

太阳能工业中的仿真应用

EMIX 使用多物理场仿真来优化用于制造光伏级硅的冷坩埚连铸工艺。

作者: CHRIS HARDEE

庞大的半导体行业植根于微型薄硅晶圆这一坚实的基础。这些晶圆是制造集成电路 (IC) 的基础材料, 我们利用硅本身类似金属的导电属性打造了现代计算机和电子产品中的通信路径。

另一项硅起到关键作用的技术是光伏 (PV) 制造。基于硅晶圆的太阳能电池就属于这个不断增长的替代能源类别, 它可以将来自太阳的光子转换为地球上的电力。太阳能被许多人视为一项拥有巨大潜力的能源。然而, 在它能与更成熟的矿物燃料技术相抗衡之前, 太阳能产品制造商必须找到一种方法来降低每单位产能的成本。

“根据多晶硅的价格, 太阳能电池的最终售价大约有 30% 与硅本身的成本相关。” Grupo FerroAtlántica 法国子公司 EMIX 的研究工程师 Julien Givernaud 博士说道。Givernaud 致力于优化用于光伏器件中硅提纯的感应加热冷坩埚及相关设备。“在降低硅生产成本的同时提升它的纯度, 这对于整个行业都至关重要。”

→ 制造光伏级硅

在自然界, 硅是地壳中储量第二丰富的元素。但在光伏应用中, 冶金级硅 (纯度 99.9%) 必须经过加工达到更高的纯度等级, 即所含杂质不应超过百万分之一 (99.9999%)。纯度之所以如此重要, 是因为它会直接影响太阳能电池从所输入的太阳光生成的电量大小, 即光电转化效率这一测量标准。

目前有几类将硅从自然态转换为可用于太阳能电池状态的工艺, 各种技术正在相互竞争。“我们的冷坩埚连铸, 或称 4C (cold crucible continuous casting) 工艺, 就是其中一项颇具创新性的光伏级硅制造方法。” Givernaud 说道, 他使用 COMSOL Multiphysics® 软件来优化制造参数。该公司拥有多项该技术的相关专利, 以及全球独家经营许可证。

在 4C 工艺中, 硅原料被送入水冷坩埚中, 并被感应加热

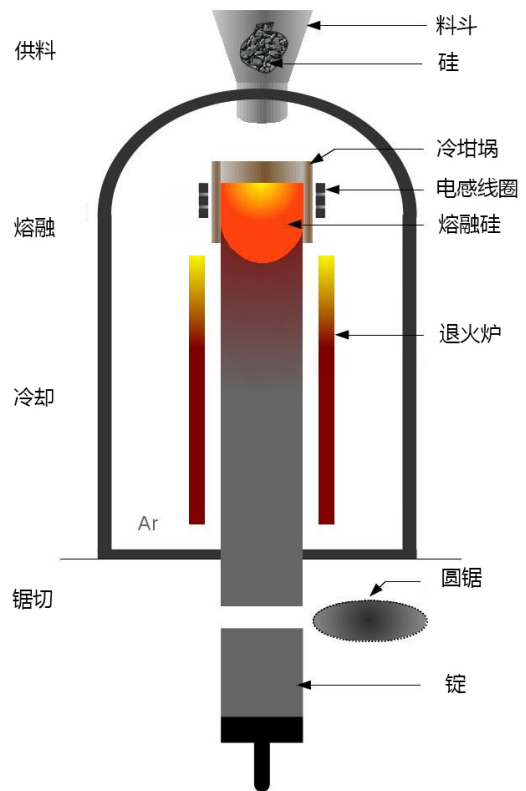


图 1. 本示意图说明了用于制造光伏级硅的冷坩埚连铸 (4c) 工艺。硅料从顶部倒入系统料斗, 然后被加热、冷却, 并切成锭。

至熔点, 即 1,414 °C; 然后它会在坩埚中进行电磁混合, 此时洛伦兹力将阻止坩埚和硅熔体之间的接触, 剧烈的搅拌使固液界面处的物质浓度变得很均匀, 增强了结晶条件, 并带来了较高的纯度 (见图 1)。

混合后, 熔体通过底部开口的坩埚“向下拉晶”, 并通过一个精细控制的退火过程实现冷却和凝固。经连铸生产的硅棒被锯成锭, 然后出售给 PV 制造商, 后者会将其切成 200 微米厚的小块来制造太阳能电池。

→ 仿真提升了光伏生产效率

虽然概念相对简单, EMIX 的 4C 工艺其实涉及到了非常多的制造变量。这就是仿真可以发挥作用的地方。Givernaud 使用仿真进行了无数次的计算来检查其中的众多变量, 例如, 冷却方式、拉晶速率、坩埚和线圈的形状, 以及熔炉的特性。他还分析了电磁场的影响、固-液界面的形状, 以及弹性应力对结晶行为的影响。

EMIX 的工程师们早在八年之前就已经开始使用多物

理场仿真来评估生产工艺了，几乎和他们进入光伏级硅行业的时间一样长。

“COMSOL Multiphysics 比我上一份工作中用到的有限元分析工具简单得多。” Givernaud 说道：“我直接在 COMSOL 中创建了所有的几何。模型的网格剖分很容易实现。物理场之间可以轻松切换，求解器快速且高效。从各方面来看，它都不愧为一款直观强大的工具。”

Givernaud 最近的模拟研究同时涉及了多尺度电磁和三维连铸仿真。他进行的电磁模拟支持通过评估电感和阻抗，以及优化坩埚设计来改进电气效率（见图 2）。连铸仿真支持输入以下参数，例如电磁功率、结晶速率、坩埚冷却区的高度，以及加热后的温度。综合这些研究结果，我们可以在较高的生产率和较低的锭中应力之间达成一个平衡。

在各种仿真中，都可以利用 COMSOL 的流体传热和层流接口来计算硅在坩埚内发生凝固时的相变。经验证，对圆柱形测试坩埚的计算适用于更大型的商用坩埚。

“仿真和我们测试过程中的实验数据非常一致。” Givernaud 说道：“仿真帮助我们实现了良好的结晶参数，改进了工业级坩埚的电气效率，减少了在中试炉中的测试次数。”他进一步补充道，从理论上来看，最近进行的一系列仿真可以

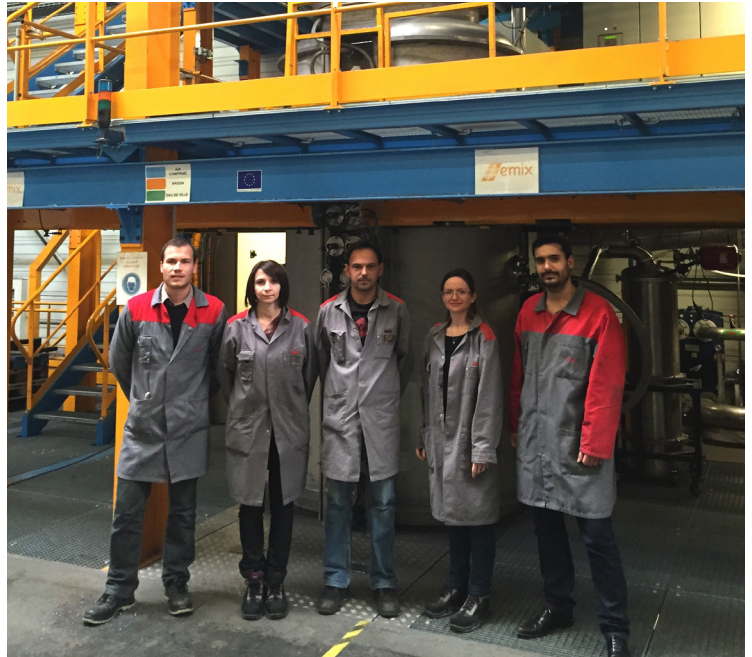
节省大约 15% 的能耗，并将拉晶速率提升了约 30%，这使得 4C 方法的生产效率要远高于其他标准硅结晶工艺。

在整个行业中，制造商都在努力降低硅晶圆的生产成本，以及针对 PV 应用提升硅的纯度。在这个正持续增长的太阳能市场中，份额的增加就是对开发出最具商业可行性解决方案企业的回报。

“多物理场仿真帮助我们验证了那些即将在工业级测试的工艺。” Givernaud 说道，他希望 EMIX 能继续创新，并在公司目前所从事的领域做出更多的突破。❖

“COMSOL Multiphysics 比我上一份工作中用到的有限元分析工具简单得多……从各方面来看，它都不愧为一款直观强大的工具。”

— JULIEN GIVERNAUD, EMIX 研究工程师



EMIX 的研发团队站在生产硅的熔炉前（从左到右）：Julien Givernaud、Elodie Pereira、Nicolas Pourade、Florine Boulle 和 Alexandre Petit。

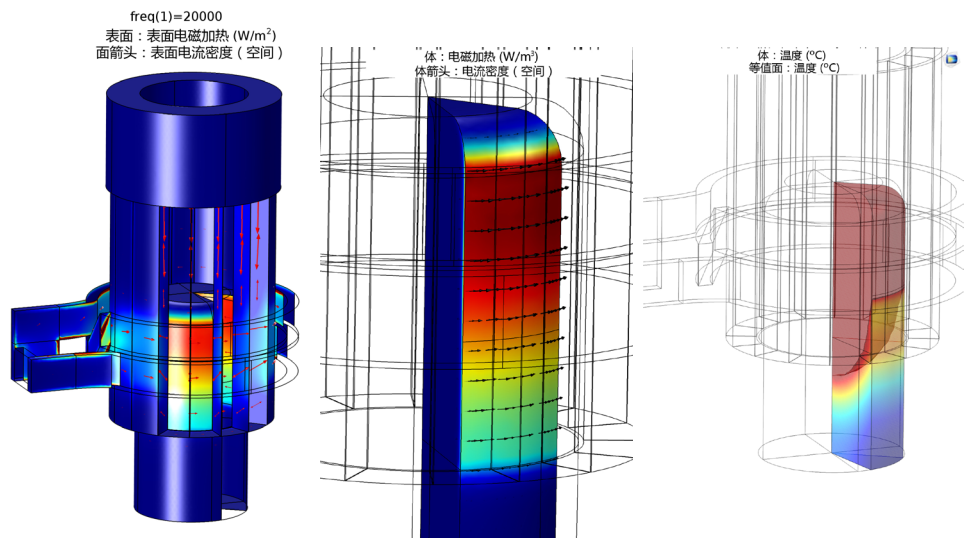


图 2. 冷坩埚模型用于预测坩埚（左）、硅熔体（中）和液固气三相界面的电磁加热，其中红色/黄色代表熔体、蓝色/绿色代表固相。