

硅基薄膜叠层太阳能电池中间层的光学设计与计算

涂 晔^{1,2} 杨 雯^{1,2} 杨培志^{1,2} 张力元^{1,2} 段良飞^{1,2}

(¹ 可再生能源材料先进技术与制备教育部重点实验室, 云南 昆明 650092)
(² 云南师范大学太阳能研究所, 云南 昆明 650092)

摘要 叠层结构是提高硅基薄膜电池效率和稳定性的有效方法,然而子电池电流不匹配使其效率的提升受到限制。为了提高叠层电池的子电池电流匹配度,需选择合适的中间层材料。通过硅基薄膜叠层电池的中间层的光学设计和理论计算,获得了材料折射率与厚度的匹配关系:中间层材料折射率 n 选取范围为 $1.59\sim 3.1$,中间层厚度 d 的制备范围为 $125/n\sim 175/n$ nm,最佳厚度 d 为 $150/n$ nm。最优中间层材料的折射率和厚度应为: n 约为 1.59 , d 约为 94.3 nm,采用这一条件可最大限度地提高硅基薄膜叠层电池的子电池电流匹配度。从叠层电池中间层的光学特性方面入手为实验研究提供了设计指导。

关键词 光学设计;硅基薄膜电池;中间层;最佳折射率;最优厚度

中图分类号 TN302 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0622006

Optical Design and Calculation of Interlayer in Thin Film Silicon Tandem Solar Cells

Tu Ye^{1,2} Yang Wen^{1,2} Yang Peizhi^{1,2} Zhang Liyuan^{1,2} Duan Liangfei^{1,2}

¹ Education Ministry Key Laboratory of Renewable Energy Advanced Materials and Manufacturing Technology, Kunming, Yunnan 650092, China
² Institute of Solar Energy, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650092, China

Abstract A tandem structure is decisive for improving the efficiency and stability of thin film silicon solar cells, however, the current mismatching between two sub cells limits the efficiency improvement. In order to improve the current matching, a suitable material is required as an interlayer. The matching relationship between refractive index and thickness of the interlayer material is obtained through optical design and theoretical calculation; the selection ranges of refractive index n and thickness d are $1.59\sim 3.1$ and $125/n\sim 175/n$ nm, respectively; the optimum thickness d is $150/n$ nm. The optimal refractive index and thickness of the interlayer material to maximize the current matching are determined to be 1.59 and 94.3 nm. The results provide a guidance for experimental design from the aspect of optical properties of the interlayer in tandem solar cells.

Key words optical design; silicon thin film solar cells; interlayer; optimal refractive index; optimal thickness

OCIS codes 220.4241; 160.4670; 310.6805; 350.6050

1 引 言

由于非晶硅/微晶硅(以下简称非/微)叠层太阳能电池(a-Si:H/ μ c-Si:HTSC)可拓宽对太阳光谱的响应范围,降低其效率的光致衰减,比单结非晶硅电池具有更高的转换效率,因而成为新一代低成本硅

基薄膜太阳能电池的研究重点^[1]。然而,非/微叠层电池的电流受限于非晶硅顶电池电流,若通过增加顶电池厚度的方法来增大电流,则会因材料本身的光致衰减效应(SWE)而使电池的稳定性降低。若在非/微叠层电池的两个子电池之间插入一中间层

收稿日期: 2013-10-21; 收到修改稿日期: 2014-01-20

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(U1037604)

作者简介: 涂 晔(1985—),女,博士研究生,主要从事光伏薄膜材料及器件方面的研究。E-mail: tuye0106@163.com

导师简介: 杨培志(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事太阳能高效利用材料及器件等方面的研究。

E-mail: pzhyang@hotmail.com(通信联系人)

(Interlayer),把一部分可见光反射回顶电池中再次吸收利用,则可增大顶电池的短路电流密度(J_{sc}),在不增加顶电池厚度的情况下提高顶、底电池电流的匹配度,从而提高叠层电池的整体稳定效率。

目前对中间层的研究主要集中在其折射率和厚度两个方面,分别研究它们对顶电池 J_{sc} 的影响。1) 在中间层材料折射率不变的情况下,实验研究其厚度变化、掺杂情况等对顶电池 J_{sc} 的影响。例如:IMT 直接选择了 ZnO 作为中间层材料,研究了不同厚度的 ZnO 对叠层电池 I-V 特性的影响^[2-3], Buehlmann 等^[4-7] 选择 $\mu\text{c-SiO}_x:\text{H}$ 作为中间层材料,并研究了厚度等因素对顶电池 J_{sc} 的影响。2) 在中间层厚度不变的情况下,研究其折射率的变化对顶、底电池电流匹配的影响^[8]。为此 Kaneka 公司研发了一种新材料(600 nm 波长的折射率为 1.7),取得了良好的中间层效果^[9],由此制备的 1 cm^2 叠层电池的初始效率高达 15%,但未报道具体的材料种类及厚度等参数。因此,通过计算模拟叠层电池子电池之间的界面状态,分析中间层材料的折射率和厚度的匹配关系,对提高叠层太阳电池的转换效率和稳定性具有重要的意义。本文通过对硅基薄膜叠层电池中间层的光学设计和计算模拟,初步研究了其材料折射率与厚度的匹配关系。

2 光学设计原理及方法

非晶硅的带隙较宽,约为 1.7 eV,主要吸收波长范围在 350~700 nm 的太阳光;而微晶硅材料带隙较小,约为 1.1 eV,主要吸收波长范围在 500~1000 nm 的太阳光。为了提高非晶硅顶电池的短路电流密度,中间层材料必须起到有选择性地反射短波段光,透射长波段光的作用,即对顶、底电池界面处的入射光进行选择分配,起到对短波光增反,对长波光增透的作用。因此,作为叠层电池两个子电池之间的中间层,其电学、光学特性应满足:高电导,宽带隙,吸收系数小,对短波光反射率高,对长波光透射率高等要求^[10]。

在叠层电池的顶、底电池之间插入一层折射率为 n 的中间层后,对于结构为“Glass/TCO/Top cell/Interlayer/Bottom cell/Al 背电极”的叠层电池,两个子电池界面处的光学设计如图 1 所示。

假设太阳光从叠层电池窗口层入射,经非晶硅顶电池吸收利用后,到达两个子电池交界处的光强为 I_0 ,经光线折射、反射和干涉之后,反射回顶电池的光强为 I_R ,透射进入底电池的光强为 I_T 。插入的

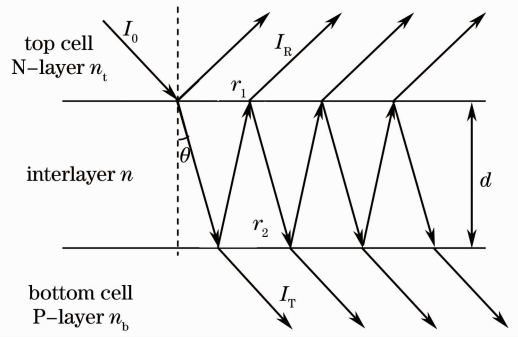


图 1 叠层电池子电池层间的光学设计

Fig. 1 Optical design of sub cells in tandem cells

中间层材料的折射率为 n ,实际厚度为 d ,而 n_t 为顶电池 N 型层的折射率, n_b 为底电池 P 型层的折射率。那么反射率 R 为^[11]

$$R = \frac{I_R}{I_0} = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1r_2 \cos \delta}{1 + r_1^2 r_2^2 + 2r_1r_2 \cos \delta}, \quad (1)$$

式中 r_1, r_2 分别为顶电池/中间层和中间层/底电池界面处的振幅反射系数,(2)式为两者的表达式。 δ 为相邻反射光束的相位差 $\delta = 4\pi n d \cos(\theta/\lambda)$,其中 λ 为入射光的波长, θ 为折射角。

$$r_1 = \pm \frac{n_t - n}{n_t + n}, \quad r_2 = \pm \frac{n_b - n}{n_b + n}. \quad (2)$$

由(1)、(2)两式可知,反射率 R 的大小与 n_t, n, n_b, d 和入射光波长 λ 等参数有关,为了更好地讨论以上参数间的关系,将(2)式代入(1)式可得反射率 R 的表达式为

$$R = \frac{n^2(n_t - n_b)^2 \cos^2 \frac{\delta}{2} + (n^2 - n_t n_b)^2 \sin^2 \frac{\delta}{2}}{n^2(n_t + n_b)^2 \cos^2 \frac{\delta}{2} + (n^2 + n_t n_b)^2 \sin^2 \frac{\delta}{2}}. \quad (3)$$

3 叠层太阳电池中间层折射率与厚度的关系计算

3.1 叠层太阳电池中没有中间层

对于非/微叠层电池来说,在光线正入射的情况下,若没有中间反射层,即中间层厚度 $d = 0$,则(3)式可以简化为 $R = \left(\frac{n_t - n_b}{n_t + n_b}\right)^2$ 。

在非晶硅和微晶硅材料折射率 n_t, n_b 分别约为 3.1 和 3.3 的条件下,计算得出顶、底电池交界处的反射率 R 约为 0.1%,且与入射光波长无关。由此可知,叠层电池若没有中间层,对于波长范围在 350~1000 nm 的太阳光,除了透射过程中非晶硅吸收利用的部分短波段光外,到达子电池界面处被反射回

顶电池的光线非常少,无法实现子电池电流的良好匹配,即不能提高顶电池短路电流密度。因此,应加入中间层,以使顶电池可吸收的短波段光反射回去再加以利用。

3.2 叠层太阳电池中有中间层

当中间层厚度 $d \neq 0$ 时,在光线正入射的情况下, $\cos \theta = 1$,此时 $\delta = 4\pi nd/\lambda$ 且 $\delta \neq 0$,为了最大的发挥中间层的作用,需计算中间层的最优反射率。对(1)式进行一次求导可得:

$$\frac{dR}{d\delta} = \frac{2r_1 r_2 (r_1^2 - 1)(1 - r_2^2) \sin \delta}{(1 + r_1^2 r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos \delta)^2}. \quad (4)$$

由于 R 取极大值的条件为: $dR/d\delta = 0$ 同时 $d^2R/d\delta^2 < 0$ 。根据(2)、(4)式可知, r_1 和 r_2 均不可能为 1,则只有当 $\sin \delta = 0$ 时, $dR/d\delta = 0$ 才成立。若 $\sin \delta = 0$,则有 $\delta = 4\pi nd/\lambda = a\pi$ ($a = 1, 2, 3, \dots$),此时 $\cos^2 \frac{\delta}{2} = \begin{cases} 0, & a = 1, 3, 5, \dots \\ 1, & a = 2, 4, 6, \dots \end{cases}$, $\sin^2 \frac{\delta}{2} = \begin{cases} 1, & a = 1, 3, 5, \dots \\ 0, & a = 2, 4, 6, \dots \end{cases}$,将两者代入(3)式可计算出极大值 R 为

$$R = \begin{cases} \left(\frac{n^2 - n_t n_b}{n^2 + n_t n_b} \right)^2, & a = 1, 3, 5, \dots \\ \left(\frac{n_t - n_b}{n_t + n_b} \right)^2, & a = 2, 4, 6, \dots \end{cases}. \quad (5)$$

由(5)式可知,当 a 为偶数时, $\delta = a\pi$ ($a = 2, 4, 6, \dots$),相邻反射光束发生干涉相消现象,使得反射率 $R = \left(\frac{n_t - n_b}{n_t + n_b} \right)^2$,与中间层折射率 n 无关,此时中间层厚度与折射率的关系为: $d = \frac{a\lambda}{4n}$ (a 为偶数)。虽然插入了中间层,但对反射率没有任何改善,这是中间层厚度设计中需避免的。

当 a 为奇数时, $\delta = a\pi$ ($a = 1, 3, 5, \dots$),相邻反射光束满足干涉加强条件,反射率 $R = \left(\frac{n^2 - n_t n_b}{n^2 + n_t n_b} \right)^2$,若要取极大值还需满足 $d^2R/d\delta^2 < 0$,继续对(4)式求导并将(2)式代入可得

$$\frac{d^2R}{d\delta^2} = \frac{(-1)^a 2n_t n^2 n_b (n - n_t)(n + n_t)(n - n_b)(n + n_b)}{(n^2 + n_t n_b)^4}. \quad (6)$$

由(6)式可知,只有满足 $(-1)^a (n - n_t)(n - n_b) < 0$ 时,才有 $d^2R/d\delta^2 < 0$,反射率 R 取极大值。因 a 为奇数,故当 $(n - n_t)(n - n_b) > 0$ 时,即当中间层折射率 $n >$

$\max(n_t, n_b)$ 或 $n < \min(n_t, n_b)$ 时, R 取极大值。此时中间层厚度与折射率的关系为: $d = \frac{a\lambda}{4n}$ (a 为奇数)。

3.2.1 中间层折射率 $n > \max(n_t, n_b)$

当中间层材料折射率 $n > \max(n_t, n_b)$ 时,也有 $(n - n_t)(n - n_b) > 0$,满足 R 取极大值的条件之一,但研究表明在此条件下的顶电池短路电流密度几乎不变,无法提高顶、底电池的匹配电流^[12]。因此折射率 $n > \max(n_t, n_b)$ 的材料不适合作为中间层材料。

3.2.2 中间层折射率 $n < \min(n_t, n_b)$

当中间层折射率 $n < \min(n_t, n_b)$ 时,也有 $(n - n_t)(n - n_b) > 0$,满足 R 取极大值的条件之一。在此情况下,同时考虑不同中间层厚度下顶、底电池电流密度的变化,如图 2 所示,当中间层厚度 $d > 110$ nm 时,最大反射峰会蓝移,使得顶电池短路电流密度下降,而底电池短路电流密度上升,使顶底电池电流密度失配^[13]。因此 d 必须小于 110 nm,根据中间层厚度与折射率的关系式 $d = \frac{a\lambda}{4n}$ (a 为奇数)有: $d =$

$$\frac{a\lambda}{4n} < 110, \text{ 即 } a < \frac{440n}{\lambda}.$$

在非/微叠层电池中, n_t, n_b 分别约为 3.1 和 3.3,根据 $n < \min(n_t, n_b)$ 知 $n < 3.1$ 。非晶硅材料主要吸收 350~700 nm 波长范围的太阳光,而微晶硅材料则主要吸收 500~1000 nm 波长范围的太阳光。由于非晶硅材料的光致衰减效应使得电池效率稳定性差,为了减少光致衰减带来的负面影响,非晶硅顶电池的吸收层厚度通常会比较薄,从而导致顶电池的 J_{sc} 比微晶硅底电池小得多,使得叠层电池的整体匹配电流受限于顶电池电流。因此中间层的折射率 n 和厚度 d 须满足的条件为:牺牲一部分底电池可吸收的透射光,尽量提高顶电池可吸收波段的反射率 R 。由于非晶硅在 500~700 nm 波段的吸收系数较大,且微晶硅在此波段的吸收系数较小,提高此波段的反射率能有效的提高顶电池的 J_{sc} ,因此选择最恰当的反射波段应为 500~700 nm,并由此选择中心波长 $\lambda_0 = 600$ nm。将 n 与 λ_0 的取值范围代入 $a < \frac{440n}{\lambda}$,可计算出 $a < 2.27$,由于 a 为奇数,于是选取 $a = 1$ 。

对于非/微叠层太阳电池,已知中间层材料折射率的上限值为 3.1,可推导出折射率的下限值。由 $d = \frac{a\lambda}{4n} < 110$,且 $a = 1$,最佳的反射波段为 500~

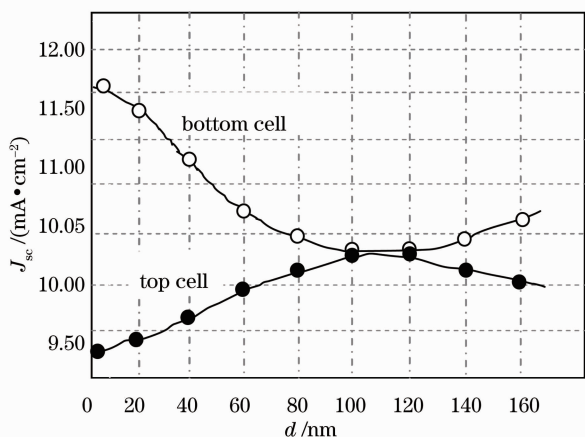


图2 不同中间层厚度下的顶、底电池电流密度变化趋势

Fig.2 Current density of top and bottom cells with varying interlayer thickness

700 nm, 计算出折射率 $n > 1.59$ 。

综合上述推导, 叠层电池中间层材料折射率与厚度的匹配关系为: 在折射率 $n < \min(n_t, n_b)$ 的情况下, 厚度 $d = \lambda/4n$ nm, λ 为反射波段波长。而对于硅基薄膜叠层电池, 中间层材料折射率 n 选取范围为 1.59~3.1, 中间层厚度 d 的制备范围为 $125/n \sim 175/n$ nm, 由于中心波长 $\lambda_0 = 600$ nm, 因此最佳厚度约为 $d = 150/n$ nm。

4 结果与讨论

中间层的插入可以提高硅基薄膜叠层电池界面处短波段光的反射率, 在对底电池光谱响应范围影响很小的情况下, 有效的增大非晶硅顶电池的短路电流密度, 从而提高顶、底电池的电流匹配度, 增加叠层电池整体转换效率。

对于非/微叠层电池, n_t, n_b 分别约为 3.1 和 3.3, 在中间层材料具备高电导、宽禁带特性的情况下, 当所选的中间层材料满足折射率 n 范围为 1.59~3.1, 厚度 d 处在 $125/n \sim 175/n$ nm 时, 波长范围为 500~700 nm 的太阳光能最大限度地被反射回非晶硅顶电池进行再吸收, 且据 (5) 式知反射率 $R_{\max} = \left(\frac{n^2 - n_t n_b}{n^2 + n_t n_b}\right)^2$ 。若 $n \ll \sqrt{n_t n_b}$, 则 R_{\max} 理论上趋近于 100%。根据推导结果, 当中间层材料的折射率 n 约为 1.59, 可计算得出厚度 d 为 78.6~110 nm, 最佳厚度约为 94.3 nm, 对波长为 500~700 nm 的太阳光可达到最大反射率 35.96%。即最优的中间层材料的折射率和厚度应分别为: n 约为 1.59, d 约为 94.3 nm, 这样能最大限度地提高硅基薄膜叠层电池的子电池电流匹配度。

南开大学对 $\mu\text{c-SiO}_x$ 薄膜作为中间层材料展开了详细的研究, 他们分别对折射率为 2.69 和 2.89 的 $\mu\text{c-SiO}_x$ 进行了 20 nm 与 40 nm 厚度的实验研究, 对于顶、底电池本征层厚度分别为 270 和 2250 nm 的叠层电池, 采用折射率为 2.89、厚度为 40 nm 的中间层比 20 nm 厚度的中间层效果好, 得出对于同样折射率的中间层, 增加中间层的厚度能增加整个叠层电池在 500~750 nm 波长范围内的外量子效率的结论^[7], 与本文的推导结果相吻合。根据本文推导结果可计算出, 对于折射率为 2.89 的 $\mu\text{c-SiO}_x$ 中间层, 若厚度为 51.9 nm, 则有望进一步提高硅基薄膜叠层电池的转换效率。

目前研究最为热门的中间层材料为 ZnO, 其折射率约为 2.0, 对于硅基薄膜叠层电池, 根据推导结果可计算出当 ZnO 层厚度为 62.5~87.5 nm 时, 均可起到良好的中间反射层作用, 当 ZnO 层厚度为 75 nm 时, 对波长为 500~700 nm 范围的太阳光可达到 19.17% 的最大反射率, 此时顶电池的短路电流密度得到最大限度的提高。

由于中间层材料本身具有一定的电阻, 它的加入会增加叠层电池的串联电阻, 导致填充因子的降低, 使电池效率的提高相对有限。此外, 带隙也是中间层材料的一个重要指标, 较宽的带隙才能有效减少中间层对光子的吸收损失。因此, 要想使电池的性能得到优化, 除了折射率与厚度的匹配关系外, 还需同时考虑中间层禁带宽度、导电性等对电池性能的影响。

5 结 论

通过对硅基薄膜叠层电池中间层的光学设计和计算模拟, 获得了中间层材料的折射率与厚度的匹配关系。在中间层材料具备高电导、宽禁带特性的情况下, 当选定的中间层材料满足折射率 n 为 1.59~3.1, 厚度 d 为 $125/n \sim 175/n$ nm 时, 500~700 nm 波长范围的太阳光能最大限度地反射回非晶硅顶电池进行再吸收。中间层材料的最优折射率和厚度应为: n 约为 1.59, d 约为 94.3 nm, 此条件下对短波光的反射率达到 35.96%, 能最大限度地提高叠层电池的子电池电流匹配度, 进而提高硅基薄膜叠层电池的转换效率。中间层材料的折射率与厚度匹配关系, 为实验研究高效硅基薄膜叠层电池提供了一定的设计思路。

美国托莱多大学天文系, 怀特光伏创新中心的宋肇宁博士在论文的修改中提供了帮助, 谨致谢意!

参 考 文 献

- 1 J Meier, S Dubail, R Flückiger. Intrinsic microcrystalline silicon ($\mu\text{c-Si:H}$)-a promising new thin film solar cell material [C]. Proceedings of First World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 1994. 409-412.
- 2 D Fischer, S Dubail, J A A Selvan, *et al.*. The "micromorph" solar cell; extending a-Si:H technology towards thin film crystalline silicon [C]. Proceedings of 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1996. 1053-1056.
- 3 S Golay, J Meier, S Dubail, *et al.*. First pin/pin micromorph modules by laser patterning [C]. Proceedings of 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2000. 1456-1459.
- 4 P Buehlmann, J Bailat, D Dominé, *et al.*. In situ silicon oxide based intermediate reflector for thin-film silicon micromorph solar cells [J]. Appl Phys Lett, 2007, 91(14): 143505.
- 5 A Lambertz, A Dasgupta, W Reetz, *et al.*. Microcrystalline silicon oxide as intermediate reflector for thin film silicon solar cells [C]. IEEE 22nd EPSDC, 2007. 1839-1842.
- 6 C Das, A Lambertz, J Huepkes, *et al.*. A constructive combination of antireflection and intermediate reflector layers for a-Si/ $\mu\text{c-Si}$ thin film solar cells [J]. Appl Phys Lett, 2008, 92(5): 053509.
- 7 Yue Qiang, Zhang Xiaodan, Zheng Xinxia, *et al.*. Study of n-type hydrogenated microcrystalline silicon oxide based intermediate reflector [C]. The Eleventh China Photovoltaic Conference and Exhibition, 2010.
岳 强, 张晓丹, 郑新霞, 等. n型氢化微晶硅氧中间反射层的初步研究[C]. 第十一届中国光伏大会暨展览会会议论文集, 2010.
- 8 Chen Peizhuan, Cai Ning, Chen Xinliang, *et al.*. Light management in thin film a-Si/ $\mu\text{c-Si}$ tandem solar cells [J]. J Optoelectronics • Laser, 2009, 20(5): 595-600.
陈培专, 蔡 宁, 陈新亮, 等. Si基薄膜叠层太阳能电池中光的优化分配[J]. 光电子•激光, 2009, 20(5): 595-600.
- 9 K Yamamoto, A Nakajima, M Yoshimi, *et al.*. High efficiency thin film silicon hybrid cell and module with newly developed innovative interlayer [C]. IEEE 4th World Conference On Photovoltaic Energy Conversion, 2006. 1489-1492.
- 10 Cai Ning, Geng Xinhua, Zhao Yin, *et al.*. Literature review on interlayer of "micromorph" silicon-based tandem solar cells [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2009, 30(3): 338-343.
蔡 宁, 耿新华, 赵 颖, 等. 非晶/微晶硅叠层电池中间层的研究进展[J]. 太阳能学报, 2009, 30(3): 338-343.
- 11 Cai Lüzhong, Wang Chengyan, Zhou Yufang. Optics [M]. Jinan: Shandong University Press, 2002. 42-75.
蔡履中, 王成彦, 周玉芳. 光学 [M]. 济南: 山东大学出版社, 2002. 42-75.
- 12 Chen Peizhuan, Chen Xinliang, Cai Ning, *et al.*. Realization of current matching between top cell and bottom cell in Si thin film tandem solar cells [J]. J Optoelectronics • Laser, 2011, 22(6): 868-871.
陈培专, 陈新亮, 蔡 宁, 等. Si基薄膜叠层太阳能电池中顶底电池电流匹配的实现[J]. 光电子•激光, 2011, 22(6): 868-871.
- 13 P Obermeyer, C Haase, H Stiebig. Advanced light trapping management by diffractive interlayer for thin-film silicon solar cells [J]. Appl Phys Lett, 2008, 92(18): 181102.

栏目编辑: 李志兰