

采用先进的湿法工艺结合常压化学气相沉积激光掺杂的低成本IBC电池的制造

多年以来，采用SCHMID常压化学气相沉积设备 (APCVD) 生产的掺杂玻璃在高效太阳能电池制造中表现出了优异的性能。最新结果表明，采用该设备沉积的掺硼玻璃作为激光诱导掺杂的局部掺杂源，让IBC电池工艺流程更加高效，潜在效率接近24%。

随着PERC电池效率接近工业制造太阳能电池的效率极限，基于n型的电池结构已表现出迅猛的发展势头，首批采用高效工艺的IBC电池生产线已建成投产。

SCHMID与斯图加特大学的光电技术研究所和康斯坦茨国际太阳能研究中心进行合作，采用常压化学气相沉积设备和湿法工艺技术用于生产完整的IBC电池，如下所示[1]：采用一种商业级基体材料直拉 (Cz) 生长的n型硅片，其电阻率为 $1.5\Omega\cdot\text{cm}$ ，具有各向异性表面 (100)。硅片正面在SCHMID水平链式制绒系统中使用氢氧化钾和Alkatex溶液进行化学制绒，以获得均匀的金字塔结构。然后在SCHMID水平链式碱抛系统中使用温度超过 80°C 的氢氧化钾溶液对硅片背面进行抛光。

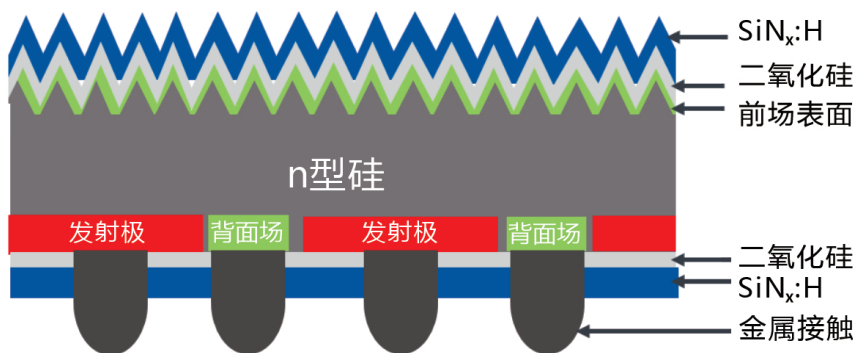
图1.正面制绒且背面抛光的激光掺杂IBC太阳能电池的横截面示意图。双层二氧化硅 (SiO_2) 和氢化氮化硅 ($\text{SiN}_x\text{:H}$) 对表面起钝化作用。背面具有并排排布的多个发射极和基极触点 (背面场)，也被叠层的二氧化硅和氮化硅膜钝化。丝网印刷银浆与两个掺杂区接触。

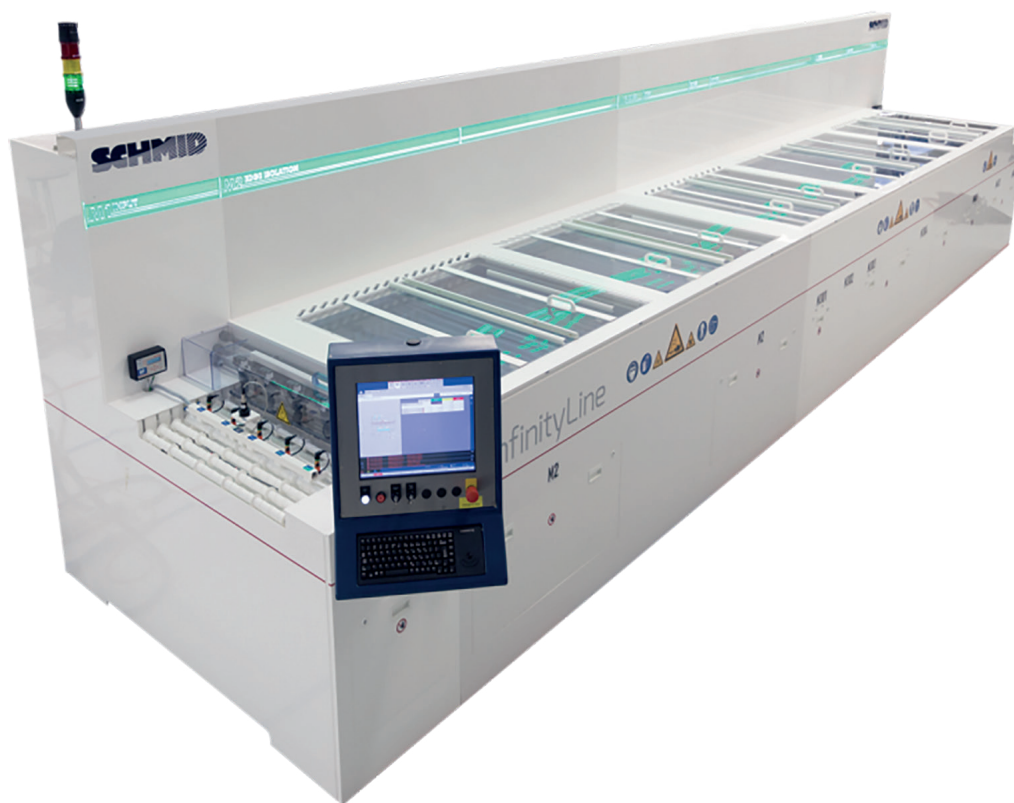
图1为激光掺杂IBC太阳能电池的横截面示意图。在对正面制绒并对背面进行化学抛光后，利用APCVD设备对含硼前驱层进行单面沉积：硼硅玻璃 (BSG) 和未掺杂硅酸盐玻璃 (USG) 的覆盖层。然后，通过局部激光掺杂在晶圆背面形成良好的硼掺杂发射极。因此，形成了局部PN结。然后，用氢氟酸清洁硅片表面。进行RCA清洗[2]去除杂质后，利用三氯氧磷 (POCl_3) 在扩散炉中进行磷扩散。对该扩散 (特别是 P_2O_5

的磷含量) 进行共优化，从而在下一步生成轻掺杂前表面场 (FSF) [3]和重掺杂基极 (背面场, BSF)。利用扩散炉沉积的磷硅玻璃 (PSG) 作为磷源，在硼发射极区域之间进行局部激光掺杂，形成了含磷的背面场。然后，用HF溶液去除PSG的其余部分。随后通过氢氟酸、硝酸混合溶液进行回蚀，均匀地蚀刻硅片表面处约50nm深的高表面浓度的磷。浅蚀刻这一步使 (更深的激光扩散) 背面场以及硼发射极完好无损。通过另一个步骤，即RCA清洗，在下一步干热氧化之前对样品进行清洗。由15 nm厚的热生长二氧化硅 (SiO_2) 和65 nm厚的等离子体增强化学气相沉积氮化硅 ($\text{SiN}_x\text{:H}$) 组成的双层膜可以对正面和背面进行钝化。最后，丝网印刷的银浆与发射极和背面场区接触。用低温银浆单独印刷主栅线，并通过印刷的聚合物浆料进行绝缘处理。其金属化设计类似于ZEBRA电池的金属化设计 [4]，允许双面照射。

与炉扩散工艺相比，APCVD工艺的优点是单面沉积，由于采用陶瓷滚轮对硅片进行水平链式传输，因此特别适用于M12这种大尺寸硅片。此外，无需抽空工艺腔室即可进行沉积。与溅射工艺或蒸镀工艺相比，这是一种更具成本和时间效益的工艺。

SCHMID扩展了碱抛设备 (图3) 的功能，该设备基于2020年初在PES杂志上展示的Infinity Line进行创新。工艺完全避免了硝酸的使用，因此能够实现无氮氧化物气体的制造工艺，每小时可生产的M12硅





片高达10,000片。与 APCVD 一样，碱抛设备也适用于最大尺寸为M12的多种不同尺寸硅片，切换时间不超过10分钟。所有设备平台都在大规模制造中得到了充分验证，并为当今最高效率电池的生产做出了巨大贡献。

硅的激光掺杂在很大程度上取决于前驱体的成分。此处测试的硼硅玻璃层以及未掺杂硅酸盐玻璃或非晶硅覆盖层的特征参数如下

- 硼硅玻璃内的硼浓度 C_B ,
- 硼硅玻璃的厚度 d_{BSG} ,
- 覆盖层未掺杂硅酸盐玻璃的厚度 d_{USG} , 或非晶硅的厚度 d_{aSi} 。

非晶硅或未掺杂硅酸盐玻璃的覆盖层防止 B_2O_3 与空气中的湿气发生化学反应，生成硼酸。

通过测量掺硼层的薄层电阻 R_{sh} ，研究了激光辐照与各层成分与激光脉冲能量密度 H_p 和激光脉冲重叠率 O 的依赖关系。

激光的脉冲能量密度 H_p 改变了硅的熔化深度，而重叠率 O 控制掺杂分布 [5]。因此，不仅薄层电阻，掺杂分布也可以通过适当的激光参数进行调整 [5-7]。

为了在前驱层中实现恰当的吸收，需要调节以下控制参数来制备掺硼的发射极：

1. 硼硅玻璃中的硼浓度，
2. 作为激光掺杂源的硼硅玻璃厚度

3. 未掺杂硅酸盐玻璃保护层的厚度。

对于激光掺杂，激光脉冲能量密度必须足够高，才能将硅熔化。其阈值取决于硼硅玻璃层的厚度。产生这种效应仅仅是因为硼硅玻璃和未掺杂硅酸盐玻璃覆盖层（如果太厚）的吸收作用：仅当下面的硅片层熔化时才会出现掺杂效果。低于阈值能量密度，硼硅玻璃/未掺杂硅酸盐玻璃对激光脉冲的（寄生吸收）恰好将硼硅玻璃/未掺杂硅酸盐玻璃堆叠层蒸发掉。研究发现，在未掺杂硅酸盐玻璃层内对激光脉冲的吸收不起作用。

结论

采用APCVD工艺的含硼前驱体非常适合通过激光掺杂制造工业太阳能电池。对于大面积电池，利用具有陶瓷滚轮链式传输的商用APCVD系统和丝网印刷金属接触，转化效率可高达24%。激光掺杂是一种避免掩膜的巧妙方法，并且由于它具有烧蚀效应的特点，也产生了富硼层。结合SCHMID单面制绒和背面抛光工艺，可以轻松实现商业布局并投入批量生产。

[1] Solar Cells with Laser Doped Boron Layers from Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition
Renate Zapf-Gottwick, Sven Seren, Susana Fernandez-Robledo, Evariste-Pasky Wete, Matteo Schiliro, Mo-hamed Hassan, Valentin Mihailetchi, Thomas Buck, Radovan Kopecek, Jürgen Köhler, and Jürgen-Heinz Werner. MDPI Solar

Journal 2021

[2]. Kern W.; Puotinen D.; Cleaning Solutions Based on Hydrogen Peroxide for Use in Silicon Semiconductor Technology. RCA Review 1970 187.

[3]. Dahlinger M.; Carstens K.; Optimized laser doped back surface field for IBC solar cells. Energy Procedia 92, 2016, 450 – 456

[4] Galbiati G.; Chu H.; Mihailetchi V. D.; Libal J.; and Kopecek R.; Latest Results in Screen-Printed IBC-ZEBRA Solar Cells. IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC), 2018, 1540-1543.

[5] Hassan M.; Dahlinger M.; Köhler J. R.; Zapf-Gottwick R.; and Werner J. H.; Unified Model for Laser Doping of Silicon from Precursors. Materials 2021, 14, 2322. <https://doi.org/10.3390/ma14092322>.

[6]. Köhler J.; Eisele S.; Influence of precursor layer ablation on laser doping of silicon. Prog. Photovolt: Res. Appl. 2010, 18, 334–339. <https://doi.org/10.1002/pip.968>.

[7]. Eisele S.; Laser doping of silicon solar cells. Dissertation, University of Stuttgart, Stuttgart, Germany, 2011.