

# 光伏技术创新 出海



## 深度

隆基 M6 硅片风云：超前十年提升全行业组件功率

P20



## 论文报告

异质结技术：通往高效组件大规模生产之路

P12

## 纪实

中国光伏企业出海记

P08



## 趋势

Fraunhofer ISE 推出基于 PERC 的叠瓦太阳能电池和组件

P22

# Growatt 古瑞瓦特

## TOP3 IHS Markit 全球單相&三相變流器

- 最大轉換效率98.8%，中國效率98.5%
- 最大直流輸入電壓1100V
- 適配雙面組件
- 3路MPPT
- 智能風冷
- 交直流二級防雷
- OLED顯示和觸摸按鍵
- 監控方式靈活
- 最大轉換效率98.4%
- 雙路MPPT
- 自然冷卻
- 直流二級防雷
- OLED顯示和觸摸按鍵
- 監控方式靈活



Growatt New Energy

深圳古瑞瓦特新能源股份有限公司  
www.growatt.com | E:info@ginverter.com  
晉好能源股份有限公司  
T:0800-208022 E:service@vgwatt.com

出版机构: Solar Media Ltd  
出版人: David Owen  
营运总监: David Evans  
营运经理: 朱莉莉  
高级编辑: 肖蓓  
网站新闻编辑: 尹欣  
网站新闻翻译: 史琳娜  
特约技术翻译: 谢文旭  
英文编辑团队: Mark Osborne  
Jose Rojo  
Finlay Colville  
客户经理: Adam Morrison  
Graham Davie

**免责声明条款:**

虽然我们已尽最大努力提高 PV-Tech PRO 的质量和准确性, 我们的作者也以极度严谨的态度来对待每一篇文章, 我们对所有原样提供的内容均不做担保。PV-Tech PRO 对其中包含的第三方内容不负有责任; 对广告内容中的错误、删节或不精确之处不负有责任, 对在广告需要出现的互联网址的可用性不负有责任。本杂志提供的数据和信息仅供参考用途, PV-Tech PRO 杂志、其附属机构、信息提供者及内容提供者均不对任何基于本杂志信息作出的投资决策或者由本杂志信息所得出的结论负责。

**使用限制:**

本杂志受国际版权法规及商标法规保护。任何人不得以任何形式修改、复制、衍生、重印、发表、转载或散布本杂志内容的任何部分。PV-Tech PRO 杂志社要求读者遵守相关版权要求及所有声明, 仅使用本杂志作为个人的非商业用途。如读者需要使用本杂志作为非个人、非商业用途, 须得到 Solar Media Ltd 公司的书面许可。

## 卷首语



时光流转, 转眼已进入十月。

对于大部分中国光伏企业来说, 2019 年上半年过的并不轻松, 国内市场处于持续低迷状态, 政策延迟、补贴问题困扰着整个行业。根据中国光伏行业协会公布的数据, 2019 年上半年我国光伏新增装机不足 12GW, 降幅超过 50%。

国内市场逐步缩减, 这与庞大产能之间的矛盾日渐突出, 以组件为例, 在目前有上百 GW 产能的情况下还是无法阻挡部分企业扩产的脚步。在此背景下, 海外市场成为新的角力点, 而有海外渠道优势的组件企业将更具竞争力, 《中国光伏企业出海记》一文详细讲述了中国领先的组件、逆变器、支架厂商是如何“扬帆出海”的。

2019 年上半年我国光伏产品出口至 200 多个国家和地区, 在这一过程中, 中国高质高效组件走向海外, 如隆基推出的大硅片组件 Hi-MO4 等纷纷出海, 引领了全球光伏制造产业的发展。《隆基 M6 硅片风云: 超前十年提升全行业组件功率》一文全面报道了这场自上游硅片到电池、组件, 再到电站终端应用的变革。

技术创新是推动中国光伏产品“走出去”的核心竞争力, 随着国产化替代加速, 规模效应提升, 异质结 (HIT) 等高效技术初始投资有望得到较大幅度下降, 良率和效率随量产线的增加也有望进一步提升。

正因如此, 异质结技术成为当下光伏行业积极讨论的热门话题, 对此, 《异质结技术: 通往高效组件大规模生产之路》、《双面异质结光伏组件: 目前发电效率最高的商用组件及测试方法》等文章将重点介绍了这一高效技术。

以上文章只是本期《PV-Tech PRO》的一部分内容, 杂志还收录了其他关于光伏产品、技术、电站等方面的精华文章, 如《全球 21 家光伏制造上市公司研发支出分析》、《Fraunhofer ISE 推出基于 PERC 的叠瓦太阳能电池和组件》、《全球新兴市场对光伏电缆的关键要求》等, 期待大家的关注。

肖蓓



编辑推荐季刊示例

本期 PV-Tech PRO 中文专业版将在今天的多个国内外行业活动中进行投放。

PV-Tech PRO 中文专业本着深入浅出、精益求精的原则, 刊载了多篇深度专题报道、最新产品简介以及权威舆论导向等内容, 并涵盖了多篇来自《Photovoltaics International》姊妹英文杂志的技术文章。

★ 编辑推荐

《Photovoltaics International》英文技术杂志

每季一期, 期期精彩, 不容错过!

垂询订阅: [subscribe@pv-tech.org](mailto:subscribe@pv-tech.org)  
网址: [www.photovoltaicsinternational.com](http://www.photovoltaicsinternational.com)

联系我们:

电话: +44 207 871 0122  
传真: +44 207 871 0102  
咨询: [info@pv-tech.cn](mailto:info@pv-tech.cn)  
投稿: [editor@pv-tech.cn](mailto:editor@pv-tech.cn)  
广告: [sales@pv-tech.cn](mailto:sales@pv-tech.cn)  
订阅: [subscribe@pv-tech.cn](mailto:subscribe@pv-tech.cn)  
微博: [weibo.com/pvtech](http://weibo.com/pvtech)  
微信: PVTechCN

地址:

2nd Floor,  
123 Buckingham Palace Road  
London  
SW1W 9SH  
United Kingdom

## 目录



29



17



16



39

6-7 **新品发布**

8-10 **深度报道**

中国光伏企业出海记

12-18 **技术前沿**

异质结技术：通往高效组件大规模生产之路

20-21 **深度报道**

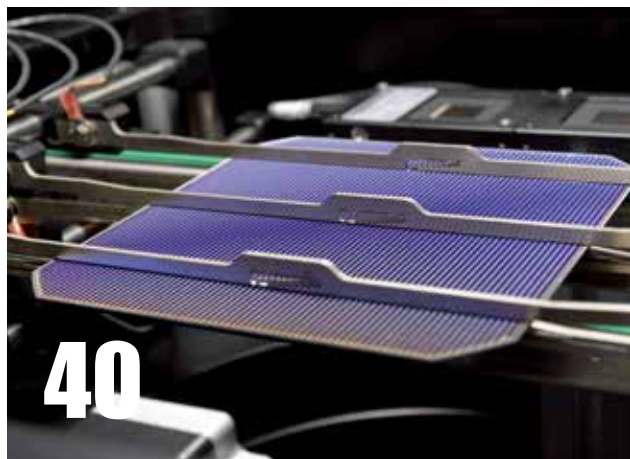
隆基 M6 硅片风云：超前十年提升全行业组件功率

22-37 **技术前沿**

Fraunhofer ISE 推出基于 PERC 的叠瓦太阳能电池和组件

38-40 **公司动态**

先进测量技术 确保一流精度



40



# 全球成功连接超255GW光伏系统 我们的经验是您的优势

## 久经考验的品质

每一细节，史陶比尔电连接器皆蕴藏精工造诣、高可靠性和安全。史陶比尔MC4，已成功连接全球超255GW光伏系统。我们的经验是您的优势。

## 史陶比尔的优势

史陶比尔拥有127年历史和50余年电连接专业经验，是光伏连接器领域的先驱和领导者。

## 您始终如一的合作伙伴

[www.staubli.com/electrical](http://www.staubli.com/electrical)



原版MC4光伏连接器

**Multi-Contact**

**MC**

**STÄUBLI**



# 54

## 41-47 技术前沿

双面异质结光伏组件：目前发电效率最高的商用组件及其测试方法

## 48-48 公司动态

卡塔尔太阳能研究和测试中心“开始营业”

## 50-51 深度报道

台湾太阳能在艰难中转型 绿电交易市场开始兴起

## 54-58 技术前沿

全球新兴市场对光伏电缆的关键要求

## 60-61 行业分析

全球 21 家光伏制造上市公司研发支出分析

## 其他项目

01 卷首语  
62 广告目录



# 48

封面说明：印度德里机场 1.724MW 项目  
拍摄单位：锦浪科技

# 创新技术集大成者

天鳌N型双玻组件

天雀全黑组件

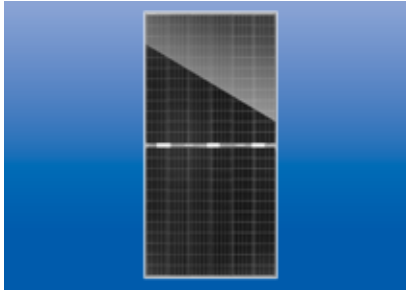
天鳌双核组件

天鲸组件

天合光能新一代组件系列解决了技术叠加的工艺难点，创新整合MBB多主栅、PERC、N型i-TOPcon、双玻、双面、切半等组件技术并实现产业化，能最大程度为客户降低度电成本，提升收益。

# 新品发布

晶科能源推出全新 Swan 透明背板双面组件



**产品应用：**大型电站项目和分布式项目，应用于沙漠、雪地、草地等地面电站及阳光房、车棚等分布式场景。

**相关信息：**晶科能源 Swan 系列双面组件，采用了 158.75mm 大尺寸 p 型高效单晶双面电池技术，在实现双面发电的同时，创新采用了玻璃和透明背板的封装方式，取代传统的双玻封装方式，从而兼具稳定的高透光性能、轻量化的设计和便捷高效的安装方式，显著降低度电成本，提升收益率。

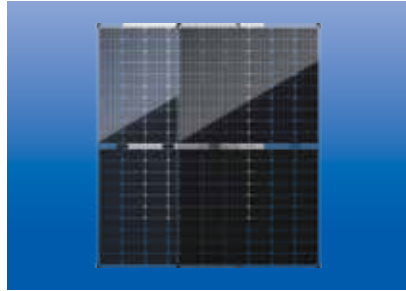
**上市时间：**2019 年 6 月

采用高效的 158.75mmP 型双面电池和基于杜邦透明 Tedlar 膜的透明背板，晶科 Swan 透明背板双面组件背面发电增益在草地和沙地等常规地面可达到 7-9% 左右，同时双面组件与单面组件相比具备更优的弱光系数，在早晚和多云天气能贡献更多发电量。

其次，晶科 Swan 透明背板双面组件采用半片设计，能够有效降低组件内部的电流热损耗，提升整体功率输出，优化组件温度系数，降低热斑风险。此外，SWAN 透明背板双面组件采用带边框设计，重量与单面组件非常接近，兼容常规单面组件的安装方式和多种跟踪支架体系，显著提高安装的便捷性。

另外，晶科 Swan 系列所采用的透明背板采用双面含氟的结构设计，具备优异的抗老化、抗紫外性能，能够在 30 年户外使用过程中保持良好的透光率和力学性能，有效保护组件内部结构和发电性能。同时基于 PVF 膜优异的抗沾污性能，透明背板双面组件更易于清洗和维护，利于降低 O&M 成本。

江苏赛拉弗推出系列新品：双面半片组件 ( Blade Bifacial Series )



**产品应用：**适用于水面、沙漠、雪地等高反光项目场景。

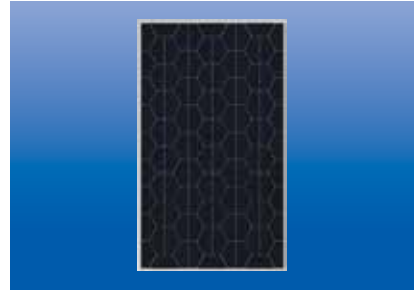
**相关信息：**赛拉弗双面半片系列组件 ( Blade Bifacial Series ) 将半片技术和双面 PERC 电池技术结合在一起，优异的组件技术叠加创新的电池技术使得赛拉弗双面半片组件具有低内耗、低热斑、高功率、高可靠性等一系列卓越的特性。

**上市时间：**2019 年 5 月

赛拉弗双面半片系列组件结合了半片技术和双面 PERC 电池技术，使得该款组件拥有这两种技术带来的所有优势。相比于传统设计的组件，半片组件有更低的电流和串联电阻，使其更有效地减少系统失配、内部损耗及阴影遮挡等。另一方面，赛拉弗双面半片组件采用的双面电池技术，可以使组件除正面发电外，背面也利用大气中的散射光和地面的反射光进行发电，根据应用环境不同增加发电量达 10%-30%，单位面积安装功率更高，大幅度降低了 BoS 成本和 LCOE 成本，符合未来提效降本的趋势。

实验室测试结果显示，赛拉弗双面半片组件的双面率可以高达 75%，具有极高的性价比。对于这款高性能的组件，赛拉弗承诺了 30 年的功率质保。值得一提的是，赛拉弗单晶 PERC 半片组件，因其优异的稳定性，产品质保延长到了 15 年，比市场通行的 10 年质保整整多出 50%。

日托光伏：全球首款“MWT+ 蜂巢”高效背接触组件



**产品应用：**适合于领跑者、竞价、平价、扶贫等各类项目。

**相关信息：**全球首款“MWT+ 蜂巢”高效背接触组件，将直拉单晶硅的高利用率和组件的高封装密度的矛盾通过 MWT 背接触技术完美解决。在提升效率方面，封装密度在 92% 以上，受光更多，结合主流半片、1500V 设计，组件输出功率更高，成本更低。

**上市时间：**暂未上市

日托光伏是一家专注于高端光伏电池及组件的研发、制造销售和服务的创新型企业，由国家“千人计划”专家、南京大学教授、博士生导师张凤鸣领导的博士团队于 2012 年在南京创建。公司开发了具有完全自主知识产权的新一代高效 MWT 背接触电池和组件技术，是目前全球光伏行业内首家实现该技术产品 GW 级量产的企业 (1.6GW 高效背接触电池产能 +1.4GW 高效背接触组件产能)。

日托光伏 MWT 组件具备高性价比的综合能力，产品质量和可靠性也优于常规产品，先后通过德国 TUV、英国 NQA、CQC、CGC、CEC 等权威机构认证测试。国外多个第三方 3 倍 IEC 加严标准测试，包括 HF30，DH3000 和 TC600，测试结果表明 MWT 组件功率衰减也远低于常规组件。

更低的衰减、更长的发电寿命 (30 年) 和更高的额定功率，日托光伏 MWT 组件能为客户创造更丰厚的投资回报。



# 新品发布

阳光电源推出全球功率最大的1500V 组串式逆变器—SG225HX



**产品应用:** 本品可用于复杂地形电站。

**相关信息:** 全球功率最大的的 1500 V 组串逆变器 SG225HX, 降本增效利器, 100MW 电站少投资 1200 万、降低系统 LCOE 5% 以上, 为光伏电站实现高收益保驾护航。

**上市时间:** 已上市

阳光电源股份有限公司是一家专注于太阳能、风能、储能、电动汽车等新能源电源设备的研发、生产、销售和服务的国家重点高新技术企业, 主要产品有光伏逆变器、风能变流器、储能系统、新能源汽车驱动系统、水面光伏浮体、智慧能源运维服务等, 并致力于提供全球一流的光伏电站解决方案。自 1997 年成立以来, 公司始终专注于新能源发电领域, 坚持以市场需求为导向、以技术创新作为企业发展的动力源, 培育了一支研发经验丰富、自主创新能力较强的专业研发团队; 先后承担了 20 余项国家重大科技计划项目, 主持起草了多项国家标准, 是行业内为数极少的掌握多项自主核心技术的企业之一。公司核心产品光伏逆变器先后通过 UL、TÜV、CE、Enel-GUIDA、AS4777、CEC、CSA、VDE 等多项国际权威认证与测试, 已批量销往德国、意大利、澳大利亚、美国、日本、印度等 60 多个国家。截至 2019 年上半年, 阳光电源在全球市场已累计实现逆变设备装机超 8700 万千瓦。

古瑞瓦特推出“储能储备”智能光伏逆变器



**产品应用:** 本品可应用于各类户用光伏电站。

**相关信息:** 此新产品可轻松升级为储能逆变器, 在当前储能电池较高的情况下, 可单独作为光伏并网逆变器使用, 待电池价格下降或用户有储能需求时, 接入电池即可升级为储能逆变器。

**上市时间:** 2019 年 10 月

深圳古瑞瓦特新能源股份有限公司是一家专注于研发和制造太阳能并网、离网、储能逆变器及用户侧智慧能源管理解决方案的新能源企业。太阳能并网逆变器功率覆盖 1-100kW, 离网及储能逆变器功率覆盖 1-30kW, 产品适用于户用、商用、光伏扶贫、大型地面电站及各类储能电站场景, 并已在全球广泛应用。

自 2010 年成立以来, 公司先后在德国、美国、英国、澳大利亚、泰国、印度、荷兰等 13 地设立分公司服务全球客户。古瑞瓦特始终坚持研发投入和技术创新, 并通过对太阳能逆变器核心科技的掌握、对质量管理体系的严格管控、对售后服务的不断提升, 为客户提供优质产品和服务。截止目前, 古瑞瓦特在全球 100 多个国家和地区累计出货 133 多万套, 成为中国户用逆变器第一品牌及单相及三相分布式逆变器全球第三品牌。古瑞瓦特将始终坚持技术领先、品质至上; 以人为本、以客户为中心的理念; 整合全球资源, 致力于成为全球领先的户侧智慧能源方案供应商。

锦浪 5G : 组串式逆变器全面进入 100kW+ 平价时代



**产品应用:** 本产品应用于工商业光伏电站和地面电站。

**相关信息:** 锦浪科技全新一代 5G 逆变器平台在原有基础上进行了功能升级, 把降本增效、智能维护视为光伏系统的核心价值点之一, 并紧跟时代发展, 充分利用自身 5G 平台, 以降低光伏电站度电成本, 为客户进一步带去可靠高效的先进体验为最终目标, 为构建光伏电站数字化、智慧化而不懈努力。

**上市时间:** 2019 年 9 月

此款 GCL- (80-110) K-5G 逆变器具备了高效发电、安全可靠、智能运维等一系列优势。高效发电: 最高效率可达 99.0%, 支持 1.5 倍容配比和长时间 110% 过载运行的 GCL- (80-110) K-5G 逆变器坚持采用国际知名品牌元器件, 硬桥硬马基底扎实, 同时自适应并联技术和逐波限流保护等新技术的开发应用, 在保护开关器件的同时, 有效提高了逆变器转换效率和持续功率输送的能力。安全可靠: GCL- (80-110) K-5G 内置标配可更换的交流 / 直流二级浪涌保护器, 且还为浪涌频发区域提供交流一级防雷设计; 国内首推的 AFCI 故障检测保护功能, 准确检测到拉弧故障时快速自动切断电路; 保护了逆变器免受雷击或浪涌冲击等不可避免的潜在风险, 同时可主动预防火灾事故的发生。智能运维: 锦浪 5G 技术平台还支持系统远程升级, 远程修改安规标准和并网功率控制等功能, 大部分电网端的问题均可通过后台操作实现有效维护。搭载了组串级监控和智能 IV 曲线诊断技术, 可动态追踪监测每一个组串的适配和运行情况。

# 中国光伏企业出海记

文 / 肖蓓 **PVTECHPRO**

近年来，中国光伏产业的高速发展远超预期，进一步巩固了作为全球领头羊的地位。但随之而来的隐忧也逐渐显现，近日就有媒体引用某企业高管的言论，2019年中国国内装机预计在25GW左右，这一数字与年初众机构乐观的装机预测差距较大。

对于制造端的企业来说，萎缩的内需与庞大产能之间的矛盾日渐突出，以组件为例，在目前已有上百GW产能的情况下还是无法阻挡部分企业扩产的脚步，因此出海走出去成了众多中国光伏企业不得不面对的现实问题。

海外除了传统的欧盟、美国、日本、印度等市场外，近年“一带一路”沿线也出现了许多蓬勃发展的新兴市场，如今年上半年越南就以超4GW的装机让全球侧目，可以说“一带一路”为中国企业带来了新的发展机遇。

据不完全统计，2015-2017年“一带一路”沿线国家的光伏累积安装量已从18GW提高到40.2GW，增幅为123%，整个“一带一路”沿线国家（含中国）的光伏装机量占据了全球近二分之一的需求。

业内分析机构预测2019年整个国际光伏市场容量将增长20%，其中“一带一路”国家市场将以40%-50%的速度增长，如越南、巴基斯坦、埃及等国家都将迈入“吉瓦级”市场。

## “一带一路”上，与央企、盟友肩并肩

光伏发电对产融结合、产业链合作有较高要求，对于海外复杂的形势，中国能源类央企因为先天的优势在国际工程市场上取得了不错的成绩。对于民营光伏企业来说，从降低风险的角度出发，通过与央企、金融机构、行业伙伴等合作，有助于更好地走出去。

对此，较早就已经开展海外布局的组件企业赛拉弗深有体会。

2018年，赛拉弗成为当时东欧最大地面电站的组件供应商，携手中国机械设备工程股份有限公司（CMEC）与乌克兰最大私人能源公司DTEK能源集团，解决了当地10万人的用电需求。

同年底，赛拉弗与China Power签署了五年合作伙伴关系协议，共同开发光伏项目。与此同时，赛拉弗加大了与中国电建、国机集团、中节能、中建材等央企在海外的合作。

赛拉弗光伏系统有限公司总裁李纲表示：“目前海外市场总体看处于一个稳中有升的增长态势，欧洲和东南亚是今年海外市场增长的两大亮点。欧盟市场快速复苏，保守估计市场容量会达到约20GW，拉美、澳大利亚以及‘一带一路’



图说：  
赛拉弗为越南50MW  
光伏电站项目供应  
组件

## 光伏企业

上的东南亚、非洲地区，发展势头都非常迅猛，美国市场需求在去年基础上也出现了大幅度反弹，这些区域赛拉弗都有不同布局，今年我们预计销售额会有 50% 的提升。”

李纲称，中国拥有完整的光伏产业供应链，企业的国际竞争力毋庸置疑。对于赛拉弗来说，未来的计划是进一步加大全球化布局。

他表示：“目前国际形势复杂多变，巨浪一个接着一个，除了市场全球化，我们制造也在实行全球化，这能帮助我们有效规避贸易保护措施，分散投资风险。同时，现在组件价格越来越低，相对来说运费占比大大增加了，生产全球化可以让我们更贴近客户，减小运输成本，提高市场竞争力。”

受益于全球化策略与“一带一路”新兴市场布局，近两年赛拉弗公司发展进一步提速，规划并落地了多个制造工厂。2018 年赛拉弗在南非开普省建成 300MW 常规 +200MW 半片组件厂，2019 年于中国山西增建 1G 瓦双面组件产能，接下来还将在越南、印尼建设组件生产线来扩大海外业务。

目前赛拉弗全球组件产能达到 5GW，其中国内 4250MWW，海外 750MW，电池产能 500MW。据了解，眼下赛拉弗生产产线已全部排满，优势产品叠瓦组件的生产订单接到了 2020 年。

与赛拉弗一样，在拜访中信博时，该公司的产品生产产线也异常繁忙。这家在支架及跟踪器领域处于领先地位的中国公司同样受益于早期全球化战略的布局以及近年来海外市场的增长，今年已连续三年位列“全球跟踪器和固定支架累积出货量”榜首，历史累积安装量近 19GW。

中信博营销中心总裁容岗在接受 PV-Tech 采访时表示：“中信博从 2012 年开始做国内支架，那时候中国市场还很小，所以公司开始将目光转向国际市场，记得我们首先进入的是希腊，2013 年在希腊做了 8 兆瓦，后来希腊项目开发商成为了我们 2018 年在澳洲最大的客户。”

提到这家希腊客户，容岗表示：“当再次合作时客户说了一句令我印象深刻的话，他说除了你们公司跟踪器产品做的好，和你一起工作最重要的原因是五年后你还在这里，你仍然在兑现承诺的一切，维护你的系统，对我来说一切问题都解决了。”

不同于组件产品，支架产品虽然是光伏发电的重要组成部分，但其关注度远低于组件及逆变器，为此受到的各方支持力度也更低，在开拓海外市场时面临的问题和情况更复杂，品牌认知度也低，迫于激烈的竞争，不少支架厂做着做着就消失了。

容岗说，海外市场从来都是需要靠实力积累，2013 年中信博接了一个印度的项目，当时印度市场还没正式启动，我们做的项目只有 4 兆瓦，但做的很成功，这也为 2015 年我们再次进入印度市场打下了基础，后来我们在印度供货了 800 多兆瓦的跟踪项目。

早年的海外市场实力与经验积累让中信博的出海征程日益顺利，除了传统市场，目前该公司也在“一带一路”沿线进行了深入布局，其中包括印度、越南、哈萨克斯坦等多个国家和地区。

中信博在越南市场的表现尤为令人关注，2018 年 -2019

年 6 月底，中信博先后为越南西宁省 500MW、宁顺省 258MW、61MW 和 Dak Lak 省 158MW 等 12 个项目提供超 1GW 太阳能光伏支架系统解决方案。

在出海过程中，中信博也在联合盟友走出去。近期，中信博携手东方日升一起进入了哈萨克斯坦，作为“一带一路”的首倡之地和重要支点国家，哈萨克斯坦因其优越的光照资源和广阔的市场前景，成为了光伏企业和金融机构们着力布局的海外新市场之一。

据了解，中信博已经正在为哈萨克斯坦项目供货的固定及跟踪支架共计 270MW，其中 70MW 已经顺利并网运行。

## 技术创新领衔“出海”

技术创新是推动中国光伏产品“走出去”的核心竞争力。

尤其近几年，在中国国家能源局光伏领跑者项目的持续推动下，PERC、黑硅等高效电池技术在中国得到大范围应用，N 型双面组件、异质结（HJT）组件、半片组件等领先技术正不断走向成熟化，进而推动了中国优秀高质高效组件走向海外，引领了全球光伏制造产业的发展。

在这一波由领跑者引起的技术浪潮中，日托光伏“MWT”高效背接触组件以创新设计与优异的性能获得了极大发展与关注。

对于组件产品结构，日托光伏摒弃传统组件焊带设计，改由导电背板互连电池片，有效避免焊接应力及由此导致的隐裂，增强产品的可靠性。同时更薄、更大硅片的使用，使得 MWT 组件的成本进一步降低，带来更低的度电成本。

日托光伏总裁张凤鸣博士表示：“MWT 技术是一个技术平台，可以叠加黑硅、PERC 和 HJT 等，可兼容的技术非常多。虽然现在行业有多种技术，但我们可以看到一个越来越明显的趋势，就是电池和组件的结构走向背接触，这是大势所趋。”

在国内市场取得广泛认可的同时，日托光伏推行一体“2”翼策略，加大了对国际市场的布局。

2019 年上半年，日托光伏“MWT+”平台技术分别亮相中东、荷兰及德国重要展会，向国际市场展示其标杆系列全黑组件、全球首款柔性高效背接触组件、低载荷轻质组件、双玻组件等一系列新品，惊艳了当地市场。

应用创新技术的日托光伏组件以美观漂亮著称，可以融合多种图案、花纹的设计，这使得原本单一的组件变得更有观赏价值，同时具备超薄厚度、超轻重量、安装便捷等优势，大大扩展了产品应用空间。

“新推出的蜂巢组件也在同步推向海外市场，后面日托还会有更多创新的产品出来。基于这些创新产品，现在我们除了现有传统市场，还在尝试多元化应用，比如 BIPV 光伏建筑一体化等新的应用市场，这些市场发展潜力很大。”张凤鸣博士说到。

据了解，日托光伏的 MWT 技术拥有完全自主知识产权，这对于注重专利及知识产权的海外市场来说，具有很大的优势。作为全球首家实现 GW 级 MWT 技术大规模量产的公司，目前，日托光伏高效背接触组件产品已销往德国、法国、荷兰、瑞士、日本、东南亚、澳洲、巴西等数十个国家和地区。

## 品牌溢价优势渐显

中国光伏公司开拓海外市场的征途中，逆变器公司也是绝对的主角。

2018 年度中国光伏逆变器出口数据显示，中国逆变器出口额约为 18.2 亿美元（含光伏、风电、汽车电源等）。其中，光伏逆变器前 30 强企业占比为 46.49%。2018 出口额数据前三甲中，来自中国宁波的锦浪科技位列第三。

9 月 9 日，锦浪科技迎来了公司十四周年纪念日。在大多数行业，企业的生命周期长短可以代表很多事情。这对逆变器行业来说也相当重要，过去的 15 年里，有很多逆变器公司离开了这个市场，这也意味着锦浪这家公司及产品是值得信任的。

2019 年，锦浪科技正式登陆了深交所 A 股上市，这对于近五年几乎没有组件和逆变器厂家能在国内 A 股独立上市的光伏行业，特别是自 2018 年中国 531 光伏政策后处于低谷时期的行业来说，显得尤为难得。

锦浪科技董事长王一鸣表示：“我们在全球范围内保持了良好的平衡，除了中国，我们还有欧洲、美国、印度、澳大利亚、拉丁美洲五个不同的市场，所以即使在去年国内市场非常困难的一年，我们仍保持增长，这使得我们能够成功登陆资本市场。明年我们还将增加东南亚的出货，这些地区都是我们快速增长的市场。”

对于逆变器产品而言，除了出货，售后服务也是很重要一块，且正在变得越来越重要。逆变器的复杂性意味着在评估可融资性时，必须考虑本地支持方案。

过去几年不少逆变器公司被淘汰出局，把很多售后、保修、维护等问题留给了市场、安装商，这使得国际市场对逆

变器产品的品牌愈加看重。海外项目对于逆变器的可融资性一直以来都是逆变器品牌的关键性指标之一，彭博新能源财经最近首次公布了对逆变器可融资性价值的调研报告，锦浪科技荣列亚洲前三品牌价值。

“客户购买我们的锦浪 Solis 产品，他们期望得到对应的回报，所以我们不仅要保证产品的可靠性，还要保证公司的可靠性。我们为不同的市场投资，对各个国家、区域市场进行优化，同时提供服务支持营销，为他们提供一切。”王一鸣说。

为了进一步扩充产能满足市场需求，锦浪科技开始了第二制造中心的规划和建设，新制造中心离目前的全球第一生产基地只有 500 米距离，但面积是现有工厂的 3 倍，料想产能超过 15GW，预计在 2020 年建成后锦浪科技将拥有 20GW 的产能。

不仅逆变器公司，组件、支架厂商也感受到了市场对品牌倾斜的趋势，李纲表示：“市场已经一点一点的改变了，不像刚开始的时候，人们只关心价格。比如说早年很多低质量、没有品牌的组件销往澳洲，市场都能接受。现在，市场会从原材料采购环节开始，关注组件制造的全过程，关注产品质量和效率，并制定了更严格的新标准，很多低质量的小公司正在被赶出市场。”

容岗亦赞同这一观点，他表示：“中信博的产品海外出货量大但不做价格竞争，在海外市场有时我们也会遇到价格的问题，比如一些招标项目，其他公司的价格比我们低，但很多客户仍然选择我们，因为我们提供的是有价值的东西。如果一家公司只一味的看重价格，而忽视了产品的质量与价值，我认为这只是舍本逐末。”



图说：  
锦浪科技为新加坡  
光伏项目供应逆变器

**第十四届(2020)国际太阳能光伏与智慧能源(上海)展览会暨论坛**  
SNEC 14th (2020) International Photovoltaic Power Generation and Smart Energy Exhibition & Conference

**2020** | **5月25-27日**  
**中国·上海**

上海新国际博览中心 (上海市浦东新区龙阳路 2345 号)  
Shanghai New International Expo Center  
(2345 Longyang Road, Pudong District, Shanghai, China)



SNEC 网站

◎主办单位：亚洲光伏产业协会 / 上海新能源行业协会

◎承办单位：上海伏勒密展览服务有限公司

地址：上海市徐汇区宜山路425号光启城办公楼905-907室 邮编：200235

电话：+86-21-33685117 / 33683167

◎For exhibition: [info@snec.org.cn](mailto:info@snec.org.cn) For conference: [office@snec.org.cn](mailto:office@snec.org.cn)

# 异质结技术： 通往高效组件大规模生产之路

文 / Igor Shakhray, Alexey Abramov, Sergey Abolmasov, Ekaterina Terukova & Dmitriy Andronikov, Hevel Group, Moscow, Russia

## 摘要

异质结技术是目前硅光伏行业积极讨论的热门话题。Hevel 最近成为首批采用其旧的微晶组件生产线用于生产高效硅异质结 (SHJ) 太阳能电池和组件的公司之一。根据 Hevel 自身的经验, 本文将介绍从硅片制绒到最终组件封装的所有生产步骤。

## 引文

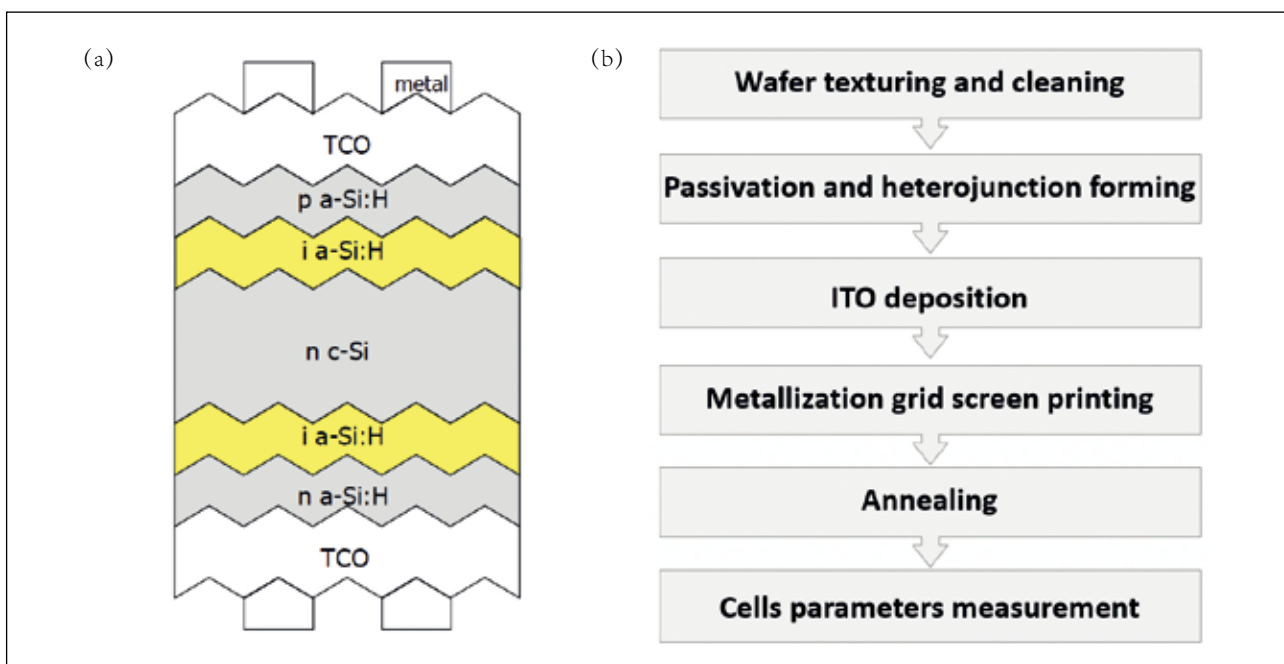
近年来, 硅光伏产业中的许多太阳能电池和组件生产商被迫升级现有生产线使其适应新技术的生产, 从而能够向市场提供高效和低成本组件。最常见的升级改造是从 Al 背面场 (Al-BSF) 到钝化发射机和背电池 (PERC) 技术, 因为后者能与用于标准技术的现有生产线兼容。不过, 依靠氢化非晶硅 (a-Si:H) 实现优异的晶体硅 (c-Si) 表面钝化性将使得将硅薄膜生产线上成本最高的部分一称为等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 系统用在硅异质结 (SHJ) 技

术上成为可能, 并且最近已经由 Hevel LLC 实现。

SHJ 太阳能电池的简单结构, 结合其高效率 and 低温处理的优势, 使它们对光伏产业非常有吸引力。这就是为什么 Hevel 已决定将其非晶硅 / 微晶硅生产线 (其中包括了大量的 PECVD 系统 (从 TEL 太阳能 KAI-MT PECVD 反应器)) 进行现代化改造, 并使之成为一条新的 SHJ 产线。Hevel 是在 2017 年 4 月份使用由其公司内部薄膜技术研发中心 (TFTE—Hevel 一个研发部门) 开发的 SHJ 太阳能电池技术成功实现向 SHJ 太阳能电池和组件生产线转型的。

在该转型项目的第一阶段, 年产能从最初的 97MW<sub>p</sub> (非晶硅 / 微晶硅生产线) 增加到 160MW<sub>p</sub>, 大规模生产 SHJ 电池的平均效率为 21%。Hevel 选择 Meyer Burger 的 SmartWire 电池技术 (SWCT) 用于 SHJ 组件封装的互连。在项目的第二阶段 (2017 年 6 月至 2019 年 5 月), Hevel 生产线的生产能力增加到了 260MW<sub>p</sub>, 大规模生产的平均电池效率为 22.8%。

“SHJ 太阳能电池的简单结构, 结合其高效率 and 低温处理的优势, 使它们对光伏产业非常有吸引力”



图一: (a) 传统 SHJ 太阳能电池的剖面结构图。(b) SHJ 电池的主要制造工艺步骤。

# LOCTITE



## 为了新一代太阳能电池技术 信赖您的粘合剂技术专家

无论是薄型硅片、异质结和叠瓦电池，还是高密度组件，都需要用到汉高的粘合剂专业知识。在过去六十年里，我们不断研发出业界领先的导电胶 (ECAs) 产品。



汉高专为太阳能行业研发的导电胶 (ECA)：

- 最大化电池效率—避免电池遭受热损伤
- 优化CTM损失—降低电池片封装损失，提升组件效率
- 提升产品良率—避免电池翘曲、电池串对位问题并优化工艺窗口
- 提升整体可靠性—避免焊点开裂和低温焊点疲劳
- 延长组件寿命—确保在整个工作寿命期间，组件拥有优秀的功率衰退表现
- 降低生产成本—适用于无主栅电池，可减少40%银材料消耗
- 可拓展性—工程服务帮助客户依照生产规模选择最合适的设计
- 快速投入市场—LOCTITE与设备商协同设计，保障客户最终生产目标的达成
- 值得信赖的合作伙伴—汉高ECA技术引领太阳能GW级市场。目前保持零户外失效记录。



了解更多信息，请拨打1-888-943-6535，或扫描二维码或访问我们的网站[henkel-adhesives.com/electronics](http://henkel-adhesives.com/electronics)

本文所有所用商标皆为汉高及其美国、德国及其他地区分公司的商标或注册商標。©2019汉高公司。版权所有。(08/19)



电池组件

技术开发

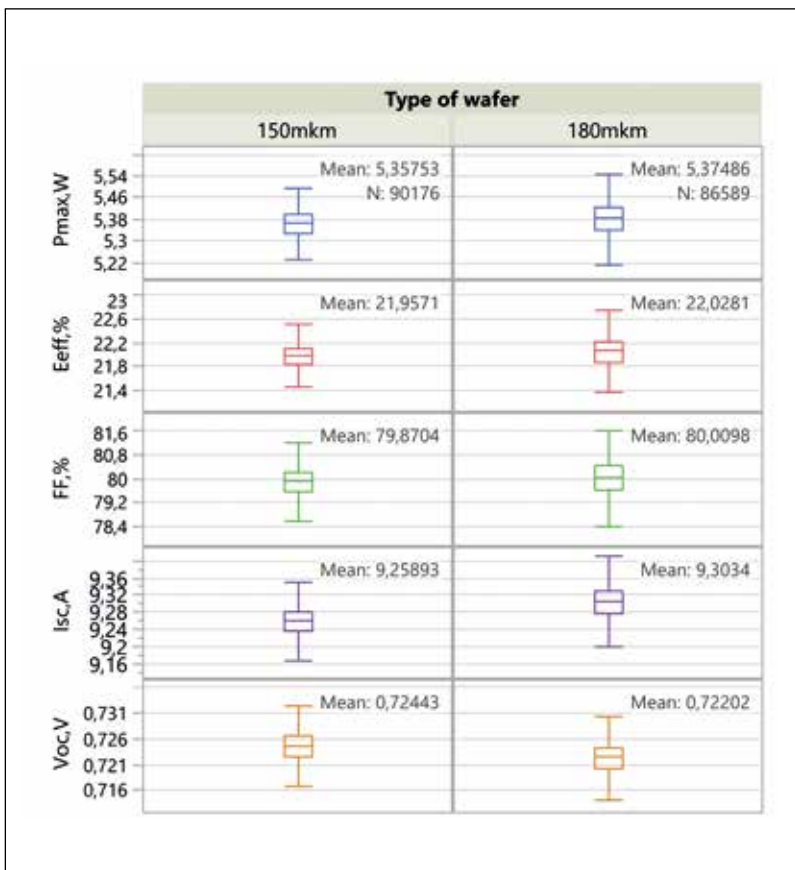
从图 1 中可以看到，SHJ 电池的结构非常简单，并且仅需要 6 道工艺制造步骤。通常，SHJ 电池由 n 型 c-Si 硅片制成，该硅片在两侧涂覆有薄的本征和掺杂的 a-Si:H 层。厚度只有几纳米的超薄本征 a-Si:H 层对 SHJ 电池的性能有着至关重要的影响。这些层的作用是通过化学钝化 c-Si 硅片表面上的悬空键以形成 Si-Si 和 Si-H 键来抑制表面复合的，以及防止在沉积掺杂层期间由掺杂剂原子产生缺陷。掺杂的层完全被氧化铟锡 (ITO) 膜覆盖，然后使用低温导电 (LTC) Ag 浆料丝网印刷接触金属栅格以进行电流收集。为了增强 ITO 层和接触栅格的性能，需要进行一次低温退火。

用于 SHJ 电池的硅片

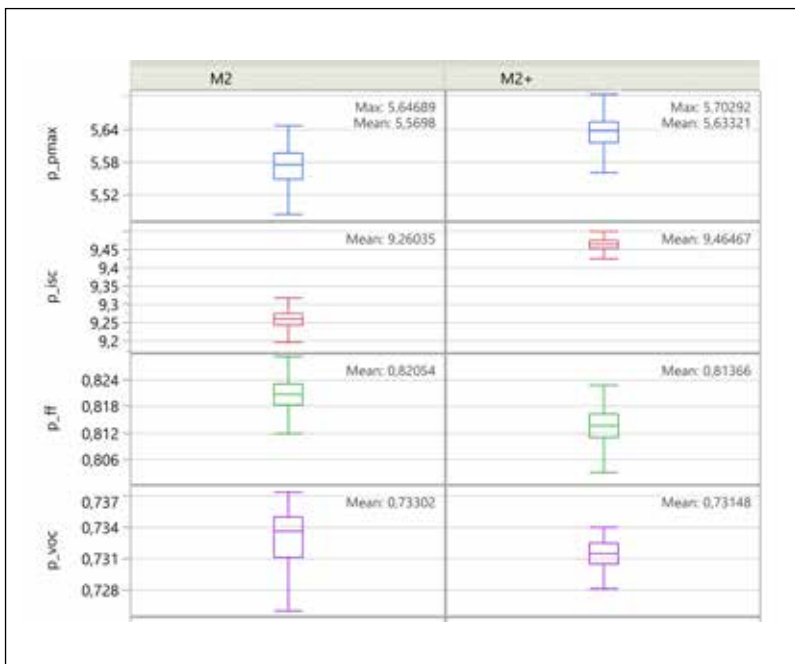
与所有高性能 c-Si 太阳能电池的情况一样，硅片质量是实现高效 SHJ 电池的关键。虽然文献中报道的记录效率值是使用高纯度浮区 (FZ) c-Si 硅片制造的，但 Czochralski 工艺的发展和多晶硅质量的不断提高使得在不大幅提高成本的情况下有效降低 CZ 硅片中的杂质浓度。结果，最近 SHJ 电池的开路电压 (Voc) 值达到了 750mV。

到目前为止，只有单晶 CZ 硅片已被用于 SHJ 太阳能电池的大规模制造。用于高效太阳能电池的单晶硅片的电学特性由杂质和掺杂剂浓度决定。由于这些参数的测量需要使用在大规模生产过程中难以应用的特殊技术，因此在实际生产中通常测量少数载流子寿命和硅片电阻，并成为检测硅片或硅锭质量的主要参数。这些参数通常沿着硅锭和硅锭之间变化，它们的变化曲线取决于硅锭生长过程和后处理的细节。因此，已经提出使用测量的寿命 / 电阻比值作为硅片和异质结质量的累积表征值。最近的研究还表明，对于 Voc > 750mV 的 SHJ 电池必须使用寿命—电阻率大于 4ms / Ωcm 的钝化硅片。

SHJ 技术在降低成本方面最显著的优势是所有工艺步骤均在低温 (<250℃) 下进行，这有利于在 SHJ 太阳能电池生产中使用薄片。金刚石线锯技术的应用使得硅片切片技术不断进步，目前可以实现厚度小于 160 μm 的低成本硅片的大规模生产。最近在 SHJ 生产过程中甚至成功实现了切割厚度为 150 μm 的硅片，同时不增加组件功率



图二：硅片厚度为 150μm 时的结果。



图三：大面积硅片 (M2+) 的性能表现。



## 电池组件

损耗，如图 2 所示。虽然 SHJ 电池厚度的进一步减小也可能不会导致效率的大幅损失，但要实现薄硅片的大规模生产目前还是受到了操作过程的限制，例如操作不当会导致硅片破损率过高。

当电池生产将切割硅片厚度降到  $150\ \mu\text{m}$  时， $I_{sc}$  的轻微下降可由  $V_{oc}$  增益部分地补偿回来，从而使效率损失控制在非常小的程度 ( $<0.1\%$ )。在组件层面，电池效率的损失可以通过电池—组件 (CTM) 比率降低  $10\%$  完全补偿回来。硅片厚度降低到  $150\ \mu\text{m}$  带来的总体平均收益使每块组件功率提升  $1-1.5\text{W}$ 。

最近一次对硅片的更新是在 2019 年 5 月进行的。现有的 SHJ 生产线能够适用于尺寸为  $157.35\text{mm} \times 157.35\text{mm}$  (M2 + 硅片) 的硅片生产。基于这种硅片进行电极接触网格的优化设计可以使每片电池功率增加  $0.15\text{W}$  (图 3)。Hevel 研发中心目前还使用 M4 和 M6 硅片以及氧浓度更低的硅片和全方形硅片进行进一步开发。

### 硅片制绒和清洁

与其他 c-Si 光伏技术一样，SHJ 电池生产流程的第一步是湿化学处理。通常包含以下步骤：

- 蚀刻硅片的高缺陷表面部分 (表面损伤蚀刻—SDE)。
- 形成特殊的表面形貌 (制绒)，减少硅片表面 (TEX) 的光反射。

- 清洁硅片表面以去除有机和金属杂质。

### “生产高效 SHJ 电池需要强化清洁程序”

虽然基于各向同性 (SDE) 和各向异性 (TEX) 碱性蚀刻的前两个步骤与其他硅光伏技术中的相似，但最后一步却有较大差异。为了获得高质量的表面钝化，硅片表面应该保持格外干净。因此，生产高效 SHJ 电池需要强化清洁程序；这包括从 c-Si 硅片表面去除残留的有机、离子和金属污染物 (源自湿法蚀刻 / 制绒溶液)。此外，在每次化学处理之间使用重去离子 (DI) 水冲洗步骤。湿化学处理以短暂的 HF 浸渍结束，目的是在 a-Si:H PECVD 工艺之前去除原生氧化物并用氢原子钝化 c-Si 表面。

Hevel 一直致力于稳定和优化硅片制绒和清洁工艺。其中一项优化步骤是向单组分制绒添加剂转变；这有助于增加寿命并减少化学试剂的消耗。

### 表面钝化和结形成

高质量的表面钝化是提升高效硅基太阳能电池  $V_{oc}$  值的关键。而在 c-Si 硅片和掺杂的 a-Si:H 层之间插入薄的 ( $<10\text{nm}$ ) 氢化非晶硅 (a-Si:H) 层可以有效提升  $V_{oc}$  值。在过去的二十年中，许多研究团队已经大大改善了 SHJ 电池的表面钝化，使  $V_{oc}$  值接近  $750\text{mV}$ ；这一结果已经接近理论极限 ( $760\text{mV}$ )，足以显示该技术的特殊吸引力。

通常，a-Si:H / c-Si 界面应该控制在原子级厚度，这是

VON ARDENNE

GWATT

XEA|nova<sup>®</sup> L  
≤ 10 000片/小时

面向未来的镀膜设备  
用最少的千兆瓦资本支出提供最高的性能

您是否正在寻找用于生产硅基异质结太阳能电池并且成本较低的TCO镀膜设备。我们可以为您提供针对各种生产规模的面向未来、高吞吐量的系统解决方案和技术。我们成熟的XEA|nova<sup>®</sup>设备平台也可以用于IBC或钝化接触等技术。

www.vonardenne.biz

更多的相关信息，请参观我们在PV CELLTECH 2020的展位。

电池组件

保证良好表面钝化的必要条件，这意味着避免了硅外延生长，即没有形成结晶材料。这可以通过在沉积过程中适当调整 a-Si:H 膜性质来实现。实际上，a-Si:H 层通常是采用 PECVD 方法在接近 200°C 温度下的纯硅烷或硅烷-氢混合物中的平行板电容耦合等离子体放电进行生长的。表面钝化的最关键工艺参数似乎是氢-硅烷气体流量比和 RF 功率密度，而气体压力可能影响膜厚均匀性。

掺杂层的性质也会对电池性能产生很大影响：例如，适当调整 n 层的厚度和掺杂分布可以使电池效率增加 0.5%，而调整 p 层的收益约为 0.1%。

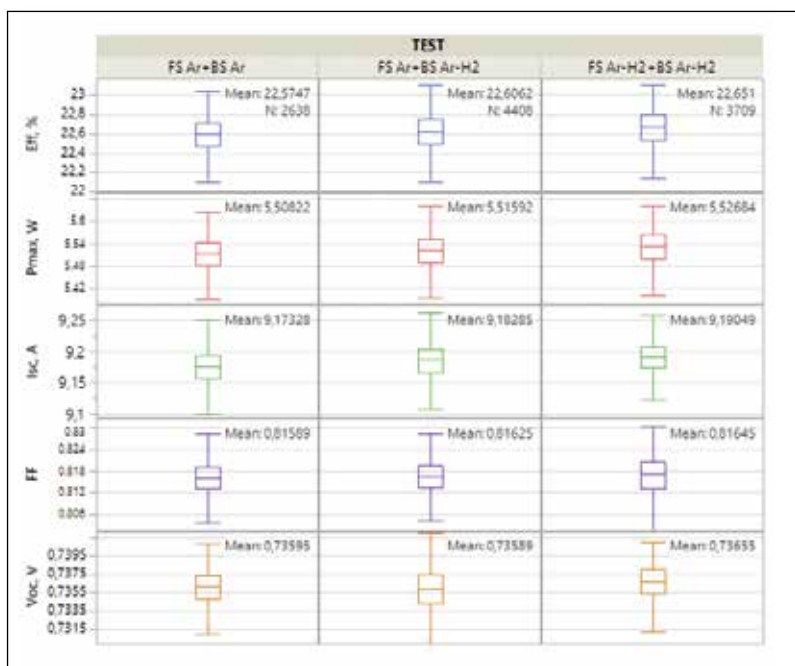
“提高背面 ITO 层透明度并减薄厚度可以提高电池效率，这是因为能够更好利用 IR 部分光谱的光线”

透明导电氧化物

ITO 层通常在 SHJ 电池中用作透明导电氧化物层，对其特性进行优化非常关键，特别是对于双面 HJT 太阳能电池。在 Hevel 的研发中心进行了对 ITO 溅射磁控管靶的各种化学计量含量的研究。发现提高背面 ITO 层透明度并减薄厚度可以提高电池效率，这是因为能够更好利用 IR 部分光谱的光线。这一改进可以使组件功率增加 3.7W，因为 CTM 损失较低，并且能够降低电池生产成本，因为 90:10 的 ITO 目标比标准的 97:3 ITO 目标便宜约 6%。2018 年第一季度 Hevel 的生产线上第一次采用了优化的 ITO 配比。

用于 ITO 层优化的另一种方法是在磁控溅射期间添加 Ar/H<sub>2</sub> 混合物（图 4）；这种方法可以使每片电池的功率增加 20mW。此外，目前还在试验许多其他具有更高霍尔迁移率的磁控靶材。其中一些靶材料已经在 Hevel 的研发中心进行了测试，并得到了令人鼓舞的结果，这些结果也在实际产线的进一步测试中得到证明。

为了尽可能降低电池生产成本，现在正在考虑使用称为狗骨靶材的新材料。这种靶材可以降低靶材消耗，从而进一步降低电池生产成本。我们已经做了一些额外的改进工作，其中包括对物理气相沉积（PVD）托盘进行优化，同时修改接触电极网格的设计以尽可能降低非有效区域造



图四：通过在磁控溅射期间添加 Ar/H<sub>2</sub> 混合气体对 ITO 层的优化结果。

	Standard BOM	Optimized BOM and cell
Pmax[W]	304	328
Vpmax[V]	34.72	36.66
Ipmax[A]	8.76	8.94
Isc[A]	9.4	9.42
Voc[V]	43.34	43.94
FF[%]	74.6	79.3

表一：罗列了标准和优化 BOM 后的 I-V 特性结果平均生产值，包括电池功率的优化。



图五：Hevel 的产线。



图六：Hevel 产线的视觉检查站

成的损失。采用上述电池进行封装的组件实现了 1.8W 的平均功率提升。

## 金属化

与传统的同质结 c-Si 太阳能电池相比，制造 SHJ 太阳能电池的工艺要求具有几个优点。第一个优点是异质结形成期间的低热预算；a-Si:H 和 ITO 层的沉积温度通常低于 250℃。其次，对于 SHJ 电池，形成 a-Si:H/c-Si 结和接触层所需的时间也比基于热扩散工艺的常规 c-Si 太阳能电池短。第三，SHJ 太阳能电池的低工艺温度和对称结构，抑制了硅片翘曲。

然而，使用低温工艺也存在弊端，主要是标准的烧穿金属化技术（烧制温度在 800-900℃ 范围内）不能用于 SHJ 电池。这是因为 a-Si / c-Si 异质结不能承受高于 200-250℃ 的工艺温度，此时来自异质结内表面的氢气渗出会对电池性能产生不利影响。由于这个原因，通过丝网印刷对 SHJ 电池进行金属化时需要使用低固化温度（LCT）银浆，这是目前用于金属栅格沉积的最先进技术。

## 电池互连和组件封装

互连工艺是整个 SHJ 电池工艺链的瓶颈：用于传统 c-Si 电池互连的焊接工艺与 LTC Ag 焊膏不兼容，而后者是因为 a-Si / c-Si 异质结的温度限制才被用于替代标准烧穿银浆材料的。低温型浆料的体电阻率较高（是高温浆料的 2 至 3 倍）

和焊接后粘附性也较低。通常，低于 1N/mm 的力都能使 Ag 主栅从 ITO 表面剥离。

为了克服这一限制，已经提出了新的电池互连技术，例如使用导电粘合剂（ECA）粘合带，或者使用嵌入式 InSn 涂层电线的箔带实现低温粘黏来进行多线互连（Meyer Burger 的 SmartWire 连接技术）—SWCT。熔点约 120℃ 的 InSn 合金对 Ag 浆料和 ITO 层本身具有良好的粘合性；因此，在加热处理之后实现导线和电池表面之间的合金接触。SWCT 技术不需要连接带与金属化网格之间的定位非常准确，而这是多线技术的主要挑战之一。在 SWCT 中将电池初始连接到电线上，不需要将电线精确焊接到焊盘上，并且通常通过含有粘合剂层的箔来完成，这允许使用大量（最多 24 个）相对较细的直径为 200-250 μm 的电线。

“电池生产的总体改进（更高的 FF，导致更低的 CTM）和 Hevel 生产线上的组件封装使得 2017 年第四季度至 2019 年第二季度的平均功率从 300W 增加到 318W。”

通过优化 SWCT 组件材料清单（BOM）—即通过调整层压箔的光学特性和电线的电气特性—Hevel 实现了将 60 片电池组件功率比标准 BOM 提高 9W，并且不增加材料成本（见表 1）。

## 电池组件

电池生产的总体改进（更高的 FF，导致更低的 CTM）和 Hevel 生产线上的组件封装使得 2017 年第四季度至 2019 年第二季度的平均功率从 300W 增加到 318W。

2019 年 6 月，Hevel 开始使用胶合五主栅电池建立了一条新的双玻组件封装线。计划于 2019 年 7 月全面启动。新的双玻组件将提升额外的产能，因为它们可以为发电厂提升高达 30% 的额外组件功率。

Hevel 新装配线的另一个优点是采用特殊的陷光带（LCR）；它能够扩散反射光，可以使组件效率提高 4%（根据生产商数据）。因此，下一代 Hevel 组件具有更高的效率以及更高的耐用性和稳定性，这是玻璃—玻璃结构带来的结果，同时可以降低组件衰减。

## 总结

在破纪录项目计划里，Hevel 将其子公司研发中心 TFTE 开发的工艺使其低产能（97MWp）非微晶组件生产线提升为中等产能生产线（260MWp），并用于生产高效 SHJ 电池 / 组件（图 5 和图 6）。在关闭薄膜生产线后不到两年的时间内，平均电池效率达到了 22.8%（最高效率超过 23.5%），使大规模平均 60 片组件功率提升到 318W（最大组件功率甚至达到 328W）。

## 致谢

作者希望感谢他们的设备供应商对 Hevel 生产线设备给予的支持，以及 Skolkovo 基金会对使用其实验室设备的资助。

## 关于作者



Igor Shakhray 自 2015 年起担任 Hevel Group 的首席执行官。他曾在伊尔库茨克州经济学院学习经济学，并获得了 RANEPa 的资产管理 MBA 学位。在他的领导下，Hevel 太阳能组件生产线的商业运营于 2015 年启动并投入满负荷生产，2017 年薄膜硅片生产线转为异质结技术。

自 2010 年以来，Alexey Abramov 博士一直担任 Hevel 研发中心 TFTE 的太阳能部门主管。1993 年，他在俄罗斯圣彼得堡国立理工大学获得量子电子学硕士学位，随后 2001 年在圣彼得堡 Ras a.f. Ioffe 物理技术学院获得半导体物理学博士学位。2001 年至 2010 年在圣彼得堡 AF Ioffe 物理技术研究所 RAS 进行半导体物理学研究。他于 2004 年至 2010 年在巴黎 CNRS 和 École Polytechnique 工作，担任非晶和纳米晶薄膜半导体及其在光伏和大面积电子产品领域应用的研究员。

Sergey Abolmasov 博士自 2013 年起担任 Hevel 研发中心 TFTE 的高级工艺工程师，专注于薄膜硅和硅异质结太阳能电池的开发。2003 年他获得日本福冈九州大学等离子体物理学博士学位。2003 年至 2010 年，他在日本京都和东北大学以及韩国三星 SDI 有限公司担任等离子体技术领域的研究员。从 2010 年到 2013 年，他在法国 Ecole Polytechnique 的 CNRS 工作，研究非晶 / 微晶硅太阳能电池。

Ekaterina Terukova 博士自 2011 年起在 Hevel 的研发中心 TFTE 工作，目前是太阳能部门的团队负责人。她曾在俄罗斯圣彼得堡理工大学学习材料科学。她的研究兴趣包括太阳能电池制造材料和太阳能组件封装。她的主要工作是为 Hevel 的生产线导入新材料和工艺。

Dmitriy Andronikov 博士是 Hevel 研发中心 TFTE 的首席工艺工程师。2013 年，他获得俄罗斯圣彼得堡州立大学凝聚态物理博士学位。他于 2013 年至 2011 年在俄罗斯圣彼得堡的 Ioffe 物理技术研究所担任研究员，从事非晶硅沉积研究工作。自 2011 年以来，他一直在 Hevel 研发中心工作，最初担任高级工艺工程师，随后担任首席工艺工程师，主要专注于硅异质结太阳能电池的 PECVD 工艺和光伏组件封装技术开发。

## 垂询

Hevel Group  
Profsoyuznaya Str., 65 bld. 1  
117342, Moscow, Russia  
Tel: +7 (495) 933 06 03  
Email: a.berdnikova@hevelsolar.com  
overseas@hevelsolar.com  
Website: www.hevelsolar.com/en



# ENERGY TAIWAN

## 台灣國際智慧能源週



台北南港展覽館1館

Taipei Nangang Exhibition Center, Hall 1

14-16 OCT  
2020

- PV Taiwan**  
台灣國際太陽光電展
- Wind Energy Taiwan**  
台灣國際風力能源展
- HFC Taiwan**  
台灣國際氫能與燃料電池展
- Smart Storage Taiwan**  
台灣國際智慧儲能應用展

Organizers:



ENERGY TAIWAN



# 隆基 M6 硅片风云： 超前十年提升全行业组件功率

文 / 肖蓓 

2018 年以来，行业关于硅片尺寸的争议不断，进入 2019 年，各家倡议的硅片尺寸逐渐从 M2 标准尺寸走向多样化，市面上出现了 156.75mm、157.0 mm、157.75mm、158.75mm、161.7mm、166mm 等不同尺寸的硅片。

新尺寸的出现打破了此前的市场平衡，沉寂五年的硅片江湖再起变化。

2019 年 6 月，隆基股份推出 M6(166mm) 大硅片产品，并同时发布大硅片组件 Hi-MO4，以期推动行业应用新一代更好、更优化的标准尺寸，正式拉开了光伏行业走向 166 时代的序幕。

这将是一场贯穿整个光伏产业链，自上游硅片到电池、组件，再到电站终端应用的变革。

隆基股份总裁李振国表示：“硅片尺寸变化主要缘于市场竞争越来越激烈，一些企业因为转换效率进步速度受限，开始在尺寸上进行设计。我们认为如果每个厂家在尺寸的定义上都不一致，反而会制约行业的健康发展。”

这让人想起五年前几家公司联手统一硅片尺寸标准的往事。

2013 年以前，全球单晶硅片规格处于庞杂混乱的局面，不同硅片尺寸阻碍了产业链上下游的配合，给整个供应链带来了困扰。

2013 年 12 月，隆基联合业内五家中国单晶硅片企业共同发布了 (M1)156.75 x 156.75 P 型单晶硅片 (205mm 直径) 和 ((M2)156.75 x 156.75 P 型单晶硅片 (210mm 直径) 的标准，在全球光伏业造成轰动。

标准发布后，硅片尺寸的统一化进程延续了六个季度，李振国回忆道：“标准发布后反应最快的是韩国企业，之后是国内企业，中间也有受到德国和日本企业的质疑，但最终在 2015 年二季度末，全球形成了单晶硅片尺寸的标准统一，并于 2017 年 8 月收录至 CMI 国际标准名录。”

当时，在不增加 60 片电池组件整体尺寸的前提下，M2 硅片将组件功率提升 5W<sub>p</sub> 以上，显著提高了每瓦竞争成本，从而迅速成为主流并将这种状态保持了数年之久。

如今，五年过去，行业发展速度远超预期，在此背景下的 M6 又将开创什么样的局面？

## 阶段性极限，短期无法超越的 166 时代

这一次，隆基将硅片尺寸标准定在 166mm，并公布了 M6 单晶硅片价格，以 3.47 元 / 片开售，向外界传达了力推 M6 的意愿。

就产线兼容性、市场需求和产品可靠性而言，大硅片是 2019 年主要的发展路线之一，在这一技术变革中，关键点是对硅片尺寸的把握。

李振国表示：“我们考虑了多维度的对尺寸进行设计，比如演变出来的组件的变化，又演变出对玻璃的变化。包括国内 100 多 GW 的老旧电池生产线，这种生产线如果尺寸变化之后它的兼容性等，在深入研究后，我们得到了一个尺寸—166mm。”

在各方看来，隆基 166 mm 尺寸的确立以及其大刀阔斧的推行，让这家公司又一次走在了行业的前面。

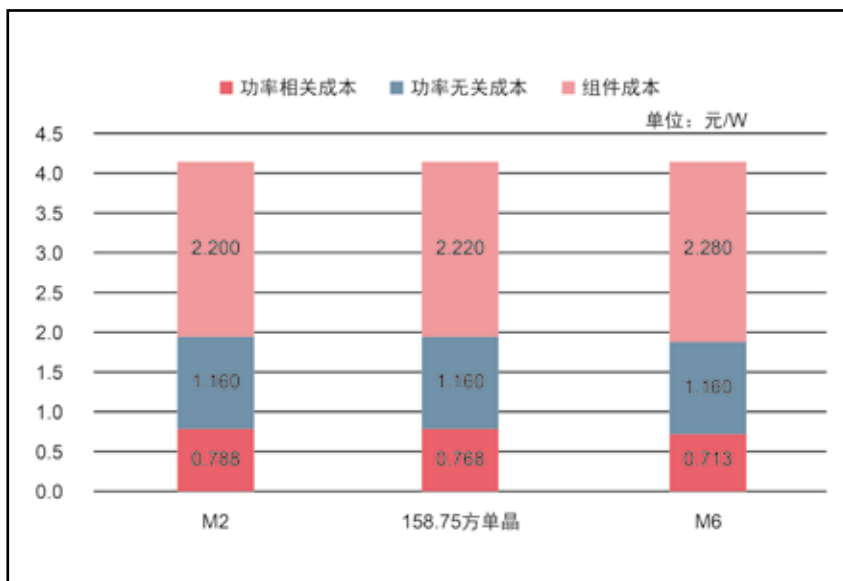


图 1、电站分别使用 M2/158.75/M6 三种硅片组件时的系统成本拆分 (元/W)，资料来源：中信建投证券研究发展部

## 电池组件

“M6 硅片已经达到部分设备允许尺寸的极限，再要继续增大硅片尺寸就需要重新购置部分设备，但这样做会使得增大尺寸带来的成本下降被新购设备带来的成本上升所抵消。增大硅片尺寸的限制在于现有设备的兼容性，通过梳理拉棒切片、电池、组件三个环节用到的主要生产设备，现有主流设备可以兼容 M6 硅片，但这一规格已基本达到现有设备允许的尺寸上限。”上海交通大学太阳能研究所所长沈文忠说到。

也就是说，短时间内硅片尺寸标准难以再提高，M6 将在相当长的一段时间内成为标准上限。

根据隆基的硅片产能规划，单晶硅棒 / 硅片产能 2019 年底达到 36GW，2020 年底达到 50GW，2021 年底达到 65GW，届时 M6 也将随庞大产能释放。

目前隆基公司在全力改造现有电池片、组件产线，而银川 5GW 单晶电池产线直接设计的是适用于 166mm 尺寸。

隆基乐叶董事长助理王英歌表示：“Hi-MO 4 组件将在今年三季度开始规模供货，到 2020 年底，隆基的电池、组件大部分产能都将切换成 166mm 尺寸。”

隆基 M6 硅片及 Hi-MO 4 组件产品同时受到了第三方分析机构的关注，中信建投证券研究发展部电力设备与新能源首席分析师王革在其报告中分析了当前行业使用大硅片的驱动力，他表示：“在电站建设中，使用大硅片高功率组件可以减少支架、汇流箱、电缆等成本，从而摊薄单瓦系统成本，为组件带来溢价；在制造端，大硅片本身可以摊薄硅片、电池、组件生产环节的非硅成本，从而直接增厚各环节利润。”

他指出，在组件售价端 158.75 方单晶可溢价 2 分钱，M6 可溢价 8 分钱。在硅片、电池、组件总成本方面，158.75 方单晶可降低 2 分钱，M6 可降低 5 分钱。

## 超前十年提升行业整体组件功率

2019 年，光伏发电在全球多个国家及地区相继进入了平价时代，中国也来到了光伏平价临界点，行业对度电成本、发电收益的考量远甚于前，电站投资商无一不以 LCOE 为目标进行发电设备选型。

相对制造端对大尺寸的纠结，电站系统端更多的是乐见其成。出于平价压力，电站终端市场对组件提出了 400Wp 以上更高功率输出的需求。

河北能源工程设计院在大庆、包头、武汉团风、梅州四个城市对 425Wp、390Wp、330Wp、280Wp 组件进行的实测数据显示，使用 M6 单晶硅片的 425Wp 组件比使用 G1 硅片的 390Wp 组件带来的 BOS 成本低 8 分钱 / 瓦，425Wp 组件不论在支架基础安装、直流电缆差价等方面都占有优势。

对组件面积增加引起重量和成本增加的问题，中信博新能源 CTO 王士涛表示：“组件虽然变大了，对支架成本有一定增加，比如载荷增加，组件固定檩条、主轴、立柱成本增加，但它不是线性的。控制计传动成本基本不变，随着组件功率增加 25% 以上，跟踪系统单位装机成本大约下降 15%，同时兼容现有风洞等测试。

查看 M6 组件规格书，对应的 1500V，1000V 组串组件数量几乎无变化，使得跟踪器价格有较大幅度单位成本的下降。”

特变电工从 2012 年开始一直使用

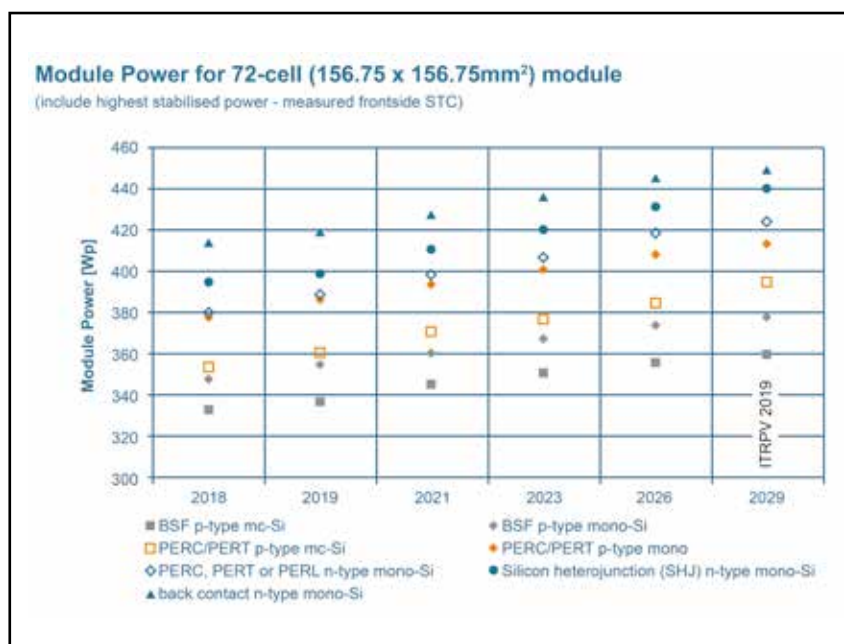


图 2：不同 c-Si 156.75 (72 片) 电池组件功率预测曲线，来源：ITRPV

72 片大组件，该公司对 310W-430W 之间的组件也做了测算，发现随着组件效率提升、功率增大，度电成本也在显著降低，同时带来了 BOS 成本的降低，组件功率每提升 5W，全部成本降低 0.13 分。

“现在采用 156.75 电池片的 P 型组件功率在 385-390Wp 左右，隆基推出的大尺寸组件功率已经达到 425-430Wp。根据国际光伏技术路线图 (ITRPV)，以 156.75 尺寸，P 型组件功率爬上 425Wp 需要在 2029 年才能达到，隆基整整提前了十年，对光伏度电成本的影响是巨大的！”特变电工新疆新能源股份有限公司总工程师张盛忠说到。

除了特变，爱旭、东方日升、正泰等主流光伏公司也在主推 166 规格组件，海外市场很多项目均采用 72 片大组件，而隆基股份采用 M6 单晶硅片的 Hi-MO<sub>4</sub> 组件也将推向全球市场，据透露，目前该组件在全球的意向订单已超过 2GW。

# Fraunhofer ISE 推出 基于 PERC 的叠瓦太阳能电池和组件

文 / Puzant Baliozian, Nils Klasen, Nico Wöhrle, Christoph Kutter, Hannah Stolzenburg, Anna Münzer, Pierre Saint-Cast, Max Mittag, Elmar Lohmüller, Tobias Fellmeth, Mohammad Al-Akash, Achim Kraft, Martin Heinrich, Armin Richter, Andreas Fell, Alma Spribille, Holger Neuhaus & Ralf Preu, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, Germany

## 摘要

实现硅基光伏组件的高输出功率密度  $P_{out}$ ，需要提高电池效率以及减少电池—组件 (CTM) 的损失。太阳能电池堆叠是 20 世纪 50 年代首次引入的一种组件封装方法，其主要目的是希望通过以下方式减少 CTM 损失：1) 通过相邻电池的堆叠来消除电池的间距；2) 通过用相邻电池的有效区覆盖主栅线来减少阴影损失；3) 减少电池间串联电阻损耗。本文报道了 Fraunhofer ISE 基于钝化发射极和背局域接触电池 (PERC) 技术制造的叠瓦太阳能电池的最新研究进展。采用的制造工艺是在硅片 (基于 Czochralski 工艺生长的 6 英寸硅片) 金属化和接触烧结后将它们分离成双面 p 型叠瓦钝化边界、钝化发射极和背面 (pSPEER) 太阳能电池。分离工艺采用的是激光辅助切割技术：1) 激光划线和机械切割，或 2) 热激光分离。由于分离过程没有对边界进行钝化，可能会导致高边界复合率。因此，开发了基于光致发光的方法来表征边界复合率，并通过 Quokka3 方法进行仿真模拟。为了进一步提高未进行边界钝化的电池的 pSPEER 输出功率密度  $P_{out}$ ，已经开发了后金属化 / 分离边界钝化方法，即钝化边界技术 (PET)。在 pSPEER/PET 太阳能电池中增加 PET 步骤可以提高额定面积功率达  $P_{out} = 23.5 \text{ mW/cm}^2$  (这里包括了额外的背面辐照度  $G_r = 100 \text{ W/m}^2$ ) 之多。接着，在进行叠瓦组件组装的过程中，采用导电粘合剂 (ECAs) 的固化动力学和基于机械模型的研究方法，来更好地理解电池串中 pSPEER 电池之间的连接。然后使用 SmartCalc 软件进行 CTM 分析。该 CTM 软件分析结果显示了串联式拓扑与矩阵式拓扑的差异。最后，叠瓦太阳能电池因其能减小组件面积并且使用于集成组件产品使它们非常受欢迎，这可以通过其在汽车上的成果应用得到证明，并同时还能保持较高  $P_{out}$ 。根据作者在定制组件和表面设计方面的专业知识，提出了一种具有高度美观外表的车辆集成光伏解决方案。

## 简介

仅在第一款硅基太阳能电池制造出来 [1] 两年后的 1956 年，就有人提交了太阳能电池的堆叠互连方案的专利 (见图 1(a)) [2]。随后，又出现与之相关的各种应用专利，例如卫星太阳能电池阵列 [3]，包括不同互连模式、几何形状和热稳定的叠瓦阵列 [4]。早期叠瓦太阳能电池的出版物，主要

涉及 1) 低辐照度下在电子设备上的应用 [5]；2) 具有有限发电面积的原型车 [6]。

“由于有效电池面积的增加和串联电阻的降低，叠瓦式设计能有效增加组件输出功率密度  $P_{out}$ 。”

目前市场上已经有基于叠瓦太阳能电池的商用组件 [7,8]，预测趋势表明未来几年市场份额将会增加 [9]。最近专利 (参见图 1(b)) [10,11] 中的例子，以及文献 [12-15] 中的报告) 指出了与叠瓦概念相关的研究活动正快速增加。叠瓦电池制造工艺是通过将一个电池的背面主栅线与下一个相邻电池的前表面主栅线重叠，使相邻电池形成机械和电气互连，从而形成视觉上无主栅线的叠瓦电池串，并形成叠瓦式组件。

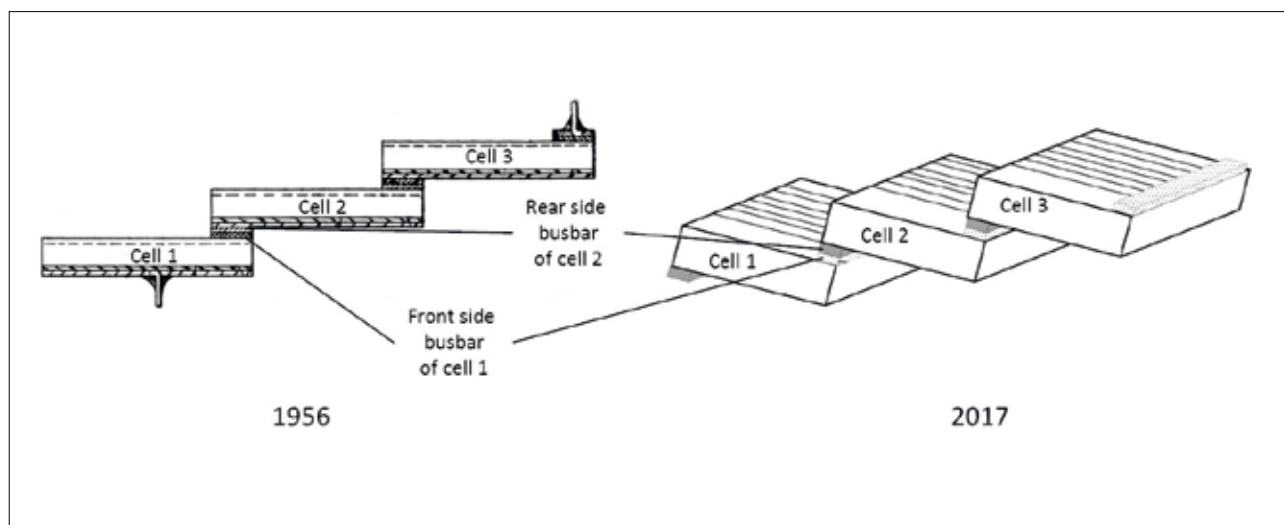
由于有效电池面积的增加和串联电阻的降低，叠瓦式设计能有效增加组件输出功率密度  $P_{out}$ 。此外，其外观的均匀性引起人们对其在车辆 - 光伏一体化 (VIPV) 和建筑 - 光伏一体化 (BIPV) 上应用的兴趣。此外，通过使用双面太阳能电池可以进一步增加  $P_{out}$ ，因为双面太阳能电池可以利用从背面反射的光线 [16,17]。参考 Fraunhofer ISE 之前在 Photovoltaics International 上 [24] 讨论的叠瓦双面太阳能电池，包含了双面钝化发射极与背局部接触电池 (PERC 和 biPERC) [18,19]，钝化发射极与背局部扩散 (PERL) 电池 [20]，钝化发射极和背全局扩散 (PERT) 电池 [21]，异质结 (HJT) 电池 [22] 或 TOPCon [23] 电池。

未来几年市场向 PERC 太阳能电池的转变 [9]，意味着铝背面场 (Al-BSF) 太阳能电池市场份额的缩小。而市场向 PERC 太阳能电池转变的主要原因是，与 Al-BSF 相比其具有介电钝化的背面，这使得 PERC 具有进一步提升效率的潜能。PERC 太阳能电池具有由局部接触开口 (LCO) 和随后金属化步骤产生的局部接触，这使得 PERC 电池结构可以设计用于双面光吸收。这种 biPERC 是通过背面金属电极网格替换背面全区域金属化而获得的，从而该网格金属化能够从背面吸收光线。

这种背面钝化层的调整可增强电池背面的光耦合。虽然叠瓦概念可以应用于不同的电池结构，如 PERC、HJT 和 TOPCon 等 (如 Wöhrle 等 [24] 所述)，但本文将主要讨论



## 电池组件



图一：(a) 展示了 3 片叠瓦电池组成的电池串示意图，经过修改并标识自早期 1956 年的专利 [2]。(b) 展示了在最近 2017 专利（经过修改并标识）提出的 3 片叠瓦电池组成的电池串示意图。(a) 和 (b) 的相似性显示了叠瓦电池概念重新兴起的趋势。在电池叠瓦串中，相邻两片电池的前主栅和背主栅形成电互连和机械连接。

的是基于 PERC 的叠瓦电池，该电池由基于 Czochralski 工艺生长的 (Cz-Si) 硅片制造而成，然后封装在叠瓦组件中。

在本文的第一部分，将介绍 Fraunhofer ISE 现有的制造工艺，以及双面 p 型叠瓦钝化边界、发射极和背面 (pSPEER) 太阳能电池 [25] 的表征结果，并用于叠瓦组件封装。还介绍了用于制造叠瓦电池的激光辅助分离工艺。通过对分离边界的建模、仿真和光致发光 (PL) 测量，进一步研究了分离边界的质量。此外，还引入了 Fraunhofer ISE 的钝化边界技术 (PET)，这是一种后金属化 / 分离边界钝化概念。在第二部分中，作为电池互连的重要步骤，展示了可用的测试方法以及导电粘合剂 (ECA) 的关键特性。本文还对比了可行的叠瓦设计拓扑结构，并建议了其在众多领域的应用，例如光伏 - 车顶一体化。

### pSPEER 太阳能电池的概念和工艺

与大面积电池相比，双面叠瓦 pSPEER 电池的制造仅需要增加一个额外的工艺步骤：激光辅助分离工艺。该分离工艺更适合在 6 英寸硅片后段制程完成（通常在烧制后）之后进行。如 Baliozian 等人 [25] 所报道的那样，pSPEER 太阳能电池只通过修改后段制程就可以完成制造。除了额外的分离工艺步骤之外，制造 pSPEER 太阳能电池还需要调整金属化设计，目的是在一块硅片中得到数片叠瓦电池。换句话说，可以使用来自工业生产线的 PERC 前段（具有沉积的钝化层）样品，同时叠瓦电池的尺寸也可以按照需求设计。稍后讨论如何使用前段样品制造 pSPEER 电池。

### pSPEER 电池的电流 - 电压测量

快速精确的电流 - 电压 (I-V) 测量是表征叠瓦太阳能电池的前提条件。网格几何形状，尤其是倒转放置的背部网格和小电池尺寸，对 I-V 测量设备提出了新的挑战。其中，带有接触引脚的传统测量装置仅可用于研发用途。

测量电池的方法之一是使用传统硅片形状的嵌体，如

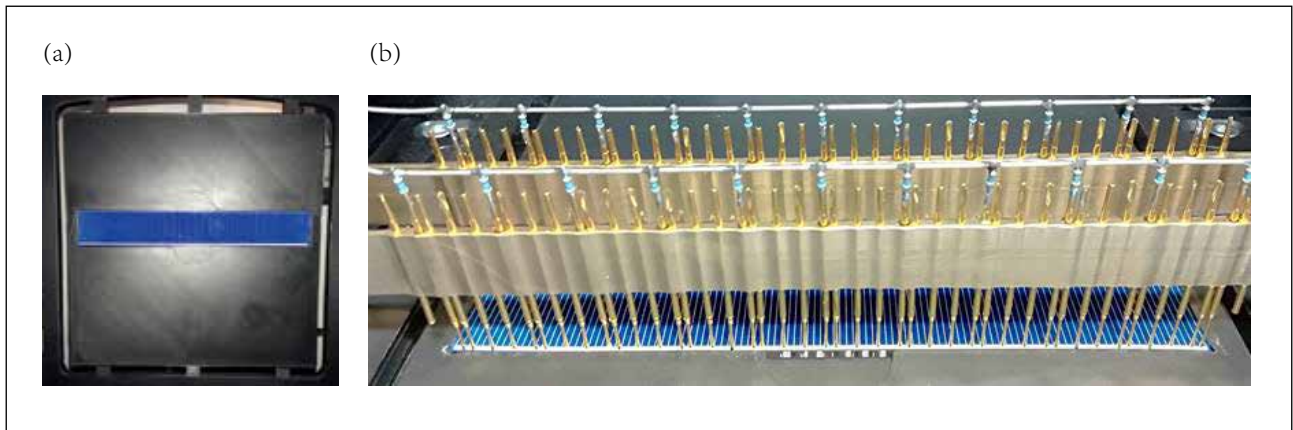
图 2(a) 所示。将 pSPEER 电池放置在嵌体中，然后通过两排 I-V 引脚阵列条与前表面和背面主栅线形成电接触，如图 2(b) 所示。另外，还有两排附加阵列（每侧一排）用于辅助机械固定，因此没有电连接。为确保测量的有效性，I-V 测试仪使用基于 Fraunhofer ISE CalLab PV cells 实验室测量的 pSPEER 电池作为校准。同时也会测量电池总面积（包括主栅）。由于主栅是相邻叠瓦电池形成互连之后才被覆盖的，因此现在我们主要关注的是除了主栅区域之外的区域或者称为指定区域的效率。用总电池面积减去主栅面积可以计算出有效区域短路电流密度  $j_{sc,des}$ 。

然而，对于量产产线来说，这种测试设备并不是最理想的，因为所测电池的等效功率大小会随着叠瓦尺寸的变小而减小。因此，用于测量叠瓦电池效率的替代方法正在开发中。目标是在主硅片进行激光电池分离之前用常规技术进行测量。由于前主栅和背主栅的走向相互交替，因此主硅片不能像具有主栅设计的传统电池一样简单地与引脚阵列接触。因此我们优选 GridTOUCH 技术，其排列方向平行于主栅线（参见图 3(a)）。利用该方法，可以同时测量 6 块待分离叠瓦电池的效率。而局部效率信息则可以通过前置暗电致发光 (EL) 技术获得，这是当今 I-V 测试仪的常见功能。

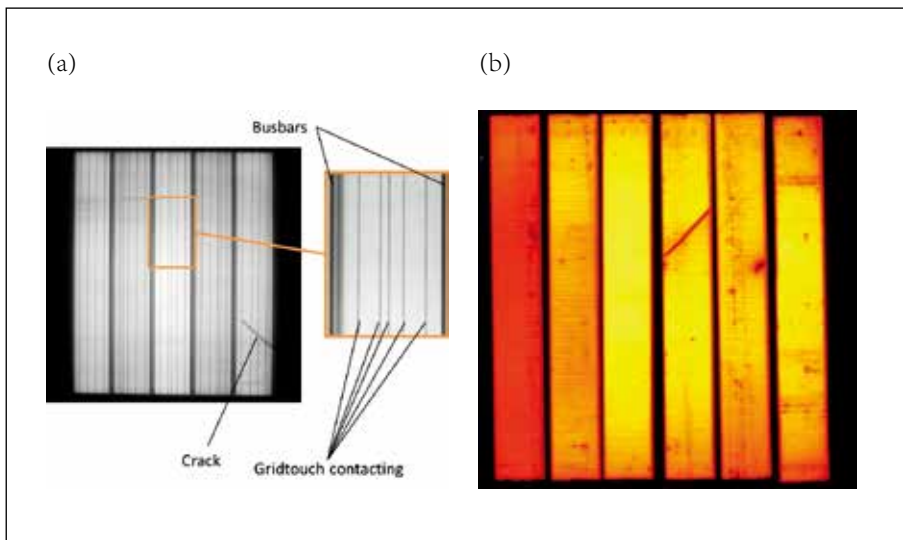
**“激光分离可能会引入边界开裂，甚至是漏电通路，这些也是需要进行检查的”**

然而，激光分离可能会引入边界开裂，甚至是漏电通路，这些也是需要进行检查的。一种可选方案是在分离后立即使用在线非接触式 PL 技术，以便检测有缺陷的电池。由于 PL 摄像机的宽视野和非接触式测量的短测量时间间隔，可以同时测 2 块叠瓦电池（假设根据叠瓦电池尺寸进行适当自动化处理），从而避免了前面提到的产能瓶颈。图 3(b) 显示了 6 块分离 pSPEER 电池测量样品的 PL 图像。

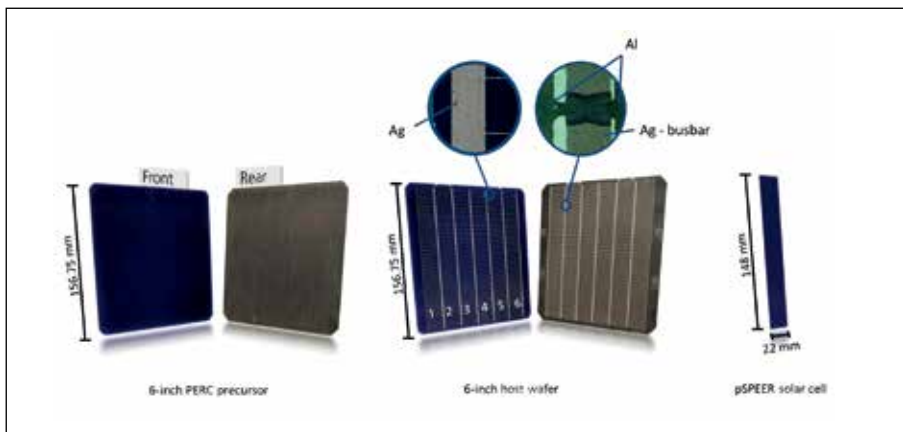
电池组件



图二：(a) pSPEER 电池的嵌入式测试图，可以搭配传统 I-V 测试装置使用。在该装置中，pSPEER 电池可以使用两排 I-V 管脚阵列实现与前主栅和背主栅的电连接。(b) 展示了使用 I-V 管脚阵列连接前表面主栅。



图三：(a) 已完成制造步骤的硅片在分离前进行在线 EL 成像拍摄，由 GridTOUCH 装置连接。从图中可以看到，电池右下角存在微裂纹，将会导致这片区域对应的 pSPEER 电池在切割分离后被筛选出来丢弃。(b) 已分离 pSPEER 电池（尺寸与图 (a) 的不同）的 PL 成像图。PL 成像图可以发现由激光辅助分离工艺造成的其他损伤；包括边缘相关缺陷和新的裂纹或者由操作不当造成的损伤等。通过灵活的自动化系统，可以同步测试多片 pSPEER 电池，使得测试速度能够满足产线在线测试的要求。



图四：展示了电池不同阶段的前表面和背面图像：(a) 6 英寸商用 PERC 先驱物样品；(b) 主硅片的前表面和背面金属化设计（金属电极的显微镜图像）；(c) 尺寸为 22x148mm 的 pSPEER 太阳能电池。该先驱物硅片并不是针对双面电池进行优化的，这就是为什么背面呈现黄色的原因。

pSPEER 太阳能电池样品

最新的 pSPEER 电池结果发表在 Baliozian 等人的文章中 [26]。该批次样品使用氮化硅 (SiN<sub>x</sub>) 层对磷掺杂发射极 (参见图 4(a)) 进行钝化作为预处理。背面则镀有氧化铝 (AlO<sub>x</sub>) 和 SiN<sub>x</sub> 叠层。测得来自参考样品批次的体电阻率在  $0.3 \Omega \text{ cm} \leq \rho_B \leq 0.9 \Omega \text{ cm}$  范围内。

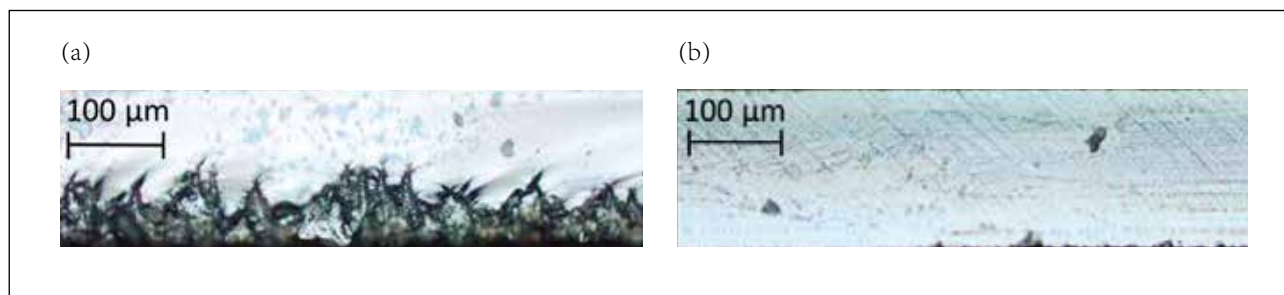
对样品的处理从激光 LCO 开始，我们选择使用 Fraunhofer ISE 的红外激光工艺。外部的背面电极，在这里使用的是银，也称为背面主栅，是首先进行丝网印刷（外部银电极类似于 6 英寸 PERC 电池的印刷背面焊盘）的。然后在背面增加铝网格，并覆盖 LCO；这在铝电极网格之间形成银主栅（见图 4(b)）。接下来是印刷正面银电极网格，并在工业快速烧结炉中进行接触烧结。随后经过激光划线和机械切割分离工艺，得到 6 块尺寸为 22mm×148mm 的 pSPEER 电池（参见图 4(c)）。之所以选择这种 pSPEER 电池尺寸进行研究，是因为能灵活应用于不同的商用硅片尺寸。

为了对制造完成的 pSPEER 电池进行表征，需要在标准测试条件下进行测量 (STC; G<sub>f</sub> = 1,000W/m<sup>2</sup>)。正如 Baliozian 等

## 电池组件

	$\eta$ [%]	Voc[mV]	$j_{sc,des}$ [mA/cm <sup>2</sup> ]	FF[%]	pFF[%]	$\beta$ [1]
Front side	21.4	666	40.2	79.8	82.3	0.64
Rear side	13.7	654	26.2	79.7	81.6	

表一：输出功率密度  $P_{out}$  最高的一组 pSPEER 太阳能电池的 I-V 数据 [26]。特定区域短路电流密度值是由总电池面积  $A_{tot}=3,263\text{mm}^2$  减去主栅面积得到的。



图五：基于激光辅助分离工艺的 pSPEER 电池边缘显微镜图像：(a) LSMC 和 (b) TLS [32]。

人 [26] 报道的那样，对于标称尺寸为  $22\text{mm} \times 148\text{mm}$  的 pSPEER 电池，I-V 测量结果显示指定区域峰值前端效率  $\eta_f = 21.4\%$ ，如表 1 所示。pSPEER 电池产生开路电压  $V_{oc} = 666\text{mV}$ ，填充因子  $FF = 79.8\%$ ，伪填充因子  $pFF = 82.3\%$ ，短路电流密度  $j_{sc,des} = 40.2\text{mA/m}^2$ 。在 STC 下测量同一电池的背面时，得到指定区域背面效率  $\eta_r = 13.7\%$ ，其他参数包括  $V_{oc} = 654\text{mV}$ ， $FF = 79.7\%$  和  $j_{sc,des} = 26.2\text{mA/m}^2$ 。因此，可以计算双面因子  $\beta = \eta_r / \eta_f = 0.64$ 。pSPEER 电池总输出功率密度  $P_{out} = 22.8\text{mW/m}^2$ （考虑到背面辐照度  $Gr = 100\text{W/m}^2$ ）。

此外，背面  $j_{sc,des}$  与前表面  $j_{sc,des}$  之差  $\Delta j_{sc,des} = 14\text{mA/m}^2$ ；这种差异是源于背面金属化面积大于前表面。另外，所用特定先驱物样品背面的光学性质不是最佳的，因为它们尚未针对双面使用进行调整。背面和前表面测量值之间的  $V_{oc}$  差异，或  $\Delta V_{oc}$  约为  $12\text{mV}$ ；这种差异是由于较低的背面  $j_{sc,des}$  和较小程度上的边界复合，这可以使用单二极管模型方程验证。

另一方面，在同一批次中制造的 6 英寸双面 PERC 电池与分离的 pSPEER 电池之间的 pFF 差异，或  $\Delta pFF$ ，为  $\sim 1.2\%$  sbs；这表明分离过程会引入边界复合。作为分离工艺的副产品，切割边界会被一层薄的原生氧化硅层进行轻微钝化，除此之外就没有其他边界钝化过程了。为了提高分离后电池的性能，需要进行额外的边界钝化工艺。在接下来的章节中将讨论通过激光辅助分离工艺以及额外的边界钝化工艺来减少边界复合。

### 激光辅助分离技术及其表征

分离叠瓦电池最常用的方法是进行激光划线，然后进行机械切割 (LSMC)。激光划线器利用脉冲激光沿整个分离路径烧蚀硅片表面，由此产生的激光刻蚀槽可以通过机械切割轻松地实现电池分离。然而，激光刻蚀会导致切割区域中硅材料熔化和重构，产生光学可见的粗糙表面，如图 5(a) 所示。

晶体结构的破坏导致边界处出现大量缺陷。由于所获得的叠瓦电池具有高的周长与面积比，因此损坏的边界会带来严重的损失。

热激光分离 (TLS) [27,28] 是用于替代 LSMC 分离的破坏力较小且无切口的分离工艺。其具体过程是，首先从硅片边界开始由红外激光器进行短划线，以引发裂缝。随后，在硅片表面上引导连续波红外激光 (TLS 裂解激光)，随后进行流动水冷和空气冷却。这种加热后又冷却的过程会在材料内引入热应力，并导致硅片沿着引导路径从初始裂缝传播开裂。该过程能产生平滑的叠瓦电池边界表面，如图 5(b) 所示。

图 6(a) 中展示的 TLS 过程高度依赖于各种工艺参数，包括切割激光功率、推进速度以及激光光斑和样品上的冷却点之间的距离等 [29]。可以通过红外成像监测解裂过程，在图像上可以看到椭圆形状的激光斑点（参见图 6(b)）。调整切割参数，可以优化样品上的热分布以及总散热，以实现平滑的分离边界和笔直的分路路径。

由于 TLS 工艺不会使硅熔化而是使之开裂，因此预计该方法引起的晶体缺陷会少很多，进而引起的电损耗也更小。在 TLS 时硅材料几乎不会出现消融（仅在短暂的初始划线中出现），这使得它几乎不会引起尘灰。这对于高产量的工业生产尤其具有吸引力 [29,30]。此外，在机械稳定性上，TLS 分离的电池要好于 LSMC 分离的电池 [31]。

### 模拟工具 Quokka3 中的模型更新

硅太阳能电池建模工具 Quokka3 [33] 专门用于处理叠瓦电池技术，以提高叠瓦电池建模的速度。它使用最新集成的“多域建模”，可以组合两个或多个模拟域来实现大面积设备的建模，同时维持一个小的计算网格 [34]。有边界效应的太阳能电池、半切片电池和叠瓦太阳能电池设计都可以使用这种方法建模。

如图 7 所示，这里使用一个核心域和一个边界域来模拟

电池组件

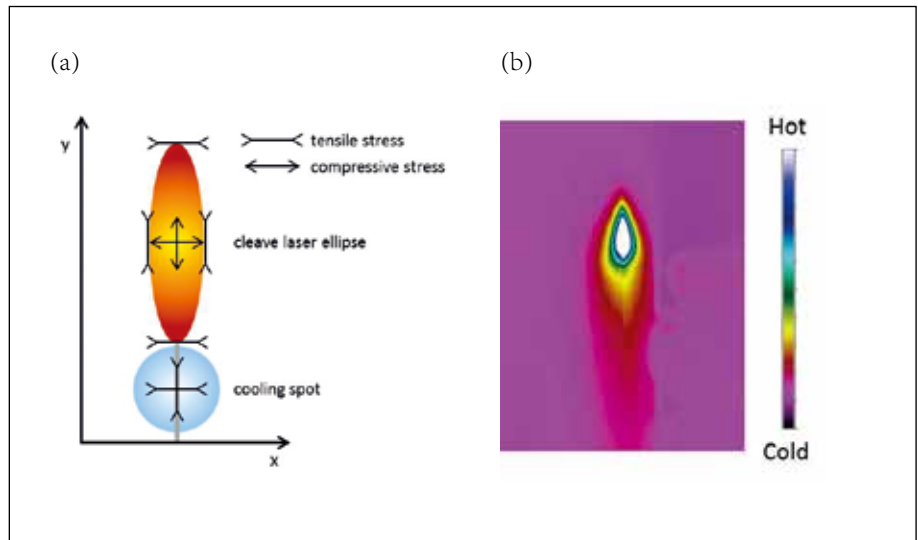
pSPEER 电池。有效对称元的尺寸仅为子栅间距乘以子栅长度 (约  $1.3\text{mm} \times 25\text{mm}$ ), 而不是像前面报道中使用的条状电池的一半 (约  $25\text{mm} \times 150\text{mm}$ ) [35]。这将每条 I-V 曲线仿真计算时间从几个小时缩短到几分钟。其中, 边界区域使用的是空间电荷和体区的表面复合模型, 可以用复合参数  $j_{01,\text{edge}}$  或  $S_{\text{eff},\text{edge}}$  和  $j_{02,\text{edge}}$  来表示。还可以集成沿着边界的发射极窗口和可调方块电阻与表面复合进行计算。

边界复合的分析模型

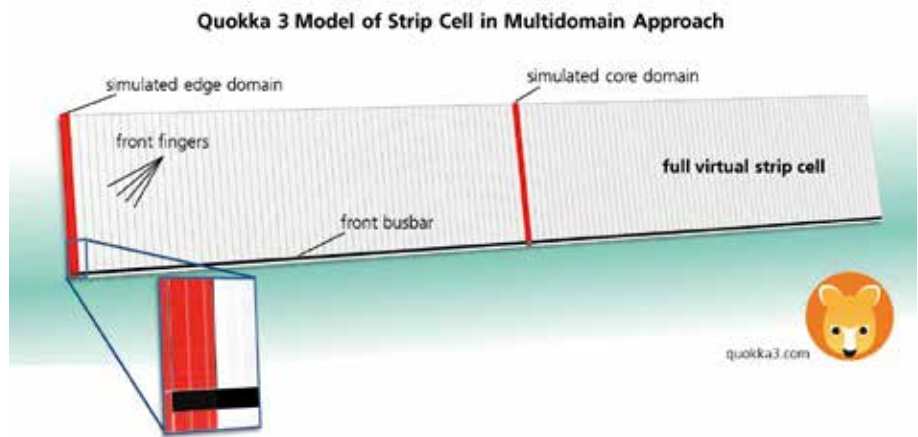
除了能用于叠瓦电池的优秀数值模拟之外, 对分析模型进行简化的方法也适用于计算太阳能电池边界复合。有关详细信息, 请参阅 Saint-Cast 等人 [36] 报道。边界可以区分为 p-n 结内或在 p-n 结附近区域的线性复合中心; 这与背面的局部复合 (例如背面接触复合) 有所不同, 其复合主要受到少数载流子从前表面穿过硅片向背表面扩散的限制。

假设缺陷平面沿着垂直轴平移不变, 则可以将仿真模型降到二维。另一个假设是线性缺陷是该系统中唯一的不均匀性来源。边界处的高复合率 (与电池的其余部分相比) 在其附近引起较低的 p-n 结电势差 (或较低的过剩载流子密度)。这种电位的梯度导致电子和空穴流向缺陷区域—这也是我们正在研究的一个载流子传输问题。在该模型中, 假设 (假设 1) 相对于器件的尺寸 ( $> 1\text{cm}$ ), 载流子流动距离非常小 ( $> 1\text{mm}$ ), 横向载流子的流动将受到电阻损耗的限制。为了进一步简化这个问题, 还假设 (假设 2) 发射极和基极中的垂直传输远小于横向传输, 则可以通过简单的薄层电阻建模 (发射极  $\rho_e$  和基极  $\rho_B$ )。

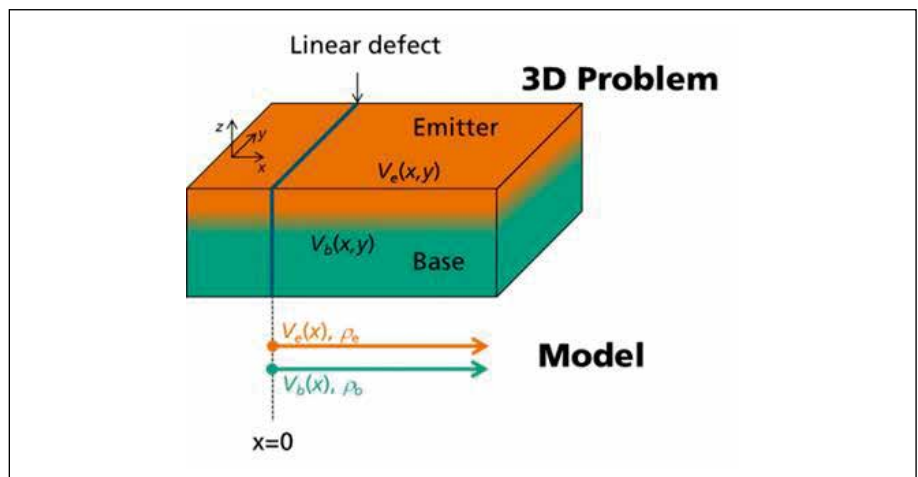
图 8 显示了该问题的三维示意图, 并与开发的模型进行了比较; 由于上述假设, 3D 问题



图六: (a) TLS 工艺示意图。在对硅片边缘进行短暂激光划线并引入开槽后, 施加连续波长红外激光产生热, 紧接着进行流动水冷和空气冷却; 这一步骤将带来热应力并使衬底开裂。(b) 红外图像显示了先激光加热然后进行冷却的衬底热云图。椭圆激光斑点的形状与大小影响着 TLS 切割的质量。



图七: 使用 Quokka3 仿真建模方法对条状电池进行模拟的示意图。其中, 红色前表面和中心部分代表两个实际模拟的区域。灰色区域是电池对称的结果, 不需要额外的仿真。通过该方法可以大幅减少仿真的时间。



图八: 展示了太阳能电池的三维问题, 并与线性缺陷的简化模型进行对比。

电池组件

减少到单个维度。 $x$ 轴的原点定义为线性缺陷(边界)的位置。然后分析计算 p-n 结处的局部电位差  $V(x)$ 。

在开路条件下,由于边界处的复合, p-n 结电压朝向边界减小。在图 9 中,分别将六种不同光照强度下的 p-n 结电压绘制为位置的函数。太阳光谱 AM1.5G 定义 1 个太阳辐照度,功率密度为  $1,000\text{W}/\text{m}^2$ 。在这种情况下,通过在温度  $T = 300\text{K}$  下照射厚度为  $W \approx 160\ \mu\text{m}$  的参考太阳能电池,并通过  $808\text{nm}$  波长单色光以及光子通量密度  $j\gamma = 2.5 \times 10^{17}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  来实现等效生成。在低辐照度下, p-n 结电压受边界影响的距离远远大于高辐照度。将模型的结果与使用 Quokka3 的 2D 漂移-扩散模拟进行比较,发现偏差只有  $\pm 3\text{mV}$ ,说明一致性非常好。对于该示例,边界处的复合参数是  $j_{02,\text{edge}} = 19\text{nA}/\text{cm}$ ,与 Fell 等人确定的“最坏情况”值 [37] 相同。

这种模型的好处是简化了测量电池参数的分析,有助于确定边界的复合参数(见下一节);它还有助于理解边界复合背后的物理原理。通过数值模拟验证的该假定模型表明,在边界处重新组合的载流子传输机制主要是电阻性的。

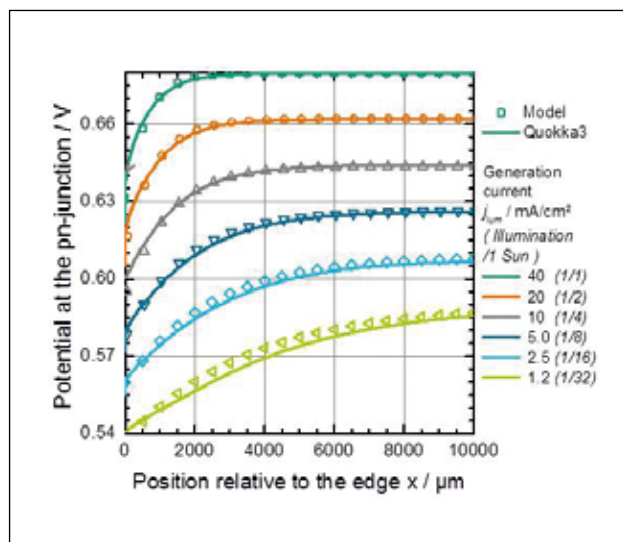
使用 PL 成像进行边界复合分析

因为在成品电池的 I-V 参数和建模中已经看到了边界复合的影响,所以很有必要对这种类型的复合进行深入表征。参考 Stolzenburg 等人的研究 [38],提出了一种新方法,即通过将 Quokka3 器件、发光模型和 PL 检测方法结合起来量化边界复合的大小。主要目标是确定两个相关边界对复合损失的贡献,并将它们分离,如 Wöhrlé 等人提出的那样 [35]: 1) 用有效表面复合速度  $S_{\text{eff},\text{edge}}$  描述体边界的复合; 2) 用基于边界长度定义的非理想复合参数  $j_{\text{eff},\text{edge}}$  来描述的 p-n 结边界处的复合。

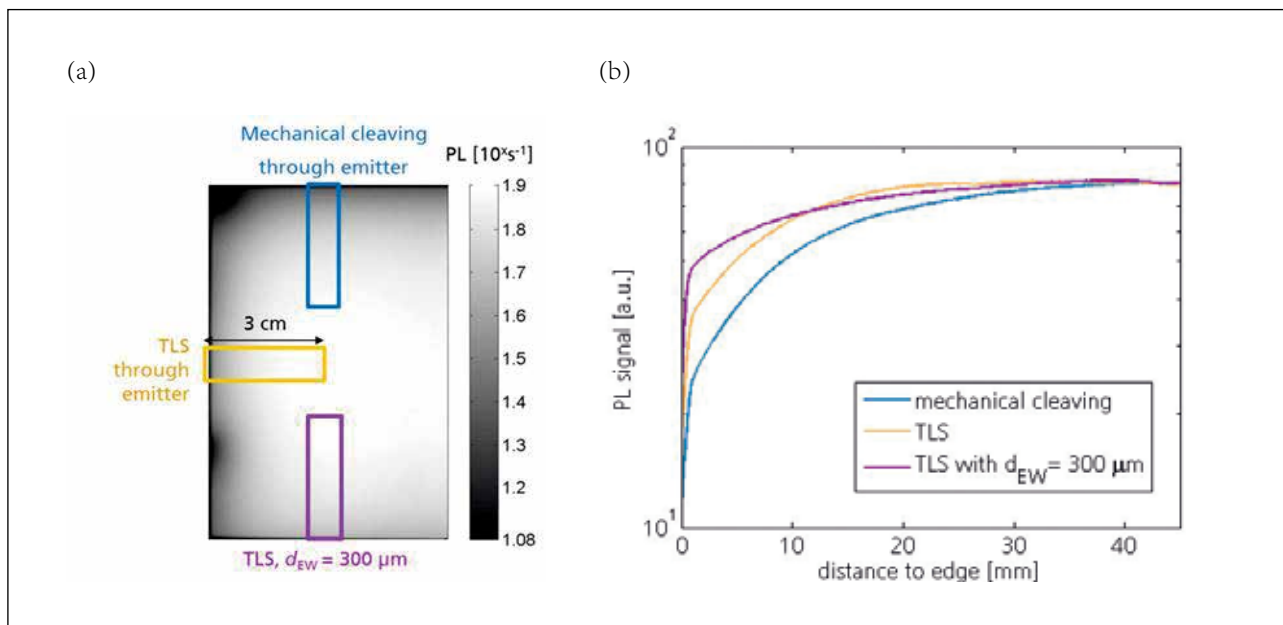
我们研究了分别用三种不同边界处理工艺加工的碲扩

散与  $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiN}_x$  表面钝化 n 型浮区硅硅片 ( $\rho_B = 1\text{cm}$ )。这些硅片通过以下方式进行分离: 1) TLS 从前表面穿过发射极层; 2) 发射极和边界之间的距离  $d_{\text{EW}}$  为  $300\ \mu\text{m}$  的 TLS(发射极窗口); 3) 金刚石切割划线和随后手动机械切割穿过发射极层。

图 10(a) 展示了三种不同边界类型在 0.02 个太阳辐照度下的 PL 图像。图 10(b) 中的相应 PL 图像清楚地显示朝着边界逐渐减小的趋势和不同处理工艺下边界之间的区别。可以看到,穿过发射极的 TLS 切割边界不像边界复合那样受机械切割边界的影响。此外,还观察到由于少数载流子通过发射极到边界的导电性缺失对发射极窗口带来的正面影响 [35,39]。



图九: 不同辐照度下 p-n 结与到边缘距离的潜在差异,其中  $iV_{oc} = 680\text{mV}$ ,  $\rho_e + \rho_b = 180/\text{sq}$  和  $j_{02,\text{edge}} = 19\text{nA}/\text{cm}$ 。



图十: (a) 用对数换算 0.02 个太阳辐照度下的 PL 图像,显示了 3 种不同影响的边界; (b) 彩色方框内表示的相应面积对应的 PL 图像。

电池组件

为了量化边界复合，使用 Quokka3 的 2D PL 模拟数据拟合到实验 PL 数据上。首先需要进行寿命校准 [40]，随后通过改变两个自由参数  $S_{eff,edge}$  和  $j_{02,edge}$  进行拟合。六种不同辐照强度 (0.02 到 1 个太阳) 的组合拟合能够区分  $S_{eff,edge}$  和  $j_{02,edge}$  值。在图 11 可以看到通过发射极分离的 TLS 边界，其模拟和实验结果的一致性非常高，而研究边界的最佳拟合参数在表 2 中列出。

将这些结果与 Dicker [41] 和 Fell[37] 等人提出的非钝化边界的最坏情况假设进行比较，(分别为  $S_{eff,edge} \geq 106\text{cm/s}$  和  $j_{02,edge} = 13$  或  $19\text{nA/cm}$ ) 可以看到本研究中的结果较小，表明在本研究中存在某种天然的边界钝化。特别是， $j_{02,edge}$  与 Rühle 等人 [39] 的研究结果接近，他还报告了机械切割未钝化边界的复合参数为  $5\text{nA/cm}$ 。

这里给出的方法可以用于提取关于边界复合的详细信息。由于总体目标是优化硅太阳能电池性能，从机械切割和 TLS 的结果比较可以得出结论，TLS 工艺导致的边界损失更小，因此是潜在的叠瓦电池分离方法。此外，该方法不受特定样品参数的约束，并且可以用于不同的高效硅太阳能电池以及边界钝化的硅片，以获得关于边界复合的详细信息。

后金属化钝化边界技术 (PET)

在先前的研究中可以找到一些用于减少边界复合效应的边界钝化方法的报道。例如，其中一种方法是通过将 p-n 结保持在距离分离边界几百微米的位置来形成发射极窗口，从而减少了暴露的空间电荷区域处的悬空键复合 [5,42]。另一种方法是对整个分离路径进行大量掺杂，形成“边界表面场”，表面场会对载流子进行排斥从而减少那些预期区域的复合 [43]。此外，还有文章提出了在发射极边界制造隔离沟槽的方法。隔离沟槽可以通过激光烧蚀工艺，加上湿化学蚀刻，然后通过例如热生长的氧化硅或多晶硅 [44] 方法对沟槽进行钝化来实现。尽管所有这些方法都能减少边界复合，但是它们的商用可行性受到以下限制：所涉及的工艺必须在金属化之前在前端进行，并且这些工艺可能非常昂贵。

据报道，在经过化学处理的边界上生长二氧化硅可以减少主要在低光照条件下检测到的边界复合 [45,46]。此外，还有报道研究了通过具有高电荷密度的介电层直接在边界处钝化 p-n 结和 / 或基极的方法 [47]。然而，

如 Altermatt 等人所报道的那样，为了在边界上形成高质量的氧化物钝化，必须先去除由分离过程中产生的受损硅材料 [48]。

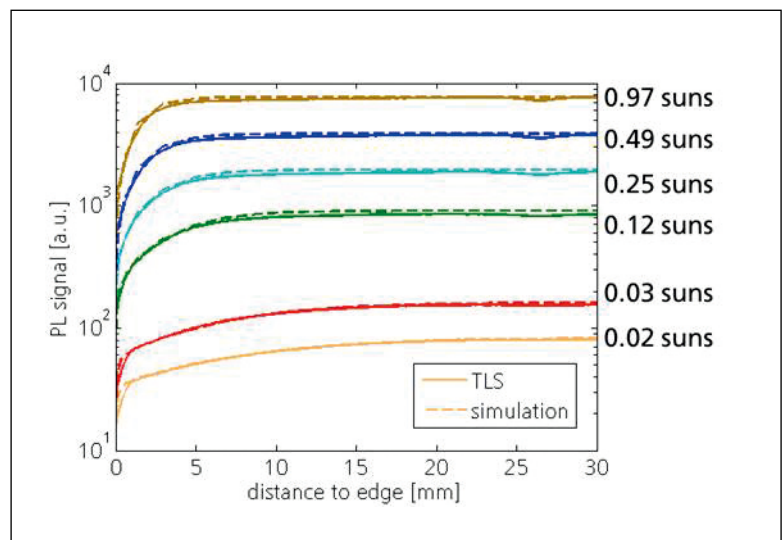
另一方面，后金属化 / 分离边界钝化工艺似乎是一种有竞争力的方法：因为需要找到工业上可行的边界钝化工艺。其中一项技术挑战是金属电极的稳定性会在烧结后的热过程中降低，如 Kontermann [49] 和 Chan 等人所述 [50]。

在 Fraunhofer ISE 开发的 PET 旨在结合 TLS 分离工艺来减小边界损伤，同时提高边界钝化质量，并且不会损害太阳能电池电极。经过 PET 处理的 pSPEER 电池 (pSPEER PET) 表现出了更高的前表面效率  $\eta_f = 22.1\%$  和总输出功率密度  $P_{out} = 23.5\text{mW/m}^2$  (其中背面辐照度  $G_r = 100\text{W/m}^2$ )。关于这些 pSPEER PET 太阳能电池和 PET 工艺的更多细节可以在 Baliozian 等人的文章中找到 [51]。

互连

与传统的太阳能组件相比，叠瓦式电池互连不需要焊带或焊线。太阳能电池直接在一块小的重叠区域内互连，这种方法与屋顶瓦片类似。互连工艺分为 4 步：

1. ECA 的应用；
2. 通过抓取和放置工艺实现电池放置；
3. 固化 (可选)；
4. 层压 (封装固化)；



图十一：使用最佳拟合的 TLS 边界的实验数据与仿真数据对比，并显示了所有 6 种辐照度和  $j_{02,edge} = 3\text{nA/cm}$  和  $S_{eff,edge} = 105\text{cm/s}$ 。

Edges	$j_{02,edge} [\text{nA/cm}]$	$S_{eff,edge} [\text{cm/s}]$
TLS through emitter	3	$10^5$
TLS(dEW=300 $\mu\text{m}$ )	-	$10^5$
Mechanical cleaving through emitter	5	$\geq 10^6$

表二：3 种不同非钝化边界类型的最佳拟合参数。

## 电池组件



图十二：由 TT1800 串焊机制造的叠瓦太阳能电池串，接下来可进行组件封装。

Fraunhofer ISE 提供的 ECA 应用技术包括点胶、钢网印刷和丝网印刷。在实验室里，ECA 可以手动涂敷或使用半自动钢网和丝网印刷工艺。此外，全自动商用串焊机 (TT1800，与串焊机制造商团队联合技术开发)[52] 可用于不同尺寸和几何形状的电池生产各种长度的叠瓦组合 (参见图 12)。钢网和丝网印刷可以实现任意的 ECA 印刷图案，同时还能优化 ECA 消耗。此外，机器人式的抓取和放置过程 [53] 可以支持制造矩阵叠瓦互连 (在下一节中更详细地讨论)。

与焊接相比，ECA 不是通过熔化和固化而是通过热激活的化学交联反应来实现太阳能电池互联的；而交联反应速率取决于温度，并且通常在温度高于  $100^{\circ}\text{C}$  时开始反应。在  $150^{\circ}\text{C}$  的温度下，固化持续时间可以从几秒到几分钟。因此可以将层压和固化工艺结合在一起，避免了在层压前进行一次额外的固化步骤 [54]。

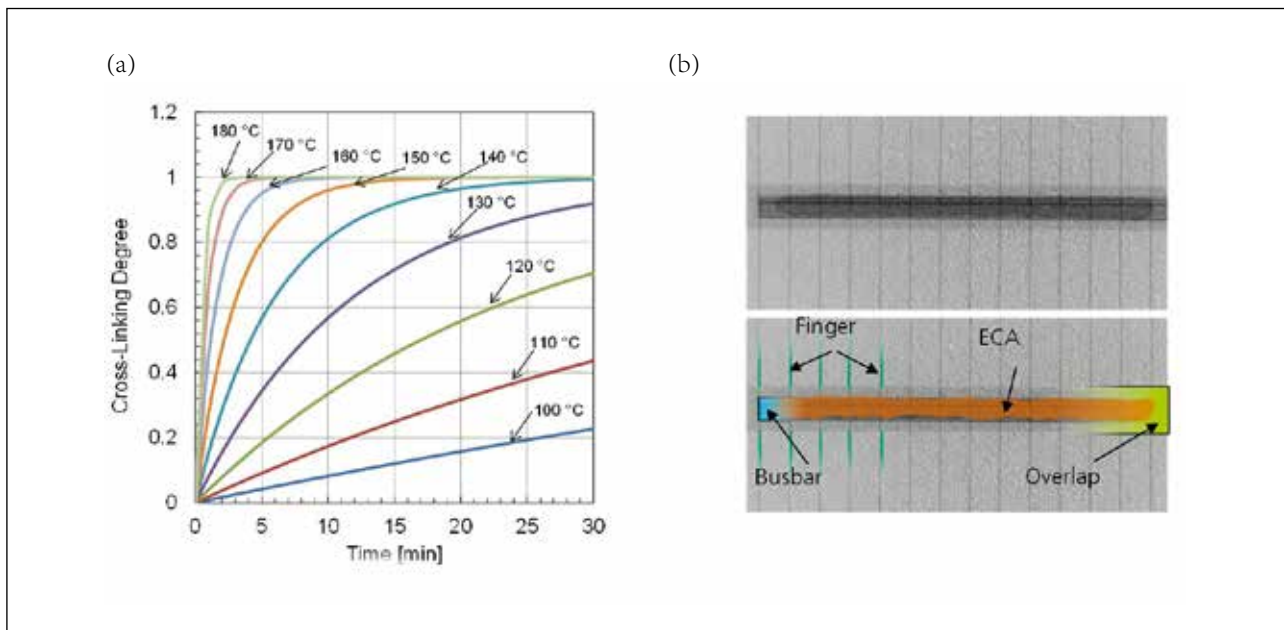
叠瓦过程中最关键的一环是太阳能电池之间的连接，因此组件性能高度依赖于所应用的 ECA 材料；为了确保互连的可靠性，需要对 ECA 进行深入的适用性评估。我们开发了基于差示扫描量热法 (DSC) 测量的固化动力学模型 [55]，用于对串焊或层压过程中的温度时间曲线进行特定优化，以确保接触点完全固化 (参见图 13(a))。

另外，非破坏性 X 射线透射成像可以显示接触点甚至最终层压板中的玻璃几何形状和均匀性信息 (参见图 13(b))。而破坏性成像方法包括根据 IEC 61215 [56] 在加速老

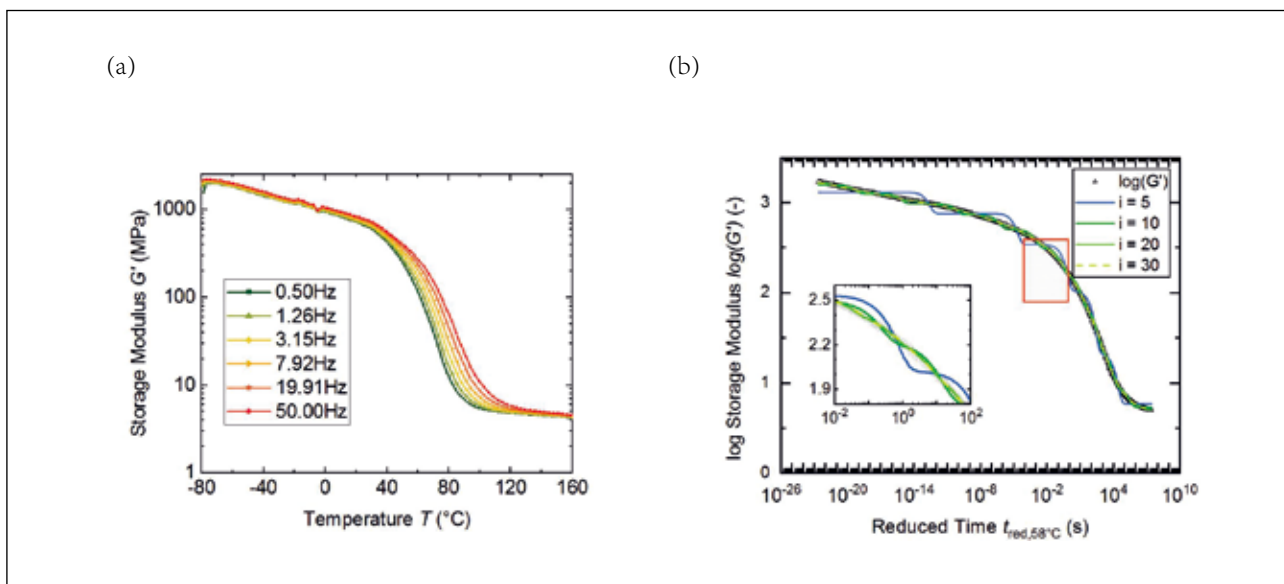
化测试后研磨组件横截面。最后，光学方法，如光学显微镜和扫描电子显微镜 (SEM)，可用于识别接触点的失效机制。

为了进一步验证这些实验结果，我们使用结构 - 机械有限元模拟方法对受到例如温度循环或机械载荷时叠瓦接触点受到的潜在影响进行更深入理解。在这里，ECA 体材料在机械行为方面的特性是模拟的重要输入信息。

在这里，使用动态力学分析 (DMA) 来测量和模拟 ECA 的粘弹性 [57]。图 14(a) 显示了 Fraunhofer ISE 用于互连叠瓦太阳能电池的一种材料典型 DMA 数据。该材料在  $40$  至  $120^{\circ}\text{C}$  之间显示出独特的粘弹性，频率范围为  $0.5$  至  $50\text{Hz}$ 。尽管 ECA 含有高比例的金属填料以确保导电性，但剩余的有机粘合剂基质会引起粘弹性行为。通过使用时间 - 温度叠加原理移动这些离散的数据集，可以绘制出主曲线 (见图 14(b))；该曲线描述了在参考温度下材料的弛豫谱 (参考温度通常选择为玻璃化转变温度  $T_g$ )。存在几种流变模型，其使用弹簧 - 阻尼系统来模拟这种机械特性。用于进行有限元方法 (FEM) 研究的 Comsol Multiphysics 软件是通过数值与广义 Maxwell 模型的拟合来完成的 [58]；使用  $i = 20$  个 Maxwell 臂实现数据的平滑表示。在这种材料建模的基础上，对受到 (热) 机械载荷的叠瓦太阳能电池串的有限元研究已经进行并在发表在 Klasen 等人的文章中 [57]。



图十三：(a) 来自用于 ECA DSC 测量的纯动力学测试，显示了交联度与固化时间和温度的关系。(b) 相邻 pSPEER 电池之间叠瓦接触点的 x 光传播分析 (上图显示原始数据；下图被阴影遮挡和标识是为了更好显示效果)。



图十四：(a) ECA 硬度与温度关系，在 3 种不同激发频率下测试得到。(b) 在  $T_g$  点时相应的主曲线，由在时域下数据的转变和使用广义麦克斯韦模型去拟合数据，用 3 种不同麦克斯韦参数区获得平滑的解释。

### 组件技术和应用领域

由于光学和电学效应，太阳能电池集成到光伏组件中会导致输出功率的改变。组件层内的吸收、光学界面处的反射和太阳能电池互连中的电阻损耗是光伏组件内主要的损耗因素。

另外，当加上非有效组件区域 (例如，电池间隔) 时，实际参考面积会增加。因此，这不仅改变了电池的输出功率，还改变了组件的效率 [59,60]。由 Haedrich 等人在 2014 年引入的电池 - 组件 (CTM) 分析方法 [61]，提供了一种多功能

工具来评估组件封装中的这些影响。该方法指出增益和损耗皆是由组件中各个重要部件 (例如接线盒、焊带) 引起的，并提出了相应的物理机制，从而可以帮助评估组件设计和材料以及对不同组件技术进行比较。

该方法提供了一个简单的关键指标 -CTM 来描述组件集成封装在功率或效率方面的成功与否。CTM 比率是组件功率或效率除以初始总电池功率或效率的比值；如果比值小于 1 则表示太阳能电池集成到组件中发生了损耗，而比率大于 1 则表示发生增益。



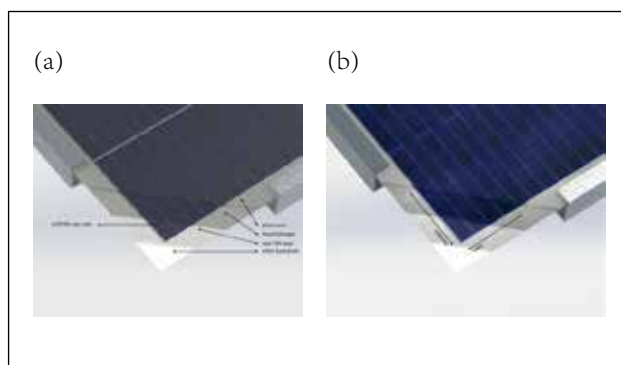
电池组件

Mittag 等人 [62] 进一步扩展了 CTM 方法，用以分析叠瓦组件。所有模型都集成在了 Fraunhofer ISE 的 SmartCalc. CTM 软件中——这是一款灵活、精确且用户友好的计算工具，能分析不同组件技术的 CTM 比率 (<https://www.cell-to-module.com>)。使用 SmartCalc. CTM 进行的案例研究表明，与传统组件相比，由于消除了电池间距和互连产生的阴影，叠瓦技术显著提高了组件 CTMefficiency 比值。

2018 年, Fraunhofer ISE 重新引入了“矩阵叠瓦”拓扑结构, 该结构由 Schmidt 和 Rasch 于 90 年代早期申请了专利 [63]。矩阵叠瓦是对串式叠瓦设计的进一步提升, 并且有效增加电池堆积和功率密度。与串式叠瓦设计 (参见图 15(a)) 一样, 矩阵叠瓦需要通过垂直地重叠太阳能电池来串联电池。另外, 对连续平行电池组成的电池条进行水平移动, 能够产生类似砖墙一样的拓扑图案 (参见图 15(b))。这意味着在单行内, 太阳能电池通过水平相邻电池的重叠前后主栅线并联连接。由此形成的串并联连接, 能有效提升在部分阴影条件下的组件性能 [15]。在 2018 年的 Intersolar Europe 展览会上, Fraunhofer ISE 首次 (据作者所知) 展示了一种等效于 60 片电池组件的双面矩阵叠瓦组件 (见图 16)。

为了展示矩阵叠瓦方案的潜力, 我们对比了传统的串式叠瓦组件和矩阵式叠瓦组件 CTM 分析结果。其中, 矩阵拓扑由 78 行组成, 每行有 6 条 pSPEER 太阳能电池, 而串式拓扑结构则包含 6 个电池串, 每个电池串由 78 块电池连接而成。对于两种拓扑结构, 电池功率和电池重叠保持不变。串式设计的相邻电池串之间有 2mm 间隙, 而矩阵拓扑没有间距。而组件边界空白区域大小一样; 这使得矩阵拓扑组件玻璃尺寸比串式设计小 1cm。两种组件都包含 3.2 毫米厚的玻璃和防反射涂层、0.45 毫米厚能困住低波段紫外线的 EVA 封装和一块白色 TPT 背板。所用电池的特性列于表 3 中, 而组件拓扑结构列于表 4 中。

结果显示, 矩阵式叠瓦组件的组件功率略小于 (-2W<sub>p</sub>) 串式叠瓦组件的组件功率, 因为前者没有电池串间隔区域带来的底部反射光线 (比较图 17 和 18 中的 k11)。由于矩阵组件较小且其电池集成更密集, 因此在该设计中矩阵拓扑的效率略有增加, 功率密度也有 0.71W/m<sup>2</sup>(+0.36%) 的提升, 如表 5 所示。



图十五: (a) 平行串式叠瓦拓扑, 电池串之间存在空隙。(b) 矩阵式叠瓦拓扑, 无非有效区域。



图十六: 双面矩阵式叠瓦组件俯视图 (等效于 60 片电池组件, 背面)。

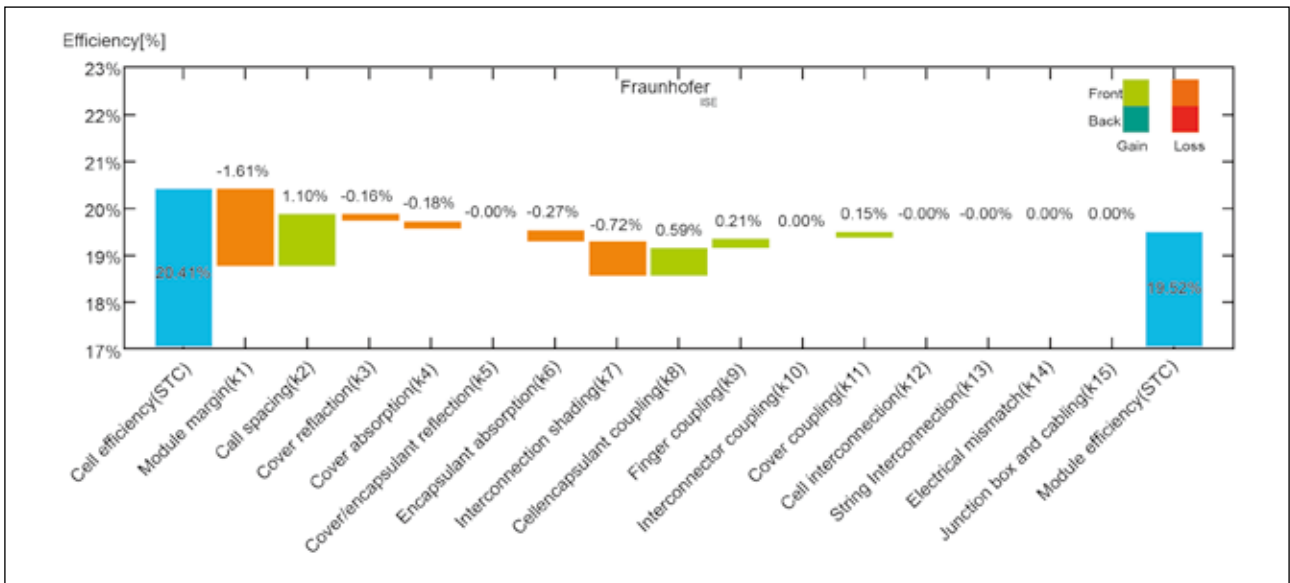
pSPEER technology	
Cell dimensions[mm <sup>2</sup> ]	156.75*22.00
Cell total area efficiency[%]	20.04
Cell power(STC)[Wp]	0.703
Ribbons	n/a

表三: 用于叠瓦组件概念的电池特性。

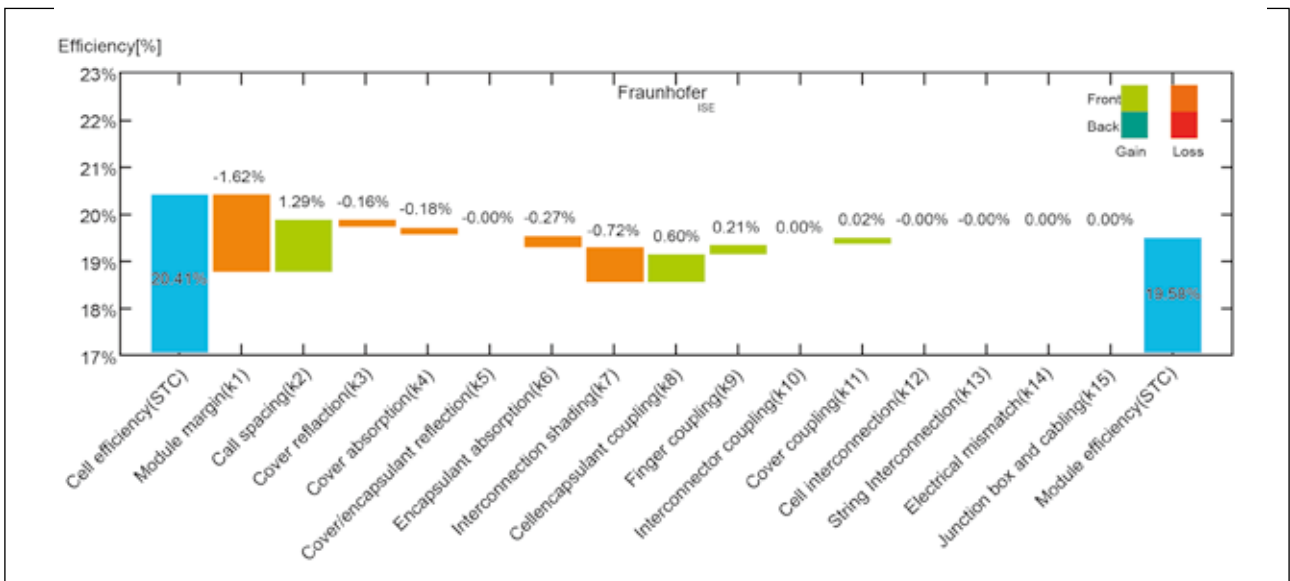
电池组件

	String shingled	Matrix shingled
Number of cells	468	
Overlap[mm]	1.55	
String spacing[mm]	2	-
Top/bottom margins[mm]	36.7	
Side margins[mm]	18	
Glass format[mm]	32*1,667*987	32*1,667*977

表四：两种叠瓦组件概念的拓扑特性。



图十七：在 STC 下串式叠瓦组件的 CTM<sub>efficiency</sub> 图



图十八：在 STC 下矩阵式叠瓦组件的 CTM<sub>efficiency</sub> 图

## 电池组件

	String shingled 1,667*987mm <sup>2</sup>	Matrix shingled 1,667*977mm <sup>2</sup>	$\Delta_{abs}$
Cell input power[Wp]	329.49	329.49	0
Module power[Wp]	323.27	321.15	-2.12
Power density[W/m <sup>2</sup> ]	196.48	197.19	+0.71
Module efficiency[%]	19.52	19.58	+0.06
CTM <sub>power</sub> ratio[%]	98.11	97.47	-0.64
CTM <sub>efficiency</sub> ratio[%]	95.69	95.98	+0.29

表四：两种叠瓦组件概念的拓扑特性。



图十九：在 Intersolar 2019 上展出的曲面矩阵式车顶组件。



图二十：集成光伏移动车顶示意图。

CTM 分析的结果表明，矩阵叠瓦是进一步提高叠层组件效率和功率密度的有效方法。另外，当间隔区域的反射增益不适用时，例如对于具有透明后盖的双面组件，则矩阵方法的优势更大。

汽车、飞机或其他交通工具因其可用空间有限，所以在组件设计时需要新的思路。例如，矩阵叠瓦设计非常适合于 VIPV 应用，该应用要求在部分遮蔽条件下仍然能实现高功率密度和较优的性能。此外，VIPV 应用还要求太阳能电池具有优美的外观。而矩阵叠瓦设计由于没有电池互连焊带，也没有电池间距或电池串间距，正好具有非常均匀的光学外观。

可惜的是，太阳能电池的外观通常呈现黑色，缺乏一些产品在明亮和鲜艳色彩方面所需的特殊外观。Fraunhofer ISE 的仿生 'Morpho Color' (一种光谱选择性光子结构，仿照了蝴蝶用于实现华丽外表的相同物理效果) 则满足了这一要求，并允许光伏组件定制设计能选择多种颜色，但带来的功耗损失仅为 -7% rel[64]。矩阵叠瓦和 Morpho Color 的组合实现了肉眼几乎无法分辨的光伏组件。为了证明这种方法的潜力，我们制造了带有 Morpho-Color 涂层的 2D 弯曲矩阵叠瓦组件，展示了 VIPV 新的可能性 (见图 19)。

高功率密度、改进的遮光耐受性和出色的美观性使矩阵叠瓦设计非常适用于集成光伏应用，如 BIPV 或 VIPV，如图 20 所示。对于要求具备高效率、优美的光学外观和出色的遮光耐受性的光伏应用环境，矩阵叠瓦提供了一个非常有吸引力的解决方案。

## 总结

叠瓦太阳能电池在提升组件输出功率密度方面具有明显的潜力优势。然而，为实现这一目标，必须在整个光伏产业链中克服诸多挑战，涉及从电池加工到组件加工的各个环节。

通过改进金属化布局和先进的激光辅助分离工艺，可以制造出能用于叠瓦组件的 pSPEER 太阳能电池。采用激光划线和机械切割工艺的 pSPEER 太阳能电池在 STC 测量时前表面指定面积的效率  $\eta_f = 21.4\%$ 。当考虑额外的背面辐照度

## 电池组件

$G_r = 100\text{W}/\text{m}^2$  时, 可以实现总特定面积输出功率密度  $P_{\text{out}} = 22.8\text{mW}/\text{cm}^2$ 。

通过数值 Quokka3 模拟方法进行模型分析, 可以更好地理解边界区域中的复合效应。此外, PL 方法也有助于进一步了解边界复合效应。研究表明, 与通过金刚石切割划线和机械切割穿透发射极方法相比, 热激光分离工艺(穿过发射极)更有助于提升电池性能, 例如可以将电流密度提升至  $j_{02,\text{edge}} = 3\text{nA}/\text{cm}$ 。

Fraunhofer ISE 正在开发后金属化 / 分离钝化边界技术 (PET), 能够在不影响金属电极稳定性的情况下进一步提升电池效率。用 PET 工艺制造的 pSPEER 电池 (也称为 pSPEER PET 太阳能电池) 性能可以达到  $\eta_f = 22.1\%$  和  $P_{\text{out}} = 23.5\text{mW}/\text{cm}^2$  (考虑额外的背面辐照度  $G_r = 100\text{W}/\text{m}^2$ )。此外, 还需要适当的 ECAs 材料和固化工艺用于叠瓦互连。ECA 是一种具有粘弹性行为的材料。

矩阵式叠瓦结构可以呈现出一种美学外观, 从而在集成光伏应用领域具有吸引力。矩阵叠瓦组件的一个很好的应用实例是车顶 - 光伏集成组件; 由于 Morpho-Color 玻璃表面可以与汽车的结构无缝融合, 所以几乎无法辨别出是光伏组件。

## 鸣谢

本文报告的工作是在德国联邦经济和能源部 (BMWi) 资助的 PV-BAT 400 项目 (合同号 0324145) 的框架内进行的。作者要感谢 Fraunhofer ISE 光伏部门的所有同事对先进光伏研发的贡献。

## 参考文献

- [1] Chapin, D.M., Fuller, C.S. & Pearson, G.L. 1954, "A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power", *J. Appl. Phys.*, Vol. 25, No. 5, p. 676.
- [2] Dickson, J.D.C. 1960, "Photo-voltaic semiconductor apparatus or the like", US Patent 2,938,938.
- [3] Nielsen, R.J. & Rongved, L. 1963, "Satellite solar cell assembly", US Patent 3,116,171.
- [4] Leinkram, C.Z. & Oaks, W.D. 1973, "Shingled array of solar cells", US Patent 3,769,091.
- [5] Glunz, S.W. et al. 2002, "High-efficiency silicon solar cells for low-illumination applications", *Proc. 29th IEEE PVSC*, New Orleans, Louisiana, USA, pp. 450–453.
- [6] Zhao, J. et al. 1997, "20000 PERL silicon cells for the '1996 World Solar Challenge' solar car race", *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, Vol. 5, No. 4, pp. 269–276.
- [7] SunPower, "SunPower P-Series Solar Panel" [<https://www.sunpower.de/sunpower-p-seriessolar-panel>].
- [8] Canadian Solar Inc., "High density shingle modules" [<https://www.canadiansolar.com/solarpanels/hidm.html>].
- [9] ITRPV 2019, "International technology roadmap for photovoltaic (ITRPV): 2018 results", 10th edn (Mar.) [<https://itrpv.vdma.org/en/>].
- [10] Morad, R. et al. 2015, "Shingled solar cell module", US Patent 2015/0349167 A1.
- [11] Heng, J. et al. 2018, "Module fabrication of solar cells with low resistivity", Tesla Motors Patent 10,115,839.
- [12] Tonini, D. et al. 2017, "Shingling technology for cell interconnection: Technological aspects and process integration", *Proc. 33rd EU PVSEC*, Amsterdam, The Netherlands.
- [13] Rudolph, D. et al. 2017, "Cell design optimization for shingled modules", *Proc. 33rd EU PVSEC*, Amsterdam, The Netherlands.
- [14] Schulte-Huxel, H. et al. 2019, "Interconnectshingling: Maximizing the active module area with conventional module processes", *Proc. 9th SiliconPV*, Leuven, Belgium.
- [15] Mondon, A. et al. 2018, "Comparison of layouts for shingled bifacial PV-modules in terms of power output, cell to module factor and bifaciality", *Proc. 35th EU PVSEC*, Brussels, Belgium.
- [16] Luque, A. et al. 1984, "Diffusing reflectors for bifacial photovoltaic panels", *Solar Cells*, pp. 277–292.
- [17] Kopecek, R. et al. 2015, "Bifaciality: One small step for technology, one giant leap for kWh cost reduction", *Photovoltaics International*, 26th edn.
- [18] Blakers, A.W. et al. 1989, "22.8% efficient silicon solar cell", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 55, No. 13, pp. 1363–1365.
- [19] Dullweber, T. et al. 2016, "PERC+: industrial PERC solar cells with rear Al grid enabling bifaciality and reduced Al paste consumption", *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, No. 12, pp. 1487–1498.
- [20] Lohmüller, E. et al. 2017, "Bifacial p-type silicon PERL solar cells with screen-printed pure silver metallization and 89% bifaciality", *Proc. 33rd EU PVSEC*, Amsterdam, The Netherlands.
- [21] Meier, S. et al. 2017, "Fast co-diffusion process for bifacial n-type solar cells", *Solar RRL*, Vol. 1, No. 1.
- [22] de Wolf, S. et al. 2012, "High-efficiency silicon heterojunction solar cells: A review", *Green*, Vol. 2, No. 1.
- [23] Feldmann, F. et al. 2017, "Evaluation of TOPCon technology on large area solar cells", *Proc. 33rd EU PVSEC*, Amsterdam, The Netherlands.
- [24] Wöhrle, N. et al. 2017, "Solar cell demand for bifacial and singulated-cell module architectures", *Photovoltaics International*, 36th edn, pp. 48–62.
- [25] Baliozian, P. et al. 2018, "Bifacial p-type silicon shingle solar cells – the 'pSPEER' concept", *Solar RRL*.
- [26] Baliozian, P. et al. 2018, "Bifacial pSPEER solar cells for shingle modules", *Proc. 35th EU PVSEC*, Brussels, Belgium, pp. 410–413.
- [27] Lewke, D. et al. 2015, "Thermal laser separation – A novel dicing technology fulfilling the demands of volume manufacturing of 4H-SiC devices", *MSF*, Vol. 821–823, pp.

- 528–532.
- [28] Röth, J. et al. 2015, “Thermal laser separation (TLS) dicing process study – A new technology for cutting silicon solar cells for high-efficiency half-cell modules”, *Proc. 31st EU PVSEC*, Hamburg, Germany, pp. 716–718.
- [29] Lewke, D. 2018, *Untersuchung und Minimierung lateraler Rissabweichungen beim Thermischen Laserstrahlreparieren*. Aachen: Shaker Verlag.
- [30] Koitzsch, M. et al. 2013, “Improving electric behavior and simplifying production of Si-based diodes by using thermal laser separation”, *Proc. 24th SEMI ASMC*, pp. 400–403.
- [31] Eiternick, S. et al. 2014, “Loss analysis for laser separated solar cells”, *Energy Procedia*, Vol. 55, pp. 326–330.
- [32] Baliozian, P. et al. 2018, “Bifacial shingle solar cells on p-type Cz-Si (pSPEER)”, *Proc. 8th SiliconPV*, Lausanne, Switzerland.
- [33] Fell, A. et al. 2017, “The concept of skins for silicon solar cell modeling”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 173, pp. 128–133.
- [34] Fell, A. & Altermatt, P.P. 2019, “Detailed 3D full-cell modeling in Quokka3: Quantifying edge and solder-pad losses in an industrial PERC cell”, *AIP Conf. Proc.*, Vol. 1999, No. 020007, pp. 1–5.
- [35] Wöhrle, N. et al. 2017, “The SPEER solar cell Simulation study of shingled bifacial PERC technology based stripe cells.”, *Proc. 33rd EU PVSEC*, Amsterdam, The Netherlands, pp. 844–848.
- [36] Saint-Cast, P. et al. 2019, “Extracting metal and edge recombination parameters which are compatible with multi-dimensional cell simulations”, *Proc. 36th EU PVSEC*, Marseille, France.
- [37] Fell, A. et al. 2018, “Modeling edgerecombination in silicon solar cells”, *IEEE J. Photovolt.*, Vol. 8, No. 2, pp. 428–434.
- [38] Stolzenburg, H. et al. 2019, “Edge recombination analysis of silicon solar cells using photoluminescence measurements”, *Proc. 9th SiliconPV*, Leuven, Belgium.
- [39] Ruhle, K. et al. 2015, “Impact of edge recombination in small-area solar cells with emitter windows”, *IEEE J. Photovolt.*, Vol. 5, No. 4, pp. 1067–1073.
- [40] Giesecke, J.A. et al. 2011, “Minority carrier lifetime imaging of silicon wafers calibrated by quasi-steady-state photoluminescence”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 95, No. 3, pp. 1011–1018.
- [41] Dicker, J. 2003, “Analyse und Simulation von hocheffizienten Silizium-Solarzellenstrukturen für industrielle Fertigungstechniken”, *Dissertation*, Faculty of Physics, University of Konstanz.
- [42] Fellmeth, T. 2014, “Silicon solar cells for the application in low concentrator systems – Development and characterization”, *Dissertation*, Faculty of Science, University of Tübingen.
- [43] Mulligan, W.P. et al. 2000, “Development of chip-size silicon solar cells”, *Proc. 28th IEEE PVSC*, Anchorage, Alaska, USA, pp. 158–163.
- [44] Zhao, J. et al. 2000, “Peripheral loss reduction of high efficiency silicon solar cells by MOS gate passivation, by poly-Si filled grooves and by cell pattern design”, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, pp. 201–210.
- [45] Hermle, M. et al. 2003, “Analysis of edge recombination for high-efficiency solar cells at low illumination densities”, *Proc. 3rd WCPEC*, Osaka, Japan, pp. 1009–1012.
- [46] Dicker, J. 2003, “Analyse und Simulation von hocheffizienten Silizium-Solarzellenstrukturen für industrielle Fertigungstechniken”, *Dissertation*, Faculty of Physics, University of Konstanz.
- [47] Kuhn, R., Fath, P. & Bucher, E. 2000, “Effects of pn-junctions bordering on surfaces investigated by means of 2D-modeling”, *Proc. 28th IEEE PVSC*, Anchorage, Alaska, USA, pp. 116–119.
- [48] Altermatt, P.P., Heiser, G. & Green, M.A. 1996, “Numerical quantification and minimization of perimeter losses in high-efficiency silicon solar cells”, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, Vol. 4, No. 5, pp. 355–367.
- [49] Kontermann, S. 2009, “Characterization and modeling of contacting crystalline silicon solar cells”, *Dissertation*, University of Konstanz.
- [50] Chan, C. et al. 2017, “Instability of increased contact resistance in silicon solar cells following post-firing thermal processes”, *Solar RRL*, Vol. 1, No. 11, 1700129 (1–5).
- [51] Baliozian, P. et al. 2019, “Post-metallization ‘Passivated Edge Technology’ of separated bifacial shingle pSPEER solar cells”, *IEEE J. Photovolt.* [submitted for publication].
- [52] Fraunhofer ISE 2019, “Adhesive process developed for shingle cell technology”, Press Release [[https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2019/ klebeverfahren-fuer-schindeltechnologieentwickelt.html](https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2019/klebeverfahren-fuer-schindeltechnologieentwickelt.html)].
- [53] Klasen, N. et al. 2017, “Shingled cell interconnection: A new generation of bifacial PV-modules”, *Proc. 7th Worksh. Metalliz. Interconn. Cryst. Sil. Sol. Cells*, Konstanz, Germany.
- [54] Wirth, H. 2018, “Encapsulation form for a shingled photovoltaic module”, WO 2018/087008 A1.
- [55] Geipel, T. & Eitner, U. 2013, “Cure kinetics of electrically conductive adhesive”, *Energy Procedia*, Vol. 38, pp. 340–347.
- [56] IEC 61215-1-1, 2016, “Terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval – Part 1-1: Special requirements for testing of crystalline silicon photovoltaic (PV) modules.
- [57] Klasen, N. et al. 2019, “FEM simulation of deformations in strings of shingled solar cells subjected to mechanical reliability testing”, *Proc. 8th Worksh. Metalliz. Interconn. Cryst. Sil. Sol. Cells*, Konstanz, Germany.

[58] Ward, I.M. & Sweeney, J. 2013, *Mechanical Properties of Solid Polymers*. Chichester, UK: Wiley.

[59] Hädrich, I. 2014, "Unified methodology for determining CTM ratios: Systematic prediction of module power", *Proc. 4th SiliconPV*, 's-Hertogenbosch, The Netherlands.

[60] Pfreundt, A. et al. 2018, "Rapid calculation of the backsheet coupling gain using ray groups", *Proc. 35th EU PVSEC*, Brussels, Belgium.

[61] Hädrich, I. et al. 2014, "Unified methodology for determining CTM ratios: Systematic prediction of module power", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 131, pp. 14–23.

[62] Mittag, M. et al. 2017, "Cell-to-module (CTM) analysis for photovoltaic modules with shingled solar cells", *Proc. 44th IEEE PVSC*, Washington DC, USA.

[63] Schmidt, W. & Rasch, K.-D. 1990, "New interconnection technology for enhanced module efficiency", *IEEE Trans. Electron Dev.*, Vol. 37, No. 2, pp. 355–357.

[64] Bläsi, B. et al. 2017, "Morpho butterfly inspired coloured BIPV modules", *Proc. 33rd EU PVSEC*, Amsterdam, The Netherlands, pp. 2630–2634.

作者介绍



Puzant Baliozian 于 2014 年获得美国贝鲁特大学物理学学士学位，2016 年依靠其在 Fraunhofer IPM 完成的磁热能转换领域的论文工作获得弗莱堡大学的可再生能源工程和管理专业硕士学位。他目前是 Fraunhofer ISE 的在读博士，其主要研究领域是通过激光辅助分离和边界钝化工艺开发 p 型 SPEER 太阳能电池。



Nils Klasen 曾在卡尔斯鲁厄理工学院 (KIT) 学习化学和工艺工程。他于 2015 年在光技术研究所 (LTI) 完成了关于大面积钙钛矿太阳能电池加工的硕士论文。2017 年，他开始攻读博士学位，主要是在 Fraunhofer ISE 的组件技术部门内研究叠瓦式电池互连的可靠性。



NicoWohrle 曾在德国弗莱堡大学学习物理，并依靠他在 Fraunhofer ISE 的硅太阳能电池的光学模拟研究工作，于 2012 年获得学士学位。通过德国联邦环境基金会 (DBU) 的奖学金，他获得了博士学位。他从 2016 年开始在弗莱堡大学从事 PERC 太阳能电池的模拟研究工作。他目前是 Fraunhofer ISE 的研究员，专注于太阳能电池的模拟和在线表征以及 p 型 PERC 太阳能电池的技术开发。



Christoph Kutter 在 2015 年获得了汉堡应用科技大学的环境工程专业学士学位，他的研究领域是光伏电站 LCOE 与组件设计之间的关系。2018 年，他获得了弗莱堡大学可再生能源工程和管理专业硕士学位，发表了建筑集成光伏组件的 CTM 分析论文。作为 Fraunhofer ISE 的科学家，他目前的研究重点是开发用于集成光伏应用的组件技术 (BIPV 和 VIPV)。



Hannah Stolzenburg 曾在哥廷根大学学习物理。她于 2018 年获得了材料和固态物理硕士学位，同时在根特大学学习了一个学期的物理。在她的硕士论文中，她使用深能级瞬态光谱研究了 p 型硅和氧化铝之间的界面。目前她是 Fraunhofer ISE 的一名博士研究生，主要从事硅太阳能电池边界损耗表征和量化研究。



AnnaM ü nzer 在 2015 年获得半导体物理学学士学位，之后她在弗莱堡大学学习可再生能源工程和管理。她从 2018 年开始在 Fraunhofer ISE 担任工程师，目前她正从事叠瓦太阳能电池的 TLS 工艺开发。



Pierre Saint-Cast 于 2007 年获得格勒诺布尔理工学院的硕士与工程学位。2012 年，他获得了德国康斯坦茨大学的博士学位。自 2008 年以来，他一直在 Fraunhofer ISE 工作，他的研究兴趣包括开发太阳能电池钝化层，特别是用于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 层的 PECVD 技术，以及 Si 太阳能电池器件中电传输的分析模型。他目前是 Fraunhofer ISE PERC 太阳能电池的项目经理和产品经理。



Max Mittag 曾在弗莱堡采矿与技术大学学习工业工程和管理。2010 年，他在 Fraunhofer ISE 完成了毕业论文并加入了光伏组件技术部门。他目前是组件效率团队的负责人，工作领域涵盖 CTM 效率分析、技术经济评估以及新 PV 组件概念的开发。



ElmarLohm ü ller 曾在蒂宾根大学和南非伊丽莎白港纳尔逊曼德拉都市大学学习物理。他在弗劳恩霍夫国际教育学院 (Fraunhofer ISE) 从事 p 型 MWT-PERC 太阳能电池开发工作，并于 2010 年获得博士学位。他于 2015 年在弗莱堡大学开始从事 n 型 MWT 太阳能电池研发工作。目前他是 Fraunhofer ISE 的一名研究员，专注于开发 p 型 PERC 太阳能电池。

## 电池组件



Tobias Fellmeth 曾在康斯坦茨大学学习物理学，并于 2009 年凭借他在 Fraunhofer ISE 的 MWT 聚光太阳能电池的开发和表征工作获得学士学位。他随后于 2014 年获得了蒂宾根大学 (University of Tübingen) 博士学位，在那里他主要研究硅基低聚光太阳能电池。他目前是 Fraunhofer ISE 的科学家和项目经理，专注于双面 PERC 和 TOPCon 太阳能电池的开发。



Mohammad Al-Akash 拥有德国约旦大学能源工程专业学士学位。2019 年，他获得弗莱堡大学的可再生能源工程和管理专业硕士学位。他的硕士论文主要涉及 p 型 SPEER 太阳能电池不同后金属化边界钝化方法的评估。



Achim Kraft 曾在汉诺威应用科学大学学习电气工程，并在柏林应用科学大学学习可再生能源。在 2012 年加入 Fraunhofer ISE 攻读博士学位之前，他获得了可再生能源硕士学位。2015 年，他在德国弗莱堡 Albert Ludwig 大学开展硅太阳能电池前表面镀铜金属化领域工作。从那时起，他便担任 Fraunhofer ISE 组件研发部门的互连技术团队的主管，主要从事太阳能电池互连技术和工艺的研发。



Martin Heinrich 于 2015 年获得新加坡国立大学的博士学位，随后在 SERIS 工作了两年，然后在 Fraunhofer ISE 工作了两年。作为弗莱堡大学的团队负责人，他专注于太阳能电池工程研发，他同时还担任太阳能工程在线学习计划的协调专员。2017 年，他加入了 Fraunhofer ISE 的组件技术部门，并担任 PV for Mobility 计划的协调专员。



Armin Richter 于 2014 年获得德国康斯坦茨大学的物理学博士学位，期间主要研究工作是 n 型硅太阳能电池和正面掺硼发射极，以及对氧化铝基硅表面钝化的深入表征。他目前的研究兴趣包括功能薄膜的原子层沉积 (例如钝化层、电子/空穴传输层和 TCO) 以及介电表面钝化层的深入表征，以及高效硅太阳能电池的全工艺流程和 3D 器件模拟仿真的开发。



Andreas Fell 在德国 Fraunhofer ISE 完成硅太阳能电池激光工艺的建模和仿真领域的论文工作。从 2011 年到 2015 年，他担任澳大利亚国立大学的研究员，在那里他开发了硅太阳能电池的激光工艺和器件模拟技术。2016 年和 2017 年，他获得 Fraunhofer ISE 的 Marie-Curie 奖学金，并致力于开发 Quokka3 太阳能电池模拟器并推进太阳能电池建模，这仍然是他目前的研究重点。



Alma Spribille 曾在德国弗伦斯堡欧洲大学学习能源和环境管理。2010 年，她完成了作为 Fraunhofer ISE 工业工程师的文凭论文工作，该工作涉及 MWT 太阳能电池，之后她加入了 MWT 太阳能电池和印刷技术部门。自 2017 年 12 月起，她一直担任结构和金属化团队的工艺整合负责人。



Holger Neuhaus 拥有新南威尔士大学博士学位。他曾担任 Pacific Solar Pty Ltd 的研发工程师，之后在 SolarWorld AG 工作超过 15 年，最初负责电池生产的质量保证和技术开发，后来负责整个价值链的全球研发活动。2018 年，他加入 Fraunhofer ISE，负责组件技术。



Ralf Preu 曾在弗赖堡大学和多伦多大学学习物理学，并在德国哈根大学学习经济学。在获得电气工程专业博士学位后他于 1993 年加入 Fraunhofer ISE，并曾从事过各种光伏领域的工作，包括系统监控、硅太阳能电池和组件技术、表征和仿真等。他目前是 Fraunhofer ISE 光伏生产技术部门的主管，专注于先进硅太阳能电池技术的研发和工业化转移。他同时还在弗莱堡大学担任光伏发电专业的教学工作。

## 垂询

Puzant Baliozian  
弗劳恩霍夫太阳能系统研究所 ISE  
HeidenhofstraBe2  
79110 德国弗赖堡  
电话: +49(0)761 4588 5383  
电子邮件: puzant.baliozian@ise.fraunhofer.de

# 先进测量技术 确保一流精度

梅耶博格为世界各地的客户提供最精确的电池片和组件测量设备已有超过 30 年的历史。太阳能电池片和组件根据其性能等级分类销售，因此，确保精确的性能测量至关重要。电池片和组件检测系统用于检测可能存在的质量缺陷并测量性能。

对于降低光伏发电成本的需求推动着光伏市场不断发展。为了实现这一目标，光伏行业一直在努力提高电池片 / 组件效率，并降低生产成本。因此，设备供应商需要在考虑到生产节拍时间、总运行成本 (TCO) 以及精度和可靠性等因素的情况下，为组件制造商提供高效可靠的解决方案。对于那些旨在提供用于准确测定光伏组件在运行时的电性能的解决方案的测量设备供应商而言，这些因素尤其值得考量。

光伏设备的评估是生产环节的关键问题。光伏组件的商业价值与其在标准测试条件 (STC, 辐照度  $1\text{kW/m}^2$ 、AM1.5 光谱、 $25\text{C}$  的组件温度) 下测得的峰值功率 ( $P_{\text{mpp}}$ ) 直接相关。峰值功率测量的精度直接影响到组件定价，进而影响组件制造商的利润。

为确定在标准测试条件下测得的峰值功率，需要在每条生产线的末端通过阳光模拟器对光伏电池片和每个组件进行测试。阳光模拟器的测量精度是一个关键参数。

为了将完整光伏组件的效率再提高 0.1%，我们目前在研发和生产工艺方面付出了大量的努力，因此不能因为劣质的功率测量而功亏一篑。的确，要想从这些技术创举中获利，必须对功率测量结果进行全面、准确的评估。因此，光伏行业无疑需要同时也应当通过高精度太阳能测量设备获得利益。

任何功率测量伴随的不确定度都可以分为三个主要部分 (参见图 1)：阳光模拟器校准用参考电池片及组件的不确定度、阳光模拟器自身的不确定度以及测量工艺的不确定度 (包括组件温度和布线控制。针对这些不确定度的计算表明，光学影响是除参考电池片及组件之外最重要的影响因素。

因此，为了准确测量光伏组件的功率，使用带高质量光源的测量设备至关重要。为此，IEC 60904-9 现行国际标准定义了光伏测量设备的性能要求，以及 A (最好)、B、C (最差) 三个等级。每个阳光模拟器均用三个字符来定级，依次为光谱匹配度、测试板上的辐照不均匀度以及辐照不稳定性 (参见表 1)。AAA 级阳光模拟器要求光谱匹配度为 AM1.5 参考光谱分布 (六个预先设定的光谱区间，波长跨度为 100 或 200nm，光谱总范围在 400 到 1100nm 之间) 的  $0.75 - 1.25 (\pm 25\%)$ ，不均匀度 2%，长期和短期不稳定性分别为 2% 和 0.5%。

由于该标准是在数年前制定的，并且这些仪器所用到的技术和专业技术知识自此也在不断改善，因此光伏组件制造

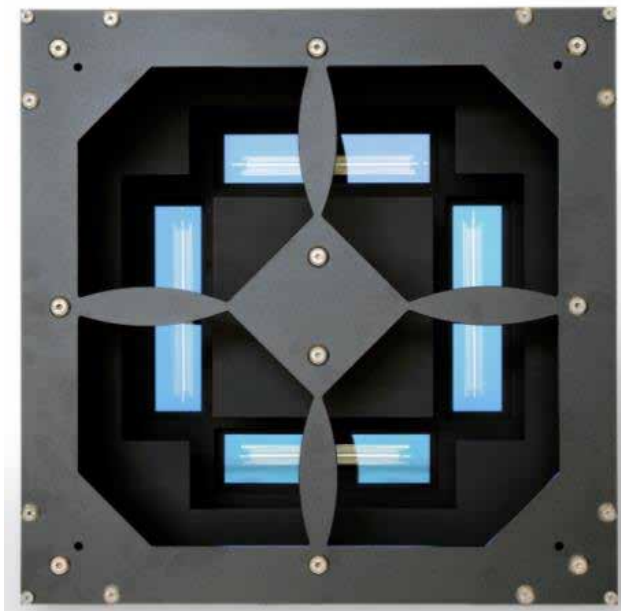


图 1: Pasan 组件测试仪的 A+A+A+ 级光源

IEC 60904-9	Pasan	A-A-A	B-B-B
光谱匹配度	$< \pm 12.5\%$	$\pm 25\%$	$\pm 40\%$
均匀性	$< 1.0\%$	2%	5%
稳定性	$< 1.0\%$	2%	5%
光源角度	$< 15^\circ$	-	-

IEC 60904-1	Pasan HighLight	标准	
功率测量准确度	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.2\%$	

表 1: Pasan A+A+A+ 级性能与现行 IEC 标准的对比

商有权要求使用更精密的仪器。实际上，负责认证各种光伏技术的认证机构以及那些寻求高精度测量系统的负责责任的厂商也同样需要精度更高的仪器，同时他们也希望这些仪器能优于最“基本”的 AAA 级要求。因此，一项规定更严格的全新 IEC 标准应当在近期内实行，而 Pasan 公司的测量设



## 测量设备

备也将根据这一新标准进行定义。

梅耶博格的光伏测量和测试技术不仅能达到目前市面上最高的光谱匹配度和均匀度，并且也能实现高质量的瞬态稳定性。该技术由梅耶博格旗下 Pasan 公司开发，能使测试设备达到 A+A+A+ 级性能，同时也通过了领先光伏机构的认证，目前是市面上使用最广泛的技术。A+A+A+ 级满足市场对于光谱匹配度、均匀度和稳定性最严格的标准。这种顶级性能直接影响到制造商产能的可靠性。

Pasan 测量设备能为光伏生产商带来众多优势。

这款一流的设备提供专业的解决方案，适用于任何类型的组件和光伏技术，无论是 PERC 背钝化技术还是异质结电池片技术。

位于瑞士纳沙泰尔 (Neuchâtel) 的 Pasan 公司在光伏测试系统领域已有 30 余年的丰富经验，其生产的测量设备因可作为质量参考标准而享誉全球。自从与梅耶博格集团合并后，Pasan 公司在光伏测量领域不断设定全新的标准，由此在该领域积累了丰富的专业技术知识。

Pasan 测量设备的高测量精度不仅是各大认证机构和实验室所追求的，而且还能为光伏生产商创造增值。

Pasan 产品组合即将推出的创新产品包括为实现电网平价而设计的全新 Spot<sup>LIGHT</sup> 电池片测试仪系列。该系列设备专为提升性能而开发，并且能通过精确的组件产能测量创造价值。它配备了具有高可靠性的独特接触探针系统，可实现高效的电池片测量。

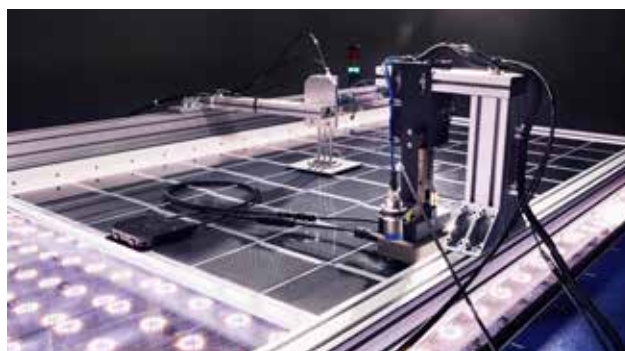


图 2: 组件检测系统 (MIS)，用于检测采用异质结电池片制成的双玻组件



图 3: Spot<sup>LIGHT</sup> 电池片测试仪，用于测试异质结电池片和 PERC 电池片



## 异质结： 卓越的电池片效率

了解梅耶博格卓越的异质结生产技术。HELIA双面异质结生产平台生产的太阳能电池片效率超过24%，并拥有极低的LCOE。

以梅耶博格引领行业的模块化电池片镀膜平台为基础，HELIA系统确保了卓越的电池片钝化品质和均匀性。

异质结及智能网栅连接技术的有力结合确保了极高的发电量和极长的组件寿命。

梅耶博格助您在新能源领域更上一层楼。  
[www.meyerburger.com](http://www.meyerburger.com)

测量设备



图 4: 自动化双面 Grid<sup>TOUCH</sup> 装置

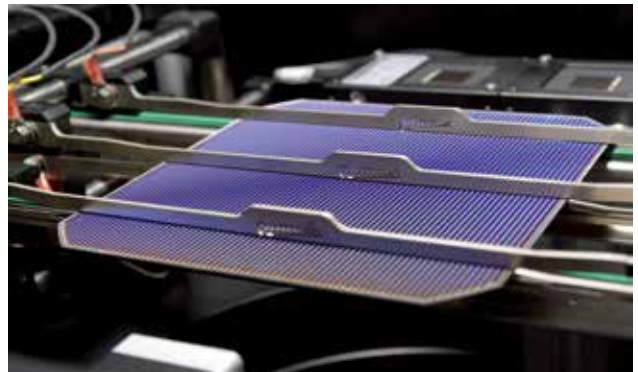


图 5: Soft<sup>TOUCH</sup> 接触探针

Spot<sup>LIGHT</sup> 系列全新设计的高科技滤光片匹配 AM1.5 光谱，并且具有出色的光均匀度。同时，它还能与用于主栅线和无主栅电池片且具有相同高质量标准的测量设备配合使用。独一无二的 Soft<sup>TOUCH</sup> 超薄单体触点专为减小主栅线电池片阴影面积而设计，而 Grid<sup>TOUCH</sup> 解决方案则用于精确测量无主栅、多主栅、IBC 和 MWT 电池片。

调整后的接触材料和设计确保数百万次的接触。受控且均匀分布的接触压力将电池片所受应力降至最低，从而提高了良率。

由于采用了组件测试仪所使用的光源设计和一个能确保高重复性和高可靠性测量的长寿命接触探针系统，Spot<sup>LIGHT</sup> 电池片测试仪能够以较低的成本、极高的产能对电池片额定功率进行准确测量。

氙灯光源

氙灯光源所采用的定制滤光片和 L- 形光源设计可提供 A+ 级光谱和均匀度。闪光灯管经过重新设计后使用寿命提高至 100 万次，同时其冷却系统可大幅提高产能。

对于采用 PERC、异质结和 IBC 电池片等制成的电容性组件，我们开发了一种独特的测量方式，并且已经通过弗劳恩霍夫太阳能系统研究所 (ISE) 的认证。

采用高品质氙气闪光 A+A+A+ 脉冲，LED 脉冲（持续时间达 600ms）可自行校准。

这项创新设计简化了设备操作和用户界面。

高效的温度控制将节拍时间缩短至 1 秒，具体取决于测量工艺。

新一代电子负载提高了测量精度。所有机械和电气接口均实现标准化，以便进行集成。

这项最新的设计成果提高了开机率和良率，从而延长设备的使用寿命和简化维护操作。

因此，梅耶博格用于测量光伏设备功率的解决方案是一台行业领先的高效设备，该设备考虑到了生产节拍时间、低成本尤其是低总运行成本 (TCO) 以及卓越的精度和可重复性。

<https://www.meyerburger.com/en/technologies/photovoltaics/high-efficiency-technologies/high-efficiency-measurement/>

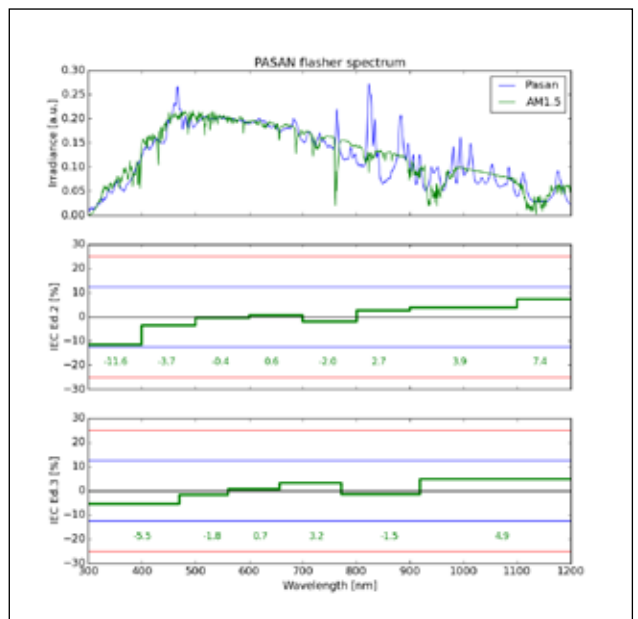


表 2: Pasan A+A+A+ 级光谱由德国莱茵 TÜV 集团测量，并根据 IEC 60904-9 进行评估



图 6: 高品质氙气闪光灯和 LED 闪光，持续时间达 600m

# 双面异质结光伏组件：目前发电效率最高的商用组件及其测试方法

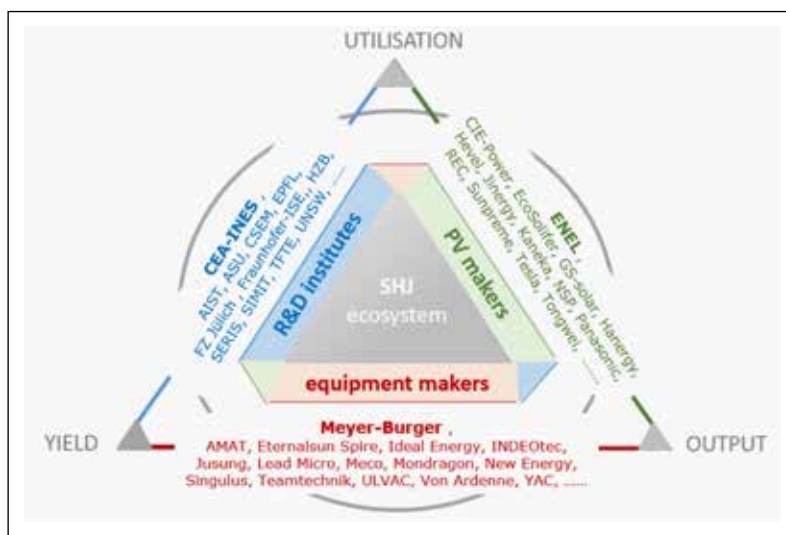
近年来的技术进步和工业制造工艺优化使得硅异质结成为最具吸引力的光伏技术之一，这要得益于其固有的双面特性，提供了最高水平的双面增益。来自 CEA-INES 和 Eternalsun Spire 的研究人员探究了实际户外条件下双面异质结组件的性能稳定性和特性参数，并与本行业最广泛使用的技术—PERC 组件进行比较。

相比于标准的钝化发射极和背局域接触 (PERC) 电池，硅异质结 (SHJ) 太阳能电池只需要更少的制造步骤 (只有 5 到 7 步)，使之工艺控制更为简单 (在均匀性和缺陷率方面)。近年来，SHJ 技术在规模制造准备度方面迅速完善，例如组件效率超过了 24%；可使用质量高且成本低的薄 n 型 c-Si 硅片；新的金属化和互连解决方案；以及用于 PECVD 沉积非晶硅和 PVD 沉积透明导电氧化物 (TCO) 层的低成本的大规模生产设备 [1]。现在至少有 20 家研究机构和试验或生产线上在 6 英寸硅片上实现了该电池效率高于 23% (见图 1) 的成果。最后但并非不重要的一点是，SHJ 技术是一种天然的双面电池技术，其双面性能大约为 90-95%，而 PERC 电池的双面性能只有 70-80% [2]。

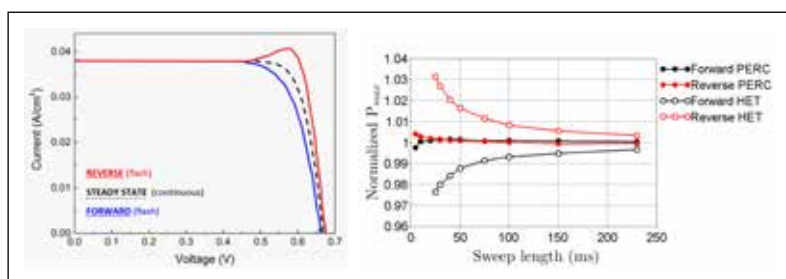
## 如何准确测量异质结效率

新技术及其效率可能需要使用新的测试设备。传统的短脉冲隧道闪光模拟器在 SHJ 的 IV 测量时会出现较大的偏差。如图 2 所示，这是由于高效率、高  $V_{oc}$  光伏组件中固有的电容效应。短脉冲隧道闪光测量得到的效率值会比实际值偏高或偏低 (这取决于 IV 扫描的方向) [3]。即使是使用动态 IV 等校正方法，测量结果 [4] 也会存在  $\pm 0.6\%$  的不确定度，相当于 400W 组件的  $\pm 2.4W$ 。

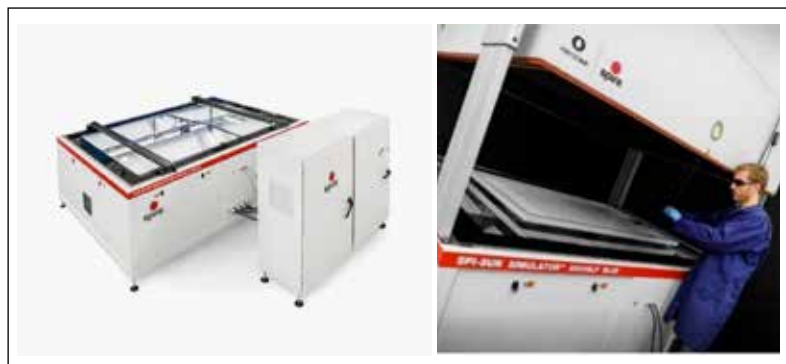
不过，高性能 (和高电容) SHJ 组件的测量挑战可以通过使用长脉冲闪光 (超过 200ms) 来解决。这些长脉冲可以通过 Eternalsun Spire 的 SPI-SUN 5600 SLP 台式太阳模拟器获得，如图 3 所示，该设备同时适用于研发、认证和制造。



图一：SHJ 制造的未来是受生态驱动的。



图二：左图：展示了前表面 (蓝色) 和背面 (红色) 短脉冲扫描的 IV 曲线，并与稳态 IV 测量对比。右图：展示了 PERC 和 SHJ 组件的  $P_{max}$  性能与 Eternalsun Spire 长脉冲太阳模拟器发出的脉冲长度之间的关系。该测试能覆盖 200ms 以上的脉冲长度，这是传统闪光太阳模拟器无法达到的。



图三：左图：来自 Eternalsun Spire 的 SPI-SUN 5600 SLP 台式模拟器。右图：在左图设备基础上增加了顶部温度控制盒，用于单边双面测试。

电池组件

SHJ 在低辐照度和高温下的卓越性能

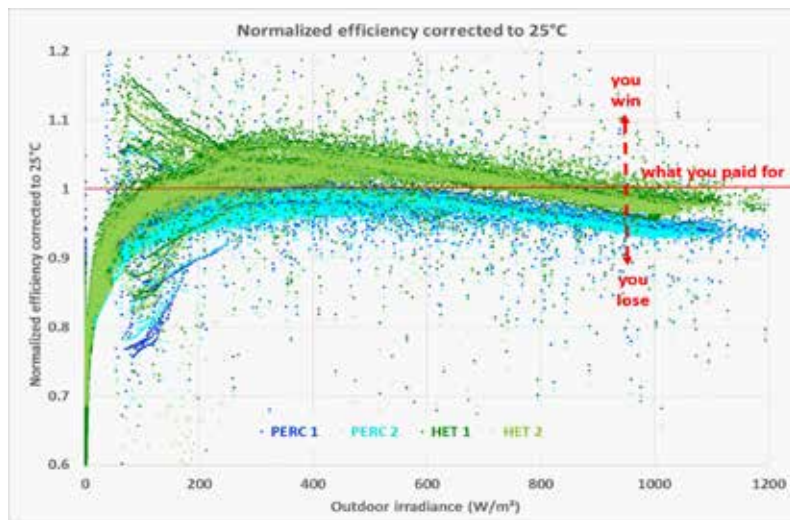
了解 PV 组件在低于标准 STC 辐照度 1,000W/m<sup>2</sup> 时的性能是非常重要的。图 4 显示了在 Bourget-du-Lac( 法国 ) 的 CEA-INES 测试现场在一个月内在 PERC 组件和 SHJ 组件进行户外监测的结果。PERC 组件来自一级供应商，而 SHJ 组件则是在 CEA-INES 的试验线上与 Meyer Burger 和 3SUN/ENEL 合作生产的。结果显示，在这些户外条件下，SHJ 技术在整个辐照度范围内都比 PERC 表现出更高的效率。

图 4 中的户外效率数据是基于室内 STC 条件下测量的效率进行归一化处理的。STC 效率影响着光伏项目投资的组件成本。因此，对于红色“收支平衡”线以上的组件，项目在财务上的表现会优于估计值，如果低于此线，则说明表现更差。

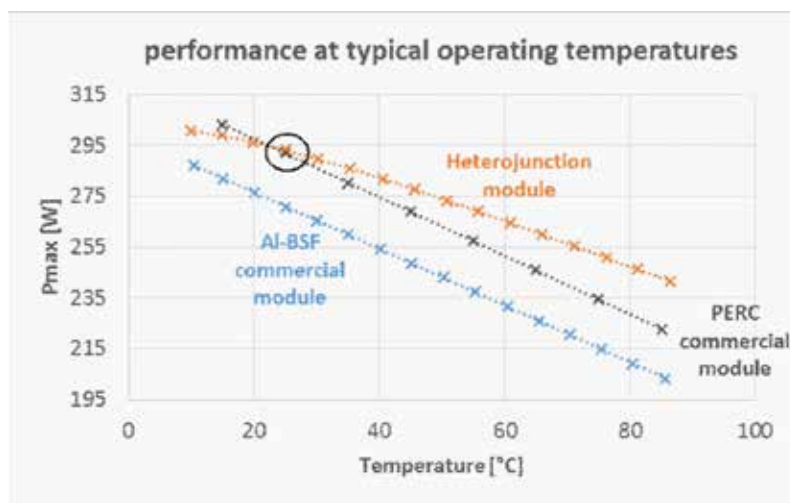
使用组件的温度系数将图 4 中的值校正到 25°C 的工作温度。该温度系数取决于技术，并且是户外发电性能的决定因素。正确确定此温度系数非常繁琐，需要严格的程序和设备，以将测量误差和不确定性降至最低。图 5 展示了 SHJ、Al-BSF 和 PERC 组件的温度系数示例。

图 5 显示了 SHJ、PERC 和 Al-BSF 组件的性能，用图 3( 右 ) 所示的设置测量。可以看出，虽然购买的 PERC 和 SHJ 组件的额定功率均为 295W，但在实际温度工作条件下 (> 40°C)，SHJ 实际上可以提供 5% 的功率增益。

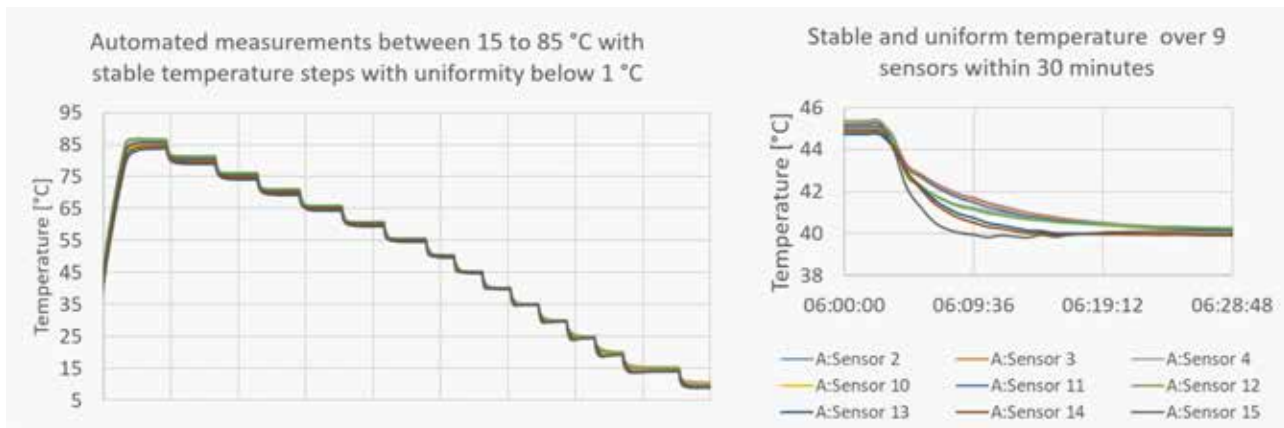
最后，图 6 展示了任一技术 PV 组件在不同温度下准确表征一个太阳辐照度时的功率性能所需的测试程序。此过程可以在如图 3 中的设置中执行，并提供图 5 中所示的结果。



图四：展示了组件温度校正效率与户外辐照度 (W/m<sup>2</sup>) 之间的关系，这是位于 Bourget-du-Lac (France) 的 CEA-INES 发电场在 2018 年 8 月以每分钟一次的频率收集到的数据。同时以两块商用单面 PERC 组件 (蓝色) 作为由 CEA-INES 试制产线制造的两块异质结组件 (绿色) 的参照物。散点图上的效率数据是相对于室内标准效率做了归一化处理的。图上的红色实线是财务收支平衡线，表明 SHJ 组件表现优于 PERC。

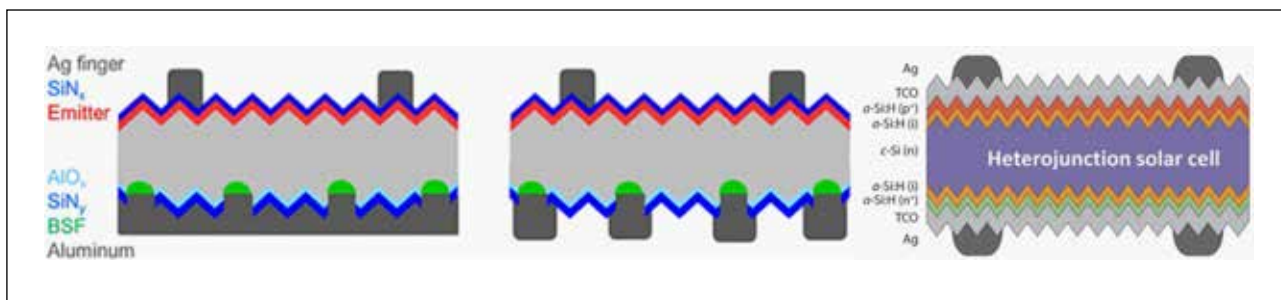


图五：分别展示了 SHJ、PERC 和 Al-BSF 组件在由 Eternalsun Spire labfla-sheer (带温度控制盒) 生成的一个太阳辐照度下 Pmax 与温度的关系。

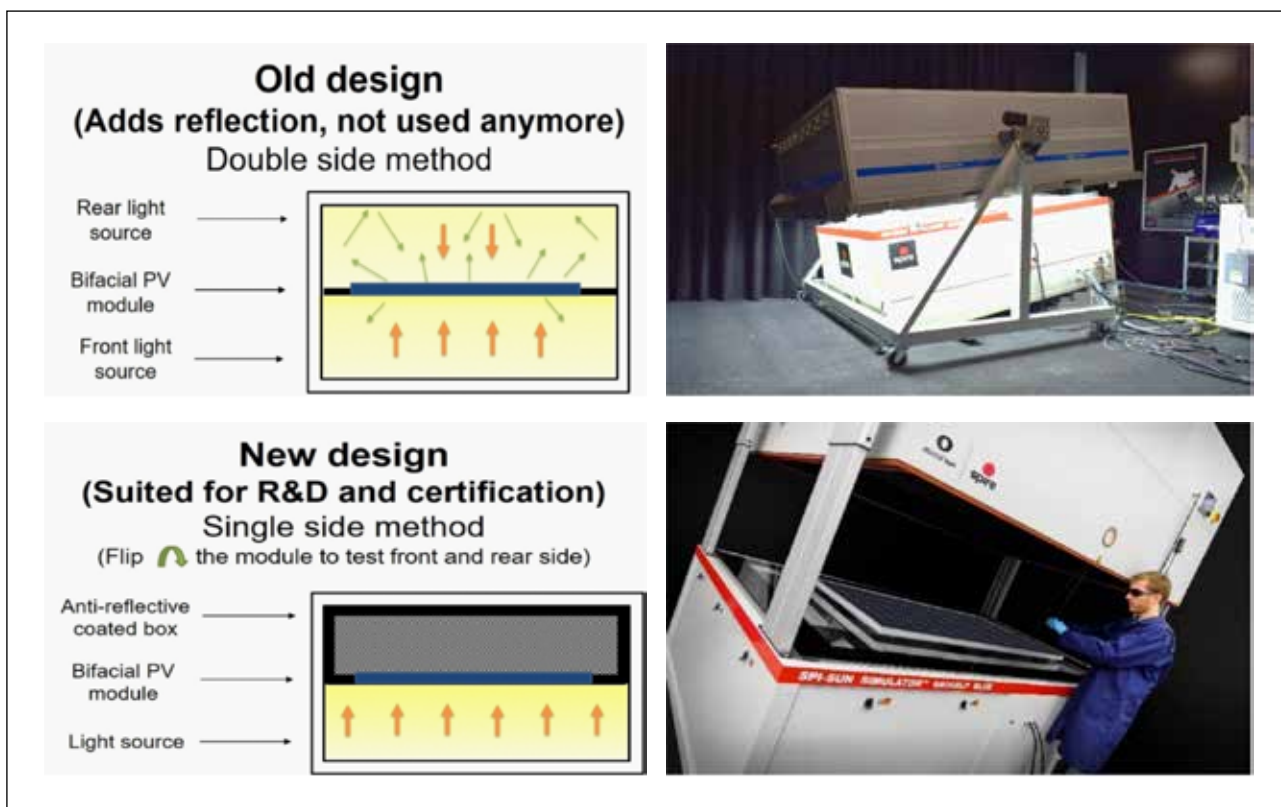


图六：在图五显示的 Pmax 与温度关系测试中，测量到光伏组件上 9 个点的温度与时间的关系。值得注意的是，在精确 Pmax 测试中温度是稳定的。图三展示了 Eternalsun Spire 装置的测试表现。

电池组件



图七：分别展示了单面 PERC（左）、双面 PERC+ 电池（中间）和异质结电池（右）的结构图。



图八：展示了由 Eternalsun Spire 测试的两种双面表征方法。

这款带温度控制盒的 SPI-SUN 5600 SLP 台式模拟器可以为整个组件提供非常高的温度均匀性。IEC 标准建议整个组件内的温度差低于 2℃。该设备的性能超出了此要求，因为它的温度差低于 1℃，并适用于 10℃ 至 85℃ 区间内的所有温度。

### 双面增益与低风险（高精度）预测指导

双面性被描述为当双面都在 1 个太阳 (1 SUN) 辐照度下照射时，正面与背面的发电功率之比。虽然 ISFH [5] 提供的双面 PERC + 电池具有 80% 的双面性，但异质结 (SHJ) 电池却得益于其对称结构而使其双面性更高 (约 95%)，如图 7 所示。

电池和组件的双面性可被视为直接增益，通过背面反照率和利用创新光伏系统安装方式，可提供高达 30% 的发电

电输出增益。后者的一个例子是将组件垂直放置并东西朝向，这能最大限度地减少了污染损失并使土地利用 (农业) 最大化。Fraunhofer ISE [6] 对这种垂直安装的研究表明，与 PERC 相比，异质结组件的双面性提高了 20%，使其价格差异达到 20% 或 30% (对于平衡电力成本 (LCOE) 而言)，分别为 0.04 欧元和 0.06 欧元 / 千瓦时。

为了强调这种发电增益，国际电工委员会 (IEC) 负责制定光伏组件的测试标准，决定在三种情况下标记双面光伏组件的性能。第一种，正面辐照度 1,000W/m<sup>2</sup>，背面辐照度 0W/m<sup>2</sup>；第二种，正面辐照度 1,000W/m<sup>2</sup>，背面辐照度 100W/m<sup>2</sup>；第三种是正面辐照度 1,000W/m<sup>2</sup> 和背面辐照度 200W/m<sup>2</sup>。该标准标记为 IEC 60904-1-2。

此外，该标准还描述了测试上述三种情况下发电性能的两种室内实验方法。这两种测试方法分别是双面法和单面

电池组件

法。

双面法是正反两面同时使用两种光源照射，设置了上述三种辐照度水平。而单面方法则分别依次照射前侧和背面，其中照射前表面时设置较高的辐照度，从而补偿缺少的背面辐照度。请注意，这两种方法都经过 IEC 认证，都可以用于双面光伏组件的研发测试和认证，因为它们产生的性能结果是相同的。

虽然看起来双面方法更加真实，但实际上它增加了测量的复杂性。这是因为两个光源之间存在不均匀的反射，如图 8 中的绿色箭头所示（顶部）。请注意，IEC 60904-1-2 标准的要求之一是反射小于  $<3\text{W/m}^2$ ，这意味着一个太阳辐照度的 0.3%。而单面方法使用带有抗反射涂层的空腔，可将反射降低至  $<3\text{W/m}^2$ ，这一点已经通过 Eternalsun Spire 的温度控制实验室闪光灯 (TCLF) 对 IEC 60904-1-2 规定的 9 个点进行验证和测试，如图 6 所示。

为了进一步证实单侧双面 PV 测试方法效果，CEA-INES 采用了内部研发的测试方法，称为“Mother-PV” (Meteorological, Optical and Thermal History for the Energy Rating of PhotoVoltaics) [7,8]。这种方法测量不同水平的总辐照度约  $1,000\text{W/m}^2$  的组件性能，在这种情况下适用于双面组件的两侧，用于模拟任何总（前 / 后）辐照度水平的性能。

该方法的主要方程是：

$$P_{\text{MAX}} = I_{\text{SC}} \cdot (A + B \cdot I_{\text{SC}} + C \cdot I_{\text{SC}}^2 + D \cdot \ln(I_{\text{SC}}) + E \cdot \ln^2(I_{\text{SC}}))$$

其中 A、B、C、D 和 E 是模型的拟合参数。

总之，在将该方法应用于四种不同类型的双面组件之后，我们发现在  $I_{\text{sc}}$  不变的情况下，如果只有正面或背面产生电流，则这些双面组件的表现都相似，因此没有任何寄生或协同效应 [9]。

这个结论证明了双面组件的单面表征，这也是在 2019 年 3 月发布的 IEC TS 60904-1-2 测试标准中提出的。

电势诱导衰减组件的恢复能力

电势诱导衰减 (PID) 是过去十年光伏电站运行中遇到的难题之一。这个问题最初是 1978 年由 JPL [10] 报道的，并在 2010 年左右大规模爆发，这是因为组件的工作电压越来越高，远高于最初设计的 600V。另外，在欧洲被广泛采用的低成本无变压器逆变器也使这种衰退情况进一步恶化。从物理学的角度来看，PID 源于使用不允许接地的无变压器逆变器，使得接地组件框架和系统负极附近的光伏电池之间出现电压差。

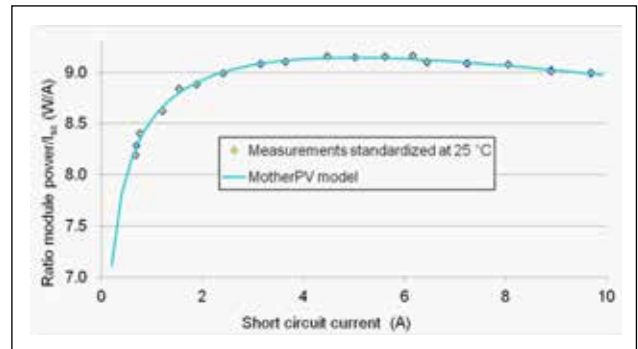
该电压差将可移动的钠离子从玻璃驱动到在电池连接处并在不断累积，从而导致分流型 (PID-s) 的 PID，降低 FF 和  $R_{\text{sh}}$ 。当这些钠离子积聚在抗反射 / 钝化层中时，它们引起偏振型 PID (PID-p)，降低  $I_{\text{sc}}$  和  $V_{\text{oc}}$ 。

对于前侧和背面都是采用玻璃封装的双面组件，电池的正面和背面可能都会出现 PID 问题。对于单面 PERC 电池，可能已经解决了前端的 PID 问题，但是一旦 PERC 电池变成双面，它们的背面，特别是  $\text{AlOx} / \text{SiNx}$  介电钝化层，可能成为 CSP Halle[11] 或 SERIS Singapore[12] 最近证明的弱点，即两者都证明来自背面的 PID 衰减速度是来自正面的四倍。

尽管 PERC 前端受到分流型 PID 的影响，但是背面因极化类型的 PID 而退化：正电荷被吸引到  $\text{AlOx} / \text{SiNx}$  叠层并消除了层堆叠的场效应钝化。与 PERC 单元结构相反，SHJ 结构是完全对称的，并且代替电介质钝化和抗反射层 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiN}$ )，应用 a-Si 和 ITO 的超薄层。正如松下公布的商用 HIT 组件所报告的那样，这可以完全抵抗潜在的衰减 [13]。

光和温度诱导组件衰减的恢复能力

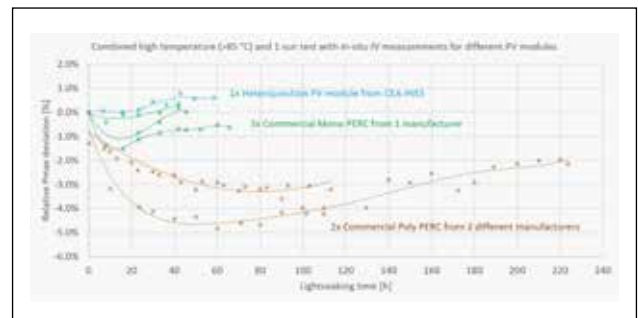
光照和高温诱导的衰减 (LeTID) 是一种长期的衰减和再生现象，可能需要数年时间才能出现在发电现场。我们评估



图九：Mother-PV 方法：分别展示了测量与模拟方法得到的 P<sub>MAX</sub>/I<sub>SC</sub> 比值与 I<sub>SC</sub> (25℃下) 的关系。作为辐照度自参考的短路电流 I<sub>SC</sub> 描点。

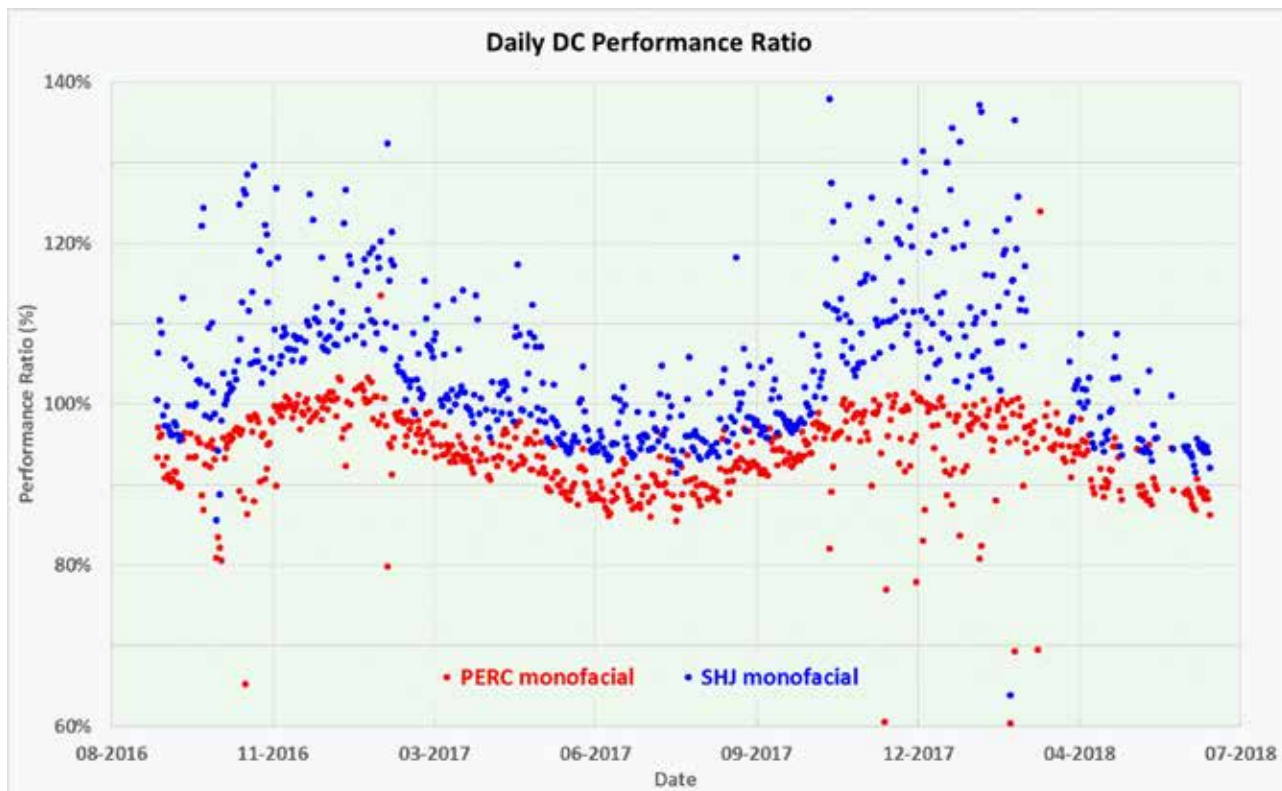


图十：气候室太阳模拟器 (CCSS)，能够对不同光伏技术组件进行加速温度、辐照度和湿度测试。

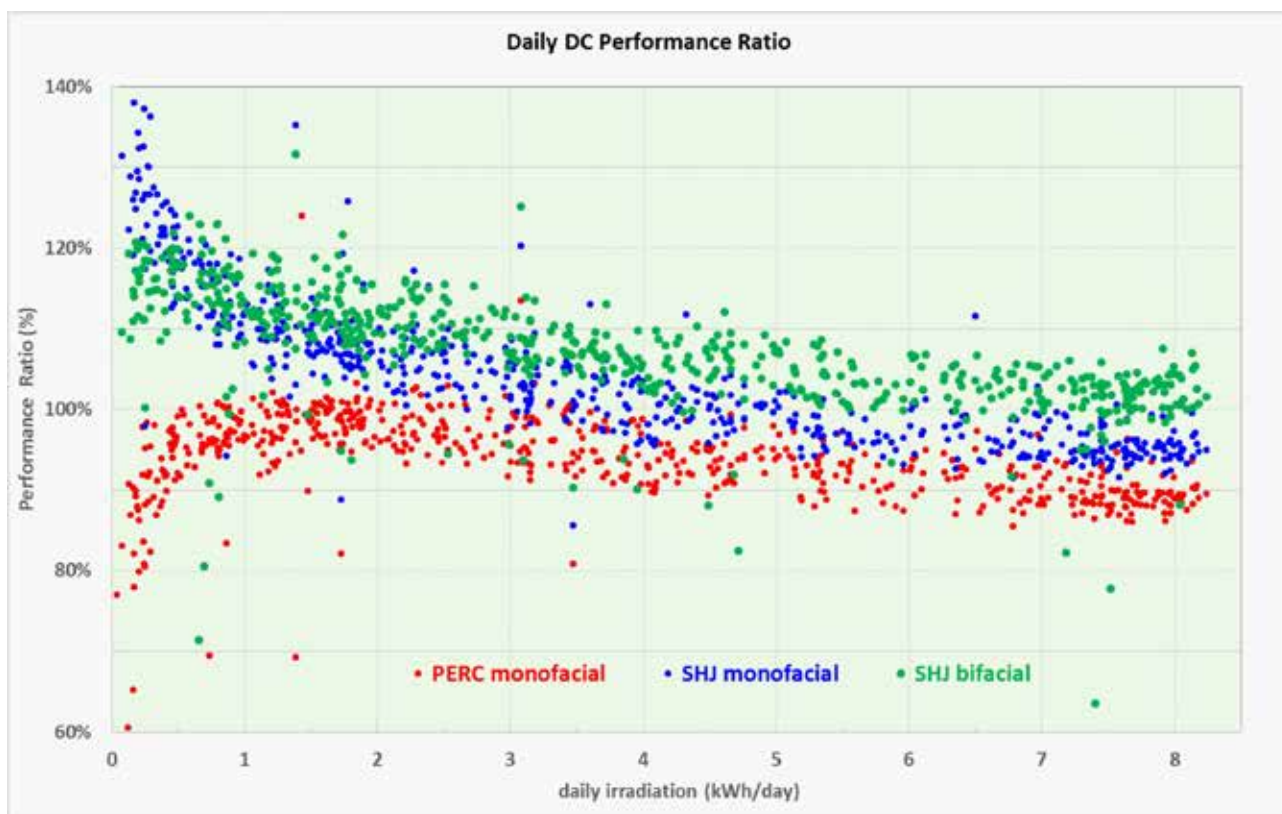


图十一：对来自不同制造商的 PERC 组件进行现场 LETID 测试，显示这些组件可能出现高达 5% 的性能衰减，并在随后出现不同程度的恢复；而来自 CEA-INES 的异质结光伏组件则未发生任何的衰退，反而反向提升了约 1% 的性能。

电池组件



图十二：对位于 Bourget-du-Lac (France) 的 CEA-INES 发电场的组件在 2016-2018 年期间户外监控到的每天平均发电性能表现。红色散点代表单面 PERC 组件，蓝色散点代表单面 SHJ 组件。



图十三：组件在 2016-2018 年期间户外监控到的每天平均发电性能表现与每天辐照度的关系。

## 电池组件

了一级供应商的商用 PERC 组件的 LeTID 机制，并将其与 CEA-INES 与 Meyer Burger 和 3SUN / ENEL 合作开发的 SHJ 组件进行了比较测试。

我们使用 Eternalsun Spire 公司提供的集成 AAA 太阳模拟器的专用气候室对 LeTID 衰减和再生的动力学进行了研究，如图 10 所示。该装置可用于测试任何光伏技术（如硅、薄膜或钙钛矿）的电池和组件的可靠性、衰减、再生和亚稳定性，并能控制 IV 测量时的辐射、温度和湿度。

显然，是因为 LETID 机制的动态特征促使了在这个专门的气候室中进行这种现场测试。如果没有集成太阳模拟器，则间隔着进行 IV 测量，并且可能很容易漏掉重要节点的测试信息，例如最大衰退点和开始恢复点。图 11 展示了不同的市场上在售 PERC 组件的测试结果。

如图 11 所示，已经根据上述类似的方式在 SHJ 组件上测试了 LeTID 动力学。可以观察到 LeTID 测试条件不会引起 SHJ 组件的退化，反而使组件功率有效增加了几个百分点。这种改善似乎与  $V_{oc}$  的增加密切相关，这有点类似于在 SHJ 组件的中等温度 (32°C) 下光照时出现的  $V_{oc}$  增加 [14,15]。这与 PERC 组件的 LeTID 衰减形成对比，因为 PERC 组件的  $V_{oc}$ 、 $I_{sc}$  和 FF 都出现衰减。

SHJ 技术对 LeTID 的固有恢复特性要归因于有利的氢动力学性能（较低的饱和度和渗出），因为与 PERC（约 800°C）相比，电池工艺温度相当低 (<200°C)，同时与 PERC 技术的钝化层相比，a-Si:H 钝化层更薄 (<10nm)。此外，在基于 n 型硅片的 SHJ 电池中不存在硼元素，这有助于消除光照时的  $V_{oc}$  衰减。

### 这一切是如何影响户外工作的

图 12 显示了 Bourget-du-Lac CEA-INES 现场两年内的户外性能监测结果（见图 14），比较了由 10 块商用 PERC 组件组成的光伏系统，和在 CEA-INES 的电池和组件试生产线上制造的另外 10 块 SHJ 组件组成的光伏系统。

该图显示了典型的季节性影响，冬季由于低于 STC 温度而具有更高的性能比。由于 SHJ 组件的温度系数低于 PERC 组件的温度系数，季节性温度无法解释 SHJ 和 PERC 在冬季的较大性能偏差。为了更好地将这些监测数据与图 4 中的户外数据进行比较，我们将结果重新绘制为每日辐照度



图十四：Bourget-du-Lac (France) 的 CEA-INES 测试场一角。

的函数（以 kWh / 天为单位）。我们还在图中添加了一个双面 SHJ 组件（绿色）。

图 13 中的结果显示单面 SHJ 组件的平均性能比其单面 PERC 组件高 8%。对于双面组件，这种差异更是高达 14%。图 13 还显示了 SHJ 组件在低辐照度水平下的更好性能。这解释了在图 12 中观察到的冬季 PERC 和 SHJ 组件之间的较高偏差，因此冬季更频繁地出现低辐照度天气。

上述 SHJ 组件的有利结果也可以从 NREL [16] 报告的已经超过 10 年以上的异质结组件的年度组件退化率结果得到证实。他们报告每年下降  $0.67 \pm 0.18\%$ （线性化），这在统计上与基于 c-Si 的光伏系统相似。他们得出结论，由于电池中复合的增加以及少数载体寿命降低了两倍，衰减主要是  $V_{oc}$  的降低。TUV Rheinland 在四种不同的气候条件下对 SHJ 组件进行了为期两年的户外评估，也得出了类似的结论 [17]。

### 结论 / 展望

硅异质结组件在加速环境室内的 IV 测试结果表明它们对 LeTID 衰减不敏感，与在类似条件下测试的商用 PERC 组件相反。同样，没有检测到 SHJ 组件的 PID 衰退迹象。使用单长脉冲闪光对于异质结组件的精确 IV 测量至关重要。关于低光性能和温度稳定性方面，SHJ 组件的性能也优于 PERC 组件。最后，在扩展户外监测期间对单面 SHJ 和 PERC 组件的比较表明 SHJ 组件具有优越的性能。

### 参考文献

- [1] C. Ballif et al, Solving all bottlenecks for silicon heterojunction technology, PV International, Vol.42, 85-97, March 2019
- [2] T.S. Liang et al., A review of crystalline silicon bifacial photovoltaic performance characterisation and simulation, Energy Environ. Sci. 12, 116 – 148, 2019.
- [3] R.A. Sinton et al, Assessing transient measurement errors for highefficiency silicon solar cells and modules, IEEE J. of Photovoltaics 7(6), 1591-1595, 2017
- [4] C. Monokroussos et al., Accurate power measurements of high capacitance PV Modules with short pulse simulators in a single flash, proc. EUPVSEC conf., 2012.
- [5] T. Dullweber et al., PERC+: industrial PERC solar cells with rear Al grid enabling bifaciality and reduced Al paste consumption, Progress in Photovoltaics 24 (12), 1487-1498, 2016
- [6] L. Bodlak et al., Price-bifaciality relationship of bifacial modules in vertical east-west oriented PV systems, proc. EUPVSEC conf., Amsterdam, 2018
- [7] A. Guérin de Montgareuil et al., A new tool for the MotherPV method: modeling of the irradiance coefficient of photovoltaic modules, proc. EUPVSEC conf., 2009
- [8] A. Guerin de Montgareuil et al. , From Watt-peak to Watt-hours : the MOTHER-PV method and IEC61853 standard, proc.



## 电池组件

EUPVSEC conf., 2013

[9] G.Razongles et al., Bifacial photovoltaic modules: measurement challenges, Energy Procedia 92, 188-198, 2016

[10] A Hoffman et al., Environmental qualification testing of terrestrial solar cell modules, NASA proceedings PVSC conf. 1978.

[11] K.Sporleder et al. , Local corrosion of silicon as root cause for Potential - Induced Degradation at the rear Side of bifacial PERC solar cells, Physica Status Solidi Rapid Research Letters, 2019

[12] W. Luo et al, Elucidating potential - induced degradation in bifacial PERC silicon photovoltaic modules, Prog Photovolt Res Appl. 26 (10), 859 – 867, 2018.

[13] T.Ishiguro et al, Study on PID resistance of HIT® PV modules, PV module reliability workshop, Golden (USA), 2013

[14] E. Kobayashi et al, Light-induced performance increase of silicon heterojunction solar cells, Applied Physics Letters 109, 153503, 2016.

[15] J.Veirman et al., Positive aging of heterojunction solar cells under illumination: kinetics, amplitude and stability, Silicon-PV workshop, Leuven (B), 2019

[16] D.C. Jordan et al., Silicon heterojunction system field performance, IEEE J. Photovolt. , Vol.8 (1), 177-182, 2018

[16] M.Schweiger et al., Performance stability of photovoltaic modules in different climates, Prog. Photovolt: Res. Appl. 25 (12), 968-981, 2017

## 作者介绍



Eric Gerritsen 于 1985 年加入飞利浦研究实验室 (荷兰埃因霍温) 从事离子注入研究, 并在荷兰特文特大学 (荷兰) 学习工程物理学, 获得博士学位。他于 1990 年在格罗宁根大学工作。随后, 在他 2008 年加入 CEA-INES 从事组件技术及其应用的相关工作之前, 他还在德国、荷兰和法国的飞利浦 (照明、半导体) 担任过多个职位。



Elias Garcia Goma 拥有荷兰代尔夫特理工大学 PVMD 集团的太阳能专业硕士学位。自 2016 年起, 他开始在 Eternalsun Spire 从事创新光伏组件表征方法的研究工作, 并且是 IEC TC82 WG2 的活跃成员。他的最新研究课题包括: SHJ 组件、双面 PV、LeTID 和钙钛矿等。



Guillaume Razongles 2007 年毕业于法国斯特拉斯堡工程学院的“电信物理学”专业, 并于 2009 年加入 CEA-INES。在那里, 他一直在从事光伏组件在户外条件下的性能研究、光伏市场调研和分析光伏的 LCOE 和生命周期评估。



Stefan Roest 是 Eternalsun Spire 的联合创始人和首席技术官, 该公司通过对光伏组件的效率和可靠性进行最高精度的测量, 促进了太阳能产业的发展和增长。Stefan Roest 是 IEC TC82 WG2 的活跃成员, 参与了多个不同技术的光伏组件测试相关项目团队。



Lionel Sicot 于 1999 年获得法国奥赛大学材料物理学博士学位, 主修有机太阳能电池。从 2000 年到 2007 年, 他在 CEA 的有机成分实验室从事这一领域的工作。2007 年, 他加入了 CEA-INES 的光伏系统实验室, 自 2017 年以来一直致力于双面异质结技术的产业化。



Benjamin Commault 于 2011 年作为一名材料工程师毕业于 Polytech Nantes 公司, 此后一直在法国太阳能研究所 (INES) 从事光伏领域的研究工作。在 CEA-INES, 他在异质结太阳能电池的开发和生产方面积累了两年多的经验, 自 2014 年以来, 他一直致力于 C-Si 光伏组件的研发。



Aude Derrier 在巴黎矿业技术公司的 CEMEF 实验室获得了材料、加工和建模方面的高级硕士学位。她在所罗门和埃默运动鞋公司工作了 15 年, 担任研发项目经理和功能性聚合物和复合材料专家。2017 年, 她加入了 CEA-INES, 目前担任光伏组件实验室负责人。



Yannick Veschetti 在斯特拉斯堡大学获得了晶体硅光伏领域的物理学博士学位。他于 2005 年加入 CEA-INES, 从事高效硅晶体太阳能电池研发工作。2013 年至 2015 年, 他在同质结硅太阳能电池实验室负责 n 型硅方面研发工作。他目前负责领导 CEA-INES 的光伏组件部门。

# 卡塔尔太阳能研究和测试中心 “开始营业”

沙漠环境会对光伏组件的性能和可靠性产生什么样的影响？在极端高温、充满灰尘的环境中，同时也考虑到含盐量和湿度条件的影响，人们可以采取哪些措施使产能达到最高？这些问题是卡塔尔环境与能源研究所（QEERI）关注的部分核心问题，这一机构正在加强与全球太阳能公司的合作。

QEERI 是位于多哈的一处研究、开发和创新中心。长期以来，QEERI 一直是太阳能沙漠测试的首选目的地。自 2013 年开放户外测试设施以来，QEERI 已经测试了来自不同制造商的 30 多种光伏技术。严酷的温度、湿度和土壤条件令其拥有了户外测试的完美环境。最近，QEERI 搬进了新家——一座拥有最为先进的材料和测试实验室的专用研究大楼。

通过对这些能力设施的投资，QEERI 致力于加强与太阳能、水和环境领域的公司的合作。去年，QEERI 推出了太阳能研究和测试平台 Solar Consortium，其成员包括帝斯曼、韩华 Q-Cells、Nice Solar、道达尔以及当地电力局 Kahramaa。

QEERI 能源中心高级研究总监 Veronica Bermudez 博士表示：“基于我在薄膜光伏行业的背景，我认为可靠性和运行条件非常重要，这些天气条件会为可再生能源社区创造机遇和优势。所以，这就是 QEERI 的工作重心所在。与此同时，我们还在业内展开了更紧密的合作。这就是我们会对当地太阳能项目产生最大影响、创造最高效益的原因，例如即将到来的 350MW 光伏电站项目。”

QEERI 的 Solar Consortium 平台由两部分组成：会员公司可以在 QEERI 的室外和室内设施测试它们的技术。测试数据完全保密，同时会员公司拥有对测试数据的所有权。另一部分是小组研究项目，所有小组成员合力解决共同感兴趣

的问题。第一个小组项目是真实环境中清洗工艺对光伏涂层磨损的研究，这一项目将于今年晚些时候开始。

Bermudez 博士表示：“我们希望将 Solar Consortium 打造成一个有吸引力的平台，通过这个平台，国际化公司和地方当局可以与我们的合作解决关键问题——恶劣气候条件下的可靠性、老化和监测。对于取得的初始进展和已经加入的非常棒的合作伙伴，我们感到非常高兴。现在我希望能够继续保持增长。对于各家公司来说，没有哪个地方比卡塔尔更适合进行沙漠测试了。”



# QEERI 太阳能联盟

- ▶ 太阳能设备沙漠测试
- ▶ 合作研究项目
- ▶ 组件测试实验室
- ▶ 自2013年以来，对60多款组件进行了现场测试

欲获取更多信息，请发邮件至  
[qeeri-communication@hbku.edu.qa](mailto:qeeri-communication@hbku.edu.qa)



# 台湾太阳能在艰难中转型 绿电交易市场开始兴起

文 / 肖蓓 **PVTECHPRO**



图 1, 由新日光、昱晶能源和升阳光电组合成立的联合再生能源股份有限公司 (URE) 则从侧面折射了台湾太阳能企业及地区政府应对这一波行业低谷的态度

过去两年, 在全球光伏产业制造产能与竞争格局双重变动下, 台湾太阳能制造业经历了一段灰暗的“阵痛”时期, 尤其是电池领域, 曾经向世界供应优质电池的典范公司纷纷遭遇亏损、重组困境。而在更早前, 硅片铸锭领域的成就也逐渐被中国光伏公司所超越。

台湾地区硅片、电池出货量急剧下降, 多数企业或淘汰或退出或转型, 行业弥漫着灰心、沮丧的情绪。

为了帮助处境艰难的台湾太阳能行业实现稳定过渡, 台湾地区政府陆续发布了《电业法》、《能源发展纲领》、《再生能源发展条例》等一系列振兴政策, 希冀通过提高可再生能源使用比例等方式, 开发本地应用市场以提振台湾太阳能产业。

2019年4月12日, 台湾地区审核通过的《再生能源发展条例》修正案确定了2025年再生能源推广总量超20GW的目标。台湾地区政府还宣布2025年终止核能发电, 电力来源分布配比将划分为天然气(50%)、火电(30%)和可再生能源(20%)。

基于新的政策, 台湾太阳能市场环境得到一定改善, 尤其在终端电站市场, 可以看到安装量的变化, 截至2019年5月, 台湾光伏总装机达到约3.3GW。

新形势下, 不少台湾新能源、太阳能公司蠢蠢欲动, 展开了战略转型和相关布局。

## “阵痛”中转型

台湾地区电池生产量虽然排名全球前列, 但组件产能较小, 在政策创造了内需空间后, 不少太阳能公司开始往组件制造转型。

元晶太阳能(TSEC)称公司拥有目前全台湾最大的光伏组件产能, 当前产能800MW, 计划2020年增加到2GW。而在两年前, 元晶太阳能的主营业务是电池, 2018年该公司电池产能为2GW。

“因为中国大陆电池领域的竞争越来越大, 我们将重心转向组件, 通过去年的转型, 2018年公司实现组件出货100MW, 2019年会进一步扩大。为了避免同质化, 我们生产差异化组件。”元晶太阳能副总经理江郅豪在接受PV-Tech采访时说到。

元晶太阳能以前的主要客户来自中国大陆, 战略调整后, 他们在力图避免持续受到中国大陆的影响。

江郅豪表示: “目前, 我们的主要机会在台湾, 台湾太阳能公司这两年处在一个比较艰难的时期, 我们在调整, 地方政府也有一些积极的想法, 在支持台湾地区太阳能产业的发展, 这对我们来说是机会。”

除了电池组件制造, 元晶管理团队对终端电站也充满了兴趣, 并展开了一定涉足, 比如EPC业务, 目前项目储备量达到300MW。

相对于元晶太阳能的独立面对, 由新日光、昱晶能源和升阳光电组合成立的联合再生能源股份有限公司(URE)则从侧面折射了台湾太阳能企业及地区政府应对这一波行业低谷的态度。

联合再生能源公司在9个月前完成了合并, 合并后的主营业务版块分为三块: 电池、组件和光伏电站系统。其中电池产能2.47GW/年, 组件产能850MW/年(包括越南400MW), 今年5月该公司发布的144片1500V PEACH 400瓦系列高效太阳能组件, 成为台湾太阳能高效组件标竿。

系统版块也逐渐建立了核心竞争力, 截至目前, 累计并网项目超过569MW, 项目储备近1GW。

## 台湾市场

联合再生能源股份有限公司模组事业总经理沈维钧表示：“以2025年累计装机达20GW的目标来看，当前台湾的光伏装机量还很小，预计今年会有很多屋顶和地面电站进入开发建设阶段，未来几年整个行业也将加快发展。”

查看联合再生公司业绩数据，2019年5月份该公司营收新台币22.9亿元，较上月成长12.9%，较去年同期成长136.6%，呈现比较积极的发展态势。该公司今年还成立了新业务部门，开发储能解决方案。

对于未来发展，沈维钧表示：“我们虽然坐标台湾，但市场要面向国际。”

来自有成精密股份有限公司（WINAICO）太阳能事业部的业务副总Sascha Rossmann赞同沈维钧的看法，他说：“台湾公司要取得更大的生存空间，需要挖掘本地市场和走向国际。”

有成精密在太阳能领域的业务主要包括组件和系统集成，从业务方面看，这家公司除了与台湾公司一起合作，也在尽力开发欧洲及澳洲市场。

Sascha Rossmann预计今年公司在澳洲的EPC业务会有一个强劲增长，同时与欧洲20多个国家有业务往来，意大利、波兰等国家的市场正变得强劲，未来组件出货也会一定量的提升。

企业的一系列动作表明，台湾太阳能制造业正在从中游向下游转移，由商业电池生产商转向组件销售以及灵活的电站开发集成商。

## 电价补贴十年下降60%，电力市场新趋势

过去十年，台湾地区光伏上网电价呈现出大幅下降曲线，降幅超过60%（如图）。部分光伏系统的上网电价甚至已经低于公用事业电价，如果光伏电力在自由市场上出售，无疑会极具竞争力。

如今《再生能源发展条例》政策的推行，将带动台湾可再生能源市场从上网电价补贴逐步转向电力自由化交易。

该《条例》规定，用电800KW以上的大户须有10%电力使用再生能源，也就意味着大型用户的需求有望达到16TWh，这一项约产生12GW光伏发电项目量。

“用电大户需使用10%再生能源的规定，已经引发了再生能源凭证（T-REC）的刚性需求。”南亚光电股份有限公司市场推广处处长林美秀说到。

南亚光电在太阳能领域主要从事EPC业务，目前已经完成了3.74MW光伏EPC项目。林美秀表示，未来公司将承接更多的EPC项目，我们判断光伏需求会在工业用电较高的地区最先被带动起来，如新竹、桃园、台中、高雄等地。

据介绍，再生能源凭证是使用绿电的证明，经台湾地区标检局查核认证后，每一千度绿电，即可核发一张再生能源凭证。

再生能源凭证可自用，也可交易给需

要的客户，售价由自由市场决定。除了签署台电趸售与其他绿能电厂外，所有经过再生能源认证的电厂都可以将电、证合并販售，收入将会是电价加上凭证，而凭证的价格也是由自有市场决定。

目前该市场处于供不应求的状态。

天泰能源股份有限公司执行董事、总经理陈坤宏敏锐感觉到了政策调整及市场的微妙变化，很快带领团队做出了新增售电业务的决定。

天泰能源主要从事电站开发、运营和EPC业务，是台湾太阳能行业这一领域的佼佼者，目前已并网的光伏电站项目有149.4MW，在建项目40MW，储备项目109.8MW。

陈坤宏表示：“2017版《电业法》提出了允许私人可再生能源发电商和零售商直接向消费者出售电力和T-REC，2019《再生能源发展条例》修正案明确了发电商可以以固定费率将发电回售给台湾电力公司（Taiwan Power Company, TPC），为期二十年，这将构建一个新的电力市场商业模式，对于我们来说是新的事业和机会。”

另外一边，同样深根于电站及EPC业务的开阳集团，在电站商业模式及应用模式上亦做了诸多尝试，最近两年，他们在积极推进建设农光互补电站。

开阳集团董事长蔡宗融表示：“过去几年，我们完工了逾一千个政府建筑、工厂、农场、地面太阳能电站和农光屋顶太阳能电站，项目装机总量达到336.80MW，其中140个农光项目，这部分装机规模是51MW，未来这块会持续增长。”

从台湾地区政府与企业的积极态度来看，可以预见，不久的将来台湾地区太阳能电力自由化交易市场将会起来，而光伏发电将成为这一市场兴起的直接受益方。

光伏装机提升的同时，也将帮助台湾地区电池、组件制造业走出眼下的困境，我们期待在今年10月于台北举行的台湾2019能源展上感受更多的积极信号与消息。

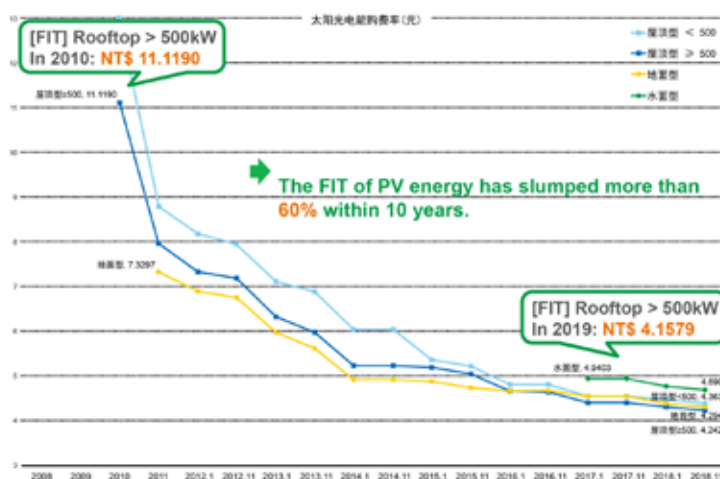


图2：台湾光伏上网电价十年下降曲线，图片来源：天泰能源

# 2020 年全球未来能源峰会 将在阿布扎比举办，大会规模空前， 各国政府、商业和金融领袖齐聚一堂

1月13日-1月16日，太阳能展及论坛将在世界未来能源峰会上成为焦点  
阿布扎比，阿拉伯联合酋长国

2020年1月，全球能源峰会将重返阿布扎比。此次大会规模空前，出席大会的有各国政府及商界高层领导。做为未来能源、清洁技术和可持续发展的全球领军展会和商业市场，全球能源峰会的地位获得了进一步巩固。

由 Masdar 举办的全球能源峰会是阿布扎比可持续发展周的一部分。峰会汇集了能够带来真正变革的所有相关方，包括政府、私营行业大型公司和中小型企业、技术供应商和融资方。一直以来，峰会在这一领域的工作都极为出色。2019年峰会的访客和代表包括13个国家的元首、约120名政府部长及3000名C类高级官员。峰会的重心是太阳能展 & 论坛，这是这一地区最大的太阳能展，展会扩展项目还包括水管理、废物管理和智能城市。

2019年展会公布了价值约100.5亿美元的新业务。鉴于中东可再生能源市场仍在强劲增长，2020年，这一数字有望进一步攀升。

Group Event 总监 Grant Tuchten 表示，“全球能源峰会提供了连接政府、企业和金融机构的理想平台，推进、转变了想法、技术和投资，刺激了可持续发展与增长。”

“大会有利于加速可持续发展和创新。决策者、可持续解决方案的买卖双方、投资方和融资方、带来新想法的创新人士在阿布扎比汇聚一堂。”

全球未来能源峰会每年举办一次，包括能源、太阳能、水、废物和智能城市这五个支柱领域的展览和论坛项目。

中东拥有高水平的太阳能发展潜力。中东可再生能源供应增长了7.1%(1.3GW)，装机总量达到约20GW。本世纪二十年代初，海湾GCC国家计划新增7GW可再生能源发电。仅在2014年-2017年间，海湾GCC国家可再生能源装机量就增长了四倍。中东地区正在将以太阳能为主的可再生能源作为经济规划的中心。





# WORLD FUTURE ENERGY SUMMIT

13-16 January 2020 | ADNEC, Abu Dhabi

SOLAR

Part of



Hosted by



ADSW Principal Partner



## 探索太阳能发电的未来

2020年 World Future Energy Summit —— 了解太阳能发电的成熟技术和突破性创新。拓展您的人际网络、共享信息，与全球技术领袖、项目开发商和各国政府展开合作。

### 太阳能展 & 论坛亮点

- 274家参展商展示它们的太阳能技术
- 在太阳能论坛上与50名业内发言人面对面
- 为您的太阳能项目寻找上百种解决方案

免费注册

[www.worldfutureenergysummit.com](http://www.worldfutureenergysummit.com)

Industry Supporter



Knowledge Partner



Co-located with



Organised by



# 全球新兴市场 对光伏电缆的关键要求

文 / Mark Froggatt



全球光伏市场的迅速增长对于电缆制造商来说是一大利好。不过，要成功跟上光伏市场持续发展的步伐，必须了解主要的增长区域、集中在这些区域增长的原因以及由此带来的环境和立法挑战，Mark Froggatt 写道。

全球太阳能光伏能源系统市场正快速增长，由于所有太阳能项目都要用到大量的电缆，这对电缆制造商来说是一个相当大的机会。为了在这个市场上获得竞争优势，电缆制造商必须了解世界上哪些地区的需求量最大，并开发满足这些地区所有相关法规的电缆产品。了解光伏电缆与低压 (LV) 电缆的性能差异对于那些寻求为光伏市场开发产品的人来说是至关重要的，因为这些产品的应用和条件将产生不同的要求。此外，对光伏电缆产品的准入标准进行解读，也是至关重要的，因为每个标准的要求可能使其不适合特定区域内的项目或应用。例如 IEC 62930 和 BS EN 50618，这些标准在电缆产品的测试方法和测试范围方面有所不同，这意味着电缆制造商需要有放矢地定义其产品范围。

本文将讨论光伏电缆产品的关键要求，为测试光伏电缆提供适用标准方面的指导，并探讨制造商如何在全球太阳能市场蓬勃发展的背景下生产符合要求的电缆产品。

## 为什么太阳能产业在增长？

今天太阳能产业的快速增长是多种（而不是一种）因素一起驱动的。随着时间的推移，化石燃料的价格预计将持续上涨，因此，未来通过减少对此类燃料的依赖，在经济学上是合理的。同样重要的是，商业组织面临着履行其环境义务和建立可持续的绿色能源策略的压力。这种压力不仅来自股东、雇员和贸易伙伴，还来自政府和相关机构的强制性立法。

相应地，主要的能源市场参与者正在引领大型可再生能源项目的发展，包括亚马逊、苹果、英国广播公司、宜家 and 联合利华在内的控股公司都有做重大投资的计划。

然而，政府和个人消费者以及许多其他国际企业也为推动太阳能需求做出了贡献。据报道，太阳能系统装机量的稳步增长满足了对太阳能发电的需求。

包括太阳能在内的可再生能源计划也为偏远和发展中地区提供了有价值的解决方案。向发展中国家的农村地区提供自给自足的可再生能源，为他们的家庭、学校、医院、商店和工业提供动力，有助于当地居民摆脱贫穷。

总体而言，最新数据显示 2017 年全球太阳能光伏系统装机容量超过了 400 吉瓦（如图一所示）。

这些因素促成了全球大量的商业增长机会。2018 年 1 月，GTM 研究报告指出，目前有 53 个国家制定了招标和拍卖方案，使供应链能进行投标以支持即将到来的太阳能项目。研究还发现，另有 29 个国家正在计划制定相关方案，以召集最优秀的供应商，从而满足其项目规格和要求。

这一说法也反映在了国际可再生能源机构 (IRENA) 公布的与可再生能源部门就业相关的数字中。2017 年，这一数字在全球达到 1030 万。太阳能光伏产业在这些工作



## 光伏电缆

岗位中占近 340 万个，并被誉为所有可再生能源技术中的最大雇主。

### 电缆扮演着什么角色，它们的关键要求是什么？

电缆主要用于传输从太阳能电池板产生的电能。无论是室内安装还是室外安装，每种应用都因其性能表现而对电缆特性有不同要求，从而影响对材料的要求。

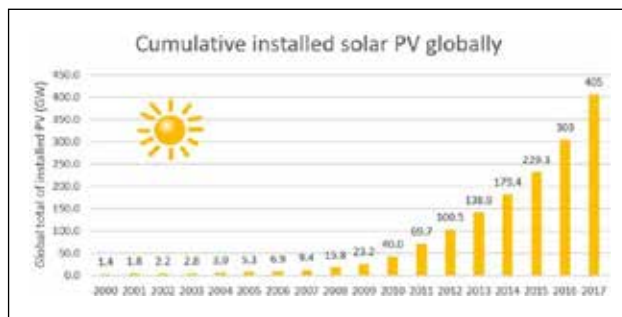
图 2 显示了一个简单的家用光伏系统原理，也适用于大型电站。特别需要注意的是，组件之间的相互连接使用的是直流电缆，并传输到逆变器上以将直流电转换成交流电。其中从逆变器接出来的交流电缆通常处在建筑物室内并受到保护，但直流电缆通常处在室外，会受到环境应力和潜在的人为干扰。

虽然与克服这些问题相关的技术性与立法性挑战很大，但这也给那些能克服这些问题的电缆制造商同样带来了难得的发展机遇。

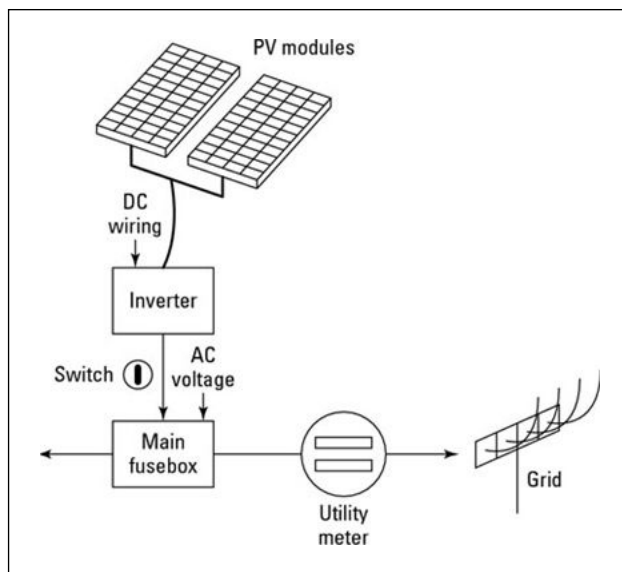
### 光伏电缆与低压电缆有何不同？

安装光伏系统时，低压 (LV) 和光伏电缆都需要明确规定。由于这些电缆是为不同的应用而设计的，因此性能特性也可能不同。例如，低压电缆适合室内或者在受到保护的环境下使用，但它们通常不适合室外应用。这条规则的一个例外是当电缆埋在地下时，因为光伏电缆不是为此要求的应用而设计的。但是，光伏电缆适用于安装在电缆槽中，既电缆不接触地面的应用中。如果在使用电缆的环境中存在啮齿动物的破坏，这一点尤其有用。

低压和光伏电缆产品的最高工作温度也不同。在确定所



图一：全球太阳能光伏累积安装量。来源：Solar-Power Europe



图二：简单的光伏系统示意图。



光伏电缆

Abrasion resistance	Ozone resistance
Flame retardance	Proofed against chemical stresses - acids and alkalis
Halogen-free(where appropriate)	UV resistance
Humidity and water resistance	Withstanding large temperature
Low smoke emission	Withstanding mechanical stress:compression,tension,bending and shear load

表一：根据行业标准，直流电缆需要测试的项目。

选产品是否适合特定应用时，应在制定规格阶段考虑这一方面。根据 IEC 62930 和 BS EN 50618 标准，为了确保在寿命周期内的持续运行，低压电缆产品的最高连续工作温度为 90 度，而光伏电缆产品则要求 120 度。光伏电缆必须具有抗臭氧特性，而低压电缆则无这种要求。虽然低压和光伏电缆在传输电力这一基本功能上是相同的，但根据电缆设计的差异，它们对环境的响应是有所不同的。

哪些规格适用于光伏电缆？

光伏电缆技术仍然相对较新，这意味着大多数应用将遵循既定的国际标准，以确保电缆产品达到高质量和安全水平。

太阳能电池板制造商提供的行业标准保质期为 25 年。因此，有时也建议将其作为太阳能电缆的生命周期。然而，在不了解工作温度和条件的情况下，无法准确给出电缆的额定使用时间。而光伏标准中规定的耐热性试验结果可用于预测电缆产品的预期寿命。

太阳能项目建设的位置特别是偏远地区要求产品具有

寿命长、维护费用低的特性。因此，太阳能行业受到严格监管，以确保产品的可靠性和适用性。作为最低要求，产品必须符合安装区域的建筑法规。

仅仅对光伏电缆产品进行热耐久性测试并不能保证其达到所需的质量和安全水平。不过，通过对产品进行独立测试并证明其符合适用标准，可以为规范制定者和最终用户提供信心。

在与许多从事太阳能技术的公司进行讨论之后，我们制定了电缆相关标准，并推荐了表一所示的直流电缆应进行测试的特性列表，以最大限度地利用潜在的机会。

仅仅由电缆制造商声明其电缆通过了其内部测试是不够的，他们必须向行业证明其太阳能产品能满足与验证上述产品特性所涉及的每个特定测试相关的要求。采用测试和认证合作伙伴可以满足电站运营商和相关机构提供保障。

电缆使用不当会缩短项目的寿命，许多太阳能项目正得到地方政府的支持，因此，合理地使用电缆可以让这些太阳能项目向公众利益相关者承诺在财政投资方面的回报。虽然一些认证机构已经制定了自己的光伏电缆产品测试标准，



## 光伏电缆



但国际公认的、与直流设备中使用的太阳能电缆产品特别相关的主要标准是：IEC 62930:ed 1.0:2017 和 BS EN 50618:2014。

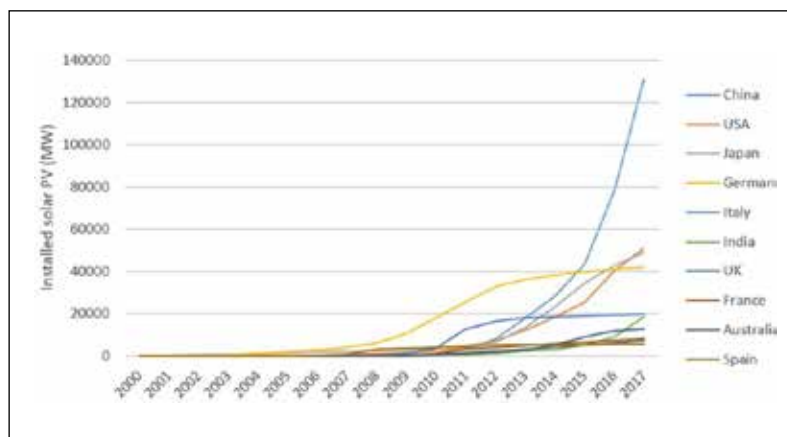
EN 50618 仅适用于使用低烟无卤 (LSHF) 材料制成的单芯、交联绝缘和护套的镀锡铜软导体的电缆产品，而 IEC 62930 则将此范围扩展到使用或不使用 LSHF 材料制成的单芯交联绝缘电力电缆产品。这两个标准都规定了测试光伏电缆产品的严格要求，反映了电缆产品将要面对的挑战性条件。

虽然这些标准具有相似的关键要求，但在允许的材料和可测试的导体尺寸范围方面存在显著差异，我们将在下一节讨论。

### 如何才能制造出符合太阳能光伏系统要求的电缆？

在技术层面上，如今化合物和挤压工艺的创新可以帮助电缆制造商满足太阳能行业的独特规格需求。许多电缆制造商正与项目指定方密切合作，以生产符合设计要求的电缆。

为了生产能满足太阳能光伏系统要求的电缆产品，其设计应满足 IEC 62930:ED 1.0:2017 和 BS EN 50618:2014 的要求。接下



图三：2000-2017 年前 10 个国家的累积光伏安装量。来源：Solar-Power Europe

来我们将更详细地探讨这些具体要求，其中每个标准对某些材料的使用重点都互不相同。

第一个要求是针对与二级设备一起使用的电缆产品。在 IEC 61140 中二级设备定义为不需要安全接地的双绝缘设备，通常二级设备适用于电视机、DVD 播放机和电动工具等电器。BS EN 50618 适用于测试这些类型的电缆产品；但是，IEC 62930 没有对此作出规定。因此，使用带有二级设备的光伏电缆产品的任何电器应按照 BS EN 50618 进行测试。

在寻求了解具体特性和每个标准的着重点时，进一步考虑的是电缆导体的尺寸。其中 BS EN 50618 仅规定导体尺寸范围在 1.5 到 240mm<sup>2</sup> 之间，而

## 光伏电缆

IEC 62930 允许的范围更大，为 1.5 到 400m<sup>2</sup> 之间。值得注意的是，即使电缆产品的直径很大，由于被绝缘层、垫层和钢丝铠装所包围，导体的尺寸也可能很小。因此，决定哪些标准电缆产品应进行测试，不应仅仅基于导体尺寸。

标准之间的主要区别在于允许测试的材料，例如 BS EN 50618 只允许测试使用 LSHF 材料制造的电缆产品。这些类型的电缆产品在遭遇火灾时释放的烟雾和腐蚀性气体较低。它们通常被指定用于公共建筑，因为可以降低对公共安全造成的风险。相比之下，IEC 62930 允许测试有或没有 LSHF 的材料，包括 PVC 电缆产品。当这种材料燃烧时会产生浓烟和有毒烟雾，PVC 或改性 PVC 更适合客户要求。例如，PVC 电缆产品可能更适合从太阳能电池板向水处理设施输送电力，因为它们比 LSHF 产品具有更高的耐化学腐蚀性。

作为 IEC 62930 和 BS EN 50618 的一部分，耐热性试验是强制要求的。该测试旨在确定电缆的使用寿命，包括测试温度高达 120°C 下的任何光伏电缆产品达 20000 小时，以模拟产品在运行中的性能。当这些标准最初制定时，热耐久性试验引起了一些争议，因为其主要措施是证明电缆在达到规定阈值之前将运行多长时间；所有这些测试都是在受控条件下进行的。由于许多光伏电缆产品是在极端条件下安装的，因此，该试验的结果可能不如更为成熟的试验（如用于检查护套和绝缘材料在高温下是否耐压的热压力试验）具有决定性。尽管如此，提交用于耐热性试验的电缆产品可进一步帮助证明电缆质量。

虽然电缆产品可以成功通过耐热性试验，但也应考虑其他特性将如何受到其运行条件的影响。例如，太阳能电池板通常安装在沿海或沙漠地区，那里的温度可能会迅速下降，这可能会导致电缆破裂或弯曲，因为温度下降到了这些电缆产品的设计工作温度值。如果电缆产品是使用劣质材料生产的，它们可能会吸收大量的水分，通过减少电缆产品所能携带的电流而降低电缆产品的性能。这些例子表明，需要对光伏电缆进行广泛的性能测试，以验证在规定条件下安装的质量和适用性。

## 全球需求的分布情况？

作为太阳能光伏系统的早期使用者，德国在 2015 年之前的十年里一直被公认为太阳能安装的领导者，之后被中国超越（见图 3）。2012 年，中国的太阳能装机量开始迅猛增长，到 2017 年，中国太阳能新装机总量甚至超过了后面 9 个主要国家的总和。同时，相对较新的日本和美国也超过了德国，并一直在以更高的安装速度跟进。数据显示，如今全球都竞相推出可再生能源的激励政策。因此，规范制定者、买方、电缆分销商和制造商必须注意使用符合国际和当地标准的产品，以确保所提供的产品在商业上是适用的。

希望打入太阳能市场的电缆制造商在设计电缆时应仔细考虑终端用户的要求，因为用于验证电缆质量的标准会针对不同类型的材料。如上所述，BS EN 50618 仅适用于 LSHF 电缆产品，而 IEC 62930 则允许不使用这些材料生产，这可以指导制造商识别其现有产品种类中哪些最适合特定市场。根据电缆产品需要满足的规格和市场上最受欢迎的标准，来

制定产品设计和生产决策。

例如，如果选定市场中的建筑物有很高的火灾风险，或电缆产品将安装在封闭空间内，则应使用 LSHF 电缆产品，以将建筑物内居民在火灾中暴露在有毒烟雾和气体中的风险降到最低。反之，如果电缆产品设计用于建筑物外部，就像许多光伏电缆产品一样，其对电缆产品的要求也有所改变。在这种情况下，PVC 可能被认为是一种更适合使用的材料，因为它比 LSHF 具有更高的耐磨性和耐久性。

## 总结

本文揭示了影响太阳能光伏市场快速增长的多种因素。随着时间的推移和知识的迅速发展，我们看到太阳能工业用电缆的质量和性能有了很大的提高。但在最近几年，某些方面却并没有如预期的那么好，因此随着行业的不断发展，我们也可以期待用于制造电缆的技术不断进步，以确保可靠的产品进入市场。这种增长为外部直流电缆创造了健康的需求，也带来了克服与满足市场需求相关的挑战。这些制造商可以通过与 Basec 合作获得独立的产品认证和批准，证明供应到市场的产品符合所有必要的法规，从而在这一过程中获得竞争优势。

投资电缆制造商的潜在回报是可观的；正如 Walid Halty (Dvinci Energy, Forbes, 2018 年 5 月) 评论的：“如今，太阳能是最具可持续盈利前景的技术之一，它已经将整个行业变成了淘金热。”

## 作者简介



马克·弗罗格特是英国电缆认证服务公司 Basec 的技术总监。他于 2019 年 6 月加入 Basec 的管理团队，此前曾担任 Basec 的非执行董事。此外，他还曾在 Draka 担任技术销售经理，在 Nexans 担任市场开发经理，最近在 British Cables Company (以前是 BT Cables) 担任技术经理。他拥有化学与管理研究专业的理学学士学位。在 Basec 任职期间，Mark 主要负责 Basec 测试、认证和相关服务的总体技术政策、应用和运营，同时不断提高技术能力和业务机会。Basec 是领先的电缆产品认证提供商，包括电气、机械、材料、化学、防火和防烟性能特性的综合测试。

**CREC | 2019**

www.crecexpo.com

# 第十一届中国(无锡)国际新能源大会暨展览会

The 11<sup>th</sup> Chinese Renewable Energy Conference & Exhibition

2019.11.7-9 无锡太湖国际博览中心

## 分布式能源一站式采购平台

One-stop Purchasing Platform for Distributed Energy

## 风光储充综合能源解决方案

The integrated solution of Wind, Solar, Energy Storage and Charging



联系方式 Contacts

T: 0510-81827277 / 81827276 / 81820490

E: info@crecexpo.com



# 全球 21 家光伏制造上市公司 研发支出分析

文 / Mark Osborne **PVTECHPRO**

十多年来，PV Tech 一直在对光伏制造商的研发支出进行分析。本文将介绍一些主要发展趋势，即将出版的《国际光伏》技术期刊将详细阐述这些趋势。

2017 年，21 家主要光伏制造商累计年度研发支出达到 10.8686 亿美元（约为 10.8 亿美元）。尽管 2018 年略低于这一数值，但这是研发支出连续第二年超过 10 亿美元水平。（见图 1）

## 支出模式差异

有趣的是，研发支出在五年内翻了一番，从 2013 年的 5.04 亿美元增至 2017 年的 10.8 亿美元。我们分析的 21 家光伏制造商在 2013 年几乎都已是上市公司。至 2014 年，所有 21 家光伏制造商都实现了上市。

（见图 2）

然而，自 2014 年以来，与逐年增加支出的公司相比，减少研发支出的公司数量在不断增长。

2014 年，仅有两家公司降低了研发支出，而 2017 年则达到了转折点，当时有 10 家公司较上一年减少了支出。这一趋势延续到了 2018 年。这一年，减少研发支出的公司数量（11）首次超过了增加研发支出的公司数量（9）。

此外，自 2015 年以来，还有两家公司（First Solar 和英利绿能）已连续四年降低支出。

2018 年的分析显示，两家公司（亿晶光电和海润光伏）已连续三年降低支出，还有两家公司（浙江向日葵光能科技、无锡尚德）连续两年降低支出。

支出模式的差异主要是由部分公司的财务状况推动的，例如英利绿能、海润光伏和 SunPower 等公司。

2018 年，由于开发项目远超计划、市场过热，中国政府宣布实施“531 新政”，公用事业和分布式市场出现停滞，中国下游市场疲软。这是导致越来越多的公司在

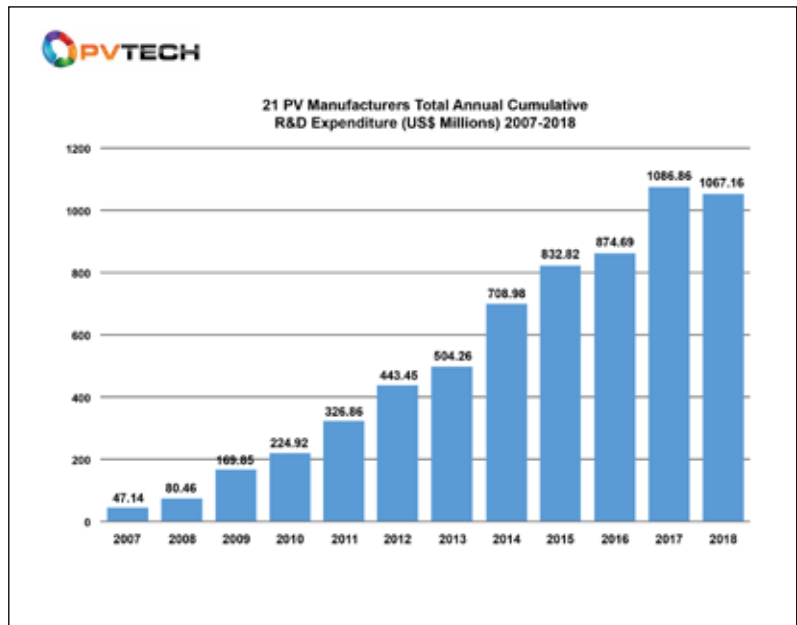


图 1: 2017 年，21 家主要光伏制造商累计年度研发支出达到 10.8686 亿美元（约为 10.8 亿美元）

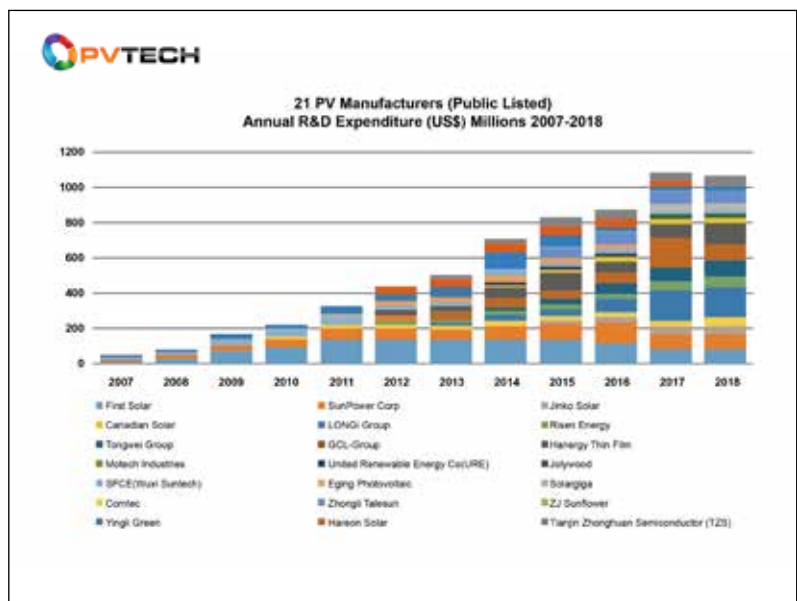


图 2, 至 2014 年，所有 21 家光伏制造商都实现了上市

## 研发支出

2018 年降低支出的部分原因。

值得注意的是，由于这一趋势，自 2012 年以来，只有两家公司（隆基和中利腾晖）的研发支出逐年增长。

2018 年增加支出的其他公司包括：晶科能源、阿特斯、SunPower、通威、汉能薄膜、URE、TZS 和 Comtec。

下图涵盖了 21 家主要光伏制造商过去五年的年度研发支出情况。（见图 3）

图 3 显示，五家公司（First Solar、隆基公司、汉能薄膜、SunPower 和协鑫集团）过去五年的累计研发支出至少超过了 1 亿美元。

尽管 First Solar 和 SunPower 的年度排名有所下降，但 First Solar 五年间的变化并不那么明显，仍是累计研发支出的领导者。

过去五年，这些公司的支出范围介于 4-5 亿美元。

然而，在 2018 年的排名表上，SunPower 下滑了两位。过去五年，SunPower 也被隆基公司和汉能薄膜发电集团所取代。在 2018 年大幅削减研发支出之前，协鑫集团一直在快速向 SunPower 靠拢。

就研发支出而言，隆基公司和汉能薄膜发电集团一直位列增长最快的三家公司之一，尤其是在过去三年，如图所示。

从图中还可以看出，过去四年，三家公司（中利腾晖、TZS 和通威集团）组成了研发支出快速增长的第二个强大团体。中利腾晖、TZS 和通威集团的研发支出范围介于 2-2.5 亿美元。

TZS 之下的情况也很有趣。过去三年，低支出水平令英利绿能在排行榜上不断下滑，而海润光伏则大幅下滑。

这意味着过去两年，东方日升、晶科能源和阿特斯的研发支出加速，具备了迅速超越英利绿能的实力。

然而这也表明，它们仍然远远落后于第二梯队中的中利腾晖、TZS 和通威集团。由于其他公司的排名正在下降，这几家公司的排名可能会缓慢上升，虽然如此，它们与第二梯队公司的差距很有可能会扩大，硅基组件超级联盟的两家主要成员会维持在中下游水平。

随着另外两家硅基组件超级联盟成员——天合光能和晶澳太阳能回归中国股市，预计它们的研发支出也会加速这一趋势。

对于那些排在阿特斯之后的公司来说，五年的研发支出凸显的是一梯队和二梯队领军公司之间看似越来越难逾越的鸿沟。

另外，此前我们从未发布过与公司研发支出收入占比相关的数据和图表，人们对此一直存有疑问。过去，关键原因在于几乎普遍被认可的一条规律，即企业研发支出在收入中的占比介于 0.8%-3%。唯一的例外是 First Solar 和 Sunpower，它们的研究支出占比一直较高。

然而，当下的变化更为复杂，所以我们列举了两个研发支出收入占比的例子。

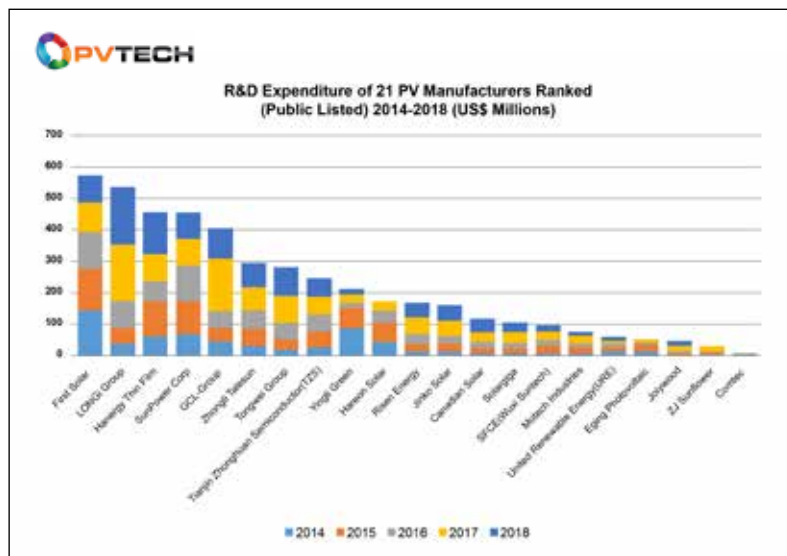


图 3: 五家公司（First Solar、隆基公司、汉能薄膜、SunPower 和协鑫集团）过去五年的累计研发支出至少超过了 1 亿美元。

其中，First Solar 和 Sunpower，它们代表了研发支出收入占比的历史高点，还有两家大型硅基组件超级联盟公司（晶科能源和阿特斯），它们的年度研发支出总额长期处于落后水平。此外，还有一家相对较小的光伏制造商亿晶光电。

一项关键结论是，与其他公司相比，First Solar 和 Sunpower 专有技术的研发支出收入占比要高的多。这些入选公司充分反映了研发支出收入占比的历史高点和低点。

然而，由于晶科太阳能和阿特斯都已成为当下全球领先的晶硅光伏组件制造商，年度研发总支出和研发支出收入占比几乎没有出现过落后的负面情况。

研究跟踪企业的三家大型中国集成光伏制造商，隆基集团、TZS 和协鑫集团，从商业模式角度来看，这些公司可被视为匹配度最高的公司。

这里出现的主要偏差是，从收入、多晶硅以及多晶硅硅片产能规模的角度来看，多年来，协鑫集团一直都是光伏行业最大的公司。

隆基集团和 TZS 这两家快速增长的公司拥有强大的研发支出机制，收入增长强劲。实际上，2018 年，这两家公司研发支出收入占比的降幅几乎相同。两家公司的总收入都较上一年出现大幅增长，研发支出有所增加，但明显低于收入增长速度。

相比之下，协鑫集团 2018 年的收入较上年出现明显下降。由于财力有限，协鑫集团逐年大幅削减研发支出，导致研发支出收入占比出现下降。

因此可以说，过去五年，研发支出高的数家大型新兴公司已可与长期巨头公司竞争可观的市场份额。然而，协鑫集团一直以来也是 TZS 和 SunPower 的投资方，这让比较各家公司的界线变模糊了。

2019 年，我们追踪的和未追踪的公司都在持续经历着动荡，但值得一提的是，2018 年的研发支出超过了 10 亿美元。

# Advertisers & Web Index

Advertiser	Web Address	PAGE No.
CREC	<a href="http://www.crecexpo.com">www.crecexpo.com</a>	P.59
Energy Taiwan	<a href="http://www.energytaiwan.com.tw">www.energytaiwan.com.tw</a>	P.19
Growatt	<a href="http://www.growatt.com">www.growatt.com</a>	Inside Front Cover
Henkel	<a href="http://www.henkel-adhesives.com/electronics">www.henkel-adhesives.com/electronics</a>	P.13
JA Solar	<a href="http://www.jasolar.com">www.jasolar.com</a>	Inside Back Cover
Meyer Burger	<a href="http://www.meyerburger.com/cn">www.meyerburger.com/cn</a>	Back Cover
QEERI	<a href="http://hbku.edu.qa">hbku.edu.qa</a>	P.49
STAUBLI	<a href="http://www.staubli.com/electrical">www.staubli.com/electrical</a>	Content Page 1
SNEC	<a href="http://www.snec.org.cn">www.snec.org.cn</a>	P.11
Trina Solar	<a href="http://www.trinasolar.com">www.trinasolar.com</a>	Content Page 2
VON ARDENNE	<a href="http://www.vonardenne.biz">www.vonardenne.biz</a>	P.15
WFES	<a href="http://www.worldfutureenergysummit.com">www.worldfutureenergysummit.com</a>	P.53

**Welcome to  
subscribe!**





PERC 专利持有者

收获更多阳光

降本增效, 平价上网首选  
晶澳九主栅半片组件

410W 更高的功率输出

20.4% 更高的转换效率

3.70% 更小的遮挡损失

-0.35%/°C 更低的温度系数



JAM72S10 390-410/MR 系列

JA SOLAR  
晶 澳 太 阳 能

电话: +86 (10) 63611888  
邮箱: sales@jasolar.com marketing@jasolar.com  
网址: www.jasolar.com



MEYER BURGER



## 异质结： 卓越的电池片效率

了解梅耶博格卓越的异质结生产技术。  
HELiA双面异质结生产平台生产的太阳能电池片效率超过24%，并拥有极低的LCOE。

以梅耶博格引领行业的模块化电池片镀膜平台为基础，HELiA系统确保了卓越的电池片钝化品质和均匀性。

异质结及智能网栅连接技术的有力结合确保了极高的发电量和极长的组件寿命。

梅耶博格助您在新能源领域更上一层楼。  
[www.meyerburger.com](http://www.meyerburger.com)

