

晶体硅太阳能电池背面套印图形设计对 电池性能和组件性能的影响

张 良, 李化阳, 李 良, 姚 玉, 王 霞, 王 俊

(镇江大全太阳能有限公司, 扬中 212211)

摘 要: 以晶体硅太阳能电池背面套印图形为研究对象, 通过设计背电场和背电极套印方式以及背电极图形, 对背面不同套印图形的接触电阻、电池的电性能和组件性能进行研究。研究表明: 背面铝背场和银电极在重叠面积为 4.35%, 且背电极蜈蚣脚间距为 1 mm 时的接触电阻最小, 电池效率提升最大, 同时组件输出功率增益最多。该研究为晶体硅太阳能电池背面套印图形设计和背电极图形的优化提供指导。

关键词: 太阳能电池; 丝网印刷; 转换效率; 背电极; 背电场

中图分类号: TM914.4^{†1} **文献标志码:** A

0 引 言

太阳能电池的电极制作是电池制备工艺中最关键的步骤之一。高效且低成本的丝网印刷的电极制作方法^[1-3]已成为目前业界主流的电极制作工艺方法。目前对电池的研究主要集中在正面电极^[4-9]和背面电场^[10-13]方面, 对于背电极图形设计以及背面套印方式的研究较少。

朱薇桦^[8]研究 4 种不同背场、背电极图形, 得出背电场和背电极在保证接触的情况下重叠面积越小越好, 此研究仅局限在电池端, 且研究结果具有一定的笼统性, 对组件性能的影响也未考虑。吴旻等^[14]的研究表明背电极和硅片的合金层含有大量的少子复合中心, 面积较小的背电极可有效提高电池的输出特性, 但实验未考虑背面套印方式的影响, 也未给出对组件性能的影响。李中兰等^[15]研究背电极设计图形对电池机械性能的影响, 并未涉及背电极图样对电池电性能和组件性能的影响方面。

本文针对背面套印方式和背电极图形设计, 通过研究对接触电阻、电池电性能和组件性能的影响找出最佳的套印方式。研究发现合理的背面图形套印设计和背电极图形设计可有效提高电池的转换效率和组件的输出功率。

1 实 验

1.1 实验设计

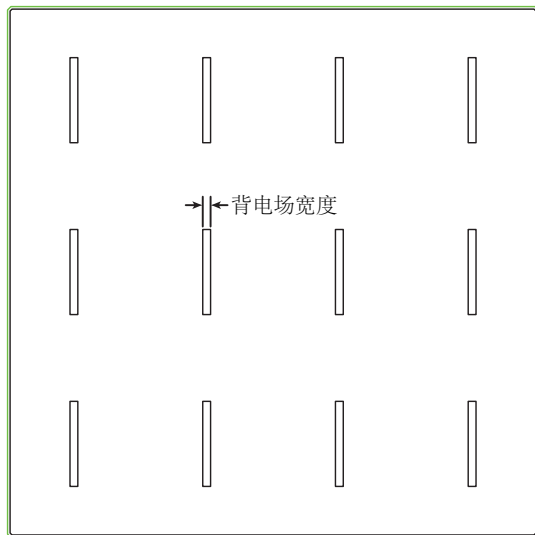
实验采用大全新能源有限公司生产的 156 mm × 156 mm 规格的 p 型多晶硅片, 硅片厚度 (200 ± 20) μm, 电阻率为 1~3 Ω·cm。丝网印刷使用本公司的 ASYS 印刷机台, 太阳能电池片的 *I-V* 测试采用 Halm 测试仪。电池片的制备过程中除背面套印方式以及背电极图形设计不同外, 其他物料及工艺过程均保持一致。同样, 在组件封装过程中使用相同的工艺和物料, 保证组件测试结果只与电池背面套印方式以及背电极图形设计相关。

1.2 背电极和背电场套印设计

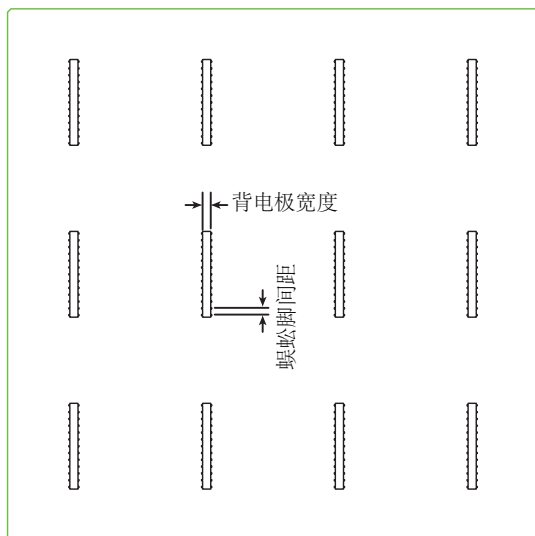
丝网印刷背电场通常印刷铝浆, 然后通过高温快速烧结后形成铝背场。铝背场的作用是形成 p⁺钝化层, 减少少子复合, 提高开路电压; 通过铝吸附硅中的杂质以提高少子寿命; 作为背反射器, 增加长波响应, 提高短路电流; 作为背面电流收集器, 将电子收集起来通过背面电极输出。但由于铝的可焊性差导致其电性能低于银, 因此选择可焊性更好且导电性能更佳的银作为背面电极, 但银的缺点是不能像铝那样在硅片表面形成 p⁺层, 而且银电极在烧结后也会成为背面少子的复合中心。目前工业上主要采用背面铝背场与背面银电极套

印的方式(如图 1 所示),且背面电极采用蜈蚣脚设计,这样既减少了背面电极的有效面积,又可与铝背电场形成充分地接触。

背面套印图形设计的参数(见图 1)描述如下:1)背电场宽度,即背电场设计留出的套印背电极的开口宽度;2)背电极宽度,即背电极设计印刷宽度;3)蜈蚣脚间距,即背电极蜈蚣脚设计间隔。



a. 背面铝背场图形



b. 背面银电极图形

图 1 电池背面套印图形

Fig. 1 Overprinting pattern at back of cell

1.3 接触方阻测试方法

用于收集光生电流的多晶硅太阳能电池电极(包括迎光面的栅电极和背面的栅电极)是多晶硅太阳能电池的重

要组成之一,其设计的合理性、制备质量的优劣、自损耗的大小及电极与硅的接触特性将直接影响电池的转换效率。

电池背面由背面银电极和铝电场组成,通过高温快速烧结后形成导电膜与硅基底形成欧姆接触。导电膜的表面方阻测试方法主要有铜棒法和四探针法 2 种^[16]。导电性作为太阳能电池的重要性能指标,其重要性不言而喻。晶体硅太阳能电池背面是银和铝形成的导电膜层,采用四探针法测量银电极和铝背场的接触电阻,可有效衡量烧结膜导电性的优劣。四探针测试仪是一种专门用来测量金属镀膜层及半导体材料电阻率和方阻的仪器,一般由电气和探头 2 部分组成,探头则由 4 根碳钨探针组成,且 4 根探针头部间距相等。如图 2 所示,4 根探针分别与导电膜相接触,其中,外端的探针 1、探针 4 产生电流场,内端的探针 2、探针 3 负责测试电流场在探针 2、探针 3 的探点上形成的电势。导电膜方块电阻越大,则探针 2、探针 3 产生的电势越大,由此可测得导电膜的方阻值。文献[17]研究四探针法采用电流电压法的 4 端测试原理,因而可消除端口的接触电阻以及引线电阻的影响,保证测试结果的精度。

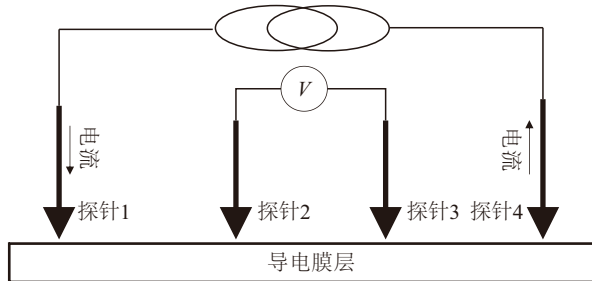


图 2 四探针测试原理

Fig. 2 Principle of four-point probe measurement

本次实验使用 RTS-4 型四探针测试仪。将探针 1 和探针 2 与银背电极接触,探针 3 和探针 4 与铝背电场接触,这样可显示出背电极与背电场之间的接触电阻。尽管接触电阻不能表征套印图形接触电阻的绝对值,但可比较各套印设计方案的“方阻”的相对大小。后文用这个“方阻”值相对地表征背面电极和背电场的接触电阻。

2 结果与讨论

2.1 背电极与背电场接触电阻

晶体硅太阳能电池背面图形由银电极和铝背场套印

组成,其中背面电极设计有蜈蚣脚,以保证银电极在尽量小的接触面积时与背电场有充分接触。由于银浆和铝浆本身为流体,具有流动性,而且在工业应用中背面电极设计有蜈蚣脚图形,所以即使在背电极宽度相比背电场开口宽度较窄时,仍能实现背面银铝的接触。基于此思路设计 5 种实验方案,并对各方案的背面接触电阻进行测试,测试结果如表 1 所示,表 1 中侧面 A 和 B 是指背面电极与背电场接触的 2 个对称的侧边。

表 1 背面银铝交界处方阻测试结果
Table 1 Sheet resistance of border between silver and aluminum at back of cell

设计 方案	背电场 宽度/mm	背电极 宽度/mm	重叠 比例/%	蜈蚣脚 间距/mm	测试位置	方阻/ $\Omega\cdot\Box^{-1}$	平均方阻/ $\Omega\cdot\Box^{-1}$
1	2.3	2.1	-8.70	2	侧面 A	0.088	0.110
					侧面 B	0.131	
2	2.3	2.3	0.00	2	侧面 A	0.041	0.069
					侧面 B	0.096	
3	2.3	2.4	4.35	2	侧面 A	0.049	0.045
					侧面 B	0.030	
4	2.3	2.4	4.35	1	侧面 A	0.030	0.030
					侧面 B	0.030	
5	2.3	2.5	8.70	1	侧面 A	0.098	0.098
					侧面 B	0.098	

从表 1 中可看出:1)当背电极和背电场设计重叠面积为 -8.70% (即不重叠),蜈蚣脚间距为 2 mm 时,平均接触电阻最大。这主要是因为背电极宽度较窄,不能与背电场充分接触,同时由于丝网印刷精度^[18]的原因,背电极和背电场易出现偏移的现象,在背面银铝交界处易出现漏硅现象,如图 3 所示。由于两侧银铝接触程度的差异导致两侧的接触电阻差异较大。2)当背电极和背电场重叠面积为 0,当蜈蚣脚间距为 2 mm 时,平均接触电阻降低为 0.069 Ω/\Box ,但同样的由于丝网印刷精度的原因,这种设计方式也存在两侧接触电阻差异较大的问题。3)当背电极和背电场设计重叠面积为 4.35%,蜈蚣脚间距为 2 mm 时,平均接触电阻降低为 0.045 Ω/\Box 。由于背电极较宽,可保证与背电场有充分的接触,则两侧接触电阻差异较小。如果进一步加密蜈蚣脚,使蜈蚣脚间距从 2 mm 降至 1 mm 时,平均方阻进一步降低至 0.030 Ω/\Box ,同时两侧接触电阻的测试结果无差异。4)当进一步加宽背电极宽度,使得背电极和背电场设计重叠面积为 8.70%及蜈蚣脚间距为 1 mm 时,反而平均接触电阻增至 0.098 Ω/\Box ,表明在背面套印重叠区域变大后,银铝之间的接触电阻变大。也说明重

叠区域变大后,银铝合金导电性能变差,我们推测是重叠区域印刷浆料中的高分子有机物在烧结过程中燃烧较慢导致的。

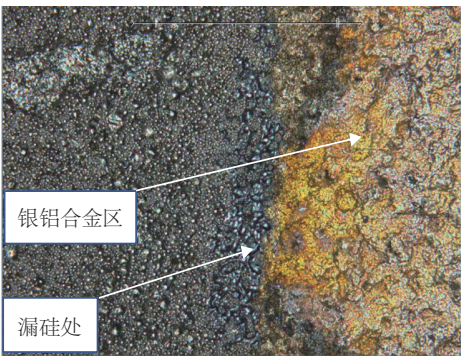


图 3 漏硅照片(光学放大 50 倍)
Fig. 3 Photo of uncovered silicon (50 optical magnification)

2.2 背面套印图形对电池性能的影响

对方案 1~方案 5 进行电性能验证,结果如表 2 所示。为更清晰比较出各方案的差异,表 2 中方案 2~方案 5 给出的电性能数据为相比方案 1 的相对值。

表2 不同套印方式下电性能对比
Table 2 Comparison of electrical performance in different overprinting modes

设计 方案	组别	蜈蚣脚 间距/mm	短路电流 I_{sc}/mA	开路电压 U_{oc}/mV	填充因子 $FF/\%$	转换效率 $\eta/\%$
1	背电场 2.3 mm+背电极 2.1 mm	2	0	0	0	0
2	背电场 2.3 mm+背电极 2.3 mm	2	-7	0	0.31	0.061
3	背电场 2.3 mm+背电极 2.4 mm	2	-7	-0.4	0.49	0.086
4	背电场 2.3 mm+背电极 2.4 mm	1	3	-0.3	0.55	0.123
5	背电场 2.3 mm+背电极 2.5 mm	1	-4	-0.4	0.42	0.078

从表 2 结果可看出: 1) 比较实验方案 1~方案 3 及方案 5, 方案 3 在背电场开口宽度设计为 2.3 mm, 背电极设计宽度为 2.4 mm, 蜈蚣脚间距为 2 mm 时, 电池填充因子 FF 提升幅度最大, 最终效率提升 0.086%; 而在方案 1 中背面套印设计为背电场 2.3 mm, 背电极 2.1 mm, 背面银铝交界处存在漏硅现象, 使得背面电极与背电场之间的串联电阻变大, 导致其 FF 最差, 这也与表 1 中接触电阻最大的结果吻合。2) 比较方案 3 和方案 4, 方案 4 缩小背电极蜈蚣脚间距为 1 mm (即增加背电极蜈蚣脚密度) 时, FF 又有了进一步提升, 最终效率相比实验方案 3 进一步提升 0.037%, 也是所有实验方案中 FF 和转换效率最佳的。3) 比较方案 4 和方案 5, 进一步增加背面电极的宽度, 结果发现 FF 反而下降, 最终导致转换效率降低 0.045%。 FF 下降主要是由接触电阻变大导致, 此电性能结果与表 1 中背面重叠面积变大后的银铝合金接触电阻增大的测试结果相吻合,

也说明使用四探针测试银铝合金接触电阻的方法是切实可行的。

2.3 背面套印图形对组件性能的影响

组件串联电阻主要来自于以下 4 个方面: 1) 晶体硅的体电阻和发射区电阻; 2) 电极与硅表面层的接触电阻; 3) 电池内部和外部线路互相连接的引线接触电阻以及汇流条和互联条电阻等; 4) 电极接触用的金属本身及其互联电阻。唯一的变动是背面银铝的接触电阻。由于太阳电池是一个高电流的元器件, 背面银铝接触电阻变大, 在局部会造成额外的功率损耗, 最终也将影响到整个组件的功率输出。根据背面套印图形对电池性能的影响, 选择套印图形 1、套印图形 3、套印图形 4 进行批量生产 (见表 3), 并进行组件验证。组件验证时使用相同的测试机台、制作工艺和物料。不同设计方案的组件的 CTM 值 (cell to module) 结果如表 3 所示。

表3 不同的设计方案的CTM结果
Table 3 CTM results in different designed modes

设计 方案	套印图形	背电场 宽度/mm	背电极 宽度/mm	重叠 面积/%	蜈蚣脚 间距/mm	CTM/%
方案1	背电场 2.3 mm+背电极 2.1 mm	2.3	2.1	-8.70	2	99.72
方案3	背电场 2.3 mm+背电极 2.4 mm	2.3	2.4	4.35	2	100.06
方案4	背电场 2.3 mm+背电极 2.4 mm	2.3	2.4	4.35	1	100.28

从表 3 结果可知: 1) 背电场 2.3 mm 套印背电极 2.1 mm, 蜈蚣脚间距 2 mm 时, CTM 仅为 99.72%; 2) 当背电极宽度增加, 套印重叠面积为 4.35%, 蜈蚣脚间距为 2 mm 时, 组件 CTM 升至 100.06%; 3) 在重叠面积为 4.35%, 增加蜈蚣脚密度, 组件 CTM 升至 100.28%。这时对应的背面银铝接触电阻也最低。在光伏组件中, 此处导致的功率损耗将降低, 最终提高了组件的输出功率, 提高了组件的 CTM 值。也进一步说明合适的背面套印图形设计可提高组件 CTM 值。

3 结 论

本文对晶体硅太阳电池的背面套印图形和背电极图形进行研究和分析, 采用四探针的方法测量背面套印图形的接触电阻, 并通过实验验证不同设计图形对电池电性能和组件 CTM 的影响。

在背面电极设计宽度较窄时, 背面套印图形的接触电阻较大, 电池和组件性能较差, 企业技术设计人员在背面图形设计时需要注意此问题。同时背面电极和

背电场重叠面积并非越大越好,本文的研究结果表明在背面电极和背电场重叠面积为 4.35%,蜈蚣脚间距 1 mm 时,套印图形接触电阻最小,同时这种图形设计在电池电性能和组件 CTM 方面表现最佳。

背面套印图形的设计思路是既要保证银铝充分有效接触,也要考虑烧结后银铝合金的导电性能,本文中通过实验设计和验证表明,4.35%的面积重叠是最佳选择。在企业或研究中,建议使用一套背电场和背电极网版,在同一块背电极网版上设计不同宽度的背电极和不同密度的蜈蚣脚组合。这样只需印刷一片电池片就能得到不同的实验组合,借助四探针测量方法,可简单直接有效找出最佳的套印方式。本文的研究设计思路和验证方式可为晶体硅太阳能电池背面套印图形设计和背电极图形的设计提供指导。

[参考文献]

- [1] BROWN D. 丝网印刷在太阳能电池制造中的挑战[J]. 集成电路应用, 2009(8): 38-40.
BROW D. The challenge of screen printing in solar cell manufacturing [J]. Application of IC, 2009(8): 38-40.
- [2] 应用材料(中国)有限公司. 晶体硅太阳能电池的丝网印刷技术[J]. 中国集成电路, 2010, 19(7): 68-72.
Applied materials (China) Co., Ltd. Screen printing technology of crystalline silicon solar cells[J]. China integrated circuit, 2010, 19(7): 68-72.
- [3] 贾静茹, 杨丽珍, 马昆. 实用丝网印刷技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 30-44.
JIA J R, YANG L Z, MA K. Practical screen printing technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001: 30-44.
- [4] 任丽, 王倩, 张东, 等. 硅太阳能电池的电极优化[J]. 太阳能学报, 2013, 34(10): 1746-1749.
REN L, WANG Q, ZHANG D, et al. Optimum design of metal electrodes of silicon solar cell[J]. Acta energiae solaris sinica, 2013, 34(10): 1746-1749.
- [5] 杜樊立, 付秋明, 陈炳若. 高效单晶硅太阳能电池的结构分析与设计[J]. 武汉大学学报(理学版), 2005 (Sup2): 72-74.
DU F L, FU Q M, CH B R. Structure analysis and design of high efficiency silicon solar cells[J]. Journal of Wuhan University (science edition), 2005 (Sup2): 72-74.
- [6] 刘翔, 陈庭金. 太阳能电池栅线电极的优化设计[J]. 新能源, 1998, 20(5): 9-13.
LIU X, CHEN T J. Optimum design of solar cell contact grid[J]. New energy sources, 1998, 20(5): 9-13.
- [7] 张忠文, 唐仕碧, 尹云坤. 商业化晶体硅太阳能电池电极图形优化设计[J]. 新能源, 2000, 22(10): 21-22.
ZHANG Z W, TANG S B, YIN Y K. Optimum design of electrode for commercial crystalline-silicon solar cell [J]. New energy sources, 2000, 22(10): 21-22.
- [8] 朱薇桦. 晶体硅太阳能电池电极研究[D]. 广州: 中山大学, 2010.
ZHU W H. The research of silicon solar cell metal contact[D]. Guangzhou: Sun Yat-Sen University, 2010.
- [9] 周之斌, 孟繁英, 崔荣强, 等. 用SEM和EDAX技术研究多晶硅太阳能电池研究[C]//中国第六届光伏会议论文集, 中国昆明, 2000.
ZHOU Z B, MENG F Y, CUI R Q, et al. Study on polycrystalline silicon solar cells by SEM and EDAX technology [C]//Proceedings of the Sixth Photovoltaic Conference of China, Kunming, China, 2000.
- [10] 彭银生, 刘祖明, 陈庭金. 晶体硅太阳能电池铝背场的研究[J]. 云南师范大学学报, 2004, 24(1): 34-36.
PENG Y S, LIU Z M, CHEN T J. The study of aluminum back-surface-field in silicon solar cell [J]. Journal of Yunnan Normal University, 2004, 24(1): 34-36.
- [11] 周继承, 李斐, 陈勇民, 等. 铝背场对单晶硅太阳能电池输出特性的影响[J]. 半导体光电, 2009, 30(6): 838-841.
ZHOU J C, LI F, CHEN Y M. Influence of Al-BSF on electrical properties of monocrystalline silicon solar cells [J]. Semiconductor optoelectronics, 2009, 30(6): 838-841.
- [12] 陈庭金, 马逊, 夏朝凤, 等. 硅太阳能电池铝背场结构的研究[C]//第八届全国光伏会议暨中日光伏论坛, 中国深圳-香港, 2004.
CHEN T J, MA X, XIA C F, et al. Study on the aluminum back field structure of silicon solar cells [C]//The Eighth National Photovoltaic Conference and China Japan photovoltaic forum, Shenzhen-Hong Kong, China, 2004.
- [13] 李幼真, 周继承, 黄迪辉, 等. 单晶硅太阳能电池背场欧姆接触的改善研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(1): 41-44.
LI Y Z, ZHOU J C, HUANG D H, et al. The improvement research on back surface omic contact of crystalline silicon solar cells [J]. Acta energiae solaris sinica, 2011, 32(1): 41-44.
- [14] 吴旻, 宋佳, 刘金宁, 等. 对太阳能电池背电极的研究[C]//第十一届中国光伏大会暨展览会, 中国南

- 京, 2010.
- WU M, SONG J, LIU J N, et al. Research on back electrodes of solar cells [C]//11th China Photovoltaic Conference and Exhibition, Nanjing, China, 2010.
- [15] 李中兰, 汪雷, 杨德仁, 等. 背电极花样对单晶硅太阳能电池机械性能的影响[J]. 太阳能学报, 2011, 32(2): 225-228.
- LI Z L, WANG L, YANG D R. Investigations of the influence of the rear busbar patterns on the mechanical property of single crystalline silicon solar cells[J]. Acta energiae solaris sinica, 2011, 32(2): 225-228.
- [16] 张军琴, 顾瑛. 薄层方块电阻自动测量法[J]. 电子测量技术, 2000(2): 1-3.
- ZHANG J Q, GU Y. The automatic measurement of sheet resistance [J]. Electronic measurement technology, 2000(2): 1-3.
- [17] 蔡卫平, 古建平. 四探针电阻率测试仪示值基本误差的变通计算方法[J]. 计量与测试技术, 2009, 36(6): 39-40.
- CAI W P, GU J P. Alternative measurement method for intrinsic indication error of four-probe resistivity tester [J]. Metrology & measurement technique, 2009, 36(6): 39-40.
- [18] 胡更生. 影响丝网印刷位置精度的几个重要因素[J]. 丝网印刷, 1998(1): 9-10.
- HU G S. Several important factors affecting the position accuracy of screen printing [J]. Screen printing, 1998(1): 9-10.

DESIGN OF BACK OVERPRINTING PATTERN OF CRYSTALLINE SILICON SOLAR CELL INFLUENCING PERFORMANCE OF SOLAR CELL AND CELL MODULE

Zhang Liang, Li Huayang, Li Liang, Yao Yu, Wang Xia, Wang Jun

(Zhenjiang Daqo Solar Co., Ltd., Yangzhong 212211, China)

Abstract: To study the contact resistance and the performance of the solar cell and cell module using the back overprinting pattern as the research object, through designing the back field and back electrode overprinting method as well as back electrode pattern. The results show that when the overlapping square of the aluminum back-surface-field and back electrode is 4.35 percent and the spacing of the back electrode additional is one millimeter, the contact resistance is the smallest, and the improvement of the cell's efficiency and the output power of the module is the largest. The research provide the guidance for the design of the back field and back electrode overprinting and optimization of the back-electrode pattern.

Keywords: solar cell; screen printing; conversion efficiency; back electrodes; back surface field (BSF)