

文章编号: 1672-8785(2015)05-0035-08

透明导电氧化膜的功函数对 $\mu\text{c-Si:H(n)}/\text{c-Si(p)}$ 异质结太阳能电池性能影响的数值模拟

吕雁文 刘淑平 聂慧军

(太原科技大学应用科学学院, 太原 030024)

摘 要: 用 AFORS-HET 软件分析了透明导电氧化膜 (Transparent Conductive Oxide, TCO) 的功函数对 $\mu\text{c-Si:H(n)}/\text{c-Si(p)}$ 异质结太阳能电池性能的影响。模拟结果表明, 透明导电氧化膜的功函数会强烈影响太阳能电池的性能如 V_{oc} 和 FF 。当透明导电氧化膜的功函数在 TCO/ $\mu\text{c-Si:H(n)}$ 界面小于 4.4 eV、 $\mu\text{c-Si:H(n)}$ 发射层的厚度为 6 nm, 透明导电氧化膜的功函数在 $\mu\text{c-Si:H(p+)}/\text{TCO}$ 界面大于 5.2 eV 且透明导电氧化膜为 ZnO 时, 模拟的具有纹理结构的 TCO/ $\mu\text{c-Si:H(n)}/\text{a-Si:H(i)}/\text{c-Si(p)}/\text{a-Si:H(i)}/\mu\text{c-Si:H(p+)}/\text{TCO}$ 太阳能电池的转换效率达到了 23.78% (V_{oc} : 758.6 mV, J_{sc} : 40.94 mA/cm², FF : 76.58%)。这表明 $\mu\text{c-Si:H(n)}/\text{c-Si(p)}$ 异质结太阳能电池的性能与透明导电氧化膜的功函数紧密相关, 通过透明导电氧化膜的功函数可以提高太阳能电池的效率。

关键词: 透明导电氧化膜; 功函数; 异质结; AFORS-HET

中图分类号: TM914.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2015.05.008

Numerical Simulation of Influence of Work Function of Transparent Conductive Oxide on Performance of $\mu\text{c-Si:H(n)}/\text{c-Si(p)}$ Heterojunction Solar Cell

LV Yan-wen, LIU Shu-ping, NIE Hui-jun

(Academy of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The influence of work function of transparent conductive oxide on the performance of $\mu\text{c-Si:H(n)}/\text{c-Si(p)}$ heterojunction solar cells is analyzed by using a AFORS-HET software. The simulation results show that the work function of transparent conductive oxide has a great influence on the performance of solar cells, such as V_{oc} and FF . When the work function of transparent conductive oxide at the interface of TCO/ $\mu\text{c-Si:H(n)}$ is less than 4.3 eV, the thickness of $\mu\text{c-Si:H(n)}$ emitting layer is 6 nm, the work function of transparent conductive oxide at the interface of $\mu\text{c-Si:H(n)}/\text{TCO}$ is greater than 5.2 eV and the transparent conductive oxide is ZnO, the TCO/ $\mu\text{c-Si:H(n)}/\text{a-Si:H(i)}/\text{c-Si(p)}/\text{a-Si:H(i)}/\mu\text{c-Si:H(p+)}/\text{TCO}$ solar cell has its photoelectric conversion efficiency up to 23.78% (V_{oc} : 758.6 mV, J_{sc} : 40.94 mA/cm², FF : 76.58%). The result shows that the performance of the $\mu\text{c-Si:H(n)}/\text{c-Si(p)}$ heterojunction solar cell is closely correlated with the work function of transparent conductive oxide. Through the work function of transparent conductive oxide, the efficiency of solar cells can be improved.

Key words: transparent conductive oxide; work function; heterojunction; AFORS-HET

收稿日期: 2015-03-08

作者简介: 吕雁文 (1986-), 男, 山西朔州人, 硕士研究生, 主要从事光电材料与光电子技术研究。

E-mail: lvyenwen1986@163.com

0 引言

太阳能是一种环境友好型可再生资源。对如何有效利用太阳能这一点,各国科学家一直都在努力探索,尤其是对太阳能电池的研究。1994 年日本 SANYO 公司开发了内在本征薄层异质结(Heterojunction with Intrinsic Thin-layer, HIT)这种新型太阳能电池结构^[1],这种电池结构的高效性以及低成本特点迅速得到行业的认可。2014 年, SANYO 公司研发的 HIT 太阳能电池在实际应用中获得创历史新高的 24.7% 的效率,其开路电压达到了 745 mV ~ 750 mV^[2]。所有有关 HIT 太阳能电池的报告都将高性能归因于异质结处优良的表面钝化技术。这种技术是在非晶硅/晶体硅或微晶硅/晶体硅界面插入一层超薄的非晶硅本征缓冲层 a-Si:H(i)。本征缓冲层对电池性能的影响表现在两方面:一是可以降低界面缺陷密度,对界面的钝化起到很好的效果;二是通过影响能带的失配来提高太阳能电池的性能^[3,4]。

虽然日本 SANYO 公司采用 n 型单晶硅作为光吸收材料,但如今市场上异质结(Heterojunction, HJ)和 HIT 太阳能电池更多是以 p 型晶体硅作为光吸收区的^[4-6]。由于微晶硅市场上推出了大量 p 型晶体硅晶片,与 n 型晶体硅晶片相比,不仅为制作 HJ 和 HIT 太阳能电池提供了原材料的便利,同时也降低了生产成本。大多数研究学者认为,在将非晶硅沉积在单晶硅上后,当费米能级对齐时,异质结的价带失配大于导带失配^[4,7]。相关研究表明,异质结的能带弯曲或自建电势主要在晶体硅的一侧^[8]。对于 a-Si:H(n)/c-Si(p) 这种结构,光照下绝大部分的光生电子-空穴对产生在 c-Si(p) 层。光生少数载流子通过内建电场后,电子流向 n 区,而空穴流向 p 区;在异质结界面,由于导带边缘能带失配较低,电子可以很容易地越过这种势垒进入 n 区。而在这种结构中,价带处的能带失配基本不影响空穴的运输,因为 p 区收集空穴,空穴不必逾越电场,便直接留在了 p 区。因此,用 p 型晶体硅作为 HJ 和 HIT 太阳能电池的吸收层有较高的效率和较低的成本。

虽然 a-Si:H(n)/c-Si(p) 异质结太阳能电池通过先进的表面钝化技术已经获取了较高的效率,但是基于 a-Si 的太阳能电池本身的光致衰退问题对太阳能电池性能的长期稳定性具有很大的影响。为了克服这个问题,有人用 $\mu\text{c-Si:H(n)}$ 代替了 a-Si:H(n),因为 $\mu\text{c-Si:H}$ 在光照下具有更明显的长期稳定性^[9]。此外,选用 $\mu\text{c-Si:H}$ 还具有一优势,用 $\mu\text{c-Si:H(p+)}$ 作为背场材料时,高掺杂的 $\mu\text{c-Si:H}$ 会导致价带边缘能带失配变小,这种较小的势垒有利于多子(空穴)的输运,从而可提升太阳能电池的性能。通过高掺杂的 a-Si 也可以达到与 $\mu\text{c-Si}$ 一样的效果,但是在非晶硅中掺杂高浓度的硼并不容易,而在微晶硅中由于晶体相的存在提高了掺入硼的可能性^[4]。因此,本文中我们选用微晶硅作为发射区以及背场区的材料。

TCO 的使用会进一步提高太阳能电池的性能^[10]。本文中,我们采用一款数值模拟 AFORS-HET 软件,通过透明导电氧化膜的功函数(Work Function of Transparent Conductive Oxide, Wtco)对 $\mu\text{c-Si:H(n)}/\text{c-Si(p)}$ 异质结太阳能电池性能影响进行模拟优化。通过模拟优化,具有纹理型结构的 TCO/ $\mu\text{c-Si:H(n)}/\text{a-Si:H(i)}/\text{c-Si(p)}/\text{a-Si:H(i)}/\mu\text{c-Si:H(p+)}/\text{TCO}$ 双面型 HIT 太阳能电池获得了最佳效率,这为实际制造太阳能电池提供了理论参考依据。

1 电池结构与参数

太阳能电池是以半导体材料为主,利用光电材料吸收光能后发生光电转换的器件。本文模拟的电池结构如图 1 所示。通常情况下,人们可通过用等离子体增强化学气相沉积技术把掺杂的 $\mu\text{c-Si:H}$ 沉积到非掺杂的 c-Si 衬底上来制造 HJ 和 HIT 太阳能电池。简单的 HIT 太阳能电池是在 $\mu\text{c-Si}$ 发射极和 c-Si 衬底之间插入了一层很薄的 a-Si:H(i) 来钝化异质结界面(如图 1a)。同样,在 $\mu\text{c-Si:H(n)}$ 与 c-Si(p) 之间插入一层本征 a-Si:H(i) 以及在 c-Si(p) 与 $\mu\text{c-Si:H(p+)}$ 背场层之间插入一层本征 a-Si:H(i),可形成如图 1b 所示的双面型太阳能电池(Bifacial Heterojunction with Intrinsic Thin-layer, BIFHIT)。

AFORS-HET 是一款重要的异质结太阳能电池数值模拟工具, 本文用它来模拟基于 c-Si(p) 衬底的 HIT 太阳能电池。模拟时各层所采用的参数见表 1。模拟中, 入射光照条件为 AM1.5 和 100 mW/cm², 模拟光照条件为 AM1.5 和 100 mW/cm², 选取无界面态的理想情况。在模拟过程中, 除非有特别的声明, 所用的参数如上所述。

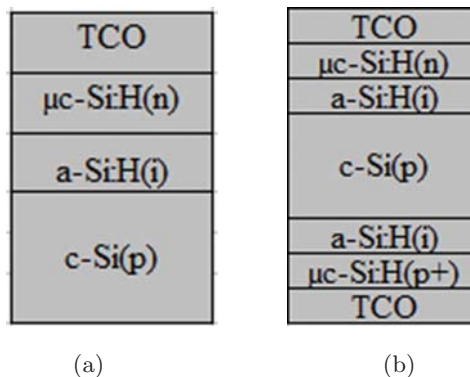


图 1 两种太阳能电池结构的示意图

表 1 模拟太阳能电池各层的参数

结构参数	c-Si(p)	a-Si:H(i)	μc-Si:H(n)	μc-Si:H(p+)
层厚 /nm	3×10^5	3	6	10
介电常数	11.9	11.9	11.9	11.9
电子亲和势 /eV	4.05	3.9	4	4
带隙 /eV	1.12	1.72	1.6	1.45
光学带隙 /eV	1.12	1.72	1.6	1.45
有效导带密度 /cm ⁻³	2.85×10^{19}	1×10^{20}	1×10^{19}	1×10^{19}
有效价带密度 /cm ⁻³	1.04×10^{19}	1×10^{20}	1×10^{19}	1×10^{19}
电子迁移率 /cm ² V ⁻¹ s ⁻¹	1107	5	50	50
空穴迁移率 /cm ² V ⁻¹ s ⁻¹	424	1	5	5
受主掺杂浓度 /cm ⁻³	1×10^{16}	0	0	5×10^{21}
施主掺杂浓度 /cm ⁻³	0	0	1×10^{20}	0
电子热速度 /cm·s ⁻¹	1×10^7	1×10^7	1×10^7	1×10^7
空穴热速度 /cm·s ⁻¹	1×10^7	1×10^7	1×10^7	1×10^7
层密度 /g·cm ⁻³	2.328	2.328	2.328	2.328
电子俄歇复合系数 /cm ⁶ s ⁻¹	2.2×10^{-31}	0	0	0
空穴俄歇复合系数 /cm ⁶ s ⁻¹	9.9×10^{-32}	0	0	0
带间复合系数 /cm ³ s ⁻¹	9.5×10^{-15}	0	0	0

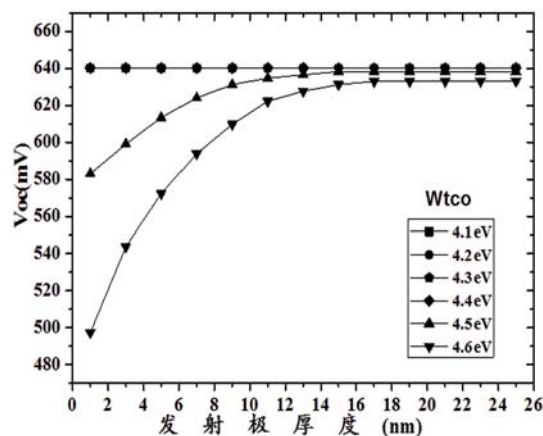
2 结果分析与讨论

2.1 TCO 的功函数对 TCO/μc-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p) HIT 太阳能电池性能的影响

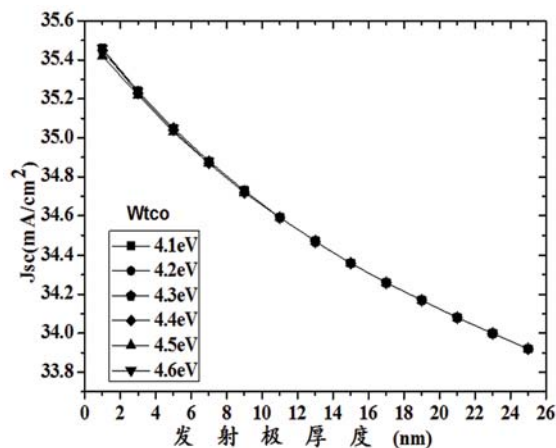
使用高性能 TCO 可以很容易把光生电子或空穴电荷引出来。因此, TCO 是影响 HIT 太阳能电池性能的一个非常重要的因素。当 μc-Si:H(n) 的掺杂浓度为 1×10^{20} cm⁻³ 时, 在图 2 所示的 TCO 的不同功函数下, μc-Si:H(n) 发射极厚度的变化对 TCO/μc-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p) 太阳能

电池性能具有影响。从图中可以明显看出, 当透明导电氧化物的功函数 W_{tco} 为不同值时, 短路电流密度 J_{sc} 随发射极的厚度变化会持续下降, 因为发射极越厚, 光通过后被吸收的就越多, 即吸收损失增大, 就会导致光生载流子数减少。而在 W_{tco} 为 4.1 eV~4.4 eV 时, 开路电压 V_{oc} 基本保持不变; 当 W_{tco} 为 4.5 eV 时, 随着发射极的厚度从 1 nm 增加到 13 nm, V_{oc} 从 583 mV 增加到 636.6 mV; 在此之后, 随着发射极厚度的增加, 开路电压 V_{oc} 保持在 639.8 mV 不变; 但当 W_{tco}

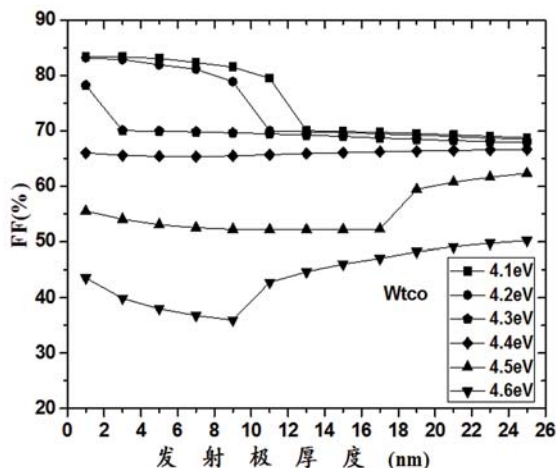
为 4.6 eV、发射极为 1 nm 时, 开路电压 V_{oc} 仅仅为 497.3 mV, 严重失真; 之后当发射极的厚度增加到 15 nm 时, V_{oc} 也增加到了 631.3 mV; 最后在 633 mV 处达到饱和。同样, 在不同的 W_{tco}



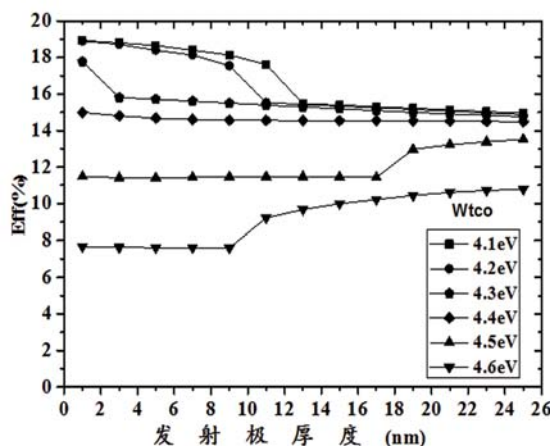
(a)



(b)



(c)



(d)

图 2 不同功函数下, $\mu\text{c-Si:H(n)}$ 发射极厚度变化对太阳能电池性能的影响

下, 太阳能电池的效率 Eff 会随着发射极厚度的增加出现不同的变化; 总的趋势是随着 W_{tco} 的增大, 太阳能电池的效率降低; 当 W_{tco} 小于 4.4 eV 时, 电池的效率随着发射极厚度的增大逐渐减小, 直至趋于稳定; 而当 W_{tco} 大于 4.4 eV 时, 电池效率随着发射极厚度的增大逐渐增加, 直至趋于稳定。

对于上述情况, 从太阳能电池的能带对齐来考虑。图 3 中, 发射极左边是 $\text{TCO}/\mu\text{c-Si:H(n)}$ 肖特基接触, 发射极右边是 $\mu\text{c-Si:H(n)}/\text{c-Si(p)}$ 异质结接触。当 W_{tco} 较低时, TCO 的费米能级高于 $\mu\text{c-Si:H(n)}$ 的费米能级, $\mu\text{c-Si:H(n)}$ 的费米能级高于 c-Si(p) 的费米能级。当费米能级对齐后, 一方面 $\text{TCO}/\mu\text{c-Si:H(n)}$ 肖特基接触的内建电压方向与 $\mu\text{c-Si:H(n)}/\text{c-Si(p)}$ 异质结的内建电压方向相同, 使得 $\mu\text{c-Si:H(n)}/\text{c-Si(p)}$ 异质结的内建电压变大; 另一方面, $\text{TCO}/\mu\text{c-Si:H(n)}$ 界面 $\mu\text{c-Si:H(n)}$ 的能带向下弯曲, 导带势垒降低, 有利于电子的收集。所以在 W_{tco} 低时, 电池的开路电压 V_{oc} 大, 从而转换效率也大。而当 W_{tco} 高时, 正好与上述情况相反, TCO 的费米能级低于 $\mu\text{c-Si:H(n)}$ 的费米能级, $\mu\text{c-Si:H(n)}$ 的费米能级高于 c-Si(p) 的费米能级; 当费米能级对齐后, $\text{TCO}/\mu\text{c-Si:H(n)}$ 肖特基接触的内建电压方向与 $\mu\text{c-Si:H(n)}/\text{c-Si(p)}$ 异质结的内建电压的方向相反, 会减小 $\mu\text{c-Si:H(n)}/\text{c-Si(p)}$ 异质结的内建

电压。所以在 W_{tco} 为高时, 电池的开路电压 V_{oc} 变小, 导致转换效率变小; 另一方面, 随着 W_{tco} 增大, $\text{TCO}/\mu\text{c-Si:H(n)}$ 肖特基接触的内建电压变大, 在发射极的耗尽区变宽; 如果发射极不是足够厚的话, $\text{TCO}/\mu\text{c-Si:H(n)}$ 肖特基接触的耗尽区和 $\mu\text{c-Si:H(n)}/\text{c-Si(p)}$ 异质结的耗尽区就会在发射极处重叠。而 W_{tco} 越高, TCO 的费米能级与 $\mu\text{c-Si:H(n)}$ 的费米能级的落差也越大。若发射极很薄, 则 $\text{TCO}/\mu\text{c-Si:H(n)}$ 肖特基接触反方向的内建电场就会对 $\mu\text{c-Si:H(n)}/\text{c-Si(p)}$ 异质结的内建电压造成严重影响, 即在发射极不是足够厚的情况下, 电池的 V_{oc} 和 FF 将会降低, 这样会使太阳能电池的性能变差, 这是不可取的。

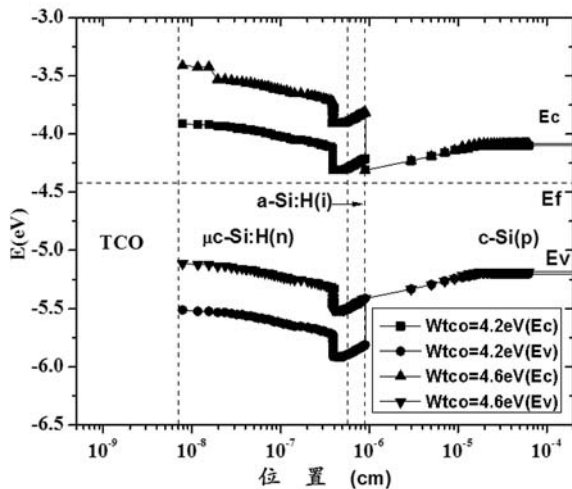


图 3 不同 W_{tco} 下, $\text{TCO}/\mu\text{c-Si:H(n)}/\text{a-Si:H(i)}/\text{c-Si(p)}$ 太阳能电池的能带

因此, 发射极的厚度应该等于或略大于 $\text{TCO}/\mu\text{c-Si:H(n)}$ 肖特基接触的耗尽区和 $\mu\text{c-Si:H(n)}/\text{c-Si(p)}$ 异质结的耗尽区在发射极区的厚度总和。否则, 发射极层将是一个光学死层, $\mu\text{c-Si:H(n)}$ 仅仅在 $\text{TCO}/\text{c-Si(p)}$ 结构中扮演了一个插入的角色, 这在太阳能电池中是不可取的。但发射极也不能太厚, 否则会使短路电流密度 J_{sc} 降低。所以, $\text{TCO}/\mu\text{c-Si:H(n)}/\text{a-Si:H(i)}/\text{c-Si(p)}$ 太阳能电池的最佳性能可在 W_{tco} 低于 4.4 eV、相应的发射极厚度为 1 nm 时获得, 如图 2 所示。但在实际中, 我们使用等离子体增强化学气相沉积技术来沉积这样的薄层, 对沉积薄层厚度的最

低限制是 6 nm, 因此考虑将 6 nm 作为发射极的一个优化厚度。

2.2 $\mu\text{c-Si:H(p+)}/\text{TCO}$ 接触对 $\text{TCO}/\mu\text{c-Si:H(n)}/\text{a-Si:H(i)}/\text{c-Si(p)}/\text{a-Si:H(i)}/\mu\text{c-Si:H(p+)}/\text{TCO}$ 太阳能电池性能的影响

图 4 所示为背面 TCO 不同功函数下 $\mu\text{c-Si:H(p+)}$ 背场区厚度的变化对 $\text{TCO}/\mu\text{c-Si:H(n)}/\text{a-Si:H(i)}/\text{c-Si(p)}/\text{a-Si:H(i)}/\mu\text{c-Si:H(p+)}/\text{TCO}$ 双面型太阳能电池性能的影响。图中明显表明, 当 W_{tco} 较高时, 该太阳能电池具有良好的性能; 当 W_{tco} 较低时, 该太阳能电池具有劣质的性能。但当背场区的厚度超过一定值时, 就能克服这种劣质性能。例如, 当 W_{tco} 为 5.0 eV、背场区的厚度超过 5 nm 时, 该种结构的太阳能电池就可以获得最佳性能; 而当 W_{tco} 为 5.1 eV, 背场区的厚度超过 3 nm 时, 该种结构的太阳能电池可以获得最佳性能。图中也表明大的背场区厚度不会使太阳能电池的性能下降, 这是因为太阳光仅仅从前表面入射, 不会在 $\mu\text{c-Si:H(p+)}$ 背场区产生光学死层, 因此可以按实际需求适当选取大的 $\mu\text{c-Si:H(p+)}$ 背场区厚度。

从太阳能电池的能带对齐方面考虑, 背场区的右边是 $\mu\text{c-Si:H(p+)}/\text{TCO}$ 肖特基接触, 背场区的左边是 $\text{c-Si(p)}/\mu\text{c-Si:H(p+)}$ 异质结接触。当 W_{tco} 较高时, TCO 的费米能级低于 $\mu\text{c-Si:H(p+)}$ 的费米能级, $\mu\text{c-Si:H(p+)}$ 的费米能级低于 c-Si(p) 的费米能级; 当费米能级对齐后, 一方面, $\mu\text{c-Si:H(p+)}/\text{TCO}$ 肖特基接触的内建电压方向与 $\text{c-Si(p)}/\mu\text{c-Si:H(p+)}$ 异质结的内建电压的方向相同, 使 $\text{c-Si(p)}/\mu\text{c-Si:H(p+)}$ 异质结的内建电压变大; 另一方面, $\mu\text{c-Si:H(p+)}/\text{TCO}$ 界面 $\mu\text{c-Si:H(p+)}$ 的能带向上弯曲, $\text{c-Si(p)}/\mu\text{c-Si:H(p+)}$ 界面使导带失配变大, 价带失配减小, $\mu\text{c-Si:H(p+)}$ 形成更加有利于少子的背场, 而小的价带失配有 利于空穴被背电极收集, 从而可提高电池的转换效率。而当 W_{tco} 较低时, 就必须通过增加背场区的厚度来避免电池的劣质性能。

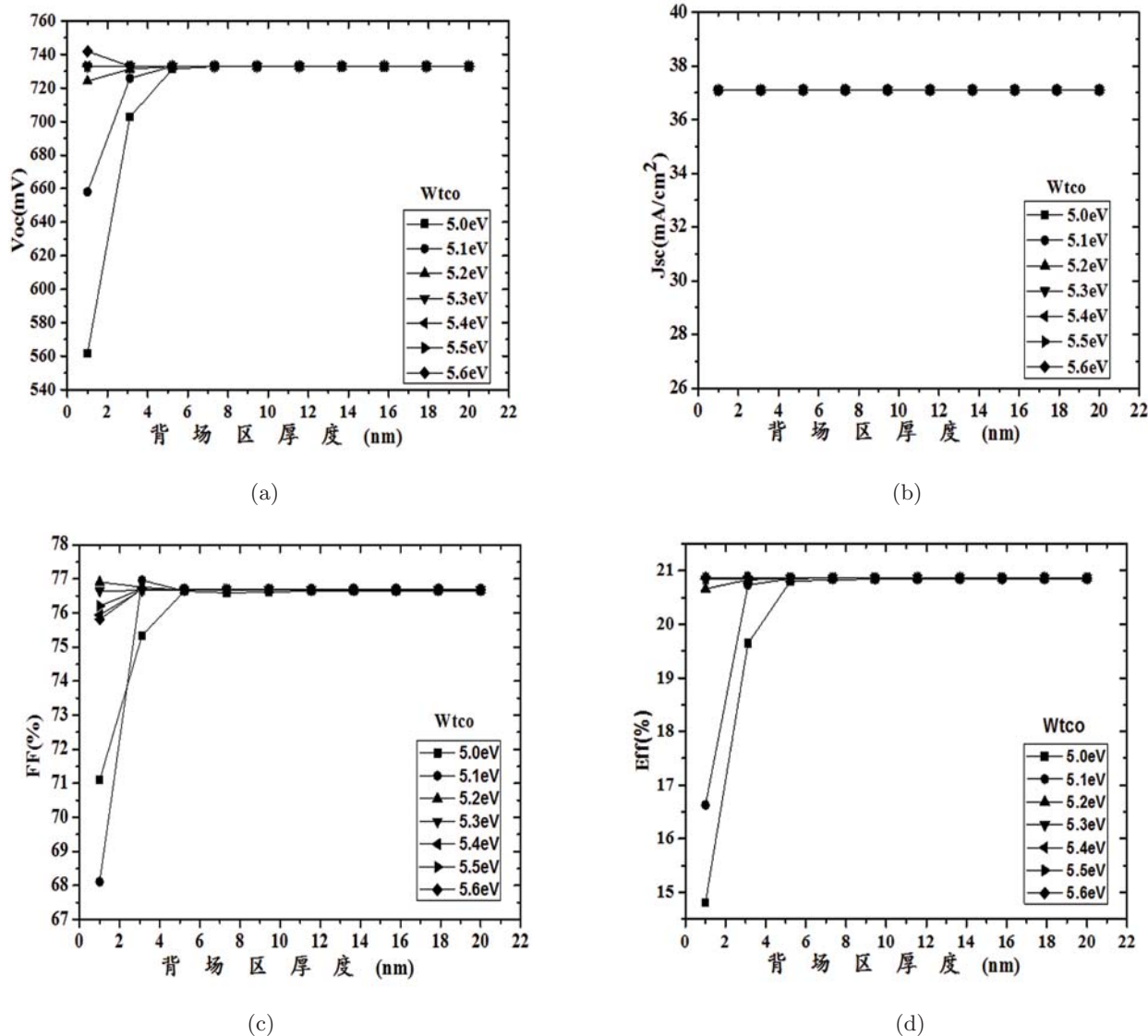


图 4 不同功函数下, $\mu\text{c-Si:H(p+)}$ 背场区厚度变化对太阳能电池性能的影响

2.3 不同材料 TCO 对 $\text{TCO}/\mu\text{c-Si:H(n)}/\text{a-Si:H(i)}/\text{c-Si(p)}/\text{a-Si:H(i)}/\mu\text{c-Si:H(p+)}/\text{TCO}$ 太阳能电池性能的影响

实际中,常用的 TCO 功函数范围是: 掺锡氧化铟 (Indium Tin Oxide, ITO) 为 3.6 eV~5.3 eV, 掺铝氧化锌 (Aluminum Zinc Oxide, AZO) 为 3.1 eV~4.5 eV, 氧化锌 (Zinc Oxide, ZnO) 为 3.1 eV~4.5 eV^[11]。ITO 是工业最常用的材料,但在自然环境中锡/铟的储量稀少,且铟是一种有毒元素,对人体和自然环境会造成损害。ITO 薄膜在氢气环境下会因发生还原反应而变黑,透光率下

降。如今,ITO 薄膜的替代材料 AZO 和 ZnO 可以克服上述缺点且具有良好的光学性能。

材料表面的纹理具有良好的陷光效应,可使光封闭在材料中,不反射回去,这样可以进一步提高太阳能电池的效率。上面我们讨论了电池前后表面 TCO 的功函数对太阳能电池性能的影响。这里我们选取前表面 TCO 的功函数为 4.2 eV,发射极厚度为 6 nm,后表面的功函数为 5.4 eV,背场区的厚度为 10 nm,来进一步探讨 ITO 和 ZnO 作为 TCO 材料时,平面型和纹理型的各层材料对双面型 $\text{TCO}/\mu\text{c-Si:H(n)}/\text{a-Si:H(i)}/\text{c-Si(p)}/\text{a-Si:H(i)}/\mu\text{c-Si:H(p+)}/\text{TCO}$ 太阳能电池性能

的影响。图 5 给出了模拟后的 J-V 曲线对比图。从图中我们明显可以看到, 具有纹理结构的 TCO 材料比平面型 TCO 材料的电流密度大, 这是由于陷光效应引起的, 说明纹理型的 TCO 材料太阳能电池具有优良的性能。

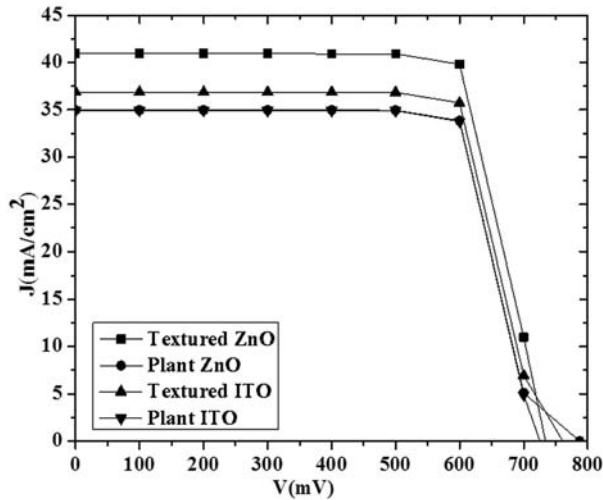


图 5 不同 TCO 材料及其各层表面不同结构, 双面型 HIT 太阳能电池的 J-V 曲线对比

对于 TCO/ $\mu\text{c-Si:H(n)}$ / a-Si:H(i) / c-Si(p) / a-Si:H(i) / $\mu\text{c-Si:H(p+)}$ /TCO 太阳能电池, 纹理型的 ITO 比平面型的 ITO 开路电压大 43 mV, 电流密度大 1.93 mA/cm^2 , 使电池的转换效率从 20.19% 上升到了 21.36%, 见表 2。而纹理型的 ZnO 比平面型的 ZnO 开路电压小 28.9 mV, 电流密度大 5.98 mA/cm^2 , 使电池的转换效率从 20.23% 上升到了 23.78%。因此, 总体上 ZnO 作为透明导电膜材料比 ITO 更有优势, 并且采用纹理型的 ZnO 可使电池的效率达到 23.78%。

表 2 平面型和纹理型的不同 TCO 材料
对太阳能电池性能的影响

TCO 材料及属性	Voc	Jsc	FF	Eff
平面型 (Plant) ITO	732mV	34.92 mA/cm^2	78.98%	20.19%
纹理型 (Textured) ITO	775mV	36.85 mA/cm^2	74.78%	21.36%
平面型 (Plant) ZnO	787.5mV	34.96 mA/cm^2	73.5%	20.23%
纹理型 (Textured) ZnO	758.6mV	40.94 mA/cm^2	76.58%	23.78%

3 结论

对于 $\mu\text{c-Si:H(n)}$ / c-Si(p) 太阳能电池, 使用 AFORS-HET 数值模拟软件分别讨论了前表面 TCO/ $\mu\text{c-Si:H(n)}$ 接触、后表面 TCO/ $\mu\text{c-Si:H(p+)}$ 接触以及不同 TCO 材料时平面型和纹理型的各层材料对太阳能电池性能的影响。结果表明, 在前表面 TCO/ $\mu\text{c-Si:H(n)}$ 接触中, TCO 的功函数 W_{tco} 应该低于 4.4 eV。当相应的发射极厚度为 6 nm 时, 电池的性能可达到最佳; 在后表面 TCO/ $\mu\text{c-Si:H(p+)}$ 接触中, TCO 的功函数 W_{tco} 应该大于 5.2 eV, 而背场区的厚度可以根据实际情况选择。只要其导电性能足够好, 可以选择大的背场区厚度。通过模拟不同 TCO 材料的平面型和纹理型结构对太阳能电池性能的影响, 我们得出太阳能电池采用纹理型结构的 TCO 比采用平面型结构的 TCO 效果更好, 并且 ZnO 作为透明导电膜材料比 ITO 更有优势, 而纹理型的 ZnO 透明导电膜可以使电池的开路电压达到 758.6 mV, 短路电流密度达到 40.94 mA/cm^2 , 最终可使双面型 TCO/ $\mu\text{c-Si:H(n)}$ / a-Si:H(i) / c-Si(p) / a-Si:H(i) / $\mu\text{c-Si:H(p+)}$ /TCO HIT 太阳能电池的转换效率达到 23.78%。

参考文献

- [1] Sawada T, Terada N, Tsuge S, et al. High-efficiency a-Si/c-Si Heterojunction Solar Cell[J]. *Photovoltaic Energy Conversion*, 1994. *Conference Record of the Twenty Fourth. IEEE Photovoltaic Specialists Conference-1994*, 1994 IEEE First World Conference on, 1994, 2:1219-1226.
- [2] Taguchi M, Yano A, Tohoda S, et al. 24.7% Record Efficiency HIT Solar Cell on Thin Silicon Wafer[J]. *Photovoltaics, IEEE Journal of*, 2014,4(1): 96-99.
- [3] 白晓宇, 郭超群, 柳琴, 等. 缓冲层对 p-a-Si/n-a-Si 异质结太阳能电池影响的计算分析 [J]. *中国科学: 物理学力学天文学*, 2013,43(8):923-929.
- [4] 赵雷, 周春兰, 李海玲, 等. a-Si(n)/c-Si(p) 异质结太阳能电池薄膜硅背场的模拟优化 [J]. *物理学报*, 2008,57(5):3212-3219.
- [5] Rostan P J, Rau U, Nguyen V X, et al. Low-temperature a-Si:H/ZnO/Al Back Contacts for High-efficiency Silicon Solar Cells [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2006, 90(9): 1345-1352.

- [6] Xu Y, Hu Z, Diao H, et al. Heterojunction Solar Cells with n-type Nanocrystalline Silicon Emitters on p-type c-Si Wafers [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2006, **352**(9): 1972–1975.
- [7] Varache R, Kleider J P, Favre W, et al. Band Bending and Determination of Band Offsets in Amorphous/Crystalline Silicon Heterostructures from Planar Conductance Measurements [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, **112**(12): 123717.
- [8] 胡志华, 廖显波, 曾祥波, 等. 纳米硅 / 晶体硅异质结太阳能电池的数值模拟分析 [J]. *物理学报*, 2003, **52**(1): 0217–08.
- [9] Rawat A, Sharma M, Chaudhary D, et al. Numerical Simulations for High Efficiency HIT Solar Cells Using Microcrystalline Silicon as Emitter and Back Surface Field (BSF) Layers [J]. *Solar Energy*, 2014, **110**: 691–703.
- [10] Veschetti Y, Muller J C, Damon-Lacoste J, et al. Optimisation of Amorphous and Polymorphous Thin Silicon Layers for the Formation of the Front-side of Heterojunction Solar Cells on p-type Crystalline Silicon Substrates [J]. *Thin Solid Films*, 2006, **511**: 543–547.
- [11] 马斌, 冯晓东. HIT 太阳能电池性能的模拟计算 [J]. *南京工业大学学报*, 2014, **36**(4): 1671–7627.

(上接第 29 页)

二乘法, 建立了热像仪标定模型, 并通过和方差 “SSE”、确定系数 “R-square” 和拟合标准差 “RMSE” 评价指标衡量了拟合曲线的拟合精度, 最后还分别基于加权最小二乘法与最小二乘法对目标进行了辐射测量实验。

在实例分析中, 无论是从标定结果还是从辐射测量结果上看, 基于加权最小二乘的拟合精度和测量精度都高于基于最小二乘的拟合精度和测量精度。实验结果表明, 基于加权最小二乘的热像仪标定具有较强的实用性。

参考文献

- [1] 张艳超, 赵建, 孙强, 等. 非制冷红外焦平面成像系统辐射测温技术研究 [J]. *红外*, 2011, **32**(02): 1–4.
- [2] 戴映红. 红外热像仪校准方法探讨 [J]. *计量技术*, 2004, **40**(12): 32–35.
- [3] 谭锋, 傅强. 一种可提高红外热像仪测温精度的算法 [J]. *红外*, 2011, **32**(06): 23–27.
- [4] 刘缠牢, 谭立勋, 李春燕. 基于 BP 神经网络的红外测温系统温度标定方法 [J]. *激光与红外*, 2006, **36**(08): 655–667.
- [5] 杨词银, 张建萍, 曹立华. 基于实时校标的目标红外辐射测量新方法 [J]. *红外与毫米波学报*, 2011, **30**(03): 284–288.
- [6] 孙志远, 李孟华, 乔彦峰, 等. BP 神经网络在比色法测温系统标定中的应用 [J]. *激光与红外*, 2007, **37**(12): 1274–1277.
- [7] 王湘波, 陈小文, 李春来, 等. 制冷型热红外焦平面成像系统数据处理的关键技术 [J]. *红外*, 2014, **35**(05): 7–12.
- [8] 李园园, 屈惠明, 刘文俊. 基于环境辐射的现场目标发射率测量方法研究 [J]. *激光与红外*, 2013, **43**(03): 272–275.
- [9] 李云红, 孙晓刚, 杨幸芳, 等. 红外热像仪测温精度的理论分析 [J]. *西安工程科技学院学报*, 2007, **21**(05): 635–639.
- [10] 孙晓刚, 李云红. 红外热像仪测温技术发展综述 [J]. *激光与红外*, 2008, **38**(02): 101–104.