

钙钛矿太阳能电池国际战略规划 及发展态势分析*

边文越** 李国鹏 周秋菊

(中国科学院科技战略咨询研究院,北京 100190)

摘要:本文全面调研了美国、欧盟、日本及我国在钙钛矿太阳能电池领域的战略规划和项目部署情况,并基于权威机构认证数据,总结了钙钛矿太阳能电池研究最新进展,比较了各国技术实力。研究发现,各国都重视钙钛矿太阳能电池这一新兴技术,积极部署基础研究并推动其实用化和产业化;钙钛矿太阳能电池研究单元效率已突破 23%,稳定性和大规模制备技术不断提高;我国在基础研究方面已经后来居上,创造了研究单元效率纪录,但在大规模印刷制备技术方面与美、欧、日等国家或地区还有一定差距。基于此,本文对我国发展钙钛矿太阳能电池以及钙钛矿材料提出了三点建议。

关键词:钙钛矿太阳能电池;战略规划;基础研究;产业化;大规模制备

中图分类号:G353.11;P578.4+91 文献标识码:A doi:10.16507/j.issn.1006-6055.2019.04.005

Strategic Plans and Research Trends of Perovskite Solar Cells*

BIAN Wenyue** LI Guopeng ZHOU Qiuju

(Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In this paper, the strategic plans and deployed projects of the U. S., EU, Japan and China in the R&D of perovskite solar cells (PSCs) were comprehensively investigated, the latest R&D progress of PSCs was summarized based on the confirmed results, and the strengths of each country/region were compared. It was found that the mentioned countries and regions all put emphasis on PSCs, actively funding basic research and promoting its commercialization. The efficiency of PSCs has exceeded 23%, and the stability and scale-up manufacturing technology were also improved. China has come to the forefront in terms of basic research in PSCs, creating latest efficiency records, but fell behind in the field of scale-up manufacturing. Finally, three suggestions were proposed for R&D of the PSCs and perovskite materials in China.

Key words: perovskite solar cells; strategic plans; basic research; commercialization; scale-up manufacturing

钙钛矿太阳能电池是以钙钛矿材料作为吸光层的太阳能电池,其光电转换效率从 2009 年首次报道时的 3.8%,到 2018 年已经突破了 23%。2013 年,钙钛矿太阳能电池被《科学》杂志评为年

度十大突破之一^[1];2016 年,又被“世界经济论坛”评为当年十大新兴技术之一^[2]。

钙钛矿太阳能电池的优点主要有三点:钙钛矿材料来源丰富、成本低;光电转换效率高、易于

* 中国科学院科技战略咨询研究院院长青年基金(Y8X1111Q01)资助

** 通讯作者, E-mail: bianwenyue@casisd.cn

制造;可与硅太阳能电池形成串联结构,实现更高效率。同时,其面临的主要挑战也有三点:稳定性差(受水分、氧气、热、紫外线影响);含有毒物质铅;可放大、可重复的高质量钙钛矿薄膜制备过程存在困难^[3]。

如表1所示,钙钛矿太阳能电池研究主要集中在各种新型电池设计以及钙钛矿吸光层材料、电子传输材料、空穴传输材料等基础研究方向。特别值得注意的是,“钙钛矿薄膜大面积制备”“钙钛矿薄膜高质量成膜及缺陷修复”等涉及钙钛矿材料大规模高质量制备的方向已成为研究前沿,说明钙钛矿太阳能电池的研究正在从实验室向实用化、产业化方向迈进。

表1 ESI数据库中的钙钛矿太阳能电池研究前沿¹⁾

Tab.1 Research fronts of perovskite solar cells in the ESI database¹⁾

	电池设计	基础研究
研究前沿	<ul style="list-style-type: none"> • 有机无机杂化钙钛矿太阳能电池 • 金属离子掺杂钙钛矿太阳能电池 • 无铅钙钛矿太阳能电池 • 无机钙钛矿太阳能电池 • 钙钛矿/硅串联电池 • 平面异质结钙钛矿太阳能电池 • 半透明钙钛矿太阳能电池 • 柔性钙钛矿太阳能电池 	<ul style="list-style-type: none"> • 迟滞现象 • 自旋-轨道耦合延长载流子寿命 • 钙钛矿材料结构 • 钙钛矿材料稳定性 • 钙钛矿材料缺陷 • 钙钛矿材料中氯的作用 • 混合卤素阴离子钙钛矿材料光致相分离 • 电子传输材料 • 空穴传输材料 • 钙钛矿薄膜高质量成膜及缺陷修复 • 钙钛矿薄膜大面积制备

1)2018年3月数据。

1 各国战略举措

为了尽快将钙钛矿太阳能电池从实验室推向实用化,美国、欧盟、日本和我国采取了一系列战略举措。

1.1 美国

1.1.1 战略规划

2011年2月,美国能源部发起 Sunshot 重大

挑战计划,旨在通过提供从研发、制造到市场化的全面解决方案,加速太阳能发电技术在全美的广泛部署,实现2020年太阳能发电平价上网目标,即大型光伏系统平准化电力成本降至6美分/千瓦时(表2)。2017年,该目标提前实现,新的目标是到2030年将大型光伏系统发电成本再降低一半^[4]。

表2 美国能源部 Sunshot 重大挑战计划

Tab.2 The SunShot grand challenge of the U. S. Department of Energy

适用对象	平准化光伏发电成本(美元/千瓦时)			
	初始情况(2010)	初始目标(2020)	完成情况(2017)	新的目标(2030)
住宅	0.52	0.10	0.16	0.05
商用	0.40	0.08	0.11	0.04
公用	0.28	0.06	0.06	0.03

钙钛矿太阳能电池以其高效率、低成本的优势,成为 Sunshot 计划支持的研究方向之一。沿着从基础研究到应用开发整个创新链条,美国能源部通过一系列项目部署、多种协同创新机制,推动钙钛矿太阳能电池从实验室走向市场。

1.1.2 项目部署

对于钙钛矿太阳能电池研究,美国能源部2014年在第三轮“下一代光伏技术”项目中首次资助了5项^[5];2016年,在“国家实验室多年合作”项目中资助了2项^[6](表3);2016—2017年,连续两年在“光伏研究和开发”项目中提供支持^[7];2017年,在第三轮“技术到市场”项目中支持了1项^[8](表4)。通过这四类项目,能源部围绕钙钛矿太阳能电池实用化部署了提高电池效率、替代铅、提高稳定性、研究降解机制、开发新材料等一系列基础和和应用研究,特别是投资发展低成本、高速卷对卷生产工艺,表明了其积极推动技术从实验室向产业化方向转移的态势。

表3 美国能源部“下一代光伏技术”和“国家实验室多年合作”项目资助的钙钛矿太阳能电池研究

Tab.3 Projects related to perovskite solar cells in “next generation photovoltaics” and “SunShot national laboratory multiyear partnership” programs from the U. S. Department of Energy

项目类型	承担单位	研发重点	资助金额(美元)
下一代 光伏技术	杜克大学	提高钙钛矿太阳能电池效率,替代铅元素,提高材料/电池稳定性	1,300,002
	斯坦福大学	开发钙钛矿薄膜材料,并沉积到硅基太阳能电池顶部; 研究钙钛矿器件的主要降解机制、对于水和氧气的稳定性上限	1,484,623
	国家可再生能源实验室	开发高效单结钙钛矿太阳能电池; 开展理论建模,提高对钙钛矿材料与器件性质的认知; 开发基于卤化物钙钛矿的超高效叠层薄膜器件	1,360,000
	内布拉斯加-林肯大学	开发钙钛矿太阳能电池作为顶电池、晶硅电池作为底电池的叠层多结电池,转换效率提高到30%以上,成本增幅最小化	1,211,075
	华盛顿大学	开发宽带隙复合钙钛矿材料和新型叠层器件架构,转换效率超过25%	1,500,000
国家实验室多年合作	国家可再生能源实验室	开发高效、稳定、可量产的杂化钙钛矿太阳能电池 通过化学气相沉积法制备更加稳定的钙钛矿材料	4,000,000 125,000

表4 “光伏研究和开发”和“技术到市场”项目资助的钙钛矿太阳能电池研究

Tab.4 Projects related to perovskite solar cells in “photovoltaic research and development” and “technology to market” programs

项目类型	承担单位	研发重点	资助金额(美元)	机构匹配(美元)
光伏研究和开发	纽约州立大学布法罗分校	绿色、稳定、原料丰富的吸光材料,基于含硫族元素的钙钛矿材料	224,814	60,657
	科罗拉多大学博尔得分校	通过理论设计,发现富有前景、稳定、无铅杂化钙钛矿化合物 开发金属阳离子被部分等价取代的单钙钛矿以及具有不同价态金属阳离子的双钙钛矿吸光材料	225,000	25,000
			225,000	25,000
	科罗拉多矿业大学	开发新型空穴传输材料,以突破当前在成本、导电性、疏水性、无锂掺杂、稳定性等方面存在的瓶颈 设计新型钙钛矿太阳能电池模块,提高化学、热、机械稳定性	192,530	21,385
			225,000	56,250
斯坦福大学	钙钛矿/硅串联太阳能电池,钙钛矿太阳能电池作为顶电池	1,365,306	192,235	
技术到市场	能源材料公司、柯达公司、北卡罗来纳大学教堂山分校	低成本、高速卷对卷印刷生产钙钛矿太阳能电池模块,全面评测电池原型模块的效率和稳定性	2,000,000	2,378,892

1.1.3 协同创新

美国能源部通过多种协同创新机制推动钙钛矿太阳能电池研究和实用化。在这些机制中,既有侧重基础研究的能源前沿研究中心、能源材料网络,也有侧重应用开发的区域创新联盟、工程研究中心。虽然各有侧重,但这些协同创新机制都是通过构建包括大学、国家实验室、企业在内的产学研联盟来推动研究进步和实用化。

能源前沿研究中心是由来自美国大学、国家实验室、非盈利研究机构、企业甚至海外研究机

构的研究人员组成的跨学科、跨机构研究团队,主要从事基础研究。由能源部提供资金,第一轮(2009—2014)资助了46个,第二轮(2014—2018)资助了36个,第三轮(2018—2022)资助了42个。其中,至少有2个研究中心涉及钙钛矿太阳能电池研究^[9](表5)。

能源材料网络是以国家实验室为核心,围绕先进材料研发组成的国家实验室、高校、企业研究联盟,用以加快研发进程,缩短先进材料进入市场的时间。当前共有7家联盟,每个联盟关注

表5 从事钙钛矿太阳能电池研究的能源前沿研究中心

Tab.5 Energy frontier research centers related to perovskite solar cells

中心名称	牵头机构	钙钛矿太阳能电池方面研究内容	资助期	资助金额(万美元)
太阳能研究中心	西北大学	钙钛矿太阳能电池	2009—2014	1900
			2014—2018	1520
设计下一代材料研究中心	国家可再生能源实验室	开发5种不含铅的新钙钛矿材料	2014—2018	1400

一类先进材料。2016年9月,能源部宣布设立光伏模块耐用材料联盟,计划在此后五年投入3000万美元。该联盟由国家可再生能源实验室牵头,桑迪亚国家实验室、劳伦斯伯克利国家实验室、SLAC国家加速器实验室参与,旨在研究耐用的高性能光伏模块新材料,以实现平准化电力成本3美分/千瓦时目标^[10]。钙钛矿太阳能电池是其研究方向之一。

2011—2016年,能源部投资2500万美元设立了旧金山湾区光伏联盟(现仍在运行)。该联盟由斯坦福大学和加州大学伯克利分校牵头,工业合作伙伴包括通用电气、杜邦、Sunpower、道达尔、意大利国家电力公司、FirstSolar、Alta Deviecs、Siva Power等。联盟与工业界密切合作,由工业委员会确定研究优先方向和范围,面向大学招标,由工业委员会评审申请书,以确保研究方向与工业需求紧密配合。在联盟五大研究方向中,3个(高性能和多结太阳能电池、薄膜吸光层和薄膜太阳能电池、封装和可靠性)都涉及钙钛矿太阳能电池研究^[11]。

2011年,能源部和美国国家科学基金会联合成立“量子能量和可持续太阳能技术”工程研究中心,双方已累计投入4777万美元,用于支持中心直到2019年的研究项目。该中心由亚利桑那州立大学牵头,合作对象包括麻省理工学院、特拉华大学、加州理工学院、新墨西哥大学、佐治亚理工学院、亚利桑那大学、休斯顿大学、日本东京大学、澳大利亚新南威尔士大学、英国帝国理工

学院等海内外高校以及40多家企业。中心设有三大研究方向,其中之一是硅串联电池,目标是到2030年顶电池/硅串联太阳能电池模块效率大于30%,制造成本低于每平方米100美元。钙钛矿/硅串联结构是该方向技术路线之一^[12]。

1.1.4 发展方向

2017年6月,能源部发布《光伏创新路线图》意见征集,向利益相关方(学界和商界)征集钙钛矿太阳能电池实用化面临的最重要挑战和发展方向,得到的反馈包括成本、稳定性、效率、环保等一系列问题,未来发展方向包括总封装成本小于5美元/平米、使用寿命至少25年、年降解率降至0.2%、串联结构光电效率大于30%、铅减少一半或全部取代等(表6)^[13]。

1.2 欧盟

1.2.1 “地平线2020”计划

欧盟自2013年起在“第七框架”计划下资助钙钛矿太阳能电池研究,2014年起在“地平线2020”计划下继续资助。截至2018年10月,“地平线2020”计划已资助相关研究28项,累计投入3638万欧元(图1)。在项目数量方面,英国(9项)、西班牙(6项)、瑞士(6项)排名前三,且优势明显;在资助金额占比方面,瑞士(16.1%)明显落后西班牙(25.8%),位居第三位,且与排第四的比利时(14.9%)相差不大。通常认为在钙钛矿太阳能电池研究方面,英国和瑞士在欧洲范围居于领先,然而上述分析说明欧洲还有更多的国家和机构值得关注。表7列出了资助金额在200

表6 《光伏创新路线图》意见征集反馈(钙钛矿太阳能电池部分)

Tab.6 Responses related to perovskite solar cells to “photovoltaics innovation roadmap request for information”

挑战类型	具体描述	成本和效率目标
成本	开发轻量化、低成本封装,耐久性相当或高于玻璃封装	总封装成本小于5美元/平米
降解	提高钙钛矿太阳能电池耐久性的材料和加工工艺	25年使用寿命
	钙钛矿材料不稳定	长产品寿命
	钙钛矿太阳能电池在湿气中快速降解	降解率降至每年0.2%
	提高长期稳定性	降解率降至每年0.2%,寿命延长至30年
效率	研究材料组成、结构、制造工艺、封装,提高可靠性	模块光电转换效率每年降低不超过2%
	吸收层带隙1.7 eV,稳定且可大面积制备	串联电池光电效率大于30%
湿气侵入	钙钛矿太阳能电池湿气瓶颈	降低年降解率
科学理解	明确如何掺杂钙钛矿材料对其效能最优	更好地理解缺陷,哪些必须去除,哪些不必,从而节省成本
	认识体相和界面降解的物理和化学机理	降低年降解率
	区分光和湿气造成的降解	玻璃封装的电池测试结构的降解率降至每年0.2% (没有湿气降解,只有光降解)
毒性	铅的存在	全部或替代一半铅
一致性	提高电池/模块的一致性和制造质量	(全年生产)资本支出每瓦特5美分

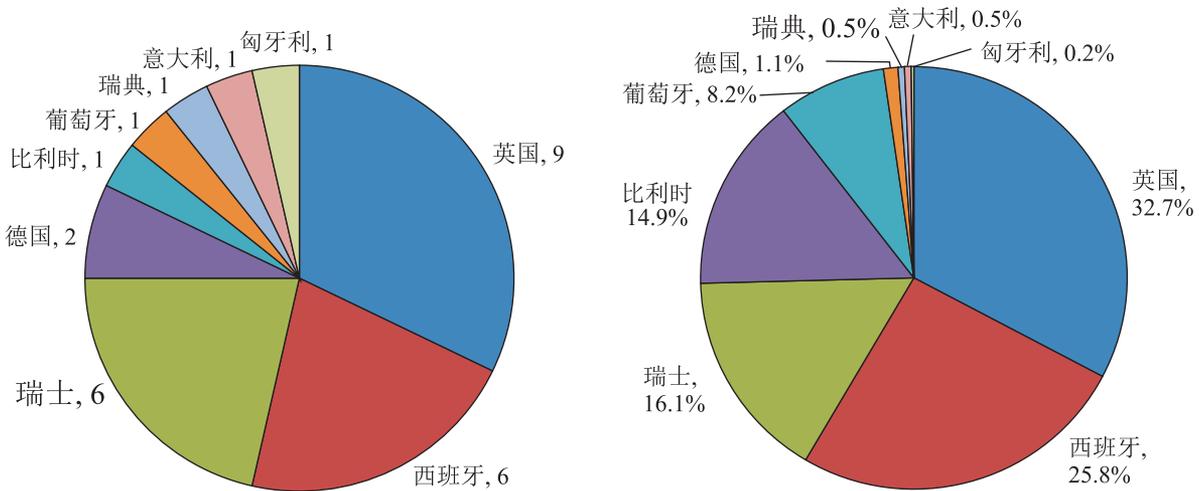


图1 “地平线2020”计划钙钛矿太阳能电池项目分布

Fig.1 Distribution of projects related to perovskite solar cells in the “Horizon 2020” program

表7 “地平线2020”计划资助的钙钛矿太阳能电池研究重大项目

Tab.7 Major projects related to perovskite solar cells in the “Horizon 2020” programs

项目名称	资助金额(欧元)	主持机构
高效、耐用钙钛矿太阳能电池模块的结构和加工工艺	5,412,657	比利时微电子研究中心
低成本、高效率钙钛矿太阳能电池的生产技术	5,042,913	瑞士电子与微技术中心
可全打印的柔性、耐用、高效钙钛矿太阳能电池	4,997,192	西班牙 Leitat 技术中心
钙钛矿薄膜光伏电池	4,996,041	英国牛津大学
推动钙钛矿太阳能电池商业化	3,852,446	英国巴斯大学
第三代太阳能电池	2,993,403	葡萄牙波尔图大学

万欧元以上的钙钛矿太阳能电池研究项目。从中可以看出,欧盟正在大力推动钙钛矿太阳能电池实用化,积极研发具有高效、耐用特征的钙钛矿太阳能电池的生产技术。

1.2.2 区域创新

薄膜光伏研究联盟 Solliance 成立于 2010 年,是一个由荷兰、比利时、德国研究机构为主体的跨国组织,研究队伍超过 250 人,致力于使该地区成为光伏领域一支重要研究力量。核心成员包括比利时微电子研究中心、荷兰国家应用科学研究院、Holst 研究中心、荷兰能源研究中心、荷兰埃因霍芬理工大学、德国于利希研究中心、比利时哈塞尔特大学、荷兰代尔夫特理工大学。合作伙伴有荷兰壳牌公司、澳大利亚 Greatcell Solar 公司、俄罗斯 Solartek 公司、日本松下公司、中国汉能等多个区域内外企业。

Solliance 在荷兰埃因霍芬建有独立的研究大楼,配备了先进的实验室和试验生产设施。Solliance 的三大研究方向之一就是钙钛矿太阳能电池,目前与澳大利亚 Greatcell Solar 公司、俄罗斯 Solartek 公司、日本松下公司正在合作研究通过卷对卷技术生产大面积、低成本、高效率、长寿命钙钛矿材料,推动钙钛矿太阳能电池走向市场;同时,还在研究钙钛矿-硅串联太阳能电池和半透明钙钛矿太阳能电池^[14]。

1.3 日本

1.3.1 战略规划

新能源产业技术综合开发机构(NEDO)是日

本最大的公立研发管理机构,是以解决能源、环境问题和产业发展技术为目标的国立研究开发法人,在经济产业省与大学、产业界、研究机构之间起到桥梁作用。2004 年,NEDO 发布《光伏发电路线图》,提出了 2010、2020 和 2030 年光伏发电成本目标和光电效率目标^[15](表 8);2009 年 6 月,发布路线图修订版,重申 2020 和 2030 年光伏发电成本目标,上调光电效率目标,新增 2050 年光伏发电成本目标和光电效率目标^[16];2014 年 9 月,发布《光伏发电开发战略》,再次重申 2020 和 2030 年光伏发电成本指标,并再次上调光电效率目标。作为日本最新的光伏发电技术开发指南,《光伏发电开发战略》首次纳入钙钛矿太阳能电池^[17]。

1.3.2 项目部署

2015 年,NEDO 设立“高性能/高可靠性光伏发电成本降低技术”研发项目,2015—2017 年累计投入 137.67 亿日元,2018 年预算 46 亿日元。项目包括 6 个子课题,其中,子课题 2“研发革新的新结构太阳能电池”设立了面向钙钛矿太阳能电池的“研发革新的低制造成本太阳能电池”专项。通过推动新结构和新材料的研发,该专项旨在验证新概念制造设备、可靠性保障技术、发电原理,建立高度可靠的性能评估技术,进一步提高钙钛矿太阳能电池性能。参与机构包括松下公司、东芝公司、积水化学工业株式会社、爱信精机株式会社、富士公司、早稻田大学、东京大学等^[18]。

表 8 日本光伏发电目标

Tab. 8 Japan photovoltaic development goals

	2010	2020	2030	2050	
发电成本(日元/千瓦时)	23	14	7	<7	
实用模块效率水平 (研究单元效率水平)	2004 年版	16% (20%)	19% (25%)	22% (25%)	-
	2009 年版	-	20% (25%)	25% (30%)	40% ¹⁾
	2014 年版	-	22%	>25%	-

1)2050 年光电效率目标 40% 未指定实现方式,其余均为晶硅太阳能电池。

1.4 中国

1.4.1 战略规划

2016年3月,国家发改委与国家能源局联合发布《能源技术革命创新行动计划(2016—2030年)》,提出“新型高效太阳能电池产业化关键技术”创新行动。行动要求“研发铁电-半导体耦合电池、钙钛矿电池及钙钛矿/晶体硅叠层电池产业化的关键技术、工艺及设备,建立电池组件生产及应用示范线,建成产能 $\geq 2\text{MWp}$ 的中试生产线,组件平均效率各为 $\geq 14\%$ 、 $\geq 15\%$ 、 $\geq 21\%$ 。探索新型高效太阳能电池技术,探索研发更高效、更低成本的铁电-半导体耦合电池、铁电-半导体耦合/晶体硅叠层电池、钙钛矿电池、染料敏化电池、有机电池、量子点电池、新型叠层电池、硒化铋电池、铜锌锡硫电池和三五(III-V)族纳米线电池等电池技术,实现至少一种电池达到世界最高效率”^[19]。

2016年11月,国务院印发《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》,提出加强钙钛矿等新型高效低成本太阳能电池技术研发,推动高效低成本太阳能利用新技术和新材料产业化^[20]。

1.4.2 项目部署

2012年,国家自然科学基金委员会启动“面向能源的光电转换材料”重大研究计划,并在2014年的资助指南中专门提出:拟在“钙钛矿型太阳电池”领域,围绕“钙钛矿型太阳电池”的新材料、机理、效率、器件工艺及稳定性等方面以培育项目与重点支持项目的形式予以资助并形成子项目群;2016—2017年,连续两年将“面向光伏和发光应用的钙钛矿材料与器件”列为唯一重点资助研究方向;2018年,重点资助“印刷有机电子关键共性技术与核心材料体系”等五个方向^[21]。此外,基金委还于2017年启动“钙钛矿材料多功

能原理及其耦合新效应”重大项目。

2015年,科技部“纳米研究”重大科学研究计划资助了“钙钛矿型太阳电池的基础研究”项目,项目首席科学家为时任南京工业大学校长的黄维院士。

此外,地方政府也部署了一些项目。例如,2014年4月,北京市政府发布实施《北京技术创新行动计划(2014—2017年)》,通过“面向未来的能源结构技术创新与辐射带动”专项部署了钙钛矿太阳能电池研究^[22]。

2 研究进展

美国国家可再生能源实验室发布的《最佳研究单元效率表》和德国Wiley出版社*Progress in Photovoltaics: Research and Applications*杂志发布的《太阳能电池效率纪录表》是光伏领域光电效率纪录的两大权威发布平台。

根据2018年12月21日发布的《最佳研究单元效率表》,钙钛矿太阳能电池的光电转换效率已达到23.7%,由中国科学院半导体研究所创造^[23]。而上一个纪录23.3%(2018年7月17日发布)同样由半导体所创造。在这条快速上升、竞争激烈的钙钛矿太阳能电池纪录曲线上,2018年首次出现中国研究机构的名字,并且连续两次登上最高点。

而根据2018年12月25日发布的第53版《太阳能电池效率纪录表》(表9),钙钛矿太阳能电池的认证纪录为20.9%,来自韩国化学技术研究所。中科院半导体研究所创造的23.7%没有被认证为纪录,但以“显著例外”(notable exception)的形式也记录在列。钙钛矿/硅、钙钛矿/铜铟镓硒串联电池的光电转换效率也分别达到27.3%和22.4%。在钙钛矿太阳能电池实用化

表9 太阳能电池效率纪录表(第53版,钙钛矿太阳能电池部分)
 Tab.9 Solar cell efficiency tables(version 53, perovskite solar cells)

电池类型	效率 (%)	面积 (cm ²)	开路电压 (V)	短路电流 (mA/cm ²)	填充因子 (%)	研发机构
cell	20.9 ± 0.7	0.9910	1.1250	24.920	74.5	韩国化学技术研究所
thin film ¹⁾	23.7 ± 0.8	0.0739 ²⁾	1.1697	25.400	79.8	中国科学院半导体研究所
钙钛矿 minimodule	17.25 ± 0.6	19.2770	1.0700	20.660	78.1	杭州纤纳光电科技有限公司
submodule	11.7 ± 0.4	703	1.0730	14.360	75.8	日本东芝公司
-	11.6 ± 0.4	802	23.7900	0.577A	68.0	日本东芝公司
钙钛矿/硅(monolithic)	27.3 ± 0.8	1.0900	1.8130	19.990	75.4	Oxford PV
钙钛矿/铜铟镓硒 ¹⁾	22.4 ± 1.9	0.0420	1.7740	17.300	73.1	美国加州大学洛杉矶分校

1)该电池效率未被认证为纪录,被列入“显著例外”类别;2)该面积为孔径面积,其余为限定辐照面积。

方面,中国和日本分别取得了小模块和大模块光电效率纪录。中国杭州纤纳光电科技有限公司在19.277平方厘米小模块上将稳态光电转换效率提升至17.25%。日本东芝公司利用弯月面涂布技术,制备出面积高达703和802平方厘米的全球最大钙钛矿太阳能电池,稳态光电转换效率分别达到了11.7%和11.6%^[24];下一步将开发更大尺寸(900平方厘米)薄膜制备工艺,同时改进钙钛矿材料,进一步提升光电效率和稳定性,尽快实现钙钛矿太阳能电池实用化。

此外,钙钛矿太阳能电池的稳定性也取得重要突破。在光照1千瓦/平方米(过滤紫外光)、温度55℃条件下,瑞士洛桑联邦理工学院研发的电池模块稳定运行超过1万小时,相当于在欧洲大多数地区户外使用10年^[25]。

3 总结与建议

综合来看,美国、欧盟、日本和我国等国家或地区都重视钙钛矿太阳能电池这一新兴技术,积极部署基础研究,推动实用化和产业化。在基础研究方面,各国研究项目大都围绕新材料、机理、效率、稳定性、环保等方面展开;在实用化和产业化方面,各国都积极发展卷对卷技术等大规模印刷制备工艺;在研发组织机制方面,各国都采取

了产学研紧密合作的研发模式。

从产出成果来看,在钙钛矿太阳能电池基础研究方面,我国已经后来居上,接连创造了实验室研究单元效率纪录,实现了《能源技术革命创新行动计划(2016—2030年)》提出的“至少一种电池达到世界最高效率”目标。然而,在包括钙钛矿太阳能电池在内的薄膜光伏电池印刷制备工艺技术方面,我国同领先国家还有较大的差距。美、日、欧等国家或地区已经建立了较为成熟的大面积柔性薄膜光伏电池制备技术。我国在这方面的研究团队相对较少,相关技术积累还有较大的不足。

必须指出的是,虽然钙钛矿太阳能电池研究如火如荼,但其距离实现实用化和产业化还有不少阻碍需要克服。第一,虽然研究单元效率超过23%,但实用模块效率仍然较低;第二,至今仍是《最佳研究单元效率表》中唯一被标识为“不稳定”的电池;第三,虽然钙钛矿材料成本低,但组成电池的其他材料(如空穴传输材料)价格昂贵;第四,铅引发的环保问题;第五,大规模高质量薄膜制备技术仍需探索。

基于以上分析,本文对钙钛矿太阳能电池以及钙钛矿材料发展提出三点建议。

1) 理性看待钙钛矿太阳能电池产业化。虽

然钙钛矿太阳能电池研究火热、进展很快,但短期内不会对传统光伏格局带来明显冲击。一方面,制约钙钛矿太阳能电池产业化的规模化生产、成本、寿命、环保等因素还没有彻底解决;另一方面,薄膜电池在整个光伏市场中占比很低,不足5%,同时已商业化的光伏电池也一直保持高度研究活力。

2) 积极发展大面积柔性薄膜光伏制备技术。该技术是有机及钙钛矿薄膜光伏电池印刷制备的关键共性技术,也是我国相对落后的技术环节,制约了我国将先进实验室技术率先转化为现实生产力。建议我国通过重大任务、重大专项,部署高校、科研院所、企业等相关研究力量发展该技术。

3) 积极发展钙钛矿材料。具有电、磁、光等多功能耦合的钙钛矿新体系,在信息存储与信息安全以及光能源转换等方面有其独特的优势,可望为信息、能源、催化等领域的发展带来重大突破。目前,钙钛矿的应用研究仍显单一,建议积极发展面向晶体管和集成电路、激光器、LED、光探测器、催化等应用的新型钙钛矿材料。

参考文献

- [1] Anon. Newcomer Juices Up the Race to Harness Sunlight [J]. Science, 2013, 342 (6165): 1438-1439.
- [2] World Economic Forum. Top 10 Emerging Technologies of 2016 [R]. Geneva: WEF, 2016.
- [3] 韩礼元, 杨旭东. 钙钛矿太阳能电池研究进展与展望 [R] // 中国科学院. 2017 科学发展报告. 北京: 科学出版社, 2017: 54-61.
HAN Liyuan, YANG Xudong. The Research Status and Outlook of Perovskite Solar Cells [R] // CAS. 2017 Science Development Report. Beijing: Science Press, 2017: 54-61.
- [4] U. S. Department of Energy. The SunShot Initiative [EB/OL]. 2017-09-12. [https://www. energy. gov/eere/solar/sunshot-initiative](https://www.energy.gov/eere/solar/sunshot-initiative).
- [5] U. S. Department of Energy. Next Generation Photovoltaics 3 [EB/OL]. 2014-10-22. [https://www. energy. gov/eere/solar/next-generation-photovoltaics-3](https://www.energy.gov/eere/solar/next-generation-photovoltaics-3).
- [6] U. S. Department of Energy. SunShot National Laboratory Multiyear Partnership (SuNLaMP) -Photovoltaic Subprogram-FY16-18 [EB/OL]. 2018-10-24. [https://www. energy. gov/eere/solar/sunshot-national-laboratory-multiyear-partnership-sunlamp-photovoltaic-subprogram-fy16-18](https://www.energy.gov/eere/solar/sunshot-national-laboratory-multiyear-partnership-sunlamp-photovoltaic-subprogram-fy16-18).
- [7] U. S. Department of Energy. Photovoltaics Research and Development 2: Modules and Systems (PVRD2) [EB/OL]. 2017-07-12. [https://www. energy. gov/eere/solar/photovoltaics-research-and-development-2-modules-and-systems-pvr2](https://www.energy.gov/eere/solar/photovoltaics-research-and-development-2-modules-and-systems-pvr2).
- [8] U. S. Department of Energy. Technology to Market 3 (T2M3) [EB/OL]. 2017-07-12. [https://www. energy. gov/eere/solar/technology-market-3-t2m3](https://www.energy.gov/eere/solar/technology-market-3-t2m3).
- [9] U. S. Department of Energy. Energy Frontier Research Centers Technical Summaries [R]. Washington, D. C. : U. S. Department of Energy, 2018.
- [10] U. S. Department of Energy. Energy Department Launches Up to \$ 30 Million Effort to Improve Solar Module Materials [EB/OL]. 2016-09-15. [https://www. energy. gov/eere/articles/energy-department-launches-30-million-effort-improve-solar-module-materials](https://www.energy.gov/eere/articles/energy-department-launches-30-million-effort-improve-solar-module-materials).
- [11] Bay Area Photovoltaic Consortium. Bay Area Photovoltaic Consortium Project Catalogue 2016 [R]. Stanford: BAPVC, 2016.
- [12] Quantum Energy and Sustainable Solar Technologies. Research Overview [EB/OL]. 2018-10-24.

- <https://qesst.org/research>.
- [13] U. S. Department of Energy. PV Technical Challenges Database Anonymized [R]. Washington, D. C. ; U. S. Department of Energy, 2018.
- [14] Solliance. Shared Research [EB/OL]. 2018-10-24. <https://www.solliance.eu/shared-research>.
- [15] 杨金焕, 邹乾林, 谈蓓月, 等. 各国光伏路线图与光伏发电的进展 [J]. 中国建设动态阳光能源, 2006(4) : 51-54.
YANG Jinhuan, ZOU Qianlin, TAN Beiyue, et al. Worldwide Progress in Photovoltaic Roadmap and Photovoltaic Power Generation [J]. Solar & Renewable Energy Sources, 2006(4) : 51-54.
- [16] 新エネルギー・産業技術総合開発機構. 「太陽光発電ロードマップ(PV2030+)」概要版 [R]. 东京: NEDO, 2009.
NEDO. PV Roadmap (PV2030 +) Summary [R]. Tokyo: NEDO, 2009.
- [17] 新エネルギー・産業技術総合開発機構. 太陽光発電開発戦略 [R]. 东京: NEDO, 2014.
NEDO. NEDO PV Challenges [R]. Tokyo: NEDO, 2014.
- [18] 新エネルギー・産業技術総合開発機構. 「高性能・高信頼性太陽光発電の発電コスト低減技術開発」基本計画 [R]. 东京: NEDO, 2015.
NEDO. The Plan of Costly PV Technology with High Performance and Reliability [R]. Tokyo: NEDO, 2015.
- [19] 国家发展改革委, 国家能源局. 能源技术创新行动计划(2016—2030年) [R]. 北京: 发改委, 能源局, 2016.
P. R. C. National Development and Reform Commission, National Energy Administration. The Plan of Energy Technology Revolution Innovation Action(2016 - 2030) [R]. Beijing: National Development and Reform Commission, National Energy Administration, 2016.
- [20] 国务院. “十三五”国家战略性新兴产业发展规划 [R]. 北京: 国务院, 2016.
P. R. C. the State Council. The Thirteenth Five-Year National Plan of Strategic Emerging Industry [R]. Beijing: the State Council, 2016.
- [21] 国家自然科学基金委员会. 面向能源的光电转换材料重大研究计划 2018 年度项目指南 [EB/OL]. 2018-07-25. <http://www.nsf.gov.cn/publish/portal0/tab625/info74870.htm>.
P. R. C. NSFC. Application Guide for Major Research Project "Photoelectric Materials for Energy Application" [EB/OL]. 2018-07-25. <http://www.nsf.gov.cn/publish/portal0/tab625/info74870.htm>.
- [22] 科技部. 《北京技术创新行动计划(2014—2017年)》“面向未来的能源结构技术创新与辐射带动”专项系列成果发布会召开 [EB/OL]. 2016-09-20. http://www.most.gov.cn/dfkj/bj/tpxw/201609/t20160919_127747.htm.
P. R. C. Ministry of Science and Technology. Press Conference for Beijing Technology Innovation Action Plan(2014 - 2017) [EB/OL]. 2016-09-20. http://www.most.gov.cn/dfkj/bj/tpxw/201609/t20160919_127747.htm.
- [23] The National Renewable Energy Laboratory. Best Research-Cell Efficiencies [R]. Washington, D. C. ; NREL, 2018.
- [24] GREEN M A, HISHIKAWA Y, DUNLOP E D, et al. Solar Cell Efficiency Tables (version 53) [J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2019, 27(1) : 3-12.
- [25] RONG Yaoguang, HU Yue, MEI Anyi, et al. Challenges for Commercializing Perovskite Solar Cells [J]. Science, 2018, 361(6408) : 1214.