问题, 晶体硅电池是太阳能光伏发电的主流产品, 表面光功能织构可有效提高晶体硅电池光电转换效率。从晶体硅电池表面光功能织构的作用出发, 介绍常规晶体硅电池表面织构的类型及其制备方法, 分析直接在晶体硅电池表面制备光功能织构的瓶颈问题, 论述复合光功能织构晶体硅电池的研究现状、存在的难点和核心问题, 指出高效晶体硅电池表面光功能织构制备的发展趋势。

关键词: 晶体硅电池; 表面织构; 吸光率; 光生伏特效应; 微纳制造

中图分类号: F416

Progress in Surface Optical Functional Texture and Preparation of Crystalline Silicon Cells

XU Zhilong^{1,2} XU Xipeng¹ HUANG Hui¹ TAN Yuanqiang¹

(1. Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021;

2. College of Mechanical and Energy Engineering, Jimei University, Xiamen 361021)

Abstract: Surface functional texture research has gradually developed into multidisciplinary cross-integrated design and manufacturing science issues. Crystalline silicon cells are the mainstream technology of solar photovoltaic power generation, and surface light functional texture can effectively improve the photoelectric conversion efficiency of crystalline silicon cells. Based on the function of optical functional texture of crystalline silicon cells, the types of surface texture of conventional crystalline silicon cells and their preparation methods are introduced. The bottleneck problems of optical functional texture directly on the surface of crystalline silicon cells are analyzed. The research status, difficulties and core problems of composite optical functional textured crystalline silicon cells are discussed. The development trend of optical functional texture preparation of high efficiency crystalline silicon cells is pointed out.

Key words: crystalline silicon cell; surface texture; absorbance; photovoltaic effect; micro-nano manufacturing

0 前言

表面功能织构研究已从局部工艺性加工技术, 逐步发展到多学科交叉整体性设计和制造科学问题^[1]。表面功能织构制造的发展趋向于微细化、多尺度复合或多功能结构耦合加工^[2-4]。根据功能需求设计表面织构的形貌和尺寸, 并研究其相应制备方法是未来微/纳制造的发展趋势^[5-6]。国家自然科学基金委员会已将“表面织构”列为机械表面效应与表面技术研究领域的一个研究方向^[7]。太阳能是有望彻底摆脱化石能源制约的清洁、高效和永不衰竭

的新能源形式。在太阳能利用研究领域, 表面织构对太阳能电池的光电特性影响很大, 光功能表面织构的研究已经成为国内外学者研究热点。

据国际权威机构 Schott Solar Wafer GmbH 预测, 全球太阳能光伏市场将持续 30% 以上速度增长。目前晶体硅电池占全球光伏产业市场份额 87% 左右^[8], 是太阳能电池的主流产品。提高光电转换效率、降低成本是晶体硅电池发展中不变的主题。提高晶体硅电池光电转换效率的两个基本途径: ① 减少光学损失, 实现对太阳光的高效吸收^[9]; ② 减少电学损失, 增强光生伏特效应, 使所吸收的光能高效转化为电能^[10]。如何减少晶体硅电池表面反射损失、提高其光生伏特效应、降低生产成本是晶体硅电池领域的研究热点^[11]。本文围绕表面光功能织构

* 国家自然科学基金资助项目(51676085)。20180928 收到初稿, 20181128 收到修改稿

对晶体硅电池吸光率和光生伏特效应的影 响, 介绍了常规晶体硅电池表面织构的类型、制备方法及其瓶颈问题, 论述复合光功能织构的研究现状、存在的难点和核心问题, 指出高效晶体硅电池表面光功能织构制备的发展趋势。

1 表面光功能织构——保障太阳能电池吸光率的关键

太阳能电池效率低下已经成为世界太阳能光伏产业发展的瓶颈, 对太阳能电池而言, 光学损失是阻碍太阳能电池效率提高的主要障碍之一。光功能织构是在太阳能电池表面制备有规则排布的微结构以提高其吸光率, 它通过反射、折射和散射作用, 将入射光分散到各个微结构进行吸收, 从而增加光在太阳能电池的折射吸收次数和光程, 使其吸光率显著增加。大量研究表明, 在太阳能电池中引进表面光功能织构有利于提高其光电转换效率^[12], 寻求最优化的表面光功能织构已成为光伏领域以及太空探索领域研究的目标之一。晶体硅电池表面光功能织构的形状、尺寸参数以及制备工艺对其吸光率和光生伏特效应影响非常大, 目前晶体硅电池表面光功能织构的性能远远没有达到理想状态。因此, 表面光功能织构的设计及制备已成为高效晶体硅电池研究的热点和难点。

根据光在不同介质间的反射和折射规律, 当光从折射率为 n_1 介质入射到折射率为 n_2 介质, 对消光系数 ε 很小的透明材料和半导体材料, 其反射率 R 可近似为

$$R = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \times 100\% \quad (1)$$

光在晶体硅表面微结构经过 n 次折射和反射后, 其吸光率 A_n 为

$$A_n = (1 - R^n) \times 100\% \quad (2)$$

光从空气入射到晶体硅时, 由空气折射率 $n_1=1.0$, 硅折射率 $n_2=3.5$, 由式(1)、(2)可得: 只经过一次折射吸收其吸光率仅为 $A_1=69\%$, 经二次折射吸收其吸光率 $A_2=90.5\%$, 经三次折射吸收其吸光率达到 $A_3=97\%$ 。早期晶体硅电池为光面结构, 光反射损失严重^[13], 如图 1a 所示。为了实现晶体硅电池对太阳光的高效吸收, 在晶体硅表面制作微小的吸光织构(即绒面), 则入射到绒面上的光部分折射进入晶体硅内, 部分反射光被绒面二次折射吸收, 绒面晶体硅电池吸光率大约是光面晶体硅电池的

1.35 倍^[14], 如图 1b 所示。

图1 晶体硅表面微结构

各国学者围绕晶体硅电池表面光功能织构投入大量研究, ESCARRE 等^[15]研究发现单晶硅表面织构能够有效降低光的反射损失, 采用不同形状和尺度的表面织构, 其吸光率可以提高 22%~27%。目前晶体硅电池广泛采用的表面光功能织构有倒“金字塔”、V 型槽和正向“金字塔”等。对晶体硅电池表面倒“金字塔”光功能织构研究的典型代表是新南威尔士大学 GREEN 等^[16]研制的 PERL 电池, 入射到“金字塔”内壁的光至少经过二次折射吸收后才会逃逸, 倒“金字塔”织构对于电池背部反射的光也能有效抑制其逃逸, 可获得 97.1%的吸光率。STAPF 等^[17]对晶体硅电池表面随机倒“金字塔”织构的光吸收特性进行理论分析, 并制备随机倒“金字塔”表面织构的晶体硅电池, 获得了良好的吸光特性。V 型槽表面光功能织构的典型代表有: FATH 等^[18]在晶体硅表面制作 V 型槽织构, 并研究了 V 型槽底曲率半径变化对晶体硅电池吸光率的影响; Cho 等^[19]对 V 型槽表面织构进行优化, 研究发现谷底夹角为 112° 的 V 型槽对于抑制光线逃逸具有最佳效果。目前工业上普遍采用正向“金字塔”作为单晶硅电池的表面光功能织构, 当光线照射到“金字塔”表面一次折射吸收后, 反射光线会进一步照射到相邻“金字塔”上, 经过二次折射吸收, 吸光率可达到 90%左右^[20]。KHAN 等^[21]在研究中提出了一种截面为抛物线的晶体硅表面光功能织构, 并对其进行了仿真与试验研究, 该晶体硅电池也获得了较好的吸光特性。这些表面光功能织构研究推动了晶体硅电池光电转换效率不断提高。

2 常规表面光功能织构的制备及瓶颈问题

2.1 表面光功能织构的制备

常规晶体硅电池都是在其表面直接制备出光功能织构, 针对各类表面光功能织构的特点, 国内外专家研究出很多制备方法, 主要有化学制绒、物理

制绒以及两者组合制备;按表面织构尺度可分为微米尺度和纳米尺度表面织构。

2.1.1 微米尺度表面织构

(1) 非均匀表面织构。

晶体硅的晶胞为面心立方金刚石结构,晶体内部各个不同的方向上,原子排列的疏密程度和排列方式都有显著不同。单晶硅(100)晶面被强碱刻蚀速率约是(111)晶面的十倍,化学制绒可在单晶硅表面刻蚀出“金字塔”织构,但由于刻蚀之前其表面态不一致,导致化学制绒所获得的“金字塔”织构不均匀,如图 2a 所示;多晶硅表面含有大量的晶粒和晶界,且晶粒取向各不相同,刻蚀后只能形成不规则的凹坑织构,其吸光率比单晶硅低很多,如图 2b 所示。

(a) 单晶硅

(b) 多晶硅

图 2 化学制绒表面织构

对于化学制绒机理的探讨由来已久,各式各样的理论层出不穷,而最具说服力的是 SEIDEL 等^[22]提出的电化学模型,电化学模型认为单晶硅各向异性刻蚀是由于单晶硅晶格各个方向的悬挂键密度、背键结构和能级差异等引起。通过化学制绒所获得的单晶硅表面“金字塔”织构不均匀,为了获得尺寸相对均匀的表面织构,周春兰等^[23]采用间隙式超声辅助化学制绒技术,可在单晶硅表面获得分布相对较均匀的“金字塔”织构;KIM 等^[24]采用连续式超声辅助化学制绒技术,在单晶硅表面得到更为均匀的“金字塔”织构;这是由于化学制绒过程中会产生氢气,在刻蚀过程中加入了超声波辅助,可驱离刻蚀过程吸附在单晶硅表面的氢气,从而获得相对均匀的表面织构。目前工业上广泛采用 NaOH 碱性溶液进行化学制绒,通过调节 NaOH 的浓度、刻蚀温度和时间,添加不同的催化剂,可以改变单晶硅表面“金字塔”织构的形貌和尺寸;也有学者尝试其他种类的碱性溶液对单晶硅表面进行织构化处理并取得了一定成效^[25]。

(2) 均匀表面织构。

化学制绒具有效率高、成本低等优势,但化学制绒所获得的表面光功能织构不均匀,难以得到最

优表面织构,而且存在环境污染的问题^[26]。相对化学制绒而言,物理制绒的减反射效果更好,且物理制绒可获得尺寸小于 2 μm 的均匀表面织构,更有利于晶体硅电池的薄片化^[27]。目前物理制绒的主要方法有机械刻槽和载能粒子束加工^[28]。采用机械刻槽可在晶体硅表面加工出均匀织构,山东大学葛培琪等^[29]采用硬质合金微型铣刀在晶体硅表面加工不同深度的 V 型槽,并评估刀具磨损情况和晶体硅电池的吸光特性。华南理工大学谢晋等^[30]采用微磨削技术在单晶硅表面加工出微沟槽结构阵列,发现微沟槽织构可提高单晶硅电池对弱光的吸收。西南交通大学钱林茂^[31]团队利用自制的多点接触微/纳米加工设备,基于摩擦诱导选择性刻蚀原理,在单晶硅表面制备了各种均匀微/纳织构,并取得良好的吸光特性。

采用载能粒子束物理制绒主要有激光光刻和离子束加工,激光光刻技术可以在晶体硅表面获得更为细微的织构, GREEN 教授带领团队^[32]研制的 PERL 电池,采用光刻技术在晶体硅正面加工出规则的倒“金字塔”织构,达到了优异的吸光效果,如图 3 所示。DOBRZANSKI 等^[33]采用激光刻槽方法,在多晶硅表面制备均匀的条纹状织构。HONG 等^[34]利用飞秒激光诱导周期性表面织构,改善晶体硅电池表面的光学性能,增加其吸光率。PESC^[35]电池采用光刻技术,沿<100>晶向刻蚀出微细的长条形缝隙,然后用 NaOH 溶液进行选择性刻蚀,就可在缝隙区制成 V 形槽,该 V 形槽可降低晶体硅电池表面反射损失。随着离子束加工技术的发展,采用离子束刻蚀方法可在晶体硅表面加工出非常精细的光功能织构,其反射率可降至 3% 以下。河北大学于威等^[36]采用离子束在单晶硅表面刻蚀锥型织构,并系统地研究各种试验条件对离子束制备单晶硅织构的影响。YOO 等^[37]以 SF₆/O₂ 为反应气体,利用离子束刻蚀在单晶硅表面制备了柱状绒面结构,所制备的单晶硅电池吸光率得到了大幅度提升。但是,苛刻试验条件以及反应过程控制的复杂性使离子束制绒产业化应用受到限制。

图 3 PERL 电池结构

2.1.2 纳米尺度表面织构

运用物理和化学方法可在硅片上制备纳米尺度光功能织构,使得硅片反射率大大降低,因为其表面反射率极低,肉眼观察为黑色,故名黑硅^[38]。纳米尺度加工的领军人才哈佛大学 LIEBER^[39]教授,作为纳米科技研究领域国际顶尖的科学家,正致力于纳米线结构晶体硅电池的开发和应用。目前制备黑硅表面织构的方法主要有金属催化化学刻蚀法(Metal catalytic chemical etching, MCCE)和反应离子刻蚀法(Reactive ion etching, RIE)。金属催化化学刻蚀法^[40]采用银离子辅助化学刻蚀,将一定浓度的氢氟酸(HF)、过氧化氢(H₂O₂)和硝酸银(AgNO₃)溶液按适当比例配制,刻蚀时 Ag 粒子会随机附着在硅片表面,Ag 粒子作为阴极、硅作为阳极,在硅片表面形成刻蚀微通道,这时在金属粒子下方的硅基体会被快速刻蚀形成纳米孔隙,从而在整个硅片上形成纳米绒面结构,如图 4a 所示。反应离子刻蚀法^[58]可在晶体硅表面加工纳米级别的光功能织构,南京航空航天大学沈鸿烈^[41-42]课题组采用反应离子刻蚀法对多晶硅表面进行加工,获得了反射率低于 1% 的黑硅表面织构,如图 4b 所示。黑硅表面光功能织构达到了纳米尺度,但由于加工精度无法有效控制,黑硅的表面缺陷严重抵消了吸光率的增益,其光电转换效率并不高。因此,改善黑硅电池表面缺陷是提高其光电转换效率的关键。

图 4 黑硅电池表面织构

2.2 常规光功能织构制备遇到的瓶颈问题

在晶体硅表面直接加工光功能织构可有效提高晶体硅电池的吸光率,目前规则织构可使其吸光率提高至 99% 以上;但是晶体硅电池的光电转换效率并未与吸光率成正比增加。主要原因是化学制绒所获得的表面微结构不均匀、尺寸较大;物理制绒虽然能够获得尺寸相对较小、均匀的表面织构,但由于目前的微/纳制造精度还不够,难于在晶体硅表面直接获得精细、无缺陷态的光功能织构。在晶体硅电池后续制备过程,大尺寸表面织构会带来以下缺陷: 1) 在 PN 结扩散过程中,表面织构会影响 PN 结扩散深度的均匀性,从而削弱其内建电场; 2) 高

温扩散和电极烧结时,体积膨胀会在表面织构的顶端和谷底产生较大热应力,导致晶格位错缺陷加剧; 3) 晶体硅表面织构尺寸过大,会使电极的接触电阻增大,造成光生电流减小。上述缺陷都会削弱绒面晶体硅电池的光生伏特效应,从而限制其光电转换效率的提高。PARK 等^[43]对单晶硅扩散后 PN 结深度不均匀性进行研究,发现“金字塔”塔顶 PN 结最深达到 250 nm,如图 5a 所示;而“金字塔”谷底 PN 结只有 4 nm 深,如图 5b 所示;在“金字塔”侧面,PN 结深度约为 95 nm。HAYASHI 等^[44]研究发现绒面单晶硅电池的“金字塔”顶端会出现晶格缺陷,该缺陷会降低其开路电压。KHANNA^[45]的研究结果显示,大尺寸“金字塔”织构会影响单晶硅电池丝网印刷银电极的接触电阻,从而影响其光生电流。

图 5 “金字塔”织构 pn 结扩散深度

国内外学者为了减小晶体硅电池表面光功能织构带来的负面影响做了大量研究,浙江大学杨德仁院士^[46]团队研究发现快速热处理单晶硅时,位错在压痕残余应力的弛豫过程中能发生快速滑移。辛超等^[47]研究了多晶硅电池退火温度和冷却方式对位错密度的影响,提出在 1 320℃ 以上退火时,采用缓冷处理可降低多晶硅的位错密度。EDWARDS 等^[48]采用化学抛光来圆化单晶硅表面“金字塔”塔尖、棱边和谷底,从而提高其光生伏特效应。南昌大学周浪^[49]团队采用 HNO₃-HF 混合液对单晶硅表面“金字塔”织构进行圆化处理,并采用圆化程度 DR 定量分析圆化对吸光率和光生伏特效应的影

3 复合光功能织构的提出及其制备

3.1 复合织构的光学特性

在晶体硅电池表面直接加工出光功能织构虽然会提高其吸光率,但也不可避免地会削弱晶体硅电池的光生伏特效应,抵消了部分吸光率增益;研究

发现撇开吸光率, 光面晶体硅电池比绒面晶体硅电池的光生伏特效应可提高 $5.1\% \sim 5.6\%$ ^[51]。因此, 有学者尝试在光面晶体硅电池表面复合陷光织构膜, 以提高其吸光率。2015 年, RAHMAN 等^[50]在《Nature Communications》上发表了在光面晶体硅电池表面复合不同尺寸的锥形织构膜, 该复合光功能织构膜可使光面晶体硅电池的吸光率达到 99% 以上。许志龙等^[51]设计了一种光面晶体硅-陷光膜复合电池结构, 把陷光膜(厚约 $100\ \mu\text{m}$)复合在光面晶体硅电池上; 如图 6 所示, 入射光在陷光膜表面经多次反射和折射, 绝大部分光透过陷光膜进入到光面晶体硅电池内, 光面晶体硅电池上表面的反射光可进一步通过陷光膜的内反射回到光面晶体硅电池内部, 因此大大减少光面晶体硅电池的反射损失。LEE 等^[52]也制备了顶端为尖状的氧化锌纳米棒阵列陷光薄膜, 其反射率为 6.6% ; 程轲等^[53]提出一种理想陷光膜复合电池模型, 即在光面晶体硅的表面构造陷光织构膜, 使其能够在较宽的光波谱范围内减少反射损失。中国科学院丁武昌^[54]为了降低晶体硅电池的表面反射损失, 开展了多种表面复合光功能织构膜的研究。还有学者从生物进化的角度出发, 寻求具有优异光功能特性的陷光织构膜, POTYRAILO 等^[55]研究发现蝴蝶翅膀微结构是一种高效的光收集器, 在太阳能电池领域复合该表面织构膜具有广阔的应用前景。JIANG 等^[56]采用仿生的方法研制出类似蛾眼的周期性微结构作为陷光膜, 并考察了其减反射特性。这些晶体硅电池表面复合光功能织构的提出, 为多层复合高效太阳能电池的研究提供了新思路。

图 6 光面晶体硅-陷光膜复合电池

3.2 复合织构的电学特性

复合织构可有效提高光面晶体硅电池的吸光率, 采用光面晶体硅可使 PN 结扩散更为均匀, 减少高温导致的晶格缺陷, 因此可获得理想的光电转换效率^[50-51]。复合光功能织构电池引入了多层界面, 这些界面对晶体硅电池光电特性的影响很大。为了减少晶体硅电池的界面缺陷态, 德国哈根大学 FAHRNER 团队^[57]利用离子体增强化学气相沉积 (Ion enhanced chemical vapor deposition, PECVD)

法, 在晶体硅表面沉积 SiN_x , 反应气体 NH_3 释放原子态的氢可以饱和 Si/SiN_x 界面上的悬挂键, 从而提高了晶体硅电池的光生伏特效应; 另外 SiN_x 的折射率在 1.8 和 1.9 之间, 沉积在晶体硅表面还有助于提高吸光率。ZABALA 等^[58]利用等离子体辅助沉积 Al_2O_3 钝化层, 使晶体硅电池表面复合损失大幅降低, 提高了晶体硅电池的光生伏特效应。DINGEMANS 等^[59]通过分析 Al_2O_3 在高温下的钝化效果, 采用 Al_2O_3 钝化制备的 P 型及 N 型晶体硅电池都获得较高光生伏特效应。何悦等^[60]利用热原子层沉积设备在硅片上制备了 Al_2O_3 薄膜, 改善晶体硅电池的界面态, 使其有效少数子寿命达到 $100\ \mu\text{s}$ 以上, 光生伏特效应得到大幅度提高。这些界面效应的研究推动了复合光功能织构晶体硅电池的发展。

3.3 复合织构的制备

在光面晶体硅电池表面复合光功能织构, 不仅可以有效提高其吸光率, 而且可获得高效光生伏特效应, 是高效晶体硅电池的研究思路。采用等离子刻蚀、纳米压印可制备出各种光功能织构膜。RAHMAN^[50]在光面晶体硅电池表面复合一层平面 PMMA 薄膜, 再通过等离子刻蚀在 PMMA 薄膜加工出不同尺寸的锥形织构; 如图 7a-i 为绒面晶体硅, 图 7a-ii 为光面晶体硅-光功能织构膜复合电池; 图 7b 为平面 PMMA 膜复合在光面晶体硅表面, 并在 PMMA 膜表面覆盖氧化铝颗粒; 图 7c、7d 为通过等离子刻蚀在 PMMA 膜加工出不同尺寸光功能织构; 图 7e 为复合不同尺寸织构膜晶体硅电池的反射率测试数据, 可以看出在光面晶体硅表面复合陷光织构膜可使反射损失最低降到 1% 以下, 该研究论证了高质量精细复合织构可获得极高的吸光率, 但其制备成本非常高。采用纳米压印可低成本获得复合织构膜, HAN 等^[61]采用热压印在光面晶体硅电池表面复合不同形貌 PVC 织构膜, 使其吸光率增加 $4\% \sim 7\%$, 该晶体硅复合电池的光电转换效率提高了 4.95% 。紫外纳米压印可在常温下快速地制备高分辨率的织构膜, AMALATHAS 等^[62]采用紫外压印技术在光面晶体硅电池表面制备出周期性纳米级倒“金字塔”织构膜, 该复合电池的光电转换效率提高了 11.73% , 且表面纳米织构具有自洁净功能。上海交通大学黄其煜等^[63]采用纳米级多孔氧化铝模板, 在室温条件下通过紫外纳米压印技术在光面晶体硅表面制备一层蛾眼织构膜, 使复合电池的反射损失减少到 4% 左右, 该晶体硅复合电池的光电转换效率提高了 19% 。目前纳米压印的加工精度还较低, 如何提高微/纳织构模具的加工精度, 优化微/

纳织构膜的成型工艺, 实现高精度、低成本微/纳光功能织构膜的制备是晶体硅复合电池产业化的关键。

图7 复合光功能织构膜

4 光功能织构制备方法展望

(1) 晶体硅电池表面直接制备。

降低甚至避免在晶体硅电池表面直接制备光功能织构所造成的缺陷, 其表面光功能织构应趋向于纳米尺度, 精细纳米尺度表面光功能织构制备依靠精密和超精密加工方法及其装备。揭示微纳尺度下表面效应对其吸光率和光生伏特效应的机理, 研究晶体硅表面光功能织构精细、无损伤、高效的制备工艺及其装备, 对促进我国太阳能发电领域的发展以及提升机械制造业的竞争力至关重要。

(2) 复合光功能织构的制备。

光面晶体硅复合光功能织构电池的制备涉及多个新型交叉学科, 膜微细结构材料成型方法、复合工艺和加工要求并非是加工方法和相应制造工艺的简单叠加, 需要系统地进行加工全过程、甚至是设计与加工的全过程分析, 并着重考虑因多工艺和多尺度结构集成可能引起的工艺、材料和尺度相容性等关键问题。揭示复合光功能织构表现出有别于单一光功能织构的特殊机理, 探索复合微/纳光功能织构的精密、高效、低成本制备方法是未来高效率晶体硅电池的发展方向。

5 结论

(1) 表面光功能织构可有效增强晶体硅电池的吸光率, 从而提高其光电转换效率。探究各种形貌和尺寸表面织构对晶体硅电池光电转换效率的影响, 并结合各种制备工艺设计高效光功能织构是晶

体硅电池研究的热点。

(2) 为减少直接在晶体硅电池表面制备光功能织构对其光生伏特效应的负面影响, 研究晶体硅电池表面光功能织构精细、无损伤、高效率制备工艺及其装备, 可进一步提高晶体硅电池的光电转换效率, 降低太阳能光伏发电成本。

(3) 复合光功能织构可有效提高晶体硅电池的吸光率, 又不会削弱其光生伏特效应, 可更进一步提高晶体硅电池的光电转换效率。探索复合表面光功能织构的精密、高效、低成本制备方法, 是未来高效率晶体硅电池的研究方向。

(4) 晶体硅电池表面光功能织构的发展趋势: 一是从宏观结构向精细微/纳米结构发展; 二是从单一光功能织构向复合织构发展, 在设计与制备复合织构过程中, 应注意与材料学、仿生学等学科的交叉, 这将是一个重要的研究方向。

参考文献

- [1] 王静秋, 王晓雷. 表面织构创新设计的研究回顾及展望[J]. 机械工程学报, 2015, 51(23): 84-95.
WANG Jingqiu, WANG Xiaolei. State of the art in innovative design of surface texture[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(23): 84-95.
- [2] 张辉, 董光能, HUA Meng, 等. 混合润滑状态下表面织构的建模和设计研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(3): 168.
ZHANG Hui, DONG Guangneng, HUA Meng, et al. Modeling and design of surface texture in mixed lubrication[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(3): 168.
- [3] 陈平, 李俊玲, 邵天敏, 等. 考虑表面张力影响的表面织构最优参数分析[J]. 机械工程学报, 2016, 52(19): 123-131.
CHEN Ping, LI Junling, SHAO Tianmin, et al. Optimal analysis of geometric parameters of surface texture with surface tension considered[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(19): 123-131.
- [4] 郭东明, 孙玉文, 贾振元. 高性能精密制造方法及其研究进展[J]. 机械工程学报, 2014, 50(11): 119-134.
GUO Dongming, SUN Yuwen, JIA Zhenyuan. Methods and research progress of high performance manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(11): 119-134.
- [5] 常秋英, 齐焘, 王斌, 等. 激光表面织构对 45 钢干摩擦性能的影响[J]. 机械工程学报, 2017, 53(3): 148-154.
CHANG Qiuying, QI Ye, WANG Bin, et al. Tribological influence of laser surface textures on 45 steel under dry

- sliding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(3): 148-154.
- [6] 汤勇, 唐恒, 万珍平, 等. 超薄微热管的研究现状及发展趋势[J]. 机械工程学报, 2017, 53(20): 131-144.
TANG Yong, TANG Heng, WAN Zhenping, et al. Development status and perspective trend of ultra-thin micro heat pipe[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(20): 131-144.
- [7] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 机械工程学学科发展战略报告(2011-2020)[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
National Natural Science Foundation of China, Department of Engineering and Materials Science. Mechanical engineering discipline development strategy report (2011-2020) [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [8] KORTE L, CONRAD E, ANGERMANN H, et al. Advances in a-Si: H/c-Si heterojunction solar cell fabrication and characterization[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2009, 93(6-7): 905-910.
- [9] JAY F, MUNOZ D, DESRUES T, et al. Advanced process for n-type mono-like silicon a-Si: H/c-Si heterojunction solar cells with 21.5% efficiency[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2014, 130: 690-695.
- [10] 孔伟金, 曹凯华, 由成龙, 等. 太阳能电池用宽光谱减反射光栅的优化设计[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 35-39.
KONG Weijin, CAO Kaihua, YOU Chenlong, et al. Optimization of wide spectrum anti-reflective grating for solar cell[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 35-39.
- [11] 杨德仁. 太阳能电池材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
YANG Deren. Solar cell materials [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
- [12] BU Y Y, CHEN S. Improved crystalline silicon solar cells by light harvesting zinc oxide nanowire arrays[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(22): 10355-10359.
- [13] CAMPBELL P, GREEN M A. Light trapping properties of pyramidally textured surfaces[J]. Journal of Applied Physics, 1987, 62(1): 243-249.
- [14] LAL N N, WHITE T P, CATCHPOLE K R. Optics and light trapping for tandem solar cells on silicon[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2014, 4(6): 1380-1386.
- [15] ESCARRE J, SÖDERSTRÖM K, DESPEISSE M, et al. Geometric light trapping for high efficiency thin film silicon solar cells[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2012, 98: 185-190.
- [16] GREEN M A, EMERY K, HISHIKAWA Y, et al. Solar cell efficiency tables (Version 45)[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2015, 23(1): 1-9.
- [17] STAPF A, HONEIT F, GONDEK C, et al. Texturing of monocrystalline silicon wafers by HF-HCl-H₂O₂ mixtures: Generation of random inverted pyramids and simulation of light trapping in PERC solar cells[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2017, 159: 112-120.
- [18] FATH P, BORST C, ZECHNER C, et al. Progress in a novel high-throughput mechanical texturization technology for highly efficient multicrystalline silicon solar cells[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 1997, 48(1-4): 229-236.
- [19] CHO C, KIM H, JEONG S, et al. Random and V-groove texturing for efficient light trapping in organic photovoltaic cells[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2013, 115: 36-41.
- [20] NOSITSCHKA W A, VOIGT O, MANSHANDEN P, et al. Texturisation of multicrystalline silicon solar cells by RIE and plasma etching[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2003, 80(2): 227-237.
- [21] KHAN F, BAEK S H, KAUR J, et al. Paraboloid structured silicon surface for enhanced light absorption: experimental and simulative investigations[J]. Nanoscale Research Letters, 2015, 10(1): 376.
- [22] SEIDEL H, CSEPREGI L, HEUBERGER A, et al. Anisotropic etching of crystalline silicon in alkaline solutions I. Orientation dependence and behavior of passivation layers[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1990, 137(11): 3612-3626.
- [23] 周春兰, 王文静, 赵雷, 等. 单晶硅表面均匀小尺寸金字塔制备及其特性研究[J]. 物理学报, 2010, 59(8): 5777-5783.
ZHOU Chunlan, WANG Wenjing, ZHAO Lei, et al. Preparation and characterization of homogeneity and fine pyramids on the textured single silicon crystal[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(8): 5777-5783.
- [24] KIM T, LIM J K, KYEONG D, et al. 21%-efficient PERL solar cells with plated front contacts on industrial 156 mm p-type crystalline silicon wafers[J]. Energy Procedia, 2014, 55: 431-436.
- [25] LI M, LI Y, LIU W, et al. Metal-assisted chemical etching for designable monocrystalline silicon nanostructure[J]. Materials Research Bulletin, 2016, 76: 436-449.
- [26] 周建忠, 梅於芬, 盛杰, 等. 激光喷丸诱导镁合金表面微织构的电化学腐蚀性能[J]. 机械工程学报, 2015, 51(16): 120-126.
ZHOU Jianzhong, MEI Yufen, SHENG Jie, et al.

- Electrochemical corrosion behaviors of magnesium alloy micro-textured induced by laser peening[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(16): 120-126.
- [27] CHEN T G, YU P, CHEN S W, et al. Characteristics of large-scale nanohole arrays for thin - silicon photovoltaics[J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2014, 22(4): 452-461.
- [28] SPINELLI P, NEWMAN B K, POLMAN A. Photovoltaics: Light-trapping in crystalline silicon and thin-film solar cells by nanostructured optical coatings[J]. *Nanotechnology for Energy Sustainability*, 2017: 163-180.
- [29] YANG S, ZHANG L, GE P. Experimental study of the pyramidal texturization on the surface of photovoltaic silicon with cemented carbide micro-milling tool[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92(9-12): 3187-3196.
- [30] 谢晋, 李萍, 吴可可, 等. 微结构表面精密磨削技术及其功能特性开发[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(23): 182-190.
- XIE Jin, LI Ping, WU Keke, et al. Micro and precision grinding technique and functional behavior development of micro-structured surfaces[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 92(9-12): 3187-3196.
- [31] 李连凯, 余丙军, 郭剑, 等. 基于摩擦诱导选择性刻蚀原理的单晶硅表面大面积织构加工[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(17): 93-98.
- LI Liankai, YU Bingjun, GUO Jian, et al. Fabrication of large scale texture on monocrystalline silicon surface based on friction-induced selective etching method[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(17): 93-98.
- [32] ZHAO J, WANG A, GREEN M A. 24.5% Efficiency silicon PERT cells on MCZ substrates and 24.7% efficiency PERL cells on FZ substrates[J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 1999, 7(6): 471-474.
- [33] DOBRZANSKI L A, DRYGALA A, GOLOMBEK K, et al. Laser surface treatment of multicrystalline silicon for enhancing optical properties[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 201(1-3): 291-296.
- [34] HONG L, WANG X C, ZHENG H Y, et al. Femtosecond laser fabrication of large-area periodic surface ripple structure on Si substrate[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 297: 134-138.
- [35] BROCKETT T J, RAJAGOPALAN H, LAGHUMAVARAPU R B, et al. Electromagnetic characterization of high absorption sub-wavelength optical nanostructure photovoltaics for solar energy harvesting[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(4): 1518-1527.
- [36] 靳聪慧, 史振亮, 于威, 等. 晶体硅太阳能电池绒面的反应离子刻蚀制备研究[J]. *人工晶体学报*, 2015, 44(3): 571-575.
- JIN Conghui, SHI Zhenliang, YU Wei, et al. Fabrication of crystalline silicon surface texture for solar cells by reactive ion etching[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2015, 44(3): 571-575.
- [37] YOO J, YU G, YI J. Large-area multi crystalline silicon solar cell fabrication using reactive ion etching [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011, 95(1): 2-6.
- [38] NGUYEN K N, BASSET P, MARTY F, et al. On the optical and morphological properties of microstructured Black Silicon obtained by cryogenic-enhanced plasma reactive ion etching[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(19): 194903.
- [39] TIAN B, LIEBER C M. Design synthesis and characterization of novel nanowire structures for photovoltaics and intracellular probes[J]. *Pure and Applied Chemistry*, 2011, 83(12): 2153-2169.
- [40] MURIAS D, REYES-BETANZO C, MORENO M, et al. Black Silicon formation using dry etching for solar cells applications[J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2012, 177(16): 1509-1513.
- [41] 沈鸿烈, 蒋晔. 基于倒金字塔减反射结构的多晶黑硅及其高效太阳电池[J]. *南京航空航天大学学报*, 2017, 49(5): 744-752.
- SHEN Honglie, JIANG Ye. Investigation on multi-crystalline black silicon and high efficiency solar cell based on inverted pyramid antireflective structure[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2017, 49(5): 744-752.
- [42] 金磊, 李玉芳, 沈鸿烈, 等. 反应离子刻蚀制备的多晶黑硅损伤去除与钝化性能研究[J]. *光学学报*, 2017, 37(2): 193-198.
- JIN Lei, LI Yufang, SHEN Honglie, et al. Damage-removal and passivation of polycrystalline black silicon by reactive ion etching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 193-198.
- [43] PARK H, LEE J S, KWON S, et al. Effect of surface morphology on screen printed solar cells[J]. *Current Applied Physics*, 2010, 10(1): 113-118.
- [44] HAYASHI S, MINEMOTO T, TAKAKURA H, et al. Influence of texture feature size on spherical silicon solar cells[J]. *Rare Metals*, 2006, 25(6): 115-120.
- [45] KHANNA A, BASUA P K, FILIPOVIC A, et al. Influence of random pyramid surface texture on silver

- screen-printed contact formation for monocrystalline silicon wafer solar cells [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2015, 132: 589-596.
- [46] 徐嶺茂, 高超, 董鹏, 等. 单晶硅片中的位错在快速热处理过程中的滑移[J]. *物理学报*, 2013, 62(16): 419-423.
XU Lingmao, GAO Chao, DONG Peng, et al. Dislocation motion during rapid thermal processing of single-crystalline silicon wafers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(16): 419-423.
- [47] 辛超, 周剑, 周潘兵, 等. 高温退火对铸造多晶硅片中位错密度的影响[J]. *半导体技术*, 2011, 36(5): 378-381.
XIN Chao, ZHOU Jian, ZHOU Panbing, et al. Effect high temperature annealing on dislocation density of multicrystalline silicon wafers[J]. *Semiconductor Technology*, 2011, 36(5): 378-381.
- [48] EDWARDS M, BOWDEN S, DAS U, et al. Effect of texturing and surface preparation on lifetime and cell performance in heterojunction silicon solar cells[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2008, 92(11): 1373-1377.
- [49] 龚洪勇, 黄海宾, 周浪. 晶体硅金字塔绒面结构圆化对其光反射率和非晶硅薄膜钝化效果的影响[J]. *人工晶体学报*, 2015, 44(4): 913-917.
GONG Hongyong, HUANG Haibin, ZHOU Lang. Effects of rounding of pyramid texture on light reflectivity and amorphous silicon thin film passivation of crystalline silicon[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2015, 44(4): 913-917.
- [50] RAHMAN A, ASHRAF A, XIN H, et al. Sub-50-nm self-assembled nanotextures for enhanced broadband antireflection in silicon solar cells[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 5963.
- [51] 许志龙, 杨小璠, 黄种明, 等. 光面晶体硅-陷光膜复合电池光电特性研究[J]. *太阳能学报*, 2017, 38(12): 3265-3270.
XU Zhilong, YANG Xiaofan, HUANG Zhongming, et al. Research of photoelectric characteristics of crystalline silicon composite cell with smooth surface and light trapping film[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2017, 38(12): 3265-3270.
- [52] KE W C, LEE S J, CHEN S L, et al. Influence of the molybdenum thickness on the conversion efficiency of thin-film a-Si: H solar cells grown on a 304 stainless steel substrate[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2013, 231: 285-288.
- [53] 程轲, 王书杰, 付冬伟, 等. 单晶硅表面周期性微结构的减反射特性及光伏特性[J]. *高等学校化学学报*, 2010, 31(8): 1647-1650.
CHENG Ke, WANG Shujie, FU Dongwei, et al. Antireflection and photovoltaic properties of microstructures design on the single crystalline silicon surface[J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2010, 31(8): 1647-1650.
- [54] 丁武昌. 光管理在晶体硅电池中的应用[J]. *中国光学*, 2013, 6(5): 717-728.
DING Wuchang. Light management in crystalline silicon solar cells[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 717-728.
- [55] POTYRAILO R A, GHIRADELLA H, VERTIATCHIKH A, et al. Morpho butterfly wing scales demonstrate highly selective vapour response[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(2): 123.
- [56] MIN W L, AMAURY P B, JIANG P, et al. Bioinspired broadband antireflection coatings on GaSb [J]. *Applied Physical Letter*, 2008, 92: 141109-141111.
- [57] MUELLER T, SCHWERTHEIM S, FAHRNER W R. Crystalline silicon surface passivation by high-frequency plasma-enhanced chemical-vapor-deposited nanocomposite silicon suboxides for solar cell applications[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107(1): 014504.
- [58] RAFI J M, ZABALA M, BELDARRAIN O, et al. Deposition temperature and thermal annealing effects on the electrical characteristics of atomic layer deposited Al_2O_3 films on silicon[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2011, 158(5): G108-G114.
- [59] DINGEMANS G, KESSELS W M M. Status and prospects of Al_2O_3 -based surface passivation schemes for silicon solar cells[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 2012, 30(4): 040802.
- [60] 何悦, 窦亚楠, 马晓光, 等. 热原子层沉积氧化铝对硅的钝化性能及热稳定性[J]. *物理学报*, 2012, 61(24): 520-524.
HE Yue, DOU Yanan, MA Xiaoguang, et al. Passivation and stability of thermal atomic layer deposited Al_2O_3 on CZ-Si[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(24): 520-524.
- [61] HAN K S, LEE H, KIM D, et al. Fabrication of anti-reflection structure on protective layer of solar cells by hot-embossing method[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2009, 93(8): 1214-1217.
- [62] AMALATHAS A P, ALKAISI M M. Efficient light trapping nanopillar structures for solar cells patterned using UV nanoimprint lithography[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2017, 57: 54-58.
- [63] JIAO Fang, HUANG Qiyu, REN Wangchun, et al. Enhanced performance for solar cells with moth-eye structure fabricated by UV nanoimprint lithography[J].

- Microelectronic Engineering, 2013, 103(8): 126-130.
- [64] MASUKO K, SHIGEMATSU M, HASHIGUCHI T, et al. Achievement of more than 25% conversion efficiency with crystalline silicon heterojunction solar cell[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2014, 4(6): 1433-1435.
- [65] YOSHIKAWA K, KAWASAKI H, YOSHIDA W, et al. Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back

contacts for a photoconversion efficiency over 26%[J]. Nature Energy, 2017, 2: 17032.

作者简介：许志龙，男，1971 年出生，博士研究生，教授。主要从事新能源开发和利用方向的研究。

E-mail: Zhilong.xu@163.com

徐西鹏(通信作者)，男，1965 年出生，博士，教授，博士研究生导师。主要从事磨粒加工领域研究。

E-mail: xpxu@hqu.edu.cn