



善用太阳光芒 创造绿能世界

Reliable

Efficient

Valuable

高效单晶电池产业化技术对组件效率的影响

何嵩 博士

2015年9月15日 北京

乐叶光伏科技有限公司

“领跑者”计划要求——组件光电转换效率多晶16.5%、单晶17%

■ 国家能源局、工业和信息化部、国家认监委联合发布《关于促进先进光伏技术产品应用和产业升级的意见》，2015年“领跑者”先进技术产品应达到以下指标：多晶硅电池组件和单晶硅电池组件的光电转换效率分别达到16.5%和17%以上

材料类型	电池片尺寸 (mm)	电池片数量 (片)	16.5%转化效率 对应组件峰值功率 (Wp)	17%转化效率 对应组件峰值功率 (Wp)
多晶硅	156×156	60	270	/
	156×156	72	325	/
单晶硅	156×156	60	/	275
	156×156	72	/	330

“领跑者”计划要求的组件功率与效率、对应电池片效率比较：多晶

多晶不同规格组件功率与转化效率对照表			
组件规格	功率与效率对应		
60片	组件功率 (W _p)	270	272
	组件效率	16.49%	16.62%
	需要电池效率	18.68%	18.82%
72片	组件功率 (W _p)	325	327
	组件效率	16.77%	16.87%
	需要电池效率	18.74%	18.85%

- 组件效率=组件功率/组件面积
- 所需电池效率=组件功率/(1-1%)/片数/电池面积
- 60片组件面积：1.637m² 【1.650m×0.992m】
- 72片组件面积：1.938m² 【1.956m×0.992m】
- 面积：24336mm²
- 组件功损：1%

“领跑者”计划要求的组件功率与效率、对应电池片效率比较：单晶M1

单晶不同规格组件功率与转化效率对照表				
组件规格	功率与效率对应			
60片	组件功率 (Wp)	275	277	278
	组件效率	16.82%	16.94%	17.00%
	需要电池效率	19.56%	19.70%	19.78%
72片	组件功率 (Wp)	330	332	335
	组件效率	17.00%	17.13%	17.28%
	需要电池效率	19.56%	19.68%	19.86%

- 组件效率=组件功率/组件面积
- 所需电池效率=组件功率/(1-3.5%)/片数/电池面积
- 60片组件面积：1.635m² 【1.650m×0.991m】
- 72片组件面积：1.938m² 【1.956m×0.991m】
- M1面积：24284.35mm²
- 组件功损：3.5%

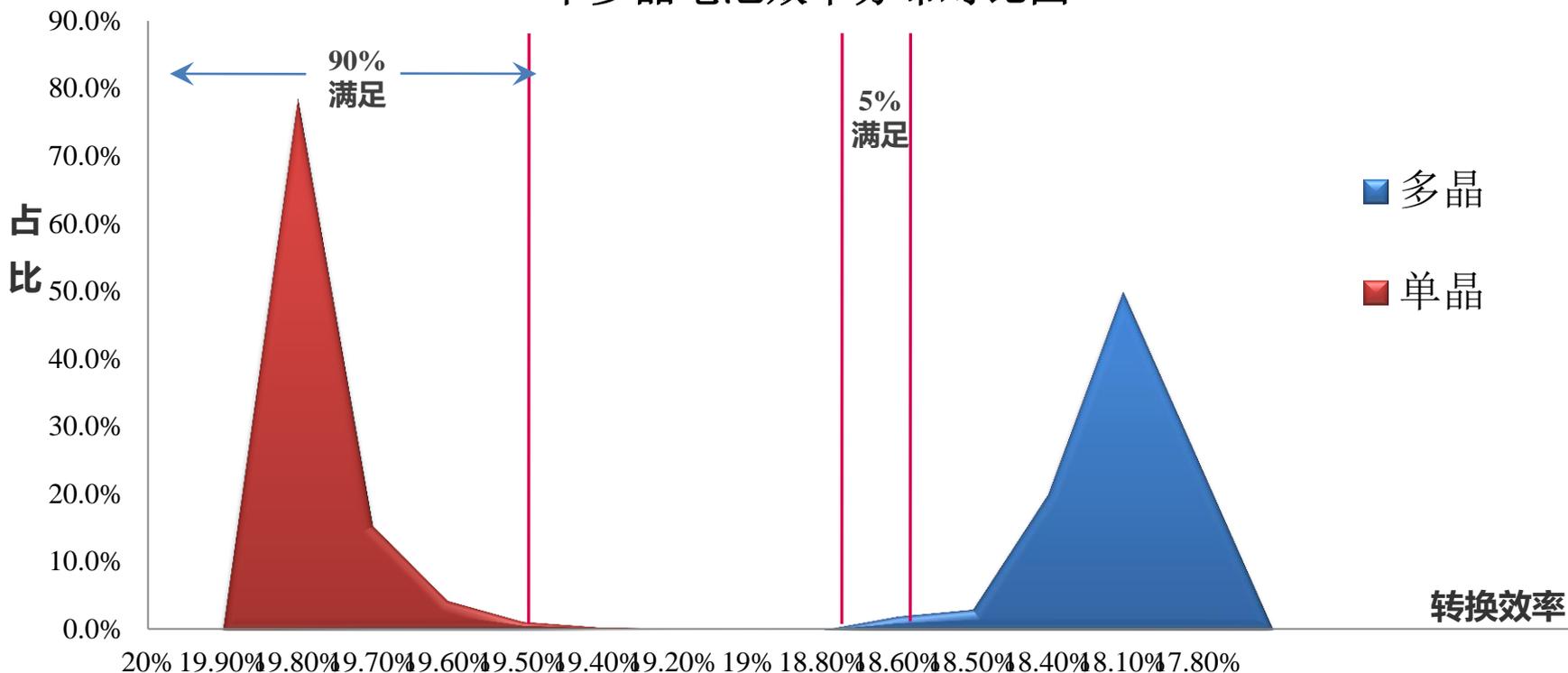
“领跑者”计划要求的组件功率与效率、对应电池片效率比较：单晶M2

单晶不同规格组件功率与转化效率对照表				
组件规格	功率与效率对应			
60片	组件功率 (Wp)	275	277	278
	组件效率	16.82%	16.94%	17.00%
	需要电池效率	19.44%	19.58%	19.65%
72片	组件功率 (Wp)	330	332	335
	组件效率	17.00%	17.13%	17.28%
	需要电池效率	19.44%	19.56%	19.73%

- 组件效率=组件功率/组件面积
- 所需电池效率=组件功率/(1-3.5%)/片数/电池面积
- 60片组件面积：1.635m² 【1.650m×0.991m】
- 72片组件面积：1.938m² 【1.956m×0.991m】
- M2面积：24431.55mm²
- 组件功损：3.5%

行业单晶电池量产效率19.70~19.80%，基本可满足“领跑者”计划要求；
行业多晶电池效率集中在~18.1%左右，难以可达到“领跑者”计划要求

单多晶电池效率分布对比图



单晶的经济性：显著节约土地、建材、工程、安装成本

单晶集约用地：

每1MW方阵组件用量比多晶少220块；
每50MW项目比多晶节约土地100亩



单晶节约建材：

每50MW项目比多晶节约160吨钢材(支架)
和40千米直流线缆



对于远距离运输项目，选择单晶还可显著节约物流成本

单晶节约工程量：

可节省8%的土方、桩基工程



单晶节约安装成本：

可节省5%的人工成本



单晶的发电能力——每瓦发电量比多晶高5%左右



中电投青海单晶系统与多晶比较，单晶每瓦发电量比多晶高 **4.77%**



阳光能源青海格尔木10MW单晶系统与10MW多晶系统比较，单晶发电量比多晶高 **5.12%**



中山大学太阳能研究所证实，每瓦单晶系统发电量比多晶高 **5.7%**



浙江大学硅材料重点实验室证实同样标称容量的单晶发电量比多晶高 **7%**



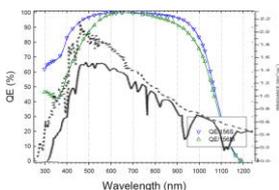
温度系数

多晶转换效率较低，更多光能转为热能；
温度提高1℃，输出功率下降0.41%-0.45%



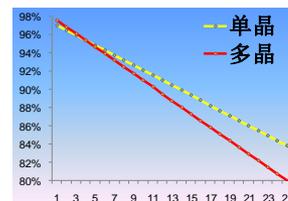
线损

同样容量，单晶电缆用量更少，
减少传输损耗



光谱响应

单晶量子效率高于多晶，弱光响应能力强，
逆变器有效工作时间更长



长期衰减

单晶组件平均年衰减0.55%，
多晶组件平均年衰减0.73%

电站投资成本比较：单晶系统和多晶系统基本持平

比较基准：国内一线品牌单晶和多晶组件

	单晶	多晶	备注
组件规格	156*156*60	156*156*60	/
组件功率	275W	260W	/
组件单价	4.11元/W	3.98元/W	国内一线品牌价格

系统投资结构：单晶组件价格高0.13元/W，BOS成本节约0.14元/W，总成本节约0.01元/W

	单晶	多晶	备注
组件	4.11	3.98	国内一线品牌
金额与组件数量相关的设备	1.15	1.24	支架、夹具、支墩、串联电缆、汇流箱、汇流电缆、接地系统等
建安工程费	0.50	0.54	人工费、安装费
金额与组件数量无关的设备	0.90	0.90	逆变器、变压器、配电柜、控制系统、升压系统等
综合管理费	0.40	0.41	材料费、项目管理费等
合计	7.06	7.07	

单晶的可靠性——超过30年应用实践，是唯一经受长期验证的技术路线



1982年
瑞士
10KW单晶系统
年均衰减0.4%



1986年
云南石屏
民用单晶系统
年均衰减0.53%



1983年
日本奈良
单晶光伏电站
至今无质量瑕疵



1994年
浙江宁波
单晶光伏电站
21年总衰减13.1%



1984年
甘肃兰州
风光互补单晶
年均衰减0.37%



1995年
西藏班戈
民用单晶
20年高海拔考验



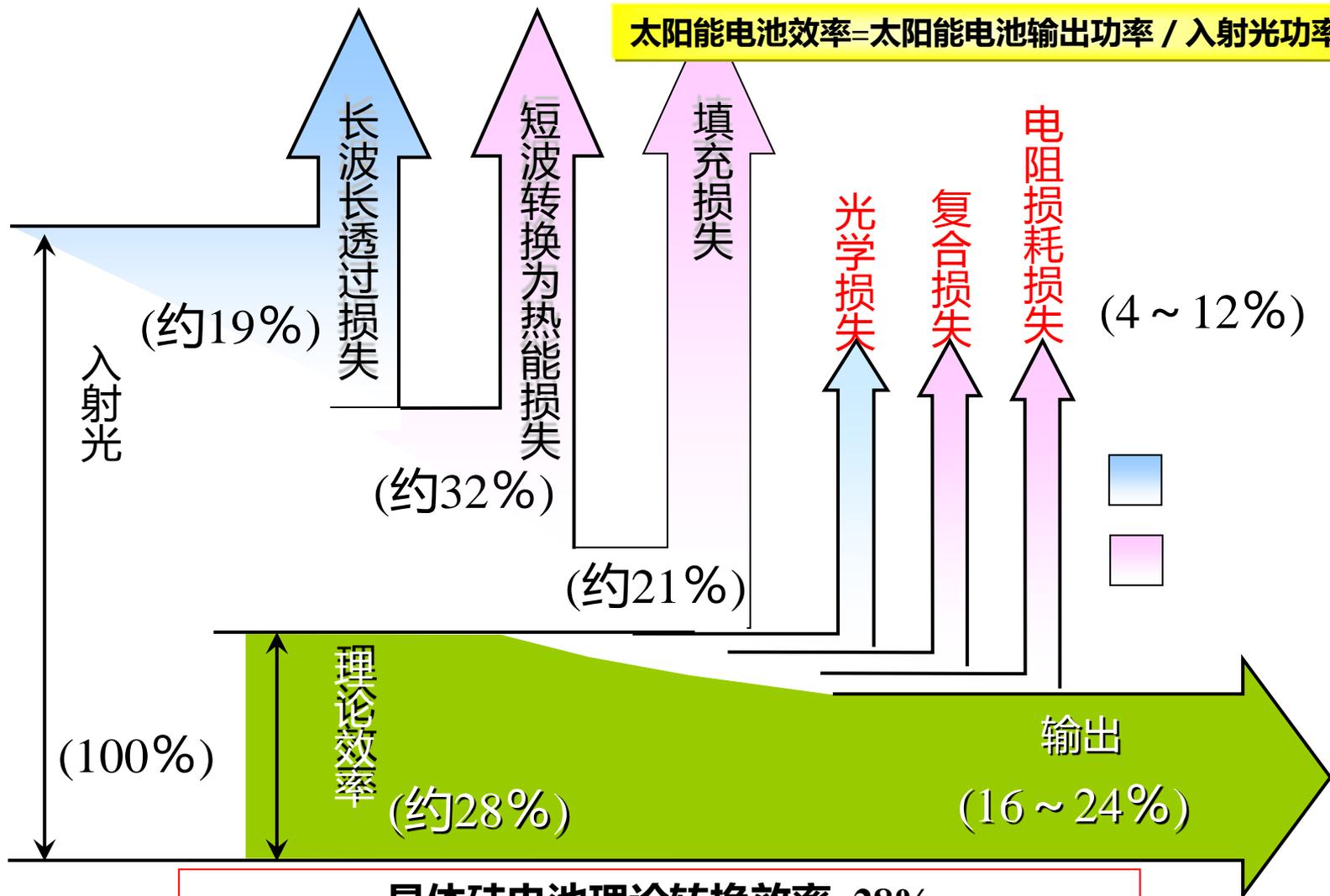
1984年
美国加州
1MW荒漠单晶
年均衰减0.9%



1997年
德国慕尼黑
兆瓦级单晶屋顶
年均衰减0.4%

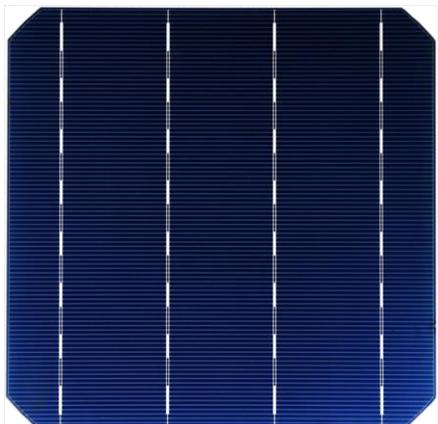
电池转换效率是决定投资收益的关键因素，晶硅电池理论效率约28%

$$\text{太阳能电池效率} = \text{太阳能电池输出功率} / \text{入射光功率}$$



晶体硅电池理论转换效率~28%

单晶电池在实验室和量产效率指标上遥遥领先于多晶电池



MONO

单晶实验室效率

- P型 PERL —— 25% (UNSW)
- N型 IBC —— 25% (SunPower)
- N型 HIT —— 24.7% (Panasonic)
- N型 HIT+IBC —— 25.6% (Panasonic)

单晶量产效率

- 现阶段 —— 19.5%~19.8%
- P型 PERC —— 20.5%~20.7%
- N型 HIT、IBC —— 22%~23%



MULTI

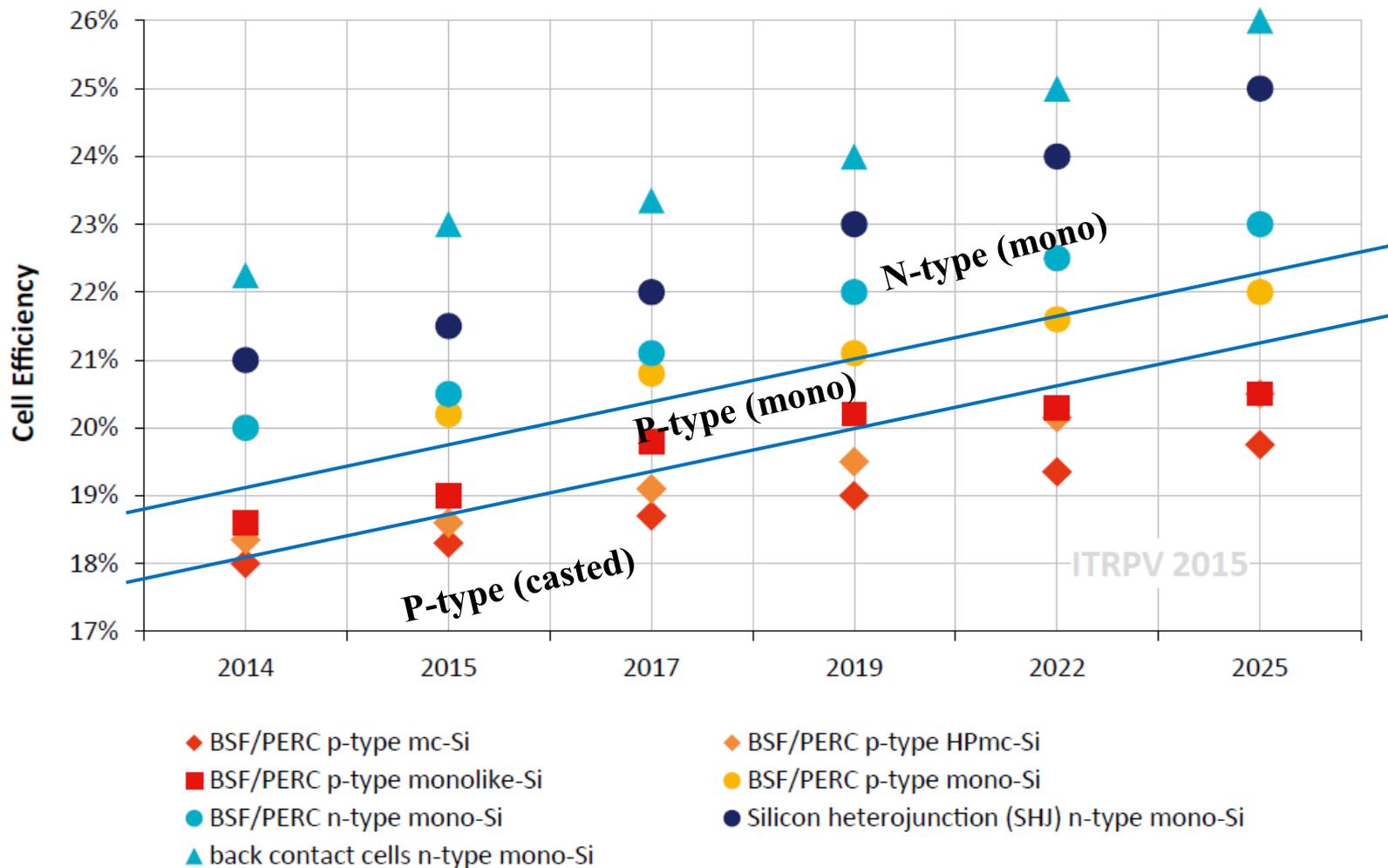
多晶实验室效率

- PERC多晶 —— 20.76% (Trina Solar)

多晶量产效率

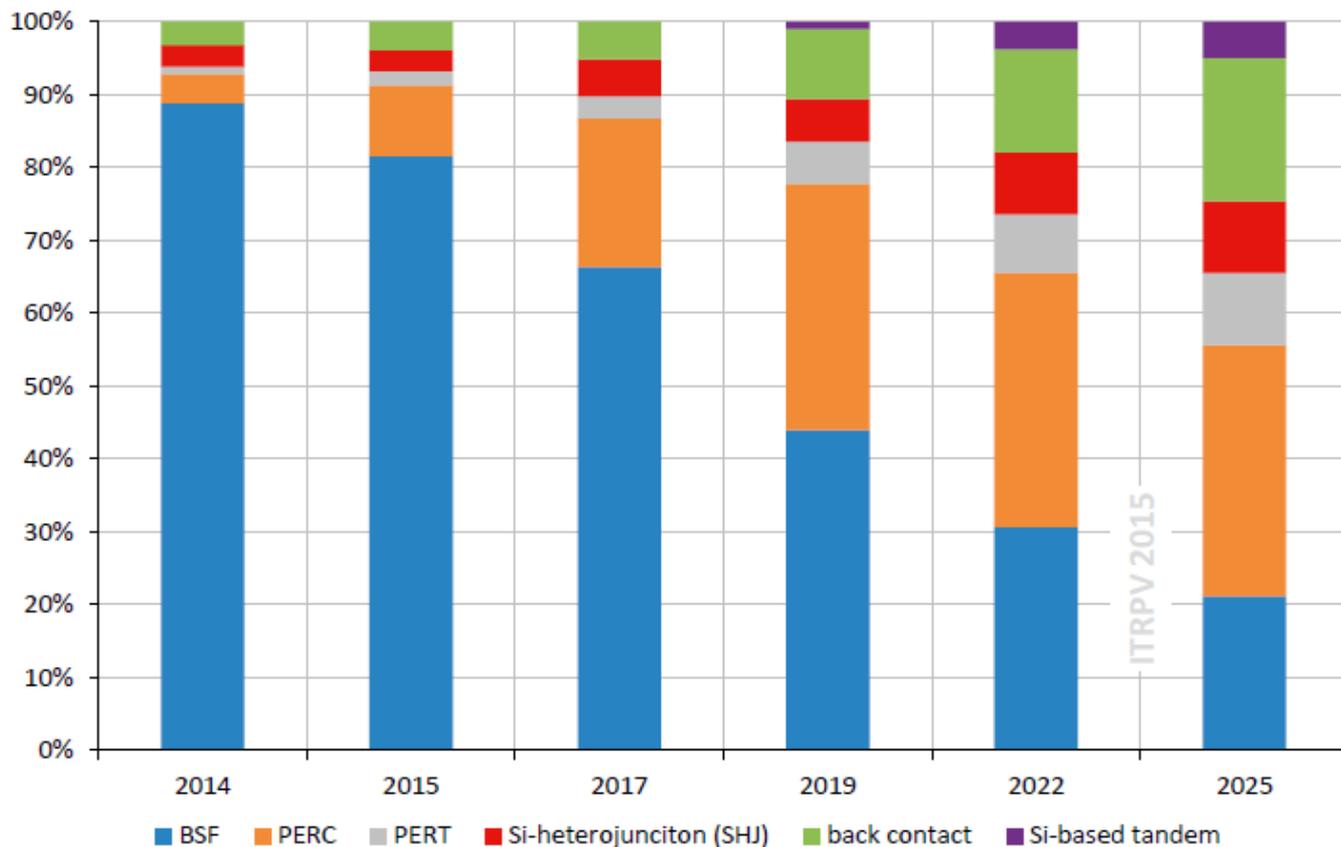
- 现阶段 —— 18.0%-18.3%
- PERC多晶 —— 18.5%~18.7%

单晶电池量产转换效率优势持续扩大 (ITRPV)



21%的量产转换效率是P型和N型电池技术的分水岭

未来高效电池技术产业化趋势：常规电池产量持续下降，PERC份额提升空间最大，其次为背接触和异质结技术（ITRPV）



单晶LID解决方案——进一步提高有效发电量

■ 降低LID的主要措施

- 降低硅片氧含量

- 市场主流数值为20ppma，隆基可实现量产15ppma以下，研发13ppma以下，最低5ppma

- 电池端采用退火工艺

- 改变掺杂剂

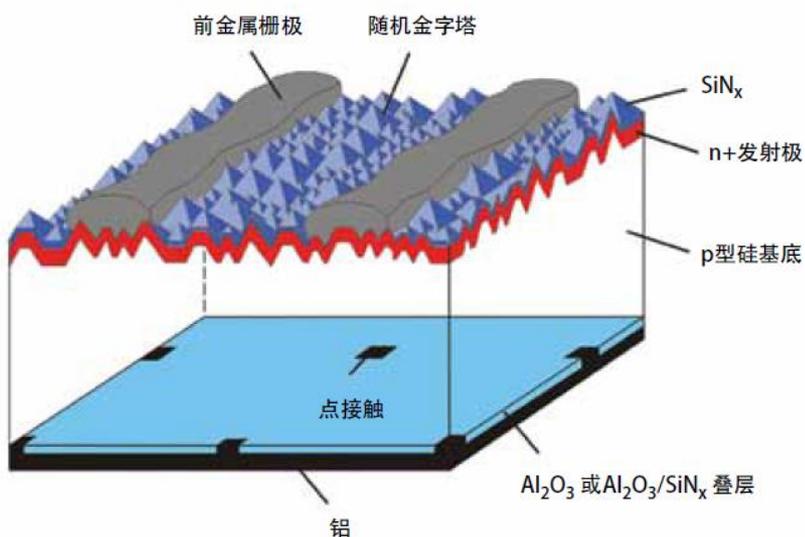
- 全掺镓（3.5米长晶棒头尾电阻率比约14）（尚在专利保护期内）

- 硼镓共掺（头部电阻率3，尾部电阻率0.5，电阻均匀性较好，尾部寿命 $\geq 20\mu\text{s}$ ）

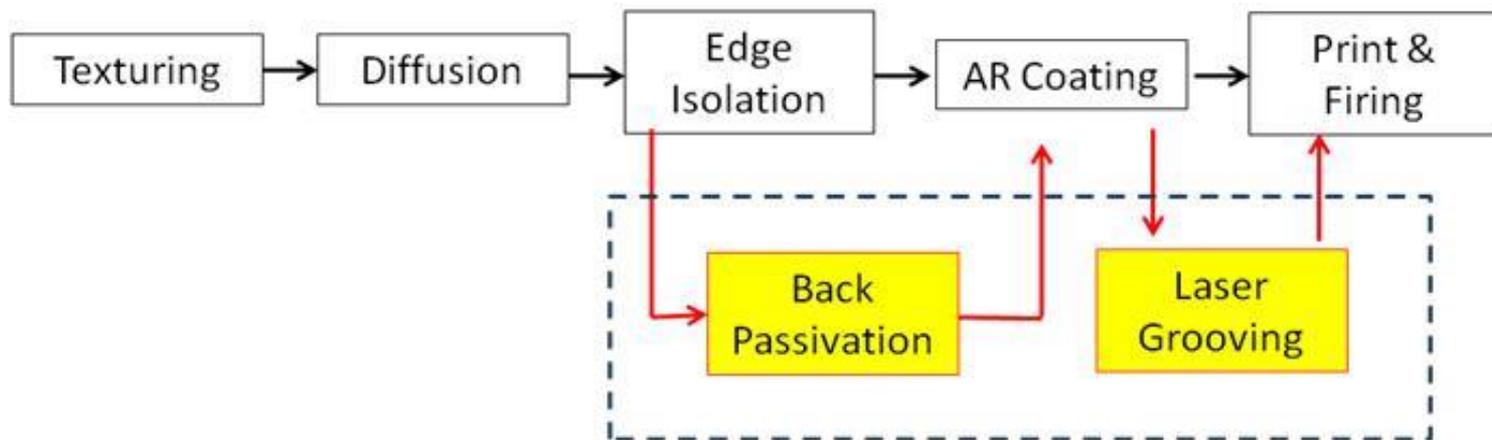
■ 隆基前期与客户做过LID方面的研究验证，LID最低可以做到0.5%以下

■ N型单晶电池可实现零LID，而且N型比P型的转换效率更高

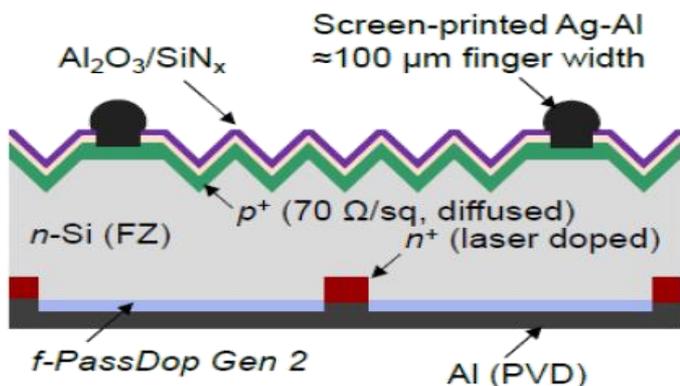
产业化高效电池技术——P型PERC单晶技术



- PERC电池效率绝对值在P型单晶上可提高1%，在多晶上可提高0.5%~0.7%，因此在单晶上采用PERC技术优势更大
- PERC技术与现有产线兼容度高，易进行产线升级，每瓦成本相对传统晶硅电池增加小(~10%)
- PERC电池将成为行业主流技术并逐步替代常规电池
- 单晶PERC实验室转换效率21.7%(SolarWorld)，量产效率可达20.5~21%
- PERC电池LID问题可以通过硅片掺镓、减少氧含量或光照退火工艺解决



产业化高效电池技术——N型PERC单晶技术



- N型PERC单晶效率比P型PERC高~0.5%，工艺难度和成本低于HIT和IBC技术
- N型PERC电池初始光衰为零
- 正面采用硼的离子注入和三氧化二铝钝化工艺，背面采用磷的激光掺杂和铝的PVD工艺

Single Side Texture (FS)

Single Side Boron Diffusion (FS)

PassDop Deposition (RS, PECVD)

Al₂O₃ (FS, ALD)

ARC SiN_x (FS, PECVD)

Screen-Printing (FS)

Firing

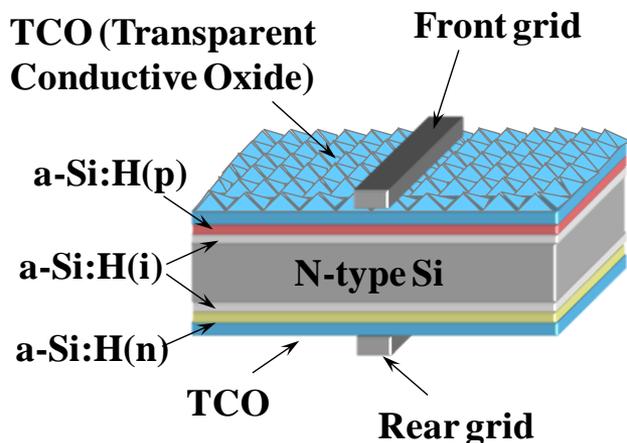
PassDop Laser (RS)

Al (RS, PVD)

量产实例：

- 韩国LGE量产N型单晶PERC效率21.5%~22%(无主栅设计)，
- 采用Schmid铜线组件封装技术的Neon2品牌组件功率320Wp

产业化高效电池技术——单晶HIT电池技术（提高Voc）



HIT电池生产、研发机构名单

	Area [cm ²]	V _{oc} [mV]	J _{sc} [mA/c m ²]	FF [%]	η [%]	Comment
Silevo	239	739	39,9	80,5	23,1	Tunnel oxide passivation J.Heng 40th IEEE PVSC 2014
R&R	239	736	38,6	81,3	23,1	Smart wire no BB GridTOUCH measured D.Bätzner, Silicon PV 2014
Choshu	239	733	37,3	81,8	22,3	Rear Emitter cell J. Nakamura, nPV Workshop 2013
CEA-INES	105	730	38,7	78,8	22,3	PJ. Riberon, Silicon PV 2014
Kaneka	171	738	40	81,9	24,2	Copper plated front grid JL Hernandez, EUPVSC 2013
Panasonic	101.8	750	39,5	83,2	24,7	98 μm thin wafer M. Taguchi, IEEE JPV 2013

- 实验室最高转换效率24.7%，量产效率可达 ~22.5% (Panasonic)
- Panasonic HIT 组件的CTM有8%增益，组件效率与IBC(CTM~0)一样
- 成本介于PERC和IBC之间
- 温度系数-0.25%/°C，大大低于常规晶硅电池-0.41~-0.45 %/°C
- 采用非晶硅薄层进行双面钝化，电池开压可提升至740毫伏
- 良好的钝化效果可以使硅片非常薄 (<100um)，降低成本
- 全程采用低温 (~200C)制造工艺，全对称双面电池构造，可避免高温制程产生的弯片现象
- 从经验上观察，通常HIT电池的量产效率比研发效率低10%；

产业化高效电池技术——HIT电池的生产情况

日本松下 (Panasonic) :

- 现有产能共1GW，160MW为一条产线，电池线的设备价格为3.5亿元人民币
- 电池量产转换效率 ~22.5%，组件端良品率 ~99%，设备开机率 ~96%，CTM~ -8%
- 马来西亚工厂HIT组件成本 ~0.7美元/瓦
- 所有硅片电池均为125mm×125mm，主要原因是薄片化（初始硅片厚度150 μ m，制成电池后厚度为110 μ m）后如果采用156mm×156mm硅片在丝网印刷段容易碎片
- 最早投入使用至今大约11年，累计衰减仅为2%~3%

欧美大规模量产计划：

- Solarcity 收购Silevo，在美国建设1GW HIT电池工厂；
- 欧洲联合研究中心最近公布“MW级先进光伏制造工厂计划（X-GWp），核心目标是推动新型高效（22-25%）HIT电池的量产，预计在2017年建设产能1GW的工厂。

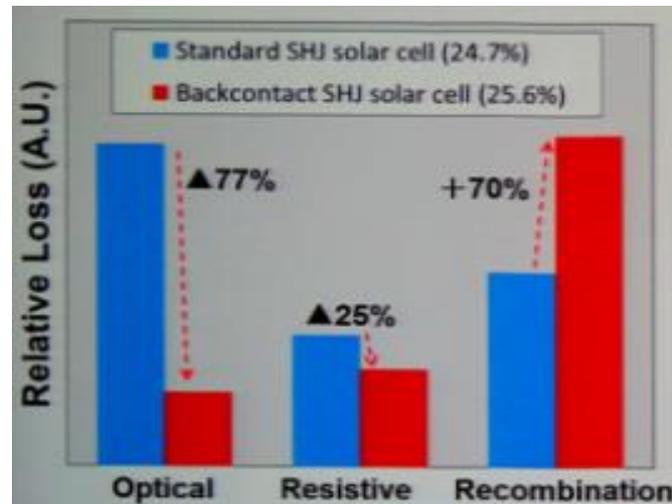
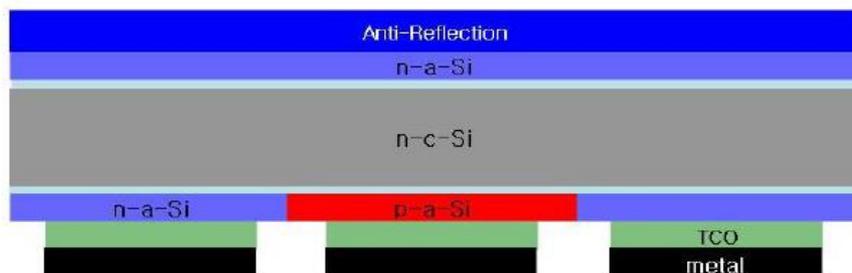
H I T 高成本的主要原因和解决途径

- 高设备折旧（~40%）——采用低成本设备，提高设备使用率
- 低温银浆和TCO成本高---提高材料使用率（减少用量）；替换低成本材料（铜电镀）
-提高铜电镀的良品率
- 硅片价格高，Panasonic的硅材料为长单，价格为4.6美元/公斤

换算成为硅片成本为1美元/片（125*125规格），目前市场上的硅料价格为18美元/公斤，换算成为硅片成本为0.73美元/片（125*125规格）
- 一旦Panasonic的硅片长单到期，采用市场价格的硅料，那么HIT组件的成本会降低0.1美元/瓦，即~0.6美元/瓦，再者考虑到HIT很低的温度系数带来的高发电量，相信会有更大的市场空间。

产业化高效电池技术——IBC和HIT技术相结合，创造了转换效率25.6%的世界纪录

IBC-HIT solar cell



Country	Organization	Area (cm ²)	Voc (mV)	Jsc (mA/cm ²)	FF	Eff (%)	Source
Japan	Panasonic	143.7	740	41.8	82.7	25.6	IEEE PVSC 2014
Korea	LG	4 / FZ	723	41.8	0.774	23.4	2011 PVSEC-21
Germany	HZB	1 / FZ	673	39.7	0.757	20.2	2011
France	INES	25 / FZ	678	32.4	0.716	15.7	2010
USA	IEC	FZ	670	34.2	0.652	15.0	2010
Italy	ENEA	FZ (p)	687	32	0.50	11.0	2007
Canada	Univ. Toronto	1 / FZ	536	20	0.755	8.1	2009

总结

- 随着单晶生长技术的持续进步，单晶组件的初始光衰将得到有效改善，尤其是N型单晶优势更明显；
- 常规单晶电池量产效率基本就可以满足“领跑者”计划要求，显示出单晶电池转换效率的优势；
- 单晶电站投资成本与多晶电站基本一致，而且单晶电站每瓦实际发电量比多晶电站高5%左右，因而单晶电站的内部收益率IRR会略高；
- PERC电池技术作为当前普遍认可的高效技术，在单晶硅电池上可以更好地体现优势，作为下一代的N型PERC技术将会逐渐受到重视；
- HIT电池技术在解决技术门槛和成本后，将在几年后显示出其特有的优势，产能将会大幅提高。

受益于光伏电站高可靠性和高收益的持续需求，以及国家对先进技术产品指标的要求，高效单晶硅电池和组件产品将领跑光伏行业，成为新的行业增长点



感谢您的关注

 **LERRI Solar**

善用太阳光芒 创造绿能世界

乐叶光伏科技有限公司

地址：西安市长安区航天中路388号

电话：029-81566686

传真：029-81566685

邮编：710100

LERRI Solar Technology Co., Ltd.

Address: No.388 Middle Aerospace Rd., Chang'an Dist., Xi'an, China

Tel: +86-29-81566686

Fax: +86-29-81566685

Zip code: 710100