文章编号:1007 - 4252(2022)05 - 0005 - 469　　DOI:10.20027/j.gncq.2022.0056

95%高双面率异质结太阳电池的叠层减反射研究

白　宇,李君君,邱清卿,陈　杨,陈　涛,俞　健*
(西南石油大学,光伏产业技术研究院,成都 610500)

摘要:本文通过 PV Lighthouse 模拟了硅片厚度(从 50 μm 至 200 μm)对晶硅异质结(SHJ)太阳电池的光学吸收及光生电流密度的影响,剖析了电池柔性化面临的瓶颈问题,并模拟了不同厚度的 TCO/MgF_2 与 TCO/SiO_2 减反射结构,获得了最佳光生电流密度。通过热蒸发制备了 MgF_2 薄膜,射频磁控溅射制备了 SiO_2 薄膜,经过优化构建了具有高透过率(92.56%)的 MgF_2/SiO_2 叠层减反射结构,将器件入光面反射率从 6.70% 降低至 5.46%。在 SHJ 电池背面应用 MgF_2/SiO_2 叠层减反射结构,正面辅以单层 SiO_2 或 MgF_2 减反射薄膜,背面入光时的外部量子效率(EQE)显著提高了 2.35%,使短路电流密度提升 1.10 mA/cm^2 以上。该叠层减反射方案实现了 95.16% 的超高双面率,对提升双玻组件的发电量具有重要意义。

关键词:异质结太阳电池;叠层减反射;光电特性;高双面率
中图分类号:TK513　　**文献标志码**:A

Research on Double-layer Anti-reflection Structures of Silicon Heterojunction Solar Cells with 95% High Bifaciality

BAI Yu, LI Jun-jun, QIU Qing-qing, CHEN Yang, CHEN Tao, YU Jian*
(Southwest Petroleum University, Photovoltaic Institute, Chengdu 610500, China)

Abstract: In this paper, the photogenerated current density and absorbance of silicon heterojunction (SHJ) solar cells with different wafer thickness from 50 μm to 200 μm were simulated by PV Lighthouse. It is found that the limitation of photogenerated current of flexible SHJ solar cells is caused by decreased substrate absorbance. Thus, the anti-reflection (AR) structures including TCO/MgF_2 and TCO/SiO_2 with different film thickness were simulated to obtain the best photogenerated current density. In experimental methods, MgF_2 thin film was prepared by thermal evaporation and SiO_2 thin film was deposited by RF magnetron sputtering. The MgF_2/SiO_2 AR structure with high transmittance (92.56%) was fabricated, which can reduce the reflectance of the SHJ substrate from 6.70% to 5.46%. In addition, the MgF_2/SiO_2 AR structure was applied on the rear side of SHJ solar cell and single MgF_2 or SiO_2 film for

收稿日期:2022-09-28;　　**修订日期**:2022-10-19
基金项目:国家自然科学基金(61904154);四川省重点研发计划(2022YFG0229);成都市技术创新研发项目(2022-YF05-00384-SN).
通信作者:俞　健(1986-),男,浙江平湖人,中国科学院大学博士,副研究员,四川省特聘专家,专注于光伏新能源及交叉学科的研究(E-mail:jianyu@swpu.edu.cn).

front side. The short circuit current density (J_{SC}) when illumination from rear side improved obviously above 1.10 mA/cm^2 due to the rear EQE was significantly increased by 2.35%. Moreover, the bifaciality of SHJ solar cell has been achieved 95.16% in this work, which is of great importance to enhance power generation of glass-glass photovoltaic modules.

Key words: Silicon Heterojunction Solar Cells; Stack-layer Anti-reflection; Optoelectronic Properties; High Bifaciality

0 引言

近年来,基于晶体硅(c-Si)太阳电池的光伏发电成为阳光资源丰富的地区最经济可行和低碳的电力来源。光伏发电的平价上网需要进一步降低光伏系统的度电成本。因此,提高光伏组件单位面积的发电量非常重要[1]。实现这一目的的方法有:提高电池效率[2-3]、单轴跟踪技术、安装反射器、或者通过双面组件从两侧收集光子[4]。随着工业级 c-Si 太阳电池的效率不断接近理论极限,进一步提高效率将需要越来越复杂和昂贵的制程。双面性电池结合双玻组件封装方式不仅可以有效利用太阳光增大发电量,还具有长期湿热可靠性优异的特点[5-6],成为了最有潜力以最低的额外成本增加组件输出功率的选择。

另一方面,硅片成本占电池总成本的 40% 以上,薄片化是目前解决这一问题的直接办法,预计在未来几年,硅片的厚度将降低到 100 μm[7]。具有薄片化优势的硅异质结(SHJ)太阳电池结合了晶体硅电池和硅基薄膜电池的优点,具有钝化效果好、转换效率高、温度系数低等优点[8-11],超薄 SHJ 电池还可以实现柔性组件封装。Taguchi 等人[12]制备了厚度为 98 μm 的 SHJ 太阳电池,开路电压(V_{OC})高达 0.75 V,效率为 24.7%。Hitoshi 等人[13]在厚度仅为 46 μm 的 SHJ 太阳电池上实现了 22% 的效率。但是硅片越薄,光生电流受到的限制越大,中长波段(800 ~ 1 200 nm)的光将直接穿透而不被吸收,因此,如何提高光生电流尤为关键[12]。SiN_x、SiO_2、MgF_2等光学薄膜被广泛用于 SHJ 太阳电池的光管理以减少短波的反射损失[14-17],而关于长波响应的改善,研究者们大多采用高低折射率匹配的背反射层[18-22]。尽管这些光管理方案使短路电流密度(J_{SC})有所增益,但是多适用于单面电池,而且几乎没有研究提及 SHJ 太阳电池的双面发电性。

本文创新性地提出一种 SHJ 太阳电池的叠层减反射结构,在 p 侧(背面)的非电极区域形成 MgF_2/SiO_2/TCO 叠层减反射结构,n 侧(正面)制备 MgF_2或 SiO_2薄膜进一步减少表面反射,使 SHJ 太阳电池双侧入光的 J_{SC}获得较大增益,背面光电转换效率显著提升,从而使电池获得超高双面率(>95%),对提高双玻组件的发电量有极大潜力。

1 实验过程

本文分别在玻璃衬底(2 cm×2 cm×0.2 cm)和 N 型 SHJ 太阳电池衬底(结构:TCO/a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(n)/a-Si:H(i)/a-Si:H(p)/TCO,2 cm×2 cm×150 μm)上制备 MgF_2/SiO_2叠层减反射结构。MgF_2 薄膜由高真空蒸发镀膜设备(18ZHGJGL-136D)在室温下以速率 1+0.2 Å/s 热蒸发制备。利用高真空多靶磁控溅射镀膜设备(8YJXGHJGL-135C),通过射频磁控溅射 SiO_2 薄膜。工作气氛为氩气(Ar),溅射压强、功率和时间分别为 3.0 Pa、100 W、10 min,实验所用的靶材纯度均为 99.999%。薄膜厚度采用探针式轮廓仪(BRUKER DektakXT)测试,MgF_2 薄膜厚度约为 112 nm,SiO_2薄膜厚度为 10 ~ 20 nm。通过紫外可见近红外分光光度计(UV-VIS-NIR,岛津 UV-3600 plus)测试 glass/MgF_2/SiO_2的透射率和反射率,并测试了 SHJ 太阳电池衬底的反射率变化,波长范围为 300 ~ 1 200 nm,步长5 nm。为了观察叠层减反射结构的形貌特征,采用扫描电子显微镜(SEM)测试了制备的叠层减反射结构 MgF_2/SiO_2的 SHJ 太阳电池,并结合能谱仪(EDS)进行了元素分析。

如图 1 所示,文中应用了四种 SHJ 太阳电池结构。为了提升中长波段的光谱响应,首先在 SHJ 太阳电池(结构 A)背面制备了叠层减反射结构 MgF_2/SiO_2,即 SHJ/MgF_2/SiO_2(结构 B)。随后在结构 B 的正面分别制备单层的 MgF_2 和 SiO_2 薄膜,形成 SiO_2/SHJ/MgF_2/SiO_2(结构 C)和 MgF_2/SHJ/MgF_2/

SiO_2(结构 D)。为了探究 SHJ 太阳电池前后的光谱响应变化,分别测试了代表太阳电池的结构 A→结构 C 和结构 A→结构 D 的外量子效率(EQE)变化,测试波长范围为 300 ~ 1 100 nm。采用太阳能电池测试系统(WaveLabs Sinus 220)在标准测试条件(AM 1.5 G,25 ℃,1 000 W/m^2)下,测试了 SHJ 太阳电池的电流-电压(I-V)性能,得到 J_{SC}、V_{OC}、填充因子(FF)和光电转效率(E_{ff}),并以标准 SHJ 太阳电池(结构 A)为参考进行归一化分析。此外,电池的双面率为背面效率与正面效率之比。

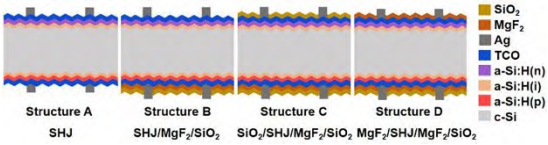

图 1　SHJ 太阳电池采用不同的减反射结构示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of SHJ solar cell with different antireflection structures.

2　结果与讨论

2.1　光学模拟

入射太阳光的路线跟踪模拟通过 PV Lighthouse 的 Wafer ray tracer 进行,Wafer ray tracer 记录每条射线的增益(光生)和损耗(反射、传输、寄生吸收),然后结合蒙特卡罗射线追踪(Monte Carlo ray tracing)与薄膜光学原理得出太阳电池或测试结构在光谱 AM 1.5 G 下的光生电流密度(Photogenerated current density, J_{ph})。本文的光学模拟为理想状态下,忽略了非晶硅薄膜的寄生吸收。

图 2(a)模拟了 TCO/c-Si/TCO 结构的光生电流与硅片厚度的关系,TCO 薄膜厚度被设置为 80 nm,硅片厚度为 50 ~ 200 μm。如图 2(a)所示,J_{ph} 随着硅片厚度的减少而降低,且在硅片厚度小于 90 μm 时,曲线斜率轻微增大,表明厚度越小,光生电流损失越大。图 2(b)为 TCO/c-Si/TCO 结构光吸收率与硅片厚度的关系,假设完美的载流子被收集时,可以反映光谱利用率。结果表明,电池薄片化过程中,J_{SC} 的减少是由于近红外光(IR)吸收率的减少,因为 IR 区域的光发生了逃逸损失和吸收损失(如图 2(c)所示),吸收损耗的主要来源是 TCO 层中的自由载流子吸收(FCA)损耗[19]。

为了减少逃逸光,增大光谱利用率,本文提出双面光管理方案(图 2(d)),太阳光无论从哪一侧入射,该侧的减反射结构都可以减少表面反射损失;同时,如果光从一侧入射,另一侧的减反射结构还能一定程度上增大内部反射,使透过的长波段光重新进入吸收层产生额外的光生载流子。因此,在图 2(a)和图 2(b)的模拟结构上应用了双面 TCO/SiO_2 和 TCO/MgF_2 叠层减反射结构,硅片厚度设置为 150 μm,得出 J_{ph} 随薄膜厚度的变化关系分别如图 2(e)和 2(f)所示,红色区域表示 J_{ph} 增益区间。TCO

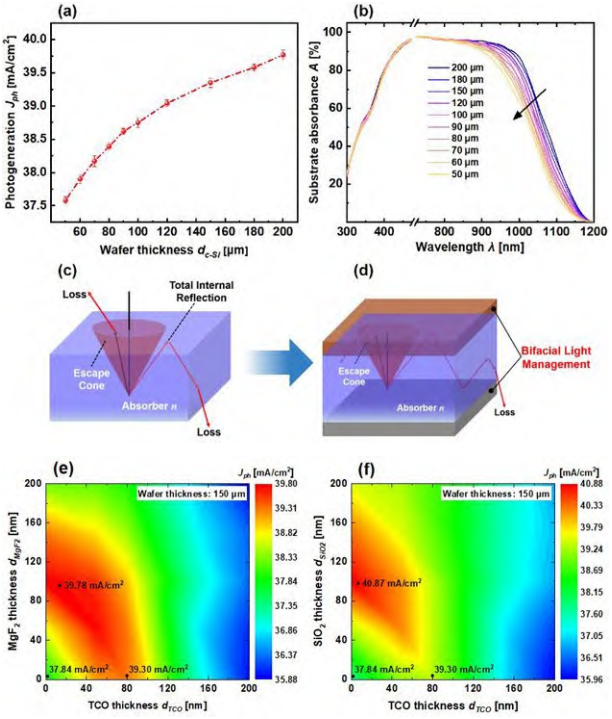

图 2　光学模拟:(a) PV Lighthouse 模拟光生电流密度随单晶硅衬底厚度变化的关系曲线;(b) PV Lighthouse 模拟入射光吸收率随单晶硅衬底厚度变化的关系曲线;(c) 入射光进入电池吸收层的损失示意图;(d) 双面光管理减少入射光损失示意图;采用叠层减反射结构的电池光生电流密度与薄膜厚度的变化关系:(e) TCO/MgF_2;(f) TCO/SiO_2

Fig. 2Optical simulation: (a) The relationship between photogenerated current density (J_{ph}) and crystalline silicon wafer thickness simulated by PV Lighthouse; (b) The curves of absorbance of silicon wafer as a function of thickness simulated by PV Lighthouse; (c) Schematic of the loss of incident light into the cell absorption layer; (d) Schematic diagram of bifacial light management to reduce incident light loss; the change color map of J_{ph} with different film thickness of the stacked antireflection structure is as follows: (e) TCO/MgF_2; (f) TCO/SiO_2

厚度(d_{TCO})为 0 nm,即没有减反射薄膜时,电池的 J_{ph}仅有 37.84 mA/cm^2,d_{TCO}增加为 80 nm,则 J_{ph} = 39.30 mA/cm^2。根据图 2(e),d_{TCO} = 55 ~ 80 nm,d_{MgF2} = 76 ~ 148 nm 为 J_{ph}增益区间,J_{ph}最大可达 39.78 mA/cm^2。采用 TCO/SiO_2结构,虽然增益区间缩小,但 J_{ph}提升比 TCO/MgF_2结构更明显,最大为 40.87 mA/cm^2。根据模拟结果进行实验设计,将在 SHJ 太阳电池中应用 SiO_2和 MgF_2薄膜或叠层结构进行了优化。

2.2 减反射结构的性能及在 SHJ 太阳电池的应用

图 3 为 MgF_2/SiO_2叠层减反射结构在不同衬底上的光学特性曲线,glass/MgF_2/SiO_2叠层减反射结构具有优异的光学透过性(T_{max} = 92.56% @ 575 nm)。这是由于 MgF_2(E_g = 10.8 eV)和 SiO_2(E_g = 4.6 eV)的光学带隙很大,能量高于带隙宽度的光子才可以被吸收,根据公式 $e = hv = 1240/\lambda$,λ >300 nm 的光不会被 MgF_2和 SiO_2吸收,因此 MgF_2/SiO_2叠层在宽波段范围具有高透过率。MgF_2/SiO_2叠层减反射结构具有极低的反射率,300 ~ 1 200 nm 的平均反射率仅为 5.83%,当被沉积在 SHJ 衬底上时(图 3(b)),硅片的反射率从 6.70% 降低至 5.46%,主要是由于短波段(300 ~ 550 nm)的减反射作用。波长范围为 550 ~ 860 nm 的反射率虽然有轻微上升,但 λ > 860 nm 反射率的减小可以将其补偿。因此,MgF_2/SiO_2叠层减反射结构适合用于 SHJ 太阳电池以减少入射光的反射损失。

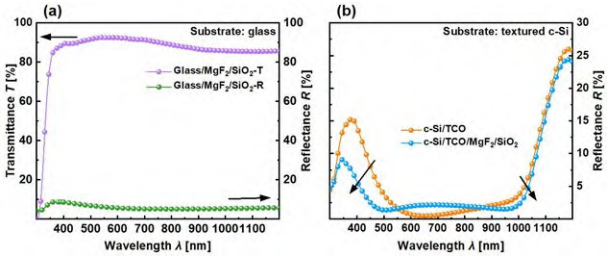

图 3 MgF_2/SiO_2叠层减反射结构的光学性能:(a)玻璃衬底上 MgF_2/SiO_2结构的透射率及反射率;(b)MgF_2/SiO_2结构制备在 c-Si/TCO 衬底上的减反射效果

Fig. 3 Optical properties of MgF_2/SiO_2 stacked antireflective structures: (a) transmission and reflectance of MgF_2/SiO_2 structure on glass substrate; (b) reflectance of c-Si/TCO substrate before and after preparation of MgF_2/SiO_2 structure

为了观察 MgF_2/SiO_2叠层减反射结构及其元素分布,构建了结构 B 的 SHJ 太阳电池,即在 SHJ 太阳电池背面 TCO 层上依次制备了 MgF_2薄膜和 SiO_2薄膜,然后进行了截面 SEM 和 EDS 分析,结果如图 4 所示。SHJ 太阳电池背表面的 TCO 层约为 71.14 nm,紧邻 TCO 表面的则是 114.8 nm 的 MgF_2/SiO_2叠层薄膜,其中,MgF_2薄膜的 Mg、F 元素均匀分布在 TCO 层表面(图 4(e)、图 4(f))。由于薄膜制备在金字塔表面,且 SiO_2层较薄(10 ~ 20 nm),所以与 MgF_2的界线不太明显,但根据图 4(d)的 O 元素分布可以发现,界面处的大部分 O 属于 TCO,而靠近 MgF_2层的表面小部分 O 则源于 SiO_2薄膜。

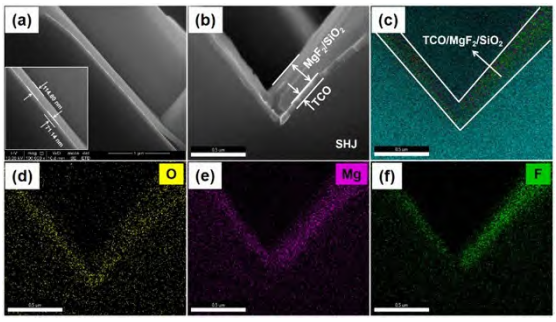

图 4 结构 B(SHJ/MgF_2/SiO_2)的截面 SEM 图和 EDS 元素分析

Fig. 4 The cross-section SEM images and EDS element analysis of structure B (SHJ/MgF_2/SiO_2)

在 SHJ/MgF_2/SiO_2太阳电池的正面再分别制备单层 MgF_2和 SiO_2薄膜,形成结构 C 和 D,并测试了这两种双面光管理后的 EQE 曲线,与对应的初始 SHJ 太阳电池进行对比分析,如图 5 所示。两种结构的 SHJ 太阳电池背面 EQE 均显著提升,平均 EQE(300 ~ 1 100 nm)提高了 2.35%,这主要是由于背面的 MgF_2/SiO_2叠层薄膜优异的减反射效果拓宽了光谱响应。由于初始 SHJ 太阳电池(结构 A)的 n 侧对入射光的短波段进行了充分利用,正面入光时的 EQE 增益比背面入光时小。SiO_2/SHJ/MgF_2/SiO_2电池正面 EQE 提升幅度较小(<1%);MgF_2/SHJ/MgF_2/SiO_2电池提升相对较明显,300 ~ 1 100 nm 的平均 EQE 提升了 1.99%,这主要得益于中长波段 800 ~ 1 100 nm 的平均 EQE 从 88.13% 增至 91.04%。根据上述结果,双面光管理方法可以有效增强 SHJ 太阳电池的光谱响应从而有助于提升 J_{SC}。

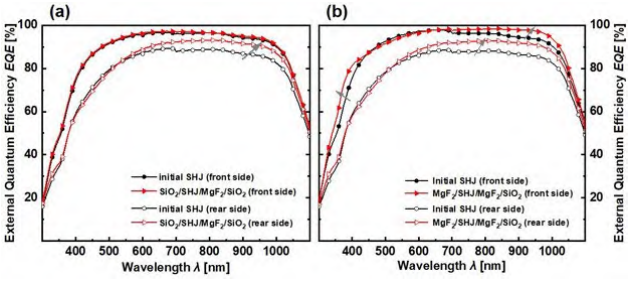

图 5　SHJ 太阳电池应用双面减反射结构前后的 EQE 曲线:(a) 结构 C(SiO_2/SHJ/MgF_2/SiO_2);(b) 结构 D(MgF_2/SHJ/MgF_2/SiO_2)

Fig. 5 The EQE curves of SHJ solar cell before and after applying bifacial antireflection structure: (a) structure C (SiO_2/SHJ/MgF_2/SiO_2); (b) Structure D (MgF_2/SHJ/MgF_2/SiO_2).

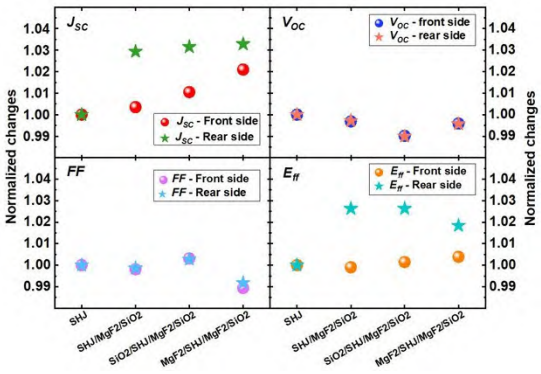

图 6　SHJ 太阳电池进行单/双面光管理后的归一化光电性能变化

Fig. 6 Normalized optoelectronic performance changes of SHJ solar cells with monofacial//bifacial light management

SHJ 太阳电池采用单面或双面减反射结构的光电性能相对变化如图 6 所示。电池正背面的平均 J_{SC} 和 E_{ff} 的绝对变化和电池的最高双面率呈现在表 1 中。由于减反射薄膜均制备在 SHJ 太阳电池的非栅线区域的 TCO 表面,所以 V_{OC} 和 FF 几乎不受影响,仅在 0.99% 范围内小幅波动。在 SHJ 太阳电池背面制备双层减反射结构后,中长波段的 EQE 增加,SHJ/MgF_2/SiO_2 电池的背面 J_{SC} 显著提升了 2.94%,当光从正面入射时,电流轻微上升。在电池正面的 TCO 层表面沉积一层减反射薄膜后,表面反射损失减少,短波段的光谱响应增加,因此,沉积 SiO_2/SHJ/MgF_2/SiO_2 叠层结构的太阳电池和沉积 MgF_2/SHJ/MgF_2/SiO_2 叠层结构的太阳电池正面 J_{SC} 分别相对提高了 1.12% 和 2.10%,背面入光时则分别提升了 3.15% 和 3.31%,与 EQE 分析相符。

由于电池的背面短路电流显著提升,SHJ/MgF_2/SiO_2 太阳电池、SiO_2/SHJ/MgF_2/SiO_2 太阳电池和 MgF_2/SHJ/MgF_2/SiO_2 太阳电池的背面 E_{ff} 分别相对提升 2.63%、2.53% 和 1.84%(图 6)。正面的 E_{ff} 增益较小,故而三种太阳电池的平均双面率分别绝对提升了 2.61%、2.10% 和 1.43%。其中,SHJ/MgF_2/SiO_2 的双面率提升最明显,最高达到了 95.16%,具有良好的双面发电性能。由此得出,MgF_2/SiO_2 叠层减反射结构不仅可以显著拓宽太阳电池的光谱利用率,增大短路电流,还可以显著提高太阳电池的背面转换效率,最终获得高双面率。

表 1　SHJ 太阳电池进行单/双面光管理后的 J_{SC} 和 E_{ff} 绝对变化及电池双面率

Table 1 Absolute changes of J_{SC} and E_{ff} and bifacility of SHJ cells with monofacial/bifacial light management

Type	Front		Rear		Bifacility [%]
	ΔJ_{SC} [mA/cm^2]	ΔE_{ff} [%]	ΔJ_{SC} [mA/cm^2]	ΔE_{ff} [%]	
A	——	——	——	——	92.66
B	0.14	−0.04	1.11	0.51	95.16
C	0.44	−0.04	1.18	0.48	94.57
D	0.85	0.15	1.26	0.35	94.02

3　结论

本文从模拟和实验两方面对异质结太阳电池的表面光管理进行研究,晶体硅衬底的厚度越小,太阳电池的光生电流越小,而辅以 MgF_2 和 SiO_2 减反射薄膜,可以有效提高超薄晶硅太阳电池的光生电流。本论文将这两种材料构建的单面和双面减反射结构应用于 SHJ 太阳电池,器件的表面反射率降低至 5.46%,SHJ/MgF_2/SiO_2 电池的背面光谱响应显著提升 2.35%,J_{SC} 平均提升高达 1.11 mA/cm^2,从而使 E_{ff} 平均提升 0.51%。在电池正面沉积单层 MgF_2 和 SiO_2 薄膜还能小幅提升正面的 J_{SC}。此方法具有两个优势:1)降低 SHJ 太阳电池的光学损耗,拓宽光谱响应,有助于解决 SHJ 太阳电池柔性化的电流限制问题;2)显著提升了 SHJ 太阳电池的双面发电特

性。SHJ 太阳电池的最佳双面率达高达95.16%，对提升双玻组件的发电量具有极大的应用价值。

参考文献：

[1] Kopecek R, Libal J. Towards large-scale deployment of bifacial photovoltaics [J]. Nature Energy, 2018, 3: 443-446.

[2] Yu J, Li J, Zhao Y, et al. Copper metallization of electrodes for silicon heterojunction solar cells: Process, reliability and challenges [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2021, 224: 110993.

[3] 余友林, 韩安军, 刘文柱, 等. 硅异质结太阳电池光注入性能增益分析 [J]. 功能材料与器件学报, 2022, 28(03): 253-259.

[4] Sun X, Ryyan K, Chris D, et, al. Optimization and performance of bifacial solar modules: A global perspective [J]. Applied Energy, 2018, 212: 1601-1610.

[5] Baiamonte M, Colletti C, Ragonesi A, et, al. Durability and Performance of Encapsulant Films for Bifacial Heterojunction Photovoltaic Modules [J]. Polymers, 2022, 14(5): 1052.

[6] Sulas-Kern D, Owen-Bellini M, Ndione P, et, al. Electrochemical degradation modes in bifacial silicon photovoltaic modules [J]. Progress in Photovoltaics Research and Applications, 2021, 30(8): 1-11.

[7] International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) Results 2021 [EB/OL]. https://itrpv.vdma.org/, 2022.

[8] Jean-Paul K, José A, Aurore B, et al. Revisiting the theory and usage of junction capacitance: application to high efficiency amorphous/crystalline silicon heterojunction solar cells [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2015, 135: 8-16.

[9] Li J, Yu J, Chen T, et al. In-situ formation of indium seed layer for copper metallization of silicon heterojunction solar cells [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2020, 204: 110243.

[10] Yu J, Bian J, Liu Y, et al. Patterning and formation of copper electroplated contact for bifacial silicon hetero-junction solar cell [J]. Solar energy, 2017, 146: 44-49.

[11] 柳 琴, 刘 成, 叶晓军, 等. 硅表面钝化及对异质结太阳电池特性的影响 [J]. 功能材料与器件学报, 2012, 18(01): 40-45.

[12] Taguchi M, Yano M, Tohoda S, et al. 24.7% Record Efficiency HIT Solar Cell on Thin Silicon Wafer [J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2014, 4(1): 96-99.

[13] Hitoshi S, Toshiki O, Yoshiki S, et al. Potential of very thin and high-efficiency silicon heterojunction solar cells [J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2019, 27(12): 1061-1070.

[14] Yu J, Zhang L, Chen T, et al. Dual-Function Light-Trapping: Selective Plating Mask of SiO_x/SiN_x Stacks for Silicon Heterojunction Solar Cells [J]. Solar RRL, 2019, 3: 1800261.

[15] 周 杰, 俞 健, 马忠权, 等. SHJ 太阳电池叠层减反结构及光电性能研究 [J]. 太阳能学报, 2020, 41(2): 303-309.

[16] Zhang D, Digdaya I A, Santbergen R, et al. Design and fabrication of a SiO_x/ITO double-layer anti-reflective coating for heterojunction silicon solar cells [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2013, 117: 132-138.

[17] Herasimenka S, Dauksher W, Boccard M, et al. ITO/SiO_x:H stacks for silicon heterojunction solar cells [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2016, 158: 98-101.

[18] Kim S, Jung J, Wehrspohn R, et, al. All-Room-Temperature Processed 17.25%-Crystalline Silicon Solar Cell [J]. ACS Applied Energy Materials, 2020, 3(4): 3180-3185.

[19] Mitra S, Ghosh H, Saha H, et, al. Improvement of photon management in partial rear contact solar cells using a combination of DBR and Mie scatterers [J]. Optics Communications, 2017, 397: 1-9.

[20] Barugkin C, Beck F, Catchpole K, et, al. Diffuse reflectors for improving light management in solar cells: a review and outlook [J]. Journal of Optics, 2017, 19: 014001.

[21] Banerjee S, Mandal S, Dhar S, et al. Nanomirror-Embedded Back Reflector Layer (BRL) for Advanced Light Management in Thin Silicon Solar Cells [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2019, 58(28): 12678-12686

[22] Duan W, Bittkau K, Lambertz A, et, al. Improved Infrared Light Management with Transparent Conductive Oxide/Amorphous Silicon Back Reflector in High-Efficiency Silicon Heterojunction Solar Cells [J]. Solar RRL, 2021, 5(3): 1-7.