

彩色多晶硅太阳电池性能研究*

贾河顺^{1)†} 罗磊²⁾ 李秉霖¹⁾ 徐振华¹⁾ 任现坤¹⁾ 姜言森¹⁾
程亮¹⁾ 张春艳¹⁾

1) (山东力诺太阳能电力股份有限公司, 济南 250103)

2) (山东省核与辐射安全监测中心, 济南 250117)

(2013年1月29日收到; 2013年5月8日收到修改稿)

通过调节单层 $\text{SiN}_x:\text{H}$ 减反射膜的厚度制备各种颜色的多晶硅太阳电池. 测试了太阳电池片和组件的光学和电学性能, 用 PC1D 软件对其性能进行模拟. 通过分析得到以下结论: 1) 当减反射膜的厚度小于 50 nm 时, 影响彩色组件和电池片功率变化的主要因素是开路电压 (V_{oc}) 和短路电流 (I_{sc}), 当减反射膜的膜厚度大于 50 nm 时, 随着减反射膜钝化作用的稳定, 影响彩色组件和电池片功率变化的主要因素是 I_{sc} ; 2) 大多数彩色电池片的效率比传统蓝色电池片的效率低, 但是在封装之后, 彩色电池组件可以有不同程度的增益, 主要原因是减反射膜与乙烯-醋酸乙烯共聚物和玻璃匹配性较好.

关键词: 彩色太阳电池, 氮化硅, 钝化, 光学匹配

PACS: 88.40.jj, 88.40.hj

DOI: 10.7498/aps.62.168802

1 引言

光伏建筑一体化 (building-integrated photovoltaic, BIPV) 及并网发电被公认为是未来光伏发电最大的市场和最主要的发展方向. 普通的太阳电池片都是蓝色的, 色彩比较单一. 尤其是 BIPV 对彩色太阳电池片的需求更加迫切, 人们希望能够选择自己喜欢的颜色来彰显其建筑的个性, 因此彩色太阳电池是光伏发展的热点之一.

彩色太阳电池主要有以下几种技术: 调节减反射膜的性质获得彩色晶硅太阳电池^[1], 调节染料的颜色获得彩色染料敏化电池^[2,3], 调节薄膜的性质获得彩色硅基薄膜太阳电池^[4]等. 由于晶硅电池在市场上占有率达到 80% 以上, 彩色晶硅太阳电池在最近几年也得到了很快发展. 理论上, 通过调节晶硅表面减反射膜的参数得到彩色晶硅太阳电池, 如单层 $\text{SiN}_x:\text{H}$ 减反射膜沉积法^[5], 多层减反射膜沉积法^[6], 硅纳米孔蚀刻法^[7-12]. 单层减反射膜沉

积法与传统晶硅太阳电池生产线兼容, 通过一次成膜不改变原有工序; 多层减反射膜沉积法运用多步工艺沉积多层相同或不同材料的减反射膜来改变太阳电池的颜色, 但是需要购买新设备并会降低产线产能; 硅纳米孔蚀刻法用电化学蚀刻硅基底, 得到硅纳米孔, 通过调节纳米颗粒的大小改变吸收波长使太阳电池呈现不同的颜色, 但是该技术工序繁杂, 还处于研发阶段.

本文采用单层减反射膜沉积法, 制备了不同颜色的多晶硅太阳电池, 并分析了不同颜色太阳电池的光学和电学特性.

2 实验

本实验采用传统多晶硅生产线, 用等离子体增强化学气相沉积法 (PECVD) 沉积一层 $\text{SiN}_x:\text{H}$ 减反射膜, 通过调节减反射膜的厚度制备各种颜色的多晶硅太阳电池, 然后按照组件常规封装工艺封装成组件. 太阳电池减反射膜的折射率为 2.05, 各种

* 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2012AA050303, 2011AA050504) 和山东省自主创新成果项目 (批准号: 2010ZHZX1A0702, 2011ZHZX1A0701) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: jiaheshun@163.com

颜色太阳能电池的颜色和膜厚度如表 1 所示. 封装组件采用折射率 1.5, 厚度 3.5 mm 的钢化玻璃; 层压后乙烯 - 醋酸乙烯共聚物 (EVA) 厚度为 0.5 mm, 折射率为 1.47.

表 1 彩色太阳能电池 SiN_x:H 减反射膜厚度及对应的颜色

样品	颜色	膜厚/nm
1	棕色	30
2	蓝色	85
3	Si 本色	115
4	黄色	140
5	红色	185
6	绿色	240

在本实验中, SiN_x:H 薄膜的厚度和折射率测试采用 SENTECH SE 400adv 多角度激光椭偏仪; SiN_x:H 薄膜沉积后样品的反射率测试采用 R9000-2DMA 全自动 D8 积分式反射仪; 用 berger 测试机测量太阳能电池的电性能; 用德镭射科 DLSK-SOL5 太阳能电池组件测试仪测试太阳能电池组件的电性能.

利用 PC1D 软件根据实际情况模拟不同颜色太阳能电池的 SiN_x:H 减反射膜膜厚度对太阳能电池电性能的影响. 主要的参数如表 2 所示.

表 2 PC1D 软件模拟主要参数表

参数项	值
基极接触电阻/ Ω	0.002
内部电导率/S	0.3
器件面积/ mm^2	243.36
基极厚度/ μm	200
扩散方阻, 浓度/ $\Omega\cdot\text{sq}^{-1}, \text{cm}^{-3}$	80, 8.992×10^{20}
测试温度/ $^{\circ}\text{C}$	25
体复合寿命/ μs	22
入射光密度/ $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$	0.1
入射光波长/nm	300—1200

3 结果分析

图 1 是不同颜色样品的反射率对比图, 棕色、蓝色和硅本色的最低反射率位置对应波长值依次增大. 薄膜吸收波长和最佳膜厚度之间的关系为^[13]

$$\lambda = 4nd, \quad (1)$$

其中 λ 为吸收光波长, n 为膜折射率, d 为膜的厚度.

棕色、蓝色和硅本色太阳能电池对应的 SiN_x:H

薄膜厚度依次增大, 最低反射率对应的波长也依次增大. 随着膜厚度的增加, 黄色、红色和绿色太阳能电池的反射光在可见光范围内出现波峰和波谷慢慢增多; 并且黄色、绿色、红色太阳能电池的反射率依次减小. 另外黄色、红色和绿色太阳能电池的总体反射率较棕色、蓝色和硅本色太阳能电池的总体反射率高. 反射率的降低, 会提高太阳能电池短路电流 (short-circuit current, I_{sc}). 如图 2 所示, 蓝色太阳能电池 (膜厚度 85 nm) 的总体反射率最低, 所以其短路电流 I_{sc} 表现出极大值. 总体反射率低的位置正好对应于 I_{sc} 大的位置 (膜厚度 85 nm, 蓝色太阳能电池); 同样, 总体反射率高的位置正好对应于 I_{sc} 小的位置 (膜厚 140 nm, 黄色太阳能电池). 因此, 反射率是影响彩色多晶太阳能电池电性能的最重要的因素之一.

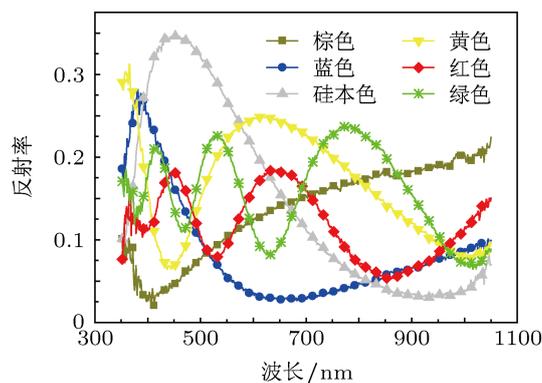


图 1 不同颜色太阳能电池的反射率

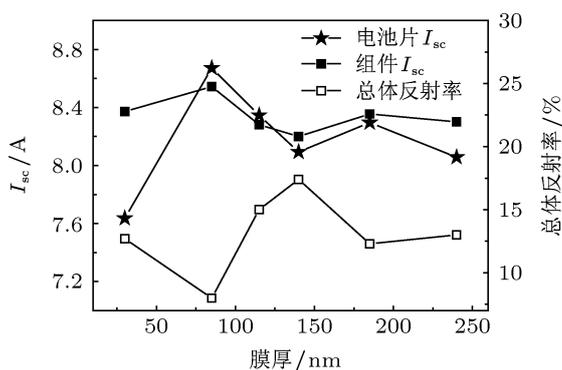


图 2 不同膜厚度彩色太阳能电池的电池片及组件的 I_{sc} 及总体反射率

对整个入射太阳光谱, 外量子效率 (external quantum efficiency, EQE) 是表征每个波长为 λ 的入射光子能对外电路提供一个电子的概率. 图 3 是不同颜色太阳能电池的 EQE, 插图是局部放大图. 从图中可以看出棕色、蓝色和硅本色太阳能电池的 EQE

最高值对应的波长依次向长波段移动. 如图 1, 棕色、蓝色和硅本色太阳电池的最佳吸收波长也依次向长波方向移动, 并且最佳吸收波长和 EQE 的最大值几乎在同一波长位置. 黄色、红色和绿色太阳电池的 EQE 表现为多个峰值, 这也是由于不同厚度减反射膜的吸光作用造成的 [1].

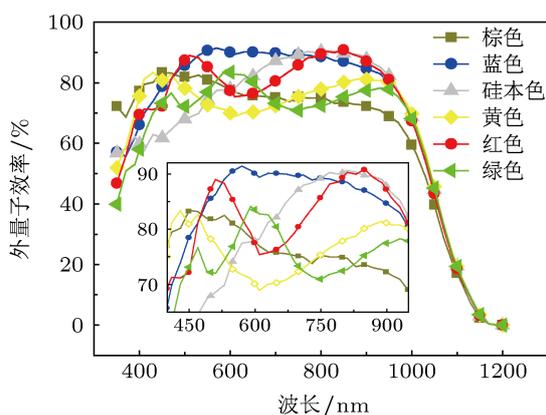


图 3 不同颜色太阳电池的外量子效率

内量子效率 (internal quantum efficiency, IQE) 是被电池吸收的波长为 λ 的入射光子能对外电路提供一个电子的概率. 一般来说, IQE 越大, 太阳电池的钝化效果越好. 图 4 是不同彩色太阳电池的内量子效率. 如图所示, 棕色太阳电池的 IQE 最低, 蓝色、硅本色、黄色太阳电池的 IQE 其次, 绿色和红色太阳电池的 IQE 最高. 这主要是因为减反射膜 $\text{SiN}_x:\text{H}$ 中 H 离子是钝化的主要机制 [13]: 同样折射率的减反射膜, 厚度越厚, 能到太阳电池界面和体内的 H 离子会越多, 这种 H 离子会起到钝化表面缺陷和体内缺陷的作用. $\text{SiN}_x:\text{H}$ 的膜越厚, 太阳电池的钝化效果越好, IQE 也就越高.

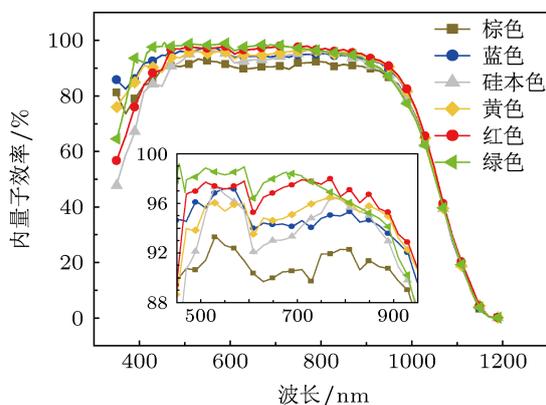


图 4 不同颜色太阳电池的内量子效率

反射率和内外量子效率会影响到太阳电池的 I_{sc} , 内外量子效率会影响到太阳电池的开路电压 (open circuit voltage, V_{oc}), 这些参数最终影响到太阳电池的功率.

用 PC1D 软件模拟不同膜厚度彩色电池 V_{oc} 的变化趋势如图 5 所示. 在 50 nm 以内, 随着 $\text{SiN}_x:\text{H}$ 膜厚度的增加, V_{oc} 持续增加; 但是膜厚度在 50 nm 以上, 随着膜厚度的增加, V_{oc} 的增加变缓, 这是因为 $\text{SiN}_x:\text{H}$ 减反射膜中的 H 离子随着膜厚度的增加开始慢慢饱和 [14]. 虽然有的膜厚度位置的电池片和组件的 V_{oc} 甚至出现斜率为负的现象, 但是电池片的 V_{oc} 保持在 0.618 V 左右, 组件的模拟 V_{oc} 保持在 0.616—0.617 V 之间. 可见, 在膜厚度大于 50 nm 时, V_{oc} 对电池片或者组件的功率影响不大.

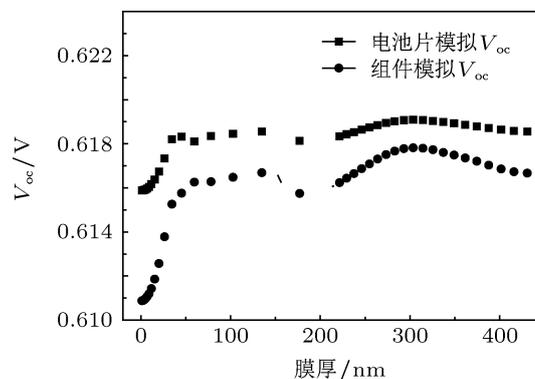


图 5 不同膜厚度彩色太阳电池片及其组件的开路电压模拟图

图 6 是不同膜厚度颜色太阳电池的电池片及组件功率图, 可以看出把不同厚度的彩色太阳电池片进行封装后的组件效率和电池片的效率变化趋势相似. 在小于 250 nm 的膜厚度范围内, 随着膜厚度的增加, 电池片的功率出现了两个波峰 (80 nm 左右和 250 nm 左右) 和一个波谷 (150 nm 左右). 在小于 85 nm 的膜厚度范围内, 随着膜厚度的增加, 电池片的功率也随之增加. 并且不同颜色彩色电池片和组件的功率变化趋势和对应的 I_{sc} 的变化趋势也基本相似. 图 7 是用 PC1D 软件模拟的不同膜厚度对应太阳电池和组件功率分布. 可以看出, 在膜厚 440 nm 内, 出现了两个功率峰值 (74 和 306 nm), 并且第一个功率峰值大于第二个功率峰值. 软件拟合与实际测试的功率结果趋势基本一致. 从对功率, V_{oc} 和 I_{sc} 的分析结果可以看出: 当减反射膜厚度小于 50 nm, 组件和电池片的功率变化主要影响因素是 V_{oc} 和 I_{sc} ; 当减反射膜厚度大于 50 nm 后, 随着减反射膜钝化作用的稳定, 组件和电池片的功率变

化的主要影响因素是 I_{sc} .

从图 6 中还可以看出,除了在膜厚度为 85 nm (蓝色) 的太阳电池组件效率低于电池片效率外,其他膜厚度的太阳电池组件的效率明显大于对应的电池效率,也就是说该厚度 $\text{SiN}_x:\text{H}$ 减反射膜的太阳电池在封装后都出现了功率增益.这对于太阳电池封装亏瓦的问题解决有很显著的指导意义.从 PC1D 的功率模拟图 7 可以看出,在膜厚度 59—87 nm 的范围内出现了不同程度的亏瓦 (74 nm 处的亏瓦最为严重),该结果不但和图 6 测试结果基本一致,而且和文献 [15] 的实验结果基本一致.

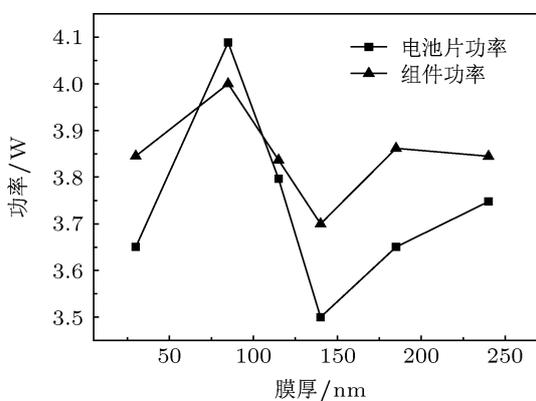


图 6 不同膜厚度彩色太阳电池的电池片及组件功率

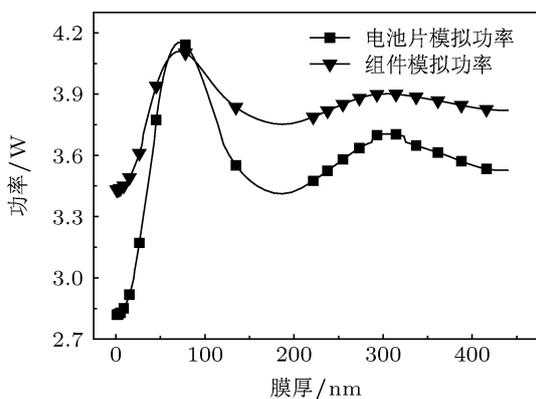


图 7 根据 PC1D 模拟的不同膜厚度太阳电池的电池片及组件功率

太阳电池封装后 I_{sc} 可以通过照射到电池片的光 $T(\lambda)$, 太阳电池的光谱响应 $\text{SR}(\lambda)$, 平均反射系数 R 和相位角 $\Phi(\lambda)$ 来表示 [15]:

$$I_{sc} = J_{sc} \cdot S, \quad (2)$$

$$J_{sc} = \int \frac{T(\lambda) \cdot \text{SR}(\lambda) d\lambda}{1 - R} \cdot \Phi(\lambda). \quad (3)$$

其中 S 为太阳电池面积.

组件的光学损失主要来自空气 - 玻璃表面的反射和玻璃/EVA 的吸收.前者的损失可以通过在玻璃表面镀减反射膜来降低,后者可以通过合理选择玻璃和 EVA 的材料来降低.相对于太阳电池片来说,组件也可以吸收未被电池片覆盖的背板以及电池片受光表面的反射光.所以组件中封装材料 - 电池界面的光受减反射膜与 EVA 和玻璃的搭配的影响 (即影响 (2) 式中的 $T(\lambda)$), 而不同颜色的太阳电池减反射膜的膜厚度影响太阳电池的光谱响应 $\text{SR}(\lambda)$ 和平均反射系数 R .

在本实验中,不同厚度减反射膜的太阳电池封装组件所用的玻璃和 EVA 均是相同的,太阳电池膜厚度 59—87 nm 范围内的组件出现了不同程度的亏瓦主要是因为该厚度的减反射膜与 EVA 和玻璃不匹配 [16]; 同理,其他膜厚度的太阳电池组件却出现了不同程度的增益,主要原因可能是减反射膜与 EVA 和玻璃匹配性较好 [15]. 电池片和组件功率的模拟数据和实际测试数据的一致性,说明虽然部分彩色电池片的效率比传统蓝色电池片的效率低,但是在封装之后,彩色电池组件可以有不同程度的增益.在实际的研发过程中,可以用 PC1D 等软件模拟,减少由于各个部件的不匹配造成的光学损失,提高各类太阳电池的效率.

4 结论

用 PECVD 沉积一层 $\text{SiN}_x:\text{H}$ 减反射膜,通过调节减反射膜的厚度制备各种颜色的多晶硅太阳电池.通过测试和 PC1D 软件模拟,可以看出: 1) 当减反射膜厚度小于 50 nm,彩色组件和电池片的功率变化主要影响因素是 V_{oc} 和 I_{sc} ; 当减反射膜厚度大于 50 nm 后,随着减反射膜钝化作用的稳定,组件和电池片功率变化的主要影响因素是 I_{sc} ; 2) 大多数彩色电池片的效率比传统蓝色电池片的效率低了很多,但是在封装之后,彩色电池组件可以有不同程度的增益,主要原因是减反射膜与 EVA 和玻璃匹配性较好.

- [1] Selj J H, Mongstad T T, Søndena R, Marstein E S 2011 *Sol. Energ. Mat. Sol. C* **95** 2576
- [2] Boschloo G, Hagfeldt A, Rensmo H, Kloo L, Sun L, Pettersson H 2011 *World Renewable Energy Congress 2011* Linköping, Sweden, May 8–13, 2011 p2800
- [3] Wang K J, Dai S Y 2007 *Physics* **36** 853 (in Chinese) [王孔嘉, 戴松元 2007 物理 **36** 853]
- [4] Li T 2011 *IEEE 9th International Conference* Xiamen, China, October 25–28, 2011 p425
- [5] MacLeod H A 2001 *Thin Film Optical Filters* (1st Ed.) (Bristol: Institute of Physics Publishing) pp5–40
- [6] Tölle R, Bruton R, Noble T, Schneider R, Janka A, Costard J, Claus H, Radike J, Summhammer M, Hilcox J, Aceves D, Anzizu O, Koch O, Tobias W, Luque I 2000 *Proceedings of the 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference* Glasgow, Scotland, May 1–5, 2000 p1957
- [7] Selj J H, Thøgersen A, Foss S E, Marstein E S 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 074904
- [8] Strehlke S, Sarti D, Krotkus A, Grigoras K, Levy-Clement C 1997 *Thin Solid Films* **297** 291
- [9] Schirone L, Sotgiu G, Califano F P 1997 *Thin Solid Films* **297** 296
- [10] Xu H J, Fu X N, Sun X R, Li X J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2352 (in Chinese) [许海军, 富笑男, 孙新瑞, 李新建 2005 物理学报 **54** 2352]
- [11] Lipinski M, Bastide S, Panek P, Levy-Clement C 2003 *Phys. Status Solidi A* **197** 512
- [12] Yuan H-C, Yost V E, Page M R, Stradins P, Meier D L, Branz H M 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 123501
- [13] Wenham S R, Green M A, Watt M E, Corkish R 2009 *Applied Photovoltaics* (London: Earthscan Publications Ltd) p59
- [14] Dastgheib-Shirazi A, Book F, Haverkamp H, Raabe B, Hahn G 2009 *Proceeding of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference* Hamburg, Germany, September 21–25, 2009 p1197
- [15] Sopori B L, Boulevard C 1990 *Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twenty First IEEE* Florida, USA, May 21–25, 1990 p618
- [16] Wang Q, Ni Z, Ren F, Zhao J, Wang A 2011 *Photovolt. Int.* **12** 148

Performance of polycrystal silicon color solar cells*

Jia He-Shun^{1)†} Luo Lei²⁾ Li Bing-Lin¹⁾ Xu Zhen-Hua¹⁾ Ren Xian-Kun¹⁾
 Jiang Yan-Sen¹⁾ Cheng Liang¹⁾ Zhang Chun-Yan¹⁾

1) (Shandong Linuo Solar Power Holdings Co., Ltd, Jinan 250103, China)

2) (Nuclear and Radiation Safety Monitoring Center of Shandong Province, Jinan 250117, China)

(Received 29 January 2013; revised manuscript received 8 May 2013)

Abstract

One layer SiN_x :H films with different thickness are deposited by plasma enhanced chemical vapor deposition to prepare several kinds of polycrystalline silicon color solar cells. The optical and electrical properties are tested by instruments and simulated by PC1D. And the analysis shows that 1) when the antireflection film thickness is less than 50 nm, the deficiencies of color solar cells and solar modules are mainly influenced by open circuit voltage (V_{oc}) and short circuit current (I_{sc}); when the antireflection film thickness is greater than 50 nm, the passivation of H ions is stable and the deficiencies are mainly influenced by I_{sc} ; 2) the efficiency of most color solar cells is lower than that of blue ones, but the color solar cell will have some gains after packaging, which is because of the better optical matching of reflective film with ethylene-vinyl acetal copolymer and glass.

Keywords: color solar cells, silicon nitride, passivation, optical matching

PACS: 88.40.jj, 88.40.hj

DOI: 10.7498/aps.62.168802

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant Nos. 2012AA050303, 2011AA050504) and the Independent Innovation Project of Shandong Province, China (Grant Nos. 2010ZHXX1A0702, 2011ZHXX1A0701).

† Corresponding author. E-mail: jiaheshun@163.com