

载流子选择性接触: 高效硅太阳能电池的选择

肖友鹏 高超 王涛 周浪

Carrier selective contacts: a selection of high efficiency silicon solar cells

Xiao You-Peng Gao Chao Wang Tao Zhou Lang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 158801 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.158801

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.158801>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I15>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超薄高速率单结微晶硅薄膜电池及其叠层电池

Ultra-thin film microcrystalline silicon with high deposition rate and its application in tandem silicon solar cells

物理学报.2015, 64(22): 228801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.228801>

选择性发射极晶体硅太阳能电池的二维器件模拟及性能优化

Two-dimensional device simulation and performance optimization of crystalline silicon selective-emitter solar cell

物理学报.2014, 63(6): 068801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.068801>

$\alpha$ -Si:H/SiN<sub>x</sub> 叠层薄膜对晶体硅太阳能电池的钝化

Passivation property of  $\alpha$ -Si:H/SiN<sub>x</sub> stack-layer film in crystalline silicon solar cells

物理学报.2013, 62(19): 198801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.198801>

彩色多晶硅太阳能电池性能研究

Performance of polycrystal silicon color solar cells

物理学报.2013, 62(16): 168802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.168802>

一种新方法制备硅/聚(3, 4-乙撑二氧噻吩)核/壳纳米线阵列杂化太阳能电池

A new approach to fabricating silicon nanowire/poly(3, 4-ethylenedioxythiophene) hybrid heterojunction solar cells

物理学报.2013, 62(10): 108801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.108801>

## 载流子选择性接触：高效硅太阳能电池的选择\*

肖友鹏 高超 王涛 周浪†

(南昌大学光伏研究院, 南昌 330031)

(2017年4月6日收到; 2017年5月3日收到修改稿)

太阳能电池可看成由光子吸收层和接触层两个基本单元组成, 接触层是高复合活性金属界面和光子吸收层之间的区域. 为了进一步提高硅太阳能电池的转换效率, 关键是降低光子吸收层和接触之间的复合损失. 近年来, 载流子选择性接触引起了光伏界的研究兴趣, 其被认为是接近硅太阳能电池效率理论极限的最后的障碍之一. 本文分析了三种类型的载流子选择性接触: 在光子吸收层与金属界面之间引入薄的重掺杂层, 即所谓的发射极或背面场; 利用两种材料之间的导带或价带对齐; 利用高功函数的金属氧化物与晶硅接触从而在晶硅中感应能带弯曲. 基于一维太阳能电池模拟软件 wxAMPS, 模拟了扩散同质结硅太阳能电池 [结构为  $(p^+)c\text{-Si}/(n)c\text{-Si}/(n^+)c\text{-Si}$ ]、非晶硅薄膜硅异质结太阳能电池 [结构为  $(p^+)a\text{-Si}/(i)a\text{-Si}/(n)c\text{-Si}/(i)a\text{-Si}/(n^+)a\text{-Si}$ ] 和氧化物薄膜硅异质结太阳能电池 [结构为  $(n)\text{MoO}_x/(n)c\text{-Si}/(n)\text{TiO}_x$ ] 暗态下的能带结构和载流子浓度的空间分布, 其中  $c\text{-Si}$  为晶硅;  $a\text{-Si}$  为非晶硅;  $(i)$ ,  $(n)$  和  $(p)$  分别表示本征、 $n$ 型掺杂和  $p$ 型掺杂. 模拟结果表明: 载流子选择性接触的核心是在接触处晶硅表面附近形成载流子浓度空间分布的不对称进而使得电导率的不对称, 形成了对电子的高阻和空穴的低阻或者对空穴的高阻和电子的低阻, 从而让空穴轻松通过同时阻挡电子, 或者让电子轻松通过同时阻挡空穴, 形成空穴选择性接触或者电子选择性接触.

关键词: 硅太阳能电池, 载流子选择性接触, 电导率不对称

PACS: 88.40.Jj, 73.40.Lq, 61.43.Bn

DOI: 10.7498/aps.66.158801

## 1 引言

太阳能电池可看成由吸收太阳光产生自由电子和空穴的光子吸收层和将光生自由电子和空穴输运到太阳能电池外部的接触层两个基本单元组成. 提高硅太阳能电池的效率需要降低复合电流, 提升光子吸收层即晶硅的品质, 尽量减少晶硅中的杂质和缺陷, 使得硅太阳能电池总的复合仅限于本征体复合机制<sup>[1]</sup>. 2016年, 日本 Kaneka 公司制备的面积为  $180\text{ cm}^2$  的叉指背接触硅异质结太阳能电池转换效率高达 26.33%<sup>[2]</sup>, 离硅太阳能电池 29.4% 理论效率极限<sup>[3]</sup> 又进了一步. 为了更加接近硅太阳能电池的理论效率极限, 关键是进一步降低金属接触处的复合损失. 载流子选择性接触被看成是接近硅太阳能电池理论效率极限的最后障碍之一<sup>[4]</sup>, 这种接触可以实现低少子复合和有效多子输运. 这里少子指的

是接触处的少子, 不是要收集的载流子, 不是体材料中的少子; 多子指的是需要收集的载流子, 多子收集损失仅限于欧姆损失, 即多子接触电阻必须很低<sup>[5]</sup>.

图 1 是硅太阳能电池载流子选择性接触物理模型示意图, 其中  $E_{Fn}$  和  $E_{Fp}$  分别为电子和空穴的准费米能级, 准费米能级分裂即  $(E_{Fn}-E_{Fp})$  决定了硅太阳能电池能够获得的隐含开路电压 ( $iV_{oc}$ ). 准费米能级梯度  $\nabla E_{Fn}$  和  $\nabla E_{Fp}$  是形成电子电流密度  $J_n$  和空穴电流密度  $J_p$  的热力学驱动力, 并通过  $J_n = n\mu_n\nabla E_{Fn} = \sigma_n\nabla E_{Fn}/q$  和  $J_p = p\mu_p\nabla E_{Fp} = \sigma_p\nabla E_{Fp}/q$  表达出来<sup>[6]</sup>, 其中  $n$  和  $p$  分别为电子和空穴浓度,  $\mu_n$  和  $\mu_p$  分别为电子和空穴迁移率,  $\sigma_n$  和  $\sigma_p$  分别为电子和空穴的电导率. 当电子电流密度  $J_n$  和空穴电流密度  $J_p$  同时到达空穴选择性接触时, 空穴电导率  $\sigma_p$  对空穴来说是高的或者说是空穴低阻, 空穴电流密度  $J_p$  轻松

\* 国家自然科学基金 (批准号: 51361022, 61574072) 和江西省博士后研究人员科研项目 (批准号: 2015KY12) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lzhou@ncu.edu.cn

通过, 相反电子电导率  $\sigma_n$  对电子来说是低的或者说是电子高阻, 电子电流密度  $J_n$  受到阻挡. 当电子电流密度  $J_n$  和空穴电流密度  $J_p$  同时到达电子选择性接触时则是电子电流密度  $J_n$  轻松通过, 空穴电流密度  $J_p$  受到阻挡. 因此载流子选择性接触应当只对一种导电类型的载流子具有选择性, 只让一种导电类型的载流子通过, 这意味着接触处的电导率对一种导电类型载流子要高而对一种导电类型载流子要低, 或者说电导率的不对称. 换句话说, 硅太阳电池不同的接触不仅负责收集不同导电类型的载流子, 也充当着一种半透膜, 从而一种接触运输电子阻挡空穴, 另一种接触运输空穴阻挡电子 [6,7].

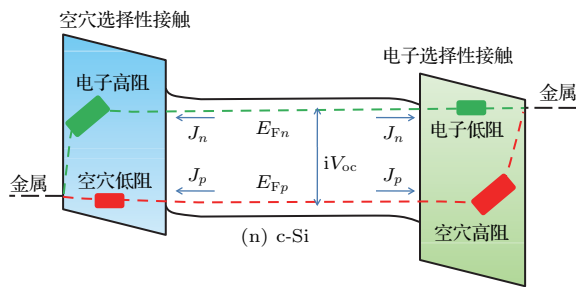


图1 (网刊彩色) 硅太阳电池载流子选择性接触示意图  
Fig. 1. (color online) Schematic of the carrier selective contacts in silicon solar cells.

晶硅表面存在着大量的缺陷, 从而在晶硅禁带中引入大量缺陷能级, 当金属直接与晶硅接触时, 这些缺陷能级不可避免地会充当有效的复合中心, 产生高的复合电流. 同时金属与晶硅的功函数匹配, 对电子和空穴的电导率都高, 因此这种接触对载流子没有选择性.

为了钝化晶硅表面的缺陷能级, 通常在硅片上沉积或生长介质层, 如  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiN}_x$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  等. 尽管这些介质层能够给硅片表面提供优秀的钝化性能, 降低复合活性, 但由于此类材料与硅的导带和价带都没有对齐, 没有表现出对电子和空穴高的电导率, 因此这种接触对载流子也没有选择性.

载流子选择性接触的核心是电导率的不对称 [8], 电导率的不对称可以通过调整迁移率和载流子浓度来实现. 硅中电子和空穴的迁移率具有相同的数量级, 因此只有通过调整载流子浓度来实现电导率的不对称 [9]. 调整载流子浓度最简单的方式是掺杂, 在硅吸收层和金属界面之间引入一层薄的重掺杂层, 从而在单一的半导体材料中产生不同的电子和空穴的电导率, 即通常所说的发射极或背面场, 如此电导率只对一种导电类型的载流子来说是高的, 这是一种与金属接触的典型方法. 然而这种

方法以增加俄歇复合为代价, 而且掺杂通常需要热扩散和高温激活, 是一种比较昂贵的制程 [10].

Yablonoich 等 [11] 指出一个理想的太阳电池应建立两个异质结结构, 应该将吸收层置于两个宽带隙半导体之间. 利用感应能带弯曲或异质结的能带排列以使得电子和空穴浓度严重不对称从而导致电导率不对称, 来实现对载流子的选择性. 如果两种材料的导带对齐而价带没有对齐, 意味着这是一种电子选择性接触, 而这种电子的选择性是由两种材料界面处的空穴浓度减少来实现的. 同样, 如果两种材料的价带对齐而导带没有对齐, 意味着这是一种空穴选择性接触.

载流子选择性接触如此重要, 促使我们基于一维太阳电池模拟软件 wxAMPS, 对硅太阳电池的能带结构和载流子浓度以及电导率进行数值模拟, 讨论载流子选择性接触的物理机制和设计原则.

## 2 器件结构与模拟参数

分析载流子选择性接触的复杂性在于它们的特性与电压和光照相关. 不过一个设计良好的硅太阳电池, 在大部分工作条件下其固有性能应当相对保持不变, 从而可以利用暗态下硅太阳电池的特性探究载流子选择性接触的物理机制. 我们选择了扩散同质结硅太阳电池、非晶硅薄膜硅异质结太阳电池和氧化物薄膜硅异质结太阳电池结构进行数值模拟, 三者的器件结构分别如图 2 (a)、图 2 (b) 和图 2 (c) 所示.

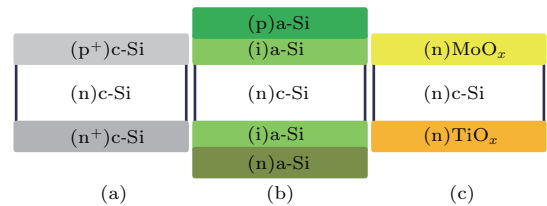


图2 (网刊彩色) 模拟器件结构 (a) 扩散同质结硅太阳电池; (b) 非晶硅薄膜硅异质结太阳电池; (c) 氧化物薄膜硅异质结太阳电池

Fig. 2. (color online) Structures of silicon solar cell: (a) Diffused homojunction solar cell; (b) silicon heterojunction solar cell with amorphous silicon thin films; (c) silicon heterojunction solar cell with metal oxide thin films.

一维模拟软件 wxAMPS 是在著名太阳电池模拟软件 AMPS 的基础上改进求解算法而开发的一款新型模拟软件 [12], 模拟所涉及的材料特性参数 [13-17] 如表 1 所列.

表1 硅太阳能电池模拟参数设置  
Table 1. Parameters of silicon solar cells.

参数	(n)c-Si	(p <sup>+</sup> )c-Si	(n <sup>+</sup> )c-Si	(i)a-Si	(p)a-Si	(n)a-Si	MoO <sub>x</sub>	TiO <sub>x</sub>
厚度	200 μm	5 μm	5 μm	3 nm	10 nm	10 nm	15 nm	15 nm
介电常数	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	86	86
电子亲和势/eV	4.05	4.05	4.05	3.9	3.9	3.9	6.7	4
禁带宽度/eV	1.12	1.12	1.12	1.72	1.78	1.78	3.3	3.2
导带有效态密度/cm <sup>-3</sup>	2.8×10 <sup>19</sup>	2.8×10 <sup>19</sup>	2.8×10 <sup>19</sup>	3.2×10 <sup>20</sup>	3.2×10 <sup>20</sup>	3.2×10 <sup>20</sup>	7.93×10 <sup>20</sup>	7.93×10 <sup>20</sup>
价带有效态密度/cm <sup>-3</sup>	1.04×10 <sup>19</sup>	1.04×10 <sup>19</sup>	1.04×10 <sup>19</sup>	3.2×10 <sup>20</sup>	3.2×10 <sup>20</sup>	3.2×10 <sup>20</sup>	1.79×10 <sup>19</sup>	1.79×10 <sup>19</sup>
电子迁移率/cm <sup>2</sup> ·(V·s) <sup>-1</sup>	1350	1350	1350	10	1	2	0.1	0.1
空穴迁移率/cm <sup>2</sup> ·(V·s) <sup>-1</sup>	450	450	450	2	0.2	0.4	0.1	0.1
受主掺杂浓度/cm <sup>-3</sup>		1×10 <sup>17</sup>			1×10 <sup>19</sup>			
施主掺杂浓度/cm <sup>-3</sup>	3×10 <sup>15</sup>		1×10 <sup>17</sup>			1×10 <sup>19</sup>	1×10 <sup>19</sup>	1×10 <sup>19</sup>

### 3 模拟结果与讨论

#### 3.1 扩散同质结硅太阳能电池

图3为暗态下扩散同质结硅太阳能电池的能带图, 这里(p<sup>+</sup>)c-Si和(n<sup>+</sup>)c-Si就是所谓的发射极和背面场。图4显示的是暗态下扩散同质结硅太阳能电池载流子浓度空间分布, 高的p型和n型掺杂分别使得发射极一端空穴浓度p升高和背面场一端电子浓度n升高, 即分别增加了发射极一端空穴的电导率σ<sub>p</sub>(=pqμ<sub>p</sub>)和背面场一端电子的电导率σ<sub>n</sub>(=nqμ<sub>n</sub>), 从而分别实现空穴选择性接触和电子选择性接触。可以看到, 在扩散同质结硅太阳能电池中光子吸收层即(n)c-Si和载流子选择性接触即(p<sup>+</sup>)c-Si和(n<sup>+</sup>)c-Si由同种材料组成。

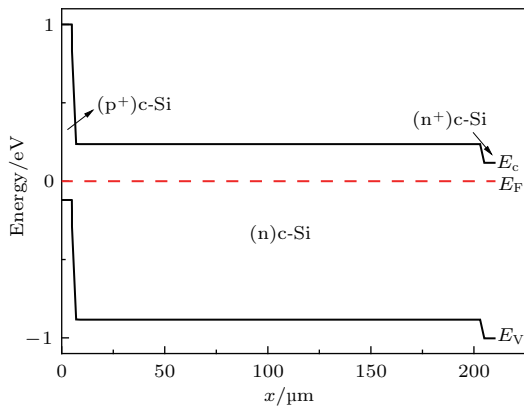


图3 暗态下扩散p-n同质结硅太阳能电池能带图  
Fig. 3. Energy diagram for the diffused p-n homojunction silicon solar cell in the dark.

扩散同质结硅太阳能电池是在晶硅衬底上扩散掺杂出一个相反掺杂类型的区域并与衬底组成p-n同质结, p-n结被认为是太阳能电池工作的基本要素, 暗态下p-n结空间电荷区建立的内建电场被认为是光照下太阳能电池形成电流的驱动力。如果p-n结空间电荷区的内建电场不存在, 很难想象太阳能电池能够工作, 也就是说如果没有内建电场的存在带电载流子就不能分离。实际上, 形成电流的驱动力是准费米能级梯度, 电子和空穴的分离和选择性输运到太阳能电池的两端是因为器件的不同区域电导率的不同或者说电导率的不对称, 而不是内建电场, 因此Würfel等[8]和Bullock等[18]认为p-n结并不是太阳能电池所必须的, 以金属氧化物MoO<sub>x</sub>为空穴收集层的硅异质结太阳能电池就是典型的例子。

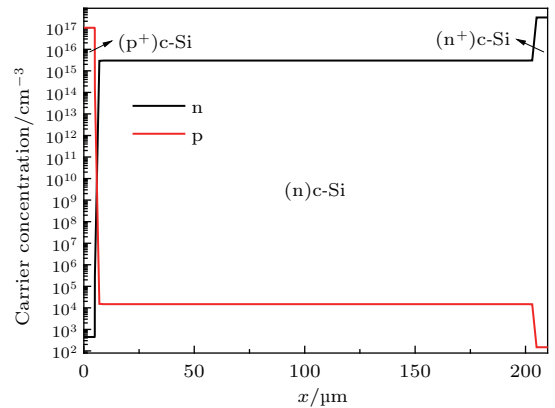


图4 (网刊彩色) 暗态下扩散p-n同质结硅太阳能电池载流子浓度空间分布

Fig. 4. (color online) Spatial distribution of the carrier concentration for the diffused p-n homojunction silicon solar cell in the dark.

### 3.2 非晶硅薄膜硅异质结太阳能电池

非晶硅薄膜硅异质结太阳能电池是具有载流子选择性接触的经典例子, 其显著的优点是能够取得高达 750 mV 的开路电压 [19], 只比高品质晶硅吸收层本征体复合决定的开路电压上限低约 10 mV [3]. 取得如此高的开路电压, 一方面得益于本征氢化非晶硅的优秀化学钝化效应, 另一方面也得益于掺杂氢化非晶硅提供的场钝化效应. 图 5 为暗态下非晶硅薄膜硅异质结太阳能电池的能带图, 其中 (p)a-Si 为发射极, (n)a-Si 为背面场. 对于空穴选择性接触, 价带带阶和向上的能带弯曲保证了晶硅表面高的空穴浓度, 对于电子选择性接触, 导带带阶和向下的能带弯曲保证了晶硅表面高的电子浓度, 如图 6 所示, 因此载流子的选择性发生在晶硅中感应 p-n 同质结和高-低同质结处, 掺杂氢化非晶硅薄膜不仅使得太阳能电池的前部和背部具有了选择性, 而且 a-Si:H/c-Si 界面处的能带弯曲也参与其中 [20]. 实际上, 通过掺杂可以调整 a-Si:H/c-Si 界面处的价带带阶和导带带阶, 从而调整载流子选择性. 非晶硅薄膜的硅异质结太阳能电池晶硅中没有外来的重掺杂效应, 而是在晶硅吸收层中感应出一个同质结, 这个感应同质结位于晶硅表面, 并且被本征氢化非晶硅有效钝化 [21]. 载流子选择性接触促使在晶硅吸收层内高的光生载流子产生率、低的少子复合率和从晶硅吸收层中对电子和空穴的有效取出. 低的少子复合率不仅来源于钝化表面缺陷以降低复合活性, 还使一种导电类型载流子想要到达太阳能电池一侧的金属变得非常困难, 从而可以保证光生载流子在复合前被收集 [22].

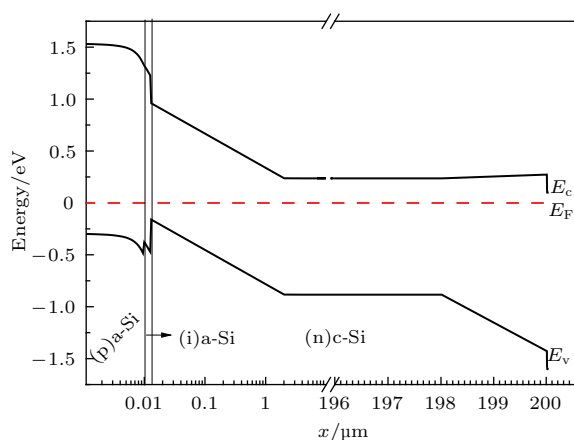


图 5 暗态下非晶硅薄膜硅异质结太阳能电池能带图

Fig. 5. Energy diagram for the silicon heterojunction solar cell with amorphous silicon thin film in the dark.

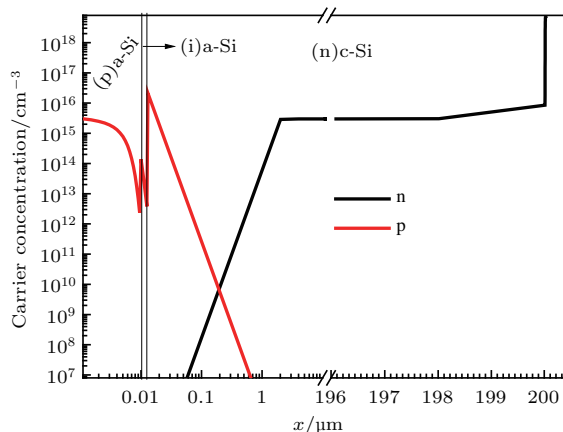


图 6 (网刊彩色) 暗态下非晶硅薄膜硅异质结太阳能电池载流子浓度空间分布

Fig. 6. (color online) Spatial distribution of the carrier concentration for the silicon heterojunction solar cell with amorphous silicon thin film in the dark.

非晶硅薄膜硅异质结太阳能电池设计有两种载流子选择性接触: 一种是收集晶硅吸收层中的光生空穴; 另一种是收集晶硅吸收层中的光生电子. 受光面载流子选择性接触的设计面临更大的挑战, 因为要受到金属栅线处横向载流子收集的功率损失和非晶硅薄膜光子吸收的支配. 而在电池背面, 至少对于单面受光硅异质结太阳能电池, 接触设计可以简化为一维问题, 而且不用过多考虑能量大于晶硅吸收层光学带隙的光子吸收 [23]. 非晶硅薄膜硅异质结太阳能电池主要的挑战是本征氢化非晶硅缓冲层、掺杂非晶硅层和透明导电膜之间的相互影响. 本征氢化非晶硅缓冲层应当抑制晶硅表面的少子复合同时保证优秀的多子输运, 上面掺杂非晶硅层能够提供有益的场效应钝化, 同时不能对化学钝化产生负面冲击. 同样重要的是如何优化掺杂非晶硅薄膜的掺杂浓度和厚度去屏蔽掺杂非晶硅层和透明导电层之间的功函数失配形成的肖特基势垒 [24].

非晶硅薄膜硅异质结太阳能电池是一种具有载流子选择性接触的高效太阳能电池, 不过其有三个主要缺点: 1) (p)a-Si 掺杂效率低; 2) (p)a-Si 的禁带宽度在 1.7—1.8 eV 之间, 会不可避免地带来光学损失; 3) a-Si 的温度稳定性差, 不能与 p-n 扩散同质结硅太阳能电池的组件制备流程相兼容, 实际上这正是金属氧化物薄膜硅异质结太阳能电池取得发展的主要驱动力 [25].

### 3.3 金属氧化物薄膜硅异质结太阳能电池

著名光伏研究机构 EPFL 于 2015 年发表了一种利用高功函数金属氧化物  $\text{MoO}_x$  薄膜作为空穴

收集层即发射极、以(n)a-Si作为背面场的硅异质结太阳能电池,效率达到了22.5% [26]. 图7为暗态下金属氧化物薄膜硅异质结太阳能电池的能带图,可以看到 $\text{MoO}_x$ , c-Si和 $\text{TiO}_x$ 都为n型半导体.  $\text{MoO}_x$  ( $x < 3$ )是一种宽带隙半导体,氧空位在 $\text{MoO}_x$ 能带中形成缺陷带并且使薄膜表现出半金属性、n型特征 [27,28]. 高功函数的 $\text{MoO}_x$ 在(n)c-Si中形成空穴反型层是界面费米能级对齐的结果. 在两种材料接触前,两者之间存在一个大的化学势差,这种能量失配是费米能级统一的驱动力. 当 $\text{MoO}_x$ 与(n)c-Si接触时,电子从(n)c-Si价带转移进入 $\text{MoO}_x$ 的氧空位缺陷带,接着电子离开(n)c-Si表面,价带边逐渐靠近费米能级 $E_F$ 并且在(n)c-Si表面感应能带向上弯曲从而出现 $(p^+)$ c-Si空穴反型层 [29]. 金属氧化物 $\text{MoO}_x$ 与(n)c-Si接触感应向上的能带弯曲进入(n)c-Si吸收层形成感应同质p-n结,如果设计良好,感应同质p-n结的整流特性与在吸收层表面的p型掺杂形成的同质p-n结相似,在(n)c-Si表面附近有高的空穴浓度,如图8所示,形成空穴选择性接触. 低功函数的金属氧化物 $\text{TiO}_x$  [30]与(n)c-Si接触时形成小的导带带阶,电子能够轻松通过,同时形成大的价带带阶,阻挡空穴的输运,即在(n)c-Si表面附近有高的电子浓度,如图8所示,从而是一种电子选择性接触.

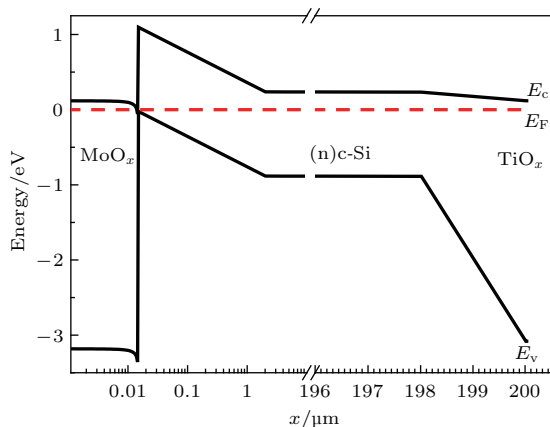


图7 暗态下金属氧化物薄膜硅异质结太阳能电池能带图  
Fig. 7. Energy diagram for the silicon heterojunction solar cell with metal oxides thin film in the dark.

免掺杂的金属氧化物取代高掺杂发射极和背面场是硅太阳能电池研发过程中的创新,其他能形成空穴选择性接触的金属氧化物还有 $\text{WO}_x$  [31]和 $\text{V}_2\text{O}_x$  [32]等,能形成电子选择性接触的金属氧化物还有 $\text{CsO}_x$  [18]等.

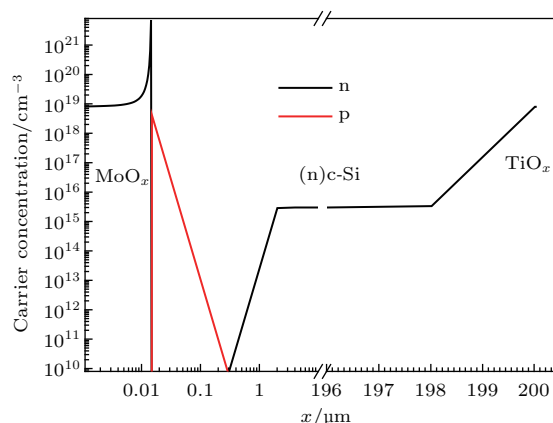


图8 (网刊彩色) 暗态下金属氧化物薄膜硅异质结太阳能电池载流子浓度空间分布

Fig. 8. (color online) Spatial distribution of the carrier concentration for the silicon heterojunction solar cell with metal oxides thin film in the dark.

## 4 结 论

硅太阳能电池中载流子选择性接触可以通过扩散掺杂制备同质结、利用异质结的能带排列或感应能带弯曲来创造. 基于一维太阳能电池模拟软件wxAMPS,我们模拟了暗态下扩散同质结硅太阳能电池、非晶硅薄膜硅异质结太阳能电池和氧化物薄膜硅异质结太阳能电池的能带结构和载流子浓度的空间分布. 模拟结果表明:就阻挡一种导电类型的载流子同时传导另一种导电类型的载流子这一特性而言,异质结载流子选择性接触的物理机制与扩散同质结相同,都是在晶硅表面附近形成载流子浓度空间分布的不对称从而导致电导率的不对称,形成对电子的高阻和空穴的低阻,或者对空穴的高阻和电子的低阻,进而让空穴轻松通过同时阻挡电子,或者让电子轻松通过同时阻挡空穴. 非晶硅薄膜硅异质结太阳能电池已经取得了非常高的转换效率,不过非晶硅薄膜带隙较窄且需掺杂,使用免掺杂的金属氧化物薄膜代替掺杂非晶硅薄膜,为制备硅异质结太阳能电池打开了更广阔的材料空间,同时也使得如原子层沉积等薄膜沉积技术得以加速发展.

## 参考文献

- [1] de Wolf S, Descoedres A, Holman Z C, Ballif C 2012 *Green* 2 7
- [2] Yoshikawa K, Kawasaki H, Yoshida W, Irie T, Konishi K, Nakano K, Uto T, Adachi D, Kanematsu M, Uzu H, Yamamoto K 2017 *Nature Energy* 2 17032

- [3] Richter A, Hermle M, Glunz S W 2013 *IEEE J. Photovolt.* **3** 1184
- [4] Feldmann F, Simon M, Bivour M, Reichel C, Hermle M, Glunz S W 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 181105
- [5] Cuevas A, Allen T, Bullock J, Wan Y, Yan D, Zhang X 2015 *Proceedings of the 42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference* Los Angeles, USA, June 14–19, 2015 p1
- [6] Würfel P, Würfel U 2009 *Physics of Solar Cells: From Basic Principles to Advanced Concepts* (New York: John Wiley & Sons) pp93–98
- [7] Cuevas A, Yan D 2013 *IEEE J. Photovolt.* **3** 916
- [8] Würfel U, Cuevas A, Würfel P 2015 *IEEE J. Photovolt.* **5** 461
- [9] Brendel R, Peibst R 2016 *IEEE J. Photovolt.* **6** 1413
- [10] Bivour M, Macco B, Temmler J, Kessels W M M, Hermle M 2016 *Energy Procedia* **92** 443
- [11] Yablonovitch E, Gmitter T, Swanson R M, Kwark Y H 1985 *Appl. Phys. Lett.* **47** 1211
- [12] Liu Y M, Sun Y, Rockett A 2012 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **98** 124
- [13] Zhao L, Zhou C L, Li H L, Diao H M, Wang W J 2008 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **92** 673
- [14] Hua X, Li Z P, Shen W Z, Xiong G Y, Wang X S, Zhang L J 2012 *IEEE Trans. Electron Dev.* **59** 1227
- [15] Islam R, Nazif K N, Saraswat K C 2016 *IEEE Trans. Electron Dev.* **63** 4788
- [16] Bullock J, Cuevas A, Allen T, Battaglia C 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 232109
- [17] Battaglia C, Yin X, Zheng M, Sharp I D, Chen T, McDonnell S, Azcatl A, Carraro C, Ma B, Maboudian R, Wallace R M, Javey A 2014 *Nano Lett.* **14** 967
- [18] Bullock J, Wan Y, Hettick M, Geissbühler J, Ong A J, Kiriya D, Yan D, Allen T, Peng J, Zhang X, Sutter-Fella C M, de Wolf S, Ballif C, Cuevas A, Javey A 2016 *Proceedings of the 43rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference* Portland, USA, June 5–10, 2016 p0210
- [19] Taguchi M, Yano A, Tohoda S, Matsuyama K, Nakamura Y, Nishiwaki T, Fujita K, Maruyama E 2014 *IEEE J. Photovolt.* **4** 96
- [20] Battaglia C, Nicolás S M D, de Wolf S, Yin X, Zheng M, Ballif C, Javey A 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 113902
- [21] Ghannam M, Shehadah G, Abdurraheem Y, Poortmans J 2014 *Proceedings of the 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition* Paris, France, September 30–October 4, 2014 p822
- [22] Römer U, Peibst R, Ohrdes T, Lim B, Krügener J, Bugiel E, Wietler T, Brendel R 2014 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **131** 85
- [23] Bivour M, Reichel C, Hermle M, Glunz S W 2012 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **106** 11
- [24] Bivour M, Reusch M, Schröer S, Feldmann F, Temmler J, Steinkemper H, Hermle M 2014 *IEEE J. Photovolt.* **4** 566
- [25] Bivour M, Temmler J, Steinkemper H, Hermle M 2015 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **142** 34
- [26] Geissbühler J, Werner J, Martin de Nicolas S, Barraud L, Hessler-Wyser A, Despeisse M, Nicolay S, Tomasi A, Niesen B, de Wolf S, Ballif C 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 081601
- [27] Meyer J, Hamwi S, Kröger M, Kowalsky W, Riedl T, Kahn A 2012 *Adv. Mater.* **24** 5408
- [28] McDonnell S, Azcatl A, Addou R, Gong C, Battaglia C, Chuang S, Cho K, Javey A, Wallace R M 2014 *ACS Nano* **8** 6265
- [29] Gerling L G, Voz C, Alcubilla R, Puigdollers J 2017 *J. Mater. Res.* **32** 260
- [30] Yang X, Zheng P, Bi Q, Weber K 2016 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **150** 32
- [31] Gerling L G, Mahato S, Morales-Vilches A, Masmitja G, Ortega P, Voz C, Alcubilla R, Puigdollers J 2016 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **145** 109
- [32] Almora O, Gerling L G, Voz C, Alcubilla R, Puigdollers J, Garcia-Belmonte G 2017 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **168** 221

# Carrier selective contacts: a selection of high efficiency silicon solar cells\*

Xiao You-Peng Gao Chao Wang Tao Zhou Lang<sup>†</sup>

(*Institute of Photovoltaic, Nanchang University, Nanchang 330031, China*)

( Received 6 April 2017; revised manuscript received 3 May 2017 )

## Abstract

Solar cell has two basic units: the photon absorption layer and the contact layer. The contact layer is a region between the highly recombination-active metal interface and the photon absorption layer. It is vital to reduce the recombination loss between the photon absorption layer and the contact layer in pursuit of the higher conversion efficiency of silicon solar cell. In recent years, carrier selective contact is arousing research interest in photovoltaic industry because it is deemed as one of the last remaining obstacles in approaching to the theoretical efficiency limit of silicon solar cell. In this paper, three different types of carrier selective contacts are analyzed, which includes: 1) sandwiching a heavily doped thin layer between the photon absorption layer and the metal interface, which is the so-called emitter or back surface field; 2) aligning the conduction bands or the valence bands of two materials; 3) inducing the band bending through a high work function metal oxide contacting crystalline silicon. Based on one-dimensional solar cell simulation software wxAMPS, three different silicon solar cell structures are numerically simulated, which includes: 1) diffused homojunction silicon solar cell [(p<sup>+</sup>)c-Si/(n)c-Si/(n<sup>+</sup>)c-Si]; 2) silicon heterojunction solar cell with amorphous silicon thin films [(p<sup>+</sup>)a-Si/(i)a-Si/(n)c-Si/(i)a-Si/(n<sup>+</sup>)a-Si]; 3) silicon heterojunction solar cell with metal oxide thin films [(n)MoO<sub>x</sub>/(n)c-Si/(n)TiO<sub>x</sub>], then the energy band structures and the spatial distributions of carrier concentrations of solar cells in the dark are discussed. The simulation results show that the key factor of carrier selective contacts is the asymmetric spatial distribution of the carrier concentrations, i.e. the asymmetric conductivities of electrons and holes. This leads to the formation of high resistance to electrons and low resistance to holes, or high resistance to holes and low resistance to electrons, so the holes will go through the contact easily and the electrons will be blocked simultaneously, or the electrons will go through the contact easily and the holes will be blocked simultaneously. Therefore a hole selective contact or a electron selective contact is formed, respectively.

**Keywords:** silicon solar cell, carrier selective contact, asymmetric conductivity

**PACS:** 88.40.Jj, 73.40.Lq, 61.43.Bn

**DOI:** 10.7498/aps.66.158801

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51361022, 61574072) and the Post-Doctor Scientific Research Fund of Jiangxi Province, China (Grant No. 2015KY12).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [lzhou@ncu.edu.cn](mailto:lzhou@ncu.edu.cn)