

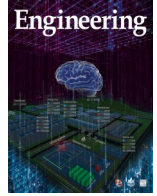


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



News & Highlights

钙钛矿太阳能电池效率刷新世界纪录

Sean O'Neill

Senior Technology Writer

2020年12月，硅/钙钛矿太阳能电池转换效率创造了新的世界纪录，这让太阳能的发展前景更加光明。该电池由一层硅和一层合成钙钛矿薄膜层串联而成，面积为 1.12 cm^2 ，并通过了位于美国科罗拉多州戈尔登市的国家可再生能源实验室（NREL）的独立测试认证，转换效率为29.52% [1]。简而言之，串联电池能将照射在其上的近30%的模拟阳光转化为电能。

该电池和钙钛矿技术由位于英国牛津的Oxford PV公司开发。目前，该公司正在德国哈维尔河畔勃兰登堡的工厂对一条生产线进行调试，以生产世界上首批商用钙钛矿/硅电池，该电池边长为 156 mm ，转换效率约为26%（图1）。预计该电池将于2022年年初投入量产，届时，其将成为世界上转换效率最高的商用太阳能电池，而目前工业生产的硅太阳能模块的转换效率一般为20%~22%。

Oxford PV公司的联合创始人兼首席科学官、牛津大



图1. Oxford PV公司位于德国哈维尔河畔勃兰登堡的工厂制造的一组串联硅/钙钛矿太阳能电池。该公司将于2022年推出的首批商用电池的转换效率可达到26%左右。来源：Oxford PV，经许可。

学物理学教授Henry Snaith称：“十年前我们就开始研究钙钛矿，试图找到一种比用硅加工电池的成本更低的材料。这大致包括基于溶液法或升华法制备钙钛矿电池的过程。我们寻找的材料应在 $2000\text{ }^\circ\text{C}$ 以下就可以结晶。我们有一个长期目标，相信有一天我们研发的电池转换效率能达到10%，并且，毫不夸张地说，我们用钙钛矿做的第一个电池的转换效率是6.1%，打破了我们以往的所有实验室纪录。这虽然在今天看起来微不足道，但在当时，它给人的第一反应是：哇！这东西竟然是开箱即用的。”

钙钛矿在太阳能光伏（PV）中的应用正合时宜，因为经过几十年的改进，在继续提高硅电池的转换效率方面遇到了重大瓶颈；光伏材料在将太阳能转化为电能方面有一个极限。这个极限的高低取决于它们的“带隙”，即将电子从材料中释放出来，使其成为电荷载流子在电路中流动所需的能量。晶体硅的带隙为 1.1 eV ，这意味着来自太阳、能量小于 1.1 eV 的光子不能释放电子，高于 1.1 eV 的光子仍可产生电荷载流子，但超过 1.1 eV 的部分光子能量将以热能的形式浪费掉。

若考虑太阳光光谱，理想硅的理论转换效率极限约为32%。但从1954年美国贝尔实验室研制出第一个实用的硅太阳能电池起[2]，其在实验室可实现的最高转换效率就在27%左右。

合成钙钛矿与天然矿物钙钛矿、钙钛氧化物具有相同的晶体结构。2012年，太阳能光伏研究领域正式开始使用合成钙钛矿，其在太阳能电池中的潜在应用受到广泛关注[3]。我们今天使用的合成钙钛矿通常是有机-无机金属卤化物钙钛矿，其中金属为铅或锡。美国国家可再生能源实验室（NREL）的首席科学家、钙钛矿和混合太阳能电

池团队负责人 Joe Berry 表示：“金属卤化物系在处理光伏任务方面非常巧妙，这使其非常引人注目。”

覆盖在硅电池上的钙钛矿薄膜的带隙可达到 1.7 eV，以补充硅的较低带隙[4]。如此便可从更多的太阳光光谱中捕获更多光子，释放更多电子，产生更多能量。结合使用这两种材料的理论转换效率为 43%。Oxford PV 公司的首席技术官 Chris Case 表示：“实际转换效率总是无法达到理论转换效率。目前，实际转换效率即将达到 30%，但我们相信，仅凭现有的知识集合，我们可以将商业电池转换效率提高到 33%。”

当光伏效率大幅提升时，从财政角度和生态角度来看，太阳能对能源公司都已是一个极具吸引力的命题。目前，在世界上许多国家，公用事业规模的太阳能光伏设备通常比新的燃煤或燃气发电设备更便宜[5]。2018 年，政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）警告称，要将全球变暖控制在 1.5 °C 以内，就必须在能源发电等方面开展“快速而深远”的变革，因为人类造成的二氧化碳排放量需要在 2050 年左右达到“净零”。国际可再生能源署（IRENA）是一个为各国寻求可持续能源发展之路提供支持的政府间组织，总部设在阿拉伯联合酋长国的阿布扎比。IRENA 根据政府间气候变化专门委员会编制的全球可再生能源路线图（REmap Case），预测了一个具有气候弹性的能源转型路径。根据该路径，到 2050 年，太阳能光伏发电将成为第一大

电力来源，全球装机容量达到 8.5 TW，风力发电将成为第二大电力来源（图 2）[6]。

太阳能光伏已在加速发展。例如，2020 年美国新发电装机容量中，太阳能光伏发电占 43%，连续两年居发电技术首位。预计美国太阳能产业在未来 10 年的产能将是目前的 4 倍[7]。出现这一快速增长的部分原因是过去 10 年太阳能光伏技术成本急剧下降。根据 NREL 的数据，由于目前可用的太阳能电池转换效率已上升到 20% 左右，且相关硬件成本也在下降，2010—2020 年，美国公用事业规模的光伏系统安装成本下降了 82% [8]。太阳能光伏在世界各地的发展趋势相似（图 3）[6]。

2020 年年末全球太阳能光伏发电量由 2019 年的 581 GW 上升至约 710 GW（图 4）[6]。要将这一发电规模进一步扩大到太瓦级，需要加速太阳能光伏生产，要求所需材料必须充足。这是钙钛矿的另一个优势，因为生产太阳能电池所需的钙钛矿薄膜通常只有 0.5 μm 厚，并且所需材料极易采购。Oxford PV 公司指出，35 kg 钙钛矿的发电量与 7 t 硅（通常用于 160 μm 厚的晶片）的发电量相同，并表示将来有一天钙钛矿完全可以取代硅[1]。

扩大其他成熟薄膜太阳能技术规模的关键难点在于，它们以碲化镉或铜铟硒化镓为基础。考虑到镉的毒性，而且对于这些技术而言，镉、碲和铟属于稀有金属，以至于无法将太阳能光伏发电量有效扩大到太瓦级规模[9]。

相比之下，制作金属卤化物钙钛矿所需的材料供应充

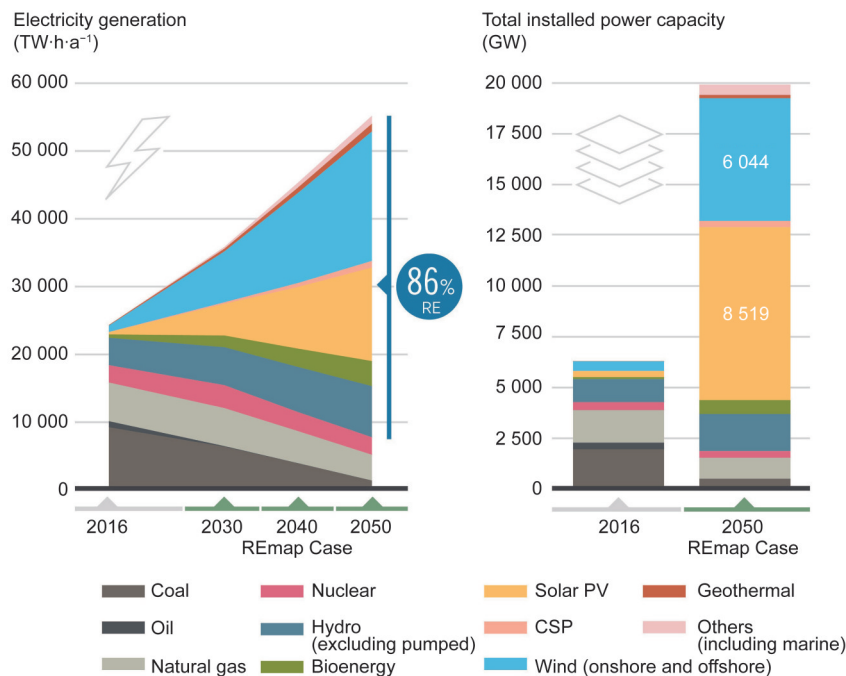


图 2. 向更清洁、可再生能源转变的预测，需要以足够快的速度减少排放，以达到 IPCC 关于气候变化的目标，并使地球到 2050 年实现二氧化碳“净零”排放。RE：可再生能源；CSP：聚光太阳能。来源：©IRENA，经许可。

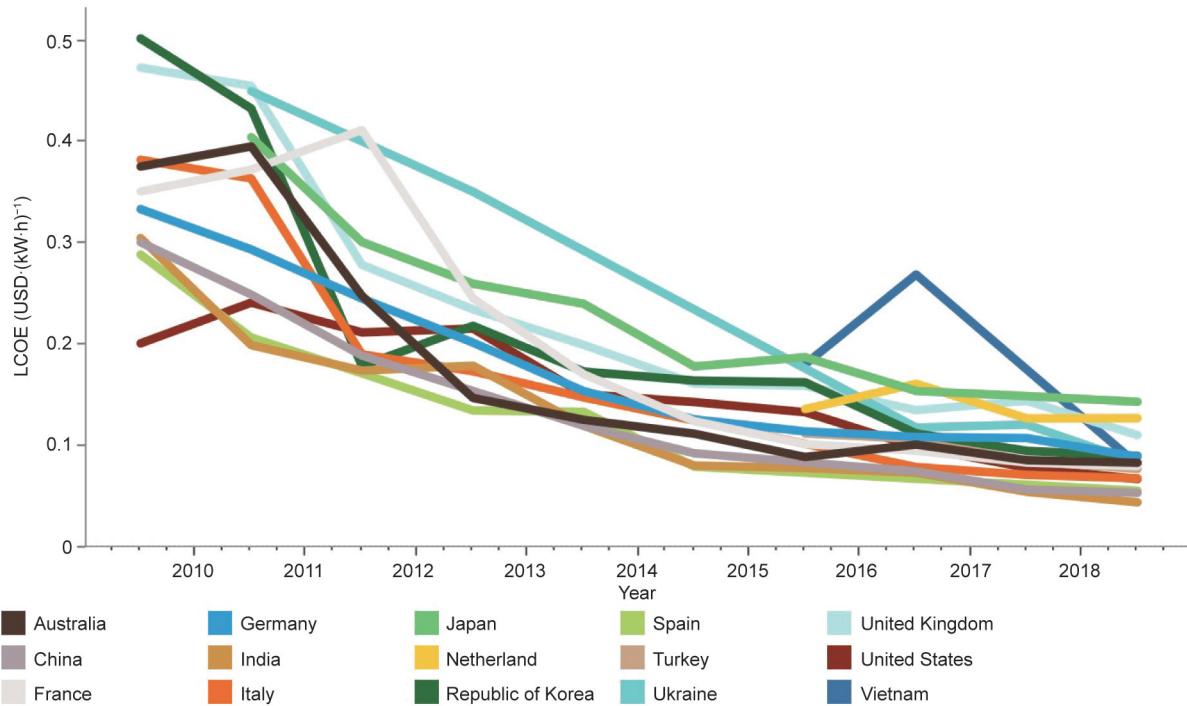


图3. 在过去10年中, 各国新投产的公用事业规模太阳能光伏项目的平准化能源成本 (LCOE) 大幅下降[6]。LCOE是在特定太阳能项目生命周期内, 为实现财务收支平衡, 电力出售的最低平均价格。来源: ©IRENA, 经许可。

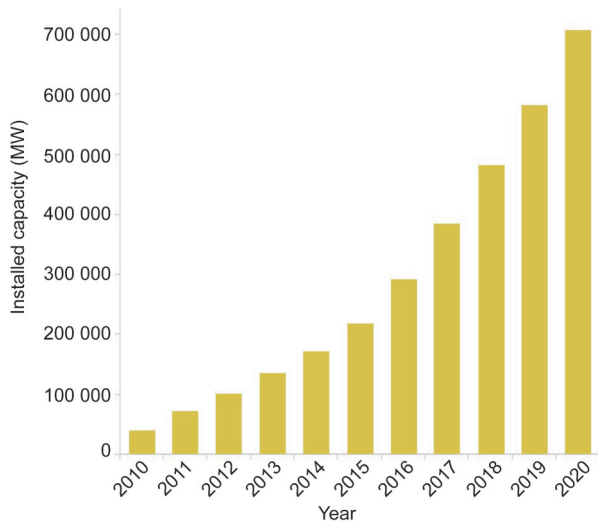


图4. 在过去10年中, 全球太阳能光伏总装机容量急剧增长, 并呈现指数级增长迹象[6]。来源: ©IRENA, 经许可。

足, 而且价格低廉。Berry说: “它们非常适用于一些高通量、低成本的加工路线。虽然有很多方法可以降低生产成本, 但同时产品的质量会随之降低, 而钙钛矿的加工方式不会对基本材料的特性产生影响。钙钛矿还有一些非常独特的优势, 已有研究证实其回收效率非常高。”

然而, 钙钛矿也不是没有缺点。尽管目前采用了薄膜技术, 但转换效率最高的钙钛矿中仍含有铅。硅/钙钛矿

串联太阳能电池广泛应用面临的一个更紧迫的挑战是其长期稳定性。公用事业规模光伏电池板的寿命需达到25年左右。虽然自其首次应用于光伏电池以来, 钙钛矿技术发展迅速, 但其长期稳定性尚未获得认可。

与硅不同, 钙钛矿是离子材料, 更容易降解 (特别是当其受潮时)。因此, 钙钛矿薄膜的有效封装至关重要。Oxford PV公司拥有比其他任何组织更多的钙钛矿太阳能光伏相关专利[10], 他们对其设计流程和钙钛矿封装方法很有信心。Snaith表示: “在过去10年中, 为了提高其稳定性, 我们在改变钙钛矿的构成、材料、设备的结构方面花费了很多精力。在提高其转换效率方面, 我们没有花费多少精力; 而实现其稳定性需要花费的精力最多。但现在, 我们对这项技术的效率和稳定性都非常有信心。”

很多工业界和科学界人士也开始研究解决钙钛矿的稳定性问题。2020年, 一个包括Berry和Snaith等研究人员在内的国际合作组织发表了一份关于钙钛矿光伏稳定性评估和报告的共识声明[11]。Berry表示: “在过去10年中, 我们一直在深入了解这些钙钛矿材料, 以便对未来30年进行预测。这种预测科学对技术要求很高, 但到目前为止, 我们在基础材料层面上的研究并未取得引人注目的成就。因此, 问题就变成了‘你有什么技术解决方案?’ 或‘你能降低多少成本?’ 这类商业问题。”

在太阳能光伏生产中加快钙钛矿应用速度会增加成

本，目前尚不确定这将对市场产生何种影响。Oxford PV 公司尚未透露其商业电池的大致价格。在大规模发电中，LCOE 是一个关键因素。这项新技术初始价格的任何潜在上涨都将取决于因转换效率的提高而带来的 LCOE 下降。

Oxford PV 公司的制造厂目前正以每年 100 MW 的发电规模进行调试，目标是到 2030 年将该制造厂发电规模扩大到每年 10 GW，同时太阳能行业每年增加约 120 GW 发电量。这个目标对于太阳能行业来说不难实现。其他开发钙钛矿光伏技术的商业组织，包括日本大型公司松下 (Panasonic) 和积水化学工业株式会社 (Sekisui Chemical Company)、中国公司纤纳光电 (Microquanta Semiconductor) 和万度光能 (WonderSolar)、韩国的 Frontier Energy Solution 及波兰的 Saule Technologies [12]。

在过去 10 年中，钙钛矿技术得到了迅猛发展。目前，实现钙钛矿技术商业化需要多久尚不确定，但 Snaith 表示，硅钙钛矿太阳能电池的全球普及和广泛使用至少还需要 10 年时间。此外，他还指出，钙钛矿的使用还具有其他诱人的可能性。“钙钛矿可以在非常轻的基材上被制成非常薄的薄膜，所以它的弯曲度或柔韧性很好。将来，在太阳能光伏效率达到 40% 时，给电动汽车进行太阳能覆层便成为可能（因为这会明显提高电动车的充电效果）。同样，如果我们能开发出超薄太阳能电池，我们就可以考虑将这种覆层用于商业建筑。如今这种假设已不完全是科学幻想了，这些设想在下一个 10 年之后的 10 年内就会成真。”

2020 年，美国先进钙钛矿制造联合体 (US Manufacturing of Advanced Perovskites Consortium) 成立，其目标是“让美国在光电和光子制造领域重新获得主导地位” [13]。该组织由 NREL、西雅图华盛顿大学清洁能源测试

台 (Washington Clean Energy Testbeds at the University of Washington in Seattle)、北卡罗来纳大学教堂山分校 (University of North Carolina at Chapel Hill) 和俄亥俄州的托莱多大学 (University of Toledo in Ohio) 组成。该联合体包括 6 家国内商业行业合作伙伴 [13]，其中之一是位于亚利桑那州坦佩市的美国第一太阳能公司 (First Solar)，该公司是一家基于碲化镉技术的公用事业规模的薄膜太阳能光伏组件生产商。

References

- [1] Oxford PV hits new world record for solar cell [Internet]. Oxford: Oxford PV; 2020 Dec 21 [cited 2021 Apr 29]. Available from: <https://www.oxfordpv.com/news/oxford-pv-hits-new-world-record-solar-cell>.
- [2] Perlin J. The silicon solar cell turns 50. Report. Golden: National Renewable Energy Laboratory; 2004 Aug.
- [3] A decade of perovskite photovoltaics. *Nat Energy* 2019;4:1.
- [4] Kim D, Jung HJ, Park IJ, Larson BW, Dunfield SP, Xiao C, et al. Efficient, stable silicon tandem cells enabled by anion-engineered wide-bandgap perovskites. *Science* 2020;368(6487):155–60.
- [5] Palmer J. Solar reaches for grid parity. *Engineering* 2020;6(2):105–6.
- [6] Future of solar photovoltaic: deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects. Report. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency; 2019 Nov.
- [7] Solar market insight report 2020 year in review [Internet]. Washington, DC: Solar Energy Industries Association; 2021 Mar 16 [cited 2021 Apr 29]. Available from: <https://www.seia.org/research-resources/solar-marketinsight-report-2020-year-review>.
- [8] Feldman D, Ramasamy V, Fu R, Ramdas A, Desia J, Margolis R. U.S. solar photovoltaic system and energy storage cost benchmark: Q1 2020. Report. Golden: National Renewable Energy Laboratory; 2021 Jan.
- [9] Feltrin A, Freundlich A. Material considerations for terawatt level deployment of photovoltaics. *Renew Energy* 2008;33(2):180–5.
- [10] Snaith HJ. Present status and future prospects of perovskite photovoltaics. *Nat Mater* 2018;17(5):372–6.
- [11] Khenkin MV, Katz EA, Abate A, Bardizza G, Berry JJ, Brabec C, et al. Consensus statement for stability assessment and reporting for perovskite photovoltaics based on ISOS procedures. *Nat Energy* 2020;5(1):35–49.
- [12] Extance A. The reality behind solar power's next star material. *Nature* 2019;570(7762):429–32.
- [13] U.S. MAP [Internet]. Golden: NREL; [cited 2021 May 25]. Available from: <https://www.usa-perovskites.org/partners.html>.