

# 晶硅光伏电池工作原理以及效率提升物理依据的 调研报告

杨浩然 221180053\*，姜沛林 221180075\*，薛琪博 221180044\*  
余林蔚老师<sup>†</sup>，王军转老师<sup>†</sup>

南京大学 电子科学与工程学院，南京 210023

**【摘要】** 本调研报告旨在探讨晶硅光伏电池的工作原理及其效率提升的物理依据。首先，报告详细介绍了晶硅光伏电池的基本工作原理，包括光吸收、载流子生成与分离、以及电荷收集过程。接着，分析了影响其转换效率的主要因素，如材料的带隙、光谱响应、电子和空穴的传输特性等。报告重点讨论了近年来提升晶硅光伏电池效率的技术进展，包括表面钝化、光学增效设计、异质结结构的优化以及多结光伏技术等。

**【关键词】** 晶硅太阳能电池；光电转换效率；钝化发射级后触点技术；表面纹理化技术；异质结技术；光注入工艺；电注入工艺

Research report on the working principle of crystalline silicon photovoltaic cells and the physical basis for efficiency improvement

Haoran Yang, Peilin Jiang, Qibo Xue, Prof. Yu, Prof. Wang

College of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China

**Abstract:** This research report aims to explore the working principle of crystalline silicon photovoltaic cells and the physical basis for improving their efficiency. First, the report details the basic working principles of crystalline silicon photovoltaic cells, including light absorption, carrier generation and separation, and charge collection processes. Then, the main factors affecting the conversion efficiency, such as band gap, spectral response, electron and hole transport characteristics, are analyzed. The report focuses on recent technological advances to improve the efficiency of crystalline silicon photovoltaic cells, including surface passivation, optical efficiency enhancement design, heterojunction structure optimization, and multi-junction photovoltaic technology.

**Key Words:** Crystalline Silicon Solar Cells; Photoelectric Conversion Efficiency; PERC Technology; Surface Texturisation Technology; Heterojunction Technology; Photo-Injection Processes; Electro-Injection Processes

## 1 晶硅光伏电池的工作原理

### 1.1 硅中 PN 结的形成

(1) 电子与空穴的运动：1. 漂移运动：n 型 Si 与 p 型 Si 在外加电场的情况下，会作定向运动。这种运动称为电子与空穴（统称“载流子”）的“漂移运动”，并产生“漂移电流”。根据静电学，电子

将作与外加电场相反方向的运动，并产生电流（根据传统定义，电流的方向与电子运动方向相反，即和外加电场方向相同）；而空穴的运动方向与外加电场相同，由于其可被看作是“正电荷”，将产生与电场方向相同的电流。2. 扩散运动：由于某些外部条件而使半导体内部的载流子存在浓度梯度的时候，将产生扩散运动，即载流子由浓度高的位置

向浓度低的位置运动。



图 1.1 pn 结基本构造：图示为以硅为主要材料的 pn 结。

(2) PN 结的形成：P 型半导体中含有较多的空穴，而 N 型半导体中含有较多的电子，这样，当 P 型和 N 型半导体结合在一起时。在两种半导体的交界面区域里会形成一个特殊的薄层，界面的 P 型一侧带负电，N 型一侧带正电，出现了浓度差。N 区的电子会扩散到 P 区，P 区的空穴会扩散到 N 区，一旦扩散就形成了一个由 N 指向 P 的“内电场”，从而阻止扩散进行。达到平衡后，就形成了这样一个特殊的薄层形成电势差，从而形成 PN 结。

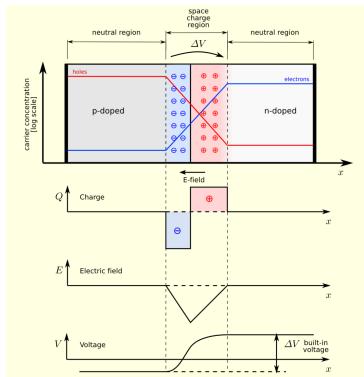


图 1.2 pn 结在零偏置与热平衡状态下。底部绘出了电荷密度、电场、电压。

(3) 平衡状态下的 PN 结：pn 结在没有外加电压情况下，跨接面形成了电势差导致了平衡状态。该电势差称为内建电势。pn 结的 n 区的电子向 p 区扩散，留下了正电荷在 n 区。类似地，p 型空穴从 p 区向 n 区扩散，留下了负电荷在 p 区。进入了 p 区的电子与空穴复合，进入了 n 区的空穴与电子复合。其效果是扩散到对方的多数载流子（自由电子与空穴）都耗尽了，接面区只剩下不可移动的带电离子，失去了电中性变为带电，形成了耗尽层。耗尽层的多数载流子已经全部耗尽，留下的电荷密度等于净掺杂水平。当平衡达到时，电荷密度近似显示为阶梯函数，耗尽层与中立区的边界相当陡峭。（见图 1.2 的  $Q(x)$  图）。耗尽层在 pn 结两侧有相同量的电荷，因此它向较少掺杂的一侧延展更远。

## 1.2 PN 结形成与电池工作原理

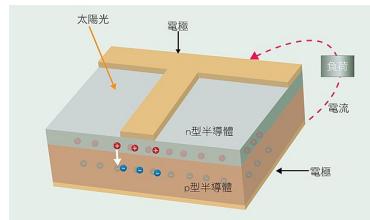


图 1.3 太阳能电池的结构图

太阳电池的基本构造是运用 P 型与 N 型半导体接合而成的，这种结构称为一个 PN 结。当太阳光照射到一般的半导体（例如硅）时，会产生电子与空穴对，但它们很快的便会结合，并且将能量转换成光子或声子（热），光子和能量相关，声子则和动量相关。因此电子与空穴的生命期甚短；在 P 型中，由于具有较高的空穴密度，光产生的空穴具有较长的生命期，同理，在 N 型半导体中，电子有较长的生命期。

在 P-N 半导体接合处，由于有效载流子浓度不同而造成的扩散，将会产生一个由 N 指向 P 的内建电场，因此当光子被接合处的半导体吸收时，所产生的电子将会受电场作用而移动至 N 型半导体处，空穴则移动至 P 型半导体处，因此便能在两侧累积电荷，若以导线连接，则可产生电流，而太阳能电池的挑战就在于如何将产生的电子空穴对在复合之前将其搜集起来。

从太阳来的光线，能量大部分落于 1–3 eV 之间，因此就单一个 PN 结而言，若经适当地设计，使吸收光能的高峰落于约 1.5 eV，则能有最好的效率。

## 2 光电转化效率提高的工艺以及物理依据

在许多国家，太阳能的光伏 (PV) 转换开始为发电做出显著贡献，全球光伏市场的 90% 以上依赖于基于晶体硅 (c-Si) 的太阳能电池。晶体硅太阳能电池目前的效率为 26.7%，而其内在极限为 29%。当前的研究和生产趋势旨在提高工业模块的效率并降低成本。在本文中，我们回顾了可以计算晶体硅太阳能电池效率极限的主要概念和理论方法，它们是硅厚度的函数。在给定的材料质量下，最佳厚度取决于高光学吸收（需要较厚的吸收层）和高效载流子收集（硅层越薄越好）这两种需求之

间的权衡。在太阳能电池结构中插入适当的光子结构，就能实现最佳(朗伯)光捕集，通过求解传输方程可以计算出效率极限。我们还讨论了外在(体外和表面)重组对转换效率的影响。我们还展示了如何利用相对简单的分析模式来描述主要结论和趋势。我们还简要讨论了通过硅/透闪石串联技术克服29%极限的前景。

## 2.1 单晶硅 PERC 技术

第一个具有钝化发射极后触点(PERC)结构的单晶硅太阳电池于1989年被提出。与传统铝背表面场(Al-BSF)硅太阳电池相比，PERC具有 $Al_2O_3/SiN_x$ 堆叠薄膜等后表面钝化层和局部Al-BSF接触<sup>[2]</sup>。后表面堆积的 $Al_2O_3/SiN_x$ 薄膜通过化学钝化和场钝化相结合有效地减少了载流子的复合<sup>[3,4]</sup>。从而提高了电子的收集效率，减少了表面反射和复合损失，从而增加了电池的效率。

### 2.1.1 工艺方法

PERC (Passivated Emitter and Rear Contact) 工艺是一种提高单晶硅太阳电池效率的先进技术，其核心方法是通过在电池的背面添加一层钝化层，以减少载流子复合并优化电子和空穴的收集。与传统的硅太阳电池不同，PERC 电池不仅对正面进行表面纹理化处理，还在背面形成钝化层，这一层通常是硅氧化物或硅氮化物等材料，用于抑制电子和空穴在背面复合，进而提高电池的光电转换效率。

### 2.1.2 原理

复合电流密度( $J_{rec}$ )与J<sub>0E</sub>的关系由(1.1)给出：

$$J_{rec} = J_{0E} \left( \frac{np}{n_{i,eff}^2 - 1} \right) \quad (1.1)$$

其中，n和p分别表示电子和空穴的浓度， $n_{i,eff}$ 表示有效本然载流子浓度。由式(1.1)可知，减小 $J_{0E}$ 会降低 $J_{rec}$ ，从而获得更好的钝化性能。

在理想情况下， $V_{OC}$   $J_{SC}$   $J_{rec}$ 之间的关系可以用(1.2)，(1.3)表示：

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln \left( 1 + \frac{J_{ph}}{J_{rec}} \right) \quad (1.2)$$

$$J_{SC} = J_{rec} \left[ \exp \left( \frac{qV}{nKT} - 1 \right) \right] - J_p h \quad (1.3)$$

其中 $J_{ph}$ 为光电流密度，K为玻尔兹曼常数，T为热力学温度，q为电子电荷，v为电压。根据方程式。(2)和(3)， $V_{OC}$ 和 $J_{SC}$ 随着复合电流 $J_{rec}$ 的减小而增大。因此，优良的钝化层可以有效地提高电池的 $V_{OC}$ 和 $J_{SC}$ 。

## 2.2 表面纹理化技术

多孔硅(PS)和织构化是降低表面反射率和钝化硅表面的有希望的候选者<sup>[6][7]</sup>。多孔硅是通过在HF基溶液中对硅表面的电化学腐蚀或染色(化学)蚀蚀形成的，而织构是通过碱性溶液形成的<sup>[8][9]</sup>，对多孔硅层的主要关注点与多晶硅的表面和晶界(GBs)钝化特性有关。

### 2.2.1 工艺方法

表面纹理化工艺是一种通过物理或化学手段，在材料表面创造出特定纹理效果的加工过程。其具体实现路径通常涉及几个步骤：(1) 预处理：去除表面杂质、氧化层或其他不必要的物质，确保后续纹理化效果的均匀性和附着力。(2) 纹理化：在材料表面通过激光雕刻、滚压、砂轮打磨或化学腐蚀等方法形成所需的微观或宏观纹理。(3) 热处理、表面涂层或电镀：增强表面纹理的耐磨性、防腐蚀性及美观度。

### 2.2.2 原理

**(1) 减少光的反射** 对于一个平面表面，光的反射率R(即反射光强占入射光强的比例)由以下公式(2.1)给出：

$$R = \left( \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right)^2 \quad (2.1)$$

其中： $n_1$ 和 $n_2$ 分别是入射介质和表面材料的折射率， $\theta_i$ 和 $\theta_t$ 分别是入射角和折射角(遵循斯涅尔定律： $n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$ )。

对于纹理化的表面，通过引入微结构，表面有效折射率和光的入射角分布会发生改变，从而减少光的反射。这种纹理化效果使得表面反射率更低，光的吸收效率更高。

**(2) 光的吸收与路径延长** 通过改变光的传播路径。对于一个平面材料，吸收率A可以通过以下公式(2.2)表示：

$$A = 1 - R - T \quad (2.2)$$

其中:  $R$  是反射率 (如上所述),  $T$  是透射率 (透过材料的光强与入射光强的比值)。

对于纹理化表面, 光在材料中传播的有效路径变长。具体来说, 表面纹理化使得光在进入材料后多次反射, 从而增加了光在材料中的平均传播路径。可以通过光程增益来定量描述这一效应。假设纹理化表面使得光的路径长度增加  $L_{\text{effective}}$ , 那么有效吸收率可以表达为 (2.3):

$$A_{\text{effective}} = 1 - R - \exp(-\alpha L_{\text{effective}}) \quad (2.3)$$

其中:  $\alpha$  是材料的吸收系数,  $L_{\text{effective}}$  是由于纹理化引起的光的有效路径长度。

**(3) 局部表面等离激元效应** 如果纹理化表面涉及金属或具有金属特性的材料, 可能会引发局部表面等离激元 (Surface Plasmon Polaritons, SPPs) 效应。这种效应可以通过以下公式 (2.4) 来描述:

$$k_{\text{sp}} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}} \quad (2.4)$$

其中:  $k_{\text{sp}}$  是表面等离激元波矢,  $\omega$  是光的频率,  $c$  是光速,  $\epsilon_m$  和  $\epsilon_d$  分别是金属和介质的相对介电常数。

局部表面等离激元效应会导致表面局部电磁场增强, 从而提高光的吸收率, 尤其在金属-半导体界面等结构中。纹理化表面通过改变表面形貌, 增加了与表面等离激元的耦合效率, 从而增强了材料的光吸收。

### 2.3 异质结技术 (HJT)

全称为晶体硅异质结太阳能电池技术 (Heterojunction with Intrinsic Thin layer, HJT) 异质结技术涉及在晶硅电池的表面形成非晶硅薄膜层, 以实现高效率的光电转化。这种技术通过在晶硅表面沉积本征/掺杂氢化非晶硅叠层来实现载流子的收集。

#### 2.3.1 工艺描述

异质结工艺的技术特点在于通过化学气相沉积等技术在晶硅衬底上沉积非晶硅 (a-Si:H) 薄膜, 包括本征非晶硅薄膜和掺杂非晶硅薄膜, 非晶硅薄膜与晶体硅形成的高效钝化异质结, 减少载流子收集以及通过精确控制功函数和能带排列实现

载流子的选择性收集, 从而提升太阳电池的光电转换效率。

#### 2.3.2 物理依据

异质结技术通过在晶体硅表面沉积非晶硅薄膜, 实现了卓越的界面钝化效果。这种钝化减少了表面和界面的复合中心, 从而降低了复合电流密度 ( $J_{\text{rec}}$ ), 提高了开路电压 ( $V_{\text{OC}}$ )。同时异质结太阳电池采用掺杂的非晶硅层作为发射极和背面场, 这些层与晶体硅之间的能带排列促进了载流子的选择性收集, 提高了短路电流密度 ( $J_{\text{SC}}$ )。而且由于异质结太阳电池的结构对称性, 其双面率极高, 这意味着电池的背面也能有效地吸收光并产生电流, 从而提高了整体的光电转化效率。此外相比于传统的工艺, 异质结太阳电池的制备过程涉及较低的温度, 这有助于减少热诱导的缺陷, 进一步提高电池的性能。

### 2.4 光注入 (光浸泡) 工艺 (light soaking)

光注入工艺, 也称为光浸泡 (light soaking), 是一种用于改善氢化非晶硅 (a-Si:H) 薄膜太阳能电池性能的技术。这种技术通过暴露在光照下, 促进薄膜中的氢原子的扩散和跃迁, 从而激活硼掺杂 (B-Si4), 提高薄膜的暗导电率 ( $\sigma_{\text{dark}}$ ), 进而提升太阳能电池的光电转换效率。通过这种光注入工艺, 研究人员在 a-Si:H 基太阳能电池中实现了超过 25% 的光电转换效率

#### 2.4.1 工艺描述

该工艺首先在石英玻璃或其他基底上通过等离子增强化学气相沉积 (PECVD) 技术沉积氢化非晶硅 (a-Si:H) 薄膜。在 a-Si:H 薄膜中掺杂硼 (B), 形成 p 型半导体 (p-a-Si:H)。最后进行光注入处理, 将 p-a-Si:H 薄膜暴露在一定强度的光照下, 通常称为光浸泡。这个过程中, 光能激发氢原子, 使其在薄膜中扩散和跃迁, 使得从而激活硼掺杂 (B-Si4), 提高薄膜的暗导电率 ( $\sigma_{\text{dark}}$ ), 进而提升太阳能电池的光电转换效率。

#### 2.4.2 物理依据

在 p-a-Si:H 薄膜中, 硼原子作为三价元素, 难以在无序的 a-Si:H 矩阵中形成四配位的 B-Si4 结构。但是在光浸泡过程中, 光能激发氢原子, 使其从弱束缚状态 (如 B-H-Si) 扩散和跃迁到更有效的 B-Si4 结构, 从而能够提高薄膜的导电性。同时

光浸泡促进了弱束缚氢原子的扩散和跃迁，激活了有效的 B-Si4 掺杂，减少了无效的 Si6-B-Hy 掺杂配置，从而提高了薄膜的暗导电率，提升材料的光电转化效率。通过改善 p-a-Si:H 的场钝化和导电性，光浸泡后的太阳能电池实现了更高的填充因子 (FF) 和光电转换效率 (PCE)。

## 2.5 电注入工艺

电注入工艺是一种用于提升晶体硅太阳电池效率的技术，主要通过在电池内部形成氢钝化层来减少载流子的复合损失，从而提高电池的光电转换效率。

### 2.5.1 工艺描述

氢钝化技术通过在硅太阳能电池中引入氢原子来减少表面和体内的缺陷，从而降低载流子的复合率，提高电池的效率。氢原子能够与硅中的悬挂键、间隙位错和其他缺陷结合，形成稳定的化合物，减少电子和空穴的复合中心，首先通过等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 或其他方法，将氢气引入硅片表面。在 PECVD 过程中，氢气与硅烷 (SiH4) 和氨气 (NH3) 混合，形成富含氢的等离子体。然后在一定温度下对硅片进行退火处理，以促进氢原子在硅片中的扩散和钝化作用。退火温度和时间需要精确控制，以确保氢原子能够有效地与缺陷结合。在退火过程中，氢原子与硅中的缺陷结合，形成氢钝化层，这层能够有效地减少载流子的复合，提高电池的开路电压 (VOC) 和短路电流密度 (JSC)。

### 2.5.2 物理依据

氢原子在硅中的扩散系数较高，能够迅速扩散到硅片内部，与缺陷结合从而形成稳定的化合物，如氢化硅 (SiH4) 和氢化硼 (BH3) 等，从而减少载流子的复合中心氢钝化对载流子寿命的影响从而显著提高少数载流子的寿命，大幅度提高光伏电池光电效率。同时，氢钝化还可以减少光致衰减 (LID) 效应，减少光伏电池在长期太阳光照射下引起效率降低。

## 2.6 光捕获优化 (Lambertian 光捕获)

假设 100% 收集载流子，则太阳能电池的短路电流密度由光生成的载流子密度给出，即：

$$J_{sc} = e \int A(E) \phi_{AM1.5}(E) dE \quad (1)$$

其中， $A(E)$  是光活性层的吸收率 (即光谱解析吸收概率)， $\phi_{AM1.5}$  是对应于与 AM1.5G 太阳光谱的光子通量。当厚度为  $d$  和吸收率系数为  $\alpha(E)$ ，忽略反射损耗，单程吸收率简单地由  $1 - \exp(-\alpha(E)d)$  得出。

朗伯光捕获极限相当于考虑太阳能电池材料的零反射损耗和最大吸收。为了优化抗反射和光捕获作用，最好只在顶面涂上抗反射涂层 (ARC)，而在后表面插入散射层。在朗伯极限，激发的电子-空穴对的光谱分辨率光生成率曲线以封闭形式给出：

$$g_{LL}(z, E) = \frac{\alpha_{LL} R_b e^{-2\alpha d_{LL}} e^{\alpha z_{LL}} + e^{-\alpha_{LL} Z}}{1 - R_b e^{-2\alpha_{LL} d} 1 - \frac{1}{n^2}} \phi_{AM1.5}(E) \quad (2)$$

其中， $n$  是折射率， $R_b$  是后反射镜的反射率。在公式 (2) 中， $a_{ll}$  表示有效吸收系数，定义为  $a_{ll} = \alpha d_{opt}/d$ ，其中  $\alpha$  是电池材料的吸收系数， $d_{opt}/d$  代表参考文献 [5] 中计算的光路增强。就硅材料而言，必须在此做出重要说明。基于非晶 (非晶硅或微晶) 硅的太阳能电池属于薄膜设备，即厚度为一微米 ((非晶硅为 200-300 纳米，微晶硅约为 2 微米) 的太阳能电池。这种硅基薄膜太阳能电池采用了巧妙的光捕获方案；然而，由于非晶材料和界面质量差，其稳定转换效率仍然很低 (单结电池低于约 11%，多结电池低于约 14%)。

基于晶体硅的太阳能电池由于间接带隙的原因，在光谱的红外部分面临吸收率低的问题。具有朗伯光捕获功能的超薄 ((微米级) 晶体硅太阳能电池的光电流可能略高于  $35mA/cm^2$ 。光电流比单程值增加了很多，但  $J_p$  的绝对值大大低于最大实用值  $44mA/cm^2$ ，从而限制了实际转换效率。波光学机制中光捕获的绝对极限尚不清楚，但它能超过上述定义的朗伯极限，特别是在受限的光谱和/或角度范围内。要比较不同光子结构下的光捕获效率并不容易，因为平面结构的参考厚度并不是唯一定义的。

## 2.7 全无机钙钛矿 ( $CsPb_{0.9}Sn_{0.1}IBr_2$ ) 太阳能电池

钙钛矿太阳能电池是一种非常有前景的新型光伏器件。近年来，其光电转换效率的最高记录已经从 3.8% 迅速上升到 22.1%。为了提高钙钛矿太阳能电池的稳定性，一种可能的解决方案是完全摒弃不稳定的有机成分。研究发现，基于  $CsPbBr_3$  和碳电极的全无机钙钛矿太阳能电池，摒弃了不稳定的有机-无机杂化钙钛矿，也无需昂贵的空穴传输层和贵金属电极，是首个完全以无机材料构成的钙钛矿太阳能电池，其性能非常稳定，制备方便，无需在手套箱中操作。

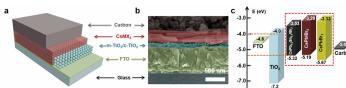


图 2.1 具有 FTO/c-TiO<sub>2</sub>/m-TiO<sub>2</sub>/CsMX<sub>3</sub>/Carbon 功能层的全无机钙钛矿太阳能电池的(a)器件结构图和(b)横截面 SEM 图;(c)基于不同 CsMX<sub>3</sub> 材料的全无机钙钛矿太阳能电池的能带结构

基于  $CsPb_{0.9}Sn_{0.1}IBr_2$  和碳对电极的全无机钙钛矿太阳能电池，完全摒弃了不稳定的有机成分和贵金属电极，并展现出 1.26 V 的高开路电压和高达 11.33% 的光电转换效率，这在现有的基于 CsMX<sub>3</sub> 钙钛矿的太阳能电池中处于领先水平。此外，这种全无机钙钛矿太阳能电池具有良好的长期稳定性、耐热 (100°C) 和耐湿性。

## 2.8 光注入退火增效

N 型隧穿氧化层钝化接触 (Tunnel Oxide Passivating Contacts, TOPCon) 太阳能电池完成印刷烧结后，再经过光注入，效率有明显提升，主要表现在  $V_{oc}$ (开路电压) 及  $FF$ (填充因子) 的提升。其机理在于通过温度和光照强度调节费米能级变化，控制 H 总量及价态来提高钝化性能。

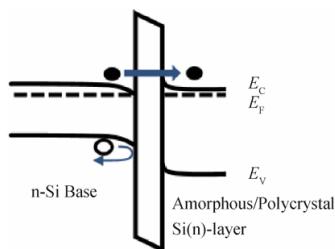


图 2.2 隧穿能带结构

N-TOPCon 电池介绍如下：高效的太阳能电池

要求在具有良好的界面钝化情况下，尽可能实现一维纵向运输，使  $V_{oc}$  和  $FF$  最大化。而钝化接触便是实现该功能的途径之一。钝化接触电池的 poly-Si 与 Si 基底界面间的氧化硅对钝化起着非常关键的作用，氧化硅通过化学钝化降低 Si 基底与 poly-Si 之间的界面态密度。多数载流子通过隧穿原理实现运输，少数载流子则由于势垒以及 poly-Si 场效应的存在难以隧穿通过该氧化层。在重掺 poly-Si 中，多数载流子浓度远高于少数载流子，降低电子空穴复合几率的同时，也增加了电导率形成多数载流子的选择性接触。

在选择性接触区域，多子传输导致电阻损失，同时少量少子向金属接触区域迁移导致复合损失。前者对应接触电阻  $\rho_c$ ，而后者则对应界面复合电流  $J_0$ 。目前 TOPCon 电池  $J_0$  低至  $2 fA/cm^2$ ， $\rho_c$  低至  $3 m\Omega/cm^2$ ， $iV_{oc}$ (隐开路电压) 高达 740 mV 以上，电池  $V_{oc}$  已达到 700mV 以上。N-TOPCon 电池经过

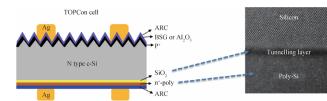


图 2.3 TOPCon 电池结构

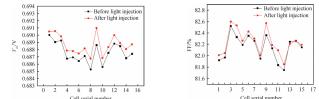


图 2.4 光注入前后  $V_{oc}$  和  $FF$  的变化

光注入退火后， $V_{oc}$  与  $FF$  会有明显提升；光照强度对相同档位 N-TOPCon 电池效率提升幅度大小无影响；光照区设定温度达到 260 °C 时，效率提升比较明显；N-TOPCon 电池 Poly 厚度较薄时，经过光注入退火后，钝化性能会降低；正面栅线遮挡面积大小对光注入退火工艺提升效率无影响；针对 N-TOPCon 电池，高电阻率硅片效率无明显增益，低电阻率效率提升明显，因此光注入提效会受到硅片基体掺杂浓度的影响；N 型硅片经过高温硼扩散后会形成同心圆，经过光注入退火后同心圆可以完全去除。

## 参考文献

[1] Wang P, Li G, Wang M, et al. Numerical study of mono-crystalline silicon solar cells with passivated emitter and rear contact configuration for the efficiency beyond 24% based on mass production technol-

ogy[J].Journal of Semiconductors,2020,41(06):85-91.

[2]Joonwichien S, Utsunomiya S, Kida Y, et al. Improved rear local contact formation using Al paste containing Si for industrial PERC solar cell. IEEE J Photovolt, 2018, 8(1), 54

[3]Albadri A M. Characterization of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> surface passivation of silicon solar cells. TSF, 2014, 562, 451

[4]Pawlik M, Vilcot J P, Halbwax M, et al. Electrical and chemical studies on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> passivation activation process. Energy Procedia,2014, 60, 85

[5]S. Belhadj Mohamed, M. Ben Rabha, B. Bessais,Porous silicon/NaOH texturization surface treatment of crystalline silicon for solar cells,Solar Energy,Volume 94,2013,Pages 277-282,ISSN 0038-092X,<https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.04.026>.

[6] S. Strehlke, S. Bastide, J. Guillet, C. Levy-Clement.Mater. Sci. Eng. B, 69–70 (2000), p. 81

[7]V.M. Aroutiounian, K.R. Maroutyan, A.L. Zaikyan, K.J. Touryan.Thin Solid Films, 403–404 (2002), p. 517

[8]J. Zhao, A. Wang, M.A. Green, F. Ferreira.Appl. Phys. Lett., 73 (1998), p. 1991

[9]Y. Yerokhov, R. Hezel, M. Lipinski, R. Ciach, H. Nagel, A. Mylyanych, P. Panek.Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 72 (2002), p. 291

[10] 李怀辉, 王小平, 王丽军, 等. 硅半导体太阳能电池进展 [J]. 材料导报,2011,25(19):49-53.

[11] 王瑤. 单晶硅太阳能电池生产工艺的研究 [D]. 湖南: 湖南大学,2010. DOI:10.7666/d.y1724880.

[12] 肖友鹏, 王涛, 魏秀琴, 周浪. 硅异质结太阳电池的物理机制和优化设计. 物理学报, 2017, 66(10): 108801. doi: 10.7498/aps.66.108801

[13]Liu, W., Shi, J., Zhang, L. et al. Light-induced activation of boron doping in hydrogenated amorphous silicon for over 25% efficiency silicon solar cells. Nat Energy, 427–437 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41560-022-01018-5>

[14]Wei Kaifeng, Liu Dawei, Ni Yufeng, Zhang Ting, Liu Junbao, Zhang Tianjie, Yang Lu. Light Injection Study of N-TOPCon Silicon Solar Cells on Annealing Synergies[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2021, 50(1): 66-72.