

基于三角形光栅结构的薄膜晶硅/PEDOT:PSS 异质结太阳电池的陷光设计

刘昭浪^{1,2}, 王莹³, 夏雷¹, 盛江², 高平奇², 叶继春²

(1. 上海大学材料科学与工程学院, 上海 200072; 2. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 宁波 315201;
3. 浙江省宁波中学, 宁波 315100)

摘 要: 针对薄膜硅的光学管理问题,通过有限元方法求解麦克斯韦基本方程组,研究基于一维三角形光栅结构对电池的光吸收率、光电流密度(J_{ph})和电场强度分布的影响,设计并优化适合 $2\ \mu\text{m}$ 硅/PEDOT:PSS 系统的双面一维三角形光栅结构,有效提升薄膜硅的光学吸收,并能与 PEDOT:PSS 形成优异的异质结,基于此结构的薄膜硅/PEDOT:PSS 异质结太阳电池的效率可超过 15%,展现了高效柔性薄膜硅/PEDOT:PSS HSCs 的可行性。

关键词: 硅/PEDOT:PSS HSCs; 三角形光栅结构; 光吸收率; 结构设计; 数值分析

中图分类号: O436.2

文献标识码: A

0 引 言

目前,基于非掺杂发射极和选择电荷传输层的晶硅异质结太阳电池已成为研究热点,电池光电转换效率超过 20%^[1,2]。其中,p 型聚合物聚 3,4-乙撑二氧噻吩-聚苯乙烯磺酸(PEDOT:PSS)薄膜因具有柔性、高稳定性、高导电率、高透过率和易加工等优点,使硅/PEDOT:PSS HSCs 兼具无机半导体和有机半导体的优势,开辟了一条高效光伏技术的新途径^[3-5]。目前硅/PEDOT:PSS HSCs 效率已超过 16%,展示了巨大的应用前景^[6]。

在硅电池中,晶硅片生产成本占总成本的 30%~40%,减小硅片的厚度不仅可降低电池成本^[7],还可减少硅片的体复合,获得更大的开路电压(V_{oc})^[8-10],实现高效的电池器件。但晶硅的光吸收能力较弱,在近红外光的吸收率只有约 50%,并且随厚度减小,对光的吸收会降低。陷光结构是提高光吸收的最有效方式之一,如基于纳米线^[11,12]、纳米笔^[13]等结构的薄膜晶硅的反射率可降至 1.5%,但其不易与 PEDOT:PSS 薄膜形成共形接触,界面复合严重。一维(1D)光栅结构作为高效的陷光结

构,在硅正面能有效地减少光反射^[14,15];在硅背面能有效反射透射光^[16]。此外,1D 光栅结构的比表面积小、坡度较小,有利于 PEDOT:PSS 薄膜完全覆盖,减少界面复合。

本文通过对比薄膜硅/PEDOT:PSS HSCs 中不同光栅结构,优化设计最优的双面 1D 三角形光栅结构,实现薄膜硅的最佳吸收,获得高效薄膜硅/PEDOT:PSS HSCs。

1 模型和计算方法

图 1 为模拟计算中薄膜硅/PEDOT:PSS HSCs 结构示意图,即 $90\ \text{nm}$ -PEDOT:PSS/ $2\ \mu\text{m}$ -硅/ $100\ \text{nm}$ -AZO/Ag,其中 PEDOT:PSS 为发射极;薄膜硅层为光吸收层; $100\ \text{nm}$ 的 AZO 为电子的传输层,还可减低 Ag 衬底的光学寄生吸收损耗;而 Ag 衬底是背面电极,也作为背反射层,对透射光具有极强的反射作用。重要的结构参数如图,包括顶部/底部光栅的周期($P_{\text{top}}/P_{\text{rear}}$)和高度($h_{\text{top}}/h_{\text{rear}}$),填充比为 1。在改变结构参数时,保持单位面积内硅的厚度不变,即 $d_{\text{Si}} = 2\ \mu\text{m} - h_{\text{top}} + h_{\text{rear}}$ 。

收稿日期: 2017-02-14

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(21403262); 宁波市国际合作项目(2015D10021); 宁波市自然科学基金(2015A610040); 宁波市自然科学基金(2015A610033); 宁波市“科技新苗培养计划”

通信作者: 盛江(1984—),男,博士、副研究员,主要从事有机无机异质结太阳电池方面的研究。shengjiang@nimte.ac.cn

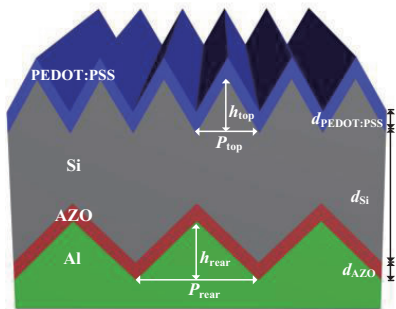


图1 薄膜硅/PEDOT:PSS HSCs 多层结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of thin film Si/PEDOT:PSS HSCs

薄膜硅/PEDOT:PSS HSCs 不仅能降低电池的成本,还使电池轻柔化,扩大电池的应用范围。单晶薄膜硅由中压等离子体沉积系统制备,该系统具有沉积速度快、温度低和转化效率高等特点,化学产率是西门子法 2 倍以上($>60\%$)^[17]。由于传统随机金字塔结构的平均尺寸较大(μm 级),且其绒面结构不易与 PEDOT:PSS 薄膜形成良好的共形接触,导致较强的界面复合。而基于 $2\mu\text{m}$ 的单晶薄膜硅的小尺寸的正面光栅结构,不仅有优异的陷光能力,还使 PEDOT:PSS 薄膜与硅形成良好的共形接触,形成良好的异质结。

利用有限元方法,结合精确的数值模拟计算,通过求解麦克斯韦基本方程组,入射光垂直于光栅顶部(z 方向)入射,波长范围为 $300\sim 1150\text{ nm}$,计算可得到 1D 三角形光栅结构的吸收率和反射率等光学性能。在 AM1.5G 标准太阳光谱下,对吸收效率积分可得到 J_{ph} 。此外,在模拟过程中,只有两种极化方向被考虑,即:电场和光栅平面平行(TE)和电场和光栅平面垂直(TM),用平均值来近似代替真实值,并且两边采用周期性边界条件(PBC),上下边界采用完美吸收层(PML)。

2 数值模拟和分析

2.1 顶部 1D 三角形光栅的减反性能

当入射光照射到薄膜硅/PEDOT:PSS HSCs 时,一部分光会被表面反射,反射率越大,光损失越多。硅抛光面的反射率超过 30% ,覆盖一层 PEDOT:PSS 薄膜后,因 PEDOT:PSS 薄膜具有一定的减反作用,反射率可降低至约 20% 。光照射到 1D 三角形光栅表面时,存在散射和反射效应。空气、共形 PEDOT:PSS 和 1D 三角形光栅形成折射率

逐渐变大的减反层,减少了光反射损失^[18]。光栅结构对光波的散射,延长了光子在薄膜硅中的光程,增加了光吸收的几率。此外,散射叠加的光波可在光栅表面发生干涉效应,从而形成驻波,产生慢光效应,降低光在薄膜硅层中的传播速度,即再次增加薄膜硅对光的吸收时间。

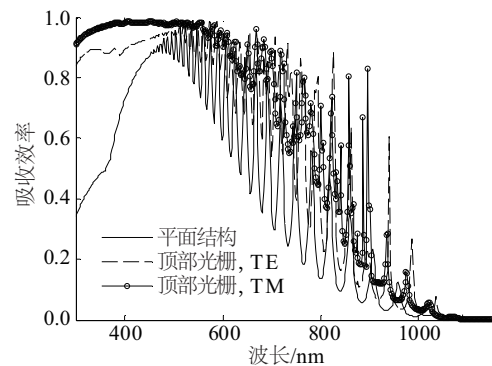


图2 基于顶部 1D 三角形光栅和平面的薄膜硅/PEDOT:PSS HSCs 的光吸收率

Fig. 2 Optical absorption of Si/PEDOT:PSS HSCs with top 1D triangular gratings

首先,研究顶部 1D 三角形光栅结构(周期和结构)对整个系统光吸收的影响。当 $P_{\text{top}} > 400\text{ nm}$ 、 $h_{\text{top}} > 200\text{ nm}$ 时, J_{ph} (TE) 超过 24 mA/cm^2 ; 同时,当 $P_{\text{top}} > 250\text{ nm}$ 、 $h_{\text{top}} > 150\text{ nm}$ 时, J_{ph} (TM) 超过 26 mA/cm^2 ; 光栅的深度对 J_{ph} 影响较大。考虑 $(\text{TE}+\text{TM})/2$ 作为真实值衡量,当 $P_{\text{top}}=500\text{ nm}$ 、 $h_{\text{top}}=710\text{ nm}$ 时,获得最佳值,即为顶部 1D 三角形光栅的最佳周期和深度。图 2 为基于周期 500 nm 和深度 710 nm 的顶部结构 HSC 和平面 HSC 在 $300\sim 1150\text{ nm}$ 范围的光吸收率,在 TE 和 TM 模式下,顶部结构 HSC 的光吸收率都远大于平面 HSC,特别是在 $300\sim 450\text{ nm}$ 和 $550\sim 900\text{ nm}$ 波段,电池的光吸收率明显增加。因此,顶部 1D 三角形光栅结构对入射光的减反作用、延长光程及慢光效应,增加了薄膜硅光吸收层对光的吸收作用。

2.2 底部 1D 三角形光栅的反射性能

单晶硅作为间接带隙半导体, $2\mu\text{m}$ 单晶硅无法对波长较长的近红外光进行完全吸收,导致较多的近红外光会透过吸收层,造成严重的光学损失。底部 1D 三角形光栅可有效地反射入射光,使得单晶硅吸收层进行二次吸收,增加光的利用率^[18]。底部 1D 三角形光栅的周期和深度在 TE 和 TM 模式下对

薄膜硅/PEDOT:PSS HSCs 的 J_{ph} 的影响。当 1D 三角形光栅 $P_{rear} > 500 \text{ nm}$ 、 $100 \text{ nm} < h_{rear} < 400 \text{ nm}$ 时, 在 TE 模式下 J_{ph} 超过 25 mA/cm^2 ; 而由于 TM 模式 J_{ph} 分布广, 不同深度的光栅均取得较好的 J_{ph} (超过 23 mA/cm^2)。但考虑到 $(TE+TM)/2$ 值, J_{ph} 主要受底部三角形光栅深度的影响, 即较浅的结构具有较好反射效果。因此, 底部 1D 三角形光栅的最佳周期是 1000 nm 、最佳深度是 170 nm 。图 3 为基于周期 1000 nm 和深度 170 nm 的底部结构 HSC 和平面 HSC 在 $300 \sim 1150 \text{ nm}$ 波段的光吸收率, 在 TE 和 TM 模式下, 底部结构 HSC 的吸收率在 $550 \sim 900 \text{ nm}$ 近红外波段远大于平面 HSC 的吸收率; 但是在 $400 \sim 500 \text{ nm}$ 波段处, 平面 HSC 的吸收率略大于底部结构 HSC 的, 由于底部光栅结构少了一部分的硅吸收层, 则出现了吸收率略小于平面 HSC 的情况。因此, 底部 1D 三角形光栅结构对近红外光具有较强的反射作用, 使硅能对反射的近红外光进行二次吸收, 提高器件对光的利用率。

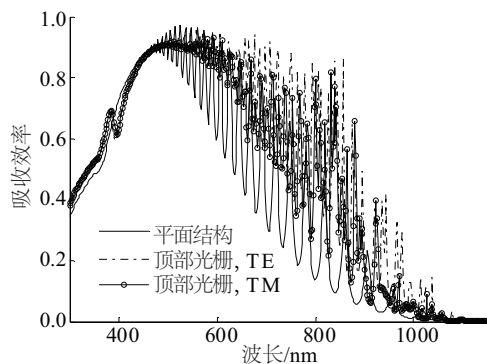


图3 基于底部1D三角形光栅和平面的薄膜硅/PEDOT:PSS HSCs的光吸收率

Fig. 3 Optical absorption of Si/PEDOT:PSS HSCs with rear 1D triangular gratings

2.3 双面1D三角形光栅的光吸收性能

基于顶部和底部 1D 三角形光栅分别对薄膜硅的光学管理作用的研究, 优化设计双面的 1D 三角形光栅结构, 使得薄膜硅/PEDOT:PSS HSCs 充分吸收光, 得到高效光伏器件。双面结构分别为: 顶部三角形光栅周期为 500 nm 、深度为 710 nm ; 底部三角形光栅周期为 1000 nm 、深度为 170 nm 。图 4 为基于双面光栅的薄膜硅/PEDOT:PSS HSCs 和平面 HSC 在 $300 \sim 1150 \text{ nm}$ 波段的光吸收率, 在 TE 模式和 TM 模式下, 双面结构 HSC 在全波段 ($300 \sim 1150 \text{ nm}$)

的光吸收率都大于平面 HSC 的光吸收率, 特别是在 $300 \sim 450 \text{ nm}$ 和 $550 \sim 900 \text{ nm}$ 波段, 光吸收率增加明显。需要强调的是, 在 $300 \sim 600 \text{ nm}$ 波段处, TM 模式下双面 HSC 的吸收率快接近 100% 。图 5 为基于顶部、底部和双面 1D 三角形光栅的薄膜硅/PEDOT:PSS HSCs 的光吸收率相较于平面 HSC 的增加量, 三种光栅结构都增强了对光的管理作用。通过顶部三角形光栅的减反和光散射作用、底部三角形光栅的反射作用, 减小表面的反射率、增加光程, 可有效提高双面三角形光栅硅吸收层对光的吸收, 即增加电池的 J_{ph} 。

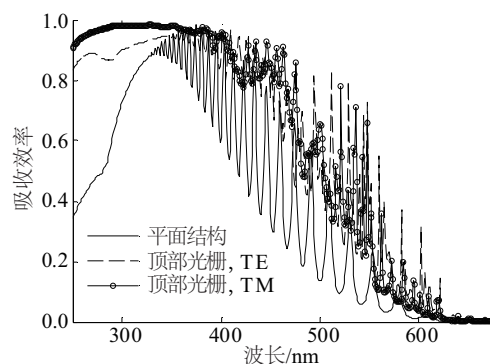


图4 基于双面1D三角形光栅和平面的薄膜硅/PEDOT:PSS HSCs的TE、TM模式吸收率

Fig. 4 Optical absorption of Si/PEDOT:PSS HSCs with double-sided 1D triangular gratings in TE and TM modes

表 1 为基于平面、顶部、底部和双面 1D 三角形光栅结构的薄膜硅/PEDOT:PSS HSCs 的 J_{ph} , 基于 $2 \mu\text{m}$ 单晶薄膜的平面 HSC 的 J_{ph} 理论值是 19.34 mA/cm^2 。从表 1 中可看出, 具有光栅结构 HSCs 的电流密度都大于平面 HSC 的电流密度, 基于顶部、

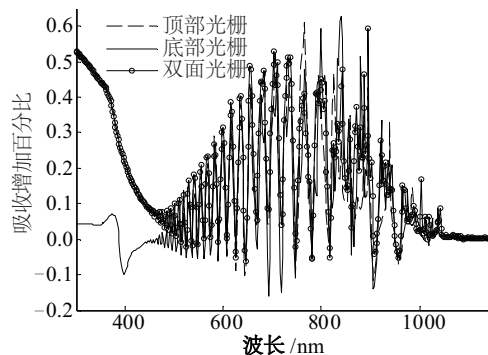


图5 基于顶部、底部和双面1D三角形光栅的薄膜硅/PEDOT:PSS HSCs的光吸收率增加量

Fig. 5 Increment of optical absorption of Si/PEDOT:PSS HSCs with different grating structures (top, rear and double-side)

底部和双面 1D 三角形光栅的薄膜硅/PEDOT:PSS HSCs 的 J_{ph} ($(TE+TM)/2$) 分别为 25.73、24.66 和 26.95 mA/cm^2 , 比平面 HSC 的 J_{ph} 分别提高 33.04%、27.51% 和 39.35%。由此可知, 三角形光栅结构能有效地对光进行管理, 提高光的利用率, 增加薄膜硅/PEDOT:PSS HSCs 器件的 J_{ph} 。

表 1 基于平面、顶部、底部和双面 1D 三角形光栅结构的薄膜硅/PEDOT:PSS HSCs 的 TE、TM 和 $(TE+TM)/2$ 模式的 J_{ph}

Table 1 Photocurrent densities of Si/PEDOT:PSS HSCs with different structures in TE, TM and $(TE+TM)/2$ modes

模式	$J_{ph}/\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$			
	平面	顶部	底部	双面
TE	19.34	24.75	25.41	26.65
TM	19.34	26.72	23.72	27.24
$(TE+TM)/2$	19.34	25.73	24.66	26.95

2.4 电场分布特征

在此模拟计算中, 采用有限元分析法分析 1D 三角形光栅的陷光机制, 计算 4 种结构 (平面结构, 顶部、底部和双面 1D 三角形光栅结构) 在各个吸收率最佳的峰位处的波长入射时单晶硅层的吸收分布, 图 6 为在 TE 和 TM 模式下, 平面结构, 顶部、底部和双面 1D 三角形光栅结构的薄膜硅的电场分布, 平面结构形成的是典型的 Fabry-Perot 共振, 在相同的深度, 吸收强度是一致的, 且对光的吸收较弱。在 1D 三角形光栅结构的作用下, 光被有效地束缚在单晶硅吸光层, 具有聚光作用, 吸收强度增强明显, 有很好的局域效应。从图 6b、图 6c、图 6e 和图 6f 中可明显看出, 单面光栅结构单晶硅吸光层在 TE 模式光的聚光效果比 TM 模式光的聚光效果差, 由此可知, 1D 三角形光栅在其轴向的陷光作用略弱于垂直方向上的陷光作用。图 6d 反映了双面光栅结构单晶硅的 TE 模式的吸收强度明显大于单面光栅结构的吸收强度, 在轴向上也起到了较优异的陷光作用, 但仍略小于 TM 模式的电场强度。由此可知, 光栅结构单晶硅吸光层的吸收强度分布结果与图 4 的光吸收系数和表 1 的 J_{ph} 结果一致, 进一步验证了 1D 三角形光栅结构的光吸收增强效应, 即具有优异的光学管理能力。

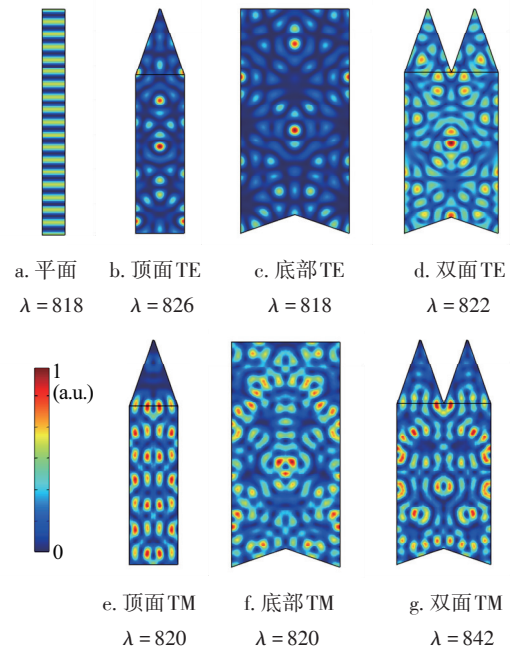


图 6 基于平面(a)、顶部、底部和双面结构的薄膜硅的电场分布(TE模式为b、c和d; TM模式为e、f和g)

Fig. 6 Electric field distribution of c-Si thin film with different structure: planar(a), top, rear and double-sided 1D triangle grating in TE mode (b, c, d) and TM mode (e, f, g)

2.5 电池参数分析

为进一步体现三角形光栅的优势, 本文对 HSCs 的电学参数进行了研究。通过求解泊松方程和载流子输运方程得到电池稳态的电势和载流子等一系列的电学参数分布。其中, 硅掺杂浓度为 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, PEDOT:PSS 的功函数为 5.0 V。图 7 和图 8 分别为 4 种结构在最佳参数时的外量子效率谱 (EQE) 和电流-电压 (J - V) 特征曲线, 表 2 给出电学参数 (短路电流密度 J_{sc} 、开路电压 V_{oc} 、填充因子 FF 和转换效率 η) 的具体数值。相比于平面 HSC, 顶部结构 HSC 的 J_{sc} 增加了 5.98 mA/cm^2 , 这是由于顶部结构在全波段 (特别是在紫外和可见波段) 对光的减反作用, 增加了薄膜硅对该波段光的吸收。而由于底部结构是对透射光 (主要是近红外波段) 进行反射, 其对 J_{sc} 的贡献没有顶部结构的明显, 只有 4.6 mA/cm^2 。双面结构 HSC 的 J_{sc} 可达到 25.52 mA/cm^2 , 相比于平面 HSC 的 18.19 mA/cm^2 , 增加了 7.33 mA/cm^2 , 体现了双面光栅结构优异的陷光效果。对比前面的光学分析可知, 不同光栅结构对电池的 J_{ph} 和 J_{sc} 的贡献趋势相同。

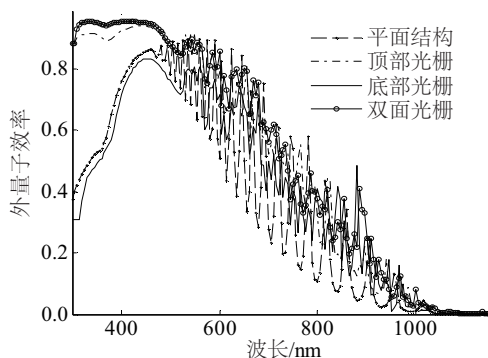


图7 基于平面、顶部、底部和双面1D三角形光栅结构的薄膜硅/PEDOT:PSS HSCs的外量子效率

Fig. 7 External quantum efficiency of Si/PEDOT:PSS HSCs with different structures

表2为基于平面、顶部、底部、双面1D三角形光栅结构以及最佳参数设计的薄膜硅/PEDOT:PSS HSCs的光电参数,平面HSC的 V_{oc} 为584 mV,而顶部和底部三角形光栅HSCs的只有578和577 mV,由于光栅结构的表面积较大,增加了表面复合损失,从而使单面光栅HSCs的 V_{oc} 有所降低。而双面结构HSCs的 V_{oc} 也可达584 mV,由于陷光作用对电流的增益填补了表面复合增加的损耗,所以 V_{oc} 与平面HSC相比基本保持不变。最终,基于4种结构的硅/PEDOT:PSS HSCs的 η 分别为8.65%(平面)、11.02%(顶部光栅)、10.46%(底部光栅)和11.82%(双面光栅),相比于平面结构,双面光栅HSC η 提高了36%。

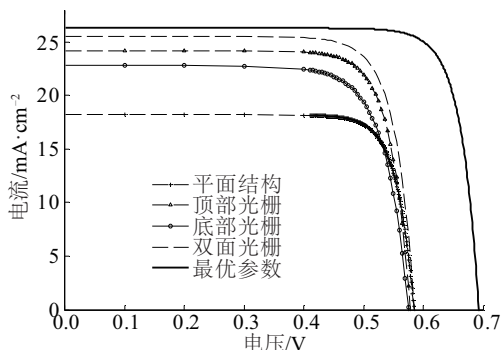


图8 基于平面、顶部、底部、双面1D三角形光栅结构以及最佳参数设计的薄膜硅/PEDOT:PSS HSCs的 J - V 曲线

Fig. 8 J - V curves of Si/PEDOT:PSS HSCs with different structures

在此电学模拟计算中的选用的参数都是根据

现有一般条件选取的,若将参数调至实验室最佳,即硅衬底的掺杂浓度为 $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, PEDOT:PSS的功函数增加至5.05 eV,表面复合速率降至100 cm/s,电池的 V_{oc} 能达到693 mV, η 可超过15%。因此,基于光栅结构的硅/PEDOT:PSS HSCs具有极大的发展潜力。

表2 基于平面、顶部、底部、双面1D三角形光栅结构以及最佳参数设计的薄膜硅/PEDOT:PSS HSCs的光电参数

Table 2 Summary of photovoltaic parameters of Si/PEDOT:PSS HSCs with different structures

项目	$J_{sc}/\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$	V_{oc}/V	$FF/\%$	$\eta/\%$
平面结构	18.19	0.584	81.42	8.65
顶部光栅	24.17	0.578	79.02	11.04
底部光栅	22.79	0.577	79.54	10.46
双面光栅	25.52	0.584	79.30	11.82
最佳参数	26.30	0.693	82.50	15.03

3 结 论

本文针对超薄单晶硅吸光层,设计了双面1D三角形光栅结构,主要对光吸收率、 J_{ph} 和电场强度分布进行系统研究。通过有限元计算分析,不同尺寸下三角形光栅能有效地对光进行减反、散射和反射作用,从而对光进行高效管理。周期500 nm和深度710 nm的顶部1D三角形光栅对全光谱都有较好的减反和散射作用;周期1000 nm和深度170 nm的底部1D三角形光栅在550~900 nm近红外波段具有优异的反射作用。基于双面光栅结构的薄膜单晶硅/PEDOT:PSS HSCs获得了较大的 J_{ph} ,达到26.95 mA/cm²,展现了获得高效柔性HSCs的可能。

[参考文献]

- [1] Bullock J, Hettick M, Geissbühler J, et al. Efficient silicon solar cells with dopant-free asymmetric heterocontacts[J]. Nature Energy, 2016, 1: 15031.
- [2] Zielke D, Niehaves C, Lövenich W, et al. Organic-silicon solar cells exceeding 20% efficiency[J]. Energy Procedia, 2015, 77: 331—339.
- [3] Sheng Jiang, Fan Ke, Wang Dan, et al. Improvement of the SiO₂ passivation layer for high-efficiency Si/PEDOT:

- PSS heterojunction solar cells [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(18): 16027—16034.
- [4] Wang Dan, Sheng Jiang, Wu Sudong, et al. Tuning back contact property via artificial interface dipoles in Si/organic hybrid solar cells [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(4): 043901.
- [5] Sheng Jiang, Wang Dan, Wu Sudong, et al. Ideal rear contact formed via employing a conjugated polymer for Si/PEDOT: PSS hybrid solar cells [J]. *RSC Advances*, 2016, 6(19): 16010—16017.
- [6] He Jian, Gao Pingqi, Yang Zhenhai, et al. Silicon/organic hybrid solar cells with 16.2% efficiency and improved stability by formation of conformal heterojunction coating and moisture-resistant capping layer [J]. *Advanced Materials*, 2017, 1606321.
- [7] 卢景霄, 张宇翔, 王海燕, 等. 硅太阳能电池稳步走向薄膜化 [J]. *太阳能学报*, 2006, 27(5): 444—450.
- [7] Lu Jingxiao, Zhang Yuxiang, Wang Haiyan, et al. The trend of changing silicon wafer-based solar cells gradually into thin films [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2006, 27(5): 444—450.
- [8] Chowdhury F I, Alnuaimi A, El-Atab N, et al. Enhanced performance of thin-film amorphous silicon solar cells with a top film of 2.85 nm silicon nanoparticles [J]. *Solar Energy*, 2016, 125: 332—338.
- [9] Cariou R, Chen W, Cosme-Bolanos I, et al. Ultrathin PECVD epitaxial Si solar cells on glass via low-temperature transfer process [J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2016, 24: 1075—1084.
- [10] Wang Shuang, Weil B D, Li Yanbin, et al. Large-area free-standing ultrathin single-crystal silicon as processable materials [J]. *Nano Letters*, 2013, 13(9): 4393—4398.
- [11] He Jian, Gao Pingqi, Liao Mngdun, et al. Realization of 13.6% efficiency on 20 μm thick Si/organic hybrid heterojunction solar cells via advanced nanotexturing and surface recombination suppression [J]. *ACS Nano*, 2015, 9(6): 6522—6531.
- [12] 黄睿. 硅纳米线的制备及其在新型太阳能电池中的应用 [D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [12] Huang Rui. Fabrication of Si nanowires and their application in novel solar cells [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [13] He Jian, Yang Zhenhai, Liu Peipei, et al. Enhanced electro-optical properties of nanocone/nanopillar dual-structured arrays for ultrathin silicon/organic hybrid solar cell applications [J]. *Advanced Energy Materials*, 2016, 6(8): 1501793—1501801.
- [14] Guo Xiaowei, Liu Jia, Zhang Shouqiang. Design of light trapping structures for ultrathin solar cells [J]. *Photonics and Optoelectronics*, 2014, 3: 66—69.
- [15] 张杰. 有机-硅纳米结构光伏电池的光电性质及界面研究 [D]. 苏州: 苏州大学, 2014.
- [15] Zhang Jie. Charge transport properties of organic/inorganic Si hybrid solar cells [D]. Soochow: Soochow University, 2014.
- [16] Shen Hongjun, Lu Huidong, Cheng Xuezhen. Back reflectors of thin-film silicon solar cells consisting of one-dimensional diffraction gratings and one-dimensional photonic crystal [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2012, 33(6): 633—639.
- [17] Wu Sudong, Kambara Makoto, Yoshida Toyonobu. Superhigh-rate epitaxial silicon thick film deposition from trichlorosilane by mesoplasma chemical vapor deposition [J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2013, 33(2): 433—451.
- [18] Brongersma M L, Cui Yi, Fan Shanhui. Light management for photovoltaics using high-index nanostructures [J]. *Nature Materials*, 2014, 13(5): 451—460.

DESIGN OF TRIANGULAR GRATINGS FOR THIN FILM SI/PEDOT:PSS HETEROJUNCTION SOLAR CELLS

Liu Zhaolang^{1,2}, Wang Ying³, Xia Lei¹, Sheng Jiang², Gao Pingqi², Ye Jichun²

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. Ningbo Institute of Material Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China;

3. Ningbo High School, Ningbo 315100, China)

Abstract: Flexible thin-film crystalline silicon/poly(3,4-ethylenedioxythiophene): poly(styrene sulfonate) (PEDOT:PSS) heterojunction solar cells (HSCs) have attracted much attention, due to presenting the both merits of organic semiconductor (i.e. easy- manufacture and low- cost) and inorganic semiconductor with the excellent photoelectric properties. The indirect semiconductor c-Si has a low optical absorption coefficient, so the light-trapping structures on the silicon surface are need to improve the photocurrent density (J_{ph}) of HSCs. In this paper, for improving the optical adsorption of c-Si thin film (2 μm), solving the Maxwell's basic equations by finite element method, the influence of one-dimensional (1-D) triangular gratings on the optical absorption, photocurrent density and electric field distribution of Si/PEDOT:PSS HSCs are investigated systematically. Double-sided 1-D triangular grating is designed to improve the light harvesting in the thin film Si/PEDOT:PSS HSCs, receiving a high power conversion efficiency of over 15%. Therefore, 1-D triangular gratings is used to effectively manage the optical absorption of c-Si thin-film, furthermore, the conformal heterojunction of Si/PEDOT:PSS is easily formed as a basis for the high efficiency flexible HSCs.

Keywords: Si/PEDOT:PSS HSCs; triangular gratings; light absorption; structural design; numerical analysis