PESIC 2026 第九届国际光伏与储能产业大会
THE 9TH INTERNATIONAL PV AND ENERGY STORAGE INDUSTRY CONFERENCE

22nd CSPV

# 2026第二十二届中国太阳级硅及光伏发电研讨会
# 22nd China SoG Silicon and PV Power Conference

# 会 议 论 文 集

2026.11.18-21 中国·成都

**主办单位**

- 上海交通大学（太阳能研究所）
- 浙江大学（硅及先进半导体材料全国重点实验室）
- 中山大学（太阳能系统研究所）
- 上海市太阳能学会

**承办单位**

通威股份 TONGWEI CO., LTD.

**协办单位** LONGi JA 晶澳 FIRST

**特别支持** 日托 HUITIAN AIKO 爱旭

**技术支持** TÜVRheinland® Precisely Right.

**分论坛冠名单位、支持单位**

协鑫 GCL · CYBRID · 中来股份 JOLYWOOD · 捷佳伟创 · SUNGROW 阳光新能源 · 金友 JINYOU · TÜVNORD · 检测设备 · HUO 海优威科技 · 中国质量认证中心 · STÄUBL · SNK 斯威克 · ZEALWE · 晶科能源 · MatCrown · DOW · TCL 中环 · Opt · XN · TopSola 宏润泰阳 · UL Solutions · TÜV SÜD · Millennial Solar · Leadmicro 微导 · 沃莱新材 · HT · 旭合科技 Solar Plus · SOLA · 云上新能源 YOURSUN ENERGY · 百士齐光伏 BSQ SOLAR · GOODWE 固德威 · 炎和科技 · NAURA 北方华创 · risen 东方日升 · 海泰新能 Haitai Solar · DR Laser · TDSTEK 泰德斯 · 泰科诺

# 2026 第二十一届中国太阳级硅及光伏发电研讨会

## 22nd China SoG Silicon and PV Power Conference

# 11 月 18 日会议议程

# Nov. 18 Program

# TNC 超高方阻技术

孟夏杰[1,2]，刘奇详[1]，余斌[2]，何宇[2]，余斌[2]，张林[2]，邢国强[2]，于军胜[1]

[1]通威太阳能(成都)有限公司

[2]电子科技大学

E-mail: tw01@tongwei.com

## 报告摘要

已有研究将高效 TOPCon 太阳电池前表面硼发射极的方块电阻提高至 400 Ω/sq 以上，以降低硼掺杂浓度、改善发射极钝化，但非接触区仍受硼相关复合限制。本研究提出一种基于低成本光刻胶刻蚀的无激光图形化方法，将非接触区方块电阻提高至 1600 Ω/sq，并据此研究硼掺杂选择性发射极（SE）和局部硼掺杂栅线结构。SE 电池的效率绝对增益为 0.16%，P++/P+区域方块电阻约为 450/1600 Ω/sq；采用该结构的高效电池经认证效率达 26.03%，开路电压为 746.5 mV。相比之下，局部硼掺杂栅线结构的效率提升 0.04%，其较低的填充因子可能与新增 p-n 结边缘附近低注入复合增强有关。Quokka3 模拟表明，调节 P++接触宽度和正面栅线间距有望优化 SE 电池；局部硼掺杂栅线结构则可能受益于高电阻率硅片。本研究为非接触区实现超高方块电阻提供了实用途径，并为高电阻率硅片上的栅线结构优化提供参考。

**关键词：**TOPCon 太阳电池；选择性发射极；光刻胶刻蚀；超高方块电阻

邀请报告

# 基于非晶硅边缘钝化与激光边缘隔离的多分片电池技术研究

闫文丽，刘尊珂，蒋虹萍，王玉明，曾俞衡，叶继春*

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

中科研和（宁波）科技有限公司

*E-mail: jichun.ye@nimte.ac.cn

为了提高光伏组件的输出功率，目前行业正在加速导入多分片电池技术。然而多分片技术引入了切割边缘缺陷，导致载流子复合及输运损失增加，限制了组件功率的增益。当前应用的原子层沉积（ALD）边缘钝化技术存在设备及运营成本较高、沉积温度较高、绕镀粘片、易导致 LECO 电极性能退化、难以兼容铜基浆料等局限。因此，开发兼具优异钝化性能、低温工艺适应性、环境稳定性、量产潜力大且低成本的边缘修复方案，对未来多分片电池效率和组件功率提升意义重大。针对上述问题，中科研和与宁波材料所开展了系统的理论与实验研究。

在非晶硅边缘钝化方面，团队开发了基于 CVD 技术的低温非晶硅复合膜层，用于多分片电池边缘钝化。该技术方案具有较低的沉积温度（可低于 160°C），能够有效兼容 LECO 接触与铜基电极。此外，该复合膜层在平面 n 型硅片上实现了优异的钝化效果，饱和电流密度（$J_{0,s}$）低于 3 fA/cm² 、隐含开路电压（$iV_{oc}$）超过 735 mV；经过 UV60 辐照后，钝化性能不衰减；可耐受醋酸长时间浸泡并保持稳定。非晶硅钝化效果显著优于实验室 240°C 沉积条件下的热 ALD AlOx 薄膜钝化质量。相关工作显示，该非晶硅复合膜系兼顾了界面钝化、抗紫外衰减、膜层保护及耐腐蚀性能，在不同类型多分片电池中具有重要应用潜力。另外，在激光隔离技术方面，团队对技术方案做了改进，具有进一步提升功率的作用效果。

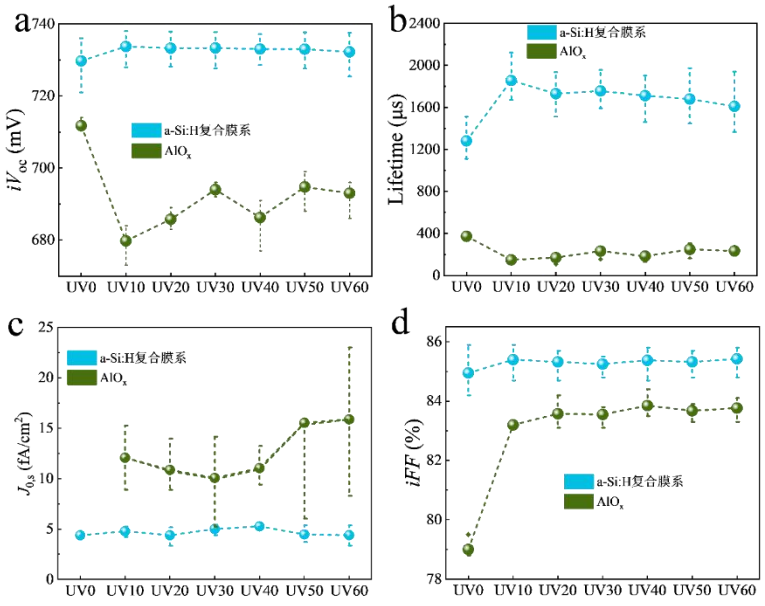


图 1 非晶硅复合膜系及氧化铝的钝化性能与抗紫外衰减性能对比：(a) 隐含开路电压，(b) 少数载流子寿命，(c) 单面饱和电流密度及(d) 伪填充因子。

在理论方面，团队通过三维器件模拟，系统分析了边缘钝化与边缘隔离技术方案对 TOPCon 多分片电池性能的影响。结果表明，结合两种技术可以实现优于单一技术功率提升效果，并降低分片电池性能对边缘钝化膜钝化质量的依赖，这为提升多分片电池及组件性能提供了新的技术思路。

综上，通过低温非晶硅复合膜系钝化结合边缘隔离的协同优化，有望在降低分片电池边缘复合损失的同时，兼顾成本、工艺稳定性与量产适用性，进一步提升多分片电池组件功率。

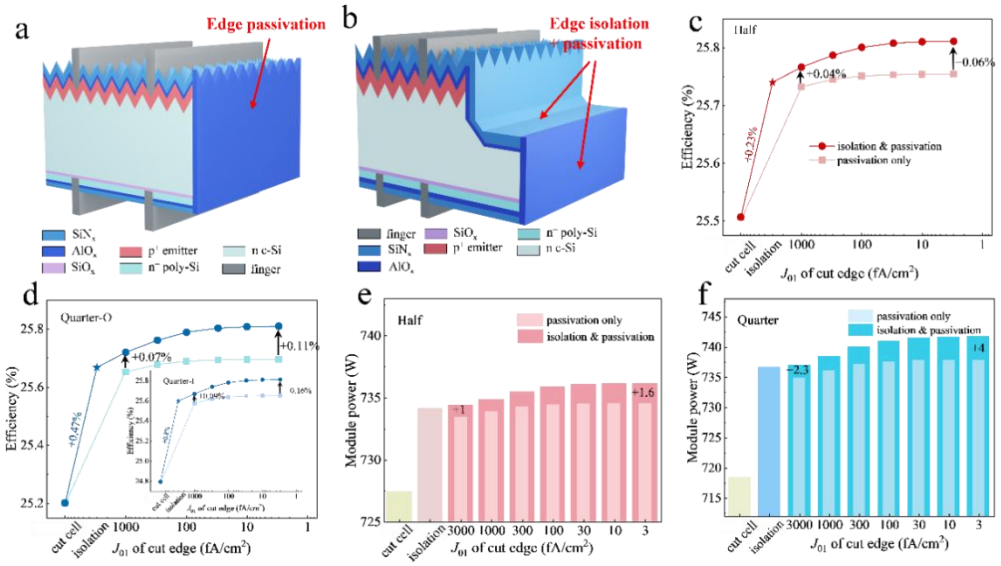



图 2 TOPCon 分片电池边缘修复结构示意图：(a) 仅边缘钝化，(b) 边缘隔离与边缘钝化协同。边缘钝化和隔离-钝化协同处理的 TOPCon (c) 二分片电池，(d) 四分片电池模拟效率对比。相应(e) 二分片组，(f) 四分片组件的输出功率对比。

邀请报告

# 直接覆膜（IFC）技术在 TOPCon 多分片上的解决方案

吴永刚

宁夏小牛自动化设备股份有限公司

E-mail: yonggang.wu@xnautomation.com

## 报告摘要

《晶体硅光伏组件和逆变器能效限定值及能效等级》GB47834-2026 标准正式发布，该标准将于 2027 年 1 月 1 日起实施。根据标准，组件方面，晶体硅光伏组件能效等级分为 3 级，其中 1 级能效最高，TOPCon 准入门槛约为 23.2%，HJT 约 23.2%，BC 约 23.5%，各能效等级的光电转换效率不应低于规定。

在行业竞争激烈、组件效率及成本同时要求的背景下，对 TopCon 组件技术提出了新的要求，多分片逐渐成为行业共识。直接覆膜技术（IFC）凭借其低温、高兼容性、无污染等优势成为多分片、低银/无银等背景下最有效的解决方案。

本报告就 IFC 在 TopCon 多分片领域的解决方案以及相关设备等做详细阐述。

**关键词：** IFC 技术；成本优化；TOPCon 多分片；产业化

# 高效组件边缘封装关键材料：光伏丁基胶的性能与应用

# Critical Material for Edge Sealing of High-Efficiency PV Modules: Performance and Application of PV Butyl Sealant

袁永清

上海回天新材料有限公司

E-mail: yuanyongqing@huitian.net.cn

## 报告摘要

强制性国标下，国内 TOPCon 组件的准入转换效率锁定 23.2%，目前行业主流效率在该值上下小幅波动。现有的多分片、负间距以及 BC 等技术可以有效提升组件效率，但目前良率欠佳。封装技术的发展更易助力主流效率的达标与进一步提升。

丁基胶具有高绝缘、高阻隔以及高粘接的特点，将其应用在组件边缘封装可有效缩短爬电距离，目前已规模应用。回天携手业内头部企业联合开发光伏丁基胶，具备可靠的抗胶膜穿刺能力，适配与胶膜共同层压的工艺。不同熔融指数的丁基胶可匹配不同的施胶设备和生产节拍，实现稳定量产。

通过分享开发原理、验证数据与实际工况，本报告将系统阐述光伏丁基胶的研究进展与应用表现，展望未来发展方向，助力光伏产业提质增效。

**关键词：**边缘封装；爬电距离；光伏丁基胶；抗穿刺；可调节的熔融指数

**Keywords:** edge sealing; creepage distance; PV butyl sealant; puncture resistance；tunable melt flow rate

# 基于 TOPCon 平台的未来技术展望与前沿方向

杨东磊

晶科能源股份有限公司

E-mail: slava.yang@jinkosolar.com

## 报告摘要

随着全球清洁能源需求增长，n 型 TOPCon 已成为光伏行业主流技术路线。晶科能源在 HOT4.0 基础上迭代推出全新一代 Tiger Neo 3.0，组件功率与转换效率显著提升，电池稳定性同步增强。将从器件机理与实证数据两个维度解析其技术优势，以弱光表现与双面发电性能为代表，结合全球实证电站数据，量化不同工况下的发电增益；针对地面电站、工商业分布式、户用及水面等场景，展示 Tiger Neo 3.0 产品在实际发电量和系统经济效益上的提升。随后进一步将视角由“产品一代”延伸至“平台一代”，展望 TOPCon 技术平台方向：从硅片端的品质提升，到电池端的钝化升级，再到新结构的延伸。TOPCon 平台既是当前最具性价比的量产技术，也是通向叠层时代的底座平台，n 型并非一代产品，而是一条可持续演进的技术主线。

**关键词：**n 型领先；Tiger Neo 3.0；弱光表现；双面发电；全场景适配

# 聚焦高压应用场景：光伏组件边缘密封的绝缘安全评估

帖克清

德国莱茵 TÜV

E-mail: John.K.Q.Tie@tuv.com

## 报告摘要

本次演讲围绕中高压光伏系统中，光伏组件边缘密封材料的测试和可靠性评估。边缘密封胶以丁基胶、丙烯酸密封胶、封边胶带为主，兼具水汽阻隔与电气绝缘双重特性。此类材料具有耐候抗老化，可阻断水汽、腐蚀性介质侵入；同时作为加强绝缘材料，有良好的耐热性以及电绝缘性能，能够有效缩短边缘爬电距离，支撑大版型组件在 1500V~3000V 中高压场景下安全应用，助力组件提升功率密度。

# TOPCon 光伏四分片组件抗阴影遮挡能力研究

徐泽林

英利能源发展有限公司

E-mail: xuzelin0415@163.com

## 报告摘要

为明确 TOPCon 四分片组件的阴影遮挡输出特性及旁路二极管导通条件，通过室内太阳模拟器开展梯度遮挡试验，测试不同遮挡工况下的组件电参数。结果表明：单串遮挡范围内功率损失随遮挡比例平缓上升，整串全遮时损失仅 15.7%，全程未触发旁路二极管；同一保护单元内两条串联支路同时完全遮挡时，旁路二极管导通，功率损失跃升至 36%左右，继续增加遮挡损失基本稳定。四分片多并联拓扑抬高了旁路二极管启动门槛，对鸟粪等局部遮挡具备更好的适应性。

# Study on anti-shading performance of TOPCon quad-cut PV modules

**Zelin Xu**

Yingli Energy Development Co., Ltd.

E-mail: xuzelin0415@163.com

## Abstract

To clarify the output characteristics under shading and the turn-on condition of bypass diodes for TOPCon quad-cut modules, gradient shading tests were carried out using an indoor solar simulator, and the electrical parameters of the module under various shading conditions were measured. The results show that the power loss increases gently with the shading ratio within the shaded area of a single string. When the entire string is fully shaded, the power loss is only 15.7%, and the bypass diode remains unactivated throughout the process. If two series branches in the same protection unit are fully shaded simultaneously, the bypass diode turns on, and the power loss jumps to approximately 36%, after which further increase in shading leads to a nearly constant power loss. The multi-parallel topology of quad-cut cells raises the threshold for bypass diode activation, delivering better tolerance to partial shading such as bird droppings.

# 索特 Solamet®少银化-无银化创新金属化方案

刘勇，张子男，QJ GUO*

浙江索特材料科技有限公司

E-mail: qijie.guo@solamet.com

## 报告摘要

随着 TOPCon、HJT 和 xBC 等光伏电池技术路线的不断迭代优化和银价持续高企，持续降低金属化成本是众多光伏电池组件厂商的重要目标。不同电池技术因其金属化工艺的差异选择不同的降银路径，TOPCon 和 TBC 等高温金属化工艺通常使用窄开口网版、全开口钢版网、0BB 等方式实现降银；HJT、HBC 等低温金属化工艺则采用低银含银包铜浆料来实现少银化。随着超细线网版、超低银含材料的不断迭代助力，目前银包铜浆料较传统纯银浆料已实现降低 50-90%银耗量。与此同时，印刷铜浆技术作为“无银化”终极路线，也吸引了众多科研机构、光伏上下游材料、设备供应商和光伏电池企业积极布局。

索特 Solamet®自 1983 年推出全球首款商业化光伏导电浆料开始，历经四十多年的深入研发和持续创新，陆续开发出了适用于不同电池结构的多种金属化解决方案。近年来，公司在持续打造覆盖 HJT/HBC、TOPCon、TBC 及钙钛矿晶硅叠层电池的全场景少银化、无银化方案。其中 Solamet® PV3NL & PV6NL 银浆可适配超窄开口丝网、钢网版实现 TOPCon 正背面持续降低银耗；PV43A、PV45x 等低温银铜浆可适配 HJT、HBC 以及钙钛矿晶硅叠层电池，多样化的银含设计可灵活适配不同客户的降银需求；此外，索特推出的 PV6NS & PV43T 产品组合以“种子层 + 银包铜传输层”的叠印工艺应用于 TOPCon 背面，实现降银提效。在无银化方面，PV46x 系列纯铜浆料实现了关键技术突破，产品可适配 HJT/HxBC，TOPCon、TBC 等多种高效电池技术，支持低温、中高温固化等多种工艺路线。索特 Solamet®持续创新迭代的少银化、无银化浆料将助力新型光伏电池技术的产业升级。

# 钝化接触硅太阳电池的紫外稳定性

黄环佩，马胜，沈文忠*

上海交通大学太阳能研究所，人工结构及量子调控教育部重点实验室，物理与天文学院

*E-mail: wzshen@sjtu.edu.cn

## 报告摘要

隧道氧化物钝化接触(TOPCon)太阳电池凭借其高效率和低制造成本成为领先的光伏技术。然而，长期户外运行中紫外（UV）辐照引起的性能衰减对其运行稳定性提出了挑战。本工作结合工业 TOPCon 电池与组件的抗 UV 衰减研究，以及 TOPCon 和隧穿氧化钝化背接触（TBC）电池的金属接触表征，探讨 UV 作用下的性能演变及改善策略。加速老化测试表明，UV 辐照导致开路电压、填充因子及短波光谱响应下降，后续光照可使性能部分恢复。通过优化前表面 $AlO_x/SiN_x$钝化结构，电池在 30 kWh/m² UV 辐照下的效率相对损失由 2.54%降至 1.16%。局部电阻测量与截面显微表征进一步揭示了不同银浆配方及金属化体系在电学响应和界面结构方面的差异，提示金属接触稳定性也需纳入 UV 可靠性研究。在组件层面，相较于高透光封装膜，采用可将紫外光转换为可见光的光转换膜进行光谱管理，可将受测 TOPCon 组件在 180 kWh/m² UV 辐照后的功率相对损失控制在 0.6%以内。本工作从钝化界面、金属接触和封装光谱管理三个层面探讨 UV 稳定性的改善路径，为钝化接触硅太阳电池的可靠性评估与材料优化提供实验依据。

**关键词：**紫外辐照；TOPCon；背接触太阳电池；金属接触；光谱管理

# UV Stability of Passivated-Contact Silicon Solar Cells

**Huanpei Huang, Sheng Ma, Wenzhong Shen ***

Institute of Solar Energy, and Key Laboratory of Artificial Structures and Quantum Control (Ministry of Education), School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University

* E-mail: wzshen@sjtu.edu.cn

## Abstract

Tunnel Oxide Passivated Contact (TOPCon) solar cells have become a leading photovoltaic technology owing to their high efficiency and low manufacturing costs. However, performance degradation induced by ultraviolet (UV) irradiation poses a challenge to their long-term operational stability outdoors. This work combines investigations of UV degradation mitigation in industrial TOPCon cells and modules with metal contact characterization in TOPCon and tunnel oxide passivated back-contact (TBC) cells to examine performance evolution under UV exposure and corresponding mitigation strategies. Accelerated aging tests reveal reductions in open-circuit voltage, fill factor, and short-wavelength spectral response following UV irradiation, with partial performance recovery under subsequent illumination. Optimization of the front-side $AlO_x/SiN_x$ passivation structure reduces the relative efficiency loss from 2.54% to 1.16% after a UV dose of 30 kWh/m². Local resistance measurements and cross-sectional microscopy further reveal differences in electrical response and interfacial structure among silver paste formulations and metallization systems, highlighting the need to consider metal contact stability in UV reliability

studies. At the module level, replacing high-transmittance encapsulation films with light-conversion films that convert UV light into visible light limits the relative power loss of the tested TOPCon modules to below 0.6% after a UV dose of 180 kWh/m². This work explores approaches to improving UV stability through passivation interfaces, metal contacts, and spectral management via encapsulation, providing an experimental basis for reliability assessment and materials optimization in passivated-contact silicon solar cells.

**Keywords：** UV irradiation; TOPCon; back-contact solar cells; metal contacts; spectral management

邀请报告

# 破局 TOPCon 效率极限

李彦斌

武汉帝尔激光科技股份有限公司

E-mail: ben.lee@drlaser.com.cn

## 报告摘要

当前 TOPCon 电池量产效率逐步逼近理论极限，正面发射极区域的复合损失成为制约效率进一步提升的关键瓶颈。本报告围绕“破局 TOPCon 效率极限”这一命题，重点介绍正面激光局域结（FLJ）技术的创新机理与量产演进路径。

FLJ 技术通过激光选择性改性，在正面发射极上形成局域改性区，结合二次制绒等湿法工艺，形成前表面交错设计的正面局域结结构，有效改善正面钝化降低复合、优化横向载流子输运，实现开路电压（Voc）、填充因子（FF）的协同提升，为 TOPCon 效率极限的突破提供了新的工艺窗口。

报告同时补充介绍 TOPCon 激光 PolyFinger 技术与二次激光诱导烧结工艺在量产中的协同价值：PolyFinger 结构通过优化背面钝化方式以及载流子收集，降低背面 Polyfinger 对光的吸收，改善电压与电流；二次激光诱导烧结工艺则通过温区与浆料体系的匹配，在保障钝化层完整性的同时提升接触质量与良率一致性。

邀请报告

# 紫外多环境条件耦合加速硅太阳电池及组件衰减

俞　健

西南石油大学新能源与材料学院

E-mail: jianyu@swpu.edu.cn

## 报告摘要

光伏组件在实际应用中面临着多种物理场耦合下环境应力协同作用的严酷考验。美国可再生能源测试中心的报告指出，40%的测试组件在紫外诱导衰减测试中首年衰减超 5%的警戒线。面向硅电池及组件户外紫外与温湿、热循环协同老化评价不足的问题，依托团队在短波光子破断 Si-H 键、TOPCon 紫外亚稳态、EVA/POE 胶膜紫外-湿热失效及 ZnO 紫外屏蔽的前期基础，以 HJT、TOPCon 为对象，开展紫外多环境条件耦合加速衰减研究，解析紫外催化胶膜脱乙酰产乙酸、非晶硅、$AlO_x/SiN_x$ 钝化层界面缺陷上升等机理贡献。针对 TOPCon 重点甄别亚稳态短期增益与长时钝化恶化边界，针对 HJT 重点评估 a-Si:H/Si 界面，构建紫外剂量+湿热/热应力等映射与等效户外加速模型，反馈胶膜改性、酸吸收剂、ZnO 类紫外屏蔽层和金属化工艺优化，降低光伏组件长期衰减与度电成本。

# 基于 Fano 共振表征 TOPCon 电池掺杂浓度的研究

陈宇谋

通威太阳能（成都）有限公司

E-mail: chenym024@tongwei.com

## 报告简要

近年来，TOPCon 等高效电池快速产业化，发射极的掺杂浓度及深度分布直接影响电池的复合与接触性能。然而，目前业界尚缺乏适用于成品太阳能电池的高效掺杂表征方法：二次离子质谱（SIMS）、电化学电容-电压（ECV）等传统手段制样复杂、周期长、成本高，且往往依赖专门的测试样片，难以直接评估成品电池。拉曼光谱具有无接触、空间分辨率高、测试快速的优点，重掺杂硅的拉曼峰因 Fano 干涉效应呈现不对称展宽与峰位移动，其线形与载流子浓度密切相关。本报告将介绍一种基于斜切法的成品电池表征思路：通过小角度斜切将纳米级的纵向深度分布展开为微米级的横向距离，再沿斜切面进行拉曼线扫描，结合 Fano 线形拟合提取掺杂浓度的深度分布，并探讨该法在成品电池上的可行性、精度与应用前景。

# TOPCon 太阳电池紫外衰减特性与机制研究

杨　宁

长三角太阳能光伏技术创新中心

E-mail: shyangn@126.com

## 报告摘要

TOPCon 太阳电池在强紫外辐照下出现严重的紫外诱导衰减（Ultraviolet-Induced Degradation, UVID）现象。与 TOPCon 太阳电池的背面结构（$SiO_X/n^+$-poly-Si/$Al_2O_3/SiN_X$）相比，其正面结构（$SiN_X/Al_2O_3$）的抗紫外性能较差，表现为暗饱和电流密度 $J_0$ 的急剧上升。材料表征结果表明：紫外辐照下，钝化层中的游离氢浓度增加，并且 $SiN_X$ 层中 N-H 键的断裂被发现是除已知的 Si-H 键断裂之外的另一个潜在氢损失来源。与此同时，Al-O 键也被发现受到紫外辐照而解离，伴随有 $Al_2O_3$ 向 Al-OH 的转化以及硅的价态变化。游离氧扩散进入 $SiN_X/Al_2O_3$ 界面和 $Al_2O_3$/Si 界面，导致氧浓度升高。同时，经过紫外辐照剂量 60 $kWh·m^{-2}$ (UV60)辐照后，$Al_2O_3$ 层中形成了大量氧空位，表明薄膜质量受到了破坏。氢相关的退化与氧相关的退化共同导致了表面复合的衰减，经 UV60 辐照后开路电压（Open-Circuit Voltage, Voc）下降 3.46%。此外，正面接触电阻率的增大导致填充因子（Fill Factor, FF）下降 2.82%。最终，TOPCon 太阳电池在 UV60 辐照后能量转换效率出现了 6.72%的大幅衰减。

# 光伏组件 UVID 测试一致性研究

曾　燕

通威太阳能（成都）有限公司

E-mail: CENGY03@tongwei.com

## 报告摘要

随着 n 型隧穿氧化层钝化接触电池（TOPCon）规模化应用，紫外诱导衰减（UVID）成为组件长期可靠性的核心评价维度。当前行业观点普遍认为 Si-H 键断裂是造成 TOPCon UVID 的主要原因。本文根据试验验证结果，提出 TOPCon UVID 主要源于电池正面 $Al_2O_3$层及 Si-$Al_2O_3$界面钝化破坏，其中 Al-O 键受 UVB 辐照断裂是导致电池表面化学钝化与场钝化下降的主因，因此 UV 测试光源的 UVB 占比对 UVID 评估结果影响显著。结合 IEC TS 63624-1 光伏组件 UVID 测试标准，本文围绕 UVB 占比、UV 辐照光强、组件所处状态、UV 后静置时间等变量开展试验研究。结果表明，上述因素均会显著影响 UVID 测试一致性。通过控制以上变量，可提升试验结果的复现性。本研究可为 TOPCon 电池 UVID 测试标准化、产品质量管控提供支撑。

**关键词**：TOPCon UVID；UVB；测试一致性

# 汉可超低温 CVD 赋能电池提效新技术

沈鸿烈

江西汉可泛半导体技术有限公司

南京航空航天大学

E-mail: hlshen@nuaa.edu.cn

## 报告摘要

江西汉可泛半导体技术有限公司基于超低温 CVD 镀膜技术提出了电池提效新方案，该技术是解决电池制造“热损伤”难题的“超低温”镀膜最优解， 同时也为所有电池技术路线提供更为极致的光管理方案，提升电池效率，助力及光伏产业高质量发展。

本报告将介绍这一工作的进展，主要包括以下内容：

1、 超低温 CVD 设备优势：超低温快速沉积、大产能、高质量、低成本；

2、 基于超低温 CVD 的边缘钝化方案：超低温：＜200 ℃，超短时间：＜5 min，工艺环境：无氧 无水；

3、 真空固化方案：超低氧含量：＜10 ppm，超低氮耗：＜5 %；

4、 超低温氮化硅：透光率提升：2 %（提效潜力 0.5%），反射率降低：0.3 %（提效潜力 0.1%）。

**关键词：**超低温 CVD，边缘钝化，高透氮化硅，晶硅电池

# 百佳年代高功率小爬电光伏组件可靠性封装方案

周兴蒙

常州百佳年代薄膜科技股份有限公司

E-mail: xingyingying@betterial.cn

## 报告摘要

随着光伏组件的逐年提升的高效率需求，目前小爬电光伏组件技术因其窄边距、高发电功率的优势，正逐步应于 BC 和 TOPCon 等新型高功率组件。PIB 丁基胶因具有高阻水和高绝缘的特性，被广泛用于小爬电光伏组件边缘封装实现组件的绝缘和阻水。现有小爬电组件因其胶膜和 PIB 胶的匹配性问题导致制程中出现边缘穿刺不良，进而导致组件绝缘失效无法满足最小爬电要求。百佳新型小爬电组件专用胶膜，通过熔指调控和抗 PID 改善，搭配高粘度复合丁基胶产品，可以有效解决边缘穿刺问题，大幅度提升制程良率，配合百佳新型抗 PID 技术，可进一步实现双 EVA 可靠封装，为组件降本提供新的封装方案。

# 射频 PECVD 多分片边缘钝化技术研究

刘帅，李兵，赵增超，谢成，周佑丞

湖南红太阳光电科技有限公司

E-mail: zhouyoucheng@cetc.hnredsolar.com

## 报告摘要

针对光伏电池边缘钝化难题及新型电池低温工艺需求，本文提出一种基于新型射频放电技术的多分片边缘钝化解决方案。本研究通过设备与工艺创新，首创了新型射频放电架构，突破了单面沉积限制，实现了多分片电池边缘的高效双面钝化。该工艺采用低温叠层钝化膜，具有无绕镀、成膜均匀性优等优势，完美适配 BC 电池及铜浆电极技术。测试结果表明，该创新设备与工艺具备显著的产能优势，低温叠层钝化膜配套切割面原位氢处理和红外退火技术，在客户端四分片 TOPCon 电池量产应用后倒角（边片）电池效率提升 0.3+%，直角片（中间片）效率提升 0.6+%。本研究为光伏电池边缘钝化提供了一套高兼容性的高效解决方案，对推动高效光伏电池的技术发展具有重要参考价值。

# n 型 TOPCon 太阳电池中针孔缺陷的形成机制及调控策略

刘铮，杨磊*，杨德仁*，余学功*

浙江大学硅及先进半导体材料全国重点实验室

* E-mail: 22026068@zju.edu.cn; yuxuegong@zju.edu.cn; mseyang@zju.edu.cn

## 报告摘要

重掺杂多晶硅（poly-Si）、隧穿氧化硅（tunnel $SiO_x$）和单晶硅（c-Si）组成的钝化接触结构是实现高效隧穿氧化物钝化接触（TOPCon）太阳电池的关键。然而，超薄隧穿氧化硅层在高温处理过程中容易形成局部不连续的针孔缺陷，过量针孔会加剧界面复合，损害器件性能。因此，明确针孔缺陷的形成机制并实现有效调控，对于进一步提高 TOPCon 太阳电池效率至关重要。这里，我们利用原位球差校正透射电子显微镜，直接观察了针孔缺陷在原子尺度上的形成过程，发现局部较薄的隧穿氧化硅层在热处理过程中逐渐减薄，最终形成 poly-Si 与 c-Si 直接接触的通道。结合元素分布表征和磷扩散实验，我们发现磷在 tunnel $SiO_x$/c-Si 界面处的富集会引入局部应力，促进隧穿氧化硅层失稳和针孔形成。在此基础上，我们通过在 poly-Si 中嵌入两层超薄 $SiO_x$，调节磷的扩散行为及浓度分布，降低界面磷富集程度，实现针孔缺陷的有效调控，并平衡俄歇复合、表面复合和肖克利–里德–霍尔复合。最终，在面积为 330.15 $cm^2$ 的工业化 n 型 TOPCon 太阳电池上，平均转换效率提高了 1.07 个百分点，认证转换效率达到 26.62%。研究结果为理解 TOPCon 太阳电池中针孔缺陷的微观形成过程提供了实验证据，同时为工业化钝化接触结构的优化提供了指导。

**关键词：**TOPCon 太阳电池；针孔缺陷；磷扩散；钝化接触

邀请报告

# 空间用砷化镓薄膜电池低成本制造技术及发展趋势

李华，冷若寒阳，王伟明

江苏宜兴德融科技有限公司

复旦大学

E-mail: wangwm@derongtech.com.cn

## 报告摘要

砷化镓（GaAs）基III-V族化合物太阳电池以其超高的光电转换效率、优异的抗辐照性能和良好的高温特性，在空间能源和聚光光伏等领域具有不可替代的优势。然而，其高昂的制造成本，特别是锗衬底等贵重原材料的消耗以及低效的制造模式，严重制约了其在地面大规模光伏发电及新兴商业航天等领域的广泛应用。本文围绕砷化镓太阳电池的低成本制造技术，系统阐述了实现成本数量级降低的核心技术路径与关键突破，世界各国发展状态。首先，分析了砷化镓电池的成本构成，指出衬底成本、制造规模与模式是成本居高不下的主要瓶颈。进而，重点介绍了研究团队历时十五年建立的薄膜化和衬底复用全套核心技术体系，并已经实现在银河航天灵犀03、06、07、09、10等商业卫星多种形式太阳翼的应用。基于薄膜砷化镓电池的太阳翼具有更低的成本、更高的质量比功率、更高的体积收纳比，为下一步大规模应用奠定基础。本研究表明，通过技术创新，薄膜砷化镓电池在百兆瓦级年产量规模下，制造成本有望降至1美元/瓦，将有力支撑中国太空光伏的大规模应用及未来能源战略。

邀请报告

# 空间用低成本晶硅太阳电池阵研发进展

沈禛珏

上海星瀚聚能技术有限公司

E-mail: shenzj@xhjn.com

## 报告摘要

近年来，随着以美国SPACEX公司为代表的各国商业航天企业大量发射低轨通讯星座卫星，在轨卫星总数已超过人类历史发射空间飞行器数量总和，同时规划构建直连通讯，在轨算力等综合航天开发计划。未来空间能源的规划、论证、建设、使用、维护等工作都将面临重大需求和工程挑战。

本文基于上述行业发展趋势，综合阐述了太阳电池，特别是晶硅太阳电池在空间应用领域的发展历史及脉络；低成本太阳电池在空间应用所面临的具体技术及工程挑战及应对策略；商业化空间太阳电池阵的降本路径及技术发展要点；基于低轨星座应用需求的低成本空间太阳翼研发进展。最后提出空间太阳电池搭载所需环境试验要求建议及空间搭载测试标定解决方案，最后展示了上海星瀚聚能在上述方面的工作及进展。

# 面向太空的光伏可靠性——关键环境挑战、验证路径与失效机理

袁明豪

德国莱茵 TÜV

E-mail: Marc.Yuan@tuv.com

## 报告摘要

本报告聚焦太空光伏在复杂空间环境下的可靠性挑战、验证方法与失效诊断。结合国内外空间光伏标准体系，围绕电子与质子辐照、高真空、极端温度循环、原子氧及真空深紫外等典型环境应力，分析辐射诱导缺陷、材料出气、界面退化、互联疲劳与防护层侵蚀等失效机理。报告以 AM0 电性能标定为基础，介绍环境模拟试验，以及结合轨道粒子谱与屏蔽条件的寿命末期（EOL）辐照衰减预测方法；通过功率保持率分解，结合 I–V、EQE、EL/PL 及材料与界面表征，建立性能变化与失效证据之间的联系，区分可恢复变化与残余损伤。在此基础上，梳理从初始表征、环境暴露、阶段检测、恢复评估到根因验证的技术路径，将性能损失、诊断证据与改进措施相衔接，为太空光伏电池与封装组件的材料选型、结构优化和可靠性评价提供测试与分析依据。

邀请报告

# 太空光伏多元化发展下的关键光电测试问题探讨

张鹤仙

陕西众森电能科技有限公司

E-mail: zhx@gsola.cn

## 报告摘要

空间任务对成本、比功率和服役寿命的差异化要求，推动柔性砷化镓、薄片晶硅及钙钛矿叠层电池并行发展。随着测试对象由裸电池扩展至封装组件和太阳翼，仅统一辐照度和温度，仍难以区分器件性能差异与测量条件引入的偏差。本文围绕地面测试结果的可比性及其对在轨工况的适用性，分析产品特性、测试场景和环境模拟条件对光电性能评价的影响。

影响可比性的因素既来自器件，也来自评价目的。柔性电池的弯曲状态和散热边界会影响输出，钙钛矿叠层器件的迟滞则使功率测量依赖预处理与扫描时序。研发阶段需辨识材料及工艺变化对稳定输出的影响，制造阶段需在规定节拍内识别批次波动与异常，航天应用则关注封装互连后的任务功率与寿命裕量。为使测量结果能够跨场景传递，计量与第三方评价需明确参考条件、修正方法和测量不确定度。

基于上述分析，本文提出分层验证方案。首先以单项测量建立性能基线，通过单因素试验确定光谱、温度或偏置对输出的独立影响。继而在耦合试验中考察因素间的交互作用，并通过原位测量区分环境应力作用期间的衰减与应力撤除后的恢复。地面试验用于复现条件和辨识机理，在轨遥测用于检验实际热边界与累积辐照下的输出是否符合地面试验结果。

在工程实施中，电流－电压（I-V）测量以大气层外太阳光谱（AM0）下的量值传递为基础，针对样品形态控制光源、温度、接触状态与采集时序。多结器件辅以分结量子效率（QE）测量，判别光谱失配对输出电流的影响。紫外老化试验结合任务条件设定辐照波段、剂量率与样品温度，利用热真空平台原位跟踪电性能，为评估地面加速试验与在轨衰减过程的对应关系提供依据。

邀请报告

# 太空光伏测试认证方案

陈永充

TÜV NORD (Hangzhou) Co., Ltd.

杭州汉德质量认证服务有限公司

E-mail: cohchen@tuv-nord.com

## 报告摘要

太空光伏历经几十年的技术发展迭代，从早期晶硅电池发展至单多结砷化镓和薄膜电池等高效电池，刚性器件逐渐发展到柔性器件，柔性阵列、展开式阵列和卷式阵列等技术逐步实现工程化应用。依托中国完整的光伏产业链与成熟航天体系，为太阳能电池技术发展和太空光伏器件运用提供坚实支撑。分析了太空高低温环境、高能粒子辐照、强紫外辐射、原子氧侵蚀、真空出气等严酷环境挑战，进而提出了一套涵盖性能测试、空间环境模拟、机械应力及系统评估的全维度可靠性测试体系，旨在以科学严谨的测试方案为太空光伏器件工程化应用与产业高质量发展提供技术支撑与可靠保障。

**关键词：**太空严酷环境；太空光伏器件；性能测试；可靠性测试

邀请报告

# 太空光伏技术发展思考

彭宗阳
北京炎和智能科技有限公司
E-mail: pengzy@yanhesolar.tech

## 报告摘要

面向商业航天对太阳翼高效率、轻量化、可靠性与成本的综合需求，本报告结合炎和科技的技术布局与研发实践，分享对太空光伏技术发展方向的思考。报告首先介绍炎和科技及其空间能源业务布局，围绕砷化镓、晶硅与钙钛矿/晶硅叠层三类技术路线，结合太阳翼成本测算，从转换效率、比功率、成本构成与应用条件等维度，讨论不同路线的技术特点与发展空间。随后介绍炎和科技在砷化镓太阳翼方面的相关能力，并重点分享面向空间应用的晶硅太阳电池稳定性研究进展，围绕空间环境下的性能保持与长期可靠性，讨论器件设计与工程应用中的关键问题。最后，介绍钙钛矿/晶硅叠层方向人工智能驱动科学研究（AI4S）的阶段性结果，围绕材料筛选、工艺优化与实验反馈，分享数据驱动的研发思路。报告结合不同路线的应用条件与验证需求，为太空光伏技术选型、稳定性提升与研发协作提供参考。

**关键词：**太空光伏；砷化镓；晶硅；钙钛矿/晶硅叠层；AI4S

邀请报告

# 空间用晶体硅异质结太阳电池抗辐照特性研究及应用进展

孟凡英[1]，袁玥[1]，时强[1]，石建华[2]，韩安军[2]，刘正新[1,2]

[1]中国科学院上海微系统与信息技术研究所新能源技术中心

[2]六智韬新能源科技（上海）有限公司

E-mail: fymeng@mail.sim.ac.cn

## 报告摘要

伴随商业航天的快速发展，近地轨道卫星发射频率越来越高，卫星在轨运行的能源来自空间太阳能，太阳电池是唯一能将空间太阳能转换成电能的器件。传统空间太阳电池是多结砷化镓电池，转换效率高，抗辐照能力强，但成本也非常高。低轨星座面临卫星数量庞大，需要更大功率更低成本的太阳翼。在此背景下，地面成熟的晶体硅太阳电池成为目前较为理想的候选者。但近地轨道空间环境不同于地面，充满高能电子、质子、强紫外、原子氧、高低温冲击、空间碎片等，对硅太阳电池很有挑战性。

本报告主要介绍课题组在空间用硅异质结太阳电池抗辐照特性，以及后处理技术改善辐照衰减能力。基于地面模拟空间环境应力实验的结果，优化、设计和制备了不同的硅异质结电池柔性太阳阵，应用于谷神星、轻舟飞船试样、SZS 实验卫星、SAR 卫星电建一号等，通过在轨运行实测数据，验证硅异质结太阳电池及太阳翼在真实低轨空间环境下的功率衰减特性。

邀请报告

# 三结砷化镓电池热-电耦合仿真、阻抗分析及可靠性研究

张　臻

上海交通大学智慧能源创新学院

E-mail: zhen.zhang21@sjtu.edu.cn

## 报告摘要

针对三结砷化镓电池在航天并联阵列中的缺陷诊断、热损伤与可靠性评估问题，开展阻抗表征、反向电流热损伤及温度仿真研究。电学方面，基于双二极管等效电路建立电池模型；热学方面，构建包含电池、封装层和碳纤维基板的热学模型，并进一步形成并联失配下的热-电耦合模型。借助 Simulink 电路仿真，结合温度修正 I-V 特性，分析反向电流与温升之间的正反馈关系。分别讨论单片正常电池、单片缺陷电池、单条电池串及太阳电池阵列在并联失配下的温度变化和热损伤行为，对热失控、热击穿临界条件及器件性能变化进行分类分析。搭建集成暗态 IV、电致发光成像和电化学阻抗谱的测试平台，建立适用于三结砷化镓电池的阻抗等效电路模型，提取不同正向偏压下的串阻、并阻等参数，并结合单色光选择性激发的光模量分析，实现子电池阻抗特征的分离。将该方法用于高温加速老化样品和典型缺陷样品，考察隐裂、性能退化等缺陷的阻抗响应。在工程应用方面，分析不同性能等级及在轨回收电池的阻抗特征，讨论阻抗参数在性能分级与损伤评估中的作用，并关注在轨缺陷电池的隐蔽性。从热-电耦合角度研究并联失配条件下缺陷电池的温升与失效机理，分析反向电流、偏压及缺陷尺度对热失控和热击穿的影响，讨论阵列结构与防反二极管配置的抑制作用。阻抗结果表明，不同缺陷类型电池的等效电路参数存在差异，并阻变化较为明显；局部分流点缺陷电池在低偏压下并阻显著降低，可用于性能下降电池的筛选和比较，阻抗谱在一定偏压下呈现多个半圆趋势，可能与不同材料界面层或子电池对应。后期工作将进一步关注实际工况下并联失效反灌电流大小的计算，并对空间单体太阳电池、组件级及太阳电池阵热-电耦合仿真进行总结与展望。相关研究可为航天太阳电池可靠性评估、在轨状态监测及阵列安全设计提供参考。

**关键词：**三结砷化镓电池；并联失配；热-电耦合；可靠性

# 商业航天背景下太空光伏封装材料应用需求与产业化探索

# Application Demand and Industrial Exploration of Space PV Encapsulation Materials under Commercial Aerospace

李雅慧

上海回天新材料有限公司

E-mail: liyahui@huitian.net.cn

## 报告摘要

随着商业航天产业化进程加速与低轨卫星星座规模化组网，太空光伏已成为空间能源系统的核心发展方向。区别于地面场景，空间太阳翼长期服役于高真空、原子氧侵蚀、紫外与带电粒子综合辐照、宽温域高低温交变等极端工况，对封装保护体系及配套胶粘剂提出了低出气（ASTM E595：TML＜1%、CVCM＜0.1%）、耐空间环境侵蚀、宽温域结构稳定等严苛性能要求，关键用胶点位覆盖盖片胶接、电池片贴装、基板与结构件固定等环节。

针对太空光伏专用封装材料的行业技术缺口，回天新材依托光伏封装材料与高端胶粘剂的技术积淀，与国内卫星企业深度开展空间级封装材料联合开发，已形成覆盖材料选型、配方设计与验证评价的清晰技术路线。本报告将系统梳理太空光伏产业发展背景与太阳翼封装应用场景，解析关键用胶点位及其性能需求，阐明封装材料与配套胶粘剂在提升太阳翼空间环境适应性、结构稳定性与服役寿命中的核心作用。

面向后续，回天将持续推进适配空间极端工况的专用封装材料迭代攻关与批量配套能力建设，助力太空光伏产业链关键材料国产化落地。

**关键词：**太空光伏；商业航天；太阳翼；封装材料；胶粘剂

**Keywords:** space photovoltaics; commercial aerospace; solar array; encapsulation materials; adhesives

邀请报告

# 逐日苍穹——太空光伏电缆技术开发与应用

潘　静

上海金友金弘智能电气股份有限公司

## 报告摘要

在低轨卫星星座规模化组网与商业航天高速发展的背景下，太空光伏发电系统对配套电缆提出了远超地面应用的严苛要求。卫星上线缆长期处于真空、高低温循环、电子/质子辐照、原子氧与紫外老化的多重极端环境叠加之中，须同时满足真空质损（TML≤1.0%、CVCM≤0.10%）等出气指标与减重、高可靠的约束，是太阳翼电能高效汇集与全星安全配电的关键基础部件。

太空光伏电缆的技术门槛、产品体系与开发路线：一是分析低轨星座带来的市场空间与单星线缆价值量构成；二是解析太空环境对导体、绝缘、屏蔽与护套材料的选型约束；三是提出覆盖镀银铜丝、辐照交联 XETFE（C55）、铁氟龙（AF200）以及聚酰亚胺、PEEK 深空储备材料的产品谱系。相关成果可为太空光伏系统的长寿命、高可靠供电提供线缆级保障，助力我国低轨卫星星座建设关键材料的自主可控。

**关键词：**太空光伏；低轨卫星；卫星电缆；辐照交联；XETFE；国产替代

# 柔性 P-HJT 电池技术开发及其在钙硅叠层电池中的应用研究

陶科，杨宝海，闫宝杰

营口金辰机械股份有限公司

E-mail: taoke@jinchenmachine.com

## 报告摘要

以电子为少子的 p 型 HJT（p-HJT）电池在同等辐照剂量下效率衰退远低于 n 型 HJT 电池（n-HJT）。基于双面准对称结构的 p-HJT 电池具有天然的薄片化优势，硅片厚度可以降至 50 微米，从而进一步提升 p-HJT 电池的抗辐照性能。钙钛矿薄膜电池与柔性 p-HJT 结合形成叠层电池，可以同时具备硅异质结电池稳定性佳、工艺成熟、产业链完善的优势与钙钛矿材料带隙可调、光谱适配性强、光电转换效率高的特点，理论光电转换效率远高于传统单结电池，同时具备高比功率、轻量化、低成本的突出优势，是下一代空间光伏技术的核心发展方向。

本论文基于 p-HJT 电池，将仿真与工艺相结合，系统研究了硅片电阻率、厚度及表面织构化技术对 p-HJT 电池转换效率、抗辐照稳定性及柔韧性的影响，通过比较不同窗口层材料对电池性能的影响，探索了 p-HJT 电池的抗辐照加固技术。将 80 微米 p-HJT 电池与钙钛矿形成叠层电池，转化效率超过 32%@AM1.5（1cm$^2$），上述实验为进一步研制高稳定性、高功质比柔性钙钛矿/p-HJT 叠层太空光伏奠定基础。

# 太空电池测试方案介绍

张 余

苏州伟信智能科技有限公司

E-mail:yu.zhang@visiontec.com.sg

## 报告摘要

太空光伏应用场景中的电池种类主要有 III-V 族叠层电池、PERC 电池、p 型 HJT 和钙钛矿电池。 针对这些电池或组件，苏州伟信提供的测试解决方案包括： 量子效率测试设备、AM1.5G & AM0 兼容的稳态 IV 测试设备、PL/EL/IV 一体测试表征设备、AM1.5G&AM0 兼容的组件 IV 设备以及非接触 I-V 测试设备。会议将集中阐述这些电池的测试机理及相应的设备特点。

邀请报告

# 机理·改善·实证·标准：基于 r-UVIDir-UVID 分类的 TOPCon 紫外衰减全景解析

李志伟，王乐

天合光能股份有限公司

E-mail: zhiwei.li@trinasolar.com

## 报告摘要

紫外诱导衰减（UVID）是 TOPCon 太阳能电池面临的关键可靠性挑战。为了建立与 IEC TS 63624-1 光浸泡恢复流程相统一的评价框架，本综述将 UVID 划分为可逆（r-UVID）和不可逆（ir-UVID）两个组分。亚稳态的 r-UVID 会在暗存储期间引起暂时的功率损失，但通过光浸泡或热退火可使其得到大幅恢复。户外实证数据证实，这种 r-UVID 行为对实际的户外发电量影响微乎其微，这强调了将其与永久性衰减剥离的必要性。 在机理层面，UVID 由 Si–H 键断裂、氢再分布以及热载流子注入所驱动。我们进一步探讨了包括 AlOx 优化和氢管理在内的缓解策略，为 TOPCon 的可靠性提供了一个全面的框架和未来的研究方向。

**关键词**：r-UVID；ir-UVID；TOPCon；亚稳态；实证发电

邀请报告

# 气缸加载系统在光伏组件静态载荷测试中的应用

李凤琦

上海质卫环保科技有限公司

E-mail:fq.li@zealwe.cn

## 报告摘要

光伏组件静态载荷测试采用气缸加载时，气体可压缩性及气缸摩擦力会影响载荷控制精度，多气缸协同加载还面临载荷均匀性与平稳性问题。组件发生突发形变时，也可能引起瞬时过载。针对上述问题，采用低摩擦气缸并在气路中增设恒压泄压阀，以改善载荷控制与过载响应，提高测试过程的稳定性和可靠性。

# 光伏钢边框的性能与可靠性解决方案浅析

洪天翔

德国莱茵 TÜV

E-mail: Andy.Hong@tuv.com

## 报告摘要

本次演讲围绕光伏组件钢边框的选型与可靠性评估，结合 2 PfG 3158 介绍材料、截面、角码、安装及防腐要求，分析其在高载荷、风沙、寒冷和低碳场景中的价值与风险。内容涵盖外观尺寸、镀层、接地、力学、盐雾、气候及复合老化测试，强调关注老化后的残余承载与连接性能，并探讨组件适配、支架协同和全生命周期碳排放，为产品导入与项目应用提供参考。

# 不同技术路线光伏组件工作温度特性及差异分析

吴军，王俊，尉元杰

苏州阿特斯阳光电力科技有限公司

E-mail: zoe.wu@csisolar.com

## 报告摘要

组件工作温度是影响光伏组件输出功率及系统发电性能的关键参数。随着隧穿氧化层钝化接触（TOPCon）和背接触（BC）等高效 n 型硅光伏技术的发展，不同技术路线在光学吸收与电能转换特性上的差异可能改变组件能量平衡及实际工作温度。本文结合标准标称组件工作温度（NMOT）测试、实证电站运行监测及能量平衡建模，对 TOPCon 与 BC 组件的工作温度特性及差异形成机制进行研究。

基于符合 IEC 61853-2:2016 要求的户外测试平台，在相同边界条件下开展 NMOT 对比测试，并利用江苏常熟跟踪光伏电站现场监测数据分析两类组件的实际工作温度。同时，结合光线追迹计算获得的光学吸收率，构建光学吸收、电能转换与热耗散耦合的稳态能量平衡模型，对温度差异形成机制进行定量解析。结果表明，BC 组件在标准测试和实际运行条件下均表现出高于 TOPCon 组件的工作温度。BC 与 TOPCon 组件的 NMOT 分别约为 40.2℃和 38.1℃，相差约 2.1℃；实证电站平均工作温度分别约为 34℃和 33℃，BC 组件平均高约 1℃。两种场景下温度差异呈一致趋势，其绝对值受环境条件及运行工况等边界条件影响。模型预测值与实测结果具有良好一致性，平均偏差接近零，均方根误差约为 2℃。

基于模型的能量平衡分析表明，在稳态条件下，组件吸收的太阳辐射能量除转化为电能外，其余部分最终以热量形式耗散。尽管 BC 组件具有更高的光电转换效率，但其增加的太阳辐射吸收未被新增电功率输出完全抵消，使净热源增加，从而形成更高的平衡工作温度。研究表明，组件工作温度由光学吸收、电能转换及热耗散过程共同决定，高转换效率并不必然对应更低的工作温度。研究结果可为不同技术路线组件的温度预测、发电量模拟及电站性能评估提供参考。鉴于不同 BC 技术及组件设计的光学和电学特性可能存在差异，本文定量结果适用于所研究的具体组件。

# 风光同场场景中 BC 与 TOPCon 发电性能实证

陈军，胡国波，李强，付玉锋

隆基绿能科技股份有限公司

E-mail: liqiang27@longi.com

## 报告摘要

为研究在风光同场场景下BC与TOPCON抗阴影遮挡的性能，本文依托甘肃环县毛井一期100MW风电场搭建户外实证平台，构建风机叶片周期性动态遮挡特殊工况，开展BC与TOPCON在风机叶片周期性遮挡条件下长周期发电性能对比测试。经过户外3个月实证，在风机叶尖周期性遮挡下，BC组件较TOPCON组件单瓦发电增益为2.12%、在风机叶中/塔筒周期性遮挡下，BC组件较TOPCON组件单瓦发电增益为1.33%。表明在实际风机叶片周期性动态阴影遮挡条件下，BC较TOPCON表现出更优异的抗阴影性能，能够挽回更多发电量。本研究验证了BC组件在风光同场风机叶片周期性遮挡条件下的适配性，从而为BC组件在风光同场场景中的应用提供了有利的实证支撑。

**关键词：**风光同场；BC 组件；TOPCon 组件；风机叶片；阴影遮挡

# Empirical Study on Power Generation Performance of BC and Topcon in Wind-solar station

## Abstract

To investigate the anti-shading performance of BC and TOPCon modules in wind-solar co-location scenarios, this paper builds an outdoor empirical test platform based on the 100 MW Phase I Wind Farm in Maojing, Huan County, Gansu, constructs the special working condition of periodic dynamic shading caused by wind turbine blades, and carries out a long-term comparative test on the power generation performance of BC and TOPCon modules under such periodic shading conditions. After 3 months of outdoor empirical tests, the results show that under periodic shading from wind turbine blade tips, the per-watt power generation gain of BC modules over TOPCon modules reaches 2.12%, while under periodic shading from the middle part of blades and the tower barrel, the per-watt power generation gain of BC modules over TOPCon modules is 1.33%. It indicates that under the actual periodic dynamic shadow shading of wind turbine blades, BC modules exhibit superior anti-shading performance than TOPCon modules and can recover more power generation. This study verifies the adaptability of BC modules in wind-solar co-location scenarios with periodic wind turbine blade shading, thus providing favorable empirical support for the application of BC modules in such scenarios.

**Keywords**: wind-solar station, BC module, TOPCon module, wind turbine blade, shadow shading

邀请报告

# 沙戈荒应用场景下光伏直流侧连接解决方案

刘家巍

史陶比尔（杭州）精密机械电子有限公司

E-mail: jiawei.liu@staubli.com

## 报告摘要

沙戈荒地区太阳能资源丰富、土地成本低，光伏结合治沙生态效益显著，建设光伏电站潜力巨大。沙戈荒环境具有高紫外、高温、温差大、风沙大的特点，对光伏直流连接器的长期稳定运行有更加场景化的要求。本文将介绍对 MC4-Evo1 依据相关标准针对沙戈荒场景开展的相关专项测试，包括 UV 测试、TC 测试、紫外热循环测试（UV+TC）、吹沙测试、干热测试、Bending test 等，验证 MC4-Evo1 在沙戈荒场景下的耐候性、可靠性与稳定性，提供该场景下直流侧光伏连接器的产品解决方案。

**关键词：**光伏直流连接器；MC4-Evo1；沙戈荒；测试

# 异质结发电挑战与通威方案

樊华龙，王思平，张磊，刘松民，张林，邢国强

通威太阳能（成都）有限公司

E-mail: fanhl01@tongwei.com

## 报告摘要

异质结（HJT）组件要从技术路线竞争中突围，必须同时满足高转换效率与低成本两大要求，同时还需应对银耗依赖、湿热/紫外老化衰减、户外发电性能验证等行业共性挑战。针对上述挑战，通威在电池端、组件端与实证端形成了系统性解决方案：电池端通过银包铜浆料、钢网印刷、光子烧结将银单耗降至 3.7mg/W，基于电镀铜互连实现 100%无银化，12μm 线宽栅线具备量产能力，配合差异化绒面、无铟 TCO 材料持续提效降本；组件端通过创新光转胶膜实现 UV120 衰减 1.94%，抗腐蚀封装实现 DH2000 衰减均值 3.18%，并以多批次多倍 IEC 标准可靠性测试保障产品质量；实证端自主设计建设 7 座高精度实证电站，覆盖热带季风、亚热带季风、温带大陆、高山高原等 5 大主要气候类型，配置直流高精度采集设备与全要素气象传感器。多频次全面发电数据监控表明：异质结组件户外温度系数低至 0.24%/℃，在高辐照、高温下较 TOPCon 发电增益可达 2%~3%；光转组件较截止组件累计单瓦增益 0.51%；高寒环境下 THC 组件衰减可控。基于实证数据支撑，异质结铜互连三分片组件以低温度系数、90±5%高双面率、低贵金属依赖度、低碳足迹等优势，精准面向高温高辐照地面集中式与高效率低碳足迹工商业分布式市场，形成差异化产品方案。

# 高效晶体硅光伏组件电学参数测量不确定度评估

高兵，王一超，张毅，曹闯，杨俊伟，谢璇，

姚柳，张鸿飞，钟天鹏

挪亚检验认证集团有限公司

E-mail:helen.gao@noagroup.com

## 报告摘要

本文以挪亚检验认证集团有限公司新能源事业部的光伏组件测试系统为依托，通过阐述质量体系、溯源链、测试方法和不确定度来源，介绍了评估高效晶体硅光伏组件电学参数测量不确定度的方法。评估了高效晶体硅光伏组件的 Isc、Impp、Voc、Vmpp、Pmax 和 FF 的室内测试不确定度分别为 2.12 %，2.13 %，0.86%，1.08 %、2.27 %和 2.56%。主要不确定度来源对组件功率测试影响的大小依次为：标板＞辐照＞温度＞电子负载＞几何位置及角度＞MC4 接触电阻，测试重复性、电容效应引入的不确定度较小。总的来说，对设备的悉心维护、质量体系的有效运行是维持本测试系统测试不确定度的有效途径。标准组件的溯源级别越高和不确定度越小、WPVS 测试方法的建立和光谱失配因子的计算，能够降低本测试系统的不确定度。希望本文提供的方法可以有效降低高效晶体硅光伏组件的测试不确定度和保证其功率测试的准确性，助力光伏产品的研发和在市场上的公正流通。

# 光伏组件 DH 可靠性-助焊剂腐蚀研究

夏宇璇

通威太阳能（成都）有限公司

E-mail: xiayx01@tongwei.com

## 报告摘要

湿热老化（DH）测试是光伏组件可靠性的关键测试项，该测试将组件置于 85 ℃、85% 湿度条件老化 1000 h，存在周期长、成本高，难以满足快速风险筛查的痛点。早期的研究表明组件湿热老化衰减主要来自醋酸腐蚀，基于醋酸腐蚀原理，光伏电池醋酸蒸汽耐久性测试方法（SEMI PV79）被开发出来并用于量产质量监控，有效地降低了 DH 失效风险。然而，近几年 UNSW、Fraunhofer 等研究机构发现 DH 过程中除了醋酸腐蚀，助焊剂残留引发的腐蚀也是造成 DH 失效的重要因素，该腐蚀对 n 型组件耐高温高湿性能提出了新的挑战。本文深入研究了影响助焊剂腐蚀大小的敏感因子，并开发了电池级助焊剂腐蚀快速评估方法，该方法只需测试 2 小时，就可实现腐蚀风险预判、失效溯源与对比试验，适用于助焊剂选型、浆料评估以及前置质量风险管控。该方法具备良好可复现性，为供应链物料筛选与组件湿热可靠性风险管控提供高效可行的技术方案。

# 组件玻璃机械性能评价体系构建及 IEC 标准化研究

尉元杰，曾雪华，窦国强，吕瑞瑞，许涛

阿特斯阳光电力集团股份有限公司

E-mail: yuanjie.yu@csisolar.com

## 报告摘要

随着双玻组件、大尺寸组件及玻璃薄型化的快速发展，光伏玻璃已由单纯的保护与透光材料转变为决定组件长期可靠性的关键结构材料。然而，现行 IEC 61215 系列等标准以组件级合格判定为目标，玻璃仅作为组件的一部分被间接考核，缺少面向玻璃本体的量化指标、判定阈值与可复现的试验方法，难以支撑来料检验、工艺变更评价与供应链质量一致性管理。为此，本文在系统梳理光伏玻璃典型失效模式的基础上，构建了涵盖尺寸与外观、表面应力（含均匀性）、弯曲强度、热冲击与落球冲击五个维度的材料级机械性能评价体系，并据此形成 IEC TS 62788-9-2 技术规范草案。

针对体系中的关键方法开展研究：一是建立 SCALP 表面应力测试方法及其均匀性评价指标，量化测试重复性与主要影响因素；二是优化全尺寸玻璃四点弯曲测试方法，改善标准小试样结果对整板性能代表性不足的问题；三是开展表面应力、弯曲强度与裂纹尺寸的关联分析，建立无损表征量与破坏强度之间的映射关系；四是开发热冲击试验条件并验证玻璃极限性能；五是建立孔区及局部应力集中区域的落球冲击评价方法。

研究结果表明，表面应力均匀性与玻璃机械性能稳定性具有良好的对应关系，优化后的 SCALP 测试方法可将同片玻璃 9 点法测量结果的标准差控制在 1 MPa 以内。基于 104 片全尺寸 2.0 mm 光伏玻璃的验证结果，建立了推荐上下跨距为 400/800 mm 的四点弯曲测试方法，所得特征强度及威布尔模量均满足统计拟合要求，测试结果具有良好一致性。热冲击试验显示，20 组样品在 200 ℃叠加冰水冲击条件下均未发生失效，而在约 390 ℃时出现热冲击破坏，表明光伏玻璃具有较高的热冲击耐受能力，并能够有效反映边缘加工质量和残余应力水平差异。落球冲击试验表明，该方法能够有效评价孔区及局部应力集中区域的抗损伤能力，其中前板玻璃采用 1000 mm 统一冲击高度进行评估，背板玻璃则通过差异化冲击高度实现不同应力集中区域的风险识别与区分。经多家实验室验证，建立的评价体系具有良好的重复性和实验室间一致性，可为光伏玻璃产品设计、质量控制、认证评价及 IEC 标准化工作提供技术依据。

上述工作形成了“无损表征—破坏验证”相结合的玻璃机械性能评价路径，可为光伏玻璃的设计开发、来料质量控制、认证评价及 IEC 标准制定提供技术依据。

**关键词：**光伏玻璃；表面应力；四点弯曲强度；热冲击；落球冲击；机械性能评价

# Construction of a mechanical performance evaluation system for photovoltaic module glass and its IEC standardization

Yuanjie Yu
CSI Solar Co., Ltd.
E-mail: yuanjie.yu@csisolar.com

**Abstract**

Driven by the rapid adoption of bifacial and large-format modules and by the trend towards thinner cover glass, photovoltaic (PV) glass has evolved from a passive protective and transmissive layer into a load-bearing structural element that governs the long-term reliability of the module. Existing IEC standards, however, are written for module-level qualification: glass is only assessed indirectly as part of a finished module, and no material-level metrics, acceptance thresholds or reproducible test methods are defined for the glass itself. This makes it difficult to control incoming glass quality, to evaluate process changes, and to assure consistency across a global supply chain. In this work, the characteristic failure modes of PV glass are first reviewed, and a material-level mechanical performance evaluation system is constructed covering five dimensions: dimensions and appearance, surface stress (including its uniformity), flexural strength, thermal shock and falling-ball impact. The system has been submitted as a draft IEC Technical Specification, IEC TS 62788-9-2.

The key test methods within the system were developed and validated: (i) a SCALP-based surface stress method with a dedicated uniformity metric, together with an assessment of repeatability and the dominant influencing factors; (ii) an optimized full-size four-point bending procedure addressing the limited representativeness of small specimens; (iii) a correlation analysis linking surface stress, flexural strength and flaw/crack size, establishing a mapping between non-destructive indicators and destructive strength; (iv) thermal shock test conditions with verification of the limiting performance of the glass; and (v) a falling-ball impact method for perforated areas and other local stress concentrators.

The results demonstrate that surface stress uniformity is closely correlated with the stability of the mechanical performance of photovoltaic glass. By optimizing the SCALP measurement procedure, the standard deviation of nine-point surface stress measurements on the same glass pane can be controlled within 1 MPa. Based on a validation study involving 104 full-size 2.0 mm photovoltaic glass specimens, an optimized four-point bending test method with a recommended upper and lower span configuration of 400/800 mm was established. Weibull statistical analysis confirmed that the measured characteristic strength and Weibull modulus satisfied the fitting requirements, indicating good repeatability and consistency of the test results. Thermal shock testing showed that none of the 20 groups of specimens failed when subjected to an ice-water quench after heating to 200 °C, whereas thermal shock fracture was observed at approximately 390 °C. These results indicate that photovoltaic glass possesses excellent resistance to thermal shock and that the test method is capable of effectively distinguishing differences in edge processing quality and residual stress levels. Drop-ball impact testing further demonstrated that the method can effectively evaluate the damage resistance of hole regions and local stress concentration areas. For front glass, a unified impact height of 1000 mm was adopted, while for rear glass, differentiated impact heights were applied to enable effective risk identification of various stress concentration regions. Interlaboratory comparison studies involving multiple laboratories verified that the proposed evaluation system exhibits good repeatability and reproducibility, providing a reliable technical basis for photovoltaic glass product design, quality control, certification assessment, and IEC standardization activities.

The work establishes a two-tier “non-destructive characterization plus destructive verification” route for evaluating the mechanical performance of PV glass, and provides a technical basis for glass design, incoming quality control, certification and the ongoing development of IEC standards.

**Keywords:** Photovoltaic glass; Surface stress; Four-point bending strength; Thermal shock; Falling-ball impact; Mechanical performance evaluation; IEC TS 62788-9-2

# 玻璃力学性能和冰雹通过率相关性研究

伍胜兰

通威太阳能（成都）有限公司

E-mail: wusl037@tongwei.com

## 报告摘要

随着极端天气频发与组件双玻化、大型化趋势的叠加，双玻组件面临的冰雹冲击风险显著上升。为明确玻璃力学性能对组件抗冰雹能力的影响，开展了其与冰雹通过率的相关性研究。首先，研究了正面冲击下应力在组件多层结构中的传递机制，阐明了背玻碎裂作为典型失效模式的力学本质；其次，通过冰雹冲击试验，系统考察了表面压应力、厚度公差及背玻开孔处理等玻璃关键参数对冰雹通过率的影响规律。结果表明：冰雹通过率随玻璃表面压应力的升高而显著提高；控制厚度呈正公差及背玻开孔磨边处理均可显著提升通过率。玻璃力学性能与冰雹通过率存在显著相关性，研究结果可为双玻组件抗冰雹设计中的玻璃选型与参数优化提供理论及实验依据。

邀请报告

# 中来 Namic 技术-光伏电池金属化创新与突破

李　锋

泰州中来光电科技有限公司

E-mail: boven@jolywood.cn

## 报告摘要

光伏电池与组件价格持续下探，而作为核心电极材料的银价格高位剧烈震荡，使本已微薄的制造端利润被进一步压缩。传统降银路径依赖栅线细化、浆料及工艺优化，银用量已大幅降低，更细栅线会显著放大可靠性风险。中来 Namic（Nano Armor Metal Inter-contact）技术：在晶硅电池内，引入纳米级“铠甲”接触层，垂直方向借助量子隧穿形成欧姆接触，横向呈绝缘态抑制漏电，并阻挡金属原子向硅衬底扩散，由此实现铝电极替代银电极。基于 TOPCon 平台的 Namic 1.0 已实现量产，银用量降低 35%，电池效率与 TOPCon 持平；组件满足 IEC 61215 标准，抗 PID、抗湿热老化及紫外老化性能优异，且可直接沿用现有金属化设备，兼容主流安装与质保体系。Namic 2.0 融合多分片结构与柔性互联，降银 60%，组件功率提升 10 W；Namic 3.0 基于 BC 平台，可实现全无银电极方案，组件功率提升 30 W。中来 Namic 技术使光伏制造与银价波动解耦，使项目投资回报与全生命周期成本更可预测，为光伏行业由低银走向无银提供全新量产技术路径。

邀请报告

# 面向强标 1 级能效光伏组件的新型封装解决方案

陈国清

苏州中来光伏新材股份有限公司

E-mail: chengq02@jolywood.cn

## 报告摘要

随着光伏组件向大尺寸硅片、满屏化及高功率方向发展，组件边缘绝缘距离缩减、水汽侵入风险增加；与此同时，0BB 无主栅技术在降低电池银耗的同时，也对细焊带的定位与封装工艺提出更高要求。针对上述需求，中来新材开发了 JW-PIB01 光伏专用丁基胶及 0BB 皮肤膜产品。其中，丁基胶以聚异丁烯为核心材料，兼具高阻水性、绝缘性与界面密封能力，可用于组件边缘密封，为扩大有效发电面积及提升长期可靠性提供材料支持；皮肤膜通过热定型工艺实现焊带固定，适配直接覆膜等 0BB 封装路线，改善焊带偏移及外观均匀性问题。报告将结合产品结构、关键性能与应用工艺，探讨新型封装材料对高效组件降本增效及可靠性提升的支撑作用。

**关键词：** 光伏组件；丁基胶；皮肤膜；0BB；封装可靠性

邀请报告

# 结构跃升：光伏边框从铝合金向高强钢的技术演进

邓如华

江苏中坚金属材料有限公司

E-mail: dengruhua@backbonesolar.com

## 报告摘要

当前光伏组件不断增大，传统铝边框持续减薄，机械强度不足、安装孔撕裂等安全隐患显现，行业亟需新一代边框方案。报告聚焦双梁型合金钢边框，对比铝边框、复合边框材料性能差异，解析第三代钢边框刚柔并济结构、锌铝镁镀层自修复等核心优势。该产品抗撕裂、抗风载、抗雪载荷性能优异，热膨胀系数与玻璃适配性佳，从结构上化解钢材与玻璃因弹性模量不同带来的适配难题，兼容现有组框及安装工艺，双面发电增益约 2%，为高风压、高雪压、高寒等严苛场景提供更安全可靠的光伏边框，是光伏边框从铝合金向高强合金钢演进的重要技术方向。

邀请报告

# 晶硅太阳电池去银金属化技术方案与进展（2026 年）

毛毅强

广州市儒兴科技股份有限公司

E-mail: yiqiang.mao@rutech.com

## 报告摘要

晶硅电池正加速向 TOPCon、TBC 等 N 型技术迭代，效率提升的同时单瓦银耗也在上升，进一步加深了对银浆的依赖。全球白银供需缺口扩大、银价持续高位运行，光伏已成为白银最大工业消费领域，银浆在 N 型电池非硅成本中的占比已近 50%，急需发展少银、无银金属化技术。围绕这一行业痛点，本公司在银镍浆、种子层 + 银包铜浆、种子层 + 铜浆、阻挡层 + 铝浆四类技术路线持续开展材料开发与客户端验证，梳理各方案产品进展、产线适配优势与产业化面临的现实挑战。

银镍浆方面，以镍部分替代银，兼容现有丝网印刷—烧结产线，重点优化镍粉及玻璃体系，平衡印刷性能、接触电阻与线电阻。银包铜浆方面，优化不同银含银包铜浆料的体电阻率。铜浆方面，面向 TOPCon、TBC 推进高温银种子层+低温铜浆两步印刷，兼顾欧姆接触与铜扩散阻挡；开发低温铜浆，适配各类固化条件，优化铜粉、铜浆抗氧化配方体系，为高效电池进一步降本提供助力。铝浆方面，依托公司在 PERC 铝浆领域的技术积累，向 TOPCon/TBC 等高温电池用铝替代延伸，研究铝硅反应、接触复合、电阻等铝浆优化方向，探索成本最低的金属化方案。

上述工作已形成多路线并行的材料支撑体系，为光伏行业降低银耗、缓解银价压力提供助力。

邀请报告

# ACM 电池技术从创新研发到量产应用

谭 善

隆基绿能科技股份有限公司

E-mail: tanshan18@mails.ucas.ac.cn

## 报告摘要

技术创新是光伏行业持续降本的核心驱动力，然而传统银浆金属化方案正面临贵金属资源约束，栅线细线化方案也逐步触达物理边界，伴随而来的提效瓶颈、隐裂、断栅等可靠性难题制约产业进一步发展，亟需颠覆性的新型金属化技术。本文聚焦隆基绿能自研 ACM 纳米合金矩阵式接触（Advanced Contact Matrix）技术，从材料体系、结构设计、量产验证三个维度进行系统剖析，阐明纳米合金浆料与矩阵图形化接触的技术机理，对标常规金属化方案，在光电性能、长期可靠性、量产经济性上开展量化对比。研究显示，ACM 跳出细线化降银耗的技术内卷，通过栅线导电结构优化，实现组件功率提升 3W 以上、导电性能提升 200%；焊接有效面积提升 122%，焊接应力降低约 65%，组件抗隐裂、防断栅能力提升 80%，在 DH、UV、TC 等可靠性测试中综合优势显著。目前 ACM 已完成 150 余项核心专利布局，2026 年规模化落地，搭载 Hi-MO 9、Hi-MO X10 背接触组件，量产峰值功率突破 670W，兼顾效率、成本与产品质量。未来 ACM 技术可兼容 TOPCon、HJT、钙钛矿叠层等主流及下一代电池路线，为 TW 级光伏产业可持续发展筑牢技术底座。

邀请报告

# 光伏电池丝网印刷低银金属化技术进展

陈宁，刘阳，王猛，殷庆辉，季斌斌，陈向阳，李文

[1] 无锡奥特维科技股份有限公司

[2] 无锡市光伏装备先进制造技术重点实验室

E-mail: chenning@wxautowell.com

## 报告摘要

光伏电池金属化长期依赖银浆，银资源稀缺与价格高企正驱动行业加速探索低银、无银金属化技术路线。丝网印刷市场占比接近 100%，工艺成熟，基于丝网印刷的低银金属化成为行业优选方向，目前正沿着浆料替代与工艺优化两条路径并行推进：银包铜浆料已实现量产应用，在保持导电性能的同时显著降低银含量；银-镍浆料方面，银掺杂镍浆料已在 TOPCon 电池背面上实现应用；纯铜浆潜力最大，通过"种子层＋导电层"功能分区设计，银种子层耗量低于 2mg/W，银耗可降低 60%—100%。与此同时，细线化印刷、钢板印刷与印刷优化等工艺手段，进一步降低单瓦电池银耗量。低银金属化是"材料—设备—工艺"三方配合、"电池结构—金属化—互联—可靠性"全链条协同的系统工程。本报告围绕新材料、新工艺、新设备，打造金属化到互联的整线解决方案，推动行业低银金属化技术发展。

# 铜基金属化方案开发与可靠性研究

陈聪，南亚雄，Himal Khatri，史卫利

无锡帝科电子材料股份有限公司

E-mail: darren.chen@dkem.cn

## 报告摘要

在新增装机量可能下滑，银价高位震荡的形势下，如何在 n 型高效电池的金属化应用上，通过导电材料的创新设计，以及电池、组件工艺的协同匹配，减缓电池中浆料成本的上升趋势，持续稳健的降低金属化成本，提高企业的产品竞争力，成为光伏行业讨论的重点，也成为全行业可持续发展的重要命题。

本报告旨在重点探讨 TOPCon、TBC、HJT、HTBC 等高温、低温制程高效电池上少银无银金属化技术方案，探讨相应配套的金属化设计、解决方案，寻求高速而又稳健的产业化之道：1）减银金属化的路线图；2）减银金属化的挑战；3）高温电池上的应用方案；4）低温电池上的应用方案。

**关键词：**少银无银金属化；低温银包铜；高铜浆料；铜浆

邀请报告

# 强化强制性标准支撑引领作用，提升光伏产品质量监督抽查与风险监控效能

王　亿

国家太阳能光伏产品质量检验检测中心（CPVT）

E-mail: wangyi_04301943@163.com

## 报告摘要

当前我国光伏产业规模位居全球首位，截至 2025 年底国内累计装机突破 1200GW，分布式光伏占比持续提升，但行业产能过剩、价格内卷问题突出，部分企业通过缩减材料规格实现降本，引发功率虚标、机械与环境可靠性不足等质量隐患，行业质量安全风险等级判定为中风险，产品安全事故偶发，产业亟需由规模价格驱动转向技术创新、质量提升的高质量发展模式。

为落实行业“反内卷”治理目标，我国出台光伏领域三项强制性国家标准，构建“强标守底线、推标拉高线”的标准体系，分别为能效强标 GB 47834-2026《晶体硅光伏组件和逆变器能效限定值及能效等级》、安全强标 GB 47739-2026《光伏组件安全要求》、铭牌强标 GB 47740-2026《光伏组件铭牌标识要求》。三项标准分阶段实施：能效强标 2027 年 1 月 1 日实施，安全与铭牌强标 2027 年 6 月 1 日实施，从能效、产品安全、功率标识三大维度设立市场准入底线，依靠法制化标准手段淘汰落后产能，维护公平市场竞争秩序，破解行业无序竞争困境。

能效强制性标准针对 TOPCon、HJT、BC 三类主流 N 型组件设置差异化的三级能效门槛，明确光电转换效率、双面率指标，创新性引入耦合环境应力衰减率（限值≤8.6%）指标，模拟组件 25 年户外服役环境，考核产品长期可靠性；同时针对 20kW 以上并网逆变器建立平均加权总效率、最大转换效率双维度能效分级指标。报告梳理了组件光电效率、双面率、耦合环境应力老化、逆变器能效的测试方法、试验流程、设备与计量保障要求，依托严苛的多阶段耦合环境应力加速老化序列测试，筛选高可靠性产品，同时规范测试设备参数与数据溯源，保障检测结果客观准确，实现对产品性能与可靠性的有效验证。

安全强标面向系统电压 1500V 及以下户外光伏组件建立全生命周期安全要求，铭牌强标着力整治功率虚标乱象。随着三项强制性国标落地实施，后续将强化质量监督抽查与风险监控效能，企业需要提前对标标准开展产品测试验证，做好合规落地，推动光伏产业实现价值重构与高质量发展。

Invited Talk

# Efficiency is not durability: metallisation paste chemistry dictates TOPCon module damp-heat stability

**Xinyuan Wu[1], Jiexi Fu[1], Wei Wu[2], Yan Zhang[2], Xutao Wang[1], Yuhao Cheng[1], Wenjie Lin[1], Jiaxin Yang[1], Lin Lv[2], Chao An[2], Haohao Zhou[2], Bram Hoex[1]**

[1] School of Photovoltaic and Renewable Energy Engineering, University of New South Wales, Australia

[2] Jolywood (Taizhou) Solar Technology Co., Ltd.

E-mail: xinyuan.wu@unsw.edu.au

## Abstract

Achieving efficient and reliable tunnel oxide passivated contact (TOPCon) photovoltaics requires metallisation that combines high initial performance with stability during subsequent processing and module operation. This study compares four Pb-containing, low-Al silver pastes with distinct compositional profiles with laser-assisted firing. Cell electrical measurements, contact characterisation, microscopy and spectroscopy are combined with thermal screening and module damp-heat testing. Although mean cell efficiencies span only 24.7–24.9%, the corresponding glass–backsheet modules with EPE encapsulation exhibit relative power losses of 36.6%, 7.8%, 5.1% and 4.1% after 2,000 h at 85 °C and 85% relative humidity. The formulation delivering the highest initial cell efficiency and module power shows the greatest damp-heat degradation. To assess tolerance to subsequent thermal processing, particularly post-cut edge passivation, a separate subset of cells is subjected to comparative thermal screening at 280 °C for 15 min. The Bi-enriched formulation containing W powder exhibits the lowest mean damp-heat power loss but the largest thermally induced series-resistance increase, demonstrating that thermal tolerance and damp-heat durability require separate evaluation.

Microscopy reveals smaller, more numerous localised contacts and more extensive firing-induced etching for the two Bi-containing formulations. Morphological and spectroscopic observations suggest that formulation-dependent stability of the surrounding Pb-containing interfacial material may contribute to contact preservation

during damp-heat exposure. Degradation of this material could disrupt electrical connections between localised contacts and the overlying metallisation, increasing resistive losses. Bi-associated modification may help limit glass-network decomposition and Pb migration. These findings highlight the need to evaluate initial efficiency, thermal tolerance and damp-heat durability jointly when selecting TOPCon metallisation.

**Keywords:** TOPCon solar cells; Metallisation chemistry; Laser-assisted firing; Contact formation; Thermal stability; Damp-heat reliability; Cell-to-module performance

**Biography:**

Xinyuan Wu is a Postdoctoral Research Fellow at the School of Photovoltaic and Renewable Energy Engineering, UNSW Sydney, Australia. His research combines nanoscale characterisation, metallisation optimisation and degradation analysis to improve the efficiency and reliability of industrial silicon solar cells and modules. His Google Scholar profile lists 28 peer-reviewed journal articles with 570 citations as of October 2026. His work bridges fundamental materials research and industrial applications to advance the performance and reliability of photovoltaic technologies. Before joining UNSW, he worked as a process engineer at Jiangsu Leadmicro Nano-Equipment Technology Ltd., specialising in front-surface passivation optimisation.

邀请报告

# 高能效产品开发及应用

黄兴俊

唐山海泰新能科技股份有限公司

E-mail: huangxingjun@htsolargroup.com

## 报告摘要

随着我国能源绿色转型进程的持续推进，针对光伏行业当前存在的产能结构性过剩与产品质量参差不齐等问题，《晶体硅光伏组件和逆变器能效限定值及能效等级》即将正式落地实施。这标志着光伏行业将由低价同质化竞争转向能效分级、技术驱动的高质量发展新阶段：新标准将光伏组件划分为一级、二级、三级共三个能效等级，其中一级为最高能效标杆，未达到三级能效的产品将被禁止进入市场。高效光伏组件的开发以 TOPCon、BC、HJT 电池为核心基础，搭配电池端多分片、切割面钝化、poly finger、大尺寸电池等技术，以及组件端叠片、汇流条隐藏、小爬电等技术，可实现高效光伏组件的产业化落地，满足能效等级要求。与传统产品相比，高效组件产品具备更高的光电转换效率、更低的功率衰减以及更优的弱光响应与温度特性，在工程应用中能够提升单位面积发电量，减少单位装机容量对应的配套物料消耗与土地占用，进而降低光伏电站全生命周期度电成本。该类产品契合行业技术迭代、提质增效与光储一体化发展趋势，可广泛应用于集中式地面电站、BIPV 建筑光伏、工商业分布式光伏及户用光伏等场景，能够推动光伏产业从价格竞争向价值竞争转型，为清洁能源规模化开发提供支撑。

**关键词：**能效等级；高效组件产品；电池技术；组件技术

# 面向多元化 BIPV 场景的搪瓷基光伏组件：结构优化与中试验证

李甜甜，张璐，陈剑辉，杨学良*

河北大学物理科学与技术学院，先进钝化技术实验室

*E-mail: chenjianhui@hbu.edu.cn

## 报告摘要

在全球新能源战略与双碳目标推进下，光伏建筑一体化（BIPV）对组件的建筑适配性提出了承载、造型与围护一体化等差异化要求。现有带边框双玻 BIPV 构件存在整体自重偏高、散热不足、难以适配曲面结构等固有局限。本研究在前期验证搪瓷基光伏组件技术可行性的基础上，重点开展面向多元化场景的结构优化与中试验证。研究采用“一型多厚、按需选配”的设计逻辑，通过系统化的前板材料选型与封装工艺匹配性分析，完成了组件从材料到结构的协同优化。经中试验证，该组件散热性能得到有效验证，真实工况下工作温度较传统双玻组件显著降低。同时，组件通过了电气安全、环境老化、机械载荷及热斑等可靠性测试，为满足建筑场景的长寿命与安全性要求提供了坚实保障。该组件采用无边框设计，构件整体具备轻量化潜力，可直接作为建筑围护结构使用，适配厂房、建筑立面、曲面建筑、车棚及阳光房等多元化 BIPV 场景。本研究完成工艺可行性评估，验证了该搪瓷基光伏组件的工程化潜力，为绿色建筑 BIPV 提供一条创新构件化技术路线。

**关键词：**光伏建筑一体化（BIPV）；搪瓷基光伏组件；结构优化；散热性能；中试验证

# 超低温电子浆料研究

高青，陈剑辉

河北大学

E-mail: gaoqing2022@163.com

## 报告摘要

面对当前晶体硅太阳电池银用量巨大，以及异质结晶体硅太阳电池、钙钛矿及钙钛矿叠层电池浆料低温需求的问题，依托实验室特有的钝化液技术，研究了一种超低温电子浆料，开发出的导电细丝粘结相创新导电机理，跳出传统浆料依靠银颗粒紧密挤压接触导电的固有思路。通过导电细丝在金属粉体间隙搭建长程连通的载流子传输通道，在保障导电性能前提下降低浆料固含量，实现银耗降低 30-40%，彻底颠覆了传统浆料依赖高温烧结实现固含量电学接触的工艺路径。该技术可实现在超低温（＜100℃）条件下固化，同时具备低银含量与高导电性能，已达到公斤级量产水平。超低温电子浆料在解决光伏领域下一代电池技术—如钙钛矿电池、叠层电池等—对超低温金属化工艺的迫切需求，为低温高效光伏电池的产业化推进提供了关键材料支撑。

# TOPCon 电池接触电阻率测试及挑战

陈宇谋

通威太阳能（成都）有限公司

E-mail: chenym024@tongwei.com

## 报告摘要

接触电阻率$\rho_C$是评价电池金属化质量的关键参数。传输线模型（TLM）通过测量不同间距电极间的电阻并线性拟合，得到方阻、接触电阻和传输长度$L_T$，是业界最常用的表征方法。电流在接触下方并非均匀注入，而是集中在接触前沿，并以$L_T$为特征长度逐渐衰减，即电流拥挤效应。TLM 通过改变电极间距，将接触电阻从总电阻中分离出来；再基于电流拥挤效应，由$L_T$将接触电阻换算为$\rho_C$。

然而，TLM 的准确性依赖一系列理想假设：电流沿一维路径流动且无寄生通路、接触下方与接触之间的方阻一致、金属电极等势。在成品电池上，这些假设往往难以满足。隔栅线测试中，部分电流会经中间栅线分流形成寄生电流，并在其接触界面产生压降，使拟合得到的方阻和接触电阻出现系统偏差；栅线的宽度与高度会改变电流分布；TOPCon 等多晶硅钝化接触结构中，多晶硅层与硅基底经隧穿氧化层并联导电，接触下方的多晶硅也可能被浆料部分腐蚀，使提取的$\rho_C$成为包含多层贡献的表观值。

本报告将介绍 TLM 的基本原理与隔栅线测试方法，分析上述误差的来源与影响程度，对比 CTLM、Cox-Strack 等其他测试方法的适用范围，并给出样品制备和数据处理（异常值剔除、置信区间评估、有效间距修正等）的规范建议，以提高接触电阻率测试结果的可靠性与可比性。

# 光伏组件用玻纤增强复合材料边框可靠性评估与潜在风险分析

吕瑞瑞，尉元杰，宋智超，许涛

阿特斯阳光电力集团股份有限公司

E-mail: ruirui.lv@csisolar.com

## 报告摘要

玻纤增强聚氨酯（GFRP）复合边框因具备轻量化、耐腐蚀、绝缘免接地及低碳等优势，已成为光伏组件边框替代铝合金的重要技术方向。针对其各向异性、聚合物基体环境敏感性以及现有评价方法不足等问题，本文基于 T/CPIA 0081—2024《光伏组件用玻纤增强复合材料边框》，结合材料端、型材端和组件端试验数据，建立了覆盖材料基础性能、环境老化、安装孔承载、疲劳耐久及组件机械载荷的三级尺度多应力耦合可靠性评价体系。

研究重点体现两方面：一是形成适用于复合边框工程导入的分级评价方法。材料端重点考察涂层耐候、基材力学和紫外、湿热、紫外湿热、热循环、盐雾等老化序列；型材端开发边框拉力测试和载荷下疲劳测试，将整框疲劳评估周期由约 29 h 缩短至 1 h～2 h；组件端覆盖静态与动态机械载荷、低温机械载荷及综合老化后机械载荷验证。二是明确复合边框可靠性风险主要集中在湿热界面失效、横向强度不足和高温力学性能衰减三类机制。

数据结果表明：复合边框密度较铝合金降低约 23%，轴向拉伸强度约为铝合金的 4 倍～5 倍，并可降低组件碳足迹约 89 g/W；经海水浸泡 15 d 和盐雾 2880 h 后，材料拉伸、弯曲强度整体保持较高水平。横向强度方面，基础方案约为 50 MPa，经三轴织布或内毡增强后可提升至约 60 MPa～70 MPa；温度由 -40 ℃ 升至 85 ℃ 时，横向模量下降约 40%～55%，横向强度下降约 10%～20%，说明高温工况下的安装孔承载、压块夹持及角码连接是结构设计和可靠性评价的重点。

综合验证显示，试验复合边框组件在静态、动态及长期老化后的机械载荷条件下均满足标准要求，并在湿热老化和高温性能衰减后仍保持必要安全裕度。本文提出的材料—型材—组件一体化评价框架，可用于复合边框材料筛选、结构改进和工程导入风险判定；同时建议后续进一步完善老化后横向强度、高温横向强度及小边框老化后拉力/疲劳指标，以支撑海上光伏、跟踪支架及高温高湿等复杂场景下复合边框组件的规模化应用和标准升级。

**关键词：**光伏组件；玻纤增强聚氨酯复合边框；可靠性评估；界面失效；横向强度；温度敏感性；

# 高性能导电碳浆的制备及其在太阳电池上的应用研究

陈柯宇，杨德华，常萱，张冬辉，陈剑辉*

河北大学物理科学与技术学院，先进钝化技术实验室

*E-mail: chenjianhui@hbu.edu.cn

## 报告摘要

太阳电池金属化目前仍高度依赖贵金属浆料，成本与供应链压力使非金属导电材料成为重要的替代方向。碳基导电浆料来源广泛、不依赖贵金属，被视为具有潜力的电极材料体系，但其在太阳电池中的应用长期受制于一个核心矛盾：碳电极导电性难以达到器件高效化所需水平。想要解决这一关键问题，需要从以下两个方面入手：其一，如何通过碳系导电浆料的成分调控与分散有效构建高效导电网络、提升电极导电性；其二，电极导电性能的提升如何有效传导为电池效率的提升。本工作即围绕高导电性导电碳浆的制备及其在太阳电池中的应用展开，重点考察碳系导电浆料的成分配比与分散对导电网络的影响、建立配方参数与电极导电性能、器件效率之间的关联规律，目标是实现高导电性与电池高效率的协同提升。

**关键词：** 导电碳浆；高效导电网络；器件效率

# 2026 第二十一届中国太阳级硅及光伏发电研讨会

## 22nd China SoG Silicon and PV Power Conference

# 11 月 19 日会议议程

# Nov. 19 Program

邀请报告

# 全球光伏产业技术变革及通威技术创新

邢国强

通威太阳能（成都）有限公司

## 报告摘要

报告立足全球产业视角，系统剖析光伏技术迭代脉络、多元先进技术路线以及通威最新研发创新成果。通过回溯全球光伏产业数十年的发展浪潮，分析光伏行业发展及技术变迁的脉络，从铝背场技术到 p 型技术时代，再到多技术竞相登场的 n 型时代，技术创新和规模化制造如何推动行业进步。

邀请报告

# 颗粒硅的产业化验证与硅料竞争规则重构

韦方娥

协鑫科技控股有限公司

E-mail:weifange@@gcl-power.com

## 报告摘要

2026 年，颗粒硅市场份额过临界点，品质追平棒状硅，多晶硅期货新规把颗粒硅纳入基准交割品，颗粒硅已经进入行业规则体系，这意味着多晶硅路线之争已经结束，接下来的竞争是成本曲线与碳曲线之争。

# 高效杂化 BC 晶硅电池量产关键技术研究

汝小宁[1, 2]，马志杰[1]，唐喜颜[1]，钱俊[1]，杨苗[1]，李云朋[1]，

卢俊雄[1]，徐希翔[1,3]

[1]隆基绿能科技股份有限公司中央研究院

[2]陕西师范大学

[3]兰州大学

E-mail: ruxiaoning@longi.com

## 报告摘要

针对当前晶硅电池量产效率普遍突破 26%，表面复合与接触损耗成为制约效率突破的核心瓶颈，基于此开发出一种基于高低温杂化背接触高效 HIBC 电池结构，该结构创新性地将低温异质结（HJT）的优异钝化性能与高温背接触（BC）的高效光子利用率相结合，通过在 p 型区域采用低温全钝化工艺、在 n 型及正面引入高温全钝化工艺，实现了经 ISFH 认证 28.29%最新晶硅电池转换效率世界纪录。本文聚焦 HIBC 电池量产转移中的关键问题，系统研究工艺制程的联动制约及协同提效，为研发高效电池技术规模量产化提供了可参考的工艺窗口设计方法、良率提升路径和工程化验证依据。

**关键词：**HIBC；高效杂化；量产，钝化接触；关键技术

# 太瓦级光伏技术：从局域钝化到全域钝化

何　博

隆基绿能科技股份有限公司

E-mail: hebo3@longi.com

## 报告摘要

作为太阳电池的主流技术，晶硅电池占据全球光伏 95%以上市场。报告将回顾近二十年来晶硅太阳电池的发展历程，重点介绍近十年来高效晶硅电池发展的趋势，包括从铝背场到 PERC，从 p 型到 n 型，从双面金属化到背接触电池，从单结到叠层，铜栅线替代银栅线等技术变革中的关键问题和解决方案。

**作者简介：**

何博，何博博士自 2004 年起在中科院，德国马普所，加拿大舍布鲁克大学，美国伯克利国家实验室等国际知名机构从事半导体材料研究，后转入硅谷工业界研制全球首款发电玻璃产品。2019 年加入全球光伏龙头企业隆基绿能。何博博士带领团队历经八年研究创制的全球首款铜基无银金属浆料产品已导入公司 GW 级产线，在光伏历史上首次实现光伏组件完全无银化，开启了铜基金属化光伏时代。何博博士带领的叠层团队 2023 年 11 月以 33.9%首次代表中国打破全球叠层电池效率世界纪录，此后又 14 次刷新该领域各类纪录，确保了中国在叠层电池领域的绝对优势。何博博士迄今在 Nature(3 篇），Science（1 篇），JACS 等顶级期刊发表学术论文 40 余篇，引用 6000 余次；主导编制中国首批钙钛矿电池行业标准；申请专利 160 余件，授权 40 余件。研究成果入选麻省理工科技评论 2024 年十大突破性技术，2025 年度中国科学十大进展，2023、2024 和 2025 连续三年入选中国光伏领域重大科技进展，入选 2026 年中国可再生能源学会科技创新人物奖等。何博博士作为项目负责人和课题负责人主持 1 项科技部重点研发项目和 2 项工信部高质量重大专项以及 2 项陕西省重大研发专项。何博博士现为隆基绿能电池研发科学家和 ACM 技术平台负责人。

邀请报告

# 高效晶硅太阳电池的传输特性研究

林豪，汪根顺，唐旱波，苏巧，韩灿，刘志斌，高平奇*

中山大学

*E-mail: gaopq3@mail.sysu.edu.cn

## 报告摘要

过去 30 余年，晶硅太阳电池转换效率的快速提升主要得益于钝化和传输性能的持续优化，但随着表面钝化水平逐步接近理想状态，如何进一步提升传输特性，决定了效率提升的新的方向。本报告将结合硅异质结（SHJ）和背接触（BC）两种太阳电池结构，探讨如何通过优化传输层材料的电学特性来降低接触电阻，提升填充因子和转换效率。报告主要涉及纳米晶硅传输层、氧化物传输层和超薄透明导电层材料。

**关键词：**晶硅太阳电池；接触电阻；传输层

邀请报告

# 直接覆膜（IFC）技术在 BC 组件制造中的产业化应用

薛　震

宁夏小牛自动化设备股份有限公司

E-mail: .zhen.xue@xnautomation.com

## 报告摘要

小牛自动化深耕光伏组件串焊设备研发领域，技术积淀深厚。公司自 2022 年启动直接覆膜低温互联（IFC）技术研发工作，并同步推进该技术在光伏行业的落地应用与市场推广。

报告通过梳理 IFC 技术的研发历程，重点阐述其在成本管控、生产提效、良率提升三大维度的核心竞争优势。成本层面，该技术可适配电池片低银浆用料、薄片化生产工艺，有效降低组件生产成本；效率层面，依托圆形焊带应用，大幅提升组件双面发电率，拓宽了产品在地面光伏电站的应用场景与市场空间；良率层面，规避了传统高温制程引发的电池片翘曲问题，降低生产操作难度，显著提升量产良率。凭借高良率、高双面率的核心特性，IFC 技术高度适配 BC 组件生产制造需求，目前已在行业内多家头部企业实现规模化量产落地。

除此之外，公司推出成熟的 BC 组件全面屏解决方案，通过优化串焊工艺实现汇流条全隐藏式设计，最大化释放组件有效发电面积。该工艺方案已完成产业化量产验证，可为 BC 组件极致提效提供成熟、可靠的产业化支撑。

展望行业发展，BC 组件还有潜力可以进一步发掘，一些 TOPCON 组件的技术也有机会应用于 BC 上，具备广阔的发展与创新空间。

**关键词：** BC 组件；IFC 技术；成本优化；低温互联；全面屏组件

邀请报告

# IEC 61730 与新强标的变化：XBC 高效率组件设计将面临哪些挑战？

朱晓辉

TÜV NORD (Hangzhou) Co., Ltd.

TÜV 北德中国区

E-mail: xizhu@tuv-nord.com

## 报告摘要

xBC 组件将正负极全部移至背面，组件内部不同电位带电部件的功能绝缘配合由此成为设计核心；其"小爬电"结构是 IEC 61730:2023 绝缘配合评估（MST 57）的主要判定难点，叠加 1500 V 系统电压、污染等级与材料组别，设计裕度极为有限。强制性国标 GB 47739-2026 进一步收紧：柔性形态既受转换效率门槛制约、又无刚性边框载荷豁免，须对载荷与抗划伤专项评估，防火与阻燃要求亦同步升级。

TÜV 北德作为评估光伏产品安全、性能及质量的全球领先认证机构，将从产品精确性能评价方法、实验室耐候性测试结果、认证标准与结构设计风险，，给出 xBC 高效率组件的合规设计边界与验证路径。

**关键词：**xBC 组件；GB 47739-2026；绝缘配合；小爬电；柔性组件；防火安全

# HTBC 电池 $n^+$ poly/非晶硅叠层激光开膜研究

李中兰，马耀东，任梦宇，李旭敏，孟夏杰，张林，邢国强

通威太阳能（成都）有限公司

E-mail: lizl054@tongwei.com

## 报告摘要

异质结与隧穿氧化层混合钝化背接触（HTBC）太阳电池是一种新型背接触结构，具有实现高转换效率的巨大潜力。实现其极限效率的关键，在于尽可能降低氧化铟锡（ITO）集电层与钝化接触结构之间的界面载流子输运损失。具体而言，为形成 N 型 ITO/$n^+$掺杂多晶硅接触，在沉积 ITO 薄膜之前，采用皮秒绿光激光烧蚀选择性地去除寄生的氢化非晶硅（a-Si:H）叠层。然而，高频激光加工过程中固有的强烈的时空热效应，往往会引起 $n^+$掺杂多晶硅表面发生局部熔融和快速淬冷，导致部分区域再次非晶化。

从根本上说，这一现象会损害载流子跨越 ITO/$n^+$掺杂多晶硅界面的输运能力，并且会增大接触电阻率（ρc）。为阐明这一机制，我们将多物理场热学建模与纳米尺度结构表征相结合。通过 COMSOL 仿真，分析了不同激光能量密度条件下，位于 a-Si:H 叠层下方的 $n^+$掺杂多晶硅表面的瞬态温度梯度。同时，利用透射电子显微镜（TEM）表征局部非晶结构，并通过拉曼光谱成像定量分析激光烧蚀光斑内非晶相的空间分布及面积占比。

研究结果表明，激光能量密度、非晶区域面积占比与电学性能之间存在强相关性。我们证实，激光能量密度太低会导致 a-Si 残留，而能量密度过高则会导致深层 $n^+$掺杂多晶硅非晶化；两种情况均会形成一层以非晶相为主的界面，这会使接触电阻率显著升高。确定合适的工艺窗口，能够在完整去除 a-Si:H 叠层与尽量减少结构损伤之间取得平衡，接触电阻率会显著降低至 36.5 mΩ·cm²。本研究揭示了激光烧蚀界面演变背后的微观结构动力学机制，为推进 HTBC 太阳电池的产业化提供了重要的理论与实践依据。

**关键词：**HTBC 太阳电池；激光烧蚀；ITO/$n^+$掺杂多晶硅接触；相变；接触电阻率

# 帝科 DKEM®TBC 电池提效降银的关键路径

郭方箐

无锡帝科电子材料股份有限公司

E-mail: fangqing.guo@dkem.cn

## 报告摘要

当前，TBC 电池因其更高的组件功率、相对成熟的工艺流程及设备，成为 TOPCon 之后率先进入规模化量产的下一代高效电池结构。金属化做为 TBC 电池工艺的最后一步，也是 TBC 电池提效降本的关键环节之一，在降低 TBC 电池整体复合、优化填充因子、持续降低 TBC 电池成本方面，扮演着重要角色。本报告将重点探讨进入量产阶段后，金属化浆料如何与 TBC 前道工艺制程的持续匹配优化，提升 TBC 电池效率、降低金属化浆料成本、并优化良率。

# 克服异质结背接触太阳能电池前表面的非晶硅寄生吸收实现 99%载流子注入效率

马法军[1,2]，徐嘉玉[3]，林文杰[2,3]，张志园[3]，周浪[3]

[1] 南昌大学共青城光氢储技术研究院

[2] 澳大利亚新南威尔士大学光伏与可再生能源工程学

[3] 拉普拉斯新能源科技有限公司

E-mail: f.ma@unsw.edu.au

## 报告摘要

异质结背接触（HBC）太阳能电池是推动晶体硅光伏器件向理论效率极限迈进的主流电池结构。然而，异质结背接触电池的性能受限于前表面本征氢化非晶硅（a-Si:H (i)）层的寄生吸收。尽管载流子可从本征氢化非晶硅层部分注入晶体硅基体以降低该类光学损耗，但决定其底层物理机制的关键参数尚未得到充分研究。本研究搭建了一套完整的数值仿真框架，系统研究本征氢化非晶硅层的载流子注入效率，并确定关键设计阈值。基于研究得到的机理认知，本研究提出一种优化的 a-Si:H(i)/$AlO_x$/$SiN_x$/$SiO_x$ 复合前表面结构，该结构同时具备优异的表面钝化效果，并且实现接近理想值的 99% 载流子注入效率。经仿真计算，该优化结构的光电转换效率可达 27.69%，实现寄生吸收降低与光生电流提升的协同效果。该研究成果为高效异质结背接触太阳能电池的光电器件优化提供了定量设计依据。

**关键词：**本征非晶硅；寄生吸收；载流子注入；数值仿真；异质结；HBC（异质结背接触）

# 背接触（BC）组件技术：结构优势、效率边界与产业化前景

陈军，胡国波，娄萍萍

隆基绿能科技股份有限公司

E-mail: loupingping@longi.com

## 报告摘要

背接触（BC）组件将正负电极全部移至背面，正面无金属栅线遮挡，这一结构变化带来的不仅是短路电流的增益，更在局部遮挡耐受性、双面率独立调控和叠层技术兼容性上形成了正结组件难以复制的系统级优势。本文结合隆基 HPBC 2.0 平台已公开的组件级数据——量产功率 650—680 W、转换效率 24.8%、双面率 75%—85%、温度系数-0.26%/°C——分析了 BC 组件当前的技术水位与效率爬坡的约束项。技术前景方面，HIBC 电池效率已达 28.29%，逼近晶硅理论极限；而 BC 作为叠层底电池的结构接口，在隆基晶硅-钙钛矿叠层电池 35.5%的效率突破中展现出无需推翻组件主体架构即可接入下一代技术的可能性。商业前景方面，2026 年上半年隆基 BC 组件出货 19.55 GW、占比超 65%，央国企集采中 BC 标段占比从约 9%跃升至 22%，但溢价空间正在收窄。本文认为，BC 组件的商业逻辑已从“路线稀缺性溢价”过渡到“高效标段“中的常规配置”，即 BC 的商业逻辑已经不再依赖“别人做不了”来支撑溢价，而是靠“高效标段里绕不开它”来确立地位。这比“路线稀缺性溢价”更稳固，但也意味着竞争从“有没有 BC”转向“谁的 BC 更好更便宜”，即未来的核心变量是产能放量节奏与产品力竞争之间的平衡。

**关键词：**背接触组件；HPBC；效率极限；叠层兼容性；产业化

# Back-Contact (BC) Module Technology: Structural Advantages, Efficiency Boundaries, and Industrialization Prospects

## Abstract

Back-contact (BC) modules relocate both positive and negative electrodes to the rear, leaving the front free of metal gridline shading. This structural change delivers more than a short-circuit current gain: it also creates system-level advantages that front-junction modules are hard-pressed to replicate in partial-shading tolerance, independent bifaciality control, and tandem-technology compatibility. Drawing on publicly disclosed module-level data from LONGi's HPBC 2.0 platform—mass-production power of 650–680 W, conversion efficiency of 24.8%, bifaciality of 75%–85%, and a power temperature coefficient of −0.26%/°C—this paper analyzes the current technical status of BC modules and the constraints on further efficiency gains. On the technology front, HIBC cell efficiency has reached 28.29%, approaching the theoretical limit of crystalline silicon; and as the structural interface for the bottom cell in tandem devices, BC demonstrates, in LONGi's 35.5%

perovskite-silicon tandem breakthrough, the possibility of accessing next-generation technology without overturning the module's main architecture. On the commercial front, LONGi shipped 19.55 GW of BC modules in the first half of 2026, accounting for over 65% of its total shipments, while the BC share in central state-owned enterprise tenders rose from approximately 9% to 22%; however, the premium space is narrowing. This paper argues that the commercial logic of BC modules has shifted from a "route-scarcity premium" to a "standard configuration in high-efficiency tender segments"—that is, BC's commercial logic no longer relies on "others cannot make it" to support its premium, but on "high-efficiency segments cannot bypass it" to establish its position. This is more robust than a "route-scarcity premium," but it also means that competition has shifted from "whether BC exists" to "whose BC is better and cheaper"—that is, the core variable in the future is the balance between the pace of capacity ramp-up and product-competitiveness-driven competition.
**Keywords:** back-contact module; HPBC; efficiency limit; tandem compatibility; industrialization

# HIBC 超高功率组件的开发进展

彭福国，董海斌，白杨，刘颖波，侯佳明，赵凯悦，韩红利，陈军

隆基绿能科技股份有限公司

E-mail: pengfuguo@longi.com

## 报告摘要

背接触（BC）光伏电池技术将 P/N 电极全部转移至电池背面，实现正面无栅线遮挡，是当前晶硅电池突破正面遮光与表面钝化双重损耗、逼近理论效率极限的关键结构。结合异质结（HJT）低温钝化与 BC 全背面叉指电极结构，开发出高低温杂化钝化背接触电池（HIBC），成为全球首个实现 HJT＋BC 融合结构规模化量产的技术方案。经国际权威机构认证，HIBC 电池转换效率提升至 28.29%， HIBC 组件转换效率达 26.4%。基于该技术的量产组件以 2382 mm×1134 mm 黄金尺寸实现功率 700 W 以上、功率密度不低于 259 W/m²、组件效率 25.9%，引领光伏量产组件效率迈入 25.5%+ 时代。本文从低温焊接工艺、金属化降本与高阻隔封装可靠性匹配等方面进行阐述最新研究进展。

**关键词**：HIBC；背接触电池；高低温杂化钝化；超高功率光伏组件；功率密度

# Progress in the Development of HIBC Ultra-High-Power modules

## Abstract

Back-contact (BC) photovoltaic cell technology, which relocates both P/N electrodes to the rear surface of the cell to eliminate front-side gridline shading, constitutes a pivotal architectural approach for crystalline silicon cells to overcome the dual losses of front-side shading and surface passivation and to approach the theoretical efficiency limit. By integrating heterojunction (HJT) low-temperature passivation with the BC all-rear interdigitated electrode structure, a high-low temperature hybrid passivated back-contact cell (HIBC) has been developed, representing the world's first technology solution to achieve large-scale mass production of an HJT+BC fused structure. Certified by internationally authoritative institutions, the HIBC solar cell conversion efficiency has been elevated to 28.29%, and the HIBC module conversion efficiency has reached 26.4%. Mass-produced modules based on this technology, in the golden size of 2382 mm×1134 mm, achieve power output exceeding 700 W, power density of no less than 259 W/m², and module efficiency of 25.9%, leading photovoltaic mass-produced module efficiency into the 25.5%+ era. This paper elaborates on the latest research progress in low-temperature soldering processes, metallization cost reduction, and reliability matching of high-barrier encapsulation.

**Keywords:** HIBC; back-contact cell; high-low temperature hybrid passivation; ultra-high-power photovoltaic module; power density

# HIBC 产品可靠性验证：高效率、高可靠

许永元，张洋，刘斌，李嘉伟，龚海丹，蒋仙

隆基绿能中央研究院

E-mail: xuyongyuan2@longi.com

## 报告摘要

HIBC（Hybrid Interdigitated Back Contact）太阳电池将正负电极全部集成于背面，彻底消除了传统电池正面栅线的遮光损失，在最大化光吸收面积的同时避免了正面掺杂引入的寄生吸收。结合双面完全钝化等结构优势，其量产电池效率已突破 28.29%；基于量产尺寸的 HIBC 组件效率达到 26.4%，经 ISE & NREL 认证创下最新组件世界效率纪录（见 Solar cell efficiency tables: Version 68）。

本文从产品设计与可靠性双视角验证该技术的可量产性，测试在标准 IEC 61215 基础之上，针对性开展多倍加严序列，包括 DH3000、TC600、LID1000、UV90 及高温热斑加严等。结果表明，HIBC 在效率与可靠性两端均已具备成为主流光伏产品的条件。

**关键词：** HIBC；可靠性；湿热（DH）；热循环（TC）；紫外（UV）；热斑；加严测试；可量产性

邀请报告

# BC 组件封装解决方案

张付特

明冠新材料股份有限公司

E-mail: zhangfute@matcrown.com

## 报告摘要

随着 BC 电池技术持续向更高效率、更高功率和更高可靠性方向发展，其背接触结构在提升组件效率与外观表现的同时，也对互联方式、封装结构、材料匹配及长期可靠性提出了更高要求。不同 BC 电池结构、互联方式和应用场景，对组件封装方案的选择呈现多样化需求。本报告围绕 BC 组件封装解决方案，结合覆膜与非覆膜等不同封装结构，介绍针对 BC 组件互联、层压及长期可靠性的材料与工艺适配思路，并围绕 UVID、PID 等典型可靠性风险探讨相应的封装材料设计与解决方案。通过封装材料、互联结构与组件制造工艺的协同优化，在兼顾组件效率与制造良率的同时，提升封装结构稳定性及长期可靠性，为不同 BC 技术路线提供可适配、可定制的封装方案。面向 BC 组件规模化应用，明冠将持续完善不同结构和工艺条件下的封装材料体系，推动 BC 组件向高效、可靠和低成本方向发展。

**关键词：**封装材料；BC 组件；封装结构；可靠性；材料工艺协同

# 专业评价赋能组件品质升级—TÜV 莱茵质臻组件

谢曦舟

德国莱茵 TÜV

E-mail: Chasel.Xie@tuv.com

## 报告摘要

本次演讲围绕 TÜV 莱茵“质臻组件”评价体系，说明专业第三方评价如何赋能组件品质升级。该体系在 IEC 61215 & 61730 认证与 PAN 文件基础上分层叠加：Bankability 可融资性（依据 IEC TS63209-1 与 2 PfG 2940）、EY 发电量评估（IEC 61853-3 组件级与系统级发电量仿真）、Energy+功率保障（莱茵一级标板溯源至产线校准的功率测量链、人员资质与测量系统评估）、Quality+ 量产质量控制（工厂检查、关键零部件测试、可靠性序列测试及 UVID、冲击电压、反向电流、Hi-Pot 等常规监控）、Reliability+ 扩展应力序列（依据 IEC TR 63279:2020，覆盖 UV + 湿热、热循环 + 湿热、机械 + 热机械、PID 等复合应力）、Traceability 供应链追溯评级（硅粉至组件六级供应商按管理体系与程序完整性综合评分）与 Sustainability 可持续服务（LCA、EPD、产品碳足迹等），并配套各模块的服务周期与交付物，为组件差异化定位、客户选型与项目融资提供可量化、可追溯的技术依据。

邀请报告

# 免焊接 BC 组件皮肤膜及胶膜封装解决方案

黄宝玉，季志超，汪俊杰，强成宏

常州斯威克光伏新材料有限公司

E-mail: huangby@sveck.com.cn

## 报告摘要

随着能效等级强制国标的实施，组件的效率被不断地提高，BC 电池组件作为效率佼佼者，正不断地提升份额占比，各大电池、组件厂正加速转型 BC 组件。BC 技术的升级带来了封装材料的变迁，主要涉及：TPO 皮肤膜、转光膜、截止膜等，这些封装膜材料相对之前 PERC 转 TOPCon 时代，变化更为巨大，技术升级难度高，带来的挑战更多；如新引入的 TPO 膜，属于热塑性聚烯烃材料，需要良好的贴膜设备适配性、与绝缘胶良好的粘接性、与电池片可靠的化学粘接性、良好的透光率及阻水性；针对 UVID 问题，正面封装胶膜需要使用转光膜、背面封装胶膜可以选择截止膜，该组合拳方案可以有效降低 BC 组件的 UVID 程度，满足国标的相关要求，保障组件在户外发电能力；针对户用 BC 组件，背面胶膜可以选择高反黑胶膜或共挤白胶膜，提供美感的同时，保障组件的高效率及可靠性，同时针对转光胶膜发蓝的外观问题，也提出了无色转光方案，效率、可靠性与外观并存。

**关键词：**BC 组件；免焊接；0BB；TPO 皮肤膜；片膜；条膜；转光；无色转光；抗迁移；UV 衰减

邀请报告

# BC 组件制造全流程 AI 质控：聚焦接线盒 3D 焊后检创新实践

董逸帆

上海欧普泰科技创业股份有限公司

E-mail: dongyifan@optjt.cn

## 报告摘要

BC 背接触组件凭借高效率优势成为行业重要技术方向，但由于电池无主栅、接线盒焊接工艺特殊，焊接虚焊、偏移、溢锡、形变等缺陷隐蔽性强，传统 2D 视觉检测手段难以完整捕捉立体焊接缺陷，对产线全流程质量管控提出更高要求。欧普泰将 AI 视觉检测技术与 3D 立体成像技术深度融合，搭建适配 BC 组件的制造全流程 AI 质控体系，重点针对接线盒焊后工序开展高精度 3D 检测技术落地应用。

该方案打通 BC 组件多工序质量数据链路，实现产线缺陷实时识别、量化分析与数据回溯，突破传统检测只能识别平面外观缺陷的局限，可精准识别焊接高度、缝隙、锡量异常等三维特征类缺陷，有效降低 BC 组件接线盒焊接失效隐患，减少后期电站端热斑、脱焊等质量风险。依托全流程 AI 质控数据，辅助工艺迭代优化，提升产线良率，保障 BC 组件长期运行可靠性。后续将持续迭代 3D-AI 缺陷算法模型，积累 BC 工艺多维度缺陷样本库，助力新型高效 BC 组件规模化、高质量量产。

**关键词：**BC 组件；全流程 AI 质控；接线盒；3D 焊后检测；组件良率提升

# HIBC 电池微绒面形貌定向调控及激光晶化工艺适配性研究

李云朋，袁团，刘浩，魏俊喆，卢俊雄，徐希翔

隆基绿能科技股份有限公司中央研究院

E-mail: rick@longi.com

## 报告摘要

单结晶硅 HIBC 电池凭借高低温杂化钝化结构与激光诱导晶化（LIC）技术，不断刷新光电转换效率纪录。激光晶化技术在保持 P 区优异钝化的同时显著降低接触电阻率，其核心在于钝化性能与接触性能之间的有效平衡。微绒面技术已在 TOPCon、TBC 电池技术中成熟应用，依靠光学管理降低光学损耗；但微绒面会改变硅基底表面几何形貌，破坏常规形貌条件下配合激光晶化在钝化、光学与接触性能之间建立的最优平衡，限制其在 HIBC 电池中的集成应用。本文采用湿法刻蚀工艺对微绒面形貌实施定向调控，获得与激光晶化工艺相适配的表面形貌，兼顾了钝化和接触性能。器件测试结果表明，经形貌优化后的 HIBC 电池短路电流密度提升 0.2 mA/cm²，光电转换效率实现 0.16% 的绝对增益。该工作为微绒面陷光结构在 HIBC 高效电池中的应用提供了可行的路径。

**关键词：**HIBC 太阳电池；微绒面；激光诱导晶化；形貌调控；光电性能

# Directional Modulation of Micro-texture Morphology for Laser-Induced Crystallization Compatibility in HIBC Solar Cells

## Abstract

Monocrystalline silicon HIBC solar cells, enabled by a hybrid passivation structure for high- and low-temperature processes and laser-induced crystallization (LIC) technology, continue to set new records in photoelectric conversion efficiency. Laser crystallization technology significantly reduces contact resistivity while maintaining excellent passivation in the P region, with the core challenge lying in the effective trade-off between passivation and contact performance. Micro-texturing technology has been maturely applied in TOPCon and TBC solar cells to reduce optical losses through light-trapping optical management. However, micro-texturing modifies the surface geometry of silicon substrates and breaks the optimal balance among passivation, optical and contact properties established for laser-induced crystallization under normal surface conditions, restricting its integrated application in HIBC solar cells. In this work, wet etching is employed to directionally modulate the micro-texture morphology. The tailored surface not only reduces surface reflectance but also matches the requirements of the LIC process, delivers optical gain without sacrificing the passivation and contact performance of the cell. Device measurements show that the morphology-optimized HIBC solar cell achieves a short-circuit current

density improvement of 0.2 mA/cm² and an absolute efficiency gain of 0.1%. This work provides a feasible route for the application of micro-textured light-trapping structures in high-efficiency HIBC solar cells.

**Keywords:** HIBC solar cells; micro-texture; laser-induced crystallization; morphology modulation; photovoltaic performance

**参考文献:**

[1] Wang et al., Silicon solar cells with hybrid back contacts, Nature 647,369-374 (2025).

[2] Yu et al., Micro- to submicron-scale selective crystallization of amorphous silicon for advanced passivating contacts in silicon solar cells, Cell Press Blue (2026).

[3] Tong et al., Total-area world-record efficiency of 27.03% for 350.0 cm2 commercial-sized single-junction silicon solar cells. Nature Communication 16,5920 (2025).

# 背接触太阳电池高性能 p 区掺杂技术

樊云昊，黄环佩，李琳，马胜，李正平，沈文忠*

上海交通大学太阳能研究所，人工结构及量子调控教育部重点实验室，

物理与天文学院

*E-mail: wzshen@sjtu.edu.cn

## 报告摘要

隧穿氧化层背接触（TBC）太阳电池因优异的正面发电能力成为下一代量产技术焦点。其核心优势之一是将 p 型接触区设计为隧穿氧化层钝化接触结构。该设计对硼扩散工艺提出了严格的要求：扩散过强会内扩过深，丧失钝化优势；扩散不足则 p 区浓度低、钝化差且接触电阻高。在硼扩散前对沉积非晶硅层进行高温预晶化是一个优秀的方案。密度泛函理论（DFT）计算表明，预晶化可提前形成良好硼扩散路径，提高表面浓度并优化扩散曲线。采用该方案的电池在 p 区钝化和接触电阻上均有优势，效率提升超过 0.1%。

**关键词：**背接触电池；硼扩散；预晶化；隧穿氧化层

# High-Performance p-Region Doping Technology for Back-Contact Solar Cells

**Yunhao Fan, Huanpei Huang, Lin Li, Sheng Ma, Zhengping Li, Wenzhong Shen***

Institute of Solar Energy, and Key Laboratory of Artificial Structures and Quantum Control (Ministry of Education), School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University

* E-mail: wzshen@sjtu.edu.cn

## Abstract

Tunnel oxide back-contact (TBC) solar cells have become a focal point for next-generation mass production owing to their excellent front-side power generation capability. One of their core advantages is the design of the p-type contact region as a tunnel oxide passivated contact structure. This design imposes stringent requirements on the boron diffusion process: excessive diffusion leads to deep boron penetration and loss of the passivation advantage, whereas insufficient diffusion results in a low boron concentration, poor passivation, and high contact resistance. High-temperature pre-crystallization of the deposited amorphous silicon layer prior to boron diffusion is

an excellent strategy. Density functional theory (DFT) simulations indicate that pre-crystallization can establish favorable boron diffusion pathways in advance, increase the surface concentration, and optimize the diffusion profile. Solar cells employing this strategy exhibit advantages in both p-region passivation and contact resistance, with an efficiency improvement of more than 0.1%.
**Keywords：** back-contact solar cell; boron diffusion; pre-crystallization; tunnel oxide

# 绒面微结构腐蚀形貌调控提升 BC 电池效率研究

陈超，陈开玉，李世豪，李善吉，王英，何琳，邓明璋，孟夏杰，李中兰

通威太阳能（成都）有限公司

E-mail: 2516461379@qq.com

## 报告摘要

随着激光诱导烧结技术（Laser Induced Firing，LIF）在 TOPCon 领域的成功应用，金属浆料的接触机理已向 Ag-Si 合金化发展。LIF 技术不仅简化了 TOPCon 生产工艺，同时助推电池绝对效率提升了 0.3%-0.5%。鉴于 TBC 技术的平台化属性，探索 LIF 技术在 TBC 中的应用已成为降本增效的关键突破口。本文提出了一种创新的绒面硼扩散激光二次烧结 TBC 电池（TBC-LIF）电池结构：其背面 P 区采用“高方阻绒面硼扩散+LIF 金属接触”，而 N 区保留 N-Poly 结构。研究表明，该结构的蓝膜片钝化性能不低于传统的双极 Poly 钝化 TBC 结构，同时减少了一次多晶硅/非晶硅沉积，有效缩减了 TOPCon 产线升级 TBC 的成本。研究证实，绒面腐蚀形貌直接决定电池界面接触质量与复合损耗。我们通过精准调控 P 区绒面腐蚀形貌、优化金属浆料与绒面界面接触状态，成功制备出平均效率 26.55%的 SMBB TBC-LIF 电池，比双极 poly 钝化 TBC 电池效率低约 0.2%。相较于常规 TBC 结构，具备独特绒面特征的 TBC-LIF 电池电流提升 2%，弱光响应增强 2%，双面率更是大幅跃升 8.2%。

**关键词：**TBC 电池，激光诱导烧结（LIF），绒面接触，弱光响应，双面率

# 基于激光参数修改的硅金字塔绒面可控表面改性

黄恺，徐梦洁，苏巧，崔志洋，林豪*，高平奇*

中山大学材料学院

E-mail: linh229@mail.sysu.edu.cn; gaopq3@mail.sysu.edu.cn

## 报告摘要

激光加工已广泛应用于晶体硅太阳电池。电池硅片经制绒可形成随机分布的微米级金字塔织构，但该类非平面表面上的光与物质相互作用机制尚不明确，激光参数调控金字塔织构三维结构演化的规律仍有待揭示。本文构建耦合麦克斯韦方程、载流子动力学、双温模型与傅里叶热传导的多物理场仿真模型，并结合SEM、TEM、拉曼光谱表征完成实验验证，建立瞬态能量沉积与结构演变的关联。研究表明：激光波长决定初始光吸收深度，金字塔形貌主导局域电磁场重分布，脉冲脉宽控制沉积能量的局域程度与热输运再分配行为。本研究阐明织构表面的光与物质双向调控规律，为三维非平面半导体的激光加工提供物理模型，为选择性制备表面纳米结构、低反射光子表面及高性能硅基光电器件提供可行方案。

# Carrier-accessibility control with front surface fields for UV-resilient back-contact silicon solar cells

**Wenjie Lin[1,2], Xinyuan Wu[1], Jiayu Xu[2], Zhiyuan Zhang[2], Kaiwen Jin[2], Yun Qin[2], Wei Fan[2], Jiaji Lin[2], Jiaxin Yang[1], Xutao Wang[1], Muhammad Umair Khan[1], Bram Hoex[1], Lang Zhou[3,4], Fa-Jun Ma[1,2,3,4,*]**

[1] School of Photovoltaic and Renewable Energy Engineering, UNSW, Australia

[2] Laplace Renewable Energy Technology Co., Ltd.

3 NCU-GQC Institute of PV-HE-ES Technology

[4] Institute of Photovoltaics, Nanchang University

[*] f.ma@unsw.edu.au

## Abstract

Ultraviolet-induced degradation (UVID) is an important reliability concern for high-efficiency silicon solar cells. Here, we investigate front-surface-field (FSF) engineering as an electrostatic strategy to improve the ultraviolet stability of tunnel-oxide-passivated back-contact (TBC) silicon solar cells. A physics-based device model was implemented in the UniSolar-Sentaurus TCAD framework and calibrated against interface-recombination data from passivated lifetime structures. The effects of UV exposure were represented by calibrated changes in interface-trap density, fixed charge, and carrier-capture cross sections. We then varied the FSF polarity, peak dopant concentration, and junction depth to resolve their effects on carrier redistribution, saturation current density, and cell performance. The results show that, under strongly asymmetric capture kinetics ($\sigma_n >> \sigma_p$), structures with electron minority carriers are highly sensitive to UV-activated interface traps, whereas hole-minority conditions substantially suppress trap-assisted recombination. A heavily doped, shallow $n^+$ FSF creates strong downward band bending, depletes minority holes at the illuminated interface, and reduces carrier access to the activated traps. The dominant loss therefore shifts from interface-limited SRH recombination to bulk

Auger recombination, which is largely insensitive to UV-induced interface defects. In contrast, $p^+$ FSFs and moderately doped $n^+$ FSFs increase $J_0$ and UV sensitivity because carrier access remains high or electrostatic compensation is incomplete. The optimized $n^+$ FSF gives a simulated efficiency of 26.78% before UV exposure and 26.76% after exposure, corresponding to a relative efficiency change of approximately 0.09%. These results identify electrostatic control of carrier-trap coupling as an effective design principle for ultraviolet-stable, high-efficiency silicon photovoltaics.

# 光储系统安全、性能与协同运行的测试验证路径

邹凯强

德国莱茵 TÜV

E-mail: Leo.Zou@tuv.com

## 报告摘要

本次演讲围绕光储系统安全、性能的认证路径，聚焦欧洲，澳洲，北美市场的认证准入要求，解析光储产品的具体认证测试内容，从系统架构，器件选型，保护参数方面出发，总结归纳产品认证中存在的常见问题，为产品的认证方案选择提供一条参考路径。

邀请报告

# 固德威生态绿电：光储融合赋能多元应用场景

蒋生根

固德威技术股份有限公司

E-mail: shenggen.jiang@goodwe.com

## 报告摘要

随着新能源产业加速发展，光伏与储能的应用正从单一设备、单一场景，向建筑空间、用能需求与智慧能源管理深度融合的方向发展。绿色能源的价值不仅在于发电，更在于如何高效利用能源、降低用能成本，并为用户创造持续的经济与应用价值。

本报告围绕固德威“生态绿电”理念，介绍以光伏发电为基础、储能调节为支撑、智慧能源管理为纽带的“源网荷储智”协同体系，探索绿色能源从生产、存储、调配到消费的系统化应用路径。

结合固德威旭日光伏瓦、银河轻质组件、家庭光储、阳台微储、光储充车棚及工商业光储等产品与解决方案，重点分享生态绿电在住宅建筑、既有工商业屋顶、停车空间、商业建筑及产业园区等多元场景中的创新应用，探讨光储融合在建筑功能集成、提升绿电自用率、削峰填谷、用电安全及能源成本优化等方面的实际价值。

通过光伏、储能、智慧能源管理与终端应用的协同创新，固德威致力于推动新能源应用从单一发电向综合能源价值创造转变，让绿色能源更好地融入建筑与生活，为用户提供更加经济、安全、智慧的用能体验。

**关键词：** 生态绿电；光储融合；源网荷储智；光电建筑；多元应用场景

# 沙戈荒场景光伏组件耐候性挑战研究、技术选型及量产化监控方案

陈真，葛中伟，王文静，张林，邢国强，闫灯周*

通威太阳能（成都）有限公司

E-mail: yandz01@tongwei.com

## 报告摘要

随着光伏发电在能源结构中的占比逐年提升，沙戈荒地区已成为当前国内外集中式光伏电站的主要增量场景。然而，荒漠化地区频繁的风沙活动，加之清扫机器人的推广应用，对光伏组件性能提出了更高要求。本文提出了沙戈荒场景解决方案并进行展开研究：通过钢丝绒 15 次摩擦测试，沙戈荒玻璃的功率衰减较常规玻璃降低 1.18%；组件级机器人清洗测试进一步表明，沙戈荒组件的功率衰减较常规组件低约 0.7%，与材料测试结果高度一致；此外，为期 2 个月的户外实证发电量数据显示，沙戈荒产品因其防尘功能，相较于常规产品单瓦发电量增益可达 0.75%，构建了完整的多维度验证链条；同时考虑沙戈荒场景高温环境，进行了加严热斑测试，全面评估组件在沙尘遮挡等异常工况下的安全性。结果表明，沙戈荒玻璃在风沙环境下展现出显著性能优势，本文提出的方案为沙戈荒光伏项目提供了从材料选型到系统运维的完整技术支撑。

# 沙戈荒 XBC 组件解决方案

黄琪伟

通威太阳能（成都）有限公司

E-mail: huangqw03@tongwei.com

## 报告摘要

针对沙戈荒大型光伏基地强紫外、大温差与风沙协同环境下背接触（BC）组件封装可靠性问题，系统研究了背面绝缘胶、正面隔离胶与固定胶三胶体系的失效机理与改进方案。结果表明：绝缘胶与隔离胶在长期紫外辐照下发生光氧化链式反应，聚合物主链断键生成共轭羰基与醌类发色团，导致黄变指数上升、透光率下降；正面隔离胶持续接收太阳直射辐照，同等周期内承受的紫外剂量远大于背面绝缘胶，黄变引起的透光率下降直接损失正面发电功率，故对黄变更为敏感。固定胶在高温交变载荷下发生蠕变，引发焊带滑移与界面脱层，最终导致电气连接失效。基于上述机理，提出脂肪族骨架、光稳定剂复配、低助剂方案与固化度窗口精准控制的耐黄变方案，热固绝缘胶绝缘胶 UV60 老化后$\Delta b \leq 2$ 隔离胶并在初始透光率≥91%与 UV360 老化后$\Delta b \leq 2.0$；固定胶采用增粘助剂、低 tg 增韧的设计方案提高高低温下拉力可靠性。经紫外老化、湿热循环与热循环验证矩阵考核，三胶体系性能满足匹配沙戈荒环境可靠性要求。

**关键词：**BC 组件；沙戈荒；三胶体系；黄变机理；透光率；耐候性；可靠性

# 晶硅太阳电池及组件技术进展

马红娜

英利能源发展有限公司

E-mail: hongna.ma@yingli.com

## 报告摘要

近年来，在"双碳"目标高质量发展导向下，我国光伏产业技术迭代加速：TOPCon 已成为产业化绝对主流技术，BC 与钙钛矿/晶硅叠层成为效率突破的重点方向，《晶体硅光伏组件和逆变器能效限定值及能效等级》强制性能效国标的实施也对组件效率与可靠性提出了更高要求。本报告系统介绍了英利能源在 TOPCon 与 BC 产业化电池及组件技术方面的最新进展、优化路径与未来规划。

在 TOPCon 技术方面，报告围绕提效降本介绍了系列工艺优化：采用叠层复合钝化减反膜系，通过折射率梯度优化降低长波反射，增强 UV 波段反射，降低 UV 衰减；背面选择性 poly-finger 结构减少 poly 层光学寄生吸收，有效提升电池效率；正面激光增强接触形成局部微纳米银/硅接触金属化；结合叠层多晶硅磷掺杂调控与表面钝化、金属化接触综合优化，显著提升电池开路电压；切割面氧化铝边缘钝化提升组件功率约 5W；配合多分片、正面发射极局域结等技术，TOPCon 组件功率达 660W 以上、双面率超过 80%，满足一级能效要求，并形成面向不同能效等级的清晰功率提升路径。

在 BC 技术方面，其凭借正面无栅线零遮挡与全钝化接触结构，可实现较 TOPCon 高 10~15W 的功率增益；通过抗热斑设计，BC 组件最高热斑温度较 TOPCon 组件低约 20℃；针对 BC 电池弱光性能较差、双面率偏低等短板，规划了低成本喷涂/湿法边缘钝化、图形化与 gap/pitch 结构优化、微型二极管设计等弱光改善方案，并结合 0BB 技术、铜浆/铝浆等贱金属化方案与高透绝缘胶、密栅精细金属化等提效降本路径，BC 组件功率达 670W 以上，满足一级能效要求。

TOPCon 工艺方案成熟高效，电池转换效率、双面率与成本仍有较大优化空间；BC 全钝化接触结构可最大程度提升电池效率，目前更适用于分布式等应用场景，未来通过 0BB、低温互联、无银金属化等技术储备逐步提升双面率与弱光响应，适配大型地面电站。

## Progress in crystalline silicon solar cell and module technologies

**Hongna Ma**

Yingli Energy Development Co., Ltd.

**Abstract**

In recent years, driven by China's "dual carbon" goals, the technology iteration of the Chinese photovoltaic (PV) industry has been accelerating: TOPCon has become the absolutely dominant mass-production cell technology, while BC (back contact) cells and perovskite/crystalline silicon tandem cells have become one of the key directions for efficiency breakthroughs. The implementation of the mandatory national standard Minimum Allowable Values of Energy Efficiency and Energy Efficiency Grades for Crystalline Silicon Photovoltaic Modules and Inverters (GB

47834-2026) imposes stricter requirements on module efficiency and reliability. This report systematically presents the latest progress, optimization routes, and future plans of Yingli Energy in industrialized TOPCon and BC cell and module technologies.

For TOPCon technology, the report introduces a series of process optimizations targeting efficiency improvement and cost reduction: a multilayer composite passivating and anti-reflection coating stack is adopted, in which refractive index gradient optimization reduces the long-wavelength reflection and enhances the reflection in the UV band, thus suppressing the UV-induced degradation; a rear selective poly-finger structure reduces the parasitic optical absorption of the polysilicon layer and effectively improves the cell efficiency; front laser-enhanced contact forms localized micro/nano silver/silicon contact metallization; combined with phosphorus doping modulation of stacked polysilicon layers and the comprehensive optimization of surface passivation and metallization contact, the open-circuit voltage of the cell is significantly increased; aluminum oxide edge passivation on the cleaved cell edges increases the module power by approximately 5 W. Together with multi-cut and localized emitter junction technologies, TOPCon modules achieve a power output above 660 W with a bifaciality exceeding 80%, meeting the Grade-1 energy efficiency requirement, and a clear power-upgrading roadmap towards different energy efficiency grades has also been established.

For BC technology, benefiting from zero front-side shading and the fully passivating contact structure, a power gain of 10-15 W compared with TOPCon can be achieved; with the hotspot-resistant design, the maximum hotspot temperature of BC modules is about 20℃ lower than that of TOPCon modules. To overcome the weaknesses of BC cells such as inferior low-light performance and relatively low bifaciality, low-cost spray/wet-chemical edge passivation, patterning and gap/pitch structure optimization and micro-diode design have been planned; combined with efficiency improvement and cost reduction routes such as 0BB (zero busbar) technology, base-metal metallization schemes using copper or aluminum paste, high-transparency insulating adhesive and fine dense-grid metallization, BC modules achieve a power output above 670 W, meeting the Grade-1 energy efficiency requirement.

The TOPCon process scheme is mature with high mass-production efficiency, yet there remains considerable room for optimization in cell conversion efficiency, bifaciality and cost. The fully passivating contact structure of BC maximizes the cell efficiency, and BC products are currently more suitable for distributed and similar application scenarios; in the future, technology reserves such as 0BB, low-temperature interconnection, and silver-free metallization will gradually improve the bifaciality and low-light response to adapt BC modules to large ground-mounted power stations.

# TOPCon 太阳电池中紫外诱导衰减的物理机制及抑制策略

林欣，余学功*，杨德仁*

浙江大学硅及先进半导体材料全国重点实验室

* E-mail: yuxuegong@zju.edu.cn; mseyang@zju.edu.cn

## 报告摘要

在全球能源结构转型的推动下，光伏累计装机容量正迈入 TW 时代。n 型 TOPCon 电池凭借效率与成本优势已成为市场占比最高的技术路线，然而其紫外诱导衰减（UVID）问题严重制约了器件的长期稳定性。已有研究多聚焦于 TOPCon 电池的正面（受光面），普遍认为高能紫外光子会导致界面处 Si-H 键断裂并引发脱氢，生成悬挂键，进而造成器件性能退化。但是 TOPCon 背面也存在 UVID 现象，且没有直接的实验证据分析氢在 UVID 中的作用。于是，我们将 TOPCon 背面的钝化结构作为我们的研究对象，对 UVID 过程进行动力学分析，发现 TOPCon 电池中的 UVID 是多阶段的，且每个阶段都有着衰减和恢复的过程。每个阶段的衰减激活能呈现先衰减后上升的变化趋势，而恢复激活能基本保持不变。同时，我们对每个阶段进行了电学分析，发现 UVID 的加剧可归因于界面态密度的升高，并伴随着 c-Si/$SiO_x$ 界面处氢的浓度的上升。基于以上研究结果，我们推测 TOPCon 中 UVID 的机制之一是高能光子打破了 $SiN_x$:H 中的 Si-H 键，释放大量自由的氢原子向 c-Si/$SiO_x$ 界面处扩散，过量的氢和界面处的 Si-H 键反应形成悬挂键，造成界面态的上升。由此，我们提出一种新的抑制 TOPCon 电池 UVID 的抑制手段，在背面氢化氮化硅和多晶硅之间插入一层纳米氢阻挡层，调控 c-Si/$SiO_x$ 界面处氢的浓度。该研究结果为阐明氢在 UVID 过程中的作用提供了直接的实验证据，深化了对 UVID 衰减机理的认识，并为抑制 UVID 提供了新的思路。

**关键词：**TOPCon；UVID；氢关缺陷；界面态

# BC 太阳电池表面损伤修复与长余辉防护浆料的夜间发电研究

杨欢，杨学良，任雨珂，陈佳和，高海顺，李甜甜 ，陈旺璇，

张旭宁，陈剑辉*

河北大学物理科学与技术学院，先进钝化技术实验室

*E-mail: chenjianhui@hbu.edu.cn

## 报告摘要

背接触（Back Contact，BC）晶硅太阳电池正面无金属栅线，具有正面结构完整、外观设计灵活等优势，但其表面在生产、搬运及应用过程中容易受到摩擦刮蹭，影响表面形貌、光学特性及电池性能。针对上述问题，本研究围绕 BC 太阳电池表面损伤修复与功能性防护开展研究。一方面，通过模拟摩擦刮蹭，结合光学显微观察、扫描电子显微镜、反射率测试、光致发光表征及电学性能测试，分析刮蹭损伤对电池表面特征及光电性能的影响，并采用钝化液对受损区域进行修复，结合边缘钝化工艺探索电池性能改善方法。另一方面，针对 BC 电池的防刮蹭需求，开发以长余辉发光粉为功能组分的复合浆料，通过图案化印刷在电池表面形成隔离防护层，并研究不同图案及覆盖率对电池光电性能的影响。在此基础上，进一步利用长余辉材料的持续发光特性，开展暗态电学输出测试，探索浆料在夜间发电方面的应用潜力。实验结果表明，钝化修复结合边缘钝化为刮蹭损伤电池的性能改善提供了可行途径；在所测试的印刷图案及覆盖条件下，浆料印刷未导致 BC 电池短路电流出现明显下降。在暗态条件下，电池检测到可测量的电流输出，且暗态电流随浆料覆盖率增加而逐渐增大，表明长余辉发光浆料与太阳电池的结合具有进一步探索夜间光电转换的潜力。此外，该浆料在 TOPCon 太阳电池上的应用也进行了初步验证。本研究将表面损伤修复、隔离防护与长余辉功能拓展相结合，为 BC 太阳电池表面防护及兼具夜间发电潜力的功能化应用提供了实验依据。

**关键词：** BC 太阳电池；表面损伤；钝化修复；长余辉发光浆料；表面防护；夜间发电

邀请报告

# 微米级碳质夹杂物及其对单晶硅缩颈断裂掉棒的危害

# Carbonaceous inclusions and their detrimental effects on the Dash-neck fracture of 300 mm CZ silicon

张华利

江苏协鑫硅材料科技发展有限公司

## 报告摘要

两炉独立的工业级 300 mm 直拉（CZ）单晶硅生长中，细颈缩颈处均发生自发断裂，晶棒整支坠落而报废。断裂都起始于缩颈锥上直径约 7.5 mm 处，尚未进入目标 5mm 细颈段。SEM-EDS 表征显示，断面上都有枝晶状碳质夹杂物。第二炉另见一根直径约 7 μm 的富碳纤维，一端嵌在基体中。各断面与生长轴约成 54°，符合 {111} 解理取向。熔体碳含量整体上满足远场平面界面稳定性判据，收缩的锥体却使溶质在局部富集。叠加拉速的瞬时波动后，界面发生枝晶化失稳，碳质颗粒和碳纤维随之被裹入晶体。等径生长初期，这些夹杂物还不足以使颈部断裂。温度高于脆性—延性转变温度（约 600 ℃）时，位错蠕变仍能松弛夹杂物与基体界面的热失配应力。降至转变温度以下后，蠕变延性消失，悬吊重量升至数百公斤，脱粘微裂纹才萌生并扩展。断裂时的载荷为 683 kg 与 597 kg，对应轴向应力 152 MPa 与 133 MPa。按表面裂纹几何做线弹性断裂力学计算，临界缺陷尺寸为 7.4 μm 与 9.7 μm，与实测夹杂物和碳纤维的尺寸接近。失效因此由缺陷主导，且具有延迟性，不受应力控制。颈部在锥体冷却之后才断裂，断口落在夹杂物被凝固裹入之处，不在名义应力最高处。

**关键词：**直拉硅；细颈；碳质夹杂物；组分过冷；脆性—延性转变；解理断裂

邀请报告

# 高效高可靠性低温合金 GPC 电池组件研究开发

王申存

协鑫科技控股有限公司

## 报告摘要

背接触(BC)电池组件因其正面无遮挡，在效率和性能上有着更高的优势。但是由于其栅线位于电池背面，传统的高温焊接工艺导致焊接后电池翘曲过大，层压后残余应力较高，带来工艺和可靠性挑战。本研究采用低温合金焊接工艺，结合电池和组件材料，设计及工艺优化，彻底解决了电池翘曲的工艺问题，并且验证了其多倍的可靠性测试，测试表现优异，三倍 IEC 测试后衰减均小于 5%。另外，本产品在抗热斑，电性能方面也有明显优势。

邀请报告

# 光伏回收和循环利用助力绿色供应链闭环

吕　芳

中国绿色供应链联盟光伏回收产业发展合作中心

E-mail: purple@mail.iee.ac.cn

## 报告摘要

中国已是全球光伏制造大国和应用大国，也将成为全球光伏回收和循环的技术、产业和市场的风向标。如何在光伏产品退役后进行无害化处理和高值循环利用，是构建光伏绿色供应链闭环的最后一公里。作为国家科技部最早牵头本领域的国家重点研发专项首席专家，将从我国光伏绿色供应链创建情况入手，重点对光伏回收和循环利用行业发展概况进行梳理和介绍。

邀请报告

# A hydrogen-mediated device-physics framework for understanding multistage UVID in TOPCon solar cells

**Zongtao Liu**

芜湖协鑫集成新能源科技有限公司

E-mail: liuzongtao@gclsi.com

## Abstract

Ultraviolet-induced degradation (UVID) in AlOx-passivated tunnel oxide passivated contact (TOPCon) solar cells involves a history-dependent sequence of UV-induced degradation, post-UV dark-storage degradation, illumination recovery, secondary dark degradation, and thermal recovery. However, existing microscopic interpretations generally address individual stages, while directly resolving hydrogen configurations and migration pathways within the buried 1–2 nm $p^+$-Si/SiOx/AlOx interfacial region remains experimentally challenging.

Here, we develop a unified, hydrogen-mediated device-physics framework by integrating experimental observations and theoretical insights from previous studies with additional mechanistic investigations. Hydrogen-related interfacial evolution is linked to the coupled changes in interface defect density ($D_{it}$) and effective fixed negative charge ($-Q_{f,\mathrm{eff}}$), which govern chemical and field-effect passivation, respectively. Additional electrical-injection-assisted green-light and red-light experiments constrain recovery explanations based solely on carrier injection or photocarrier generation. Device-level simulations are employed as a consistency test to map the multistage degradation and recovery process within a common $D_{it}$–$-Q_{f,\mathrm{eff}}$–$V_{oc}$ space.

The framework provides a coherent physical interpretation of the full UVID sequence and explains how solar cells with similar initial performance can follow distinct degradation and recovery trajectories depending on their interfacial states and treatment histories. It also suggests testable hypotheses regarding hydrogen redistribution, effective charge screening, and the different kinetics of successive dark-storage stages. Rather than claiming definitive atomistic identification, this work establishes a physically constrained framework to guide future microscopic investigations and the development of more UV-stable TOPCon solar cells.

**Keywords:** TOPCon solar cells; ultraviolet-induced degradation; hydrogen-mediated interfacial evolution; interface defect density; effective fixed negative charge; photovoltaic reliability


Initial State
(Fabricated TOPcon)
AlOx
Intrinsic structural −Qf0
SiOx
[AlO4/H+]0 configurations, Qfscreen
p+-Si
Si-H bond
Low Dit with possible pre-existing Qfscreen
UV Excitation
UV
Photoinduced destabilization of [AlO4/H+]0 configurations
Dangling bond
Temporary dynamic balance between Si–H bond dissociation and re-formation
Si–H bond breaking and photoinduced destabilization of proton-compensated Al-related configurations
Prolonged UV Exposure
(Quasi-steady state)
Some H redistributes to SiOx/AlOx boundary and part of them reassociation with [AlO4]− sites
H redistributes predominantly within SiOx
Substantially increased Dit and uncertain variation in −Qfeff depending on H redistribution
Extended Illumination
(Metastable recovery)
Slight H+ redistribution within SiOx shifts the balance toward sustained destabilization, while H+ remains near the SiOx/AlOx boundary.
A fraction of H+ may redistribute toward Si dangling bonds
Metastable recovery with increased −Qfeff and limited reduction in Dit
Light Excitation
Transient local balance between photoinduced H+ destabilization and re-association with [AlO4]− sites
Photoinduced destabilization of proton-compensated Al-related configurations
Dark Storage
(First dark stage)
Broader H redistribution toward [AlO4]− sites
Short-range H reassociation with [AlO4]− sites
A small fraction of H may redistribute toward dangling bonds
Progressive increase in Qfscreen with a slight decrease in Dit
Dark Storage
(Second dark stage)
Slower residual H redistribution toward to [AlO4]− sites
Fast short-range H reassociation with [AlO4]− sites
Relatively rapid increase in Qfscreen with little change in Dit, distinct from the first-stage dark storage
Thermal Effects
Thermally activated O-to-O hopping
Thermally activated dissociation of [AlO4/H+]0
Si-H bond re-formation
Thermally activated destabilization of proton-compensated Al-related configurations and Si–H re-formation
Thermally Stabilized State
(More stable recovery)
H-related charge compensation is substantially reduced
Re-passivation of Si dangling bonds
More stable recovered state with reduced Dit and restored −Qfeff

# 晶体硅太阳电池中的微观界面与性能关系的研究

丁德恭

浙江大学，硅及先进半导体材料全国重点实验室

E-mail: dgding@zju.edu.cn

## 报告摘要

太阳能光伏发电作为最具潜力的可再生能源之一，是半导体技术与新能源需求相结合而衍生的高科技产业，已成为能源转型、 实现“双碳”目标的新质生产力[1]。持续提升晶体硅太阳电池的光电转换效率、降低度电成本，是推动光伏产业的根本驱动力[2]。晶体硅材料内部与异质界面的微观缺陷往往是引发非辐射复合及器件退化、制约其大规模应用的核心源头[3]。本报告围绕先进电子显微学在晶体硅太阳电池中的前沿应用展开，特别是外场下的原位、原子分辨电镜技术揭示光伏器件内部微观缺陷的分布特征、界面结构的动态演变规律及其对电荷传输的影响。通过揭示微观缺陷在真实服役环境下的演变机制，深度剖析其与宏观光电器件性能衰减之间的内在关联。旨在建立“缺陷结构演变-器件性能”的跨尺度构效关系，为未来高效、长寿命新型光伏器件的设计与界面工程提供坚实的理论基础及先进表征策略支撑。

**参考文献：**

[1] Nayak P K, Mahesh S, Snaith H J, et al. Photovoltaic solar cell technologies: analysing the state of the art. Nature Reviews Materials, 2019, 4(4): 269-285.

[2] Green M A, Dunlop E D, Yoshita M, et al. Solar cell efficiency tables: Version 68. Joule, 2026, 10(7).

[3] Ballif C, Haug F J, Boccard M, et al. Status and perspectives of crystalline silicon photovoltaics in research and industry. Nature Reviews Materials, 2022, 7(8): 597-616.

# 穿越全球市场：光伏类产品绿色贸易新规挑战及应对

范　典

德国莱茵 TÜV

E-mail: Zoe.Fan@tuv.com

## 报告摘要

本次演讲围绕光伏产品国际准入与绿色贸易新规，分析全球市场规则变化及发展趋势，探讨企业如何加强绿色合规管理、完善相关数据与资料准备，提前制定有效合规方案，更好应对国际市场准入要求，提升出海竞争力。

# 退役晶硅光伏组件回收硅粉的纯化与分散调控及其锂离子电池负极应用研究

钱承，张旭宁，陈剑辉*

河北大学物理科学与技术学院，先进钝化技术实验室

*E-mail: chenjianhui@hbu.edu.cn

## 报告摘要

随着全球光伏产业的快速发展，退役晶硅光伏组件数量不断增加，废弃硅材料的高值化回收与再利用对于促进资源循环利用和光伏产业可持续发展具有重要意义。然而，退役光伏组件回收硅粉普遍存在粒径分布不均、金属杂质残留及表面氧化等问题，限制了其在锂离子电池负极材料中的应用。本研究以退役晶硅光伏组件回收硅粉为原料，采用有机清洗、沉降分级、湿法球磨及分步化学清洗相结合的工艺，实现硅粉的杂质分离、颗粒细化与表面状态调控。结果表明，沉降分级能够有效分离富 Cu 杂质组分，湿法球磨使硅粉中位粒径由约 48μm 降低至亚微米尺度，且处理过程中硅的主要晶体结构得以保留。经过分步化学清洗，硅粉中部分金属杂质的相对含量降低，表面氧化相关组分呈现减弱趋势。在此基础上，引入 Nafion 聚合物分散体系，研究不同 Nafion 浓度对回收硅粉分散稳定性及沉降行为的影响，并进一步探索其在锂离子电池负极中的应用。通过将回收硅粉的纯化处理与聚合物分散调控相结合，为改善回收硅粉的材料特性及其电化学应用提供实验依据，

也为退役光伏组件中硅资源的高值化利用提供了一条可行的技术路径。

**关键词：**退役光伏组件；回收硅粉； Nafion 分散；锂离子电池负极

邀请报告

# 用户侧光储协同与虚拟电厂的聚合价值

孙韵琳

广东永光新能源科技有限公司

E-mail: sunyunlin@winonesolar.com

## 报告摘要

在新型电力系统建设进入"组织运营"新阶段的背景下，用户侧分散资源正成为系统调节的重要力量。本报告梳理了分布式光伏 5.3 亿千瓦、新型储能 1.36 亿千瓦、已建成虚拟电厂 470 个的产业底座，指出当前的核心矛盾不是资源规模不足，而是如何把分散资源组织起来、调动起来。本报告从光储协同的技术路径、四种典型应用形态、四层聚合架构出发，系统分析了峰谷套利、需量管理、需求响应、现货套利与绿电碳资产五个价值通道，提出"基本盘+增量盘+期权盘"的三层收益结构。结合农村电网薄弱、负荷分散、农业负荷可调等五个特殊性，报告剖析了山东平阴、江苏仪征、江苏南通三个村级聚合试点的实践经验，指出整村聚合、构网型储能、一建多用是农村虚拟电厂的可行路径。最后本报告从标准、平台、运营三个维度提出三步走建议，判断 2026—2030 年是布局窗口期，早布局者将在标准、网点与运营能力上形成先发优势。

**关键词：**用户侧；光储协同；虚拟电厂；聚合价值；农村能源

邀请报告

# 能源系统的 AI 决策引擎

王小杨

北京理工大学（珠海）

E-mail: gridai@163.com

## 报告摘要

高比例新能源接入与电力市场机制演进，使能源系统呈现多源异构、多尺度耦合与强不确定性特征，对跨资源、跨场景的协同决策能力提出更高要求。本报告以自主研发的能源 AI 算法底座为核心，介绍融合电力机理、行业知识、市场规则与数据驱动模型的知识增强 AI 技术体系，将多源时序预测、多目标约束优化与策略生成贯通为能源系统的 AI 决策引擎。围绕光储协同运营与广东发电侧虚拟电厂的应用实践，阐述从源荷预测、资源聚合到调度运营、交易决策与收益评估的技术路径，展现 AI 对复杂能源业务的系统性赋能。进一步介绍专业模型与大模型、Agent 的协同机制，以专业模型承担定量预测与约束求解，以大模型和 Agent 支撑知识理解、任务编排与流程协同，形成可解释、可追溯的决策闭环。结合端云协同架构，探讨将专业算法能力下沉至园区、场站本地计算节点，实现云端全局决策与现场计算的协同。最后，面向虚拟电厂、零碳园区与算电协同，讨论统一算法底座的跨场景适配与规模化应用路径，推动 AI 由单点分析工具向能源系统的决策基础能力演进。

**关键词：**能源 AI 算法底座；智能决策；光储协同；虚拟电厂；算电协同

邀请报告

# 聚合源荷 协同增值

# —发售一体布局虚拟电厂的实践思考

蔡天赐

广州发展新能源集团股份有限公司

E-mail: 84729203@qq.com

## 报告摘要

随着电力现货市场在全国范围内加速铺开，新能源高比例接入与市场价格机制持续演进，传统售电公司依赖购售价差与中长期合约的商业模式面临批零倒挂、价差收窄的持续性压力，向负荷聚合与服务增值转型已成为行业共识。发售一体企业兼具电源侧资源与售电侧用户资源的双重禀赋，是布局虚拟电厂、实现源荷协同的天然主体。本报告基于发售一体运营的实践，系统阐述发售一体企业布局虚拟电厂的总体思路与实施路径：依托自有新能源场站与配储资源夯实电源侧聚合基础，整合分布式光伏、工商业储能与可调负荷等用户侧资源构建多品类聚合资源池；围绕平台建设、边缘网关部署、等保测评与调令员资质等关键环节筑牢技术合规底座；通过深度参与电能量交易、辅助服务与需求响应等多市场，实现源荷两侧资源的协同调度与叠加增值。结合团队双矩阵分工与年度经营目标分解的运营实践，进一步分析虚拟电厂业务与传统售电业务的协同机制，探讨从“赚价差”向“赚服务、赚协同”的价值跃迁路径，并对聚合运营中的风险管控与商业模式迭代提出思考。研究表明，发售一体是虚拟电厂规模化运营的最优承载模式之一，资源聚合能力、算法决策能力与市场运营能力的深度融合，将成为售电企业构建核心竞争力的关键。

**关键词：**发售一体；虚拟电厂；源荷聚合；现货市场；协同增值

邀请报告

# 以服务运营车辆为主的光储充一体化电站运营策略

黄　颖

广东兆万能源有限公司

E-mail: 592014632@qq.com

## 报告摘要

随着大湾区电动汽车渗透率的不断提升，其中运营车辆电动化率持续走高，深圳、广州等大湾区核心城市充电量大幅增长，充电量增速潜力巨大，工商业户号下的充电站即可作为“电力用户”直接入市参与电力市场交易，也是目前增量最快的可调负荷，被虚拟电站运营商聚合的预估价值越来越大，然而单纯依靠快充服务费的盈利模式已接近红海，优质点位布局+车队绑定（网约车公司）+光储充/V2G 的模式方能实现可观回报，充电站投资不再是“粗放投入即可盈利”的模式，运营策略需要从以服务车辆（充电）为主，转向以服务人员（司机）为核心，其中以服务运营车辆为主的充电站对运营商提出了更高的经营管理要求，运营车辆及网约车司机的充电需求呈现三重特征：服务费低廉、停车费用优惠、服务配套完善。以服务运营车辆为主的光储充一体化电站运营策略：遵循荷随源动原则，主推建设光储充一体化物流园区站，通过错峰充电、光伏自消、VPP 调度、车主服务四重机制，聚合车流、电流、人流、现金流，实现多重收益。

**关键词：**服务运营车辆；光储充一体化电站；运营策略

# 源网荷储协同：智能微网赋能节能降碳新路径

董逸帆

上海欧普泰科技创业股份有限公司

E-mail: dongyifan@optjt.cn

## 报告摘要

在双碳战略推进与能源转型背景下，分布式光伏大规模普及带来了光伏就地消纳不足、源荷供需错配、用能成本偏高等现实问题。欧普泰依托光伏检测领域技术积累，构建源- 网- 荷- 储一体化智能微网系统，面向园区、工商业等应用场景，实现光伏、储能、负荷与电网之间的协同调度。

通过智能微网能量管理系统对分布式光伏出力、储能充放电、用户侧用电负荷进行动态优化调控，提升本地光伏发电消纳比例，平抑功率波动，降低对公共电网的冲击。系统结合光伏资产运行数据，优化用能结构，削减尖峰用电负荷，实现用电侧节能降耗，挖掘光伏系统降碳潜力。方案打通光伏发电、储能调配、负荷管控全流程，助力用户降低综合用能成本，减少碳排放。后续将持续结合光伏组件与电站检测数据，进一步完善微网多工况调度策略，推动光伏- 微网融合场景规模化落地，为工商业及园区零碳建设提供可行技术路径。

**关键词：**源网荷储协同；智能微电网；分布式光伏；就地消纳；节能降碳

邀请报告

# 工商业储能在虚拟电厂中角色定位

## —行政性分时电价取消后，工商业储能的真正价值得以体现

李　朋

广东皇鼎智网能源科技有限公司

E-mail: 349893672@qq.com

## 报告摘要

随着全国电力市场化改革深化，行政性分时电价取消成为必然，依靠固定峰谷价差套利的工商业储能商业模式被打破。本文分析工商业储能在虚拟电厂中的角色定位，明确其作为分布式灵活调节资源、现货价格套利主体、电网辅助服务单元与用户侧用能优化终端的核心功能。行政分时电价取消后，固定价差套利空间收缩，储能真实价值体现为系统调节能力与多市场协同收益。本文梳理工商业储能参与虚拟电厂聚合运营的价值链条，分析发展瓶颈，并提出发展建议。研究表明，工商业储能作为最为灵活的可调负荷，可深度参与虚拟电厂调度体系，实现电能量交易与辅助服务价值协同变现，是其可持续发展的必然方向，对推动完善全国电力市场化改革具有重要作用。

**关键词：**工商业储能；可调负荷；虚拟电厂；行政性分时电价

邀请报告

# 让每一辆车都成为可调度的 V2G 资源

冯　元

北京链宇科技有限责任公司

E-mail: fengy@linkutec.cn

## 报告摘要

新能源汽车的规模化发展，使车载电池成为新型电力系统中重要的分布式灵活性资源，但资源分散、电池寿命顾虑与收益机制不清，制约了其常态化调度。本报告结合链宇科技从电池算法、双向充放电装备到零 C 云 AI 能源平台的全链条能力，提出一套电力融合互动解决方案：场站侧以 V2G 与光储充构建微网，实现绿电就地消纳与削峰填谷；平台侧将车辆聚合为可调度单元接入虚拟电厂，参与需求响应与电力交易；用户侧以“互动即保养”的电池管理和收益清分提升车主参与意愿。最后结合国家级 V2G 试点实践，分析资产、算法与交易协同形成的商业闭环及规模化路径。

**关键词：**车网互动；虚拟电厂；光储充微网；电力交易；V2G

邀请报告

# 零碳园区分布式光伏与算力系统协同优化技术体系与商业模式研究

张　锋

中国开发区协会零碳园区专委会

国网浙江省电力有限公司

E-mail: 1074587611@qq.com

## 报告摘要

立足双碳目标与新型算力、电力系统融合发展需求，针对零碳园区分布式光伏出力随机性强、就地消纳率低、高密算力负荷能耗刚性、源荷时空耦合失衡、增值商业模式匮乏等行业痛点，报告构建光伏—算力深度耦合的协同优化技术体系与市场化运营模式。研究突破传统源荷独立调控局限，搭建“风光发电、储能调节、算力柔性响应、智慧调度”一体化技术架构，通过算力负荷时空迁移、动态配比调控，精准匹配光伏绿电出力特性，有效平抑新能源出力波动，破解绿电消纳难题与算力高能耗瓶颈。同时，结合园区零碳建设场景，重构算电协同、绿电交易、碳资产增值、电网辅助服务多元商业模式，厘清各方主体权责与收益机制。研究成果可有效提升园区能源利用效率、降低算力用能成本、夯实园区零碳运行能力，为园区新能源与数字算力融合落地、规模化推广算电协同零碳模式提供理论支撑与实践范式。

邀请报告

# 高密度光伏组件用边缘密封材料可靠方案研究

林维红，胡晓波，周光大

杭州福斯特应用材料股份有限公司

E-mail: wh.lin@firstpvm.com

## 报告摘要

近年来，光伏技术飞速发展，伴随着高效电池技术迭代、封装材料辅助增效，以及综合封装方案高质量优化，将“提质增效”推进到光伏行业主旋律。

对于市场主流电池 TOPCon，多分片、扩片电池技术已经大批量量产，组件功率增益可达到 10 瓦以上。多分片及电池片扩片实现了电池分布高密度版型，即留给电池片区域的面积增大。因而，对光伏组件提出小爬电绝缘的要求。

对于组件缩小爬电距离的边缘材料，主要考虑用于组件边缘位置，包含层压件内部边缘和外部边缘，均要求密封材料具有优秀绝缘性能、稳定的绝缘厚度和耐候性能。

本报告将介绍福斯特在边缘密封材料的解决方案的分析、可靠性评估对比研究，包含丁基胶方案、边缘胶带方案、其他胶粘剂方案等。

**关键词：**边缘密封材料；绝缘性能；丁基胶；阻隔性能；长期可靠性

# 陶氏光伏 POE：以材料创新提升新一代组件的效率与可靠性

张文馨

陶氏化学（中国）投资有限公司

E-mail: emmazhang@dow.com

## 报告摘要

针对新一代光伏组件对封装可靠性与生产效率的更高要求，本文介绍陶氏快速固化光伏级 POE 新牌号（XUS 38691.00 / XUS 38698.00）。新牌号剪切变稀更强，挤出黏度更低，固化更快，可减少助交联剂用量。在 EPE 结构中，它们能在储存后保持芯层凝胶含量，从而缓解分层与气泡风险。DH1000 h 后，其粘接力较普通 POE 提升约 40%，透光率也有提高。在 Ag/Cu 金属化电池和 Poly-finger 电池中，POE 封装的湿热、UV 及抗 PID 性能优于 EVA 和 EPE 方案。在 0BB 组件的皮肤膜应用中，多种聚烯烃材料组合可实现稳定焊带接触、可控树脂流动和低尺寸变化。与气相法 POP 相比，POE 在透光率、加工性和产出方面更具优势。

**关键词：**POE；光伏胶膜；快速固化；PID；Ag/Cu 金属化；Poly-finger；0BB 皮肤膜

# Dow PV POE: Material Innovation for More Efficient and Reliable Next-Generation Modules


## Abstract

To meet the growing demands for encapsulation reliability and production efficiency in next-generation PV modules, this paper presents Dow's new fast-cure PV-grade POE resins (XUS 38691.00 / XUS 38698.00). The new grades show stronger shear thinning, lower extrusion viscosity, and faster curing, which allows a lower coagent dosage. In EPE structures they retain core-layer gel content after storage, which helps reduce delamination and bubble risks. After DH1000 h, adhesion is about 40% higher than that of regular POE, and transmittance is also improved. For Ag-seed/Cu metallized cells and Poly-finger cells, POE encapsulation outperforms EVA and EPE schemes in damp-heat, UV and PID resistance. For 0BB module skin films, a portfolio of polyolefin-based materials delivers stable ribbon contact, controlled polymer flow, and low dimensional change. Compared with gas-phase POP, POE offers advantages in transmittance, processability and output.



**Keywords:** POE; PV encapsulant; fast curing; PID; Ag-seed/Cu metallization; Poly-finger; 0BB skin film

邀请报告

# UVID 防护用转光胶膜的材料设计与性能调控

胡晓波，唐国栋

杭州福斯特应用材料股份有限公司

E-mail: xb.hu@firstpvm.com

## 报告摘要

紫外光诱导衰减（UVID）是异质结（HJT）、隧穿氧化层钝化接触（TOPCon）及背接触（BC）等高效光伏组件户外长期服役中不可忽视的功率衰减机制之一，对组件寿命与发电收益构成直接挑战。转光胶膜通过光谱下转换将高能紫外光子转换为可见光，在降低到达钝化层紫外通量的同时实现光子再利用，是兼具防护与增益双重功能的 UVID 防护方案，其材料设计已成为高效封装领域的研究热点。本报告围绕 UVID 防护用转光胶膜，结合荧光作用机理，从长期服役可靠性与浓度设计、抗迁移性能以及吸收波段选择等维度，剖析影响防护效果与寿命的关键材料因素，在此基础上总结材料设计与性能调控关键点，为 UVID 防护型封装材料的研究开发与工程应用提供参考。

**关键词：** 紫外诱导衰减；转光胶膜；长期服役；抗迁移

# 面向 TOPCon 一级能效的叠片保护胶研究进展与产业化应用

# Research Progress and Industrialization of Shingling Protection Adhesives for TOPCon Grade-I Energy Efficiency

肖瑞雪

上海回天新材料有限公司

E-mail: xiaoruixue@huitian.net.cn

## 报告摘要

强制性国家标准 GB 47834-2026 将 TOPCon 组件能效划为三级，一级要求转换效率 24.0%、三级准入线 23.2%，行业主流功率恰压准入线，电池端提效性价比又在持续下降，头部企业因此普遍转向多分片叠加负间距的封装端提效路线。但负间距使电池片重叠区域焊带处应力集中，层压与流转中易诱发隐裂乃至碎片，叠片保护胶由此成为该路线规模化的关键一环。

回天自 2024 年起携手业内头部企业联合开发叠片保护胶，已实现光固与热固双体系产业化：两类产品均可在秒级完成固化、匹配串焊机节拍，以更低用胶量实现高防护，并借助成熟的钢板印刷工艺实现稳定量产。依托大量可靠性验证数据与产业化应用实例，本报告将系统分享两类叠片保护胶的研究进展与可靠性表现，并对热固、光固路线的特性与优劣势进行对比分析，帮助客户依据自身产线条件选择适配方案。

关键词：多分片；负间距；电池片防隐裂；热固化&光固化

**Keywords:** multi-cut cells; negative spacing; cell micro-crack prevention; thermal & UV curing

邀请报告

# 钙钛矿组件不同应用场景封装材料的研究

胡修军

苏州赛伍应用技术股份有限公司

E-mail: huxj@cybrid.net.cn

## 报告摘要

本报告围绕钙钛矿光伏技术不同应用场景，开展封装材料体系的研究与分析，结合钙钛矿材料本身的性能特性与应用环境约束，探究适配地面组件及航天太阳翼的封装技术路径。报告对比不同胶膜、防护板材的性能差异，厘清地面与航天场景下材料选用边界，提出对应的产品选型思路、可靠性考核要求以及技术迭代落地建议。针对钙钛矿器件面临的各类环境失效风险，给出一体化材料配套方案，同时梳理现阶段技术尚存的工程挑战，为钙钛矿光伏在地面产业化以及航天领域的后续研发、材料选型提供技术参考与实践指引。

邀请报告

# 毫厘之间的博弈-光伏组件封边绝缘配合深度解读

姚源博

莱茵技术（上海）有限公司

E-mail: angela.yao@tuv.com

## 报告摘要

随着光伏产业的持续演进，主流组件尺寸逐渐标准化，深刻影响了从原材料到生产线的整个供应链。与此同时，2000V 与 3000V 高压组件的不断涌现，以及国家强制性标准的相继出台，使得在确保安全可靠的前提下，合理缩减安全间距以实现降本增效成为行业明确的发展方向。更高功率的组件意味着更强的市场竞争力，而优化安装空间利用率将进一步降低光伏系统整体成本。

本报告围绕层压件内部封边胶、层压件边缘胶带、含金属层背板三种典型应用场景，结合绝缘配合的核心概念——电气间隙、爬电距离与绝缘穿透距离——以及 IEC 61215/61730 等标准要求，系统阐述了各场景下的认证路径与测试方案。通过材料级与组件级双重认证策略，在保障产品安全与长期可靠性的基础上，有效缩小安全距离以提升组件功率输出、降低高压系统成本，从而增强市场竞争力。

# A Game of Millimeters: An In-depth Interpretation of Edge Insulation Coordination for Photovoltaic Modules

**Yuanbo Yao**

TÜV Rheinland (Shanghai) Co., Ltd.

E-mail: angela.yao@tuv.com

## Abstract

With the continuous development of the photovoltaic industry, mainstream module dimensions have gradually become standardized, exerting a profound impact on the entire supply chain from raw materials to production lines. Meanwhile, the increasing emergence of 2000 V and 3000 V high-voltage modules, together with the successive introduction of mandatory national standards, has made the rational reduction of safety clearances a clear industry direction for cost reduction and efficiency improvement, while ensuring safety and reliability. Higher-power modules signify stronger market competitiveness, and optimizing installation space utilization will further reduce the overall cost of photovoltaic systems.

This report systematically presents the certification pathways and test schemes for three typical application scenarios—edge-sealing adhesives used inside laminates, edge tapes applied to laminate edges, and backsheets with an aluminum layer—by integrating the core concepts of insulation coordination (clearance, creepage distance, and distance through insulation) with the requirements of standards such as IEC 61215 and IEC 61730. Through a dual certification strategy at both material and module levels, safety distances can be effectively reduced while ensuring product safety and long-term reliability, thereby enhancing module power output and reducing high-voltage system costs to strengthen market competitiveness.

邀请报告

# 差异化封装胶膜的选型方案探讨

沈　慧

常州斯威克光伏新材料有限公司

## 报告摘要

在竞争日趋白热化的光伏赛道，随着分布式屋顶光伏与 BIPV 进入规模化部署阶段，光伏封装胶膜正跳出单一“粘接封装辅材”的传统定位，迭代为承载高可靠性、安全防护与美学适配多重功能的定制化核心材料。本报告紧扣胶膜功能定制化核心主线，为组件厂商在差异化竞争突围中的封装选型提供可落地的专业解决方案。

在组件高可靠性维度，针对多分片、多主栅等高密度组件的应用需求，我们升级了白色胶膜的抗 PID 性能，同时解决了白色填料降低体积电阻率、易"溢白"等难点，实现高反射率与封装可靠性的双向兼顾。

在安全防护维度，开发的无卤阻燃胶膜，可在大幅降低燃烧过程中的烟毒释放与熔融滴落风险的前提下，保留封装胶膜原有的透光、粘接与耐候核心性能，从容匹配建筑防火法规对组件燃烧性能提出的全新合规要求。

在美学适配维度，推出的光子晶体彩色胶膜解决方案，为“光伏+建筑”一体化场景提供了高性能的美学封装胶膜。

**关键词：**封装胶膜；白色胶膜；抗 PID；阻燃；彩色胶膜；BIPV

邀请报告

# 光伏组件封边材料及复材边框关键性能分析及相关标准解读

曾　鹏

TÜV 南德智慧能源部

E-mail: peng.zeng@tuvsud.com

## 报告摘要

封边材料能够降低水汽渗透、保持粘接并提供绝缘，对组件的电池保护和整体安全具有较好作用。为减小边缘爬电距离，目前主流设计分为层压件外部封边和层压件内部封边；同时也有方案考虑将复材边框整体作为有效绝缘材料，以满足小爬电距离设计。本报告基于最新版 IEC 61730-1 及 IEC 62788-5-1，系统梳理不同封边方式下封边材料的核心指标，以及不同环境应力对其老化性能的影响。同时，结合 IEC TC82/WG2 会议最新讨论结果，分析对复材边框的最新要求；最新版 IEC 61730-1 对复材边框的抗 UV 性能、阻燃性能、环境老化后的阻燃保持性及耐疲劳应力等提出了新要求。

**关键词**：封边材料；复材边框；性能测试；长期可靠性

邀请报告

# 0BB 载体膜技术演进与组件 TC 可靠性浅析

曹明杰，王晓宇

杭州福斯特应用材料股份有限公司

E-mail: mj.cao@firstpvm.com

## 报告摘要

0BB 无主栅技术通过减少银浆使用、降低遮光面积、优化电流传输路径等方式，实现了光伏组件的降本增效。而 0BB 技术主要包含智能网栅（SmartWire）、一体化覆膜（IFC）、点胶、焊接点胶四大技术路线。随着近些年 0BB 覆膜设备、工艺技术以及材料技术的不断成熟，多元化的技术路线逐步收敛，其中载体膜方案逐渐成为主流，广泛应用于 TOPCon、HJT、BC 组件中。本报告将回顾载体膜的技术演进路线，分析不同的电池技术、覆膜设备对于载体膜差异化需求，介绍载体膜选型方案与市场化进展。

在降本增效的同时，组件的可靠性问题不容忽视，0BB 的互联结构与传统焊接差异显著，其焊丝表面的低温焊料与 Ag 细栅只有物理接触，结合强度远低于传统焊接形成的合金化接触，这种全新的结构设计对组件可靠性提出了较大挑战，尤其是高低温循环（TC）。本报告将从简单力学模型出发，结合相关学术文献，分析其失效模式，并阐明载体膜以及封装胶膜在组件 TC 老化过程中起到的关键作用，为载体膜的设计提供思路。

**关键词：**0BB 组件；载体膜；高低温循环；热应力；长期可靠性

邀请报告

# BC 电池材料应用解决方案

刘雨峰，曹明杰，周光大

杭州福斯特应用材料股份有限公司

E-mail: yf.liu@firstpvm.com

## 报告摘要

本报告围绕 BC 电池背面互联、电池表面防护及图形化需求，介绍透明绝缘胶、隔离胶、抗蚀掩膜与电镀铜掩膜四类电池材料，梳理其在电池制造和组件封装中的应用位置、工艺窗口与评价方法。

在绝缘胶方面，比较热固化与 UV 固化体系的固化、绝缘、光学及粘结性能，分析固化光源、热历程、封装结构和胶膜/背板搭配的影响；隔离胶方面，结合喷墨与丝印涂层，讨论印刷成膜、片间防粘、加热后外观及层压兼容性。在抗蚀掩膜方面，介绍丝印成型、耐 HF、尺寸控制和退膜洁净度，并梳理电镀铜掩膜的膜厚、曝光显影、解析与截面形貌。

综合固化程度、透光率、黄变、粘结力及老化等测试结果，报告分析材料性能与生产工艺、封装结构之间的关联，强调材料评价需结合实际使用条件，并将图形质量、粘结稳定性与后续组件工序表现联合验证，为透明绝缘、表面防护、精细图形化及铜金属化相关材料的选型、工艺导入与持续优化提供参考。

**关键词：**BC 电池；工艺适配；可靠性评价

# 新应用场景下的光伏材料适配性挑战和机遇

陈星妤

德国莱茵 TÜV

E-mail: Xingyu.Chen@tuv.com

## 报告摘要

本次演讲围绕中高压光伏系统中，光伏组件边缘密封材料的测试和可靠性评估。边缘密封胶以丁基胶、丙烯酸密封胶、封边胶带为主，兼具水汽阻隔与电气绝缘双重特性。此类材料具有耐候抗老化，可阻断水汽、腐蚀性介质侵入；同时作为加强绝缘材料，有良好的耐热性以及电绝缘性能，能够有效缩短边缘爬电距离，支撑大版型组件在 1500V~3000V 中高压场景下安全应用，助力组件提升功率密度。

# 钙钛矿叠层组件的封装技术研究与可靠性探讨

古文俊

通威股份有限公司

E-mail: liujw08@tongwei.com

## 报告摘要

随着单节晶硅电池效率逐渐逼近理论极限，钙钛矿/晶硅叠层技术凭借突高效优势，成为行业探索下一代高效光伏技术的重要方向。近年来，随着研究的不断深入，钙钛矿叠层技术正逐步从小尺寸向大尺寸迈进，并进一步从电池端的研发延伸至组件端的开发与验证。然而对于叠层电池组件的封装制造与可靠性，仍是当前行业共同面临的探索课题。本报告将围绕低应力封装工艺与封装辅材的协同，缓解外部应力对叠层组件的影响、提升组件的综合可靠性，为叠层电池组件技术的持续进步积累思路与经验。

邀请报告

# 0BB 封装解决方案

吉华建

明冠新材料股份有限公司

E-mail: jihuajian@matcrown.com

## 报告摘要

0BB（无主栅）技术通过取消传统主栅、优化电池互联结构，为降低银耗、提升电池有效受光面积以及无铅化互联提供了新的技术路径，同时也对串接设备的定位精度、材料贴合、张力控制、热压参数、节拍一致性及后续层压兼容性提出了更高要求。0BB 的产业化并非单一材料替换，而是材料、设备与组件工艺的系统协同。本报告围绕明冠皮肤膜在 0BB 封装中的应用，结合串接、铺设、预固定及层压等关键工序，分析皮肤膜结构与性能设计如何匹配 0BB 设备工艺窗口，并重点讨论贴合稳定性、互联结构定位、热工艺适配以及量产良率等关键问题。通过建立材料参数与设备参数之间的协同关系，为不同 n 型电池路线及不同设备方案提供可定制的 0BB 封装解决方案，推动 0BB 封装从单点工艺验证走向稳定、连续和高效量产。

**关键词：**封装材料；0BB 无主栅；皮肤膜；串接设备；工艺适配

# 百佳年代无主栅封装用皮肤膜技术方案对比

韩晓航

常州百佳年代薄膜科技股份有限公司

E-mail: xingyingying@betterial.cn

## 报告摘要

在无主栅封装技术中，皮肤膜作为核心封装材料，其主要的作用是在封装过程中固定焊带位置，保证焊带与电池的充分接触；同时保证组件长期稳定可靠。目前主流的皮肤膜材质为 EVA 和聚烯烃两种；根据使用场景的不同又分为一体膜，覆膜和条膜等多种路线。本报告通过分析不同材料特性和技术方案间的差异，综合对比不同技术路线间的差异，为客户实际应用选型提供一定的技术参考。

# 光伏组件实验室回顾及未来趋势

李凤琦

上海质卫环保科技有限公司

E-mail: fq.li@zealwe.cn

## 报告摘要

本文回顾了目前光伏组件实验室建设情况，介绍了各个国家实验室的特点，预测了未来实验室发展的趋势。

# n 型多分片组件封装胶膜：从封装保护到功能赋能

王　阳

江苏鹿山新材料有限公司

E-mail: wangy@cnlushan.com

## 报告摘要

随着 TOPCon、BC 等 n 型高效电池快速产业化，多分片封装成为主流组件技术路线，电池结构、互连方式变化带来新的封装痛点。本报告分析 TOPCon 多分片与 BC 背接触组件的封装材料需求，阐述 n 型时代胶膜由单纯保护层向功能化材料转变的发展趋势。鹿山新材针对 n 型电池金属腐蚀、PID、薄硅片应力、BC 背电极绝缘等痛点，开发 EPE 共挤、交联 POE、热塑性 POE、黑色美学及光谱调控系列胶膜产品，实现低水透、低析出、可控流动与光学增益。报告展示相关胶膜在 TOPCon 多分片、BC 组件的可靠性测试与量产应用成果，并探讨一体化封装、可回收胶膜等下一代封装材料技术方向，助力 N 型高效组件实现高良率、高功率与长周期稳定运行。

# 适配海上 n 型组件的高可靠封装胶膜技术开发与工程验证

许显，徐蔡宇，蔡均均

中天光伏材料有限公司

E-mail: xucaiyu@ztt.cn

## 报告摘要

海上光伏是我国海洋强国战略下的核心清洁能源赛道，n 型 TOPCon 电池已成为海上组件主流选型。海上高盐雾、高湿强紫外及风浪动态载荷的极端工况，对封装胶膜的阻隔、耐候、粘结性能提出远高于地面电站的严苛要求，行业尚缺少成熟专用方案。

中天科技依托三十余年海洋工程积淀与“材料 - 组件 - 电站”全产业链能力，针对海上 n 型组件封装痛点，研发高可靠专用封装胶膜方案。材料采用多层共挤复合结构，通过交联网络优化提升水汽、盐雾阻隔能力；定制耐候配方体系，引入高效光转组分抵御强紫外，强化胶膜耐水解能力，抑制多因子耦合老化引发的黄变与性能劣化；同时面向 n 型电池优化界面粘结体系，兼顾高粘结强度与抗 PID、抗 UVID 特性。

工程验证层面，中天搭建 “实验室测试 – 组件验证 – 工程工况校验” 全链条验证体系。产品通过双 85、盐雾腐蚀、温度循环等严苛可靠性测试，核心指标优于常规胶膜；配套自研海上专用 n 型组件完成系统适配，落地国内标杆海上光伏项目开展工程验证。依托集团海上风电海洋环境数据库与运维积累，可实现胶膜全生命周期性能评估，保障海上组件 25 年以上稳定服役。

未来中天将持续推进技术迭代，联合产业链完善海上光伏封装标准，赋能产业高质量发展。

**关键词：**海上光伏；可靠性；全链条验证体系

# 光伏组件 UVID 及封装材料应用性能探讨

李光辉

天津利安隆新材料股份有限公司

E-mail: liguanghui@rianlon.com

## 报告摘要

双碳目标引领下，国内光伏产业规模持续扩容，技术迭代加速，各类“光伏+”创新场景落地提速，对封装材料的长效耐紫外稳定性提出更高要求。利安隆作为高分子材料抗老化稳定化方案服务商，深耕光伏封装材料抗老化领域，以“长效耐候、稳定光学、助力组件全生命周期价值”为核心方向，持续为 EVA、POE 等封装胶膜提供定制化 UVID 稳定体系，破解紫外老化引发的胶膜黄变、透光衰减、功率衰减难题，赋能光伏材料可靠性升级。

# 稀土上转换 $NaYF_4:Yb^{3+},Er^{3+}$掺杂 EVA 胶膜对晶硅光伏组件光电性能的影响研究

张孟梅[1]，李雷[2]，冯萍[3]，马彦花[4]，雷凌茜[1]

[1]云南师范大学 能源与环境科学学院

E-mail: 15987050829@163.com

[2]楚雄师范学院 物理与电气能源工程学院

E-mail: solarcell2008@163.com

[3]云南电力试验研究院(集团)有限公司

E-mail: 2872248580@qq.com

[4]云南农业大学 机电工程学院

E-mail: 2013014@ynau.edu.cn

## 报告摘要

针对晶体硅太阳电池近红外波段光谱响应不足，入射光子能量利用率低的问题，本研究将 $NaYF_4:Yb^{3+},Er^{3+}$稀土上转换发光颗粒引入光伏封装 EVA 胶膜中，探究掺杂浓度与胶膜铺设构型对组件光电性能的调控规律。实验制备了多组梯度掺杂浓度的上转换改性 EVA 胶膜，系统表征其光学透过率与上转换发光特性。在此基础上封装四种不同胶膜放置构型的晶硅光伏组件，对比测试组件电学性能参数与外量子效率（EQE）。结果表明，适宜掺杂浓度下胶膜总透过率与纯 EVA 胶膜基本相当。标准光照下，与纯 EVA 胶膜组件相比，含上转换封装胶膜组件的 Pmax 分别提升了 6.6%、8.6%和 9.7%，上下层都含有上转换封装胶膜的电学增益效果最佳。且与标准条件相比，红外光照下，含上转换封装胶膜的组件功率平均提高了 2.55%。$NaYF_4:Yb^{3+},Er^{3+}$通过上转换效应可有效将近红外光转换为硅电池响应敏感的可见光，拓宽组件长波光谱响应。胶膜的不同铺设方式会显著影响组件的短路电流与功率。本研究验证了上转换封装胶膜提升晶硅组件光利用效率的可行性，为光伏封装材料的功能化改性与封装结构优化提供了实验依据。

# 2026 第二十一届中国太阳级硅及光伏发电研讨会

## 22nd China SoG Silicon and PV Power Conference

# 11 月 20 日会议议程

# Nov. 20 Program

邀请报告

# 挑战与破局—未来 5-10 年光伏产业化技术趋势展望

沈文忠

上海交通大学太阳能研究所

E-mail: wzshen@sjtu.eud.cn

## 报告摘要

太阳能光伏行业通过 20 年的快速发展已形成晶体硅太阳电池为绝对主流（98%市场份额）的技术路线，中国光伏、风电绿色能源发展被 Science 杂志评为 2025 年全球十大科技进展第一名。但晶体硅太阳电池多条路线并行（TOPCon、SHJ、xBC），技术迭代快，产线折旧压力大，一旦路线误判，巨额设备投资容易快速贬值。光伏行业的发展特点是适度超前的产业化策略，产业链协同是关键，本报告从产业化角度给出未来 5-10 年光伏产业化主流技术的判断，内容包括：（1）TOPCon、SHJ、xBC 技术融合发展，THBC 引领单结 28%效率晶硅终极技术；（2）钙钛矿/晶硅叠层电池产业化起步，三端叠层构筑效率超 30%新方向；（3）太阳能光伏技术可持续性发展，无银金属化打造新一轮技术跨越；（4）市场化交易推动光伏角色变化，从交流输出转变到稳定供电。希望本报告能对目前从野蛮生长走向高质量发展阵痛转型的光伏行业提供具体而又明确的未来 5-10 年发展思路。

邀请报告

# 新型电力系统构建中虚拟电厂发展的问题讨论

王 进

国合能源研究院

E-mail: wangjin@etib.cn

## 报告摘要

在新型电力系统加速建设背景下，风光装机快速扩张带来消纳压力加大，弃风弃光问题凸显，电网调峰、安全保障等系统运营成本持续攀升，同时绿电呈现发电侧售价偏低、用户侧采购成本偏高的价格错配矛盾。虚拟电厂作为聚合分布式电源、储能、可调负荷的重要调节载体，是破解上述痛点的关键路径。本文梳理国内虚拟电厂的试点实践模式，归纳当前发展堵点：市场主体权责界定不清、辅助服务市场品种不足、收益模式单一、数据与调度协同机制不完善、跨省资源联动存在壁垒等。对比欧盟成熟经验，其通过立法明确聚合商独立市场身份、开放多品类电力市场、建立清晰的价格信号与收益机制，实现需求侧资源深度参与系统平衡。研究提出我国虚拟电厂发展思路：完善市场规则体系，打通源网荷储协同链条，拓宽收益渠道，建立可信调控与数据安全机制，因地制宜分类发展，依托市场化机制充分释放分散调节资源价值，助力新型电力系统安全经济高效运行。

**关键词：**新型电力系统；虚拟电厂；弃风弃光；电力市场；聚合资源

# Issues of Virtual Power Plant Development for Building the New Power System

**Wang, Jin**

Guohe Energy Research Institute

E-mail: wangjin@etib.cn

With the accelerated construction of the new power system, the rapid expansion of wind and solar capacity has intensified accommodation pressure, resulting in rising

curtailment of wind and solar power. Grid operational costs for peak regulation and security keep increasing, while green power faces price distortion: low selling prices for generators and high purchasing costs for consumers. As a flexible resource aggregator integrating distributed generators, energy storage and adjustable loads, the virtual power plant (VPP) provides a vital solution. This paper sorts out China's pilot VPP models and identifies major bottlenecks, including ambiguous legal status of aggregators, limited ancillary service products, oversimplified revenue streams, insufficient coordination of data and dispatching, and inter-provincial transaction barriers. Drawing on EU experience, which clarifies the independent market role of aggregators by legislation, opens diversified electricity markets and establishes effective price signals, this study proposes development pathways for China. It suggests improving market rules, breaking barriers for source-grid-load-storage coordination, diversifying profit models, building reliable control and data security systems, and promoting differentiated VPP deployment, so as to fully mobilize distributed flexibility resources and support secure, economical and efficient operation of the new power system.

**Keywords:** new power system; virtual power plant; wind and solar curtailment; electricity market; aggregated resources

**作者简介：**

王进，经济学博士、教授，现任国合能源研究院院长、新能源国际投资联盟副理事长、中国开发区协会零碳园区专委会主任。获美国埃默里大学（Emory University）经济学博士学位。曾任职于国家计委、国家发改委国际合作中心国际能源研究所，并有美国高校与公共机构教学和研究经历，曾任教于中国人民大学和上海大学。长期深耕能源经济、电力市场、新型电力系统、零碳园区、绿氢与碳中和研究，重点研究源网荷储协同、虚拟电厂、算电协同、能源国际合作等。兼任若干上市公司独立董事，持续参与国内能源政策研究、产业智库咨询与行业论坛研判，输出大量关于石油天然气、新能源、电力市场、碳排放及双碳落地路径的研究观点。

邀请报告

# Tiger Neo 3.0：技术优势深度解析与 TOPCon 平台未来展望

杨东磊

晶科能源股份有限公司

E-mail: slava.yang@jinkosolar.com

## 报告摘要

随着全球清洁能源需求增长，n 型 TOPCon 已成为光伏行业主流技术路线。晶科能源在 HOT4.0 基础上迭代推出全新一代 Tiger Neo 3.0，组件功率与转换效率显著提升，电池稳定性同步增强。将从器件机理与实证数据两个维度解析其技术优势，以弱光表现与双面发电性能为代表，结合全球实证电站数据，量化不同工况下的发电增益；针对地面电站、工商业分布式、户用及水面等场景，展示 Tiger Neo 3.0 产品在实际发电量和系统经济效益上的提升。随后进一步将视角由“产品一代”延伸至“平台一代”，展望 TOPCon 技术平台方向：从硅片端的品质提升，到电池端的钝化升级，再到新结构的延伸。TOPCon 平台既是当前最具性价比的量产技术，也是通向叠层时代的底座平台，n 型并非一代产品，而是一条可持续演进的技术主线。

**关键词：**n 型领先；Tiger Neo 3.0；弱光表现；双面发电；全场景适配

邀请报告

# 全球新能源并网与构网技术白皮书

唐嘉毅

德国莱茵 TÜV

E-mail: Theo.Tang@tuv.com

## 报告摘要

本次演讲聚焦全球新能源并网与构网技术发展趋势，解析高比例新能源背景下电力系统面临的稳定性挑战，重点探讨跟网型与构网型技术演进、全球主要市场并网要求及认证趋势，并结合储能、光伏等典型应用，展望构网技术对新型电力系统发展的关键价值与未来方向。

邀请报告

# 分步式互联：兼顾 BC/TOPCon 多分片串焊的 25% 量产效率解决方案

武宇涛

云上新能源开发（杭州）有限公司

## 报告摘要

2027 年 1 月 1 日开始，针对光伏组件的国家能效强制标准即将全面开始实施。随着电池片转换效率进入瓶颈，只有通过多种组件封装技术的综合导入，才能带来组件能效达到并且超过 24%的一级能效。

目前主流的 BC 组件已经能够普遍达到 24%的一级能效，并且在未来还能迈向更高的 25%转换效率。虽然当前 TOPCon 组件的市场占有率超过 70%，但是，在不进行产线升级的情况下，现有的 TOPCon 组件很难达到 24%的一级能效标准。另外，更主要的是，当前常见的串焊机和封装工艺不同时现兼顾 BC 电池片和 TOPCon 电池片的串焊。然而，BC 组件和 TOPCon 组件分别拥有广大的市场需求，未来也有很长的共存时间。这就给广大组件工厂带来了很大的路线选择难题。

云上新能源开发的分步式串焊机和整体互联封装工艺，不仅能兼顾包括三/四分片在内的各种多分片版型的需求，将 TOPCon 组件功率提升 40-50W 以上，效率达到 25%，也能兼容实现 BC 组件的串焊，同时还能够兼顾 BC 的高温和低温焊接工艺，通过叠加多分片和其他封装工艺，还能带来 BC 组件功率的进一步提升。可以说是目前整个行业内兼容性最强的全面解决方案。

邀请报告

# PE-TBC、晶硅/钙钛矿叠层电池设备技术进展与突破

廖宝臣[1,2*]，王亨[1]，赵龙[1]，胡彬[1]，黎微明[1]

[1]江苏微导纳米科技股份有限公司

[2]南通大学信息科学技术学院

E-mail: baochen.liao@leadmicro.com

## 报告摘要

近年来光伏电池技术迅猛发展，2024 年晶硅电池已完成从 PERC 到 TOPCon 的技术迭代，进一步迈向 XBC、钙钛矿和叠层技术的多元化发展。因此，针对下一代电池技术产业化的设备研发需求迫在眉睫。本报告将分享 PECVD 原位硼掺 PE-ToxPoly(p) 及其 PE-TBC 新技术路线整线集成应用的产业化最新进展与突破。以及 ALD、PECVD、LPCVD、PVD、Laser、EPD 等工艺设备在下一代 TBC、钙钛矿以及叠层电池技术产业化中的最新进展与突破，助力下一代高效电池技术的产业化。

邀请报告

# TCL 中环印刷光刻 TBC 技术研发及产业化进展

宋登元，章康平，李灵芝，李家栋，戴建方

TCL 中环新能源科技股份有限公司

E-mail: d.song@das-solar.com

## 报告摘要

TBC 电池融合 TOPCon 隧穿钝化与背接触 BC 电池结构，消除电池正面金属栅线遮光损失，是新一代高效晶硅电池的重要技术方向。TCL 中环自主研发开发高精度低成本的印刷光刻 TBC 电池图形化工艺，解决传统激光图形化存在对硅片热损伤以及设备投资高的短板。印刷光刻方案复用光伏行业成熟丝网印刷设备体系，能够显著降低产线一次性投资与长期运维成本。该工艺采用原子级腐蚀图形化加工，能够降低对硅片的损伤与载流子复合，提升电池开路电压与光电转换效率，同时依托丝网印刷完成整面图形制备，拥有高的量产产率。

TCL 中环依托 1600 余项 BC 底层核心专利，持续开展印刷光刻 TBC 工艺迭代，大规模生产的 TBC 电池及组件具备高转换效率、优良双面率与弱光响应、抗热斑等性能优势，目前，TBC 电池量产效率达 28%以上，可适配大型地面电站、高端户用屋顶等多元应用场景。此外，TCL 中环与澳大利亚新南威尔士大学开展深度产学研协同创新[1-3]，聚焦 TBC 电池 0BB 金属化设计与热斑可靠性测试方法研究[1-3]，通过大量仿真模拟与实验迭代，优化形成最优 0BB 计方案，并搭建全新的 TBC 组件热斑试验评价方法。目前该 TBC 热斑测试新方法已获得 IEC TC82 立项，有效补齐传统热斑测试方法对 TBC 背接触电池适配性不足的短板，为行业 TBC 高效组件的标准化认证与高质量发展提供技术支撑。

**参考文献：**

[1] Hsiao P C, Zhang K, Zhou Z, et al. Grid optimization of tunnel oxide passivated back contact Silicon Solar Cells. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2026, 34:1037.

[2] Zhang K, Zhou Z, Jiang J Y, Li L, et al. Circuit model-driven investigation of hot-spot behavior in n-type TBC photovoltaic modules. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2026, 299:114179.

[3] Hsiao P C, Zhang K, Zhou Z, et al. Simulation of gap-region cutting for suppressing edge recombination losses in tunnel oxide passivated back-contact solar cells. Solar Energy, 2026, 317:115017.

邀请报告

# TBC 电池金属化研发及产业化进展

鲁伟明，马超，四建方，陈良水

TCL 中环新能源科技股份有限公司

## 报告摘要

银浆成本已上升为 BC 电池从实验室走向大规模量产的决定性障碍。在当前 BC 电池的非硅成本构成中，银浆占比超过 50%，是单项成本最高的材料；2025 年以来白银价格涨幅接近 400%，长期维持在约 2 万元/kg 高位，即便回落至 14,000 元/kg，常规 TOPCon 电池单瓦银浆成本也已攀升至 0.14 元。BC 电池因背面图形结构更复杂、金属化导电更密，银浆消耗量偏高，成本压力较 TOPCon 更为突出，导致其转换效率优势难以转化为终端售价优势，制约了 BC 技术从效率领先向市场领先的转化速度。从资源安全角度看，去银化已超越单纯经济账，上升为光伏产业可持续发展的战略命题：全球白银年产量不足 3 万吨，每年存在约 1 万吨供需缺口，光伏用银占比已从 2020 年的 13%升至 2025 年的 20%且仍在快速上升，即便银价回落，行业仍将面临与其他用银行业争夺资源的局面。因此 BC 电池少银化和无银化成为未来的技术发展趋势。当前中国 BC 龙头企业的少银/去银化路径主要分为四条：细栅+多主栅技术路线是当前最易落地的方案，通过覆膜层压焊、多焊带/多主栅（>30BB）及钢板印刷改进，可将单瓦银浆耗量降至 5mg 以下，甚至 4mg 也已经通过可靠性测试，但降本具有天花板；铜基合金浆料路线以隆基绿能 ACM 技术为标杆，采用纳米阻挡种子层+自研抗氧化铜合金导电层+微米级离散点阵矩阵接触的三层结构，对现有丝网印刷产线高度兼容、资本开支风险低，但面临铜高温扩散与氧化的核心挑战；铜电镀是公认最成熟的零银路线，Maxeon 与爱旭股份已验证其长期可靠性，被定位为 BC 电池未来无银化的优选路线，尤其适用于高端分布式及海外溢价市场；全铝无银路线由中来股份独辟蹊径，以超细铝浆完全替代银浆，背面金属化成本从约 0.2 元/W 降至约 0.02 元/W，但铝电阻率高导致效率损耗大，更适用于对成本极度敏感、对效率要求相对宽松的特定场景。四条路线在技术成熟度、降本幅度、设备投资门槛和长期可靠性方面呈现显著分化，需根据产业化阶段与场景定位选择适配路径。TCL 中环也进行相应的技术开发及储备。

邀请报告

# 喷墨打印装备助力光伏图形化技术发展

刘　旭

常州捷佳创精密机械有限公司

E-mail: leo.liu@chinasc.com.cn

## 报告摘要

本报告聚焦于光伏制造领域图形化装备技术与工艺的创新进展，旨在通过图形化装备技术革新降低太阳电池制造成本，提升电池转换效率，推动产业升级。主要探讨内容或及成果下：如何采用喷墨打印技术替代传统图形化解决方案，并搭配湿法清洗方案的优化升级，实现低成本投入下的提效升级。同时探讨了喷墨设备在 TOPCon、TBC 及 HTBC 高效电池图形化上的应用场景。此外，介绍了喷墨设备在钙钛矿叠层电池的应用，包括一步法和两步法钙钛矿，电子传输层及钝化层均得到有效应用；本报告所涉及技术有望进一步降低图形化路线的成本，提升电池片转换效率，推动行业向更高水平和可持续方向发展。

**关键词：**喷墨打印；图形化；高效电池；钙钛矿

邀请报告

# 热固胶图案化技术在高效晶体硅电池的应用

李鑫建，廖明墩，宋育杰，曾俞衡，王玉明，叶继春

中科研和（宁波）科技有限公司

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

E-mail: yuhengzeng@nimte.ac.cn

## 报告摘要

图案化技术的进步推动了量产型晶体硅太阳电池结构的进步，也实现了效率的提升。开发适应性强、效率高且成本低的图案化技术对高效率晶体硅太阳电池产业技术的发展仍具有重要价值。

目前，行业率先导入的是基于激光的图案化技术。激光图案化技术具有无耗材、精度高、技术相对成熟、已有成功案例等多项优势。然而，激光图案化也存在一些不足：1）激光引入晶格缺陷，易造成效率损失；2）对薄片化硅片的热冲击与机械应力较大，碎片率控制困难；3）设备初始投资高；4）需定期校准，高性能激光器的运营成本较高。

印刷掩膜结合湿法刻蚀的图案化路线具有解决激光技术存在不足的可行性，其优势体现在：1）不产生局部高温冲击，避免热影响区带来的晶格损伤，对薄片化硅片更为友好；2）印刷设备与湿法刻蚀槽的初始投入及维护成本低；3）印刷环节可与现有丝网印刷或喷墨平台兼容，工艺节拍与存量产线衔接平滑，设备改造门槛相对可控。目前市面主要的掩膜材料为光固胶。光固胶的优势在于 UV 固化响应快，有利于控制胶体横向铺展以获得更陡直的掩膜边缘，但需配置紫外光源及配套防护系统，设备复杂度与运行能耗相应增加，厚膜条件下还存在 UV 光穿透衰减导致底部固化不足的问题。

针对上述不足，中科研和联合宁波材料所开发热固胶技术路线，以达到减少设备投入、提升工艺衔接与存量产线适配性等目标。具体来说，热固胶的固化环节可与晶硅电池既有的热工艺体系相衔接，无需引入 UV 专用设备，设备增项更少、工艺集成更简洁；经加热固化后形成致密交联网络，在 HF 刻蚀液中保持掩膜完整，碱液去胶窗口宽、残留风险低。目前，团队取得的主要成果包括：连续印刷栅线笔直、固化时间短、印刷胶在 15% HF 溶液中浸泡数分钟无变化、在 4% NaOH 溶液（50℃）浸泡 10 秒可实现快速去胶，基本满足量产应用的需求。

现有工作表明，热固胶在耐 HF 刻蚀与碱快速去胶方面具备可靠的工艺基础，展现出一定的应用潜力。未来工作将继续聚焦于热固胶固化温度窗口与电池热预算的精确匹配、与不同介质层体系的刻蚀选择比，以及去胶废液的环保处理方案。随着上述问题的逐步解决，预计热固胶图案化路线有望从可行方案走向成熟量产方案，值得产业进一步关注。

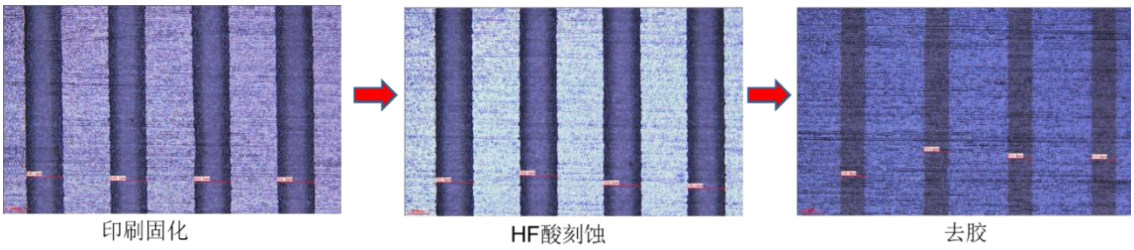



图 1 热固胶图案化技术效果

# BC 组件多维防护可靠性验证体系

杨术龙

莱茵技术（上海）有限公司

## 报告摘要

当前，工商业分布式光伏快速普及，屋顶状况复杂多变，遮挡热斑、风致振动、积灰失配等现实风险，对组件长期安全可靠性能提出严峻挑战。传统标准多聚焦于出厂新品的基础合格判定，难以评估电站运行多年后因不同环境因素叠加的真实服役表现。针对这一行业痛点，TÜV 莱茵跳出单一标准符合性测试思路，不仅核验产品市场准入基础能力，更重点评估产品真实使用过程中的能效表现，同时兼顾不同应用场景的适配能力。整套方案结合老化前置、多应力耦合等创新验证思路，模拟户外真实复杂工况开展环境加严测试，把抽象的光伏安全转化为可量化、可对标的评估依据。

# TBC 电池光刻设备和光刻胶研究进展

吴伟梁，林智威，陈浩，雷凯，张漫江，张震华

江苏光启灵犀装备有限公司

E-mail: darrenliang1990@126.com

## 报告摘要

半导体光刻机经历了 5 代产品发展，主要是提升光刻机所能实现的最小工艺节点，从 g-line、i-line 曝光光源发展到 KrF、ArF 和 EUV 光源。本文主要是研究接近式光刻技术，并制备出适用于光伏的光刻胶和光刻机，并成功应用于 BC（Back contact）和 TOPCon 电池中。光刻胶能够匹配 365、385 和 400 nm 的不同波长光源曝光，通过丝网印刷方式进行涂胶，粘度可调范围 300-30000 mPas，且材料的纯度为 ppb 级，所研发的光刻胶可溶于碱性溶液，不会形成悬浮物粘在溶液中。此外，光伏光刻胶能够实现超快曝光，曝光时间为 0.5 s 内完成固化。

光刻应用于 TBC 电池中，基于尺寸 182.2*105 mm 矩形硅片，实现 p+-poly-Si 线宽平均值 443 um，均匀性小于 1%，线宽极差 5-7 um。对于 n+-poly-Si 图形化，线宽平均值 375 um，均匀性 1.20%，线宽极差 9 um。BC 电池平均效率达到 27.57%，相同图形和相同工艺条件，比激光高 0.12%，其中 $V_{OC}$ 平均值达到 758 mV，$V_{OC}$ 提升 3 mV，单片最高效率达到 27.80%。TOPCon 电池中，采用光刻技术实现电池背面的 poly-Si finger 图形化，40000 片电池平均效率达到 26.71%，$V_{OC}$ 为 749.0 mV，$I_{SC}$ 为 16.02A，$FF$ 为 85.00%，比 baseline 提升 0.19%，其中 $V_{OC}$ 提升 2.9 mV，$I_{SC}$ 提升 0.04 A，$FF$ 提升 0.04%。

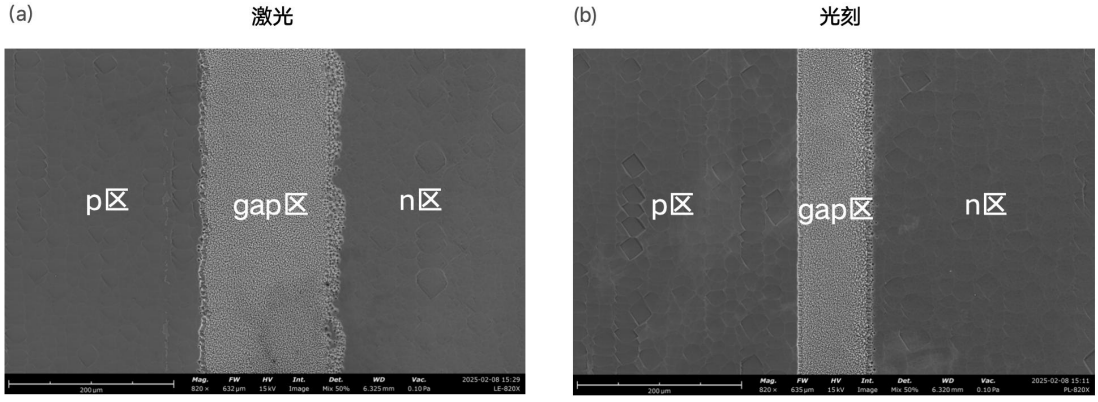



图 1 激光与光刻在 BC 电池，p 区、gap 区和 n 区的 SEM 对比图

邀请报告

# 功能性封装材料在高效组件中的应用

尤　迁

苏州赛伍应用技术股份有限公司

E-mail: youqian@cybrid.net.cn

## 报告摘要

未来随着光伏组件强制性标准及能效等级的施行，组件对初始功率以及可靠性有着更高的要求。不同电池片种类的差异，组件版型的设计以及不同的应用场景，对封装材料的要求各不相同。为了满足当下光伏组件的差异化需求，具有特殊功能的封装材料越来越重要，比如超高透胶膜透光率及折射率更高，可以进一步提升组件的功率，光转胶膜可以将紫外光转成蓝光，可以解决组件 UVID 衰减问题，皮肤膜可以固定焊带及电池片，实现组件低温封装，绝缘胶带可以延长组件的爬电距离，同样尺寸的组件电池片可以排布更多面积，双面淋膜绝缘小条可以满足汇流条和电池片的绝缘要求，高抗 EVA 胶膜具有分散电荷功能，可以解决组件的 PID 问题等等。

**关键词**：高效组件；光转换；超高透；皮肤膜；绝缘胶带

# 0BB-BC 太阳电池 I-V 测试关键技术研究与解决方案

王水威

陕西众森电能科技有限公司

E-mail: wsw@gsola.cn

## 报告摘要

无主栅背接触（0BB-BC）太阳电池的正负电极均位于背面，栅线细化使填充因子（FF）的测量对电流引出位置和电压取样位置更为敏感。由取样位置引入的系统偏差难以通过重复性检验识别，并可能影响效率分档及组件功率评价。本文通过同片对照试验分析不同测试方法对金属化缺陷的响应，结合多分片组件仿真评估电池参数失配的功率损失，并据此设计适用于量产分选的接触式夹具。

同时，为了对比接触式 I-V 测试和非接触式 I-V 测试的差异，对转换效率为 24%～27%的 0BB-BC 样片用两种方法都进行了测量，所得效率平均相差 0.90%。对存在丝网印刷漏浆的样片，PL 图像能够显示缺陷区域，但图像估算结果未能反映接触式测量中观察到的 FF 与效率下降。该结果表明，仅凭缺陷的光学特征估算效率，可能低估金属化异常造成的输出损失。

为了进一步分析分选环节失真对组件功率的影响，通过电学仿真软件对多分片组件进行仿真，结果表明，FF 离散除降低电池片自身功率外，还会产生互连失配损失。对于短路电流偏低的电池，失配片数量相同而串内分布不同时，组件功率损失亦有差异。因此，以分选数据评价组件功率，需同时考虑 FF、短路电流及组件互连结构。

针对上述取样偏差，采用柔性栅条与同极性细栅接触，以开尔文四线法在同一细栅上分别引出电流和采集电压，使测试时的集流条件接近组件互连状态。该方案在重复定位条件下实现了稳定的直接电学测量，可用于产线分选及金属化工艺异常的电性能评价。

# 百佳年代 BC 电池图形化关键材料解决方案

卢颖熠

常州百佳年代薄膜科技股份有限公司

E-mail: xingyingying@betterial.cn

## 报告摘要

背接触式 BC 电池凭借正面无栅线遮挡的优异组件外观、高的转换效率等优势，正逐步成为高效晶硅电池的重要技术路线。其特殊的背面电极结构与图形化设计，对电池的精细加工、表面保护等关键工艺提出了更高要求。

围绕 BC 电池精细图形化的加工工艺需求，我们在光刻胶、刻蚀膏、氢氟酸油墨、正面保护胶及 BC 绝缘胶等系列产品均有布局，通过材料配方与工艺适配，实现精细图形控制、高选择性加工、可靠表面保护，为 BC 电池高效、稳定及规模化制造提供关键功能材料支持。

邀请报告

# TCL 中环 BC 产品优势及多场景价值分析

董　亮

TCL 中环能源科技（江苏）有限公司

E-mail: liang.dong2@tzeco.com

## 报告摘要

TCL 中环以 SunPower 同源高端背接触架构为基础，依托 1600+全链条 BC 专利加持，重新定义了高端 BC 产品，主打全屏高效、低衰长寿、高稳安全、极简美学，精准适配户用高端屋顶、工商业分布式、中小型地面电站全场景，兼顾高发电量与长期可靠性。产品从硅片源头实现深度定制，搭载 G12/G12R BC 专用硅片，轻掺杂少子寿命，低间隙氧含量，从材料底层保障高效率与长期低衰减。电池端采用新一代 TBC 3.0 工艺，集成高精度光刻图形化、高掺杂选择性接触、微导通防热斑设计，图形精度可达±15μm 且无激光热损伤；组件端采用超多栅线+无间隙密排结构，相较常规组件功率密度提升 5%以上，叠加高可靠材料、光转胶膜，有效降低机械损伤及 UV 衰减，全方位保障 30 年超长稳定高效发电。

邀请报告

# TCL 中环 AI 拉晶技术研发及产业化进展

谷守伟，周彦杰，张文霞，郭强，刘有益

TCL 中环新能源科技股份有限公司

E-mail: shouwei.gu@tzeco.com

## 报告摘要

光伏产业当前面临产能过剩、同质化竞争严重的行业困境，AI 是品质、成本、效率兼顾的通用技术，也是差异化竞争的核心路径。直拉单晶（CZ）环节决定硅片电性能指标，对硅片品质起决定性作用，但传统拉晶工艺高度依赖现场操作人员经验，存在数据孤岛、人工干预多、异常响应滞后等瓶颈。TCL 中环依托集团跨产业 AI 平台优势，构建“业务+技术+平台”三位一体联合创新机制，将多模态时序大模型引入拉晶制造全流程，实现从引晶、放肩、等径到收尾各阶段的工艺参数自适应推荐与异常预判，将工程师隐性经验转化为可复用的组织数字资产。在拉晶场景，多源数据融合实现多维感知与趋势预判，通过最优决策与持续学习闭环控制，显著减少人工干预，提升过程一致性与产能；在高价值场景，构建多模态时序预测模型、视频流与视觉非接触感知方案，实现晶体生长全段自主闭环调控，提升晶体生长成功率与一致性。通过 AI 分析智能体，归集工程师工艺经验构建知识图谱，实现断苞分析、炉台诊断推优及良率分析等功能，AI 承接大部分工程师的分析及重复性、统计核算类工作，拉晶管理效率翻倍。目前，该智能拉晶体系已实现产能显著提升、品质一致性显著提升、过程一致性显著提升，年经济效益显著增加，并向能耗优化、设备健康度管理、品质预测等方向延伸，推动拉晶制造从经验驱动向数据驱动、从单台优化向集群智能的范式跃迁，为光伏行业高品质硅片制造的智能化升级提供技术支撑。

# 基于超声技术对光伏组件丁基胶封边工艺质量检测方法介绍

冒巍巍

无锡百士齐光伏科技有限公司

E-mail: bsqsolar@163.com

## 报告摘要

当前丁基胶封边工艺越来越多的被光伏行业各大厂商应用。主要是利用了丁基胶的两大特性，即高阻水性和高绝缘性。对于阻水性，像钙钛矿或者薄膜以及贱金属应用的组件产品都会用到，而阻水性的应用，可以通过宽度来置换工艺质量问题。对于绝缘性有也两个应用：第一个应用是更高的系统电压的光伏组件产品如：2000V 3000V 系统电压的组件产品；第二个应用就是我们现在所说的多分片组件或者是全面屏组件。不同于阻水性，全面屏或者多分片就没有足够的距离来进行丁基胶工艺置换，需要确保在有效的宽度内，就要实现比较高的工艺质量要求。如何验证或者检查改工艺的稳定成立工艺、质量、研发人员的关注重点。根据 IEC61730-1 table3 对于 cemented joints 组件在 1500V 系统电压的情况下标准要求需要有 3.5mm 的有效的距离。该报告向大家介绍和展现了行业全新的通过超声技术的测试解决方案，以解决行业技术人员和三方机构对于丁基胶应用组件产品的工艺质量问题，加快行业技术落地和产品定型。

Invited Talk

# Understanding UV-induced degradation in hybrid back-contact silicon solar cells: the role of $AlO_x$ passivation

**Yihao Zhou, Lilan Wen, Muhammad Umair Khan, Xiaoye Chen, Yuheng Zeng, Shengjie Guan, Jichun Ye, Songyan Yin, Shuo Deng, Yalun Cai, Zichen Wang, Lizhi Sun, Ouyang Zi, Martin A. Green, Xiulin Jiang, Ning Song***

School of Photovoltaic and Renewable Energy Engineering (SPREE), UNSW, Australia

R & D Center, JA Solar Technology Co. Ltd.

Ningbo Materials Institute of Technology and Engineering, CAS

*E-mail: n.song@unsw.edu.au

## Abstract

Ultraviolet-induced degradation (UVID) is an emerging reliability concern for high-efficiency crystalline silicon solar cells, particularly as back-contact (BC) technologies gain increasing industrial attention. However, the underlying degradation mechanisms associated with front-surface passivation in hybrid back-contact (HIBC) solar cells remain insufficiently understood.

In this work, we systematically investigate the UV stability of HIBC solar cells and precursor structures incorporating $SiN_x/AlO_x$ passivation stacks with $AlO_x$ thicknesses of 5, 7, and 10 nm. Following a cumulative UV exposure of 60 kWh $m^{-2}$, thinner $AlO_x$ layers exhibit more pronounced reductions in carrier lifetime, implied open-circuit voltage, and device efficiency, while the short-circuit current density remains largely unchanged.

Combining photoluminescence and electrical measurements with FTIR, ToF-SIMS, and interface characterisation reveals thickness-dependent hydrogen redistribution and interfacial defect generation. Notably, UV exposure increases the magnitude of negative fixed charge in $AlO_x$, yet this does not prevent degradation. Complementary device and interface simulations indicate that the loss of chemical passivation, rather than deterioration of field-effect passivation, dominates the observed performance losses.

These findings highlight the importance of $AlO_x$ thickness in controlling hydrogen-related interfacial changes and provide practical insights into improving the UV reliability of next-generation BC silicon solar cells.

# ＜50mg/片银耗 TBC 组件量产关键技术开发

刘灵芝[1]，朱疆[1*]，刘罗林[1]，谭小春[1]，张 林[1]，邢国强[2]

[1]通威太阳能（成都）有限公司

[2]通威股份有限公司

E-mail: jiangh019@tongwei.com

## 报告摘要

随着银价持续上涨和 TBC 电池降银需求不断增强，电极图形银 PAD 尺寸缩小，传统大粒径锡膏已难以适配低银耗小焊盘印刷，易引发漏印缺锡，导致虚焊率提升和组件长期可靠性下降。基于粒径筛选，本文开发了适用于低银耗 TBC 电池印刷的细粉锡膏，并通过配方优化，改善细粉锡膏印刷坍塌性差、蚀银速率快的问题。结果表明：优化后细粉锡膏印刷高度与传统大粒径锡膏基本一致，坍塌性和虚焊率明显改善。界面蚀银速率减缓 33%，TC400 可靠性试验中组件脱焊率下降 66.17%，功率衰减降低 38.53%。所开发技术可实现＜50mg/片银耗 TBC 电池组件的量产化互连，兼顾成本控制与长期可靠性。

# 喷墨打印技术在高效晶硅电池图形化领域的应用

易　东[1,2]，刘洪江[2]，马跃[2]，黄跃龙[2]，俞　健[1]

[1] 西南石油大学电气信息学院

[2] 湖州鹍火光电有限公司

E-mail: jianyu@swpu.edu.cn

## 报告摘要

随着晶硅光伏技术快速迭代，TOPCon 和 BC 电池因更高理论效率上限和低光衰成为主流技术路线。然而，在 TOPCon 电池 Poly-finger 结构及 BC 电池背面图案化制备中，传统激光开槽/刻蚀易造成硅片局部高温热损伤，损害钝化膜性能并降低载流子寿命；光刻工艺则工序繁琐、掩膜版与耗材成本高，量产速度难以提升。针对上述问题，本研究采用多通道压电喷墨打印技术，结合自主开发墨水，实现 50–500 μm 掩膜宽度可调、均匀性≥95%、量产节拍 0.85 s，并兼容 182/210 mm 半/全片硅片；进一步通过 HF 选择性刻蚀和温和碱脱膜湿法工艺，在常温下完成薄膜选择性去除，从原理上规避激光热损伤，同时利用墨水按需沉积提高材料利用率并替代掩膜版和光刻耗材。结果表明，喷墨路线制备的 Poly-finger 结构 TOPCon 电池电性能优于常规 TOPCon 电池：有效少子寿命提升，暗饱和电流密度（$J_0$）由 11.2 fA/cm$^2$ 降至 7.32 fA/cm$^2$，背面接触电阻由 0.683 mΩ/cm$^2$ 降至 0.45 mΩ/cm$^2$，短路电流密度（$J_{SC}$）由 41.31 mA/cm$^2$ 提升至 41.84 mA/cm$^2$；电池效率较激光路线提升约 0.2%，材料成本较光刻路线降低 0.02 元/W。上述结果表明，喷墨图形化技术在效率、成本、热损伤控制、材料利用和环保方面具有综合优势，在 50–500 μm 特征尺寸场景下是综合性价比最优的降本路线，并为下一代高效晶硅电池及叠层硅基电池的图形化制备提供了应用潜力与产业化路径。

# 低击穿电压 BC 组件热斑测试方法及模拟验证

雷 响，朱 疆，谭小春，龙铭杨，李中兰，张林，邢国强

通威太阳能（成都）有限公司

E-mail: eason.qian@tuv.com

## 报告摘要

BC 电池片正面无栅线结构，串焊过程中焊带与硅片线膨胀系数失配会产生较高热应力。由于热应力与焊接温度呈正相关，行业逐步采用低温锡膏焊接工艺，对组件的热斑温度提出更为严苛的要求。本文采用低击穿电压技术以降低热斑温度，并针对现行 IEC 标准无法准确判定低击穿电压组件最差遮挡工况的问题，基于仿真模型提出了一种改进测试方法。研究表明，此类组件的最差遮挡条件为单片电池 100%遮挡；最高热斑温度降至 114℃，满足低温锡膏工艺要求。实测与仿真偏差小于 2℃（1.75%），验证了模型的准确性。改进测试方法为低击穿电压 BC 组件的热斑风险评估提供了科学依据。

# 非接触效率测试

唐旱波，林豪，高平奇
材料学院，中山大学深圳校区
E-mail: tanghb9@mail.sysu.edu.cn

## 报告摘要

在全球能源结构加速转型的背景下，光伏已成为新增装机规模最大的电源形式。国际可再生能源署（IRENA）数据显示，2023 年全球光伏新增装机约 345.5 GW，2024 年约 400 GW，预计 2028 年将超过 660 GW。中国占据全球 90%以上的光伏产能，但国内需求增长放缓与阶段性产能过剩并存，产业竞争焦点正从“规模扩张”转向“效率提升”和“质量可控”。电池效率的精准、快速、无损表征，是产线降本增效、良率提升和组件功率匹配的核心环节。传统接触式电流-电压（I-V）测试长期以来是效率测量的行业基准，但在高效电池时代面临多重瓶颈，存在碎片率高、产线节拍瓶颈、BC 电池对位困难等突出痛点。光致发光（Photoluminescence, PL）表征技术，通过非接触式外部光激发获取载流子复合信息，无需电极接触即可在硅片、扩散片、钝化片及成品电池的全流程任意环节预测效率，从根本上避免机械损伤、破解产线节拍瓶颈，并为 TOPCon、BC 及未来叠层电池提供统一检测平台。通过多模式 PL 与反射率协同测量系统和物理-数据联合效率预测算法开发的非接触式效率测试有望成为高效 BC 电池测试分选的标准方案。

**关键词：**非接触；*I-V*；光致发光；深度学习

# Non-contact efficiency measurement

**Hanbo Tang , Hao Lin, and Pingqi Gao**
School of Materials, Shenzhen Campus of Sun Yat-sen University

## Abstract

With the accelerating global energy transition, photovoltaics (PV) has become the largest source of newly installed power-generation capacity. According to the International Renewable Energy Agency (IRENA), global PV installations reached approximately 345.5 GW in 2023, about 400 GW in 2024, and are projected to exceed 660 GW by 2028. China accounts for over 90% of global PV manufacturing capacity; however, slowing domestic demand growth coincides with periodic overcapacity, and the industry's competitive focus is shifting from "capacity expansion" toward "efficiency improvement" and "quality controllability." Precise, rapid, and non-destructive characterization of cell efficiency is central to reducing production costs, improving yield, and matching module power on manufacturing lines. Conventional contact-based current-voltage (I-V) testing has long served as the industry benchmark for efficiency measurement, yet in the era of high-efficiency cells it faces multiple bottlenecks, most notably high breakage rates, production line cycle-time constraints, and alignment difficulties for back-contact (BC) cells. Photoluminescence (PL) characterization technology obtains carrier recombination information through non-contact optical excitation, enabling efficiency prediction at any stage of the process chain, from wafers, diffused wafers, and passivated wafers to finished cells, without electrode contact. This fundamentally eliminates mechanical damage, resolves production line cycle-time bottlenecks, and provides a unified inspection platform for TOPCon, BC, and future tandem cells. Combining a multi-mode PL and reflectance co-measurement system with a physics-informed, data-driven efficiency prediction algorithm, non-contact efficiency measurement is poised to become the standard solution for testing and sorting and high-efficiency BC cells.

**Keywords:** Non-contact; *I-V*; Photoluminescence; Deep learning

# 室温 SAM 边缘钝化助力高效BC 组件产业化

张旭宁，陈剑辉，杨欢

河北大学 物理科学与技术学院

E-mail: zhangxn@hbu.edu.cn

## 报告摘要

背接触电池通过将正负电极全部移至背面、彻底消除正面金属栅线遮光， 并把光吸收与载流子收集在空间上分离，成为最具潜力的高效光伏结构之一，近期混合叉指背接触（HIBC）器件的光电转换效率已突破28.29%。在组件制造中，电池分片（cell cutting）是降低串联电阻、优化组件排布的必要工序，工业上普遍采用激光与开裂（L&C）、热激光分离（TLS）等工艺。然而， 分片会暴露未钝化的单晶硅截面，引入晶格损伤与高密度悬挂键，形成强复合中心。既往研究表明，这类切割损伤主要拉低开路电压（$V_{oc}$ ）和填充因子（FF），对$J_{sc}$ 影响甚微；但BC架构下分片后的电流损失究竟如何演变，长期缺乏系统研究，成为制约高效BC 组件量产的一块“盲区”。

针对这一空白，团队将 TOPCon 、SHJ 与 HBC 三种主流电池架构置于同一TLS 工艺下系统对比，并以“新生成边缘面积/电池总表面积”之比 K 作为定量损伤指标。实验观测到一个与传统认知截然不同的现象：TOPCon 与SHJ 电池的Jsc几乎不随K 增大而变化，而HBC 电池的$J_{sc}$ 却随K 上升显著下降，且每新增一条切割边缘，电流损失进一步加剧——这是国际上首次实验观测到激光分片对不同电池架构 $J_{sc}$ 的差异化影响。为弥补这一损失，团队将原本用于钙钛矿电池的自组装单分子层材料2PACz“移植”到硅电池切割边上，消除了BC 电池因正负电极空间分离所导致的横向输运不对称，使整片电池的电流收集重新趋于均匀。首次厘清了BC 架构分片电流损失的内在物理图像，回答了“为何高效背接触电池对切割格外敏感”这一产业关切问题，把行业内长期以 Voc 、FF 变化为主导的切割损耗认知。室温、溶液法、非真空SAM边缘钝化工艺与现有产线兼容，成本低廉、操作简便，对推动BC 电池从实验室高效纪录走向GW级量产具有重要现实意义。

# 基于 TCAD 仿真的硅基太阳电池接触电阻提取模型与物理机制研究

方伟民，林豪，高平奇

材料学院，中山大学深圳校区

E-mail: 15976937291@163.com

## 报告摘要

准确提取接触电阻对于评估高效硅基太阳电池的性能至关重要。作为背接触（BC）电池原位接触电阻测试的核心方法，传统的传输线模型（TLM）在双极性测试结构中面临解析精度失真的问题。我们通过 TCAD 仿真阐明了测试结构内的载流子输运过程，并确定了少子大注入引发的电导调制是导致提取模型失效的物理起源。在此基础上，我们揭示了体区电阻的高度非线性动态耦合行为，指出了传统方法在评估高效光伏器件接触特性时的测试局限性。通过厘清这一微观物理机制，可为未来开发更精确的 BC 电池原位接触阻抗表征技术提供坚实的理论支撑。

**关键词：**太阳电池；接触电阻；电导调制；传输线模型（TLM）；背接触（BC）电池

# Study on the extraction model and physical mechanism of contact resistance in silicon-based solar cells via TCAD simulation

**Weimin Fang , Hao Lin, and Pingqi Gao**

School of Materials, Shenzhen Campus of Sun Yat-sen University

## Abstract

Accurate extraction of contact resistance is important for evaluating the performance of high-efficiency silicon-based solar cells. As the core method for in-situ contact resistance testing of back contact (BC) solar cells, the traditional Transmission Line Model (TLM) faces the problem of analytical distortion in bipolar test structures. We elucidate the carrier transport process occurring within the test structures by TCAD simulation and determine that the conductivity modulation triggered by the high injection of minority carriers is the physical origin of the model's failure. Based on this, we reveal the highly nonlinear dynamic coupling behavior of the bulk resistance and point out the testing limitations of traditional methods in evaluating the contact characteristics of high-efficiency photovoltaic devices. By clarifying this microscopic physical mechanism, reliable theoretical support can be provided for developing more precise in-situ contact resistivity characterization techniques for BC cells in the future.

**Keywords:** Solar cells; Contact resistance; Conductivity modulation; Transmission line model (TLM); Back contact (BC) cells

邀请报告

# 光伏电站 EL 检测与运维增效的创新方案

赵　俊

上海欧普泰科技创业股份有限公司

E-mail: zhaojun@optjt.cn

## 报告摘要

随着光伏行业迈入高质量发展阶段，大规模光伏电站面临运维效率提升、资产风险管控、发电收益优化等现实挑战。欧普泰将组件制造端沉淀的缺陷 AI 识别模型迁移应用至电站检测场景，依托无人机飞控系统与 EL 相机深度集成，实现光伏电站组件级自动化 EL 全检，打破传统电站抽检、盲检的行业局限。

公司以欧泰验检通™、欧能智增通™产品及光伏资产评估服务构建完整解决方案，基于 EL 检测获取的海量组件缺陷数据，开展大数据分析，完成缺陷精准定位与风险研判，驱动运维策略优化。方案打通电站检测、发电增益提升、电站审计到资产交易的业务闭环，助力电站实现发电收益最大化，优化平准化度电成本 LCOE 与系统性能比 PR，延长组件服役寿命，同时为光伏资产评估风险模型输出核心基础数据。未来将持续沉淀行业数据，建立组件缺陷对发电量的影响模型，完善多工况条件下组件性能衰变预测体系，赋能光伏电站全生命周期价值管理。

**关键词：**光伏电站；EL 全检；AI 缺陷识别；运维增效；资产价值管理

邀请报告

# 以评价之力，释创新之能—场景化与功能化评价体系赋能光伏创新价值跃迁

姚明仁

TÜV 南德标准化与可靠性研究院

E-mail: mingren.yao@tuvsud.com

## 报告摘要

随着光伏产业的快速发展，产品创新应用逐渐从性能提升转向场景化与功能化的综合价值体现。场景化评价通过细分应用领域，系统分析光伏产品在不同环境和使用条件下的适配性与经济性；功能化评价则关注组件与建筑、交通、农业等多元场景的耦合性能与增值功能。两者结合可实现对光伏产品创新成果的全周期量化评价，推动设计理念与市场需求的精准匹配。TÜV 南德结合自身丰富的产品检测认证经验以及对产品深入的可靠性研究，整合全产业链应用经验，提出场景化与功能化创新评估方案，赋能光伏创新价值跃迁与多维可持续应用。

**关键词**：场景化评价；功能化评价；创新价值；可靠性

# 高精度实证电站建设运行与实证数据分析

张　磊

通威太阳能（成都）有限公司

E-mail: zhangl077@tongwei.com

## 报告摘要

近年来光伏组件技术蓬勃发展，各类高效组件持续研发落地、加速产业化应用。一款具备市场价值的优质产品，不仅要满足规模化量产条件，更要经受长期户外实证的检验。相较于工况可控、环境单一的实验室模拟测试，户外场景中光照、温度、积灰、光谱等因素动态多变，是检验产品实际性能最有效的手段，也是评估组件真实发电能力的核心标尺。

实证电站的建设与运维是保障数据可信的根基，而实证一致性作为核心准则，贯穿方案设计、工程实施、试验布设、长期运维、数据分析全链条，是实现不同技术路线公平、可靠横向对比的先决条件。

数据分析是实证成果输出的核心载体。实证站点源源不断产生海量多维度原始监测数据，如何从繁杂数据中筛选有效样本、剔除噪声与异常干扰，精准挖掘组件真实性能规律，并形成可溯源、可复现的量化结论，是实证工作价值落地的关键。

通威太阳能光伏技术部技术集成部资深工程师张磊先生将针对高精度实证电站建设运行与实证数据分析做详细介绍。

# 光伏与建筑双重属性下的 BIPV 测试评价思路转变

胡心怡

德国莱茵 TÜV

E-mail: Xinyi.Hu@tuv.com

## 报告摘要

随着 BIPV 产品在幕墙、采光顶等建筑场景中的应用不断拓展，其产品形态、安装方式和功能需求日益多样。与传统光伏组件相比，BIPV 兼具光伏与建筑双重属性，除满足发电性能和电气安全要求外，还需具备与不同建筑用途相适应的产品性能。这对现有测试方法的适用性、评价体系的完整性，以及认证结果与实际应用的衔接提出了更高要求。

本报告将结合国内外 BIPV 标准发展和 2 PfG 2796 最新进展，分析双重属性下 BIPV 测试评价思路的变化，探讨产品用途、性能验证与认证评价之间的关系。相关评价思路可为制造商的产品开发、性能优化和认证规划提供技术支持，并推动 BIPV 产品更好地应用于建筑设计、产品选型和实际工程项目。

# 复合边框组件与跟踪支架系统的兼容性解决方案

赵磊，李其光，侯如钟，许涛

阿特斯阳光电力集团股份有限公司

E-mail: ray1.zhao@csisolar.com

## 报告摘要

玻纤增强树脂复合材料边框可助力光伏组件降低成本及碳排放，已在光伏组件产业中实现规模化应用。但该材料固有的各向异性强度特征，使其在实际应用中受到一定限制，尚无法完全替代传统铝边框。本报告提出复合材料边框组件搭配跟踪支架的设计解决方案，陈述了验证过程及结果。该方案使得复合边框光伏组件能够在跟踪支架场景下规模化快速部署，实现与铝边框光伏组件相同的载荷承载能力、安装效率和长期可靠性，且无需额外人力投入，助力新型边框材料在光伏领域的应用拓展。

邀请报告

# 铝合金铠装光伏电缆在新国标下的应用

康　旺

上海金友金弘智能电气股份有限公司

## 报告摘要

随着光伏电站向规模化及复杂环境应用发展，直流侧电缆的选型需要兼顾电气性能、机械防护与全生命周期成本。GB/T 48188.2—2026《光伏系统用额定电压 1.5 kV 直流电缆 第 2 部分：铝合金导体电缆》的发布，为铝合金导体光伏电缆的产品评价提供了新的标准依据。围绕铝合金导体铠装光伏电缆，结合新国标及其公开项目资料，分析导体性能、绝缘护套与铠装防护的协同设计，探讨其在地面电站、工商业屋顶及沿海光伏固定敷设段的应用条件。铝合金导体与铠装结构具有兼顾轻量化和机械防护的应用潜力，应用中以正式标准和项目技术条件为依据，完成产品验证、附件适配与试点运行评估，为光伏电缆的可靠选型及工程应用提供参考，为大规模光伏电站安全高效运行提供可靠电力传输支撑。

# 光伏电站火灾隐患识别与预防方案

魏慎金

德国莱茵 TÜV

E-mail: Shenjin.Wei@tuv.com

## 报告摘要

围绕光伏电站火灾隐患识别与预防，结合实际起火案例，梳理直流连接器、线缆、拉弧、组件热斑等不同风险等级起火诱因；同时介绍火灾事故分析实施方案，通过现场勘察、数据调取、现场与实验室检测，溯源火灾根源，为光伏电站火灾风险排查、安全运维提供完整技术参考，助力电站防火安全管控。

邀请报告

# 光伏电站直流侧连接安全与全生命周期收益保障

曹伟平

史陶比尔（杭州）精密机械电子有限公司

E-mail: w.cao@staubli.com

## 报告摘要

本报告围绕光伏电站直流侧连接安全，分析连接器失效对电站安全、发电收益及全生命周期成本的影响，指出接触电阻增大及连接质量问题可能引发温升、停机等风险。报告强调，应将连接器视为关键零部件，从产品选型、规范安装到主动运维实施全过程管控，使用配套专业工具，避免不同厂商连接器互插，严禁带负载插拔。同时，报告介绍 MULTILAM 电连接技术及覆盖设计、建设和运维阶段的产品与服务方案，以长期稳定的低接触电阻和专业技术支持，提升连接可靠性，保障电站资产收益。

**关键词：**光伏直流侧连接器；MC4；电站安全；电连接

邀请报告

# 即插即用光伏（PIPV）系统安全要求与合规指南解析

王婷岚

苏州 UL 美华认证有限公司

E-mail: mia.wang@ul.com

## 报告摘要

即插即用光伏（PIPV）为公众使用清洁电力提供了便捷方式，但其接入传统布线系统可能引发安全风险。本文以 UL 3700 为主线，分析 GFCI 兼容性、触电及支路过流风险，并介绍双向 GFCI、专用连接器、输出保护和过流防护方案。同时梳理关键部件认证及附加测试要求，比较美国与欧洲标准的适用范围，为产品设计与认证评估提供参考。

**关键词**：即插即用光伏（PIPV）；UL 3700；GFCI 兼容性；触电防护；过流保护

# Safety requirements and compliance guide for plug-in photovoltaic (PIPV) systems

**Tinglan Wang**

UL-CCIC Company Limited

E-mail: mia.wang@ul.com

## Abstract

Plug-in photovoltaic (PIPV) systems offer the public convenient access to clean electricity, but their connection to conventional wiring systems may introduce safety risks. With UL 3700 as the primary reference, this paper examines GFCI compatibility, electric shock, and branch-circuit overcurrent risks, and presents protective measures including bidirectional GFCIs, dedicated connectors, output protection, and overcurrent protection. It also reviews certification and additional testing requirements for key components and compares the applicability of U.S. and European standards, providing guidance for product design and certification assessment.

**Keywords:** Plug-in photovoltaic (PIPV); UL 3700; GFCI compatibility; Electric shock protection; Overcurrent protection

# 光伏组件热斑机理及户外实验研究

李　璐

通威太阳能（成都）有限公司

E-mail: lil239@tongwei.com

## 报告摘要

热斑效应是光伏组件在遮挡、裂纹或失配条件下因局部电池反向偏置发热而诱发的关键可靠性风险，严重时可导致电池烧毁、封装材料劣化乃至组件失效，是影响电站长期发电性能与安全的重要议题。本文围绕热斑的形成机理、不同组件结构在多种运行条件下的热斑表现，以及户外长期热斑监控数据，开展了系统性的研究。

本文阐述热斑形成原理及其关键影响因素热斑本质为串联支路内受限电池反向耗能产热，其发热水平受电池电学特性、组件串并联结构、遮挡形式以及户外环境条件等多重条件耦合控制。在此基础上，针对不同组件开展户外多工况热斑试验，设置组件短接、MPPT 正常发电两种工作模式，同时采用局部遮挡、短边积灰遮挡两类典型遮挡工况进行对比测试。试验结果表明，分片技术能够有效抑制热斑峰值温度，是缓解热斑风险的有效技术手段；从理论上分析，MPPT 工况下热斑温度应低于短接工况，但受组件内部串并联影响，在并串遮挡分布条件下，MPPT 工况下热斑温度可接近短接工况水平，说明仅依靠工作模式难以完全判定热斑风险等级，遮挡形式与电路的耦合作用不可忽视。为探明遮挡位置组件内部真实温度水平，本文制备内置热电偶的试验组件，同步采集遮挡位置电池本体温度与组件外侧玻璃温度。监测结果显示组件出现热斑时，电池与玻璃之间存在显著温差，电池内部温度远高于玻璃外表面测温值，使得组件劣化破坏比预期更快、更严重，试验中也观测到持续热斑会诱发玻璃爆板、封装胶膜脱层、EL 发黑等典型失效现象，会对组件封装结构造成永久性破坏。综合试验结果可知，分片方案可有效降低热斑峰值温度，而户外遮挡场景复杂，MPPT 工况下依然存在较高热斑隐患，仅依靠结构优化无法完全消除风险，因此还需重视并加强现场运维巡检，及时清除遮挡、积灰等诱因，防范长期热斑带来的组件失效问题。

# 四川盆地低辐照区域光伏发电实证研究

韩　彪[1]，詹俊杰[3]，郭　恒[2,3]，罗　彬[3]，俞　健[1,2,3]

[1] 西南石油大学电气信息学院

[2] 西南石油大学新能源与材料学院

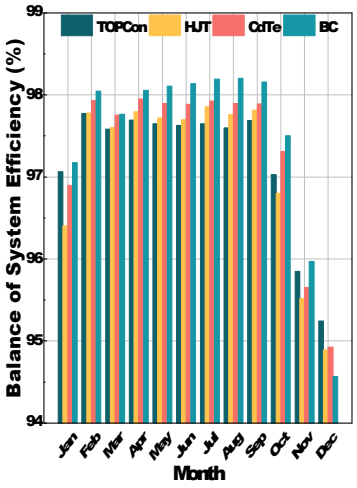
[3] 天府永兴实验室

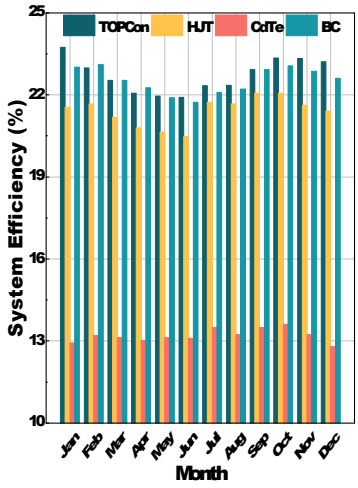
E-mail: jianyu@swpu.edu.cn

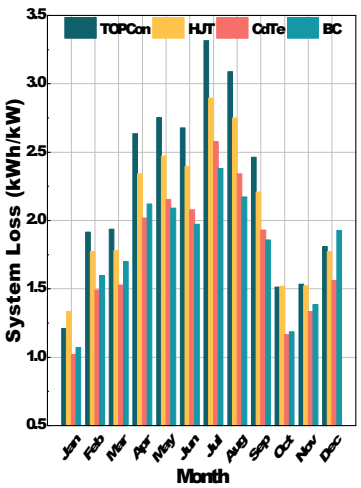
## 报告摘要

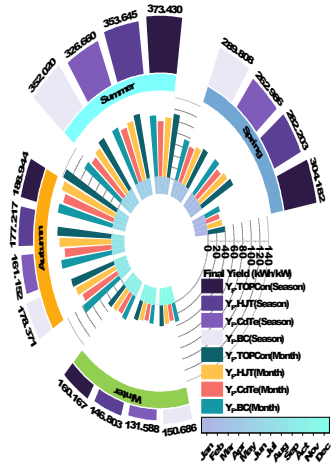
四川盆地属于我国太阳能资源较弱的地区，太阳能资源等级为全国最低（年辐照量＜1050 kWh/m$^2$），多云雾、高湿度、低风速的气象条件对光伏系统的实际运行性能构成严峻挑战。本研究依托一位于成都市的屋顶分布式光伏实证系统，对隧穿氧化层钝化接触（TOPCon）、本征薄膜异质结（HJT）、碲化镉（CdTe）薄膜和背接触（BC）四种技术路线的光伏组件开展了为期一年的连续监测与性能评估。为统一评价基准，以正面阵列面辐照量作为共同归一化依据，将双面组件的背面发电贡献视为系统级差异而非进行单独修正，在此基础上计算了参考产出、阵列产出、阵列捕获损失、阵列效率、系统损耗、系统平衡效率、最终产出、单位面积发电量、容量利用率、性能比和系统效率等指标，并采用平准化度电成本（LCOE）模型对四种系统的经济性进行了评估和单因素敏感性分析。结果表明：TOPCon系统全年性能比达 99.798 %，最终产出为 1027.573 kWh/kW，均居四种技术之首；BC 系统性能比为 93.526 %，最终产出为 971.725 kWh/kW，凭借最高的额定功率密度在单位面积发电量上接近 TOPCon（238.612 kWh/m$^2$ vs 236.832 kWh/m$^2$）；HJT 系统性能比为 92.056 %，在夏季高温时段展现出较优的温度特性；CdTe 系统受限于较低的绝对效率和额定功率密度，性能比仅为 84.706 %，单位面积发电量低至 140.198 kWh/m$^2$。LCOE 分析显示，TOPCon 系统的度电成本最低（0.2539 CNY/kWh），较 BC（0.2680 CNY/kWh）、HJT（0.2718 CNY/kWh）和 CdTe（0.4438 CNY/kWh）分别低 5.26 %、6.59 %和 42.79 %。敏感性分析表明，首年发电量对 LCOE 的影响最为显著，初始投资次之，折现率的影响相对有限，且在±20 %的参数变化范围内四种系统的 LCOE 排序保持稳定。本研究为四川盆地及类似低辐照区域光伏系统的技术选型与投资决策提供了实证依据。

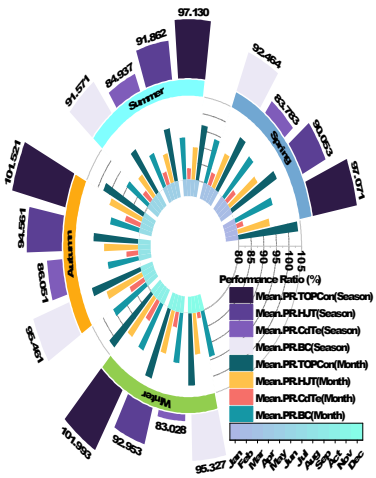
**关键词：** 四川盆地；低辐照；光伏系统；性能分析；经济性分析

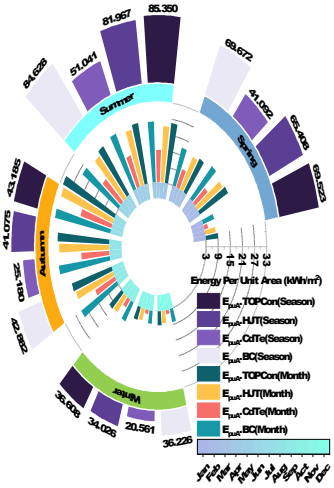

TOPCon
HJT
CdTe
BC
Balance of System Efficiency (%)
99
98
97
96
95
94
Jan
Feb
Mar
Apr
May
Jun
Jul
Aug
Sep
Oct
Nov
Dec
Month


TOPCon
HJT
CdTe
BC
System Efficiency (%)
25
22
19
16
13
10
Jan
Feb
Mar
Apr
May
Jun
Jul
Aug
Sep
Oct
Nov
Dec
Month


TOPCon
HJT
CdTe
BC
System Loss (kWh/kW)
3.5
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
Jan
Feb
Mar
Apr
May
Jun
Jul
Aug
Sep
Oct
Nov
Dec
Month


Summer
Spring
Autumn
Winter
373.430
353.645
326.660
352.089
269.808
283.986
282.203
304.182
188.944
177.217
161.122
178.371
160.167
146.803
131.588
150.686
Final Yield (kWh/kW)
Y_p,TOPCon(Season)
Y_p,HJT(Season)
Y_p,CdTe(Season)
Y_p,BC(Season)
Y_p,TOPCon(Month)
Y_p,HJT(Month)
Y_p,CdTe(Month)
Y_p,BC(Month)


Summer
Spring
Autumn
Winter
97.130
91.892
91.571
84.937
92.464
93.763
90.053
97.071
101.521
94.561
93.051
95.491
101.993
92.953
83.028
95.327
Performance Ratio (%)
Mean.PR.TOPCon(Season)
Mean.PR.HJT(Season)
Mean.PR.CdTe(Season)
Mean.PR.BC(Season)
Mean.PR.TOPCon(Month)
Mean.PR.HJT(Month)
Mean.PR.CdTe(Month)
Mean.PR.BC(Month)

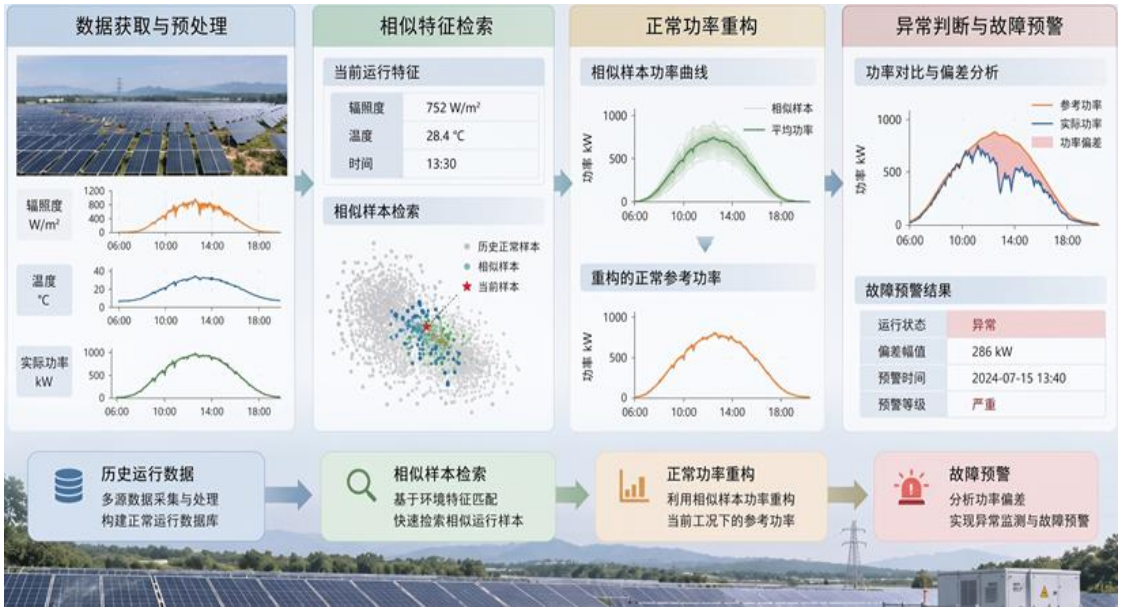

Summer
Spring
Autumn
Winter
85.350
81.957
84.658
51.041
69.672
41.092
65.408
69.523
43.185
41.075
25.190
42.882
36.608
34.026
20.561
36.226
Energy Per Unit Area (kWh/m²)
E_pua,TOPCon(Season)
E_pua,HJT(Season)
E_pua,CdTe(Season)
E_pua,BC(Season)
E_pua,TOPCon(Month)
E_pua,HJT(Month)
E_pua,CdTe(Month)
E_pua,BC(Month)

# 基于相似特征检索的光伏功率预测与故障预警方法研究

陈翔[1]，姜萌[2]，徐俊熙[1]，史博文[1]，丁坤[1]
[1]河海大学机电工程学院
[2]华能国际电力股份有限公司淮阴电厂
E-mail: xiangchen@hhu.edu.cn

## 报告摘要

光伏发电功率受辐照度、温度及天气波动影响显著，准确构建当前工况下的正常参考功率，是实现运行状态监测和故障预警的基础。针对复杂天气条件下光伏功率变化随机性强、不同运行工况预测精度存在差异的问题，本文提出一种基于相似特征检索的光伏功率预测与故障预警方法。首先，根据天气波动特征对历史运行数据进行分类，并以辐照度和温度构建当前工况特征；随后采用快速动态时间规整（Fast Dynamic Time Warping, FastDTW）度量当前样本与历史样本之间的相似程度，结合分层可导航小世界图（Hierarchical Navigable Small World Graphs, HNSW）从历史正常数据中快速检索相似样本，并根据其对应功率重构当前工况下的正常参考功率。在此基础上，计算实测功率与参考功率之间的偏差，并针对稳定与非稳定天气建立差异化异常判据，实现光伏阵列连续故障预警。实验结果表明，所提方法能够较好重构不同天气条件下的正常功率，在故障发生后仍可基于环境特征获得有效参考功率，为光伏电站运行状态监测及后续故障诊断提供可靠的预警依据。



# 德国最新阳台光伏产品安全要求和测试方法

崔　聪

德国莱茵 TÜV

E-mail: Cong.Cui@tuv.com

## 报告摘要

本分享聚焦德国2025年12月最新落地的全球首个阳台光伏整机专属强制标准DIN VDE V 0126-95:2025，面向光伏研发、测试与出海团队，系统拆解800VA功率硬限、3.5A低压馈流、残压泄放、插头匹配、组件防护、并网适配等核心要求，同步梳理标签文件规范与全项测试方法，助力企业快速掌握德国市场准入要求，提前适配欧洲各国后续对标该标准的准入趋势。

# 涂层技术赋能光伏组件在典型应用场景的适应性研究

韩东流

麦加芯彩新材料科技（上海）股份有限公司

E-mail: dl.han@megacoatings.com

## 报告摘要

光伏镀膜液已具备适应不同应用场景的完整产品矩阵，沙戈荒光伏面临风沙的沉降，具备防尘和自清洁能力；海上光伏受高盐雾海风侵蚀，重点提升耐盐雾防腐性能，保障涂层附着力；BIPV 既要实现防护功能，又要严控色差、质感，兼顾建筑美学；极寒地区需耐受冻融循环，涂层具备优异低温柔韧性，低温下不脆裂脱落。海上光伏和极寒等环境，复合边框是最佳选择，GFRP 涂料承担复材边框防腐、抗黄变、绝缘防护作用，抵御户外湿热、紫外、盐雾侵蚀，是保障组件长期可靠性的关键配套材料。各类场景均要求光伏涂料可实现 25 年以上长效耐候，保障组件稳定服役。麦加芯彩依托工业防腐技术积累，产品覆盖组件制造到电站运维全链条，匹配光伏多元化细分需求。

麦加芯彩（603062.SH）为上市高新技术企业，主营海洋装备、新能源、基础设施三大涂料业务：海洋装备板块为全球第二大集装箱涂料供应商，布局船舶海工防腐涂料；新能源板块包含风电防护涂料、光伏系列涂料及储能箱体涂料；基础设施板块提供钢结构重防腐涂料。

**关键词：**减反射镀膜液；多场景光伏；复合边框涂料；耐候性；麦加芯彩

# 全球变化光谱下两端钙钛矿/硅叠层太阳电池的性能挑战

张超[1]，樊华龙[1]，王思平[1]，张磊[1]，刘松民[1]，张林[1]，

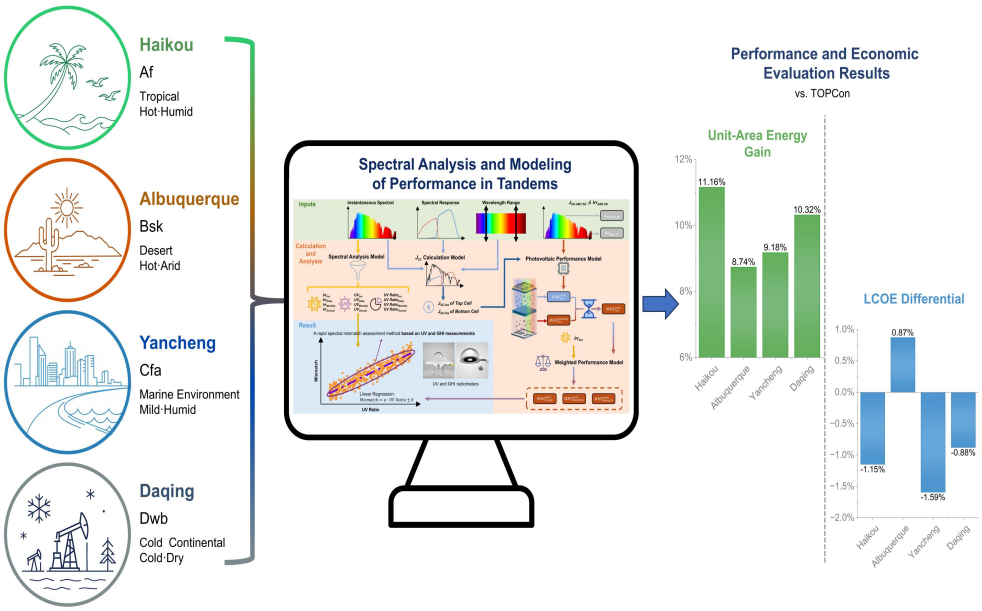
俞健[2,*]，邢国强[1,*]

[1]通威太阳能（成都）有限公司

[2]西南石油大学新能源与材料学院

## 报告摘要

两端（2T）钙钛矿/硅叠层太阳电池效率显著高于单结电池，但其更窄的复合光谱响应和电流匹配约束使其对户外光谱变化尤为敏感。本文开发了自动评估不同气候条件下光伏技术光谱性能的软件工具，结合全球主要光伏应用地区长期户外光谱数据，定量分析了光谱变化对 2T 叠层电池性能的影响。与单结器件相比，叠层电池年光谱失配损失为−3.25%~−0.77%；但凭借更高效率，其单位面积年发电量提高 8.74%~11.16%，度电成本（LCOE）降低 0.87%~1.59%，并可在最优光谱条件下支持最高 7%的组件价格溢价。本文还提出一种仅基于紫外占比（UV ratio）快速评估 2T 叠层电池户外光谱性能的简便方法。



邀请报告

# TOPCon&BC 高效电池核心干法工艺装备—LPCVD&ALD

王晓飞

北京北方华创真空技术有限公司

E-mail: wangxiaofei@naura.com

## 报告摘要

TOPCon&BC 高效电池的竞争核心聚焦转换效率、良率与量产成本，LPCVD、ALD 是电池技改提效关键膜层制备的核心载体。本文结合一线量产痛点，介绍北方华创两款装备在 TOPCon、BC 电池路线中的工艺方案与产业价值。

北方华创 LPCVD 搭载全温场分层控温炉体与深度优化温控算法，温度场控制能力大幅增强，拓宽隧穿氧化层、多晶硅层工艺窗口，工艺均匀性提升 2% 以上；配套多路独立流量计进气方案，在保障工艺适配性的同时显著降低气体消耗；腔室核心耗材升级为 SiC 材质，耐高温、抗腐蚀、工艺兼容性优异，耗材寿命成倍提升，达成工艺稳定性与产线经济性双重突破。

北方华创 ALD 设备通过金属双腔平台和三叠舟载片结构、一级加二级双层匀流系统、六面主加热及辅助加热模块支撑原子级精准沉积，实现运营成本低、维护便捷周期长、更优均匀气场，兼容多种工艺，为 n 型电池产线效率、良率、成本协同优化提供国产化装备支撑。

邀请报告

# 基于 LPCVD 形成的“钝化针孔”：高效率 TOPCon 太阳电池界面解析

张文倩[1]，章康平[2]，白钰骅[1]，张媛媛[1]，杨宽[1]，陈兵兵[1]，杨学良[1]，李家栋[2]，孙亚楠[2]，吴燕[2]，李灵芝[2]，张旭宁[1]，高青[1]，任雨珂[1]，郭静[1]，张璐[1]，杨德华[1]，陈静伟[1]，常萱[1]，刘岩鑫[3, 4, *]，伞星源[1, *]，宋登元[2, *]，陈剑辉[1, *]

[1]河北大学物理科学与技术学院，河北省光伏技术省部共建协同创新中心

[2]一道新能源科技股份有限公司研发部

[3]德国于利希研究中心，IMD-3 光伏研究所

[4]德国亚琛工业大学，JARA 能源联盟与电气工程学院

[*]E-mail: ya.liu@fz-juelich.de; xysan@hbu.edu.cn; d.song@das-solar.com; chenjianhui@hbu.edu.c

## 报告摘要

隧穿氧化层钝化接触（TOPCon）太阳电池有望成为 n 型晶体硅光伏领域的主流技术。氧化硅（$SiO_x$）层中的针孔属于局部结构缺陷，可形成直接导电通路，对器件性能至关重要，但针孔的原子尺度本质问题至今尚未阐明。本文借助球差校正透射电子显微镜，在原子尺度下解析 TOPCon 界面，发现两类截然不同的针孔：一类是复合针孔，形成贫氧硅-硅接触；另一类是此前未见报道的钝化针孔，该类针孔可保留足量氧原子，既能钝化悬挂键，又允许载流子隧穿。钝化型针孔截面尺寸约为 $1.6 \pm 0.2\,\text{nm} \times 1.4 \pm 0.3\,\text{nm}$，面密度达 $2\times10^{12}\,\text{cm}^{-2}$。菲舍尔（Fischer）模型分析表明，决定器件性能的核心因素是针孔的钝化特性，而非几何形貌。基于上述研究结论，制备得到工业级大面积（$333.3\,\text{cm}^2$）TOPCon 太阳能电池，认证效率可达 25.40%，开路电压为 738.7 mV。本研究揭示了 TOPCon 界面的原子级机理，为高效太阳能电池的制备提供直接理论指导。

**关键词：**TOPCon 电池；钝化接触；钝化针孔；球差校正透射电镜

**参考文献：**

[1] Wenqian Zhang, Yuhua Bai, Yuanyuan Zhang, Kuan Yang, Bingbing Chen, Xueliang Yang, Xuning Zhang, Qing Gao, Yuke Ren, Jing Guo, Lu Zhang, Dehua Yang, Jingwei Chen, Xuan Chang, Xingyuan San & Jianhui Chen. Passivating pinholes for large-area and high-efficiency silicon solar cells with tunnel oxide passivated contact [J]. Nature Communications,2026,17:2490.

邀请报告

# 多功能添加剂协同调控结晶与能带对齐构筑 34.28%效率钙钛矿/硅叠层太阳电池

陈司诺[1,2]，杨金利[1,2]，尹文平[4,*]，梁记伟[6,*]，毕恩兵[3,5,*]，周春兰[1,2,*]

[1] 中国科学院电工研究所

[2] 中国科学院大学工程科学学院

[3] 宣城先进光伏技术研究院有限公司

[4] 哈尔滨工程大学物理与光电工程学院

[5] 安徽华晟新能源科技股份有限公司

[6] 武汉纺织大学电子与电气工程学院

[7] 武汉大学物理科学与技术学院

*E-mail: zhouchl@mail.iee.ac.cn

## 报告摘要

针对单结钙钛矿电池效率已逼近其本质极限、两端单片钙钛矿/晶硅叠层电池亟需高质量宽带隙顶电池的背景，宽带隙（~1.68 eV）Br-I 混合卤化物钙钛矿长期受两大耦合难题制约：溶剂快速挥发导致结晶速率过快且失控，产生大量晶界与点缺陷；$I^-$与 $Br^-$迁移动力学及电负性差异诱发薄膜垂直组分梯度，驱动光致卤素相分离，同时钙钛矿/电子传输层界面能级失配进一步阻碍载流子提取。针对上述关键科学问题，本文开展了多功能添加剂协同调控钙钛矿结晶动力学、卤素分布与界面能带对齐的研究，引入二氟草酸硼酸钠 $Na[B(C_2O_4)F_2]$作为前驱体添加剂，其阴离子中草酸根与氟离子可对 $Pb^{2+}$多位点配位；实验设置 0–5.7 mmol $L^{-1}$浓度梯度，并以仅含单一官能团的 $NaBF_4$、$Na[B(C_2O_4)_2]$为对照，构建 p-i-n 单结及活性面积 1.001 $cm^2$的两端单片集成叠层器件。通过原位紫外-可见吸收与光致发光光谱追踪中间相演变，结合 TRPL、XRD、能级表征及密度泛函理论（DFT）电荷密度差分计算，获得了系统性结果：最优添加量 3.8 mmol $L^{-1}$使富溴 $MA_2Pb_3(I/Br)_8\cdot 2DMSO$ 中间相存续时间由 2.58 s 延长至 3.10 s、向α相转变时间由 3.79 s 延长至 4.47 s，为晶粒缓慢生长与 Ostwald 熟化拓宽了动力学窗口，平均晶粒尺寸由 238.81 nm 增至 790.23 nm，(100)择优取向增强（XRD 半高宽由 0.105°收窄至 0.096°），平均载流子寿命由 232.46 ns 提升至 776.51 ns，界面空穴提取时间由 130.93 ns 缩短至 87.21 ns；单结宽带隙钙钛矿太阳电池冠军效率达 23.06%，叠层器件自测冠军效率 34.27%、第三方认证效率达 34.28%（$V_{OC}$=1.974 V，FF=86.22%，$J_{SC}$=20.14 mA $cm^{-2}$，顶/底电池 EQE 积分电流 20.25/20.17 mA $cm^{-2}$，电流匹配良好）；稳态功率输出 34.26%（对照 31.45%），未封装器件在 65 ℃、一个太阳连续最大功率点跟踪 2000 h 后仍保持 93%初始效率（ISOS-L-2），远优于对照组 720 h 即衰减至 90%的水平。机理研究表明：草酸根与氟离子向欠配位 $Pb^{2+}$的电子转移钝化了导带附近的浅能级缺陷；配位延缓脱溶剂化，拓宽卤素离子垂直扩散窗口，从源头消除表面富碘、底部富溴的组分梯度。连续光照下目标薄膜 PL 峰仅由 748 nm 微移至 761 nm 且无相分离肩峰，而对照红移至 785 nm 并在 800 nm 出现肩峰；同时费米能级由-4.35 eV 上移至-4.13 eV，钙钛矿/$C_{60}$导带偏移由 0.43 eV 降至 0.41 eV，界面耗尽区压缩，促进载流子提取。该研究成果在高效率、高运行稳定性钙钛矿/晶硅叠层光伏器件领域具备明确的应用价值，为多功能添加剂分子设计、宽带隙钙钛矿薄膜质量优化及叠层器件产业化提供了重要支撑。

# 钙钛矿/晶硅高效叠层电池的制绒添加剂及绒面对叠层电池的性能影响

贾锐，高治文，李永要，邢瑶，李星

西安交通大学学科交叉研究所半导体光电实验室

E-mail: jia-rui@xjtu.edu.cn

## 报告摘要

近年来，钙钛矿/晶硅叠层太阳电池凭借其高转换效率和产业化潜力，已成为下一代光伏技术的重要发展方向。西安交通大学团队围绕高性能低成本制绒添加剂进行了系统性的研究和开发，通过添加剂对匹配钙钛矿的硅表面金字塔尺寸精准调控，通过研究成功开发出晶硅底电池制绒添加剂，通过添加剂合成研究，金字塔特征尺寸高度可成功地调控在 0.4-0.6μm 及 0.6-0.8μm，并通过一线厂商验证；一线厂商验证表明，可以使得钙钛矿/晶硅叠层太阳电池效率得到有效的提升，叠层电池的效率达到 35%以上。

# 光伏器件失效微观检测分析及案例分享

王绍亮

上海季丰电子股份有限公司

E-mail: shaoliang.wang@giga-force.com

## 报告摘要

季丰新能源光伏检测中心，以微观失效分析为差异化技术能力，针对光伏器件生命周期的典型失效模式，系统介绍了季丰电子以半导体先进检测设备赋能光伏失效分析的方法，通过3D OM、X-RAY、SAT、InGaAs 等设备进行无损定位，FIB 精准制样，并配合冷场/热场 SEM、TEM、EDS、XPS 等设备完成纳米尺度乃至原子尺度的形貌、元素分布与化学态表征，形成“无损定位—微区取样—原子解析—机理溯源”的技术闭环。并分享了行业内典型失效分析案例。

# 汉可超低温 CVD 边缘钝化最新进展

杨　超

江西汉可泛半导体技术有限公司

E-mail: Joe.yang@hactech.cn

## 报告摘要

江西汉可泛半导体技术有限公司基于超低温 CVD 技术研制了用于晶硅电池边缘钝化方案：采用本征 a-Si:H + SiNx:H (or SiNxOy:H) 复合膜层作为钝化膜层，该方案超低温、超短工艺时长、无氧无水，适用于 TOPCon，xBC 和 HJT 等全系列光伏电池，且完美适配行业无银化趋势。该方案具体优点如下：

1、提效高：二分片＞6W，四分片＞11W

2、超低温： ≤200 度，完全兼容未来的纯铜和 xBC 技术；

3、超快速：节拍 7 分钟，工艺时间 3 分钟；

4、大产能 ：四分片 2GW/台；

5、性能好：无绕镀、无粘片、无需退火、无需 NF3、无氧无水；

6、能耗少：电耗/ 特气消耗降低 60%以上，单台一年节省约 50 万元。

**关键词**：超低温 CVD，边缘钝化，晶硅电池

# TBC 高效激光开膜解决方案

欧冠雄

湖州市鹍火光电有限公司

E-mail: ouguanxiong@phoenixolarlaser.com

## 报告摘要

在 TBC 电池的制造过程中，激光技术用于图形化加工，主要是对钝化层进行开窗，通过“激光”+“化学”的方式去掉特定位置的掩膜层，实现 PN 区叉指状的精准制备。激光图形化是当前 BC 技术破局最关键的工艺，也是技术门槛最高的环节之一。BC 电池激光图形化工艺主要是大功率、高精度和低成本三大难题，鹍火针对以上环节提出了可靠的解决方案，实现±10μm 的图形精度、电池效率≥27%、量产节拍达 8000UPH（182*105mm 尺寸），并兼容 182/210 mm 半/全片硅片量产快速切换。定制开发的高功率激光器已全面实现国产化替代，最高功率可达绿光皮秒 150W，紫外皮秒 80W，可对应更大尺寸光斑高速开膜。

# 钙钛矿/硅叠层电池近红外热累积机制：SHJ、TOPCon 与 TBC 底电池的结构-材料驱动产热研究

杨学良*，李凯玥，常萱，史进超，吴蒙蒙，于波，杨欢，高海顺，侯帅航，翁航，陈兵兵*，杨德华，王淑芳，陈剑辉*

河北大学 物理科学与技术学院

E-mail: yangxl1987@hbu.edu.cn; chenbingbing0219@hbu.edu.cn; chenjianhui@hbu.edu.cn.

## 报告摘要

钙钛矿/硅叠层电池光电转换效率已接近 35%，但近红外光引发的热累积问题严重制约器件实际工作稳定性。本文针对产业化主流的三种硅底电池：硅异质结（SHJ）、TOPCon、隧穿氧化层背接触 TBC，系统解析近红外辐照下热积累的结构与材料本源。实验表明，SHJ 因背面绒面延长近红外光程，加之 ITO/a- Si:H 功能层热导率低，稳态温度可达 65.2 ℃，150 ℃条件下光电转换效率损失高达 7.91%；TBC 底电池采用平面背面结构搭配高导热 SixNy/poly- Si 叠层，热堆积最弱，同等条件下效率损失仅 5.86%。IEC 标准热老化加速测试证实 SHJ 器件热致性能衰减最为显著。借助 COMSOL 多物理场仿真，分别对 2T、4T 叠层构型的温度场开展验证；定量分析得到：背面绒面光学效应对温差贡献 55- 65%，功能层热阻贡献 35- 45%。本研究建立面向热管理的底电池选型评价框架，指出平面背面、高导热钝化接触是提升叠层热稳定性的关键，为开发高效、稳定、可产业化的钙钛矿- 硅叠层器件提供重要参考。

# 高性能钝化接触底电池开发及其在两端/三端叠层中的应用研究

杜浩江[1]，丁泽韬[2]，李欢[1]，吴悦悦[1]，杨阵海[3]，邱开富[4]，张骏凯[4]，陈丽萍[4]，应智琴[1]，杨熹[1]，曾俞衡[1]，叶继春[1*]

[1]中国科学院宁波材料技术与工程研究所

[2]捷泰新能源科技有限公司

[3]苏州大学光电科学与工程学院

[4]浙江爱旭太阳能科技有限公司

E-mail: duhaojiang@nimte.ac.cn

## 报告摘要

隧穿氧化层钝化接触（TOPCon）太阳电池凭借其产业化规模与成熟的供应链，是大面积、低成本叠层太阳电池的理想底电池候选者。然而，在高效两端叠层电池中应用 TOPCon 结构仍面临工艺兼容性及光电性能权衡等问题；同时，为了突破电流匹配限制，三端叠层电池的发展对具有背接触特征的底电池提出了更为迫切的设计需求。为此，本研究首先提出并设计了一种背面采用局部 p 型多晶硅接触的双面 TOPCon 底电池结构。通过背面局部多晶硅图形化与非接触区域制绒处理，该结构有效降低了寄生吸收并改善了近红外波段的光学响应，在最佳多晶硅覆盖率下开路电压超过 740 mV。基于该底电池制备的两端钙钛矿/TOPCon 叠层太阳电池实现了 33.91%的光电转换效率（第三方认证 33.53%），并在连续光照 1000 小时后保持 90%以上的初始效率。此外，针对三端叠层电池，本研究探索了背接触底电池的结构设计与三端集成机理，开发了双源表二维矩阵协同扫描测试方法，精确评估了器件的真实输出功率。基于 1.68 eV 钙钛矿的三端叠层初步实现了 29.7%的光电转换效率。本研究为突破硅基底电池的光电瓶颈提供了兼容工业产线的解决方案，有力推动了下一代高效两端及三端硅基叠层技术的规模化应用。

**关键词：**底电池；TOPCon；BC；钙钛矿/硅叠层太阳电池

# Volatile acid doping of PEDOT:PSS enhances photovoltaic performance in organic solar cells

**Xianpeng Meng**

Hebei University, China

E-mail: mengxianpeng176@gmail.com

## Abstract

Poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonate) (PEDOT:PSS) is a widely used hole-transport layer in organic solar cells (OSCs), yet its performance is often constrained by an insulating PSS-rich surface and a high density of interfacial traps that limit charge extraction. Herein, we report a mild interfacial engineering strategy using a volatile acid, bis(trifluoromethanesulfonyl)imide (BisTS), to modulate the surface composition, electronic structure, and interfacial properties of PEDOT:PSS. During film formation, BisTS disrupts the strong electrostatic coupling between PEDOT and PSS chains, inducing a surface reconstruction from a PSSrich to a PEDOT-rich state. This reconstruction reduces surface polarity and lowers the interfacial trap density, as evidenced by X-ray photoelectron spectroscopy and electrical measurements. Meanwhile, the volatile nature of BisTS ensures minimal residual dopant after thermal annealing. Ultraviolet photoelectron spectroscopy reveals an optimized work function alignment with the photoactive layer, facilitating hole extraction. Consequently, BisTS-modified devices achieve a power conversion efficiency of 18.16% with a fill factor of 77.51%, representing a notable improvement over the control device (17.05%). This work establishes volatile acid doping as an effective and residue-free approach for interfacial modulation in organic photovoltaics, offering new insights into the rational design of conductive polymer interfaces

邀请报告

# SHJ 电池技术的发展方向

王文静

中科院电工研究所

华晟新能源公司

## 报告摘要

本文论述了 SHJ 电池的钝化技术在未来的技术发展方向。SHJ 电池采用的非晶硅钝化技术显示出了其在 p 型硅衬底上优异的钝化特性；而采用 TCO 作为导电层又具有可以直接和铜接触的特性，使得铜替代银作为太阳电池的导电材料成为可能。因此在未来 HJT 电池的钝化技术可以在五个方面具有很好的发展发展应用：

1) 地面大规模电站使用的无银双面 n 型 SHJ 太阳电池；
2) 太空应用的 p 型 SHJ 太阳电池；
3) 异质结 BC 电池（HBC）；
4) 混合型的 BC 电池（HTBC）；
5) 钙钛矿/n 型 SHJ 叠层电池。

但是在应用非晶硅钝化技术的时候存在明显的亚稳态现象和低温衰减加剧现象，这也是在未来应用中值得深入研究的问题。

# 可量产的低铟无银异质结

张平会

通威股份有限公司

E-mail: zhangph03@tongwei.com

## 报告摘要

HJT 技术在行业内卷中的突围离不开金属化技术的革新。通威已经实现了浆料印刷与铜电镀两组技术路线的突破：结合低银含浆料、钢网印刷与光子烧结，当前印刷银耗已降至 3.7mg/W；而铜电镀则是完全的无银化技术。通威 HJT 铜电镀组件刷新了功率记录，达到 802.43W，成功突破金属化技术的边界。同时，通威也在积极推进无铟 TCO 材料在 HJT 技术中的应用，并计划于 2026 年底推出低铟、无银的异质结量产方案。

# Material-efficient silicon heterojunction solar cells via integration of silver-lean metallization and indium-reduced transparent conductive oxides

**Lizhi Sun**
University of New South Wales, Australia
E-mail: lizhi.sun@unsw.edu.au

## Abstract

Silver (Ag) metallization and indium-containing transparent conductive oxides (TCOs) are two major material cost contributors in silicon heterojunction (SHJ) solar cells. Although extensive efforts have been devoted to reducing Ag and In consumption separately, their simultaneous implementation and the resulting contact behavior have rarely been investigated. In this work, a systematic study was carried out by combining three front-side TCO architectures, including indium tin oxide (ITO), an ITO/tin oxide ($SnO_X$) bilayer, and pure $SnO_X$, with three metallization systems consisting of Ag, silver-coated copper (Cu@Ag), and silver-coated nickel (Ni@Ag) pastes. A total of nine SHJ cell configurations were fabricated and evaluated. Optical, electrical, and temperature-dependent contact characterizations were performed to understand the interaction between Ag-lean metallization and In-lean TCOs.

The results show that replacing ITO with $SnO_X$ introduces only minor optical differences, while significantly reducing carrier concentration and mobility, resulting in increased sheet resistance and contact-related losses. The ITO/ $SnO_X$ bilayer effectively mitigates the transport barrier associated with direct $SnO_X$ /n-a-Si:H contact. Temperature-dependent transmission line measurements reveal strongly TCO-dependent contact transport behavior. As the carrier concentration of the underlying TCO decreases, thermally activated transport becomes increasingly important, leading to a stronger dependence of contact resistivity on metallization composition. These results indicate that Ag-lean metallization and In-lean TCO substitution should be optimized jointly, with their compatibility governed by coupled interfacial transport behavior.

Combined with Cu@Ag paste, the ITO/$SnO_X$ bilayer achieves 25.62% efficiency with material cost reduction exceeding 65% relative to a conventional Ag-ITO reference. Ni@Ag paste is demonstrated in a high-efficiency SHJ solar cell for the first time, achieving 25.02% efficiency. Device simulations chart a pathway toward enhanced efficiency and additional cost reductions. These findings reveal the coupled interfacial transport mechanisms underlying dual-reduction strategies and provide a design framework for sustainable photovoltaic manufacturing.

**Keywords :** Heterojunction solar cells; Material-efficient strategies; Silver-lean pastes; Indium-lean TCOs

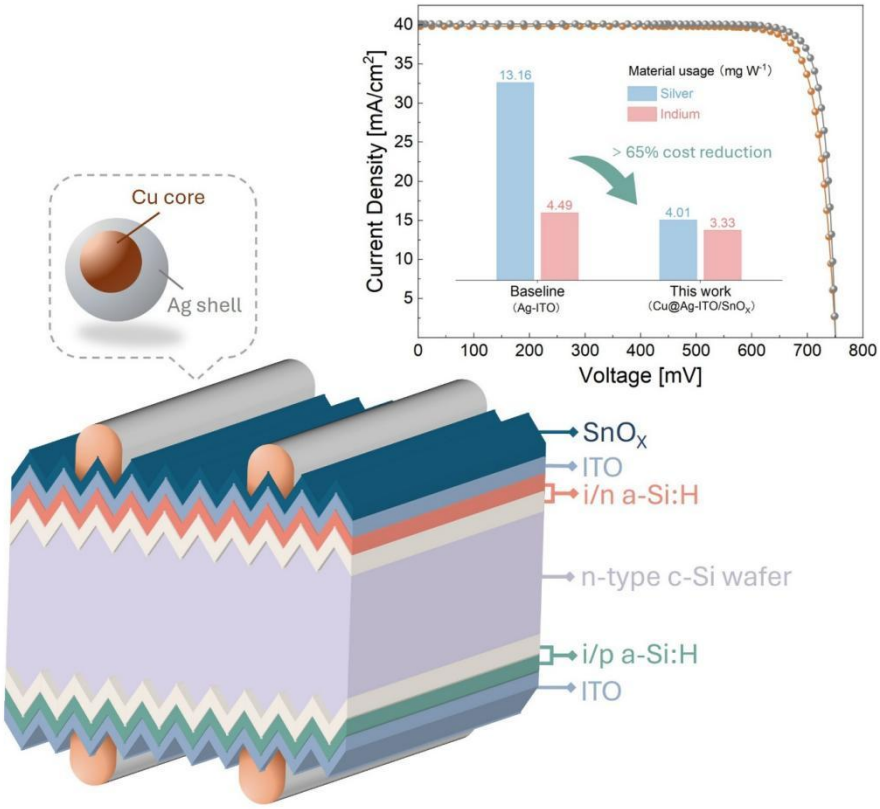



Figure 1. Schematic illustration of the coupled Ag-lean metallization and In-lean TCO strategy for SHJ solar cells. Integrating Ag-lean Cu@Ag metallization with an In-lean ITO/$SnO_X$ transparent conductive oxide maintains high silicon heterojunction solar cell efficiency with only a slight efficiency penalty while reducing material cost by more than 65%. The study highlights the benefits of jointly optimizing metallization and transparent conductive oxide design to reduce both Ag and In consumption.

# 低成本高效硅异质结太阳电池的关键功能层材料研究

邹巧娇，李伟，侯国付，张晓丹*

南开大学

*E-mail: xdzhang@nankai.edu.cn

## 报告摘要

光伏发电是推动全球能源绿色低碳转型的重要技术途径，晶硅太阳电池占据全球光伏市场95%以上的份额。硅异质结（SHJ）太阳电池凭借优异的界面钝化性能和高效率潜力，成为高效晶硅光伏技术的重要发展方向。面向未来规模化发展，降本增效是其技术发展的核心目标。然而，银浆与铟基透明电极的材料成本较高，且传统掺杂非晶层存在寄生光吸收损失及光电性能相互制约等问题，限制了电池效率的进一步提升与低成本规模化制造。围绕上述关键挑战，团队从新型材料开发、功能层光电性能调控及载流子选择性接触优化等方面出发，系统探索了低成本高效SHJ电池的材料设计、界面调控机制与器件集成策略。

针对传统银电极的高成本问题，提出基于氨基酸功能化的MXene电极，通过表面化学键合实现功函数连续调节，结合氢等离子体界面活化策略，获得了效率为24.96%的无银SHJ电池。为降低对稀缺铟资源的依赖，进一步开发了无掺杂氧化锡、钽掺杂氧化锡及氧化镉基等系列无铟材料，实现了无铟SHJ电池25.27%的效率。在降低材料成本的同时，针对窗口层光电平衡与界面钝化之间的制约关系，构建了双层纳米晶硅氧窗口层，实现光电性能的协同优化，推动工业尺寸SHJ电池效率达到26.05%。此外，面向传统掺杂非晶硅接触层的材料与工艺局限，探索了基于金属氧化物的无掺杂选择性接触，为构建低寄生吸收的新型载流子选择性接触提供了新的材料体系与技术路径。

**关键词：**硅异质结太阳电池；降本增效；无铟透明电极；无掺杂选择性接触

# 晶硅异质结电池用氧化锡/电镀铜电极特性研究

王维燕*，张景，倪飞洋，王宣储

浙大宁波理工学院，材料科学与工程学院

*E-mail: wangwy@nbt.edu.cn

## 报告摘要

晶硅异质结电池具有高光电转换效率、低温度系数、高双面率等优势， 是地面光伏电站高效电池组件及低轨空间光伏的重要发展技术之一。然而晶硅异质结电池常规电极材料所用铟、银稀有元素存在储量有限和成本高的问题，成为制约晶硅光伏产业可持续发展的瓶颈。针对上述问题，团队基于高效晶硅异质结电池原型器件，开展了低成本电极材料及技术研发，包括少铟透明电极材料以及电镀铜技术。在前期高电导、高透过率的氧化锡基（SnOx ）透明电极制备技术，以及无籽铜电镀铜界面协同调控研发的基础上，开展 SnOx 透明电极上电镀铜技术研发。通过 SnOx 表面化学键及微纳结构多尺度调控，改善电化学镍种子层及铜电极生长行为，实现电镀 Ni 及 Cu 电极更强的结晶度、更窄界面过渡层、以及更小的内应力，进而实现 SnOx/Ni/Cu 体系优异的界面电学和力学特性。揭示了SnOx/Ni/Cu 体系结构特性和电学力学特性的构效关系。进一步构筑基于 SnOx 透明电极和电化学铜电极的晶硅异质结电池，器件表现出与 ITO 基器件相当的初始效率，同时具有更优异的湿度稳定性。相关研究为少铟透明电极与铜电极技术相结合在晶硅异质结电池中应用提供了理论依据和实验基础。

**关键词：**晶硅异质结电池；氧化锡基透明电极；电镀铜技术

# 少铟少银硅异质结太阳电池的 TCO 层与电极模拟设计研究

李正平*，何光泽，马胜，沈文忠*

上海交通大学太阳能研究所，

人工结构及量子调控教育部重点实验室，物理与天文学院

*E-mail: zpli@sjtu.edu.c; wzshen@sjtu.edu.cn

## 报告摘要

硅异质结（SHJ）太阳电池技术发展迅猛，但是稀有金属铟和贵金属银的资源稀缺性与价格波动，制约了 SHJ 技术的大规模应用。亟需在不显著牺牲光电转换效率的前提下，实现铟、银两种关键材料消耗的大幅度降低。本研究基于 Sentaurus TCAD 光电协同仿真平台，系统设计并优化了一种新型少铟少银 SHJ 太阳电池结构。模拟优化提出了前表面 5 nm ITO / 50 nm 氧化锌铝（AZO） / 5 nm ITO 多层 TCO 堆栈结构，同时为弥补因超薄 ITO 带来的光学损失，在 TCO 堆栈顶层引入 110 nm 氢化氮化硅（$SiN_x$:H）抗反射层（ARC），形成双层抗反射系统；后表面 TCO 采用无铟 70 nm AZO 层。电极方面，前后表面均采用银包铜（Ag@Cu）电极，通过仿真得到优化的电极线宽（25 μm）与铜占比（80%）。协同优化后的 SHJ 电池结构在光电联合仿真中表现优异，模拟转换效率（$\eta$）达到 26.76%（$V_{oc}$ = 754.1 mV，$J_{sc}$ = 42 mA/cm²，$FF$ = 84.49%）。相比传统前后各 70 nm ITO（总厚 140 nm），本方案前 TCO 堆栈总 ITO 用量仅 10 nm，铟消耗降低 90%以上；通过 Ag@Cu 电极（Cu 占比 80%）实现银消耗降低 80%；实现了电池效率与经济性的优化平衡。

**关键词：**硅异质结太阳电池；TCO 多层结构；银包铜栅极；抗反射层

# Simulating Design of TCO Layers and Electrodes for Silicon Heterojunction Solar Cells with Less Indium and Less Silver

**Zhengping Li, Guangze He, Sheng Ma, Wenzhong Shen** *

Institute of Solar Energy, and Key Laboratory of Artificial Structures and Quantum Control (Ministry of Education),School of Physics and Astronomy,

Shanghai Jiao Tong University

* E-mail: zpli@sjtu.edu.cn, wzshen@sjtu.edu.cn

## Abstract

The rapid scaling of silicon heterojunction (SHJ) solar cell manufacturing is constrained by the scarcity and price volatility of indium and silver. In this study, a low-indium and low-silver SHJ cell structure was designed by Sentaurus TCAD optoelectronic simulation. The optimized configuration adopts a front multilayer transparent conductive oxide (TCO) stack of 5 nm indium tin oxide (ITO) / 50 nm aluminum-doped zinc oxide (AZO) / 5 nm ITO with a 110 nm $SiN_x$:H anti-reflection layer, a 70 nm AZO rear TCO layer, and silver-coated copper (Ag@Cu) electrodes with a 25 μm linewidth and 80% copper core ratio. The simulated device reduces indium consumption by 92.8% and silver usage by 80%, while reaching a simulated efficiency of 26.76% (open-circuit voltage $V_{oc}$ = 754.1 mV, short-circuit current density $J_{sc}$ = 42 mA/cm², and fill factor $FF$ = 84.49%). The simulation-guided design integrates optical compensation by $SiN_x$:H, carrier transport through the ultrathin ITO/AZO/ITO stack, and reduced-shading Ag@Cu electrodes, suggesting a feasible route for lowering critical-metal consumption in high-efficiency SHJ solar cells.

**Keywords**：SHJ solar cells; TCO multilayer structure; silver-coated copper electrodes, anti-reflection layer

# 晶硅异质结太阳电池前侧功能层的光电协同设计

李琳，沈文忠*

上海交通大学太阳能研究所，人工结构及量子调控教育部重点实验室，物理与天文学院

*E-mail: wzshen@sjtu.edu.cn

## 报告摘要

透明导电氧化物（TCO）兼具载流子输运、界面载流子选择与光学耦合等功能，是晶硅异质结（SHJ）太阳电池前侧功能层设计的关键。本工作首先以氧流量调控的磁控溅射 ITO 为对象，通过串联电阻分解与 TCAD 模拟分别解析导电输运和界面能带排列对填充因子的影响，并建立双机制拟合模型进行定量评估。结果表明，方阻相关的横向输运总体占主导，而高氧流条件下功函数变化引起的界面能带失配进一步加剧 FF 损失。在此基础上，面向减薄 ITO 前电极引入以 SiON 为核心的可调介质光学层，研究 ITO 厚度、介质层折射率与厚度对光生电流的协同影响。通过将光学模拟得到的电流增益与已有 ITO 电学模型相结合，构建简化的光电协同设计框架，分析 ITO 减薄引起的电学损失与介质光学增益之间的平衡，并评估附加光学自由度对 TCO 电学与光学设计约束的解耦潜力。所构建的光电协同设计框架为统筹 SHJ 前侧功能层的电学输运与光学管理提供了新的分析思路，并为缓解 TCO 电学与光学设计约束、优化前侧功能层结构及提升器件性能提供了设计依据。该方法为统筹 SHJ 前侧功能层的电学输运与光学管理提供了新的分析思路，并为降低前侧结构中电学与光学设计约束之间的耦合、实现面向器件性能的整体优化提供了设计依据。

**关键词：**晶硅异质结太阳电池；透明导电层；填充因子；介质光学层；光电协同设计

# Optoelectronic Co-Design of Front Functional Layers in Silicon Heterojunction Solar Cells

**Lin Li , Wenzhong Shen** *

Institute of Solar Energy, and Key Laboratory of Artificial Structures and Quantum Control (Ministry of Education), School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University

* E-mail: wzshen@sjtu.edu.cn

**Abstract**

Transparent conducting oxide (TCO) serves multiple functions in silicon heterojunction (SHJ) solar cells, including carrier transport, interfacial carrier selectivity, and optical coupling, and are therefore critical to the design of front functional layers. This work first investigates magnetron-sputtered ITO films with oxygen flow rate as the primary process variable. The effects of conductive transport and interfacial band alignment on the fill factor (FF) are separately analyzed through series-resistance decomposition and TCAD simulations, and quantitatively evaluated using a dual-mechanism fitting model. The results show that sheet-resistance-related lateral transport dominates the overall FF modulation, while work-function-induced band misalignment at high oxygen flows leads to additional FF losses. Building on these findings, tunable dielectric optical layers based on SiON are introduced for thinned-ITO front electrodes, and the coupled effects of ITO thickness, dielectric refractive index, and dielectric-layer thickness on photocurrent are investigated. By combining the optical current gain with the established ITO electrical model, a reduced-order optoelectronic co-design framework is constructed to evaluate the balance between the electrical penalty associated with ITO thinning and the optical gain provided by dielectric layers, as well as the potential of additional optical degrees of freedom to decouple the electrical and optical design constraints of the TCO. This work provides a new analytical approach for coordinating electrical transport and optical management in SHJ front functional stacks, offering new insights into reducing TCO electrical–optical coupling and optimizing device performance.

**Keywords**：silicon heterojunction solar cell, transparent conducting oxide, fill factor, dielectric optical layers, optoelectronic co-design

# 低铟/无铟透明导电薄膜研究

何文杰，刘志斌，潘杰俊，黎沛，杨赞禾，丁轶，冯子轩

高仲钰，谭雄辉，陈茵芝，韩灿*，高平奇*

中山大学材料学院

E-mail: hanc3@mail.sysu.edu.cn; gpq3@mail.sysu.edu.cn

## 报告摘要

透明导电氧化物（TCO）是硅异质结等高效光伏器件的关键材料，但太瓦级产业发展使铟资源可持续性问题日益突出。本研究围绕 TCO 降铟与无铟化，开展超薄薄膜生长、低铟靶材设计和无铟材料开发。通过临界成核策略制备 10 nm 铈掺杂氧化铟薄膜，电子迁移率达 108 $cm^2 V^{-1} s^{-1}$，在正面铟用量降低 90%的情况下保持与常规器件相当的效率；设计铟含量减半的 $Zn_3In_2O_6$ 靶材，所得 IZO 薄膜具有接近 $In_2O_3$ 基薄膜的电学性能，并表现出良好的稳定性与界面接触性能；针对无铟 $SnO_2$ 体系，揭示反应粒子数量与能量匹配对薄膜生长的协同作用，并引入 $TiO_x$ 缓冲层改善 *n* 型侧电子接触，使接触电阻率由 154.30 $m\Omega \cdot cm^2$ 降至 5.63 $m\Omega \cdot cm^2$。研究为光伏透明电极的低铟化与无铟化提供了材料、工艺及器件层面的系统解决方案。

# 低紫外透过率锌掺杂氧化铟助力硅异质结电池紫外辐照诱导性能提升

罗云仁，裘陈，时强，孟凡英

中国科学院上海微系统与信息技术研究所

E-mail: luoyr1116@mail.sim.ac.cn

## 报告摘要

硅异质结（HJT）太阳电池凭借高效率、高开路电压、低温工艺及双面发电等优势，成为晶体硅光伏领域的重要发展方向之一，但其在太空及地面环境中面临的紫外诱导衰减（UVID）问题，严重制约了其长期运行的可靠性。紫外辐照会诱导 nc-$SiO_x$:H(n)和 a Si:H(i)层中的部分 Si-H 和 Si-$H_2$ 键断裂，从而造成界面态密度升高和钝化性能的退化。这将造成开路电压和填充因子的下降。本工作采用反应等离子体沉积（RPD）制备了高质量、窄带隙的锌掺杂氧化铟（IZO）薄膜。由于 IZO 薄膜对紫外光子的强吸收能力，其能削减紫外辐照对钝化层的损伤。此外紫外辐照会导致部分 Zn-O 键断裂，促进氧空位形成。这提高了 IZO 的电导率并降低了功函数，从而改善其与 n 型掺杂层的能级匹配，增强电子提取和空穴阻挡能力。采用 IZO 的 HJT 太阳能电池表现出优异的抗紫外辐照能力。在经受 3000 等效太阳小时（ESH）的紫外辐照后，采用 IZO 的电池的功率转换效率显著提高了 4.0%，这主要得益于填充因子提升了 8.4%，与之相比，采用高透过率掺铈氧化铟（ICO）薄膜的 HJT 电池功率转换效率则损失约 5.3%。这些结果表明，IZO 是一种有前景的抗紫外透明导电氧化物，可用于低地球轨道空间应用中的高稳定性的 HJT 太阳能电池。

**关键词：**硅异质结太阳电池；非晶锌掺杂氧化铟；紫外诱导提升；功函数

# 基于 $TiO_2$/ $Zn_xMg_yO_z$ 为钝化接触的晶硅太阳电池研究

钟思华

江苏海洋大学

E-mail: shzhong@jou.edu.cn

## 报告摘要

具有优异钝化性能、载流子选择性、良好透光性、工艺简单且成本低廉的宽禁带材料，已在晶体硅（c-Si）太阳能电池领域引发广泛关注。本研究将介绍通过溶液旋涂制备的 $TiO_2$ 薄膜实现对晶硅表面的优越钝化。在此基础上，提出一种非典型 $Zn_xMg_yO_z$ 纳米复合材料，作为高效且透明的电子选择性接触，该材料通过热蒸镀法依次沉积纳米级 ZnO/Mg/ZnO 堆叠结构而成。通过 Mg 的扩散形成 Zn-Mg-O 复合物，实现兼具高透光性与低功函数特性。当 $Zn_xMg_yO_z$ 复合物与 ITO 覆盖层结合时，可与 n 型 c-Si 形成优异的欧姆接触，接触电阻率低至 11.9 $m\Omega \cdot cm^2$。结合溶液法制备的 $TiO_2$ 薄膜为钝化层和 $Zn_xMg_yO_z$ 复合物为电子选择性接触层，可在 n 型 c-Si 太阳能电池上实现 22.1%的峰值光电转换效率。最终构建的 $TiO_2$/$Zn_xMg_yO_z$/ITO 结构展现出卓越的长期稳定性与热稳定性。值得注意的是，该宽禁带电子选择性钝化接触完全摒弃了对低功函数金属覆盖层的依赖，为开发高性能光伏器件用透明载流子选择性接触层提供了极具前景的策略。

# 基于旋涂 $SiO_2$ 的全面积钝化接触硅太阳电池研究

张　颖

江苏海洋大学

E-mail: zy2629403543@163.com

## 报告摘要

随着晶硅太阳电池向高效率和低成本方向发展，传统钝化接触技术（如TOPCon、SHJ）通常依赖高温或真空工艺，存在成本高、流程复杂等问题。本文围绕低温溶液法制备钝化接触展开，报道了两种旋涂 $SiO_2$ 基钝化接触结构。针对 n 型硅，开发了一步旋涂氮掺杂 $SiO_2$（N:$SiO_2$）薄膜，通过氨水引入 N 掺杂，在 Si/N:$SiO_2$ 界面同时实现化学钝化和场效应钝化，并利用纳米针孔和 Si-N 键促进载流子输运，使 N:$SiO_2$/LiF/Al 电子选择性接触获得 0.366 mΩ·cm$^2$ 的低比接触电阻率；最终 n-Si 全面积钝化接触电池最高效率达 22.54%，$V_{oc}$ 为 671.53 mV，$J_{sc}$ 为 40.35 mA·cm$^{-2}$，$FF$ 为 83.19%。针对 p 型硅，制备了低温 $AlO_x$/$SiO_2$/$MoO_x$ 叠层空穴选择性钝化接触，其中 $AlO_x$ 提供负固定电荷场效应钝化，旋涂 $SiO_2$ 提供化学钝化并抑制水氧渗透和界面互扩散，$MoO_x$ 实现高效空穴提取；器件最高效率达 22.90%，$V_{oc}$ 为 682.39 mV，$J_{sc}$ 为 40.50 mA·cm$^{-2}$，$FF$ 为 82.85%。更重要的是，未封装器件在环境储存 30 天后效率仍保持 93%以上，120°C 退火后仍保持 96%以上，表现出优异的环境稳定性和热稳定性。上述结果表明，旋涂 $SiO_2$ 基钝化接触材料在 n 型、p 型高效晶硅电池及钙钛矿/硅叠层电池中具有低成本、低温、可放大的应用潜力。

**关键词**：旋涂二氧化硅；钝化接触；载流子选择性；晶硅太阳电池

# 高性能多壁碳纳米管/硅太阳电池研究

任雨珂[1]，高青[1]，曹安源[2*]，陈剑辉[1*]

[1]河北大学物理科学与技术学院，先进钝化技术实验室

[2]北京大学材料科学与工程学院，先进防水材料国家重点实验室

[*]E-mail: chenjianhui@hbu.edu.cn; anyuan@pku.edu.cn

## 报告摘要

碳纳米管/硅（CNTs/Si）太阳电池因性能优异、制备工艺相对简单而备受关注。多壁碳纳米管（MWCNTs）合成工艺窗口宽、成本效益高，但其器件效率此前仅达 12.49%，通常被归因于其缺陷密度高于单壁碳纳米管。本研究通过选取浮动催化化学气相沉积（FCCVD）制备的原始 MWCNTs 海绵并对该海绵进行空间识别筛选出高质量的 MWCMTs，实现了 MWCNTs:Nafion/Si 太阳电池 22.74% 的最高效率。研究发现：MWCNTs 海绵的内外两部分与 Nafion 混合后均可均匀分散，但外部 MWCNTs 因含无定形碳与铜杂质，其墨水稳定性明显劣于内部 MWCNTs 墨水（Zeta 电位分别为−9.84 mV 与−34.5 mV，静置 24 h 后外部墨水明显分层）。内部 MWCNTs 与 Nafion 的协同作用使 MWCNTs:Nafion 薄膜具有高功函数（5.52 eV）并对硅表面实现缺陷钝化（少子寿命达 4.42 ms），从而形成有利的能带排列与优异的空穴选择性输运。此外，本工作系统研究了 FCCVD 生长条件（$H_2$流量与碳源流量）对 MWCNTs 形貌、$I_G/I_D$ 比、电导率及器件性能的影响，明确了最优生长窗口（$H_2$ 380 mL/min、碳源 200 μL/min），所制备器件效率均超过 20%，并验证了公斤级导电墨水与工业尺寸器件的可扩展性。本工作挑战了"MWCNTs 高缺陷密度必然限制器件性能"的传统观点，为低成本、高效率碳基/硅太阳电池提供了新思路。

**关键词：**多壁碳纳米管；晶硅太阳电池；浮动催化剂化学气相沉积；空间筛选

# 同型双壁碳纳米管/硅异质结电池

王金云

河北大学物理科学与技术学院

E-mail: 15689663689@163.com

## 报告摘要

碳纳米管/硅（CNT/Si）异质结太阳电池是新一代光伏器件的重要发展方向，但碳纳米管的电子类型（金属性或半导体性）如何影响器件性能这一基本科学问题长期悬而未决。双壁碳纳米管（DWCNT）因内外壁可独立呈现半导体（S）或金属（M）特性，使得这一问题更为复杂。本研究利用凝胶色谱技术分离得到高纯度的同电子型 DWCNT（S@S 和 M@M），并结合 Nafion 有机钝化与掺杂策略，系统对比了不同电子类型 DWCNT 在背结碳/硅异质结太阳电池中的表现。研究发现，Nafion 处理对 S@S 和 M@M DWCNT 薄膜的电导率、功函数及硅界面钝化效果具有显著的电子类型依赖性。进一步的器件物理分析表明，M@M 器件具有更高的内建电势和更低的串联电阻，而 S@S 器件则表现出最低的薄膜内部复合损耗。本研究回答了金属型与半导体型碳纳米管何者更优的长期争议，并为碳基低维接触在高效光伏器件中的应用提供了明确的设计准则。

# 真空互联连续沉积实现高稳定性 $MoO_x$ 基晶硅太阳电池

缪王丰

北京工业大学

中国科学院上海高等研究院

E-mail: miaowf@emails.bjut.edu.cn

## 报告摘要

近年来，免掺杂载流子选择性钝化接触因其低温制备、结构简单以及良好的载流子选择输运特性，在高效晶硅太阳电池领域受到广泛关注。其中，氧化钼（$MoO_X$）具有较高功函数，是一种具有潜力的空穴选择性接触材料，但其环境稳定性、金属元素扩散以及透明导电氧化物沉积过程中产生的界面损伤等问题，限制了器件效率和长期稳定性的进一步提升。针对上述问题，本研究提出真空互联连续沉积与多层界面协同调控策略，构建 p-c-Si/$Al_2O_3$/$MoO_3$/$MoO_2$/ITO/Ag 空穴选择性接触结构。其中，超薄 $Al_2O_3$ 用于降低硅表面复合，$MoO_2$ 缓冲层有效缓解 ITO 磁控溅射过程中高能粒子对 $MoO_3$ 的损伤，ITO 层则作为 Ag 扩散阻挡层以提高界面稳定性。通过 $MoO_2$/ITO 双层界面设计，在改善载流子输运的同时有效抑制界面退化，实现效率与稳定性的协同提升。最终，基于 PERC 半成品电池构筑的 $MoO_X$ 免掺杂空穴选择性接触晶硅太阳电池获得 22.18% 的光电转换效率，其中开路电压为 651 mV、短路电流密度为 41.41 mA/cm2、填充因子为 82.28%；器件在环境中存储 32 天后仍保持初始效率的 95% 以上。该研究为兼顾高效率与高稳定性的过渡金属氧化物选择性接触设计提供了新的界面工程思路。

# 钙钛矿团体标准编制要求

曹松杰

中国国际科技促进会钙钛矿产业分会

E-mail: gtk@ciapst.org

## 报告摘要

作为第三代新型光伏发电技术，钙钛矿无论是实验室效率还是产业化进展都发展迅速。与此相应的钙钛矿电池组件相关标准也快速发展。

在产业发展初期，绝大部分钙钛矿光伏技术的成熟度还不足以形成国家标准及行业标准，团体标准能迅速填补这一领域的空白。

本报告将从国家标准、行业标准、团体标准、地方标准的不同维度介绍钙钛矿相关标准的总体进展，标准编制对于钙钛矿产业发展的巨大推动。本报告还蒋介绍钙钛矿团体标准的编制要求、流程和发展方向。

# 空间用单结钙钛矿太阳能组件标准介绍

周超成

昆山协鑫光电材料有限公司

E-mail: zhouchaocheng@gcl-power.com

## 报告摘要

火箭复用、卫星组网和空间算力加速发展，使高比功率、低成本、可大面积展开的空间电源成为太空基础设施规模化建设的关键。2015 至 2025 年，全球成功入轨火箭由 83 次增至 313 次，入轨载荷由 174 颗增至 4490 颗；算力卫星的单星功率也将由通信卫星的 10 kW 级迈向 100 kW 级。钙钛矿吸收层薄、带隙可调，可在柔性基底上成膜，兼具轻质、可折展和低成本制造潜力；其单结实验室认证效率已达 28.0%，接近晶硅单结水平，并具有较好的辐照耐受潜力，与 3～5 年低轨任务周期和柔性太阳翼需求相契合，有望成为支撑低轨星座及空间算力部署的重要光伏技术。

团体标准《空间用单结钙钛矿太阳能组件》面向以钙钛矿为单一光吸收层、采用刚性或柔性基材的低轨组件，覆盖设计、制造、检测、量产、系统集成及交付全过程。标准规定材料、组件性能和空间环境适应性要求：刚性、柔性组件比功率分别不低于 0.3 W/g 和 0.5 W/g，绝缘电阻不低于 100 MΩ，引出电极抗拉强度不低于 3.4 N/cm；同时对吸收层真空与温度稳定性、封装材料水汽和氧气阻隔性能作出限定。试验体系包括 AM0 电性能、热真空、热冲击、真空紫外、原子氧、1 MeV 电子辐照、随机振动，以及大尺寸柔性组件的正弦振动和 30 kPa 耐压试验，并以功率衰减、绝缘性能、外观和 EL 图像等作为判据。

标准进一步区分 100%逐件交收检验和鉴定检验，明确产品定型、关键材料或工艺变更、停产恢复及批量异常等鉴定触发条件，并对抽样、标识、包装、运输和贮存作出可追溯要求。该标准填补了空间用单结钙钛矿组件专门产品规范的空白，统一了研制、试验和验收口径，可为工程应用控制质量风险，也为后续国家标准制定积累验证数据，推动钙钛矿太空光伏由实验室研究走向批量制造和在轨应用。

**关键词：**钙钛矿；空间光伏；单结太阳能组件；团体标准；低轨卫星

# 超高效钙钛矿/硅异质叠层电池技术及产业化进程

顾小兵

隆基绿能光伏科技有限公司中央研究院

## 报告摘要

钙钛矿/晶硅叠层电池理论效率极限约 43%，是兼具高效率与低成本潜力的叠层技术路线。隆基持续开展技术攻关，在小面积器件上，通过双钝化工艺、异绒面硅电池结构及非对称自组装材料等创新，推动叠层电池效率达到 35.5%；在商业化大面积器件上，通过绒面尺寸设计、组分优化及复合体相钝化，改善钙钛矿薄膜结晶性与均匀性，抑制非辐射复合，实现开路电压突破 2013 mV；面向产业化，开发籽晶法空气制膜技术，实现空气制备叠层电池效率突破 34.3%，突破量产关键技术瓶颈，完成首条 MW 级叠层电池中试线建设，展开叠层电池产业化落地及可靠性研究。

# 钙钛矿电池实验室加速老化和户外实证测试

窦　军

泰德斯科技（江苏）有限公司

E-mail: doujun@tdstek.cn

## 报告摘要

钙钛矿电池具备光电转换效率高、制备成本低、可柔性制备等突出优势，是新一代光伏技术的重要方向。但易受光照、温湿度、紫外等环境因素影响，目前存在离子迁移、相分离等可靠性短板。本文基于 ISOS 标准开展实验室加速稳定性测试，结合户外实证，浅析失效机理与加速关联性，论证两类测试互补价值，并在测试装备技术和测试方法上进行梳理规划，为钙钛矿电池组件可靠性评估提供支撑建议。

**作者简介：**

泰德斯科技（江苏）有限公司是国内高效光伏电池组件实验室测试设备解决方案专业供应商。团队深耕光伏多年，具有大量的光伏实验室设备生产交付和相关测试方法研究经验，是领先的光伏钙钛矿电池测试设备合作伙伴。泰德斯研发并交付使用的钙钛矿综合气候耦合测试系统，通过程序化进行阳光（紫外）、温度、湿度、淋雨等耦合性气候模拟，并原位监测钙钛矿组件的性能变化过程和规律。为实验室加速测试与户外实证测试的拟合研究，加快钙钛矿材料优化选型和封装方案迭代提供有力的测试装备和技术支持。

窦军，泰德斯科技（江苏）有限公司创始人，总经理；具有 20 年光伏行业工作经历，专注于半导体封装测试和光伏测试设备技术开发工作。服务超过 200 家国内外光伏制造企业大学研究机构和多家半导体客户。

# 钙钛矿基多结太阳电池

刘顺畅

电子科技大学

E-mail: sc.liu@uestc.edu.cn

## 报告摘要

摘要：发展光伏太阳能对于应对全球气候变化、推动能源结构转型至关重要，也是当前发展 AI 算力和商业航天的重要基座。当前，新型的钙钛矿太阳能电池、商业化晶硅太阳能电池效率已经逐渐逼近其理论效率极限。通过将不同禁带宽度的光伏材料通过叠加的方式，拓宽器件的吸光范围并降低热驰豫损失，是进一步提升光伏器件效率的最佳手段。本报告具体内容包括：提出多模位锚定新方法，实现了钙钛矿前驱体溶液中甲脒（FA）离子与添加剂的强相互作用，使晶硅基底上钙钛矿薄膜的结晶速率显著降低，获得钙钛矿/TOPCon 叠层电池纪录效率；首次实现了宽带隙钙钛矿晶格中新型类卤素离子的掺杂，显著抑制钙钛矿体相非辐射复合，并成功将其应用于钙钛矿/钙钛矿/晶硅三结叠层太阳能电池，取得27.1%的世界纪录认证效率；针对三结叠层中顶电池制备与中间电池耦合导致重复性差的难题，开发用于超宽带隙钙钛矿的蒸发-溶液混合两步新方法，实现多结叠层电池的稳定、可重复制备，进一步将认证效率提升至 27.5%以上。本报告旨在解决宽带隙钙钛矿的能量损失大和可重复、可扩展制备难题，推动钙钛矿基多结叠层太阳能电池在实验室的性能提升和为其产业化探索提供理论依据和技术基础。

# 人工智能辅助的晶硅/钙钛矿叠层太阳能电池研究进展

马　柱

西南石油大学

E-mail:deve198509@163.com

## 报告摘要

面对晶硅/钙钛矿叠层太阳电池的材料多样、结构复杂、制备繁琐的多重挑战，人工智能可以加速解决上述关键问题，并革新叠层太阳能电池的研究范式。课题围绕钙钛矿材料带隙精准调控与叠层器件性能智能预测两个方向，通过构建基于迭代异常值剔除的梯度提升回归树模型，实现了有机-无机金属卤化物钙钛矿带隙的高精度预测。提出双物理验证约束下的生成对抗网络数据增强策略，突破了小样本场景下的建模瓶颈，为叠层太阳能电池的效率提升与工艺迭代提供了可解释的数据支撑与定量指导。人工智能正从辅助工具迈向研发核心，多元化智能路径并进加速推动叠层电池走向产业化未来。

# 钙钛矿电池吸光层、功能层协同优化及可拓展制备

徐志远

重庆大学

E-mail: zyxu@cqu.edu.cn

## 报告摘要

钙钛矿太阳电池效率虽快速突破，但稳定性与大面积制备仍是产业化关键瓶颈。本报告围绕吸光层组分调控、功能层能级匹配及界面电荷输运三个维度，探讨优化策略。吸光层方面，采用维度工程与添加剂工程调控结晶并钝化缺陷，非辐射复合显著抑制。功能层优化中，通过分别改性电子和空穴传输层，改善能级对齐并降低界面陷阱密度，兼顾高迁移率与疏水性，延缓水氧侵蚀。界面优化方面，在 ETL/钙钛矿与 HTL/钙钛矿界面分别引入修饰层与掺杂层，实现载流子选择性接触，实现载流子提取效率提升，反向复合电流降低。最终，小面积器件获得高效率与优异稳定性，并成功拓展至大面积模组。相关研究为高效稳定钙钛矿电池的理性设计提供了可行路径，加速推动其从实验室走向产业化应用。

# 界面调控提升钙钛矿太阳电池性能

黎　阳

石河子大学

E-mail: 15352730897@163.com

## 报告摘要

钙钛矿太阳电池（PSCs）凭借高光电转换效率、低成本溶液加工与优异弱光适应性，已成为光伏领域极具商业化潜力的新兴技术，但界面非辐射复合损失、钙钛矿薄膜结晶质量不足、器件长期稳定性差等核心瓶颈，严重制约其效率提升与规模化应用。本报告围绕界面调控核心突破口，系统阐述团队在反式钙钛矿电池埋底界面修饰、表面缺陷钝化、空穴传输材料分子设计等方向的研究进展：提出基于 4-丁二醇溴化铵的埋底界面协同修饰策略，通过分子与钙钛矿层形成 Pb-N 配位键钝化未配位 $Pb^{2+}$缺陷、填充甲脒离子空位，同时通过与空穴传输层 PTAA 形成氢键改善界面浸润性与接触质量；结合空穴传输材料侧链工程优化能级排列与电荷迁移能力，多维度协同优化器件性能。围绕钙钛矿太阳能电池稳定性这一核心瓶颈，团队进一步开展多维度延伸研究：一是针对新疆地区干旱、大温差的特殊气候特点，探索无需惰性气体保护的空气中制备高质量钙钛矿薄膜的工艺路径，为适配本地低成本规模化生产提供技术支撑；二是系统梳理钙钛矿电池从材料特性、器件优化到商业化落地的全链条进展，总结空穴传输材料分子设计的核心规律，形成领域系统性综述成果为行业技术迭代提供参考；三是联合企业开展新疆户外条件下太阳能电池组件稳定性研究。相关研究为制备高效稳定的钙钛矿太阳能电池提供了可推广的界面调控思路，对推动钙钛矿光伏技术从实验室走向产业化具有重要参考价值。

# 商用尺寸钙钛矿/晶硅两端叠层太阳电池

毛　霖

电子科技大学

E-mail: maolin@uestc.edu.cn

## 报告摘要

钙钛矿/晶硅两端叠层太阳电池因能突破单结晶硅电池的效率极限，被视为下一代超高效光伏技术的核心路线。其理论效率接近 45%，目前实验室小面积器件转换效率已超过 35.5%。

当前，叠层技术正处于从实验室验证向规模化量产过渡的关键阶段。如何在商用尺寸下持续提升器件效率、完善规模化制备工艺并攻克长期可靠性瓶颈，是实现钙钛矿/晶硅叠层电池商业化应用的核心命题。

邀请报告

# 高效钙钛矿/晶硅叠层太阳电池

刘　江

苏州大学能源学院

E-mail: liujiang@suda.edu.cn

## 报告摘要

为进一步提升光伏器件的光电转换效率，叠层技术已成为光伏领域的重要研究方向。面向硅基叠层的宽带隙钙钛矿薄膜仍存在相分离、界面复合等关键科学问题，与晶硅底电池的集成还面临绒面兼容、结构互连、能级匹配等多重挑战。厘清叠层电池各界面处的电子结构及界面修饰的作用机制，是当前领域亟待攻克的核心问题。本报告将介绍宽带隙钙钛矿场效应—化学协同钝化的结构与作用机制，以及高效叠层器件的构建与光电性能表征等研究进展。面向未来空天极端工况的应用需求，我们开展了超薄晶硅钙钛矿叠层电池关键技术研究，采用缺陷钝化与界面缓冲改性等手段，缓解异质层热膨胀失配引发的界面破坏，抑制非辐射复合与离子迁移，实现器件光电转换效率与极端环境耐受能力的同步提升。

**关键词：**太阳电池；晶硅；钙钛矿；叠层

# High-efficiency perovskite/silicon tandem solar cells

**Liu, Jiang**

College of Energy, Soochow University

E-mail: liujiang@suda.edu.cn

**Abstract**

To further enhance the power conversion efficiency of photovoltaic devices, tandem technology has become a major research direction in photovoltaics. Wide-bandgap perovskite films for silicon-based tandems still face key scientific challenges such as phase segregation and interfacial recombination, and their integration with crystalline silicon bottom cells encounters multiple obstacles in texture compatibility, structural interconnection, and energy-level alignment. Clarifying the electronic structures at the various interfaces of tandem cells and the underlying mechanism of interfacial modification is therefore a critical issue to be addressed. This presentation will introduce the structure and mechanism of field-effect–chemical synergistic passivation in wide-bandgap perovskites, as well as research progress on the construction and optoelectronic characterization of highly efficient tandem devices. To meet the application demands of extreme working conditions in future aerospace applications, we have carried out key technological research on perovskite/ultra-thin crystalline silicon tandem solar cells. Through defect passivation and interfacial buffer modification, we alleviate interface damage induced by the thermal expansion mismatch between heterogeneous layers and suppress non-radiative recombination and ion migration, thereby achieving simultaneous improvements in power conversion efficiency and tolerance to extreme environments.

**Keywords:** Solar cell; Crystalline silicon; Perovskite; Tandem

**个人简介：**刘江，苏州大学特聘教授，博士生导师，入选国家高层次领军人才、国家级青年人才、江苏省双创团队领军人才、江苏省杰青等人才计划。从事先进光伏材料与器件研究已 18 年，在光伏新材料开发、高效率器件构建与柔性集成、器件光电模拟等研究方面已具有丰富的经验与成果积累。相关工作曾首次突破了单结光伏器件肖克利-奎塞尔（S-Q）理论极限，多次刷新了钙钛矿/晶硅叠层电池的转换效率纪录，首次构筑了 30%效率的全硅片尺寸的柔性晶硅/钙钛矿叠层器件。相关成果入选了 2025 年度“中国科学十大进展”（进展十）。作为项目负责人主持国家重点研发计划课题，国家自然科学基金青年基金、面上项目、省重点研发计划等 10 余项科研项目。已在 Science（1 篇通讯）、Nature（四篇通讯）、Nat. Mater.、Nat. Photonics、Joule 等期刊发表 SCI 论文 80 余篇，多次担任 Science、Nat. Energy、Nat. Mater.、Nat. Photonics 等期刊的审稿人。

邀请报告

# 钙钛矿/晶硅叠层电池产业化关键技术攻关

李子佳

正泰新能科技股份有限公司

E-mail: zijia.li@astronergy.com

## 报告摘要

传统晶硅电池的转换效率已逼近理论极限，依靠常规工艺优化实现提效降本的空间越来越有限。钙钛矿/晶硅叠层电池利用宽窄带隙材料的光谱互补特性，显著降低热化损耗，成功突破单结晶硅的效率瓶颈，小面积认证效率已超过 35%，被业界视为下一代光伏的核心技术方向。目前主流路线分为钙钛矿/HJT 与钙钛矿/TOPCon 两条：HJT 路线受大尺寸绒面制约，溶液法难以实现均匀成膜；TOPCon 路线则需先行去除 $SiN_x$钝化层，叠层制备的难度随之上升。正泰新能采取双线并行的研发策略，小面积钙钛矿/HJT 与钙钛矿/TOPCon 叠层电池的认证效率分别达到 33.34%和 33.90%，210mm 全尺寸叠层电池效率为 29.5%，并正加快推进中试验证。面向硅钙叠层电池的工程化量产，团队通过无损侧边钝化、定制化绒面、PVD 低损伤复合层、RPD 无铟 TCO、少溴少甲胺组分优化等自研工艺，改善了界面匹配与大面积成膜均匀性，器件稳定性实现 $T_{90}$-1500h 的重要突破。然而，规模化量产仍受三大难题制约：低温金属浆料国产化、高阻水氧低温封装材料、高稳定性宽带隙钙钛矿体系筛选。本报告依托正泰中试产线，围绕底层晶硅迭代、少溴少甲胺/全无机钙钛矿顶电池、少铟 RPD-TCO 层等关键环节，系统剖析材料、工艺与设备的痛点，预判技术迭代方向，为硅钙叠层电池产业化提供参考。

**关键词：**钙钛矿/晶硅叠层电池；全无机钙钛矿；少铟 RPD-TCO；产业化

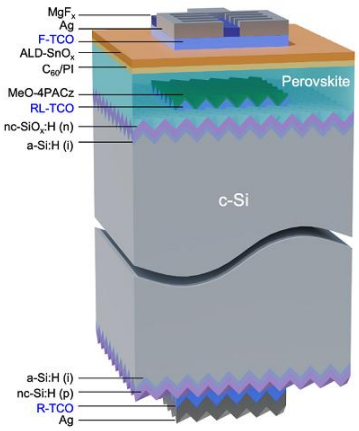



**图 1**. 无铟钙钛矿/晶硅叠层太阳能电池

邀请报告

# 钙钛矿太阳电池技术发展现状及关键件材料技术攻关

吕　俊

华侨大学材料科学与工程学院

晶灵（宁波）新能源科技有限公司

E-mail: lvjun@hqu.edu.cn

## 报告摘要

钙钛矿光伏凭借低成本、高效率与应用广的优势，成为下一代光伏核心技术，正快速从实验室迈向产业化。当前，钙钛矿薄膜成膜质量、大面积涂布均匀性、材料纯度与稳定性是制约产业化的关键瓶颈，而电子级高纯度钙钛矿微晶材料与大面积成膜工艺是突破上述难题的核心路径。

研究表明，电子级高纯度钙钛矿微晶具备 99.999% 以上纯度、结晶度高、缺陷少、晶粒尺度规整（100–500nm）等特性，相较于传统盐类前驱体，其结晶有序性更高、无杂相、光吸收性能更优，可显著降低非辐射复合、抑制离子迁移与相分离，提升器件光电转换效率、开路电压、填充因子并减小滞后效应；实际应用中，30×30cm²器件平均效率较传统盐类提升超 1.5%，批次稳定性与成膜均匀性大幅改善。在产业化技术层面，通过调控结晶动力学、优化刮涂温度与光响应分子钝化，可提升薄膜质量与长期稳定性；经工艺调试，已实现 30cm×40cm 基片涂布±2%的均匀性。

未来，以电子级高纯微晶材料为核心、结合大面积连续涂布技术，钙钛矿光伏将于 2026 年迈向吉瓦级量产，实现高效叠层组件规模化落地，为光伏产业高质量发展提供关键材料与工艺支撑。

邀请报告

# 纳米晶调控构筑高效稳定混合卤素钙钛矿宽带隙电池

刘　哲

西北工业大学

E-mail: zhe.liu@nwpu.edu.cn

## 报告摘要

具有可调带隙的混合卤素钙钛矿材料一直被认为是叠层太阳能电池的理想选择。在混合卤素钙钛矿前驱体中，Pb-Br 键强于 Pb-I 键，导致含 Br 中间相的优先形核长大。竞争成核使得宽带隙钙钛矿八面体框架变形，衍生出诸如初始结晶不均匀、薄膜本征缺陷增多等问题。在器件运行过程中，上述问题诱导卤素离子在光照下重排，形成富 Br 相和富 I 相的两种钙钛矿，即光致相分离现象。因此，抑制混合卤素钙钛矿相分离是叠层光伏电池领域的关键挑战。本报告将介绍通过液相脉冲辐照技术获得的 PbSe 纳米晶，并利用其特性诱导钙钛矿薄膜异质外延生长，获得高结晶质量、低缺陷密度的宽带隙钙钛矿（1.68 eV）薄膜；得到的钙钛矿薄膜在标准太阳光强辐照下 5 天内未产生富碘相。同时，宽带隙钙钛矿反式器件的光电转换效率（PCE）高达 22.87 %。最大功率点跟踪 1000 h 后仍保留初始效率的 88 %。

# 从测量基准到场景验证：钙钛矿产业化综合解决方案

朱俊辉

德国莱茵 TÜV

E-mail: Henry.Zhu@tuv.com

## 报告摘要

本次演讲聚焦钙钛矿产业化落地实践。面对钙钛矿从研发迈向量产的行业挑战，TÜV 莱茵构建覆盖测量基准、失效分析、场景实证与全球市场准入的全链路支撑能力。以标准为基石，串联实验室检测到真实场景验证的关键环节，携手共建产业生态，依托我们在光伏领域的技术积淀与全球公信力，赋能钙钛矿技术稳健迈向产业化。

邀请报告

# 面向叠层光伏的织构硅表面钙钛矿退化机制解析

贺明锐

新南威尔士大学，澳大利亚

E-mail: m.he@unsw.edu.au

## 报告摘要

钙钛矿/硅叠层太阳电池为实现超高光电转换效率和降低平准化度电成本提供了重要途径，但其长期稳定性仍是商业化的关键障碍，尤其是集成于工业织构硅表面的钙钛矿顶电池。本研究旨在阐明工业应用相关织构硅表面钙钛矿层的本征退化机制，利用先进的纳米尺度与原位表征技术，追踪温度应力下的结构和电子性质失稳过程。我们系统研究离子迁移、界面反应及织构引起的非均匀性如何共同导致叠层电池相关器件结构的性能损失。前期变温开尔文探针力显微镜观测表明，织构表面不同位置的表面光电压衰减存在空间差异。在此基础上，本研究将建立局部电子性质变化与宏观器件失效特征之间的机理联系。研究兼顾基础机制认识与实用稳定化策略，为开发兼容规模化制造的高效率、高稳定性钙钛矿/硅叠层太阳电池提供依据，并推动其向超低成本太阳能技术转化。

**作者简介：**

贺明锐，新南威尔士大学光伏与可再生能源工程学院 ARC DECRA 研究员，获澳大利亚研究理事会优秀青年研究者项目（DECRA）资助，2021 年获新南威尔士大学博士学位。研究涵盖无机薄膜光伏材料，以及钙钛矿与硅基叠层太阳电池。重点开展材料制备、缺陷与界面调控、应变及离子迁移研究，结合纳米尺度和原位表征，揭示器件性能损失与退化机制，探索提升光电转换效率和长期稳定性的策略。主持或参与 ARC、澳大利亚先进光伏中心及产学研合作项目，致力于推动高效、稳定、低成本光伏技术的发展。

# 自组装单分子层的溶液态超分子工程实现高性能钙钛矿/硅叠层太阳电池

周雨松[1]，李婉[1]，贺礼[2]，苏弘桢[1]，张哲维[3]，毕恩兵[3*]，沈文忠[1*]

[1]上海交通大学太阳能研究所，人工结构及量子调控教育部重点实验室，物理与天文学院

[2]吉林师范大学，功能材料物理与化学教育部重点实验室

[3]宣城先进光伏技术研究院

[*]E-mail: wzshen@sjtu.edu.cn

## 报告摘要

自组装单分子层（SAMs）被广泛应用于高效钙钛矿/硅叠层电池（TSCs）的空穴选择性接触，其中以[4-(3,6-二甲基-9*H*-咔唑-9-基)丁基]磷酸（Me-4PACz）为代表分子。然而，溶液中聚集诱导的分子间组织形态会影响 SAM 分子在基底上的均质化过程，从而损害叠层器件的光伏性能。本研究报导了一种超分子共组装策略（Supramolecular co-assembly strategy），该策略通过调控分子间非共价相互作用以实现 Me-4PACz 的溶液态分子间组织调节。通过链接溶液态分子组织与高质量的薄膜沉积，该策略不仅改善了 SAM 层的性质，还实现了优化的能级排列与钙钛矿埋底界面残余应力的释放。所制备的宽带隙钙钛矿器件与钙钛矿/硅叠层器件分别实现了 23.66% 和 33.91%（认证 33.5%）的光电转化效率。此外，优化后的叠层器件还实现了优异的长期运行稳定性，在 ISOS-L-2 标准下一个标准太阳光功率的最大功率点追踪中进行 1000 小时后仍保有最初效率的 91%。

**关键词：**钙钛矿/硅叠层太阳电池；自组装单分子层；超分子共组装；分子聚集

# Solution-State Supramolecular Engineering of Self-Assembled Monolayers for High-Performance Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells

**Yusong Zhou[1], Wan Li[1], Li He[2], Hongzhen Su[1], Zhewei Zhang[3], Enbing Bi[3*], Wenzhong Shen[1*]**

Institute of Solar Energy, and Key Laboratory of Artificial Structures and Quantum Control (Ministry of Education), School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University

[*]E-mail: wzshen@sjtu.edu.cn

## Abstract:

Carbazole-based self-assembled monolayers (SAMs), exemplified by [4-(3,6-dimethyl-9H-carbazol-9-yl)butyl]phosphonic acid (Me-4PACz), are widely used as hole-selective contacts in efficient perovskite/silicon tandem solar cells (TSCs). However, aggregation-driven intermolecular organization in solution adversely affects the homogenization of SAMs on the substrate, compromising the performance of tandem devices. Herein, a supramolecular co-assembly strategy is developed to modulate solution-state intermolecular organization and suppress aggregation by intermolecular non-covalent interactions. This strategy links solution-state modulation to the formation of uniform SAM films, simultaneously realizing optimized energy alignment and reducing residual stress at the buried interface. Champion power conversion efficiencies (PCEs) of 23.66% and 33.91% (certified 33.5%) are achieved for 1.67 eV wide-bandgap perovskite solar cells and 1 $cm^2$ two-terminal monolithic perovskite/silicon TSCs, respectively. Moreover, the optimized tandem devices exhibit excellent operational stability under the ISOS-L-2 protocol, retaining 91% of the initial PCE after 1000 h of maximum power point tracking under one-sun continuous illumination.

**Keywords:** perovskite/silicon tandem solar cells, self-assembled monolayers, supramolecular co-assembly, intermolecular organization, aggregation

# 基于碳纳米管导电钝化层的高效低成本钙钛矿/硅叠层电池研究

杨盛博

河北大学物理科学与技术学院先进钝化实验室

E-mail: 18981672413@163.com

## 报告摘要

钙钛矿/硅叠层电池难以兼顾高转换效率、低成本制备与热/真空兼容性。本文采用可溶液加工的低温碳纳米管-有机导电钝化单层，替代硅异质结底电池背面传统三层结构,突破该难题，研究证实该溶液法接触层可兼顾高叠层效率与低工艺成本。

# 面向工业绒面硅底电池的尖端选择性钝化与高效稳定钙钛矿/晶硅叠层太阳电池

杨伟创[1，2*]，盛江[3]，杨阵海[1,4]，杨熹[1]，叶继春[1*]

[1]中国科学院宁波材料技术与工程研究所

[2]宁波大学物理科学与技术学院

[3]捷佳伟创新能源装备股份有限公司

[4]苏州大学光电科学与工程学院

[*]E-mail: yangweichuang@nbu.edu.cn，jichun.ye@nimte.ac.cn

## 报告摘要

针对工业金字塔绒面硅底电池上钙钛矿覆盖不完整、尖端易漏电的问题，提出尖端选择性钝化（PSP）策略。利用聚苯乙烯纳米球模板，在金字塔尖端局部沉积Al2O3，形成绝缘钝化区域，同时保留载流子在界面的主要传输通道。Al2O3可为钙钛矿提供形核位点，改善前驱体润湿与薄膜生长，实现绒面硅上的连续无针孔覆盖。该结构抑制局部漏电和界面非辐射复合，并兼顾电荷提取与光学性能。基于该策略的 1 $cm^2$ 叠层电池最高效率达33.33%，第三方认证效率为32.89%；此外，未封装器件经 1000 h 最大功率点跟踪后，仍保持约90%的初始效率。本工作为工业绒面硅基叠层电池界面优化提供新思路。

# 钙钛矿叠层太阳电池的可靠性挑战

李嘉文

通威太阳能（成都）有限公司

E-mail: lijw043@tongwei.com

## 报告摘要

近年来，我国新一代光伏技术迭代提速，钙钛矿叠层太阳电池凭借超高转换效率，成为突破单结电池效率瓶颈、推动光伏产业降本增效的核心技术方向，产业化探索进程持续加快。在高效光伏技术升级与规模化落地的行业趋势下，钙钛矿叠层电池仍面临材料本征稳定性欠佳、界面衰减、离子迁移及复杂户外工况适配性不足等诸多可靠性难题，成为制约其大规模商业化应用的关键壁垒。本报告将针对钙钛矿叠层电池可靠性核心挑战、失效机理及优化解决方案进行全方位介绍与探讨。

邀请报告

# 过程检测在钙钛矿模型建设中的应用

朱同波

美能光伏科技有限公司

E-mail: zhutongbo@millennialsolar.com

## 报告摘要

在钙钛矿单结与叠层电池的产业化进程中，从小试向中试及量产放大时，普遍面临效率与良率的鸿沟，工艺敏感与放大难度大是制约产业推进的关键瓶颈。针对这一挑战，美能测试围绕钙钛矿工业模型建设，构建了涵盖外观、形貌、光学、电学等关键参数的流程化过程检测体系。

该体系通过多工位协同的检测架构，产出标准化、可追溯的多维检测数据，为工业模型提供高质量的数据底座，进而支撑工艺 SPEC 推导、参数相关性解析与异常根因溯源，助力钙钛矿单结与叠层电池从预研走向中试及量产的工艺建模与良率提升。本文阐述了当前的产业痛点、工业模型的建设逻辑及对检测的核心要求，并详细介绍了面向小尺寸高通量实验及中试线边检测的过程检测解决方案与设备能力，旨在为钙钛矿产线的质量控制提供参考。

**关键词：**钙钛矿；叠层电池；过程检测；工业模型；良率提升

# 钙钛矿叠层太阳电池的结构设计与性能调控

应智琴，叶继春

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

E-mail: yingzhiqin@nimte.ac.cn

## 报告摘要

针对钙钛矿基叠层太阳能电池长期稳定性不足、制约其产业化应用的核心瓶颈，本报告围绕光电结构优化，构建了涵盖结构设计、材料设计、器件优化及柔性应用的系统性研究体系。在高效器件构筑方面，基于主流 TOPCon 技术，开发了兼容工业化制备工艺的新型微纳米绒面硅结构，利用纳米限域效应提升钙钛矿晶体质量，并引入掺杂多晶硅隧穿复合结以降低子电池间的耦合损失，实现了高效率钙钛矿/TOPCon 叠层太阳能电池。在器件稳定性方面，针对复杂环境下的失效问题，通过调控钙钛矿材料的力学模量与介电环境，缓解光热应力腐蚀及载流子积累效应，同时利用原位内部封装策略抑制离子迁移与界面物质交换，提升器件的环境稳定性与运行可靠性。在柔性应用方面，基于超薄晶硅衬底实现了柔性钙钛矿/硅叠层太阳能电池，并突破了粗糙 CIGS 表面高质量钙钛矿顶电池构筑及多界面黏附调控等关键技术难题，实现了高效率柔性钙钛矿/CIGS 叠层太阳能电池。本研究为高效率、高稳定性钙钛矿基叠层太阳能电池的产业化发展及多场景应用提供了重要的技术支撑。

# 顺序沉积转化调控实现高效稳定绒面钙钛矿/硅叠层电池

李婉，沈文忠*

上海交通大学太阳能研究所，人工结构及量子调控教育部重点实验室，物理与天文学院

*E-mail: wzshen@sjtu.edu.cn

## 报告摘要

钙钛矿/硅叠层太阳能电池为突破单结光伏器件的效率极限提供了一条有前景的途径。在工业化绒面硅上集成钙钛矿吸收层，既能保留减反射和增强陷光的光学优势，又能保持与现有硅基底的兼容性。然而，微米级金字塔纹理给钙钛矿的均匀覆盖带来了挑战。混合两步沉积结合了无机前驱体真空沉积的保形覆盖能力与后续溶液转化的组分可调性和加工灵活性。通过将无机骨架沉积与有机盐引入解耦，该方法为调控钙钛矿的形成过程提供了空间。然而，前驱体渗透不足、骨架转化不完全和结晶失控可能引入埋底缺陷与组分不均匀，限制器件效率和稳定性。本研究通过醋酸铷调控改善前驱体转化与结晶过程，获得了组分更加均匀、非辐射复合减少且卤素偏析受到抑制的宽带隙钙钛矿薄膜。所制备的单结太阳能电池实现了 22.61%的光电转换效率。在全绒面硅异质结基底上制备的单片钙钛矿/硅叠层器件获得了 32.85%的最高效率，认证效率为 32.19%。此外，叠层器件经过 1390 小时的最大功率点跟踪后仍保持初始效率的 90%，展现出改善的光伏性能与运行稳定性。

**关键词：**钙钛矿/硅叠层太阳能电池；混合顺序沉积；绒面硅

# Regulating conversion during sequential deposition on textured silicon for efficient and stable perovskite/silicon tandem solar cells

**Wan Li, Wenzhong Shen ***

Institute of Solar Energy, and Key Laboratory of Artificial Structures and Quantum Control (Ministry of Education), School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University

* E-mail: wzshen@sjtu.edu.cn

## Abstract

Perovskite/silicon tandem solar cells offer a promising route to surpass the efficiency limits of single-junction photovoltaics. Integrating perovskite absorbers onto industrially relevant textured silicon preserves the optical benefits of reduced reflection and enhanced light trapping while maintaining compatibility with established silicon substrates. However, micrometre-scale pyramids pose challenges to uniform perovskite coverage. Hybrid two-step deposition combines the conformal coverage of vacuum-deposited inorganic precursors with the compositional tunability and processing flexibility of solution-based conversion. By decoupling inorganic framework deposition from organic salt incorporation, this approach offers scope for regulating perovskite formation. Nevertheless, insufficient precursor infiltration, incomplete framework conversion and uncontrolled crystallization can introduce buried defects and compositional heterogeneity, limiting device efficiency and stability. Here, rubidium acetate (RbAc) modulation improves precursor conversion and crystallization, yielding wide-bandgap perovskite films with enhanced compositional uniformity, reduced non-radiative recombination and suppressed halide segregation. The resulting single-junction solar cells achieve a power conversion efficiency of 22.61%. Monolithic perovskite/silicon tandem devices on fully textured silicon heterojunction substrates deliver a champion efficiency of 32.85%, with a certified efficiency of 32.19%. Furthermore, the tandem devices retain 90% of their initial efficiency after 1390 h of maximum power point tracking, demonstrating improved photovoltaic performance and operational stability.

**Keywords：** Perovskite/silicon tandem solar cells; Hybrid sequential deposition; Textured silicon

# 银-钠协同掺杂调控宽禁带 CIGS 太阳能电池体相与界面特性的研究

李伟民

中国科学院深圳先进技术研究院

E-mail: wm.li1@siat.ac.cn

## 报告摘要

宽禁带 CIGS 太阳能电池因其在叠层器件顶电池和高电压输出方面的独特优势而备受关注，但其效率提升长期受限于严重的开压和填充因子损失，根源在于高镓含量引发的体相质量退化及异质结界面复合加剧。本报告系统介绍了一种银-钠协同掺杂策略，通过精确调整三步共蒸发中钠含量，实现了微量掺杂元素在吸收层中的精确可控。研究表明，银的引入重构了钠的扩散路径，有效抑制了界面钠偏析，同时改善了晶格有序度，从而降低了吸收层生长对钠元素掺杂量的需求。二者协同作用显著降低了界面缺陷态密度，优化了异质结能带匹配。本报告还将探讨该掺杂工程策略从宽禁带体系向标准禁带高效器件拓展的可行性，为 CIGS 光伏组件在多元化应用场景下的性能优化提供新思路。

# 钙钛矿/晶体硅叠层电池边缘钝化与结构优化研究

陈兵兵，于礼杰，杨盛博，王新茹，崔梦楠，陈剑辉

河北大学

E-mail: chenbingbing0219@hbu.edu.cn

## 报告摘要

钙钛矿/晶体硅叠层电池通过吸收层互补实现更宽的光谱利用，是突破单结电池效率极限的重要技术路线。然而，与单结晶体硅电池类似，其在走向产业化的过程中，需将电池片分片后制备成组件，以实现高效组件应用。叠层分片引起的边缘损失已成为制约器件性能提升的关键问题之一。同时，尽管叠层电池在效率上已取得显著突破，但其制备工艺往往步骤繁多、流程复杂，增加了成本控制与规模化生产的难度。基于此，本文围绕叠层电池的边缘钝化与制备工艺简化两方面展开研究：一方面，针对叠层电池边缘区域开展钝化研究，抑制边缘复合与漏电损失，提升器件效率和稳定性；另一方面，探索叠层电池制备工艺的简化方案，在保证器件性能的前提下减少工艺步骤、降低制备复杂度与成本，为叠层电池的高效、低成本及产业化发展提供可行路径。

# 钙钛矿/TOPCon 叠层电池的界面优化

李鑫，应智琴，叶继春

宁波材料技术与工程研究所

E-mail: lixin1996@nimte.ac.cn

## 报告摘要

钙钛矿/TOPCon 叠层太阳电池是光伏领域的重要研究方向，其光电转换效率已突破 35%，但仍约为 S-Q 极限的 76%，主要受制于宽带隙钙钛矿与载流子传输层之间的界面能量损失。本报告聚焦钙钛矿/TOPCon 叠层太阳电池的界面优化，围绕上界面（钙钛矿/$C_{60}$）和埋底界面两类关键界面，介绍界面能量损失根源及相应解决方案。针对钙钛矿/$C_{60}$ 上界面接触问题，从化学钝化、场效应钝化和偶极界面调控入手，改善钙钛矿/$C_{60}$ 界面能级失配，助力获得高效稳定的叠层电池；针对埋底界面，从自组装材料（SAMs）的分散性、锚定密度与强度以及上层结构稳定性等问题出发，开发针对性添加剂策略，提高 SAMs 锚定强度，进而提升叠层器件稳定性。上述研究为提升叠层电池效率与稳定性提供了系统参考，对推动其产业化进程具有积极意义。

# 可拆卸PDMS 中间层增强四端钙钛矿/硅叠层太阳电池的光学耦合

高海顺，陈兵兵，杨盛博，龚浩毅，侍彩艳，张旭宁，陈剑辉*
河北大学物理科学与技术学院，先进钝化技术实验室
*E-mail: chenjianhui@hbu.edu.cn

## 报告摘要

四端钙钛矿/硅叠层太阳电池通过钙钛矿顶电池与晶硅底电池的光谱互补实现高效光能利用，但机械堆叠界面中的空气间隙易引发界面反射及大角度光传输损失，限制硅底电池的光电流输出。本研究提出一种基于可拆卸聚二甲基硅氧烷（PDMS）中间层的光学耦合策略，结合传输矩阵法（TMM）、光线追踪（Ray Tracing）及 Setfos 光学仿真，系统研究中间层折射率、光线入射角及硅底电池结构对四端叠层器件光学性能的影响，并通过机械堆叠器件进行实验验证。模拟结果表明，适宜的中间层折射率范围为 1.25～1.50。采用折射率约为 1.41 的PDMS 替代空气间隙后，在简化界面模型中，钙钛矿/中间层和中间层/硅界面的法向反射率分别由 16.96%和30.86%降低至6.75%和 18.12%。在 60°入射条件下，异质结（SHJ）和叉指背接触（IBC）硅底电池的模拟有效光学电流分别提高2.33 和 1.27 mA/cm²。光谱损失分析表明，PDMS 的光学增益主要来源于 800～1200 nm 近红外波段反射损失的降低，同时对钙钛矿顶电池的有效吸收影响较小。实验结果显示，钙钛矿顶电池效率为 20.69%，经顶电池滤光及PDMS 耦合后的硅底电池效率为 11.92%，两子电池独立最大功率点效率之和达到32.61%。该可拆卸PDMS 中间层无需高温处理或永久性键合即可改善四端叠层器件的光学耦合，为高效钙钛矿/硅叠层太阳电池的光管理和可维护集成提供了新的技术途

# Enhanced Optical Coupling in Four-Terminal Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells Using a Detachable PDMS Interlayer

**Haishun Gao, Bingbing Chen, Shengbo Yang, Haoyi Gong, Caiyan Shi, Xuning Zhang, Jianhui Chen***
Advanced Passivation Technology Laboratory, School of Physical Science and Technology, Hebei University,

**Abstract**

Four-terminal (4T) perovskite/silicon tandem solar cells enable efficient solar energy utilization through the complementary spectral responses of perovskite top cells and crystalline silicon bottom cells. However, air gaps at mechanically stacked interfaces introduce interfacial reflection and large-angle optical losses, limiting the photocurrent output of the silicon bottom cell. In this work, we propose an optical coupling strategy based on a detachable polydimethylsiloxane (PDMS) interlayer. Transfer-matrix method (TMM) calculations, ray tracing, and Setfos optical simulations were combined to systematically investigate the effects of interlayer refractive index, light incidence angle, and silicon bottom-cell architecture on the optical performance of 4T tandem devices, followed by experimental validation using mechanically stacked devices. Simulations indicate a favorable interlayer refractive-index range of 1.25–1.50. Replacing the air gap with PDMS (refractive index ≈ 1.41) reduces the normal-incidence reflectance at the perovskite/interlayer and interlayer/silicon interfaces from 16.96% and 30.86% to 6.75% and 18.12%, respectively, in a simplified interface model. At an incidence angle of 60°, the simulated effective optical current densities of silicon heterojunction (SHJ) and interdigitated back-contact (IBC) bottom cells increase by 2.33 and 1.27 mA/cm², respectively. Spectral loss analysis shows that the optical gain from PDMS primarily originates from reduced reflection losses in the 800–1200 nm near-infrared region, with little effect on the useful absorption of the perovskite top cell. Experimentally, the perovskite top cell achieves an efficiency of 20.69%, while the silicon bottom cell under top-cell-filtered illumination with PDMS coupling reaches 11.92%, resulting in a combined efficiency of 32.61% based on the sum of the two independently measured maximum- power-point efficiencies. The detachable PDMS interlayer improves optical coupling in 4T tandem devices without high-temperature processing or permanent bonding, offering a practical approach to light management and maintainable integration of high-efficiency perovskite/silicon tandem solar cells.

**Keywords:** Four-terminal tandem solar cells; Perovskite/silicon; PDMS; Optical coupling; Light management

# 介电-偶极协同效应实现低势垒电子抽取，用于高效钙钛矿/织构硅叠层太阳电池

张海川，王文静，张毅闻*

上海师范大学

*E-mail: zhang_yw@shnu.edu.cn

## 报告摘要

宽禁带钙钛矿顶电池的界面非辐射复合是限制高性能钙钛矿/绒面硅叠层太阳电池发展的关键瓶颈。本文报道了一种双重钝化策略，将超薄高介电常数（高 κ）$AlO_x$介质层与分子偶极层（TEACl、$CF_3$-PEAI 和 $EDAI_2$）相结合。采用原子层沉积（ALD）生长的 $AlO_x$缓冲层可共形覆盖钙钛矿表面，有效抑制有害二维（2D）钙钛矿相的形成，并钝化未配位 $Pb^{2+}$表面缺陷。与此同时，高κ-$AlO_x$介质层能够均化表面电势分布，其丰富的羟基官能团引导偶极分子均匀组装，进而精细调控界面能级排列。得益于介电–偶极的协同调制作用，界面能级偏移由 0.70 eV 降低至 0.05 eV，显著促进了高效的界面电荷提取。由此，钙钛矿/绒面硅叠层电池实现了 31.77%的最佳效率，明显优于 28.00%的对照组。此外，未封装叠层器件展现出良好的运行稳定性，在 AM1.5 光照下连续最大功率点跟踪 100 小时后仍保持初始性能的 95.4%。本工作为高效稳定的钙钛矿/绒面硅叠层光伏提供了一种具备规模化潜力的界面设计方案。

**关键词：**钙钛矿/硅叠层；界面钝化；高κ介质层；偶极层；非辐射复合

# 高效钙钛矿太阳电池的光谱调控及稳定性研究

贺礼 [1,2]，杨丽丽 [1]，沈文忠 [2,*]

[1] 功能材料物理与化学教育部重点实验室，吉林师范大学

[2] 上海交通大学太阳能研究所，人工结构及量子调控教育部重点实验室，

物理与天文学院

E-mail: jlnuhl@126.com

## 报告摘要

固有带隙的单结钙钛矿太阳电池的光伏性能受到结构组成复杂、光吸收范围窄和高能光子载流子热化等问题的严重限制，导致其只能吸收小部分紫外（UV）光和可见光，仅占太阳光谱的 45~50%，这将阻碍器件光电转换效率的进一步提高。因此，采用简单、低成本的策略来拓宽钙钛矿太阳电池对太阳光谱的吸收范围并获得优异的长期稳定性是至关重要的。在此之中，拓宽器件的近红外（NIR）光谱响应范围并提高 UV 光利用率是钙钛矿太阳电池实现进一步发展的关键所在。为此，我们采取以下技术路线：

首先，将掺杂铕的硫化铅量子点薄膜作为器件的 NIR 光吸收层和空穴传输层，与钙钛矿层之间实现良好的能级匹配，促进空穴的提取和收集。其疏水配体使未封装的器件具有优异的湿度稳定性；同时，引入量子点通过钝化缺陷的手段有效地促进电荷传输并降低缺陷态密度。其次，为了拓宽钙钛矿太阳电池的 NIR 光谱响应范围并提高 UV 光利用率，将 PTB7-Th:COi8DFIC 组成的有机体异质结（BHJ）层直接沉积在钙钛矿层上，器件的光谱响应范围拓展至 1050 nm，实现光吸收互补。BHJ 层可以有效钝化缺陷、改善电荷传输、抵抗水分侵蚀。基于 BHJ 层的器件凭借合适的能级匹配和有效抑制载流子复合的特性。最后，在拓展器件 NIR 吸收光谱时，为解决 BHJ 体系中的载流子复合等问题，采用了非富勒烯受体 N3 和聚合物给体 D18-Cl 制备高效集成钙钛矿/伪平面异质结太阳电池。聚合物 D18-Cl 首次被引入到反溶剂中，聚合物中的硫原子可以有效地降低缺陷态密度，抑制钙钛矿薄膜中的非辐射复合并辅助钙钛矿薄膜生长。采用顺序沉积法制备的 PPHJ 结构实现良好的垂直相分离，凭借有机材料中的疏水烷基链和纤维网络，未封装器件的长期稳定性和湿度稳定性也得到了显著提升。

**关键词：**钙钛矿太阳电池；近红外光谱响应；缺陷钝化；光谱吸收拓宽；稳定性

# 上界面共组装混合层改性提升反式钙钛矿太阳电池界面稳定性

王俊玉[a,b]，严辉[a]，郑子龙[a]，唐泽国[b]

[a]北京工业大学材料科学与工程学院，材料循环低碳再生全国重点实验室，

固体微结构与性能北京市重点实验室

[b]深圳技术大学新材料与新能源学院

E-mail: wangjunyu@emails.bjut.edu.cn

## 报告摘要

电子传输层（ETL）界面工程是实现反式钙钛矿太阳电池（PSCs）高效率与长期稳定性的关键，然而针对该上界面的共组装杂化中间层仍鲜有研究。本工作将 4-氨基苯甲酸盐酸盐（4AA）与二苯并 18-冠-6（DB18C6）结合，在 ETL 界面构筑杂化中间层。4AA 分子嵌入 DB18C6 聚集体中，使单分子层更加均一，表面覆盖度由 0.57 提升至 0.79，并增强界面偶极矩（2→7 德拜）。该中间层具备双重钝化效应：4AA 的-$NH_3^+$与-COOH 基团可中和离子缺陷；DB18C6 则优化钙钛矿结晶性与能级匹配。基于该修饰的器件光电转换效率达到 26.33%（对照组为 22.92%），开路电压 $V_{OC}$ 高达 1.167V，填充因子 FF 为 86.05%（对照组：1.130V，80.38%）。更重要的是，共组装杂化中间层能够阻挡环境侵蚀与离子迁移降解。未封装器件表现出优异的工作稳定性，在最大功率点持续追踪 1000h 后，仍保留初始效率的 93.2%。本工作提出一种共组装策略，解决 ETL 界面的效率与稳定性瓶颈，为构筑高性能、高稳定反式钙钛矿电池提供可靠思路。

**关键词：**倒置钙钛矿太阳电池；共组装杂化中间层；偶极矩；表面覆盖率；高效率与稳定性

# Co-Assembled Hybrid Interlayer Engineering for Enhanced Upper Interface Stability in Inverted Perovskite Solar Cells

**Junyu Wang[a,b], Hui Yan[a], Zilong Zheng[a], Zeguo Tang[b]**

[a] State Key Laboratory of Materials Low-Carbon Recycling, Beijing Key Lab of Microstructure and Properties of Advanced Materials, College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology

[b] College of New Materials and New Energies, Shenzhen Technology University

E-mail: Wangjunyu@emails.bjut.edu.cn

## Abstract

Engineering electron transport layer (ETL) interface is critical for high-efficiency and long-term stability in inverted perovskite solar cells (PSCs), yet co-assembled hybrid interlayer is rarely explored for this upper interface. This work integrates 4-aminobenzoate acid hydrochloride (4AA) with a dibenzo-18-crown-6 (DB18C6) to construct a hybrid interlayer at ETL interface. The 4AA molecules intercalate into DB18C6 aggregates, homogenizing the monolayer and boosting surface coverage (from 0.57 to 0.79) and strengthening the interfacial dipole moment (from 2 to 7 Debye). This interlayer provides dual passivation, in which the -$NH_3^+$ and -COOH groups of 4AA neutralize ionic defects, while DB18C6 optimizes perovskite crystallinity and energy level alignment. Therefore, modified devices achieve an efficiency of 26.33% (exceeding 22.92% of the control) with high open-circuit voltage ($V_{OC}$) of 1.167 V and fill factor (FF) of 86.05% (compared to 1.130 V and 80.38% of the control). More importantly, the co-assembled hybrid interlayer serves as a barrier against environmental and ionic degradation. The unencapsulated device demonstrates outstanding operational stability, retaining 93.2% of initial efficiency after 1000 h of maximum power point tracking. This work demonstrates a co-assembly strategy to address efficiency and stability challenges at ETL interface, paving a reliable path toward high-performance and stable inverted PSCs.

**Keywords:** Inverted perovskite solar cell; Co-assembled hybrid interlayer; Dipole Moment; Surface Coverage; High efficiency and stability

# 2026 第二十一届中国太阳级硅及光伏发电研讨会

## 22nd China SoG Silicon and PV Power Conference

# 11 月 21 日会议议程

# Nov. 21 Program

Invited Talk

# Perovskite/silicon tandem solar cells: from first demonstrations to efficient, scalable and durable (?) devices

**Christophe Ballif**

EPFL Photovoltaics and Thin-Film Electronics Laboratory (PV-Lab), Switzerland

CSEM Sustainable Energy Center, Switzerland

## Abstract

In barely a decade, monolithic perovskite/silicon tandem solar cells have progressed from a 13.7% proof of concept (2015) to certified efficiencies of 35.5% (LONGi, 2026), well beyond the practical limit of single-junction silicon. This keynote will first review that worldwide journey: the early two terminal demonstrations on planar silicon heterojunction cells, the move to fully textured bottom cells, the advent of self-assembled monolayer hole contacts and advanced interface passivation, the successive records by academic and industrial teams in Europe, the Middle East and China, and the first steps towards large-area cells, modules and pilot production. It will also trace the progress of perovskite/perovskite/silicon triple junctions, first demonstrated in 2018. We will report on the key steps undertaken at EPFL and CSEM in Neuchâtel to break several efficiency barriers on small-scale devices [1–4] with heterojunction and Topcon bottom, and discuss new results for fully screen-printed solar cells of 2 × 2 cm² and 60 cm². We will also report on the various deposition techniques that allow for high-efficiency devices [5], and on the impact of different front silicon surface textures on the optical properties of the devices [6]. In addition, we will comment on the role of photon recycling in measuring the quantum efficiency of tandem cells [7].

While efficiency records open the prospect of extending the efficiency curve of c-Si modules over the next decade, the decisive challenges now lie elsewhere: operational stability under heat, light, reverse bias and day–night cycling, where mobile ions, halide segregation in wide-bandgap absorbers and weak interfaces dominate [8]. We will discuss a few degradation modes, in particular lateral ion migration and its impact on cell (in)stability measurements under light soaking [9] and how smart automation can lead to faster progress towards device with enhanced stability [10] We will then discuss the importance of crystalline defects [11] and introduce new results for $FAPbI_3$ devices [12]. The usual stabilisation of α-$FAPbI_3$ relies on alloying with $Cs^+$ or $MA^+$, which unavoidably creates nanoscale A site heterogeneity and stacking faults. We will show how, by careful tuning of the layer stacks and of the crystallisation process, it is possible to achieve phase-pure α-$FAPbI_3$ with a uniform lattice parameter throughout the film, a (001) orientation and a tenfold increase in photoluminescence quantum yield. Inverted cells reach 25.8% efficiency. Unencapsulated devices retain their full performance for more than 2,400 h at 85 °C under 1-sun maximum-power-point tracking in ambient air without a UV filter. Minimodules lose less than 4% after 1,500 h at 75 °C, and outdoor tests in Berlin maintain a performance ratio of 0.9–1 over eight months.

Finally, we will conclude on what these advances mean for bankable, industrial perovskite/silicon tandem technology.

**References：**

1. F. Sahli et al., Nat. Mater. 17, 820 (2018) - fully textured monolithic tandems.
2. X. Y. Chin et al., Science 381, 59 (2023) - 31.25% via interface passivation.
3. K. Artuk et al., Nat. Commun. 16, 8672 (2025) - J Hurni,et al EES Solar 1 (2025) .
4. K. Artuk et al., Nature (2026), - triple-junction cells at 30.02% certified.
5. A. G. Kuba et al., ACS Energy Lett. 11, 3164 (2026) — two-step evaporation/CSS absorbers.
6. D. Turkay et al. ACS Energy Lett 10(2025) Beyond Flat.
7. S. Zeder et al. Solar RRL 9 (2025) – impact of PR on IQE.
8. D. A. Jacobs et al., Energy Environ. Sci. 15, 5324 (2022) — lateral ion migration.
9. C Ongaro,et al. EES solar 2 (2026), wide bandgap degradation modes.
10. HA Can, et al Digital Discovery 4 (10), 2804-2815.
11. M. Othman et al., Energy Environ. Sci. 17 (2024); Adv. Mater. 37, 2502142 (2025)。
12. M. Othman et al., manuscript submitted (2026).

Invited Talk

# Optimal energy alignment and surface adhesion improvement for highly efficient perovskite-silicon tandem solar cells

**Gaosheng Huang[1,2], Yanxun Li[3], Nan Sun[1,4], Bingbing Chen[1], Niklas Scheer[5], Benjamin Klingebiel[1], Andreas Lambertz[1], Alex K.-Y. Jen[3], Thomas Kirchartz[1,4], Uwe Rau[1,2], Kaining Ding[1]**

[1]IMD-3 Photovoltaics, Forschungszentrum Jülich GmbH, Germany

[2]Jülich-Aachen Research Alliance(JARA-Energy) and RWTH Aachen University, Germany

[3]Department of Materials Science and Engineering, City University of Hong Kong

[4]Faculty of Engineering and CENIDE, University of Duisburg-Essen, Germany

[5]IET-1,Forschungszentrum Jülich GmbH,Germany

E-mail: k.ding@fz-juelich.de

## Abstract

Self-assembled monolayers (SAMs) have become key hole-selective contacts for high-efficiency perovskite and perovskite-silicon tandem solar cells because they enable fast hole extraction and low interfacial recombination. The development of new SAM molecules has therefore focused strongly on matching their highest-occupied-molecular-orbital (HOMO) level to the perovskite valence band. However, the way this energy offset jointly affects open-circuit voltage (VOC) and fill factor (FF) is not fully understood. In addition, for tandem devices using textured silicon bottom cells, the influence of the substrate geometry and surface adhesion on perovskite precursor filling is often overlooked.

In this work, the HOMO levels of different SAMs and the perovskite valence-band minimum are determined by ultraviolet photoemission spectroscopy and used as input for numerical simulations. By systematically varying the SAM-perovskite energy offset, the competing effects on VOC and FF are analyzed and compared with experimental results from single-junction perovskite solar cells. For textured tandem bottom cells, surface adhesion is evaluated by PeakForce atomic force microscopy, while cross-sectional scanning electron microscopy is used to identify void formation in the pyramid valleys. Based on these analyses, CbzNaph is selected as the SAM and 4-phosphonobenzoic acid (4PBA) is introduced as a hydrophilic additive.

The simulations reveal a clear tradeoff between VOC and FF. Reducing the energy offset can increase the interfacial Fermi-level splitting and thus VOC, but at the same time lowers the interfacial hole concentration and increases transport-related voltage losses at the maximum power point, thereby reducing FF. Consequently, the highest efficiency is obtained within an optimal energy-alignment window rather than at the smallest possible offset. Combining the simulated trend with UPS measurements identifies CbzNaph as the most suitable candidate among the investigated SAMs, which is confirmed experimentally by the single-junction device results.

For tandem devices on textured silicon, CbzNaph alone exhibits insufficient surface adhesion, leading to incomplete precursor filling and voids in the valleys between neighboring pyramids. Mixing CbzNaph with the hydrophilic additive 4PBA substantially increases the adhesion force, especially in these critical valley regions. The improved wetting eliminates the observed voids and enhances the electrical contact between the perovskite absorber and the textured bottom cell. As a result, the tandem fill factor is markedly improved and a champion perovskite-silicon tandem efficiency of 33.38% with an FF of 82.26% is achieved. The results highlight that both energy-level alignment and surface adhesion must be optimized simultaneously for highly efficient textured tandem solar cells.

Invited Talk

# From materials and interfaces to high-efficiency silicon and tandem solar cells

**O. Isabella, S. Smits, K. Kovačević, Y. Zhao, Y. Zheng, R. Brondolin, L. Cao, E. Özkol, L. Mazzarella, P. Procel, Y. Zhao**

Photovoltaic Materials and Devices Group, Delft University of Technology, The Netherlands

E-mail: O.Isabella@tudelft.nl

## Abstract

This contribution reviews recent advancements in high-efficiency crystalline silicon (c-Si) solar cells and tandem devices developed at TU Delft, with a strong focus on silicon heterojunction (SHJ) technologies and their integration into next-generation architectures. The continuous progress in device performance is driven by improved contact engineering, innovative material stacks, plasma treatments, and simulation-guided optimization. In particular, systematic developments in doped nanocrystalline silicon oxide layers, transparent conductive oxides, and metallization schemes such as copper plating have led to substantial improvements in fill factor (FF), reaching values above 83% and enabling SHJ solar cells with efficiencies exceeding 24%.

A key innovation towards SHJ solar cells with ultimate optical response is the implementation of localized front contacts, which reduce shading and recombination losses while maintaining excellent passivation. Our optimized design can achieve power conversion efficiencies close to 24% with competitive short-circuit current densities well above 40 $mA/cm^2$. Beyond single- junction devices, the integration of SHJ bottom cells into perovskite/silicon tandem structures is explored. These tandem devices demonstrate efficiencies up to 32.6%, underlining the flexibility of our bottom cell technology to be integrated in different top cell manufacturing paradigms, such as hybrid or slot die processes.

Parallel efforts on transition metal oxide (TMO)-based contacts, particularly $MoO_x$, are presented for both front/back-contact (FBC) and interdigitated back-contact (IBC) architectures. These dopant-free approaches offer simplified processing, high selectivity, and competitive efficiencies also in the 24% mark. Finally, hybrid architectures combining $MoO_x$ with poly-$SiO_x$ passivating contacts are introduced, showing promising performance improvements through advanced passivation and contact resistivity control.

Our results emphasize that a combination of innovative materials, device architectures, and interface engineering is key to pushing c-Si solar cell efficiencies at the laboratory scale toward their theoretical limits and enabling scalable, high-performance photovoltaic technologies.

Invited Talk

# Overcoming efficiency and manufacturing challenges in fully-textured perovskite/silicon tandem solar cells

**Oussama Er-raji[1,2], Oliver Fischer[1,2], Christoph Messmer[1,2], Mohamed Mahmoud[1,2], Vladyslav Hnapovskyi[3], Sofiia Kosar[3], Rakesh Pradhan[3], Bhushan. P. Kore[1,2], Johanna Modes[1,2], Martin Bivour[1,2], Jonas Schön[1,2], Florian Schindler[1], Stefaan De Wolf[3], Martin Hermle[1], Martin C. Schubert[1], Stephan Riepe[1], Ulrike Hatt[1], Patricia S. C. Schulze[1], Juliane Borchert[1,2], Stefan W. Glunz[1,2]**

[1]Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Germany

[2]University of Freiburg, Department of Sustainable Systems Engineering (INATECH),Germany

[3]King Abdullah University for Science and Technology (KAUST), KSA

E-mail: oussama.er-raji@ise-extern.fraunhofer.de

## Abstract

Two-terminal (2T) fully-textured perovskite/silicon tandem solar cells represent a promising route toward highly efficient photovoltaic technology with low levelized cost of electricity. By conformally depositing the <1 μm-thick perovskite top cell onto an industry-standard textured silicon cell with micrometer-sized pyramids (>1 μm), the existing silicon manufacturing infrastructure at TW scale and its production technologies can continue to be used, and the power capacity can theoretically be increased by up to 50% through tandem technology. In this contribution, we address the key challenges associated with the realization of fully-textured perovskite/silicon tandem solar cells, including conformal perovskite absorber deposition on complex surface morphologies via 2-step hybrid evaporation/wet-chemistry and sequential evaporation methods, and the formation of high-quality interfaces throughout the device stack. These developments are guided by advanced characterization techniques capable of identifying loss mechanisms within the individual sub-cells, together with opto-electrical simulations that accurately describe device operation and performance limitations. Finally, we demonstrate scalable deposition approaches for the various layers of the perovskite sub-cell and transition the bottom-cell design from SHJ to TOPCon. This is implemented in the Pero-Si-SCALE platform at Fraunhofer ISE, providing a pathway toward the industrial implementation of high-efficiency fully-textured perovskite/silicon tandem solar cells.

**Keywords**: Perovskite; Silicon; Tandem solar cells

**Biography:**

Dr. Oussama Er-raji is a researcher at Fraunhofer ISE and the Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, specializing in the development of perovskite/silicon tandem solar cells. He earned his Bachelor's degree in Mechanical engineering from Université de Bordeaux and his Master's degree in Energy and Environmental Science from École Polytechnique in France. He then completed his Ph.D. at the Albert-Ludwigs-Universität Freiburg in Germany, during which he conducted his research at Fraunhofer ISE. Dr. Er-raji played a key role in reaching the record-certified power conversion efficiency of 31.6% for fully-textured perovskite/silicon tandem solar cells in 2024. He has authored and co-authored over 30 peer-reviewed publications in leading journals such as Joule, Science, and Nature Energy, contributing to the field of high-efficiency perovskite/silicon solar cell technologies. In addition to his research, he serves as a guest lecturer at the Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

**Invited Talk**

# Stability issues and recovery strategies for perovskite/silicon tandem solar cells

**Mengmeng Chu[1], Maha Nur Aida[2], Alamgeer[1], Hyejeong Jin[3], Hasnain Yousuf[1], Rafi ur Rahman[3], Xiaowei Li[4], Jinli Yang[4], Zijia Li[4], Muhammad Quddamah Khokhar[3], Junsin Yi[1,2,3*]**

[1]Interdisciplinary Program in Photovoltaic System Engineering, Sungkyunkwan University, Republic of Korea

[2]Department of Future Energy Engineering, Sungkyunkwan University, Republic of Korea

[3]Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, Republic of Korea

[4]Chint New Energy R&D Center, Frontier Technology Dept.

[*]E-mail: junsin@skku.edu

## Abstract

Perovskite/silicon (PVK/Si) tandem solar cells have surpassed the crystalline silicon efficiency limit (29.4%), with our two terminal devices reaching a certified 31.50%, but long-term stability remains a key hurdle. Existing IEC tests target crystalline silicon and neglect tandem metastability, mobile ion migration and hysteresis. We examine five issues: pretreatment, hot spot, UV, electrical bias and potential induced degradation (PID), and review proposed solutions. IEC MQT 19 stabilization (≥10 kWh/m$^2$, 50 ± 10°C) can under stabilize or over stress the perovskite, so we propose a 5-10 min maximum power point tracking soak at 25-45°C, extended until dP/dt ≈ 0. The IEC hot spot procedure causes unintended degradation (>2% in cell selection, ~7% under short circuit exposure), whereas a fixed load voltage and exposure at the bypass diode turn-on voltage keep the final degradation below 5%. PID (-1000 V, 60°C) causes ~50% efficiency loss in one day through $Na^+$ drift and Cs, Pb, I and Br out diffusion; a reported 50 nm $NiO_x$ barrier raises efficiency retention from 27% to 65%. Under AM 1.5G illumination at 85°C, reversible ion migration (retention ≈80%) evolves into irreversible phase segregation (≈62%). An AC bias (square wave, 100 kHz, $V_{pp}$ = 2 V) recovers 95-99% of the efficiency; TEM and photoluminescence analyses show a clear interface, cured defects and restored carrier lifetime. These results support in situ electro healing and tandem specific IEC tests.

# The tandem factory: integrating factory planning, CoO, LCOE and LCA

Julian Reichle, Markus Beck, Mehul Raval, Wolfgang Jooss, Peter Fath
RCT Solutions GmbH, Germany
Julian.Reichle@rct-solutions.com

## Abstract

Perovskite-silicon tandem photovoltaic technologies offer higher conversion efficiencies than conventional crystalline-silicon modules, but their industrial competitiveness depends on whether the additional manufacturing complexity, capital expenditure, operating cost, and environmental burden are compensated by increased module power and energy yield. This study compares state-of-the-art TOPCon, heterojunction technology (HJT), and back-contact crystalline-silicon modules with corresponding two-terminal(2T) and four-terminal(4T) perovskite-silicon tandem configurations. The assessment combines conceptual factory engineering, cost of ownership (COO), levelized cost of electricity (LCOE), and cradle-to-gate life-cycle assessment (LCA) for an industrial production scale of 3 GW per year.

**Keywords:** Crystalline silicon; Perovskite-silicon tandem; TOPCon; HJT; Back-contact; Cost of ownership; LCOE; Life-cycle assessment; Carbon footprint; Photovoltaic manufacturing

Invited Talk

# A unified mechanism for ultraviolet-induced degradation in TOPCon solar cells

**Bram Hoex[1,*], Muhammad Umair Khan[1], Shukla Poddar[1], Ho Yuet Rachel Yeung[1], Aeron Johns[1], Ting Huang[2], Liang Wu[2], Hao Song[2], Ruirui Lv[2], Yuanjie Yu[2], Phillip Hamer[1]**

[1]School of Photovoltaic and Renewable Energy Engineering, UNSW , Australia

[2] CSI Solar Co. Ltd.

[*] E-mail: b.hoex@unsw.edu.au

## Abstract

Tunnel oxide passivated contact (TOPCon) solar cells dominate silicon PV production, but their boron-diffused front side is prone to ultraviolet-induced degradation (UVID). Using $AlO_x$/$SiN_x$-passivated lifetime samples (4 and 7 nm $AlO_x$) cycled through UV exposure, dark storage and annealing, we show that UV breaks Si–H bonds and causes hydrogen to accumulate at the Si/$AlO_x$ interface, raising $D_{it}$ three- to fourfold. Charge trapping in the $AlO_x$ temporarily raises $Q_f$ which partly compensates for the increase in $D_{it}$. Releasing this charge in the dark causes further degradation, and annealing at 85 °C restores passivation. Thicker $AlO_x$ and firing improve UV stability. In-situ photoluminescence on eight commercial TOPCon cells under UV exposure up to 60 kWh/m² at 25–85 °C reveals three stages: an initial rise from charge trapping, a fast loss from Si–H bond breaking, and a slow loss limited by hydrogen transport from the $SiN_x$:H. The fast and slow components are distinct: the fast one saturates within a few kWh/m² and the slow one over tens of kWh/m², so the final degradation state can be extrapolated from the kinetics. Both decrease with temperature ($E_a \approx -0.09$ eV) and with visible light, showing that recovery competes with degradation. Because UVID is dynamic, module and field testing must both account for it, with defined pre-conditioning, doses long enough to rank products correctly, and reported temperature and illumination.

**Keywords:** TOPCon; UV induced degradation

**Biography:**

Bram Hoex is a Professor and Deputy Head at UNSW Sydney's School of Photovoltaic and Renewable Energy Engineering. His research focuses on solar cell efficiency improvement, reliability and performance, financial and performance yield modelling, and the application of artificial intelligence for material discovery. He published over 300 papers and has received multiple international awards, including the 2008 SolarWorld Junior Einstein and 2016 IEEE PVSC Young Professional. In 2018, Renewable Energy World featured him on their global "Solar 40 under 40" list.

Invited Talk

# Pioneering silver-lean metallisation for sustainable terawatt-scale PV

**Brett Hallam[1], Li Wang[1], Zhen Yang[1], Bruno Vicari Stefani[1], Catherine Chan[1], Yansong Wang[1], Kuninori Okamoto[2], Dongliang Wang[2], Yifu Shi[2], Marwan Dhamrin[3], Weiguang Yang[4]**

[1] School of Photovoltaic and Renewable Energy Engineering, University of New South Wales, Australia

[2] Changzhou Fusion New Materials Co., Ltd

[3] Toyo Aluminium K.K., Japan

[4]Jolywood (Taizhou) Solar Technology Co., Ltd.

[*] E-mail: brett.hallam@unsw.edu.au

## Abstract

Silver consumption is a critical constraint on the cost and sustainable scaling of photovoltaics. In 2021, our group proposed a silver consumption target of 2 mg/W for sustainable multi-terawatt-scale manufacturing. In parallel, we developed a screen-printed metallisation concept that separates the functions of conventional silver fingers: intermittent silver "dash" contacts form a low-resistance contact with the silicon, while continuous silver-lean or silver-free fingers provide lateral current transport, allowing silver to be used only where it is essential. This approach meets the requirements to achieve 2 mg/W once optimized, using existing screen-printing technology and without sacrificing efficiency.

This concept has since gained substantial industry momentum, with leading paste and cell manufacturers now pursuing related silver-seed, silver-coated copper and copper metallisation systems. Successful implementation, however, depends not only on the metallisation design but also on critical process know-how.

This presentation will review the technology's development and growing industrial impact, and provide an update on results from UNSW and its industry partners. Pilot production has demonstrated full-area TOPCon cells exceeding 25% efficiency. Recent optimisation achieved a silver consumption of 4 mg/W, with the best-performing cell only 0.2% absolute below the silver-reference efficiency. Importantly, the silver-lean design delivered an open-circuit-voltage improvement of up to 10 mV over the reference, reaching 748 mV. This exceptionally high voltage for industrial TOPCon cells highlights a key advantage of the technology: by limiting the metallised contact area, it can reduce silver consumption while also reducing contact-related recombination. Additional work has demonstrated silver consumption as low as 2 mg/W using existing manufacturing toolsets, although further work is required to address processing issues resulting in lower efficiencies. These advances provide a practical pathway toward high-efficiency, silver-sustainable TOPCon manufacturing at terawatt scale.

The technology is now in early stages of commercial production, with commercially available paste systems now available, and several companies in large scale pilot testing.

**Keywords:** Silver-lean metallisation; Screen printing; TOPCon solar cells; Copper metallisation; Terawatt-scale photovoltaics

**Biography:**

Professor Brett Hallam is an internationally recognised leader in silicon photovoltaics, with more than 20 years of experience translating research into industrial innovation. He pioneered advanced hydrogenation technologies now used throughout the global solar industry to improve the efficiency and reliability of silicon solar cells. He has worked extensively with many of the world's leading solar cell and module manufacturers, particularly in hydrogenation and advanced metallisation technologies. His research has attracted more than $40 million in funding and resulted in over 200 publications and 12 granted patents. Professor Hallam's contributions have been recognised through numerous awards, including the 2022 Prime Minister's Prize for Science – Malcolm McIntosh Prize for Physical Scientist of the Year, the 2020 IEEE Stuart R. Wenham Young Professional Award, the 2017 NSW Premier's Prize for Energy Innovation, and selection as a finalist in the 2018 Australian Museum Eureka Prize for Emerging Leader in Science.

Invited Talk

# Less weight, more possibilities: development of lightweight PV modules for integrated applications and reliability challenges

**Bin Luo**

Forschungszentrum Jülich GmbH, Institute of Energy Materials and Devices – Photovoltaik (IMD-3), Germany

E-mail: b.luo@fz-juelich.de

## Abstract

On the roadmap towards "PV everywhere", lightweight PV modules provide opportunities for solar integration into many applications, such as vehicles and buildings especially with weight constrained structures. However, their reliability under different application-specific usage scenarios requires more investigation. This presentation combines development and reliability assessment on lightweight PV modules for vehicles and textile roofs, covering both rigid and flexible module architectures. Standard PV reliability testing based on IEC 61215, including thermal cycling, damp heat, hail impact, have been conducted on different module structures. The results demonstrate that fiber reinforced polymers, optimized encapsulation design and interconnections can improve the reliability of lightweight PV modules significantly. Additional application-specific tests, including cyclic bending and fire testing, further suggest the importance of selecting encapsulation and reinforcement materials tailored to the intend application. These results highlight the need to link material properties and failure mechanisms with operating conditions and integration requirements of each application. This approach provides guidance for the development of reliable lightweight PV modules in integrated PV applications.

**Keywords:** Lightweight PV modules; Integrated PV; Reliability

Invited Talk

# Stable luminescent downshifting coatings for efficiency enhancement in commercial silicon photovoltaics

**Minya Zhou[a], Terry Chien-Jen Yang,[a,b], Romano Maximo Do Rosário[c], Hanchen Li[a], Yiyu Zeng[a] , Minh Tien Tran[a] , Ben P. Carwithen[c], Robert J. Patterson[a], Scott A. Sulway[c], Jarrod R. Thomas[c] , Shujuan Huang[d] , Jiang Tang[e], Martin A. Green[a] , Jessica Yajie Jiang[a*]**

[a] School of Photovoltaic and Renewable Energy Engineering, UNSW, Australia

[b] Department of Electrical and Computer Engineering, National University of Singapore (NUS), Singapore

[c] School of Chemistry, UNSW, Australia

[d] School of Engineering, Macquarie University, Australia

[e] Wuhan National Laboratory for Optoelectronics (WNLO) and School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology

[*]E-mail: yajie.jiang@unsw.edu.au

## Abstract

The spectral response of commercial silicon solar cells is limited in the ultraviolet (UV) and blue region, where high energy photons suffer from parasitic absorption and contribute to UV induced degradation. Luminescent downshifting (LDS) layers address this limitation by converting high energy photons into longer wavelengths that are more efficiently utilised by silicon. However, the performance of such layers is governed by the emitter. Perovskite nanocrystals offer high photoluminescence quantum yield (PLQY), tuneable emission and strong absorption, but their practical application has been limited by weakly bound surface ligands. Ligand loss introduces surface defects that quench luminescence, particularly during incorporation into polymer encapsulants and under prolonged environmental exposure.

In this work, a robust surface passivation strategy is developed for $CsPbBr_3$ nanocrystals. It suppresses non-radiative recombination and achieves near unity PLQY. The passivated nanocrystals retain this luminescence efficiency when embedded in ethylene vinyl acetate (EVA) and other polymer matrices. They also show excellent stability under ambient storage, thermal stress, UV irradiation and water immersion. Integrated as an EVA based LDS layer on commercial silicon solar cells, the nanocrystals substantially enhance the ultraviolet external quantum efficiency. Relative to an EVA coated reference, the LDS layer yields a net gain of 0.63 mA $cm^{-2}$ in short circuit current density and 0.35% absolute in power conversion efficiency, with a champion efficiency of 25.93%. The enhancement is further confirmed by spectral correction to the AM1.5G reference spectrum. These results demonstrate a scalable, encapsulant compatible route to improving the efficiency of commercial silicon photovoltaics.

**Keywords:** Luminescent downshifting; Perovskite nanocrystals; Si solar cells; Spectral conversion; UVID

**Biography:**

Jessica is a Scientia Associate Professor at UNSW Sydney, and UNSW Node Leader for the Australian Centre for Advanced Photovoltaics (ACAP), Australia's national centre for solar energy research. Her research spans the full spectrum of solar energy innovation: improving the efficiency and reliability of commercial silicon devices, pushing efficiency beyond conventional limits through photon multiplication that transform high energy photons into multiple lower energy photons to boost solar cell performance, investigating the long-term stability of perovskite and tandem modules (www.prove.org.au), and broadening photovoltaic applications in buildings and vehicles.

Beyond her research, Dr Jiang also initiated and lead the ELICE Program (www.elice.org.au), funded by the Australian Government Department of Foreign Affairs and Trade, which empowers the next generation of clean energy leaders and promotes collaboration and communication between Australia and China.