

OCTOPUS

INDEOtec SA 销售及市场总监 Frank Juergens 将与我们分享关于 OCTOPUS 系统创新正面和背面沉积概念的更多信息……

背景

由块状晶体硅和薄膜层组成的异质结或 IBC 型高效太阳能电池有潜力在未来的光伏电池市场上赢得巨大份额。目前, Panasonic 等行业领导者保持着 HIT 电池类型效率的世界纪录: 研发方面为 25.6%, 量产则为 22.5%。此外, 电池制造技术有望将成本降至远低于 0.30 美元/Wp。一项研究调查了异质结电池类型的成本降低路线图, 预测 SHJ 价格水平为 0.28 美元/Wp, 对应的电池效率水平为 24.9%。

标准异质结 (SHJ) 电池类型等对称电池结构的制造工序非常简单, 采用先进技术, 工艺步骤也少。一项关键工艺是在有纹理的 c-Si 基板材料正面和背面沉积多层 a-Si:H 薄膜, 首先钝化 Si 表面, 然后通过添加 n 型和 p 型掺杂剂层来形成发射极。现今常用的 a-Si:H 薄膜沉积方法是 RF 模式下的 PECVD。目前行业关于采用 PECVD 反应器沉积非晶薄膜的知识基础非常充分, 因为这种材料过去曾用于商业规模的光伏薄膜电池装置制造。但与此矛盾的是, SHJ 装置需要在基板晶圆两面都沉积 a-Si:H, 这对设备供应商带来了操作和成本上的新挑战。此外, 这种薄膜非常薄 (约 10 nm), 因此沉积时间极短。这意味着必须格外小心, 以确保点火之后马上达到正确的等离子体条件。因此, 如果只是对大型基板沉积的先进 PECVD 反应器技术进行简单调整以适应 HIT 电池的新参数组合, 可能相对风险较大。

2011 年, Indeotec SA 对 PECVD 系统的这项新应用进行了评估, 并开始将一种新的 RF 反应器类型和系统作为一个整体进行开发, 随后该产品以“OCTOPUS II”作为名称进入市场。关于等离子体条件的优化和新反应器类型 (镜像反应器), 已经开展了广泛的研究工作, 这种类型的反应器可以将 RF 等离子体直接沉积到晶圆正面和背面, 无需到系统外部翻转晶圆, 因此也不会频繁中断系统真空。这一专利概念已经成功通过验证和测试。

下面会通过一些薄膜均匀性实验数据来确定 SHJ 电池钝化质量的少数载流子寿命和完整的 SHJ 电池数据, 并解释反应器的功能原理。

镜像反应器概念

PECVD 镜像反应器可以在基板两面实现超均匀沉积, 无需翻转基板, 中断真空。在传统 PECVD 反应器中, 基板直接放置在一块电气接地的金属承载盘上。因此, 只能在基板的一个面上进行沉积。如果需要在另一面上沉积, 通常必须将基板从真空加工室中取出, 通过机械方式翻转。在镜像反应器中, 基板悬挂在一个带有开口的承载盘 (“双面”承载盘) 上, 从而可以同时从基板的两个面上进行沉积。如图 1 所示, 需要两个不同的反应器设计: 一个用于从基板上方进行沉积 (称为“顶部结构”), 一个用于从基板下方进行沉积 (称为“底部结构”)。

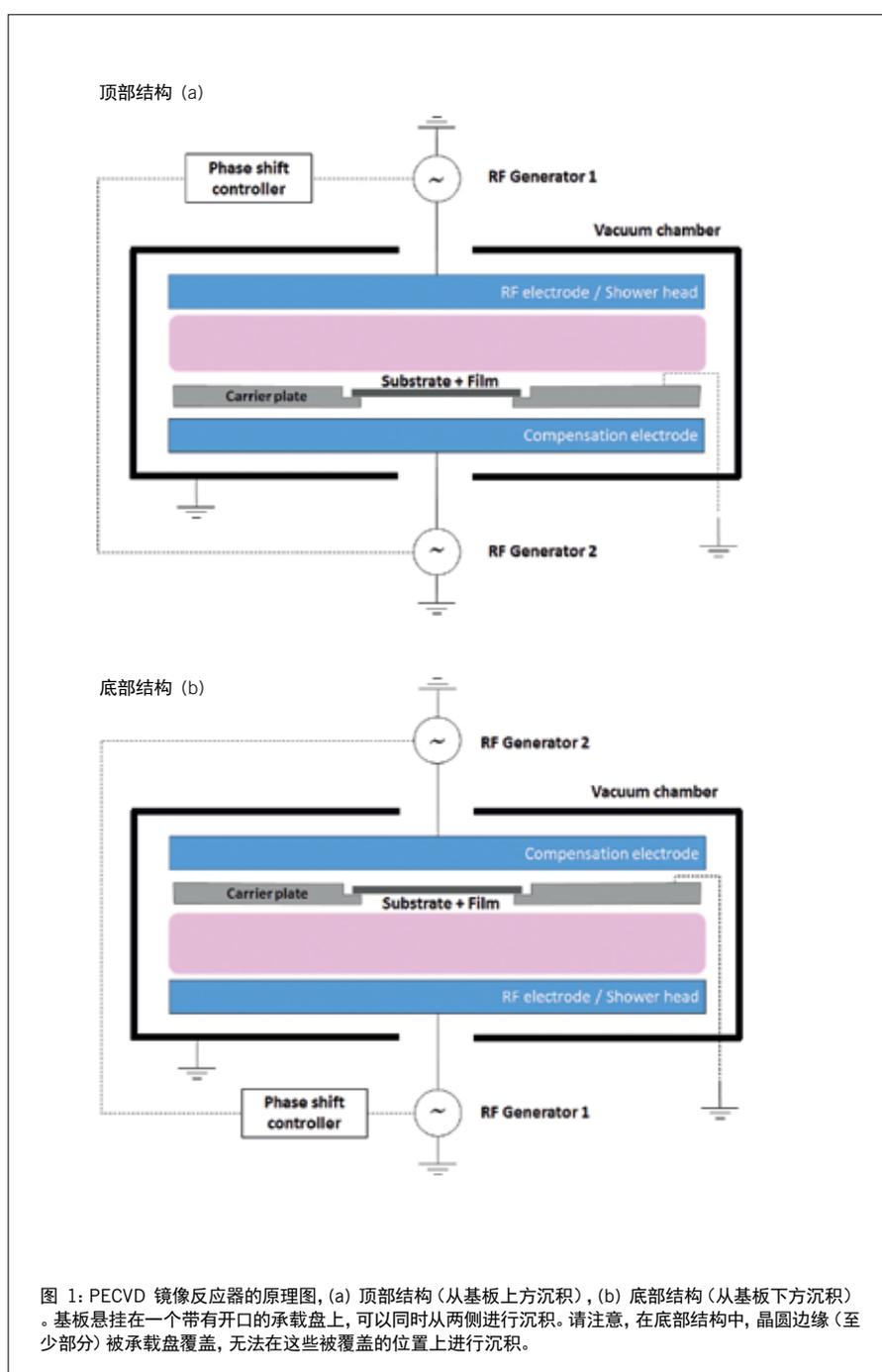
双面承载盘的使用也增加了薄膜均匀性方

面的挑战。实际上, 基板下方的空隙相当于在等效电路中增加了一个电容, 它会影响 RF 电场的整体分布, 最终导致基板上的薄膜变得不均匀。这会使基板中心的沉积速率相对边缘降低, 从而导致性能显著下降, 因此是高性能 SHJ 太阳能电池生产中不能接受的。

克服这一难题的成功方法是在承载盘一侧增加一个辅助 RF 电极。通过向辅助电极提供经过适当调整的 RF 功率, 可以补偿间隙中不利的电压降, 从而补偿基板上方的局部等离子体功率损失。这种补偿可以让薄膜沉积得和标准板结构一样均匀, 甚至更好。借助这一功率补偿, 可使基板表面的层厚均匀度低于 1%。

这种 PECVD 镜像反应器的概念验证已经得到成功证明。结果表明, 基板中心的沉积速率可以通过辅助电极上施加的功率进行非常精细的控制 (见图 2)。

通过施加正确的功率补偿, 在 6 英寸 CZ c-Si 晶圆上实现了非常均匀的高质量钝化 (图 3b), 而没有施加功率时得到的结果则非常不均匀 (图 3a)。这首先说明, 在使用双面承载盘时, 要实现均匀沉积, 采用合适的解决方案是绝对必要的。其次, 镜像概念完美满足了这一需求。太阳能电池前体的少数载流子寿命达到 6 ms 以上, 产出的 SHJ 太阳能电池效率最高可达 22% (全面积 6 英寸电池 CZ c-Si)。这些结果与标准反应器中使用普通承载盘和类似材料时得到的结果相当。



作为表面钝化良好的质量指标, 少数载流子寿命已经过多次试运行验证, 结果一致保持在极高水平。表 1 和图 4 中的示例显示了在镜像反应器中对一个完整 i-n/i-p 装置进行的钝化。

反应器设计以及对拥有成本结构的影响

对多种系统配置进行评估之后, 我们发现了一种最佳的集群设计, 可以充分利用新镜像反应器概念的优势, 并满足高效电池的沉积要求。面向研发和小规模生产的 OCTOPUS II 系统可以实现晶圆的 PECVD 和 PVD 加工 (TCO 层), 见图 1。如此就可以在系统中完成 SHJ 的所有薄膜沉积, 不需要翻转或中断真空。

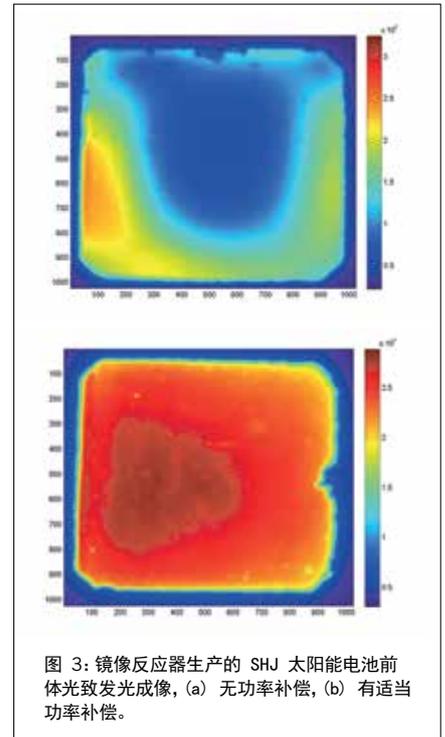
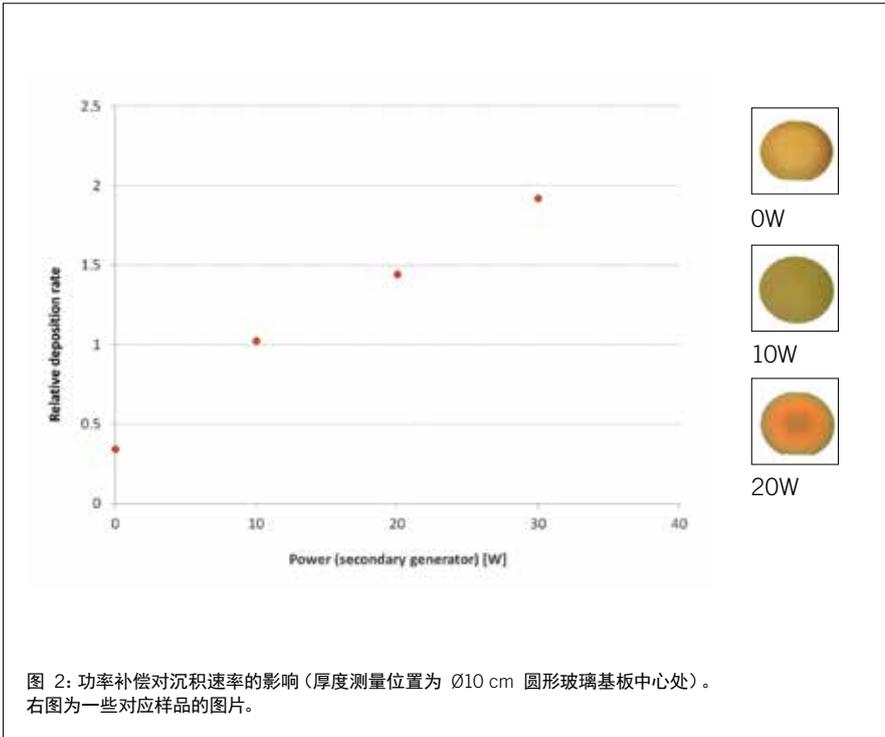
面向 SHJ 量产的 OCTOPUS III 系统针对 PECVD 沉积工艺进行了全面优化, 通量较高。系统配备有 1 个 LL 输入, 1 个 LL 输出, 1 个加热室和 6 个 (双层) PECVD 反应器模块 图 2

以下设计特性对系统收益和成本节约有很大的正面影响:

系统占用空间: 相对于混合内联系统, 集群配置大大节省了占用空间 (可达 40%)。例如, 一台 80 MW 通量的 OCTOPUS III 系统占地仅 48 平方米

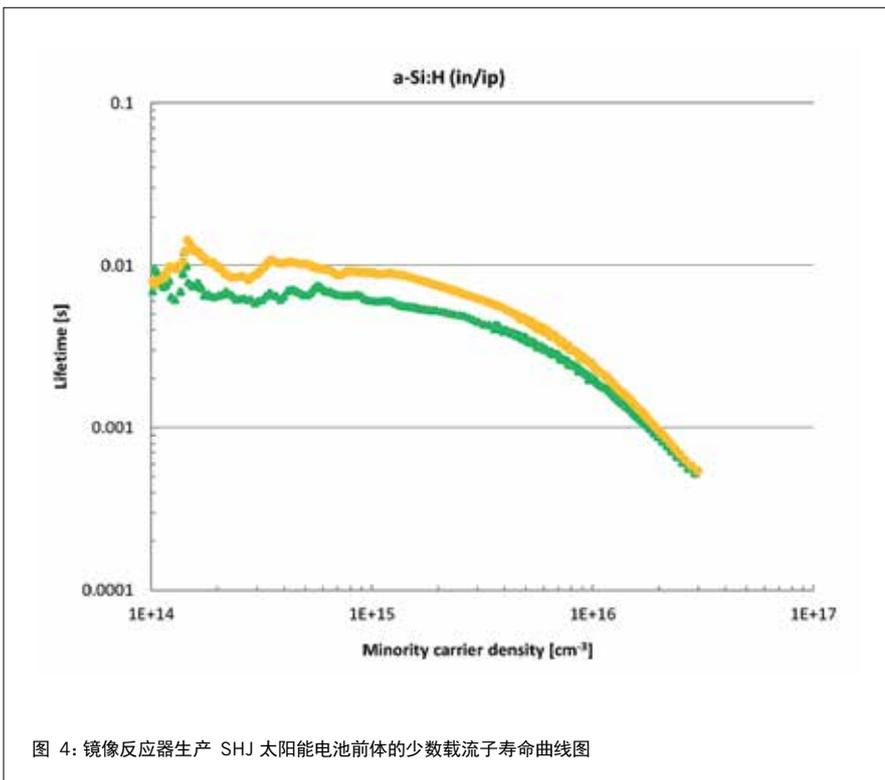
减少操作和系统调节: 在每个给定系统中, 加工时间所占比例应尽可能高, 这对于 SHJ 而言较为困难, 因为加工时间相对较短。镜像反应器完全消除了翻转和真空中断所需时间, 见图 5。所有其他晶圆承载盘的转移距离都较短。每个装载循环会装载最多 12 个晶圆承载盘。此外, 共用抽气和加热 (以及循环结束时的通气) 也节约了时间。所有这些特性都使得加工时间所占比例超过处理时间。每个循环加工时间所占比例可达到 75% 以上, 相形之下, 现有的先进系统只有 50% 或以下。

虽然 PECVD 耗材不会超过整个 SHJ 电池生产线 OPEX 成本结构的 6%, 但加工系统必须具备非常高的产量和非常短的停机时间。OCTOPUS 设计通过显著减少复杂自动操作装置或避免过度使用运转部件, 确保了出色的产量和运行时间。



晶圆沉积模式	5E14 cm ⁻³ 时的 Tau [ms]	5E15 cm ⁻³ 时的 Tau [ms]	隐开路电压 [mV]
镜像 in/ip	6.8	3.5	744
镜像 in/ip	9.9	4.6	746

图 3: 镜像反应器生产的 SHJ 太阳能电池前体光致发光成像, (a) 无功率补偿, (b) 有适当功率补偿。



另一个重要因素是集群系统中的反应器冗余。在某个反应器可能出现故障的情况下, 只需关闭受影响的反应器, 其他反应器仍可正常运行。

OCTOPUS 系统中的主要工序

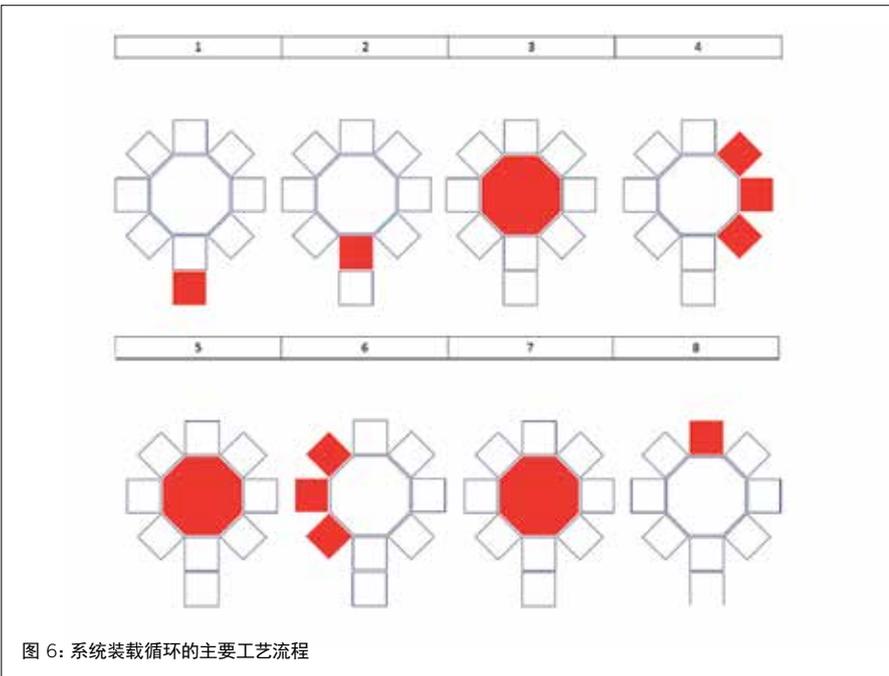
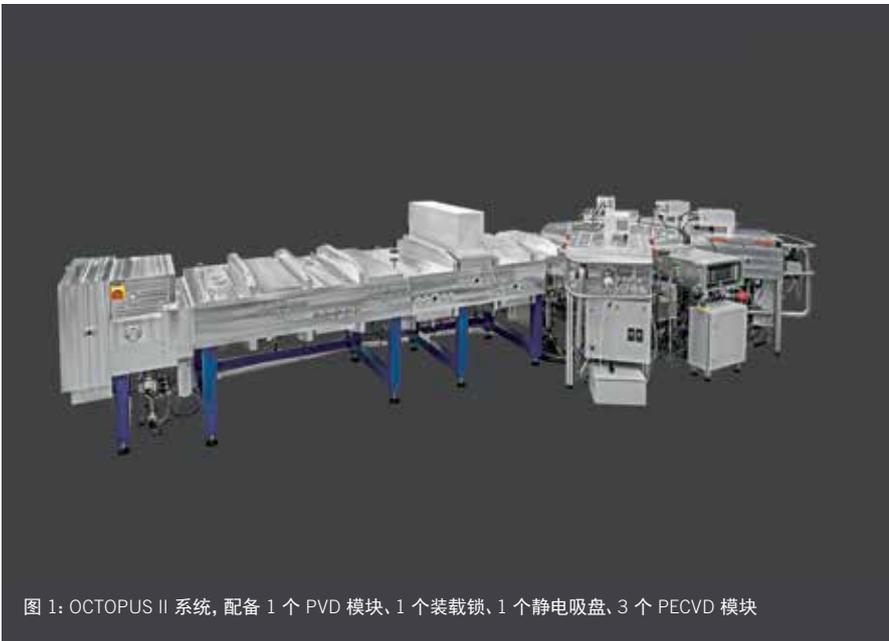
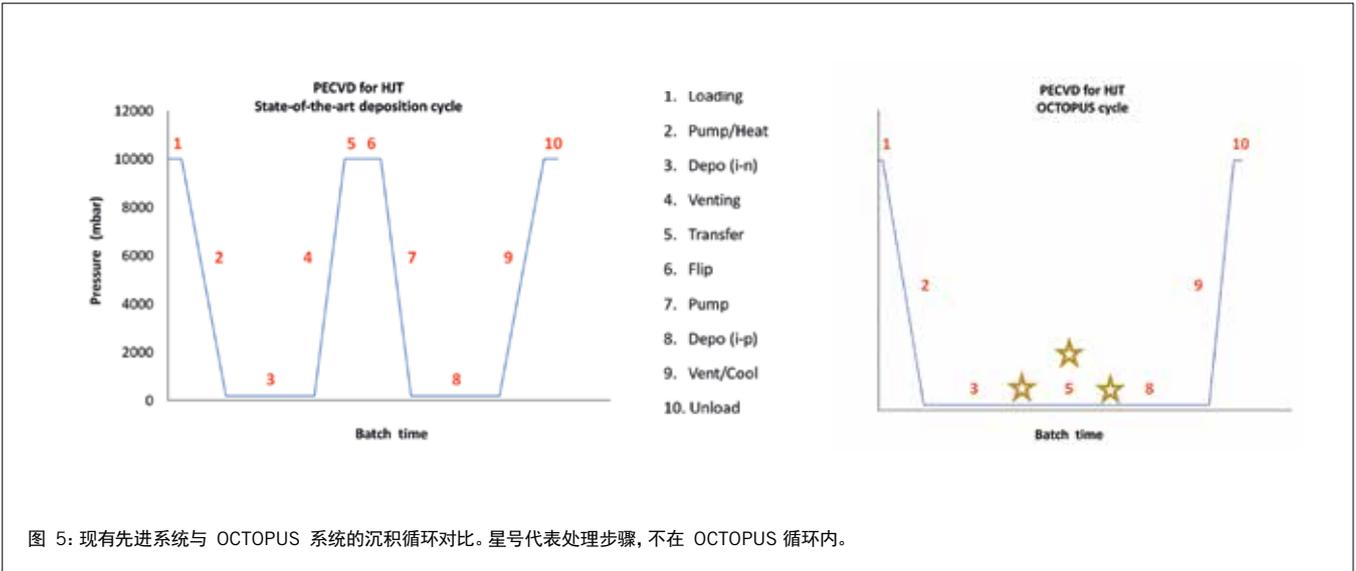
对于一项由 a-Si:H i-n 和 i-p 层沉积构成的典型 SHJ 工艺, 其工序如图 6 所示。

- 1 - 将晶圆承载盘装载到装载锁中。抽至系统基准真空水平。
- 2 - 将承载盘加热至 200°C。
- 3 - 将第一组承载盘连续转移至加工室。
- 4 - 沉积 i-n 下层 (之后在加工室卸载后快速进行清洁)。
- 5 - 转移至后面的顶部沉积室。重新装载底部沉积室。
- 6 - 沉积 i-n 上层 (之后进行清洁步骤)。
- 7 - 转移至装载锁出口。从底部沉积室转移至顶部沉积室。
- 8 - 所有承载盘均转移至装载锁出口之后, 通气并卸载。

这个循环可以连续并行多个工艺步骤, 从而进一步提高通量。■

总结

OCTOPUS 系统创新的正面和背面沉积概念所提供的解决方案填补了 PECVD 现有工具的空白, 专为异质结电池加工设计。钝化质量水平、通量和镜像反应器以及整体工具设计概念的前景非常广阔, 为行业中异质结电池制造价值链的关键工艺提供了一种可行的解决方案。



[1] Panasonic Corporation, Eco Solutions Unit. www.panasonic.net
 [2] Louwen A.; van Sark W.; Schropp R., Faaij A.: A cost roadmap for silicon heterojunction solar cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 147 (2016)