

复合陷光织构膜对光面晶体硅电池 光电特性的影响

彭海烽¹, 许志龙¹, 洪永强², 杨 星², 李 煌¹

(1. 集美大学 机械与能源工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 厦门大学 能源学院, 福建 厦门 361102)

摘要: 针对晶体硅表面织构化抵消部分减反射增益的问题, 在光面晶体硅电池表面复合三棱锥陷光织构膜来降低其反射损失, 同时保留其光生伏特效应较高的优点。分析陷光膜的陷光机理, 并通过光线追迹优化陷光膜表面三棱锥结构的几何参数。运用光学仿真与实验对比分析全波长内光面晶体硅电池、绒面晶体硅电池和复合陷光织构膜的光面晶体硅电池光学特性差异, 采用加权计算方法定量评价 3 种晶体硅电池在全波长内的反射损失。实验分析表明, 陷光膜可显著降低光面晶体硅电池反射损失, 最终复合电池实测加权反射率为 6.57%, 比光面晶体硅电池和绒面晶体硅电池的加权反射率分别降低 8.57% 和 1.65%; 复合电池的光电转换效率达 20.34%, 比光面晶体硅电池和绒面晶体硅电池分别提高 2.33% 和 1.18%。

关键词: 反射损失; 转换效率; 陷光织构膜; 光线追迹; 复合电池

中图分类号: TM914.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4776 (2020) 01-0022-07

Effect of Composite Light Trapping Textured Film on Photoelectric Characteristics of Smooth Crystal Silicon Cell

Peng Haifeng¹, Xu Zhilong¹, Hong Yongqiang², Yang Xing², Li Huang¹

(1. College of Mechanical and Energy Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. College of Energy, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

Abstract: In order to solve the problem that the surface texture of crystalline silicon offsets part of gain of the anti-reflection, the light trapping textured film of triangular pyramid was composited on the surface of the smooth crystalline silicon cell to reduce its reflection loss and retain advantage of its high photovoltaic effect. The light trapping mechanism of the light trapping film was analyzed and the geometrical parameters of the triangular pyramidal structure on the surface of the light trapping film were optimized by ray tracing. Optical simulation and experiment were used to compare and analyze the difference of the optical properties of the smooth crystalline silicon cell, textured crystal silicon cell and smooth crystalline silicon cell with the composite light trapping textured film in full wavelength, and the weighted calculation method was used to

收稿日期: 2019-08-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51676085)

通信作者: 许志龙, E-mail: zhilong.xu@163.com

quantitatively evaluate the reflection loss of the three kinds of the crystal silicon cells in full wavelength. Experimental analysis shows that the light trapping film can significantly reduce the reflection loss of the smooth crystalline silicon cells, and the final measured weighted reflectivity of the composite cell is 6.57%, which is 8.57% and 1.65% lower than that of the smooth crystalline silicon cell and textured crystal silicon cell, respectively. The photoelectric conversion efficiency of the composite cell is 20.34%, which is 2.33% and 1.18% higher than that of the smooth crystalline silicon cell and textured crystal silicon cell, respectively.

Key words: reflection loss; conversion efficiency; light trapping textured film; ray tracing; composite cell

DOI: 10.13250/j.cnki.wndz.2020.01.004 **EEACC:** 8420

0 引言

目前, 晶体硅电池约占全球光伏总产量的90%^[1], 近几十年来其转换效率不断提高并逐渐接近理论效率极限值(33.7%)^[2], 已报道工业化转换效率约为23%^[3]。提高晶体硅电池转换效率的关键在于如何减少电池表面反射损失^[4]和增强光生伏特效应^[5]。目前主要通过晶体硅电池表面制备光功能织构或复合织构膜这两种基本途径来提高晶体硅电池的吸光率^[6-7]。

在晶体硅电池表面直接制备光功能织构的方法主要包括湿法刻蚀^[8]、机械刻槽^[9]、激光刻蚀^[10]、反应离子刻蚀(RIE)^[11]和掩模技术^[12]等。直接在晶体硅片表面制备光功能织构虽能有效降低晶体硅电池的表面反射损失^[13-15], 但会增加表面缺陷密度, 削弱其光生伏特效应^[16]; 且晶体硅电池表面栅线电极会带来遮光损失^[17-18], 限制吸光率的提高。以上缺陷均制约了晶体硅电池光电转换效率的提高。因此, 有学者尝试在光面晶体硅电池表面复合陷光织构膜来提高其吸光率。A. Rahman等人^[4]在光面晶体硅电池表面复合锥形织构膜, 可使光面晶体硅电池的光学反射损失降至1%左右。S. H. Lee等人^[19]在太阳电池上复合具有陷光织构的聚合物薄膜来降低反射损失, 最终太阳电池发电量增加3.9%。然而以上织构膜表面微结构均为纳米尺度, 制造工艺复杂, 不利于快速推广。

基于此背景, 许志龙等人^[20]提出一种在光面晶体硅电池表面复合陷光织构膜的复合电池结构(陷光膜-光面晶体硅复合电池)。该陷光织构膜采用热压印技术制备, 膜表面带有微米尺度三棱锥,

具有可快速制备、成本低的特点。撇开吸光率的影响, 所采用的光面晶体硅电池比绒面晶体硅电池光生伏特效应高。本文从理论上探究了陷光膜-光面晶体硅电池复合结构的光学特性, 优化了陷光膜表面正三棱锥结构几何参数, 得到了具有最佳减反效果的复合电池模型, 并对光面晶体硅电池、绒面晶体硅电池和陷光膜-光面晶体硅复合电池的光电特性进行对比分析, 最终得出对复合电池结构电池光电特性的全面评价。

1 仿真与实验

1.1 模型创建

三棱锥陷光织构膜表面基本单元是两个对称的金字塔结构, 单个金字塔结构是底面为正三角形、三个侧面为等腰三角形组成的三棱锥, 两个三棱锥间谷底夹角为 β , 如图1(a)所示。针对微米尺度陷光膜减反特征, 构建具有正三棱锥织构的陷光膜三维模型如图1(b)所示。结合陷光膜制备工艺方案, 设计光功能微结构底边长度 $L=100\ \mu\text{m}$, 由于陷光膜的表面微结构尺寸远大于入射光波长, 忽略衍射效应, 假设微结构表面无形状误差。

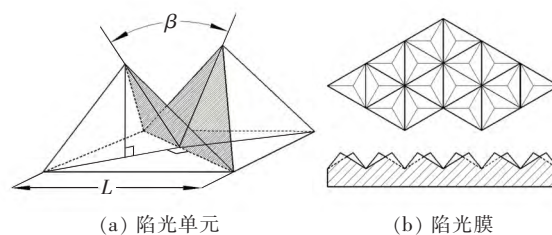


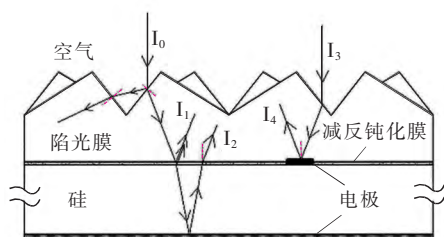
图1 陷光织构膜示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of the light trapping textured film

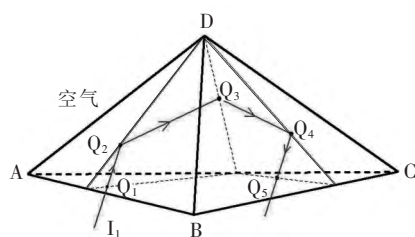
由于晶体硅表面会因晶格中断而产生不饱和的悬空键，将导致光生载流子在表面复合与晶界复合的概率增加。在晶体硅电池表面沉积厚度为纳米级的钝化薄膜，该薄膜可同时起到减少晶体硅电池光生载流子的复合损失与降低表面反射损失的作用。在模型创建过程中将陷光膜复合在减反钝化膜上，最终形成陷光膜—减反钝化膜—光面晶体硅—背电极复合电池结构。

1.2 复合电池陷光过程

光面晶体硅电池具有表面缺陷密度较低和光生伏特效应高的特点，但光面晶体硅反射率高达30%。将表面带有三棱锥织构的陷光膜与光面晶体硅电池复合，陷光膜表面三棱锥织构对光线的多次折射可显著降低光面晶体硅电池表面反射损失，同时保留光面晶体硅电池光生伏特效应高的优点。复合电池中光线传播示意图如图2(a)所示，入射光 I_0 在陷光膜表面经多次折射后，大部分光透过陷光膜、减反射钝化膜进入光面晶体硅电池，陷光膜上表面正三棱锥微结构可有效提高透光率；在该陷光膜与减反膜、减反膜与光面晶体硅界面的反射光 I_1 和难以被晶体硅吸收的长波光线 I_2 以及栅线电极反射光 I_4 ，通过陷光膜内表面的逆反射，大部分可返回到晶体硅电池内部，使陷光膜和光面晶体硅界面反射光线的逃逸损失得到有效抑制。陷光膜



(a) 复合电池光线传播路径



(b) 陷光单元内反射路径

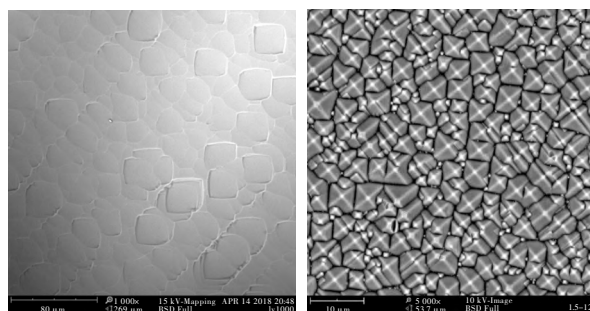
图2 复合电池陷光原理图

Fig 2 Schematic diagrams of the light trapping for the composite cell

三棱锥微结构内表面光线逆反射的传播路径如图2(b)所示，从光面晶体硅电池逃逸的光线 I_1 经 Q_1 点进入陷光膜，在三棱锥不同侧面的 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 点连续发生内反射，光线经 Q_5 点逆反射回到光面晶体硅电池内部。

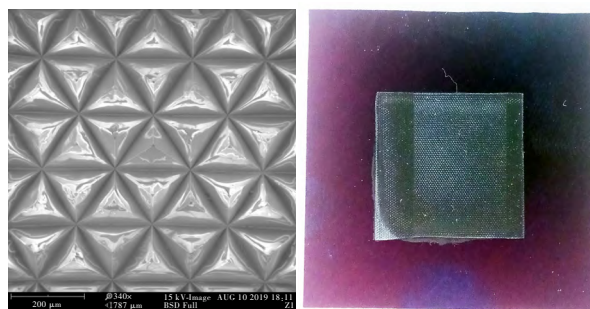
1.3 电池制备

晶体硅电池材料为P(硼)型[100]晶向直拉(CZ)法单晶硅，硅片面积 $156\text{ mm} \times 156\text{ mm}$ ，厚度约为 $180\text{ }\mu\text{m}$ ，电阻率约为 $3\text{ }\Omega \cdot \text{cm}$ 。采用质量分数为30%的NaOH溶液对15片硅原片化学抛光2 min，得到光面晶体硅片，采用扫描电子显微镜(SEM, Phenom XL, 荷兰)观测微观形貌，光面晶体硅表面形貌如图3(a)所示；对其中5片光面晶体硅片，采用1% (质量分数) NaOH + 8% (体积分数) 异丙醇(IPA) + 4% (质量分数) Na_2SiO_3 混合溶液在 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 下刻蚀25 min，得到具有“金字塔”织构的绒面晶体硅片，表面形貌如图3(b)所示。先用RCA法清洗光面晶体硅片和绒面晶体硅片，然后在 $900\text{ }^\circ\text{C}$ 气态磷源 POCl_3 中扩散30 min；用质量分数1%的HF溶液去除磷硅玻璃，再采用等离子体增强化学气相沉积



(a) 光面晶体硅形貌

(b) 绒面晶体硅形貌



(c) 陷光膜形貌

(d) 复合电池样品

图3 晶体硅和陷光膜的表面形貌与电池样品

Fig 3 Surface morphologies of the crystal silicon and light trapping film and cell sample

(PECVD) 法镀上 60 nm 厚的 SiN_x 减反钝化膜，用丝网印刷电极在 850 °C 下烧结，最后获得光面和绒面单晶硅电池。

采用超精密机床在黄铜表面加工出三棱锥织构原始模具，原始模具经电铸得到工作模，采用工作模在聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 平膜表面热压印出陷光微结构。光学级 PET 平膜在较宽温度范围内性能稳定，透光率高 (不含近紫外光线)^[21]。最终制得 PET 陷光膜表面形貌如图 3 (c) 所示。陷光膜相邻三棱锥侧面谷底夹角 $\beta=67^\circ$ ，其表面粗糙度 $R_a=22$ nm。采用紫外光 (UV) 固化剂将 PET 陷光织构膜与光面晶体硅电池复合，所制成的陷光膜—光面晶体硅复合电池样品如图 3 (d) 所示。

1.4 加权反射率评价方法

虽然晶体硅电池在全波长内的光学特性曲线图可直观体现不同波长处电池反射率大小，但由于太阳光辐射能量主要集中在可见光谱范围内且能量不依波长均匀分布，导致光学特性曲线图无法对全波长范围内电池反射损失进行量化表征，所以采用积分加权方法来定量计算晶体硅电池对太阳光的反射损失。

在光谱范围的太阳辐照度 (E) 内，给定波长 (λ) 处，单位波长间隔段内的太阳辐照度值 (E_λ) 为

$$E_\lambda = \frac{dE}{d\lambda} \quad (1)$$

$R(\lambda)$ 是与波长有关的反射率，用 $R(\lambda)$ 与 E_λ 乘积的积分可计算出电池经光谱特性加权的反射太阳辐照度 (E_s) 为

$$E_s = \int_0^\infty R(\lambda) E_\lambda d\lambda \quad (2)$$

由于光谱特性和光谱辐照度通常被认为是离散数值，所以光谱范围的实际太阳辐照度 (E) 和反射太阳辐照度 (E_s) 可近似计算为

$$E \approx \sum_{i=1}^N E_{\lambda_i} \Delta\lambda_i \quad (3)$$

$$E_s \approx \sum_{i=1}^N R(\lambda_i) E_{\lambda_i} \Delta\lambda_i \quad (4)$$

式中： λ_i 为 N 个已知光谱数据点的第 i 点波长； $R(\lambda_i)$ 为第 i 点反射率值； E_{λ_i} 为第 i 个波段内太阳辐照度值，单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$ ； $\Delta\lambda_i$ 为 N 个已知波段划分间隔的第 i 个波段。

由式 (3) 和 (4) 可知，最终按波段加权计算的加权反射率 (R_w) 为

$$R_w = \frac{E_s}{\sum_{i=1}^N E_{\lambda_i} \Delta\lambda_i} \quad (5)$$

2 结果与讨论

2.1 陷光膜参数优化

陷光膜光学特性会随三棱锥微结构的 β 改变而变化，采用光学追迹软件 Tracepro 优化 β 。为捕捉所有反射光线，复合电池模型被放置在半球形全吸收薄壳内。光源位于陷光膜正上方，光线竖直投射，光源光线密度为 120 条/三棱锥，光源面积覆盖 12 个三棱锥。设置材料折射率：空气折射率 $n_1=1$ ，陷光膜折射率 $n_2=1.55$ ，减反钝化膜折射率 (参考 SiN_x) $n_3=2.1$ ，晶体硅折射率 $n_4=3.94$ ($\lambda=600$ nm)。由于陷光膜的厚度很小，膜材质吸收系数低，在追迹仿真中忽略陷光膜对光线的吸收。在 $\lambda=600$ nm 下，改变 β ，分析复合模型的吸光率变化趋势，仿真结果如图 4 所示。当 $45^\circ \leq \beta \leq 67^\circ$ 时，复合电池吸光率随 β 的增大而上升；在 $\beta=67^\circ$ 时，复合电池吸光率达到最大值 95.4%；当 $67^\circ < \beta \leq 110^\circ$ 时，复合电池吸光率随 β 值增加呈现缓慢下降的趋势；当 $\beta > 110^\circ$ 时，复合电池吸光率随 β 值增加呈现快速降低的趋势。

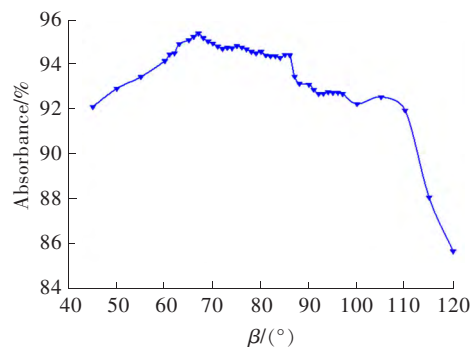


图 4 复合电池吸光率的变化趋势

Fig 4 Variation trend of the absorbance for the composite cell

2.2 复合电池的光学特性

2.2.1 仿真分析

根据陷光膜表面微结构几何参数的优化结果 ($\beta=67^\circ$)，为了在全波长内评价复合电池的光学性能，参照目前绒面晶体硅电池正面银栅线的覆盖比

例 (4.8%)，对比分析光面晶体硅电池、绒面晶体硅电池和陷光膜-光面晶体硅复合电池 3 种模型的光学性能。图 5 (a) 中光线照射到光面晶体硅电池表面只经过一次折射吸收；图 5 (b) 中光线照射到绒面晶体硅电池表面，一次反射光线会经过其微结构产生二次折射吸收；图 5 (c) 中光线照射到陷光膜-光面晶体硅复合电池，入射光线会在陷光膜表面微结构产生二次折射后进入光面晶体硅电池，通过陷光膜逆反射可把晶体硅和银栅线表面的大部分反射光返回到晶体硅电池内部。

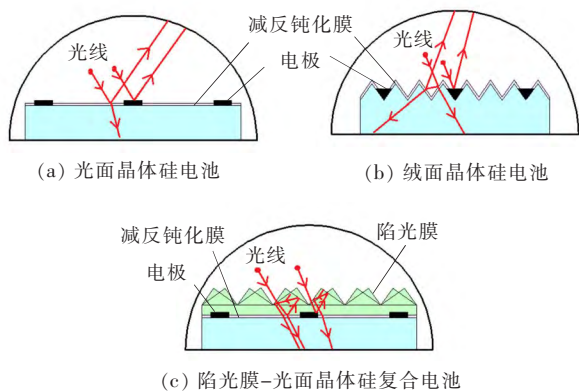


图 5 3 种晶体硅电池的光线追迹示意图

Fig 5 Schematic diagrams of ray tracing for three types of crystalline silicon cells

根据 M. A. Green^[22]测得的晶体硅折射率与波长关系曲线，假设在全波长 (300 nm λ <math>< 1100\text{ nm}</math>) 内进入晶体硅电池的光线都被其全部吸收，3 种晶体硅电池反射率仿真结果如图 6 所示。3 种电池的反射率在全波长范围内呈现出与晶体硅材料折射率相似的变化规律，3 种电池反射率在短波段出现先增后减的现象，在长波段 3 种电池的反射率呈现小幅下降趋势；光面晶体硅电池在全波长范围内的反射损失均很大；绒面晶体硅电池对光线的二次吸收使其反射率明显比光面晶体硅电池低；陷光膜-光面晶体硅复合电池的反射率最低，主要原因是：①三棱锥织构能有效提高陷光膜的透射率，②在光面晶体硅电池和陷光膜界面的反射光可通过陷光膜内表面的逆反射被光面晶体硅电池吸收；由于绒面晶体硅电池无法避免栅线电极遮光损失，而陷光膜内表面可对栅线电极的反射光进行逆反射，故复合电池获得了比绒面晶体硅电池更低的反射率。

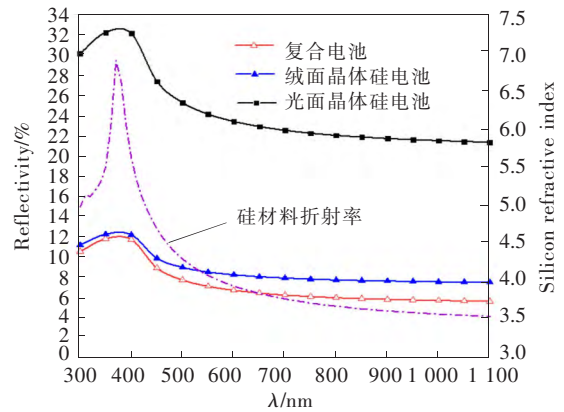


图 6 晶体硅电池反射率的仿真结果
Fig 6 Simulation results of reflectivities for crystalline silicon cells

2.2.2 吸光特性实验

采用 UV-2000 紫外分光光度计分别测试 3 种电池 (含电极) 全波长内反射率，结果如图 7 所示。在 $\lambda < 450\text{ nm}$ 的光波段内，由于陷光膜对短波的吸收，复合电池的反射率比绒面晶体硅电池低很多；在 $450\text{ nm} < \lambda < 650\text{ nm}$ 的光波段内，复合电池的反射率比绒面晶体硅电池略大，这是由于陷光膜加工误差导致实际陷光效果不如理想仿真效果；在 $650\text{ nm} < \lambda < 1050\text{ nm}$ 的光波段内，复合电池的反射率比绒面晶体硅电池略低，主要原因是硅材料对长波光线的吸收率逐渐下降，长波段的光线透过绒面晶体硅电池未被其全部吸收，经电池的背电极反射后回到晶体硅电池再吸收，但还有部分向上反射光线未能被晶体硅电池完全吸收，将从晶体硅电池上表面折射逃逸损失，而陷光膜三棱锥微结

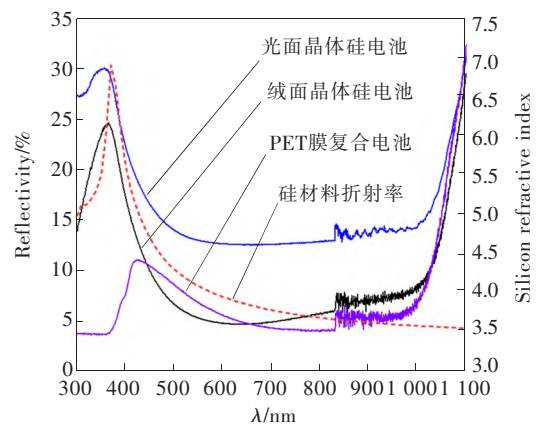


图 7 电池样品反射率的实测结果
Fig 7 Measured results of reflectivities for cell samples

构内表面对光线的逆反射作用抑制了这部分长波段光线的逃逸损失；当 $\lambda > 1\ 050\ \text{nm}$ 时，随着波长增加 3 种电池的反射率都呈现快速上升趋势，主要原因是晶体硅电池对这部分长波光线的吸收率很低，即使采用陷光膜也很难抑制该部分长波段的光线从电池的正面逃逸损失。采用加权反射率分析 3 种电池在太阳光谱内的反射损失，由式 (5) 计算得到光面晶体硅电池、绒面晶体硅电池和陷光膜—光面晶体硅复合电池的加权反射率分别为 15.14%、8.22% 和 6.57%；复合电池比光面晶体硅电池和绒面晶体硅电池的加权反射率分别降低 8.57% 和 1.65%。

2.2.3 电学特性实验

采用卓立汉光 SolarIV-1000 太阳电池测试系统对上述 3 种电池的电学特性进行测试，外量子效率测试结果如图 8 所示。与光面晶体硅电池相比，复合结构电池和绒面晶体硅电池在全波段范围内整体上均显示出更高的外量子效率 (η_{EQE}) 值，主要是因为光面晶体硅电池的表面反射损失较高，相同光照条件下产生光生载流子数目较少。由于 PET 膜对短波光线的吸收，短波段复合电池 EQE 值较绒面晶体硅电池的低。随着波长逐渐增加，复合电池 EQE 值快速上升，并且在 $\lambda \approx 400\ \text{nm}$ 处超过绒面晶体硅电池，这表明含有陷光膜的复合结构电池对光电流的增强主要是在 $\lambda > 400\ \text{nm}$ 的波长范围内。 $I-V$ 测试结果如表 1 所示。虽然光面晶体硅电池吸光率低于绒面晶体硅电池，但两者开路电压 (V_{oc}) 趋于一致，分别为 0.633 V 和 0.635 V，主要原因是：虽然绒面晶体硅电池吸光率较高，光生载流子数量较多，但其表面直接制备光功能织构带

来的缺陷会导致光生载流子复合损失加大（绒面晶体硅电池的并联电阻 (R_{sh}) 较光面晶体硅电池的高），抵消部分减反射增益。陷光膜—光面晶体硅复合电池的 V_{oc} 和短路电流 (I_{sc}) 均高于光面与绒面晶体硅电池的 V_{oc} 和 I_{sc} ，主要原因是：陷光膜在显著降低光面晶体硅电池反射率的同时，保留了其表面缺陷密度较低的特点。由于光面晶体硅的表面缺陷态较少，陷光膜—光面晶体硅复合电池的填充因子 (FF) 也比绒面晶体硅电池的高。最终陷光膜—光面晶体硅复合电池的光电转换效率 (η) 达 20.34%，比光面晶体硅电池和绒面晶体硅电池的 η 分别提高 2.33% 和 1.18%。

表 1 三种晶体硅电池样品的电学特性

Table 1 Electrical properties of three types of crystalline silicon cell samples

电池结构种类	$R_w/\%$	V_{oc}/V	I_{sc}/A	R_{sh}/Ω	$FF/\%$	$\eta/\%$
光面晶体硅电池	15.14	0.633	8.95	56.64	79.51	18.31
绒面晶体硅电池	8.22	0.635	9.51	85.45	78.99	19.16
复合结构电池	6.57	0.642	9.73	57.46	80.11	20.34

3 结论

本文通过理论分析与追迹仿真的手段探究光面晶体硅—陷光膜复合电池陷光机理，并通过仿真与实验分析得出对复合电池结构光学特性的全面评价：①根据对陷光膜—光面晶体硅复合电池的光学分析得出，三棱锥微织构可使绝大部分光线进入陷光膜内，且光面晶体硅表面与栅线电极的大部分反射光，可通过陷光膜内表面的逆反射返回复合电池内被晶体硅吸收；通过仿真优化得出陷光膜 $\beta = 67^\circ$ 时减反效果最佳；②在全波长 ($300\ \text{nm} < \lambda < 1\ 100\ \text{nm}$) 内对光面晶体硅电池、绒面晶体硅电池和陷光膜—光面晶体硅复合电池进行光学仿真，仿真结果表明光面晶体硅电池、绒面晶体硅电池和陷光膜—光面晶体硅复合电池在全波长内反射率依次降低。实验制备了 3 种晶体硅电池，并对分析这 3 种电池的光电特性，最终得出复合电池实测的加权反射率为 6.57%，比光面晶体硅电池和绒面晶体硅电池的加权反射率分别降低 8.57% 和 1.65%；复合电池的光电转

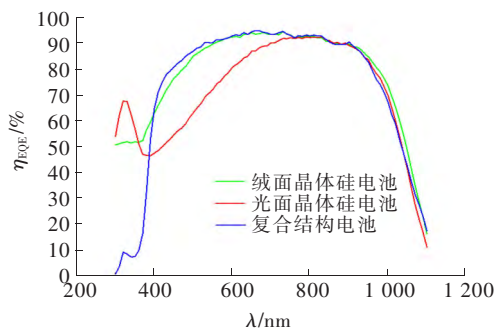


图 8 硅电池样品的外量子效率测试结果

Fig. 8 Test results of external quantum efficiencies for silicon cell samples

换效率达 20.34%，比光面晶体硅电池和绒面晶体硅电池的光电转换效率分别提高 2.33% 和 1.18%。

参考文献：

- [1] SOPIAN K, CHEOW S L, ZAIDI S H. An overview of crystalline silicon solar cell technology: past, present, and future [C] // Proceedings of AIP Conference Proceedings. Langkawi, Malaysia, 2017, 1877: 020004-1-020004-12.
- [2] POLMAN A, KNIGHT M, GARNETT E C, et al. Photovoltaic materials: present efficiencies and future challenges [J]. Science, 2016, 352 (6283): 307-317.
- [3] WEBER E R. Photovoltaics moving into the terawatt age [C] // Proceedings of Next Generation Technologies for Solar Energy Conversion VIII. San Diego, California, USA, 2017, 10368: 1036803-1-1036803-10.
- [4] 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: 5963-5968.
- [5] COUSINS P J, COTTER J E. Minimizing lifetime degradation associated with thermal oxidation of upright randomly textured silicon surfaces [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2006, 90 (2): 228-240.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] KUMAR M D, KIM H, KIM J. Periodically patterned Si pyramids for realizing high efficient solar cells by wet etching process [J]. Solar Energy, 2015, 117: 180-186.
- [9] SPIEGEL M, GERHARDS C, HUSTER F, et al. Industrially attractive front contact formation methods for mechanically V-textured multicrystalline silicon solar cells [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2002, 74 (1/2/3/4): 175-182.
- [10] DOBRZAŃSKI L A, DRYGAŁA A, GOŁOMBEK K, et al. Laser surface treatment of multicrystalline silicon for enhancing optical properties [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 201 (1/2/3): 291-296.
- [11] CHEN W H, LIN H H, HONG F C N. Improvement of conversion efficiency of multi-crystalline silicon solar cells using reactive ion etching with surface pre-etching [J]. Thin Solid Films, 2015, 597: 50-56.
- [12] GREEN M A. Crystalline and thin-film silicon solar cells: state of the art and future potential [J]. Solar Energy, 2003, 74 (3): 181-192.
- [13] 梁学勤, 冯成坤, 陈奕峰, 等. 单晶硅小金字塔绒面及其对太阳能电池性能的影响 [J]. 材料导报, 2011, 25 (2): 13-16.
- [14] 王兴普, 段良飞, 廖承茵, 等. 单晶硅制绒的实验研究 [J]. 太阳能学报, 2014, 35 (2): 242-246.
- [15] 沈辉, 柳锡运. 太阳能电池单晶硅表面织构化正交试验 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2006, 34 (10): 11-14.
- [16] STEGEMANN B, KEGEL J, MEWS M, et al. Passivation of textured silicon wafers: influence of pyramid size distribution, a-Si:H deposition temperature, and post-treatment [J]. Energy Procedia, 2013, 38: 881-889.
- [17] AURANG P, DOGANAY D, BEK A, et al. Silver nanowire networks as transparent top electrodes for silicon solar cells [J]. Solar Energy, 2017, 141: 110-117.
- [18] 王文静, 李海玲, 周春兰. 晶体硅太阳能电池制造技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 174-175.
- [19] LEE S H, HAN K S, SHIN J H, et al. Fabrication of highly transparent self-cleaning protection films for photovoltaic systems [J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2013, 21 (5): 1056-1062.
- [20] 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.
- [21] HERRERO J, GUILLEN C. Transparent films on polymers for photovoltaic applications [J]. Vacuum, 2002, 67 (3/4): 611-616.
- [22] GREEN M A. Self-consistent optical parameters of intrinsic silicon at 300 K including temperature coefficients [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2008, 92 (11): 1305-1310.



作者简介：

彭海辉 (1995—)，男，湖南湘潭人，硕士研究生，主要研究方向为晶体硅太阳能电池；

许志龙 (1971—)，男，福建泉州人，教授，主要研究方向为太阳能利用与开发；

洪永强 (1959—)，男，福建泉州人，教授，主要研究方向为测控技术与太阳能利用与开发。