

面向度电成本持续下降的量产晶硅太阳能电池技术发展研究

朱鹏浩

(鄂尔多斯市隆基光伏科技有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘要 晶硅太阳能电池近年来在全球光伏产业持续占据主导地位, 其量产技术正加速迭代, 为光伏度电成本持续下降提供关键动力。从技术路径来看, PERC 技术的规模化普及奠定了高效量产基础, 而 TOPCon 与异质结电池 (HJT) 凭借更优的载流子选择性与钝化性能实现效率进一步突破, 背接触 (BC) 结构则通过减少栅线遮光在功率输出与度电成本方面展现出综合优势。技术发展主要从材料提升、结构创新与工艺优化协同推进: 高质量硅片、先进的界面钝化及金属化工艺共同支撑效率提升, 低温金属化与高度自动化装备则促进制造成本降低。未来, 晶硅电池技术将继续在多维度协同发展, 通过工艺、结构与装备的系统创新, 实现更高效率与更具竞争力的成本控制。

关键词 新能源; 光伏; 晶硅; 产业技术

基金项目: 高效太阳能电池的钝化及减反射效率提升关键技术研究与应用 (项目编号: YF20250287)。

中图分类号: TM91

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.005

0 引言

在全球气候变化加剧与能源安全挑战加速叠加的背景下, 实现碳达峰与碳中和已成为主要经济体的共同战略方向。作为增长最快、成本下降最显著的清洁能源, 光伏发电正处于全球能源转型的核心位置。自 2000 年以来, 全球光伏产业完成了从“边缘补充能源”到“主力替代能源”的跨越式跃迁: 2000 年全球累计光伏装机仅 1.29 GW, 占全球电力装机比重不足 0.01%, 处于能源体系的边缘位置; 随着德国《可再生能源法》(EEG 2000) 的实施, 以及日本、美国等国相继推出补贴政策, 全球光伏市场进入规模化发展期, 2010 年累计装机突破 41 GW, 较 2000 年增长超 30 倍。2015 年后, 中国凭借完整产业链优势成为全球增长核心, 叠加欧洲能源转型加速、美国本土制造政策推动, 全球光伏装机迎来爆发式增长: 2015 年累计装机达 226 GW, 2020 年跃升至 760 GW, 5 年间规模扩张超 2.3 倍。进入本世纪第三个十年, 光伏产业增长进一步提速, 2023 年全球新增装机达 447 GW, 同比增长 50%; 截至 2024 年底, 全球累计装机突破 2 000 GW (2 TW), 较 2000 年增长超 1 500 倍, 成为人类能源史上发展速度最快的发电技术^[1]。

光伏发电在全球电力结构中的占比也同步大幅提升。2000 年光伏发电量占全球总发电量不足 0.1%, 是典型的补充性能源; 2010 年占比升至约 0.5%; 到 2020

年已突破 3%, 德国、西班牙、澳大利亚占比超过 10%; 2023 年全球占比达到约 5.5%~6%, 成为仅次于水电、风电的第三大可再生能源形式。在部分国家和地区, 光伏在高峰负荷时段已具备主力能源特征, 对电力系统调度方式和市场机制产生实质性影响。随着组件效率持续提升、电站建设成本不断下降以及储能与智能调度技术快速发展, 光伏发电量占比仍将保持快速上升趋势, 预计到 2030 年全球占比有望达到 15% 左右, 并在部分国家达到 30% 以上^[2]。与此同时, 以技术升级为主线贯穿的产业链竞争正持续激化, 企业在效率、成本、可靠性等多个维度上的内卷态势加速显现。在此背景下, 对量产晶硅太阳能电池的技术迭代路径进行系统梳理, 对于把握未来技术发展方向、支撑产业投资布局与企业战略决策具有重要的现实意义。

1 晶硅太阳能电池技术研发与量产过程

晶硅电池的技术研发可追溯至 1950 年代。当前主流电池结构的原型包括 Al-BSF、PERC、SHJ、TOPCon 及 BC, 其关键技术突破大多集中在 1970 年至 1980 年完成^[3], 制造成本高, 应用场景主要局限于航天卫星等高价领域, 辅以少量地面示范项目。来自中国、美国、德国、澳大利亚、日本等国的科研力量, 围绕设备、材料与工艺等核心环节持续攻关, 局域钝化、选择性激光掺杂、光学减反膜、载流子隧穿、金属化同

作者简介: 朱鹏浩 (1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 量产晶硅太阳能电池技术发展。

步扩散钝化等底层技术相继问世并逐步成熟。服务于电池制造的关键装备体系亦同步完善，化学气相沉积、物理气相沉积、原子层沉积、湿法清洗、高温烧结等设备在性能指标与产能输出方面均实现持续提升。

进入本世纪后，随着全球气候变暖议题升温，晶硅太阳能电池作为关键可再生能源技术，开始迈向量产和大规模应用阶段。图1呈现了2000年以来的量产演进轨迹。面向碳中和目标，晶硅电池的研发与量产迄今已历经四轮技术迭代。在前三轮（Al-BSF、PERC、TOPCon）的迭代过程中，光伏行业完成了产业化能力的系统构建：原材料体系日趋完备，装备能力持续进阶，制造工艺不断精进，电池效率稳步提升。新技术从研发走向量产的迭代周期，也从约10年压缩至5年、再进一步收窄至3年。这一阶段整体可概括为双面电池时代。此后，在日趋完善的光伏制造产业链支撑下，制造难度更高但效率潜力更大的背接触电池启动大规模量产进程。与此同时，硅片厚度持续下降，从180 μm 降至150 μm ，进一步下降至130 μm ；自TOPCon开始，硅片掺杂类型从P型转向少子寿命更高的N型，为效率提升提供关键支撑。从技术发展的内在逻辑来看，晶硅电池完成了从扩散电极结构向钝化接触电极结构的转化，这是电池性能持续提升的根本动因。BC技术的推进，标志着电池结构从传统的“界面优化”向“全维度载流子管理”转变，对工艺窗口控制、材料纯度、界面工程及大规模装备升级提出更高要求，推动晶硅电池技术从效率驱动阶段进一步迈向系统化、精细化和智能化的发展轨道。

1.1 PERC 前时代（2000–2020）

2000年德国出台《可再生能源法》（EEG 2000），建立系统性的光伏上网电价补贴及配套机制。这一政策工具迅速拉动本土光伏市场扩张，并引导全球光伏产业迈向量产规模化与成本持续下行的通道，对行业发展产生深远影响。此后二十年，Al-BSF 电池尽管效率受限，但因结构简单、成本低廉而率先实现大规模量产，并长期占据市场主流地位。PERC 电池在 Al-BSF 基础

上引入背面钝化层及局部开孔技术，显著提升光利用率与载流子寿命，量产效率较 Al-BSF 明显占优，并逐步开启替代进程。自2015年起，中国光伏企业加速布局，持续扩张 PERC 产能，背钝化与激光装备成本快速下降，PERC 进入吉瓦级量产阶段。此后 PERC 成为行业主流技术路线，量产效率突破21% 关口，全球扩产潮持续加速。至2019年，PERC 完成对 Al-BSF 的全面替代，占据全球晶硅电池80% 以上份额，确立主流地位。

PERC 前时代（2000–2020 年）的核心特征在于政府补贴对晶硅电池研发与产业化的强力拉动。在这一时期，中国光伏产业完成了关键技术与装备的全面国产化，显著降低晶硅电池的量产成本，推动行业逐步摆脱补贴依赖，最终迈入平价上网时代。同时，这一阶段的快速演进还为后续高效电池技术的迭代奠定了必要基础：一方面，PERC 的量产验证证明了钝化技术和激光图形化在大规模制造场景下的可行性；另一方面，补贴驱动的旺盛市场需求，倒逼企业持续优化硅片质量、清洗钝化与金属化工艺，推动行业在材料标准化、设备可靠性和生产管理体系方面快速成熟，为 TOPCon、SHJ 及 BC 等高效路线的工业化创造了前提条件。

1.2 PERC 后时代（2020 年后）

2020 年后，晶硅太阳能电池技术进入高效化与智能制造协同推进的新阶段。PERC 技术逐步接近效率极限，TOPCon、HJT、BC 等下一代电池加速量产进程，推动光电转换效率持续提升。产业链日趋成熟，设备国产化程度进一步提高，吉瓦级产能成为常态，自动化与数字化技术广泛应用，有效提升生产效率与生产良率。与此同时，硅片减薄、银耗降低、材料回收等措施持续推进，有效降低碳足迹，支撑产业向可持续方向发展。整体而言，技术升级与降本并行，推动光伏产业迈向高质量发展轨道。

2024 年始，TOPCon 电池完成对 PERC 的技术替代，成为行业主流技术路线。2025 年起，BC 电池进入全面量产阶段，逐步形成对 TOPCon 的替代态势。PERC 后时代的核心特征在于钝化接触电池技术的密集研发带动

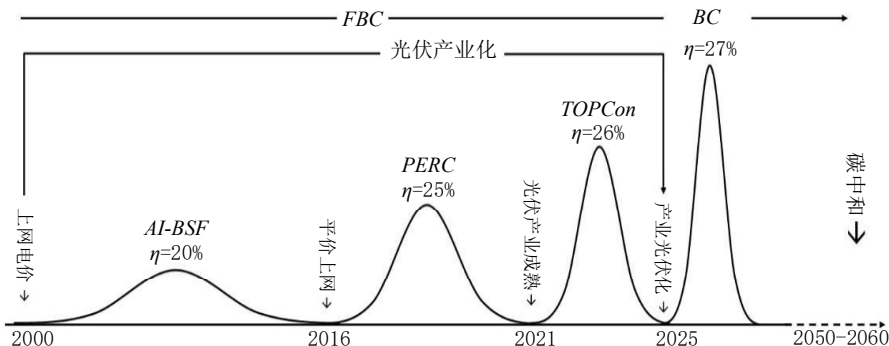


图1 量产晶硅太阳能电池的技术迭代过程

效率快速提升,多种技术路线并行发展,电池成本持续下行。TOPCon 电池最高光电转换效率已达 26.6%,HJT 电池最高效率达 26.81%,BC 电池效率纪录更提升至 27.81%^[4]。这一系列全球领先的效率突破均由中国企业创造,标志着中国光伏产业在高效晶硅电池技术上实现从“追赶者”到“引领者”的根本性跃升。中国企业不仅在吉瓦至太瓦级的量产规模化方面具备无可比拟的产业链优势,更在设备创新、工艺开发、材料体系优化和大规模技术验证等关键环节形成系统化能力,使实验室效率的突破能够快速转化为产业化成果。

与此同时,产业竞争持续加剧,技术与产能层面的内卷现象显著显现。此外,该阶段的发展呈现更强的系统化特征:一方面,企业通过机器学习、数字孪生和高级过程控制持续提升制造精度,使效率提升从“材料驱动”转向“工艺一装备协同驱动”;另一方面,政策端对碳足迹、供应链韧性与能源安全的要求不断提高,促使高效电池向更低耗材、更高可靠性和更强可持续性方向加速发展,形成技术、制造与市场三重驱动力相互叠加的共振格局。

2 量产晶硅太阳能电池技术升级趋势

2.1 量产技术迭代新特征

当前晶硅太阳能电池量产技术的升级,呈现三个显著特征:技术迭代频率持续加快、金属化降本路径快速推进、智能制造效益日益凸显。以 TOPCon 电池为例,量产完成后,LECO 技术的导入带来约 0.5% 的效率增益,且工艺简单、设备投资较低;随后激光图形化技术快速跟进,进一步提升电池效率与双面率^[5]。面向功率提升的半片钝化、多分片、高密度封装等技术陆续应用,在微弱提升电池效率的同时显著增加组件功率输出。为降低成本,细线径网版、金属网版等技术快速升级,贱金属浆料研发持续推进。

值得重点关注的是,量产晶硅电池常用金属材料银的价格,整体呈现单边上行态势。年初银价约 6 900 元/公斤,受工业需求与投资配置推动,至年中稳步升至 8 300 元/公斤左右;第三季度涨势加快,9 月接近 10 000 元/公斤;第四季度在供给偏紧与宏观预期叠加影响下明显拉升,年末一度接近 14 000 元/公斤,全年涨幅显著。这一价格走势进一步推动无银金属化技术的尽快导入量产应用。导电性良好、价格更低的铜和铝在晶硅电池上的金属化技术,亟待从实验室走向制造车间。这已成为行业降本议程中绕不开的课题。

相较于 PERC 电池, TOPCon 在装备和工艺智能化控制、精益制造能力方面优势明显,有力保障了规模化量产的稳定性。BC 电池在完成技术验证后,龙头企业迅速推动产线升级,效率、产能、良率同步提升,快

速缩小与 TOPCon 的成本差距。同时,工艺优化与材料升级进一步改善了电池在长周期运行条件下的稳定性,使组件在湿热、光致衰减和机械载荷等多重应力下表现更优。此外,背接触架构在量产中对精准掺杂、金属化均匀性和焊接可靠性的要求更高,也倒逼企业加强装备精密度与工艺闭环控制体系的建设。智能制造效益进一步凸显:AI 良率预测、在线缺陷检测及数据驱动工艺控制,实现产能、效率和良率同步提升,减少人工干预与生产波动,并通过数据反馈优化设计与工艺。这种能力逐渐成为头部企业的核心竞争壁垒。

技术迭代加速、降本路径清晰、智能制造深化三者协同推进晶硅电池量产技术的持续发展,加速产业向规模化、绿色化与高质量发展方向迈进,同时亦加剧行业竞争与技术内卷,成为当前全球光伏产业发展的核心特征。

2.2 新挑战与智能制造

在效率提升的持续驱动下,工艺复杂度不断增加;在成本压力的持续传导下,生产良率要求持续提高;在竞争持续激化下,精益制造与严格管控成为必然选择。这三方面因素共同构成量产晶硅技术迭代新格局下的核心挑战。面对上述挑战,为持续支撑电力变革所需的高效晶硅电池产品供给,智能制造逐渐成为破局的关键利器,通过数据驱动和自动化控制,实现效率、良率与成本的协同优化。

在晶硅太阳能电池量产过程中,智能制造已日益成为提升效率、降低成本和保障良率的核心手段。通过数据驱动的工艺控制,生产过程中的温湿度、镀膜均匀性、湿法化学成分、丝印流变特性、激光能量分布等关键参数实现实时监控与自适应调节,从根源上减少人工介入带来的波动,提升工艺重复性和电池一致性。基于机器视觉与深度学习的缺陷检测系统,能够在毫秒级时间窗口内识别隐裂、黑斑、针孔及金属化缺陷,并与 MES 等制造执行系统联动,实现异常根因定位和工艺闭环优化,加速产线稳定化进程。例如:在一些头部企业的量产线上,这套系统的误判率已控制在 0.2% 以内。

智能制造平台可实现设备集群控制、跨机台协同调度和产线节拍优化,使吉瓦级产能在复杂订单结构下仍保持高稼动率与低库存水平。物流系统与工艺参数的动态联动,有助于降低在制品周转周期并提升设备综合效率,从而在成本竞争中形成体系化优势。智能制造还强化了从研发到量产的“数字孪生”能力,通过模拟关键节点的电学与光学行为,预测工艺窗口变化对效率、衰减和大规模制造稳定性的影响,为 TOPCon、BC 等新技术的规模化落地提供决策依据,这使得新技术从实验室到量产线的导入周期进一步压缩。

综合来看,智能制造不仅能有效降低晶硅电池的度电成本和工艺风险,还建立起高效、可靠、低波动的量产体系,为高效电池的大规模制造和全球光伏产业向更高质量阶段发展提供了关键支撑,成为当前晶硅电池技术迭代和产业升级的核心驱动力。

3 量产晶硅技术与新型电力系统的协同

源网荷储的新型电力系统以“源—网—荷—储”协同为核心,通过光伏发电、储能系统、电网调度和负荷管理的有机结合,实现能源的高效生产、传输、分配和利用。该体系不仅提升了可再生能源接入比例和系统灵活性,还可根据负荷特性和用户需求优化能源配置,支持多场景应用,推动电力系统向智能化、低碳化和高可靠性方向发展。同时,在高比例新能源占比背景下,源网荷储协同能够有效应对短时波动和负荷不确定性,提升系统稳定性与安全裕度,为建设新型电力系统奠定基础^[6]。

光伏产业以客户需求为导向,紧密结合不同应用场景,推动细分市场发展。其包括户用光伏、分布式

光伏、工商业屋顶及光储一体化等多样化应用,BIPV(光伏建筑一体化)、VIPV(光伏汽车一体化)、光伏交通基础设施等新兴应用场景正快速扩展。同时,源网荷储一体化方案通过将发电、储能、逆变、能量管理与用户侧负荷深度耦合,使光伏从单一“发电设备”升级为“综合能源节点”,具备负荷调节、需求响应和削峰填谷功能。对客户而言,通过系统级设计优化、智能EMS调度、运维数字化及全生命周期管理,可实现更高的能量利用率、更低的度电成本和更强的供能稳定性。

通过优化系统设计、设备配置和运维策略,不仅满足了不同客户在功率、效率、成本和可靠性上的需求,也提升了光伏在能源结构中的调节能力和经济价值,推动产业从单一发电向高效、智能、多功能的综合能源解决方案转型。图2显示,在源网荷储的新型电力系统中,量产晶硅电池的技术、产品与整体方案以客户为中心,支持光伏发电站、光伏+应用一体化及光储一体化等多样化场景,实现发电、储能与负荷管理的深度协同,使光伏成为新型电力系统的核心支撑力量。

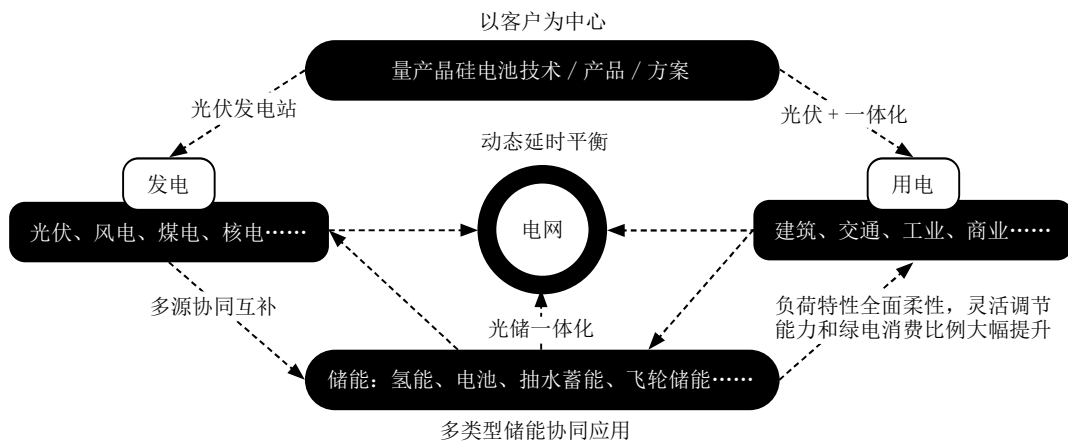


图2 量产晶硅电池技术/产品/方案等在新型电力系统中的角色

4 结束语

过去二十五年间,量产晶硅太阳能电池技术经历了从Al-BSF、PERC到TOPCon和BC的迭代发展。在PERC时代实现平价上网之后,技术迭代频率显著加快,智能制造成为满足效率与成本要求的关键手段。同时,在新型电力系统背景下,晶硅电池的生产与技术升级需以客户为中心,在发电、储能与负荷协同应用中持续优化,以支撑多场景综合能源解决方案的高效运行。

参考文献:

[1] 德国机械设备制造业联合会. 国际光伏技术路线图(ITRPV)2022年度结果(第十四版)[EB/OL].<https://www.vdma.org/international-technology-roadmap-photovoltaic>.

<https://www.vdma.org/international-technology-roadmap-photovoltaic>.

[2] 国际能源署. 可再生能源2024[EB/OL].<https://www.iea.org/reports/renewables-2024>.

[3] 马丁·格林. 硅太阳能电池: 演进、高效设计与效率提升[J]. 半导体科学与技术, 1999(08):1-12.

[4] 马丁·格林, 伊万·邓洛普, 吉田正弘, 等. 太阳能电池效率表(第66版)[J]. 光伏进展: 研究与应用, 2025,33(07):795-810.

[5] 费尔梅斯, 汉内斯·赫夫勒, 塞巴斯蒂安·马克, 等. iTOPCon太阳能电池的激光增强接触优化[J]. 光伏进展: 研究与应用, 2022,30(12):1393-1399.

[6] 李飞. 新能源发展背景下的源网荷储一体化策略研究[J]. 工程技术创新与发展, 2025,03(10):100-102.