



Perovskite solar cells: An emerging PV technology for mass production

Inst. Of New Energy Technologies

Prof. Dr. Yaohua Mai

yaohuamai@jnu.edu.cn



目录

1 Why photovoltaics?
Why perovskite?

2 钙钛矿电池的产业化现状与挑战

3 暨南大学新能源技术研究院
及研究基础

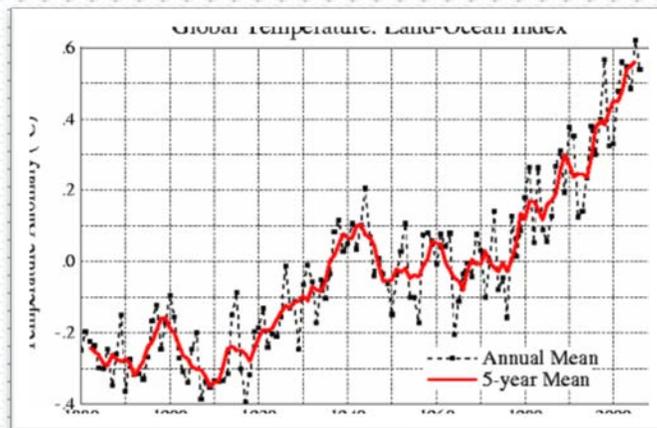
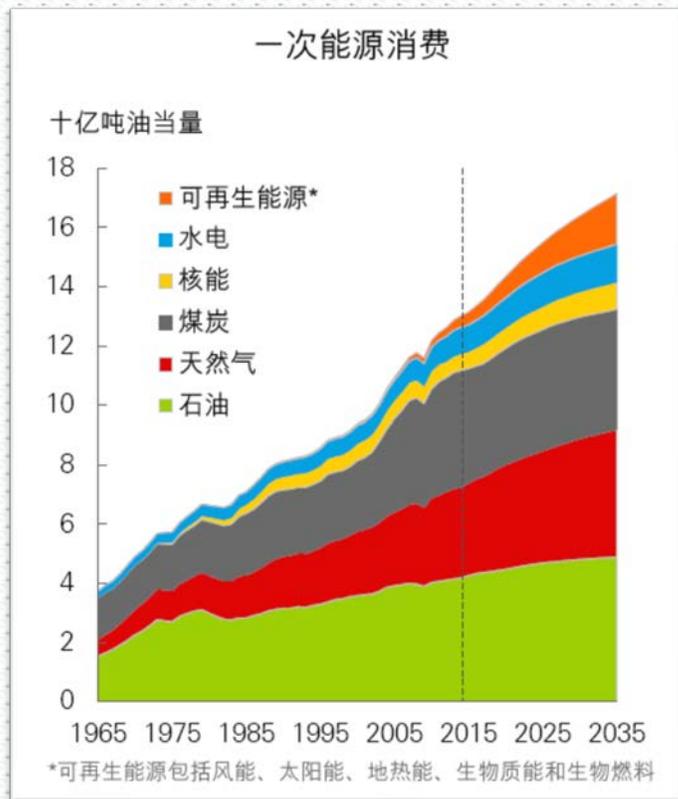
4 总结

1

**Why photovoltaics?
Why perovskite?**

1.1

化石能源使用带来全球变暖与环境污染问题



全球变暖



雾霾中的北京天安门

世界能源需求在
二次世界大战之后飞速上升
《BP世界能源展望》，2017

1.1

光伏产业现状

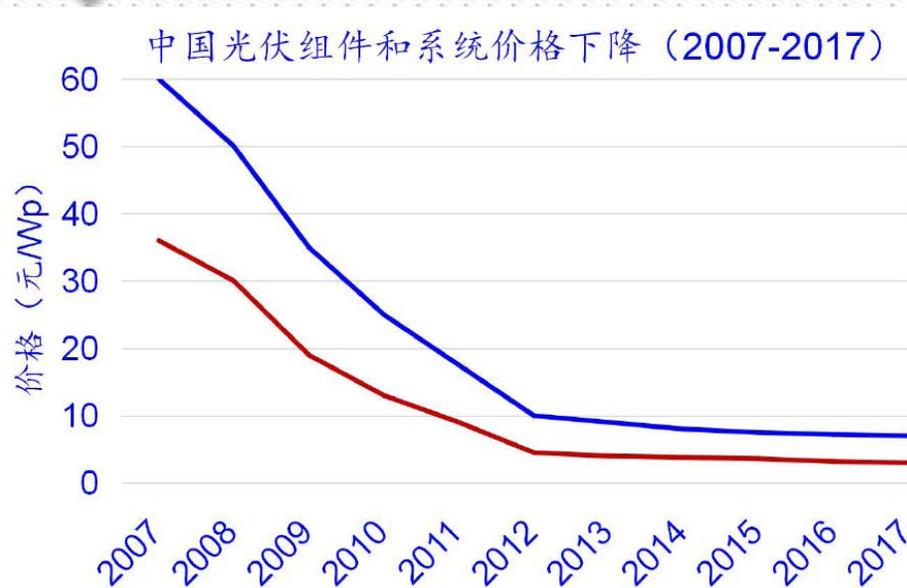
- ◆ 光伏装机容量在过去10多年里飞速增长，年平均增长率 **>42%**。
- ◆ 中国从2007年开始成为世界最大光伏组件生产国。
- ◆ 中国从2013年开始成为世界最大的光伏装机国。
- ◆ 2017年，生产世界约**70%**的组件。装机超过世界**50%**
- ◆ 2016年中国光伏发电量占比超过**1%**



Global annual PV installed capacity increased by over 29% YoY in 2017

1.1

光伏发电成本持续下降



- 光伏组件价格和系统成本近十年下降了90%。
- 光伏发电已初步具备经济性。
 - ✓ 0.4-0.7元/kWh, 低于经济发达地区的工业和商业电价
- 离“平价上网”仍有一定距离。
 - ✓ 平价上网: $LCOE < \text{脱硫脱硝燃煤上网电价}(0.36\text{元}/\text{kWh})$



- 更高转换效率
- 更低生产成本
- 更长寿命

平准化电能成本: $LCOE = \frac{\text{总成本 (建设成本 + 财务成本 + 运行成本 ...)}}{\text{总发电量或节省的能源}}$

1.1

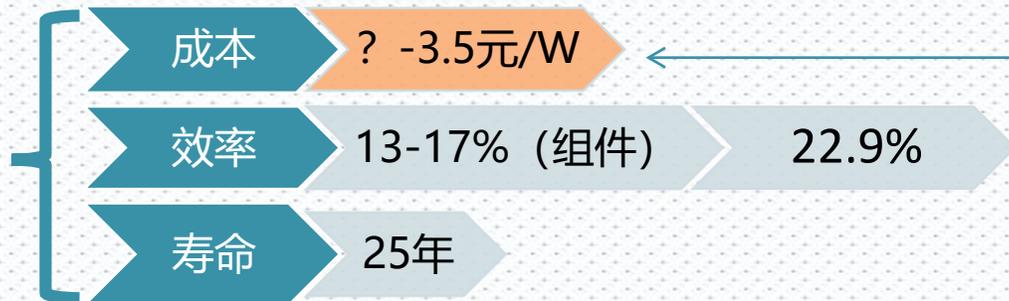
产业化电池技术现状



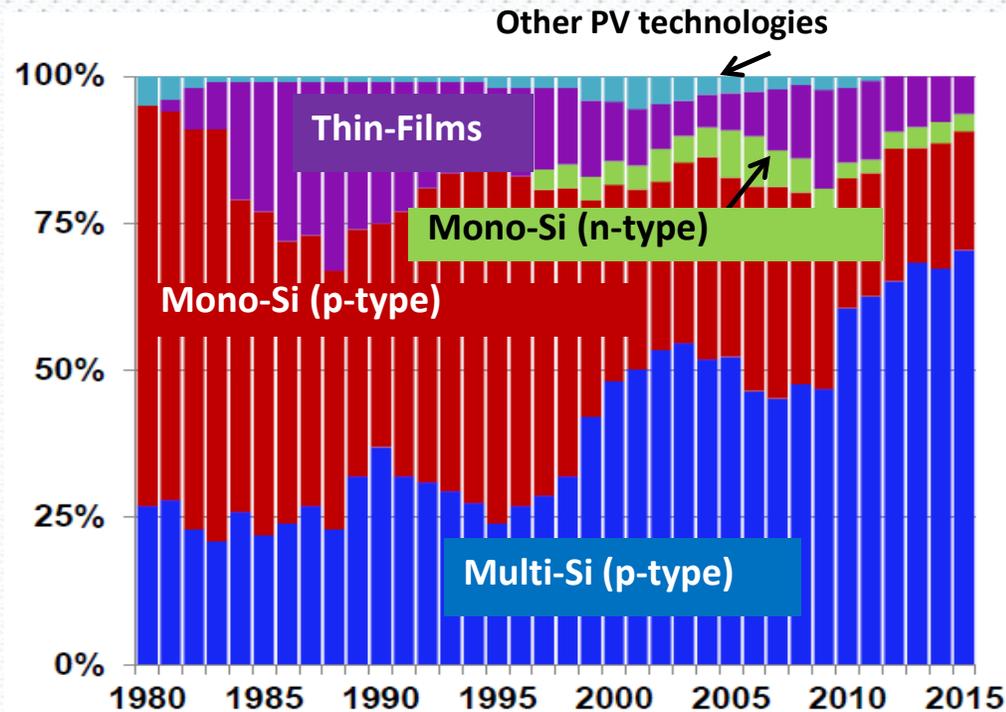
晶硅电池



CIGS电池



CdTe电池



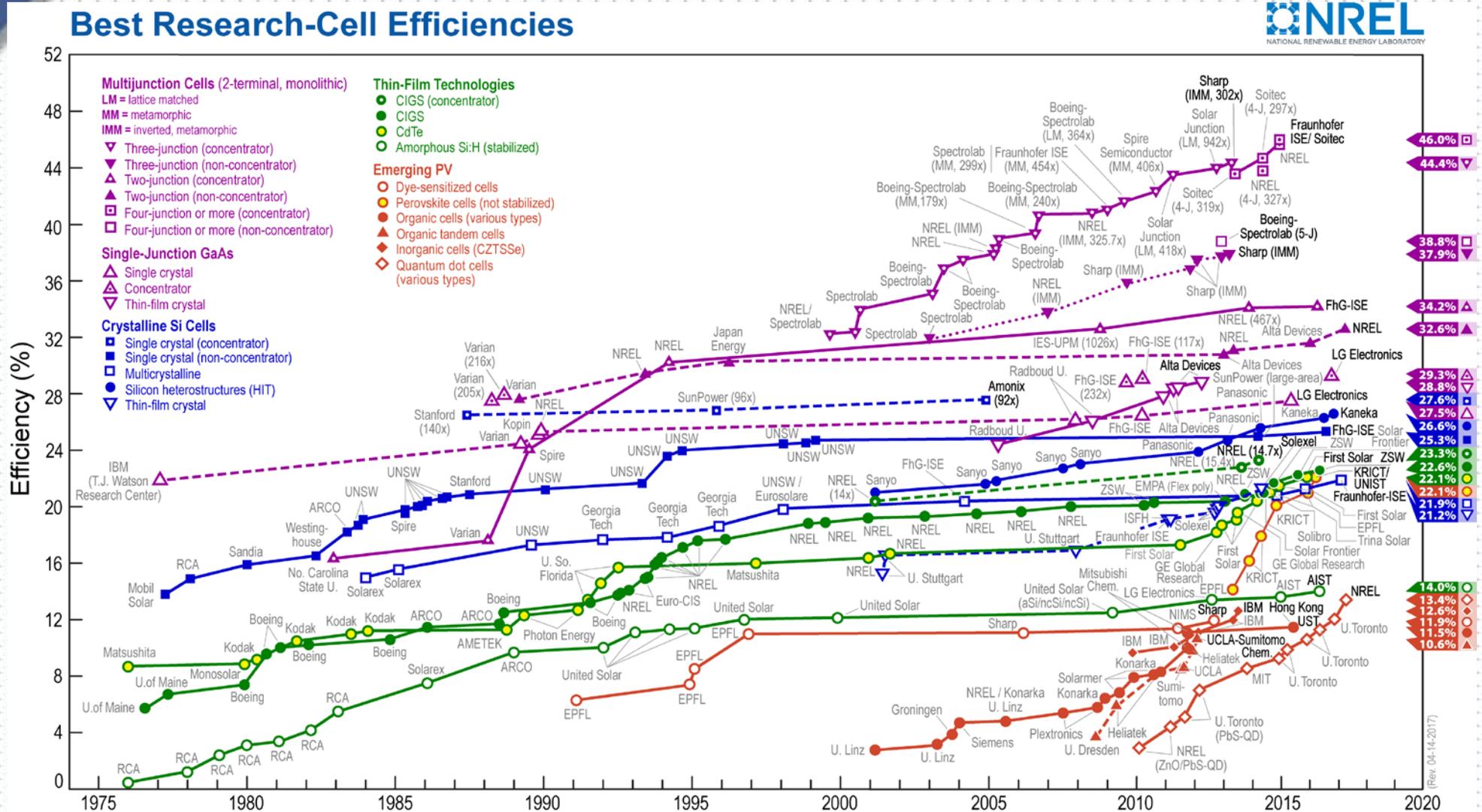
- ◆ 材料体系复杂, 良品率较低
- ◆ 产业链成熟度较差
- ◆ 适合柔性市场



Series 6
1.2×1.8 m²
420-445W

1.2

未来太阳能电池技术 – 谁主沉浮?



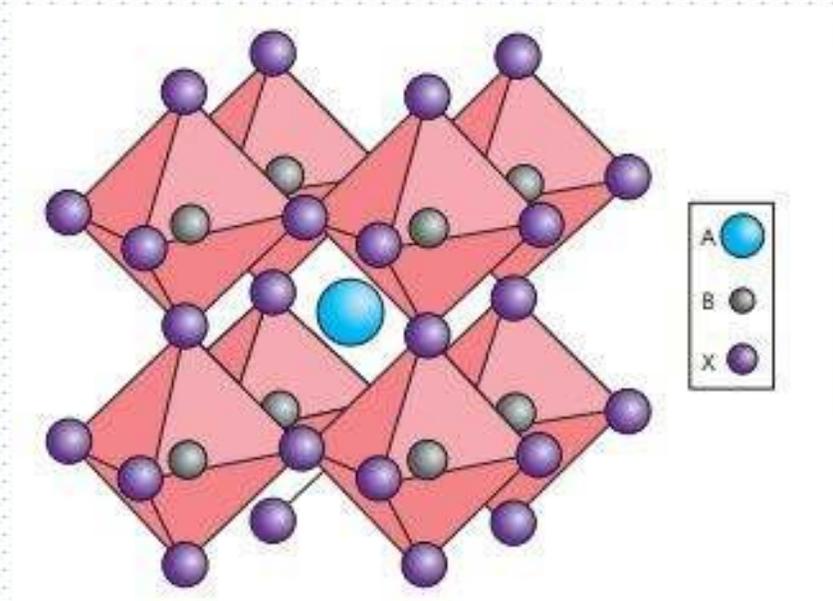
1.2

钙钛矿 (perovskite)材料



钛酸钙 (CaCO_3)

Lev Perovski



◆ A: Cs^+ , Rb^+ , MA^+ , FA^+

◆ B: Pb^{2+} , Sn^{2+}

◆ X: I^- , Br^- , Cl^-

1.2

优势：优良的材料性能

◆ 双极性半导体

◆ 载流子扩散长度大

◆ 缺陷容忍度高

◆ 高吸收系数

✓ 厚度：~0.4 μm

◆ 低温制备工艺

高效率

◆ 带隙大范围可调节

✓ 容易实现单结最佳带隙

✓ 多结叠层电池

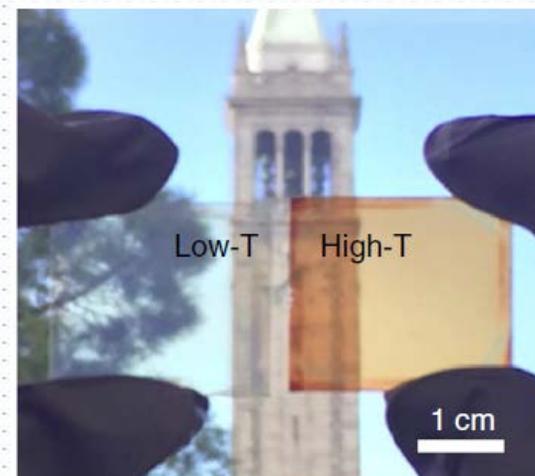
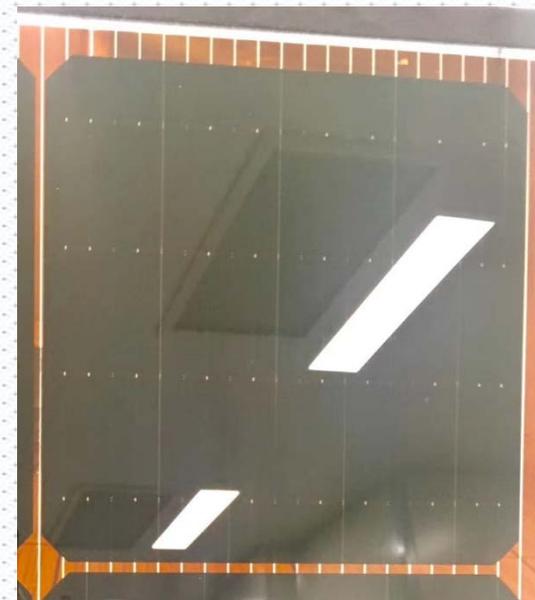
◆ 应用范围广泛

✓ 发光

✓ 显示

✓ 光电探测器

✓ 电致/热致变色



1.2

优势：高转换效率

◆ 晶体硅电池

✓ IBC-HIT: 26.6%

◆ 化合物薄膜电池

✓ CIGS: 22.6%

✓ CdTe: 22.1%

◆ 钙钛矿太阳电池

✓ 钙钛矿电池: 23.3%

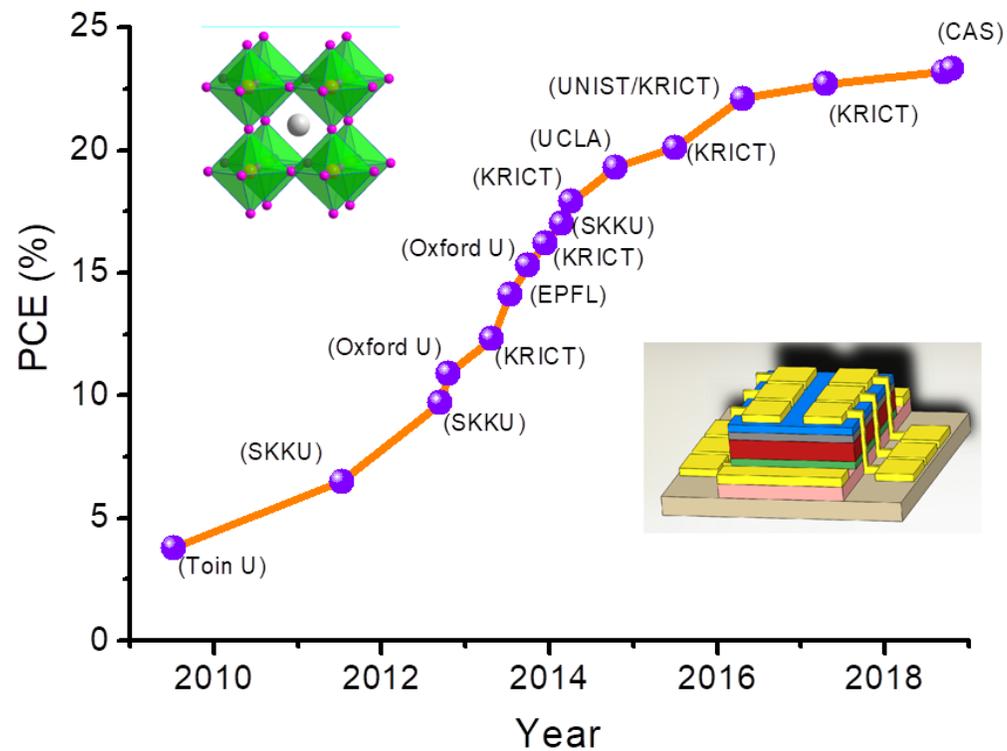
效率>20%:

◆ C-Si电池: ~30年

◆ 铜铟镓硒: ~30年

◆ 碲化镉: >40年

◆ 钙钛矿: 7年



1.2

优势：潜在低成本

◆ 真空法-蒸发

- ✓ 易于大面积制备

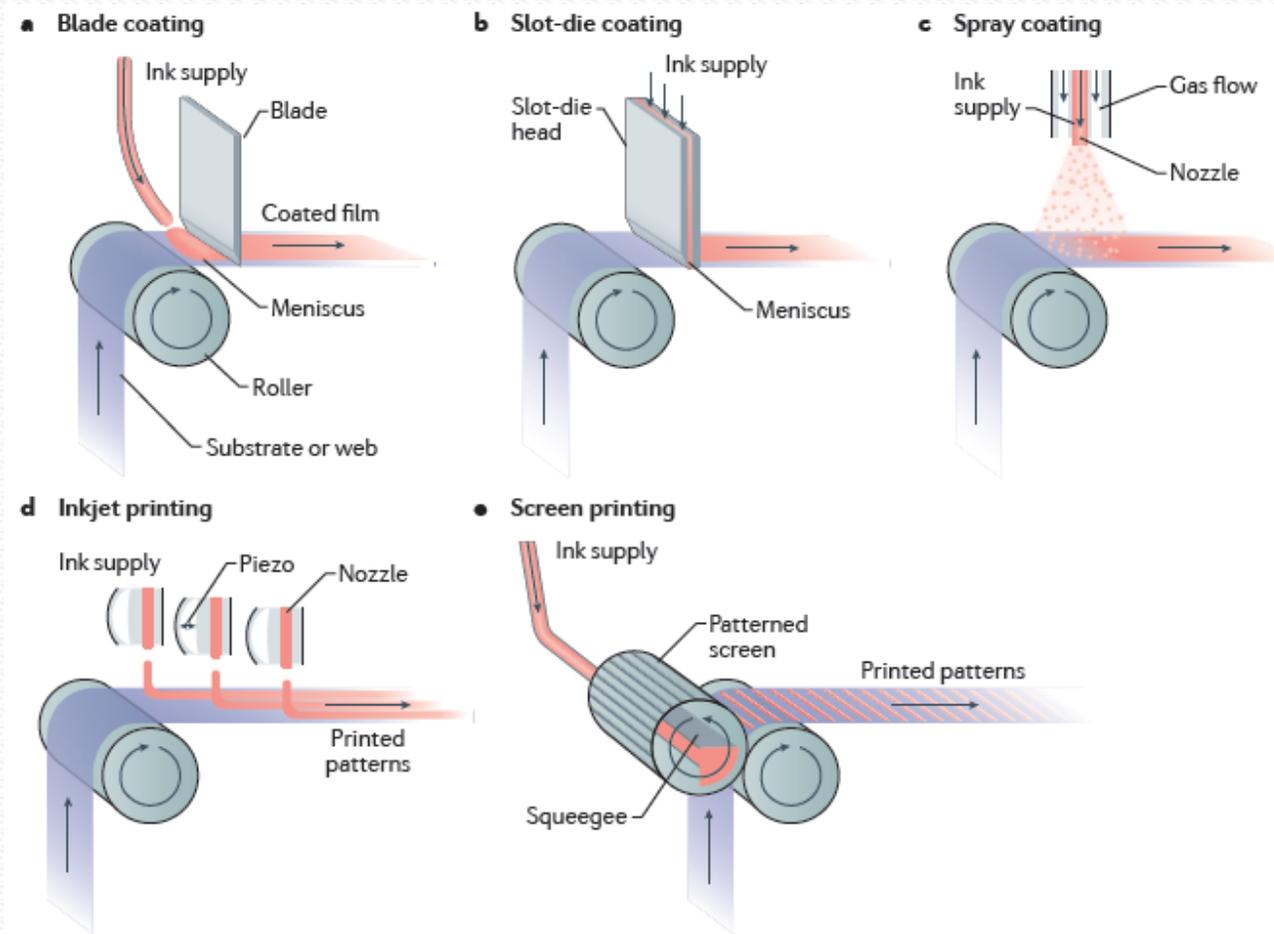
◆ 非真空法制备

- ✓ 湿法工艺
- ✓ 成本低廉
- ✓ 多种工艺

- Slot die
- 丝网印刷
- In-jet printing
- Spray coating

- ✓ 不使用稀缺元素

- ✓ 低工艺温度



Li, Z et al., Scalable fabrication of perovskite solar cells. **Nature Reviews Materials** 2018, 3 (4).

1.2

优势：应用范围广泛

◆ 玻璃衬底组件

◆ 柔性组件

- ✓ 轻量化
- ✓ 用于移动电源、可穿戴式设备
- ✓ 使用“卷对卷”生产技术
 - ✓ 设备紧凑
 - ✓ 成本低廉

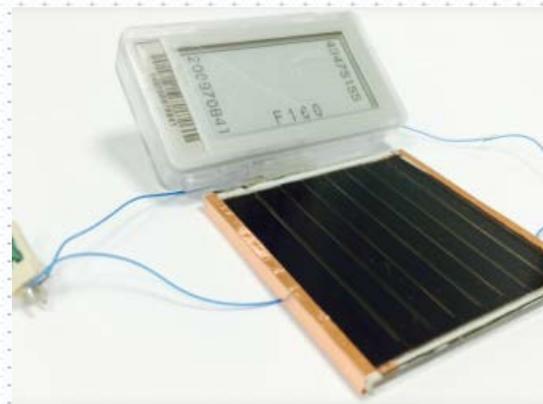
◆ 彩色和半透明

- ✓ 装饰建筑
- ✓ 光伏幕墙



◆ 弱光性能优异

- ✓ 室内发电
- ✓ 移动电源
- ✓ 可穿戴式设备电源



2

钙钛矿电池的 产业化现状与挑战

2.1

Oxford Photovoltaics



- ◆ 来自牛津大学的技术支持
- ◆ 17000m²中试线
- ◆ 2016 –收购Bosch Solar CISTech GmbH生产线，以实现钙钛矿的大规模生产，开发钙钛矿/硅叠层电池技术
- ◆ 钙钛矿层采用真空蒸发技术
- ◆ 2018年6月，实现perovskite/silicon叠层电池效率27.3%。（面积：1cm²，Fraunhofer）
- ◆ 可靠性测试：damp heat, TC, HF and light soaking

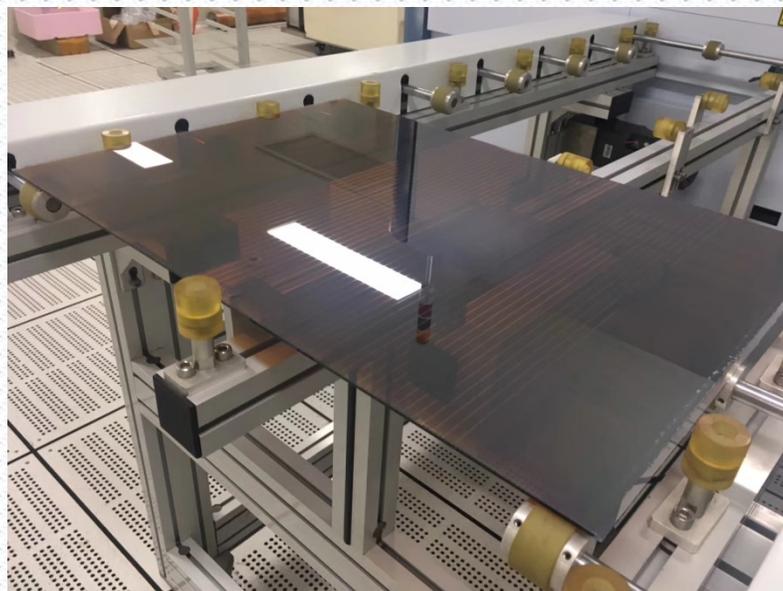
2.1

保利协鑫



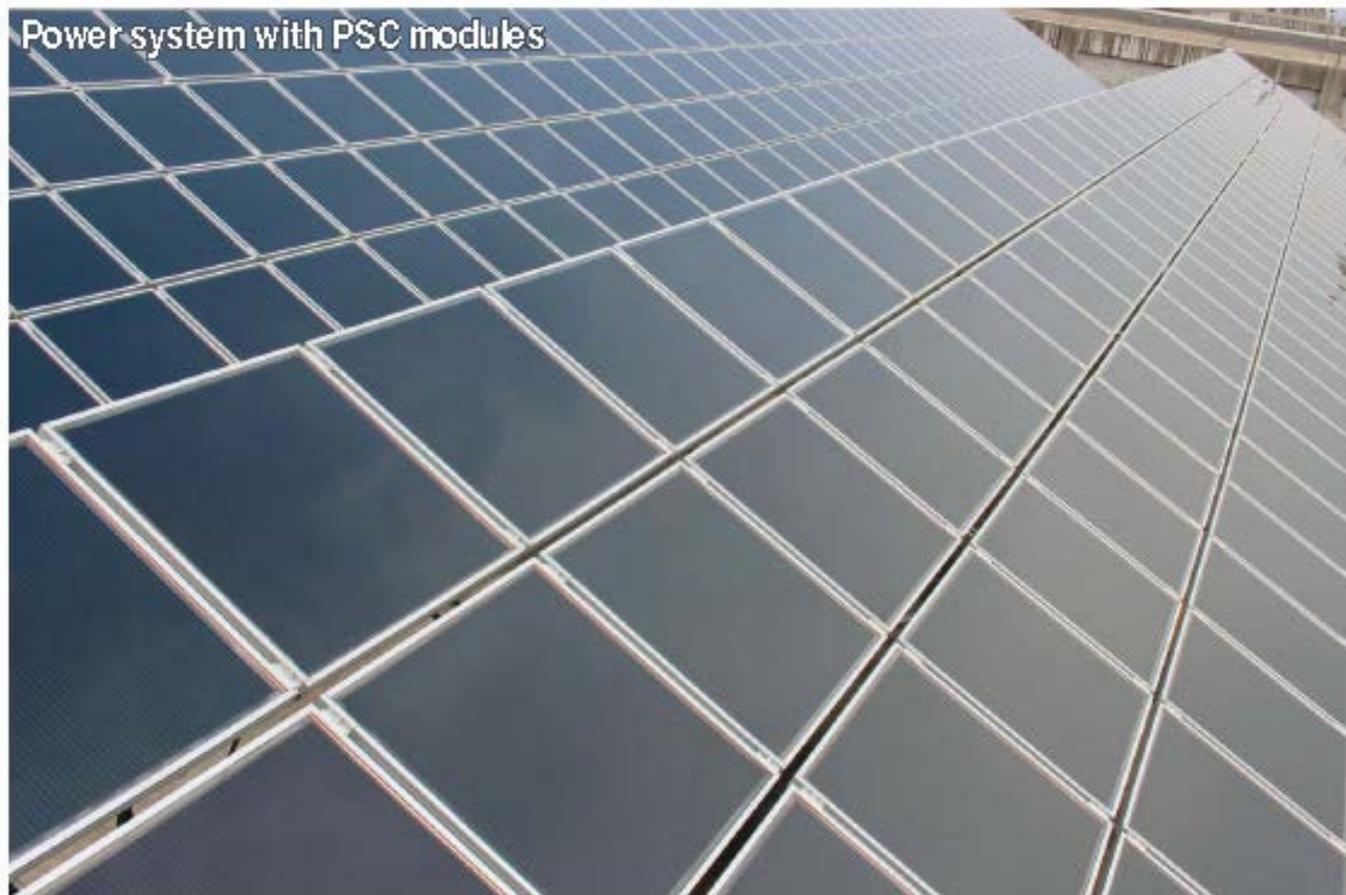
保利协鑫

- ◆ 收购厦门惟华;
- ◆ 建设中国第一条钙钛矿电池中试线;
- ◆ 组件面积: $45 \times 65 \text{cm}^2$.
- ◆ 效率 $> 15\%$
- ◆ 可靠性测试进行中



2.1

万度光能



- ◆ 依托华中科技大学韩宏伟团队
- ◆ 开发 $60\times 60\text{cm}^2$ 介孔结构钙钛矿光伏组件
- ◆ 建设 110m^2 光伏电站

Rong, Y, et al., Challenges for commercializing perovskite solar cells. Science 2018, 361 (6408).

2.1

还有其他众多企业

企业	动态
杭州众能光电	华中科技大学陈炜教授团队, 16.63% (20.77 cm ²)
杭州纤纳科技	组件效率世界纪录: 17.4% (17.8cm ²)
Solaronix	丝网印刷技术制备碳基结构的电池模组, 14% (500cm ²)
Solliance	14.5% (144 cm ²)
Sauletech	喷墨打印技术, 柔性组件
.....



几乎所有企业都处于中试阶段

2.2

技术挑战1：稳定性和可靠性问题

◆ 稳定性有了明显提高

- ✓ 3D/低维混合钙钛矿材料
- ✓ 多元阳离子/阴离子混合钙钛矿材料
- ✓ 表面包覆或者改性

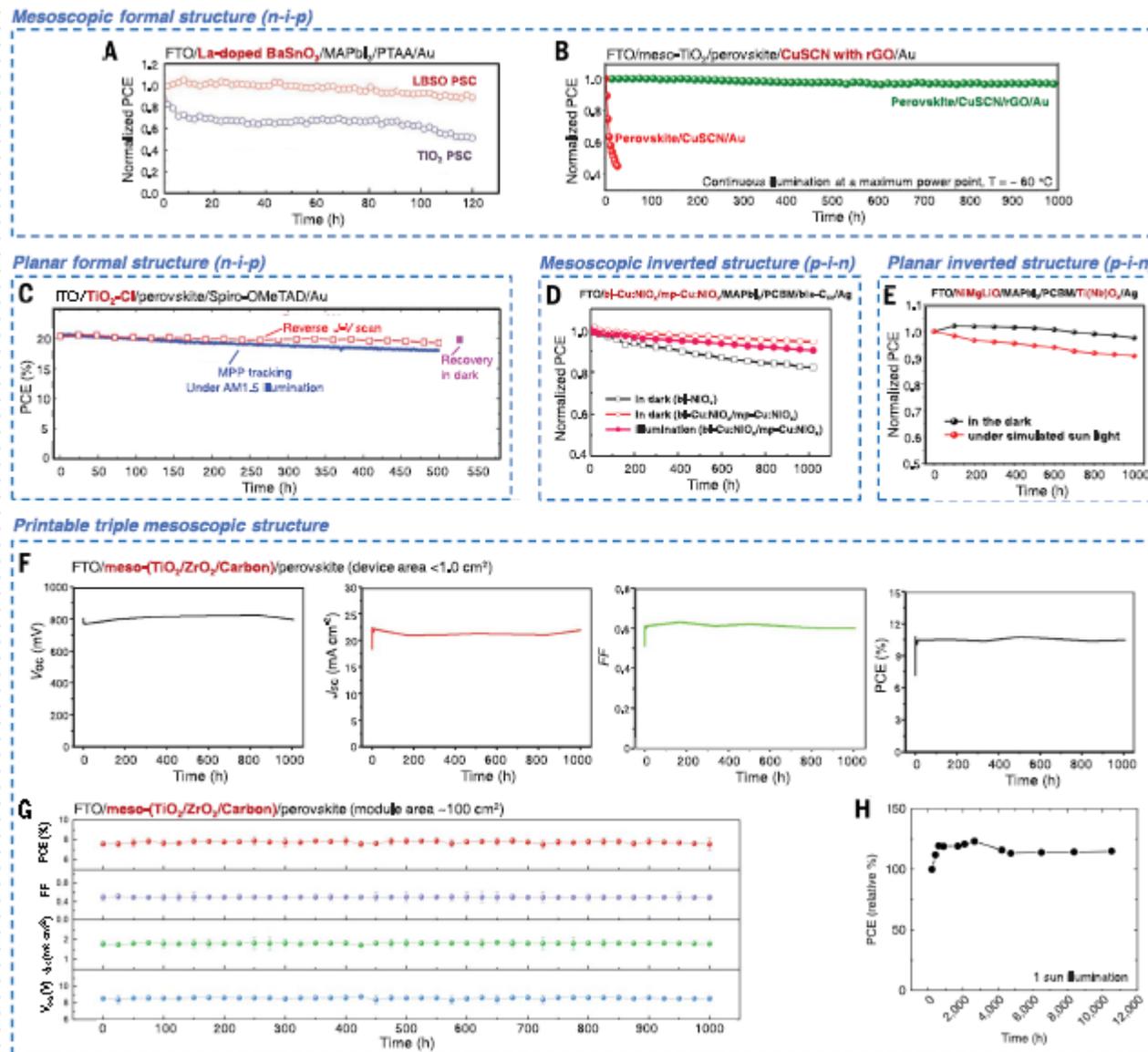
◆ 多个机构宣称钙钛矿组件可以满足IEC61215的测试要求

- ✓ 尚未看到第三方测试机构的结果

◆ 钙钛矿电池的PID和hot spot等问题的研究还很少。

稳定性和可靠性仍是最关键的技术挑战

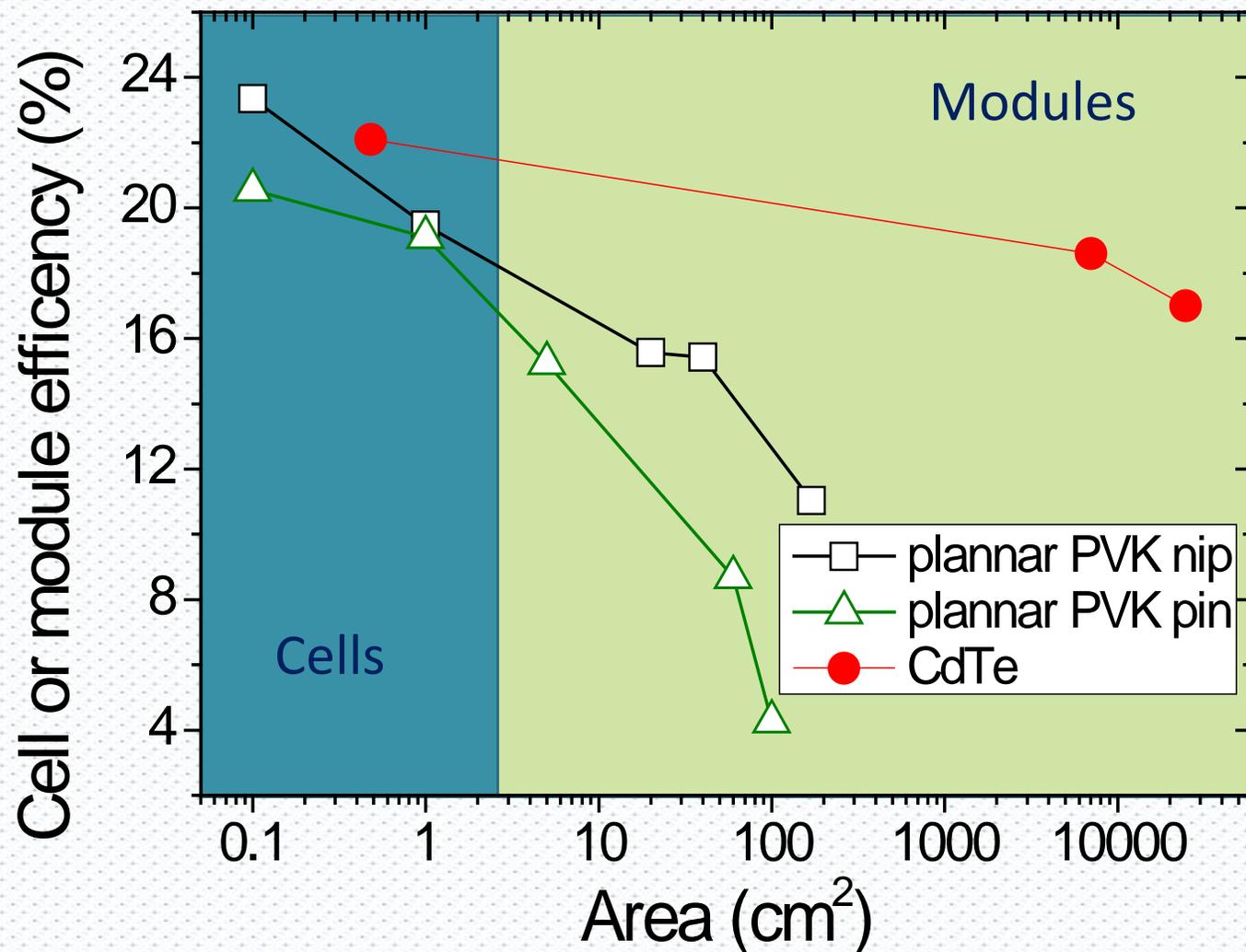
Rong, Y, et al., Challenges for commercializing perovskite solar cells. Science 2018, 361 (6408).



2.2

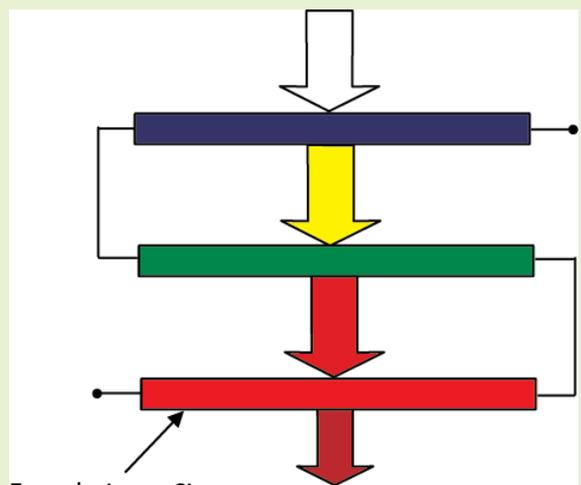
技术挑战2：大面积组件制备技术

- ◆ 和传统CdTe和CIGS电池相比, 组件面积对效率影响更显著;
- ◆ 大面积光吸收层沉积技术仍不够成熟;
- ◆ 组件制备技术仍需要探索。

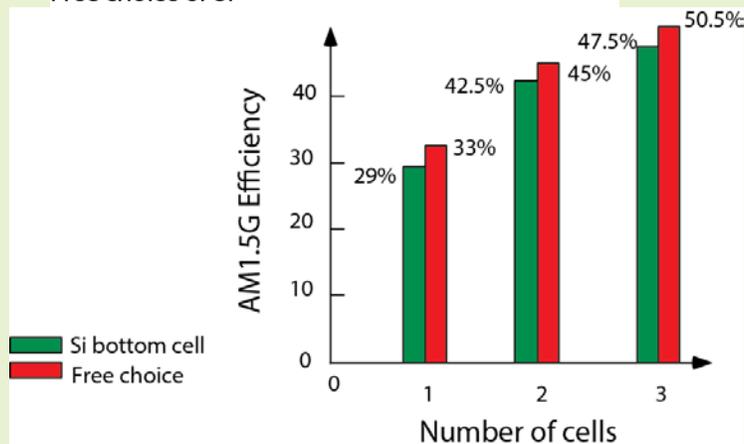


2.2

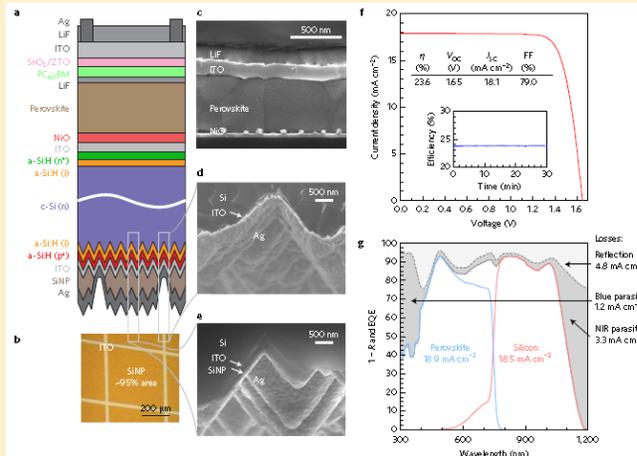
技术挑战3: Single, Tandem, 2T or 4T?



Free choice or Si



叠层电池结构是突破SQ limit的直接方法



Bush et al. NATURE ENERGY 2, 17009 (2017)

结构	Efficiency
PVK/PVK (2T)	20.7%
PVK/PVK (4T)	21%
PVK/CIGS (2T)	22.43%
PVK/CIGS (4T)	22.1%
PVK/Si (2T)	27.3%
PVK/Si (4T)	26.6%

◆ 2T:

- ✓ 需电流 (光谱) 匹配
- ✓ 工艺复杂
- ✓ 效率较低, 实际使用过程中由于光谱变化产生电流适配现象
- ✓ 良品率较低
- ✓ 成本较高
- ✓ 系统接线简单, 降低成本

◆ 4T:

- ✓ 组件结构简单
- ✓ 效率较高
- ✓ 系统接线复杂 (顶底电池电压匹配?)

**新能源技术研究院
及研究基础**

光伏领域研究方向

- ◆ 成立于2016年8月
- ◆ 16名教师，近30名研究生
- ◆ 面向产业开发，兼顾基础研究



3

仪器设备 (50余台套)

太阳能电池制备设备

- PECVD/HWCVD cluster ×1
- 线列式多靶溅射设备 ×1
- 多靶共溅射设备 ×3
- 钙钛矿电池一体化制备系统 ×1
- 电子束蒸发设备 ×2
- 手套箱匀胶机一体机 ×2
- 固相/气相硒化硫化设备 ×3



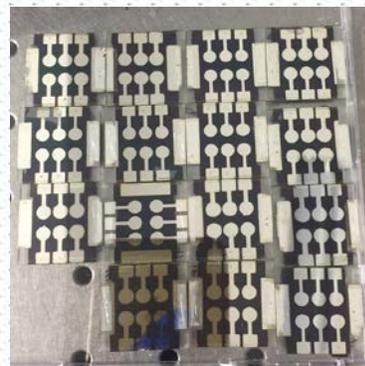
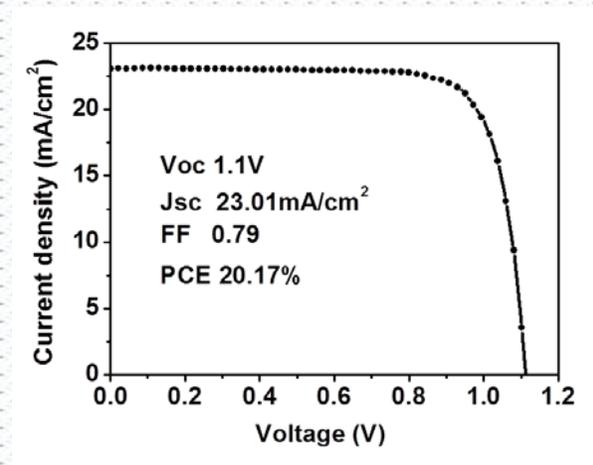
材料分析测试仪器

- X射线衍射仪
- 扫描电子显微镜
- 紫外-可见-近红外分光光度计
- 少子寿命测试仪
- 太阳模拟器
- 量子效率测试仪
- 电化学工作站及多波段光源
- X射线荧光光谱仪 (XRF)



3

从钙钛矿电池到组件



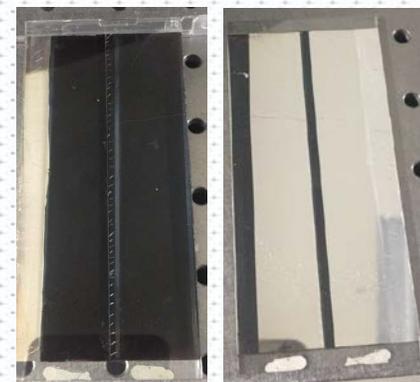
0.09 cm^2

大面积器件

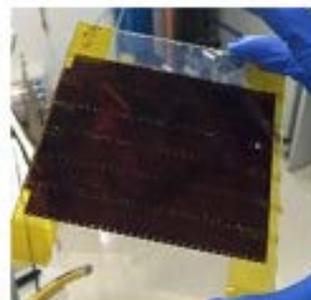


3 cm^2

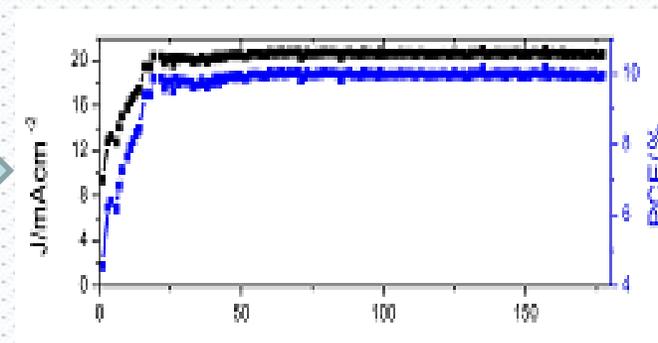
组件



30 cm^2

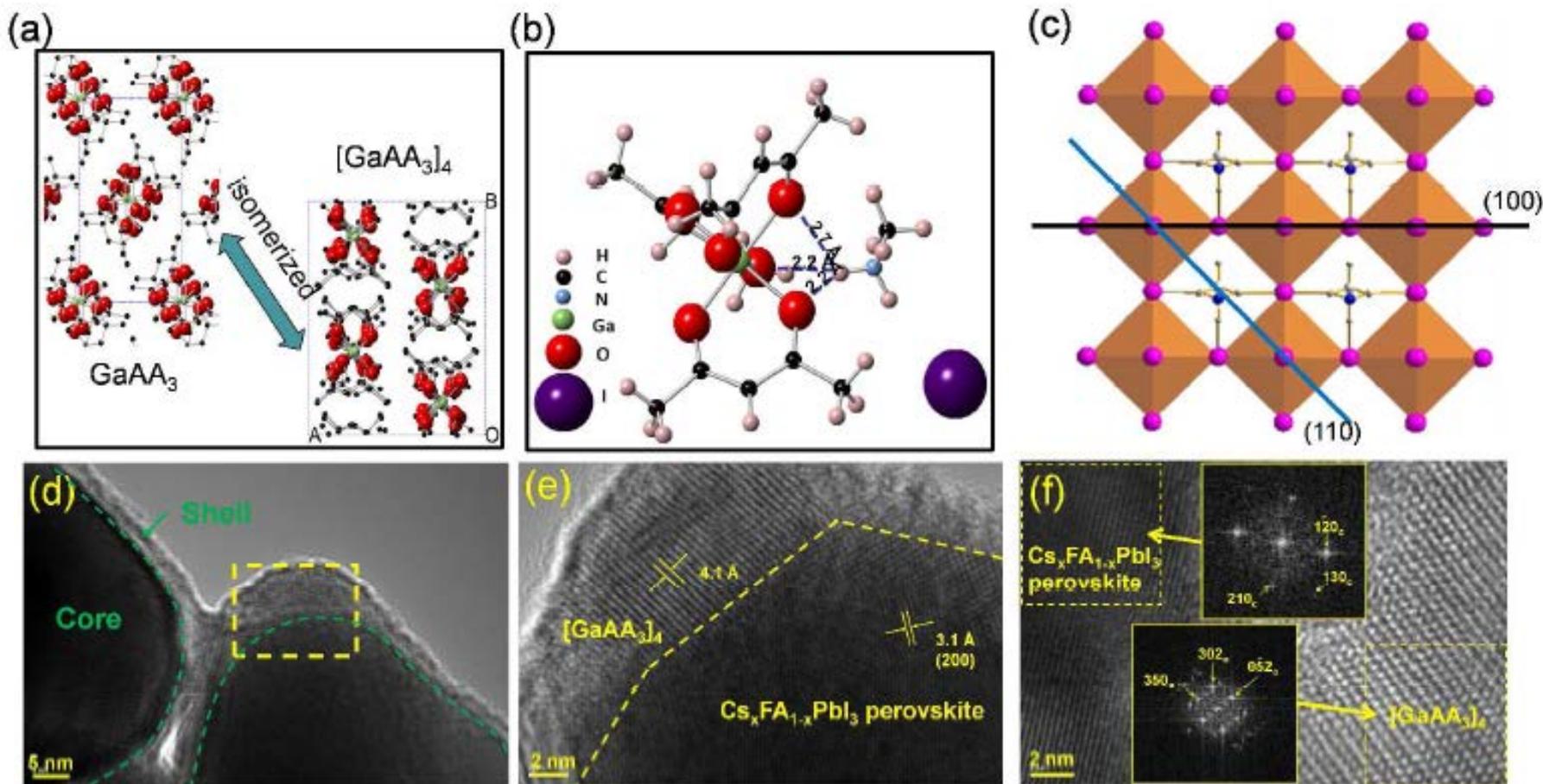


32 cm^2 组件实物图



3

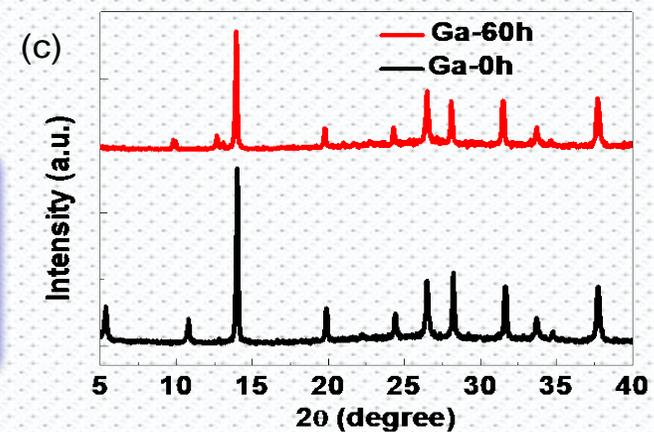
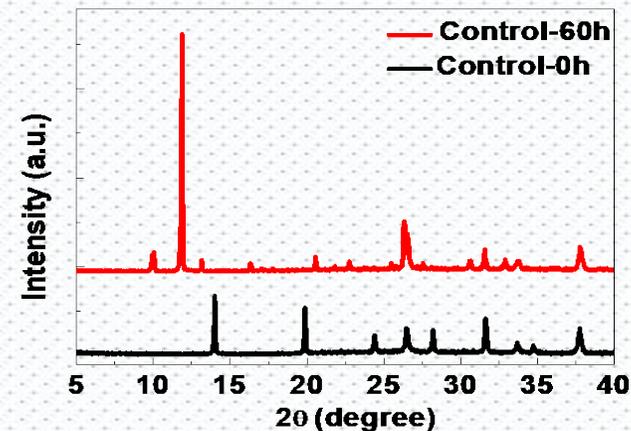
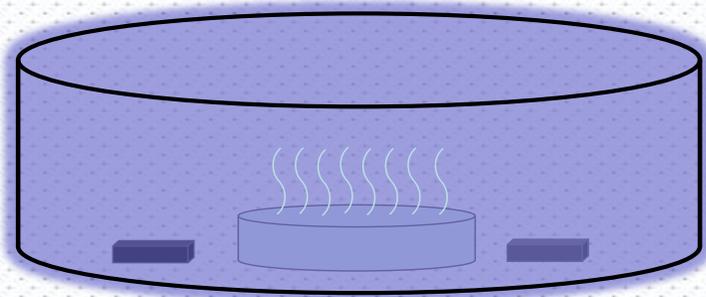
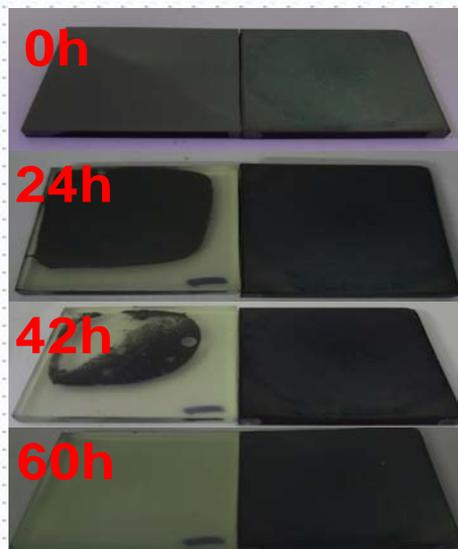
高稳定化学稳定性的钙钛矿太阳电池



$\text{Cs}_x\text{FA}_{1-x}\text{PbI}_3$ - $[\text{GaAA}_3]_4$ ($0 < x < 1$) hybrid perovskite

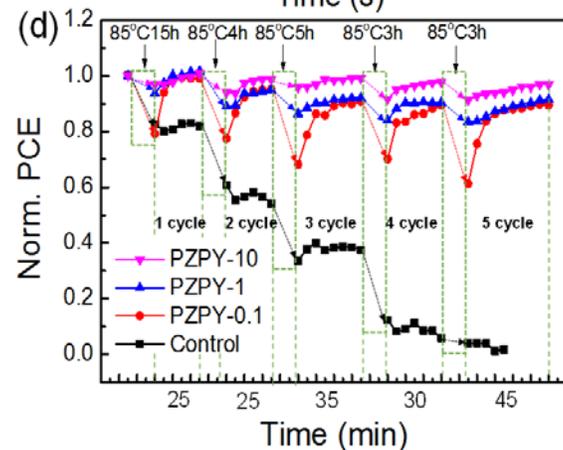
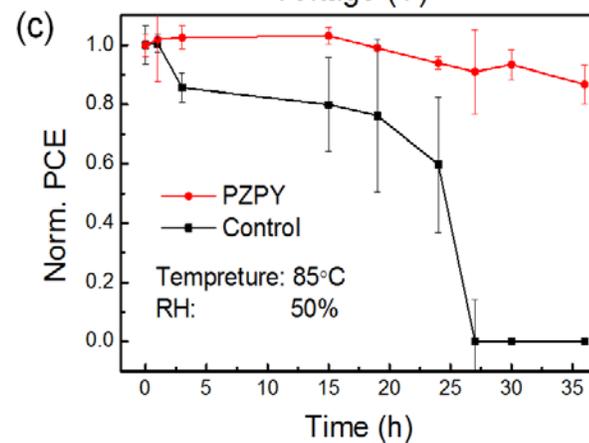
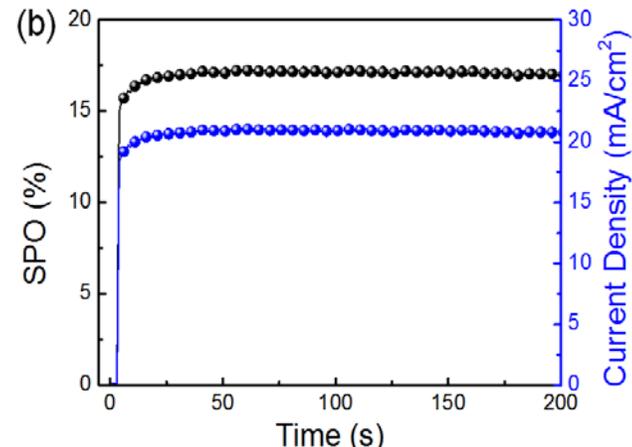
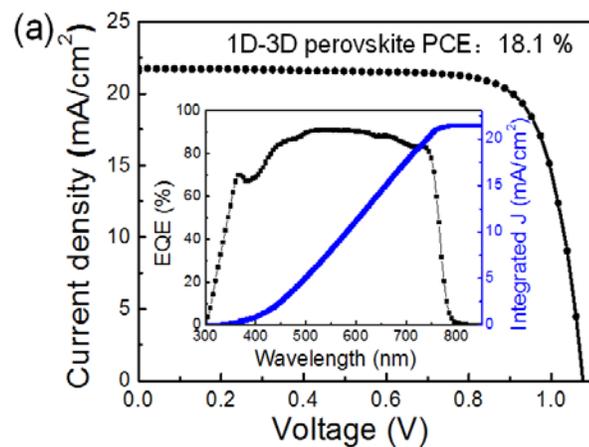
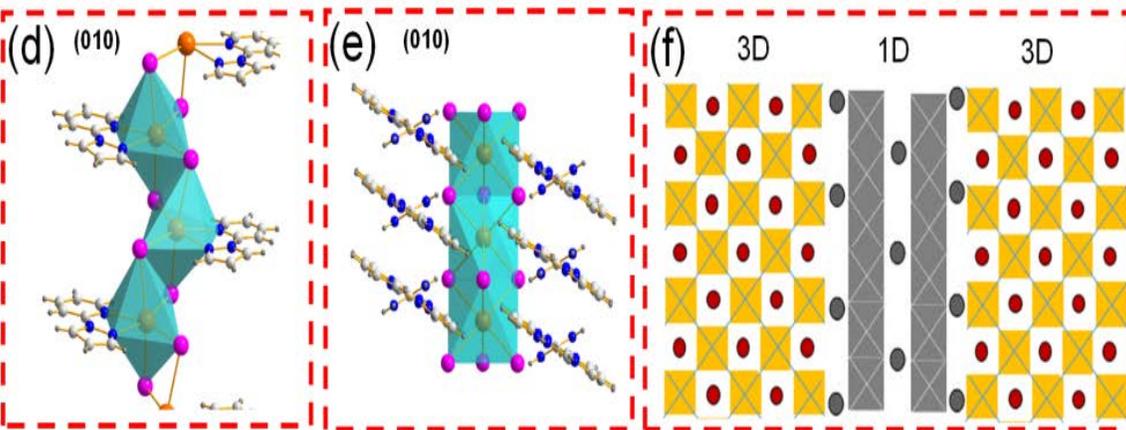
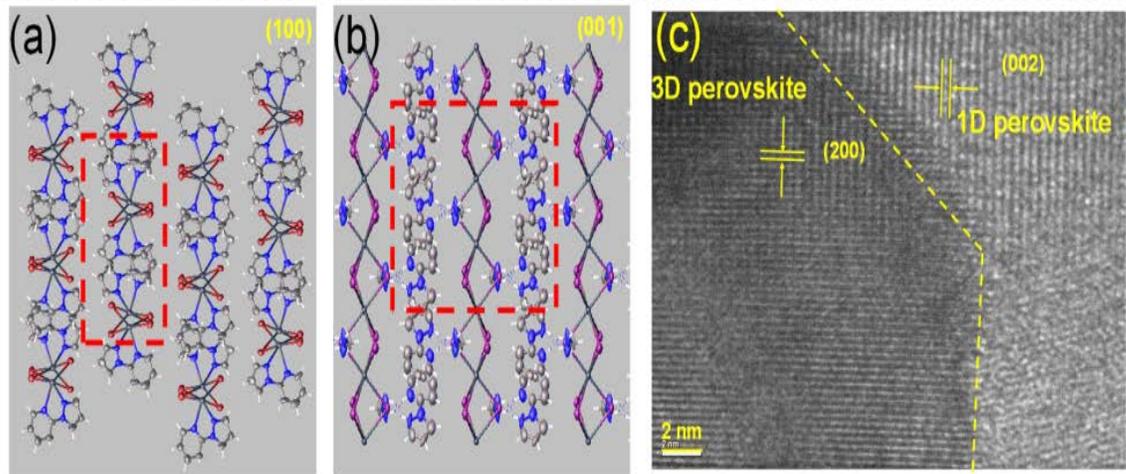
3

高化学稳定性的钙钛矿太阳电池



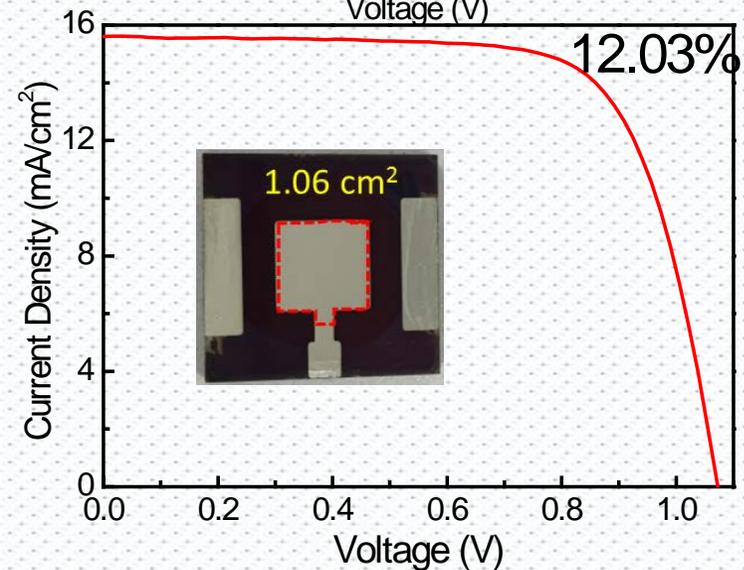
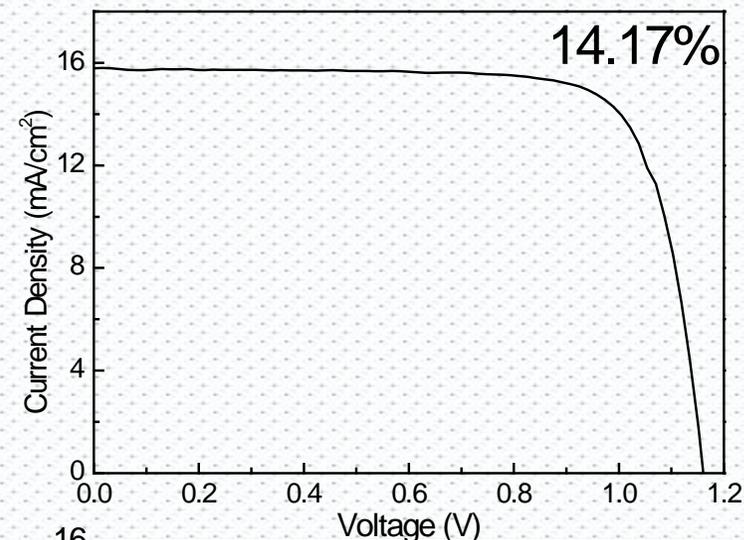
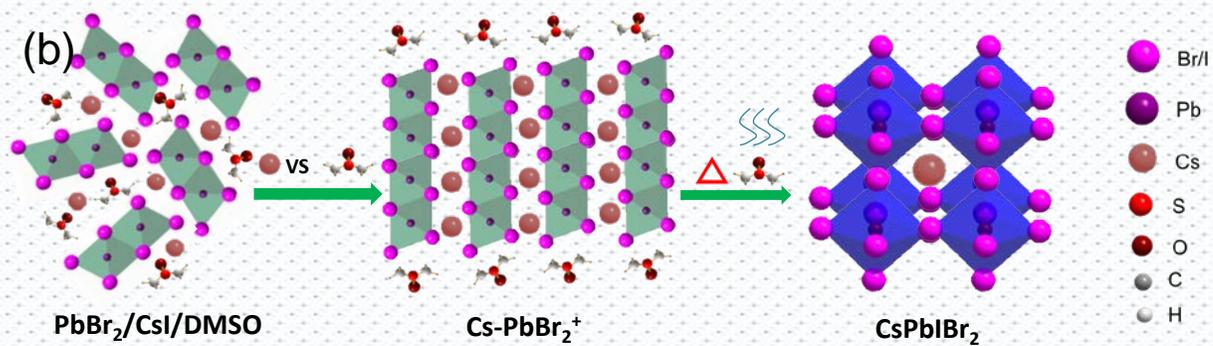
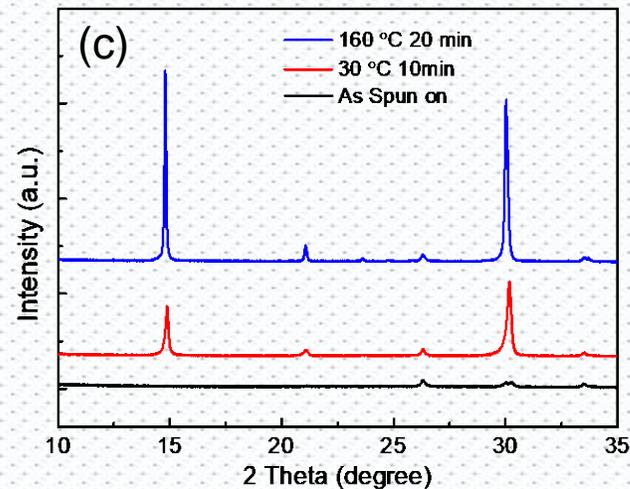
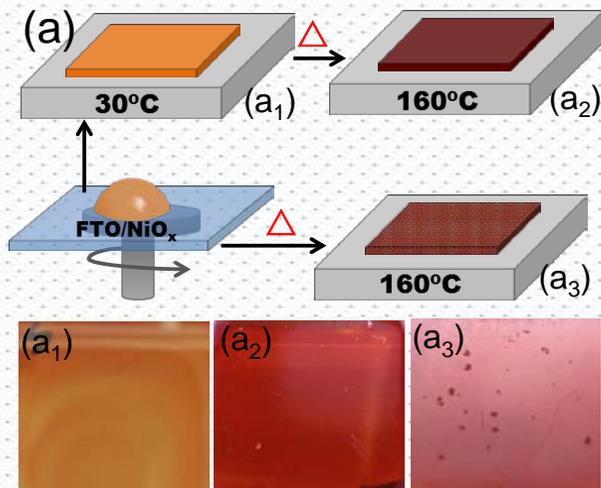
3

1D-3D混合热动力学自修复钙钛矿电池



3

高热稳定性全无机钙钛矿电池



Publications

- ◆ ACS Applied Materials & Interfaces 7, 9066-9071 (2015).
- ◆ ACS Photonics, 2016, 3, 371–377
- ◆ J. Mater. Chem. A, 2016, 4, 17104–17110.
- ◆ ACS Applied Materials & Interfaces 2016 , 8 (44) :30107
- ◆ Advanced Energy Materials, 1601433 1-9 (2016).
- ◆ Solar Energy 148, 70 (2017).
- ◆ ChemSusChem ,2017, 10, 3839–3845
- ◆ Nanoscale, 2017, 9, 13967–13975
- ◆ Scientific reports, 2016, 6, 35705
- ◆ Solar RRL, 2017, 1700141
- ◆ Advanced Optical Materials, 2017, 6(3):1700819.
- ◆ Advanced Energy Materials, 2017, 7, 1601433, 1-9
- ◆ Nano Energy, 2017, 41,75–83
- ◆ Energy & Environmental Science,2018, 11, 286-293.
- ◆ Journal of the American Chemical Society 2018, 140, 3825–3828
- ◆ Advanced Energy Materials, in revision

4

总结

- ◆ 光伏产业在过去10多年时间里飞速发展，平价上网即将实现；
- ◆ 钙钛矿太阳能电池具有高转换效率和潜在低成本等优势；
- ◆ 很多企业和机构开始了中试研究；
- ◆ 稳定性、可靠性和大面积组件制备仍是关键技术挑战；
- ◆ 暨南大学新能源技术研究院进行了大量研究，中试开发正在开展中。

谢 谢

联系方式:

麦耀华

yaohuamai@jnu.edu.cn

暨南大学番禺校区实验楼D104