

晶硅太阳能电池发展状况及趋势

周涛 陆晓东 张明 李媛 刘爱民 伦淑娴

(渤海大学新能源学院, 辽宁 锦州 121000)

摘要 对过去 10 年晶硅太阳能电池的市场发展情况进行了详细概述, 阐明了晶硅电池在未来光伏发电领域所占据的重要地位。从影响晶硅电池组件成本和效率的各种因素出发, 对影响晶硅太阳能电池发电成本的各种因素进行了详细剖析。从晶硅太阳能电池组件生产流程的角度看, 尽管组件封装部分的成本比重最大, 但组件成本的降低却主要依赖于硅锭生长、切片及电池加工等几个部分技术水平的不断提高。从生产过程的基本要素角度看, 不断降低组件加工过程中的原材料成本和持续改进加工技术, 将是降低晶硅电池组件成本的基本途径。最后, 结合晶硅电池的最新技术报道, 分别从晶硅电池生产流程和增效技术角度对其各项技术的未来发展趋势进行了展望。

关键词 晶硅太阳能电池; 成本; 效率; 发展趋势

中图分类号 TM914.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP50.030002

Crystalline Silicon Solar-Cell Development Status and Trends

Zhou Tao Lu Xiaodong Zhang Ming Li Yuan Liu Aimin Lun Shuxian

(College of New Energy, Bohai University, Jinzhou, Liaoning 121000, China)

Abstract This paper first provides an overview about the past 10 years of crystalline silicon solar-cell market development in detail and clarifies that the crystalline silicon solar cell plays a very important role in photovoltaic power generation field. Then various factors affecting the cost and efficiency of crystalline silicon cell module are considered, and the various factors influencing the crystalline silicon solar-cell power generation cost are analyzed in detail. For the crystalline silicon solar-cell module production process, although the package cost accounts for the largest proportion, the reduction in cost of module mainly depends on the improvement of the technical level, such as silicon ingot growth, slicing and cell manufacture. For the production process of the basic elements, reducing the raw materials cost for module manufacture and improving the processing technology continuously will be the basic approach to reduce crystalline silicon-cell cost. Finally, combined with the new technical reports about crystalline silicon solar cell, from the perspective of production process and efficiency-enhancing techniques, the development trends of crystalline silicon-cell module manufacturing technology in the future are prospected.

Key words crystalline silicon solar cell; cost; efficiency; development trend

OCIS codes 040.5350; 040.6040; 350.6050; 350.3850

1 引言

能源问题日益成为制约国际社会经济发展的瓶颈问题。由于在全球范围内石化能源储量有限, 且利用石化能源会产生严重的环境污染, 所以各国政府普遍注意到各种新型清洁的可再生能源在未来能源结构中的关键地位, 纷纷加大对这些能源产业和相关研究工作的支持力度, 以便在未来的新能源领域中占有一席之地。

在各种新型清洁能源中, 太阳能被认为是最具发展前景的清洁能源之一。据欧洲光伏工业协会(EPIA)预测^[1], 到 2030 年, 可再生能源在总能源结构中将达到 30% 以上, 而太阳能光伏发电在世界总电力供应中的占比也将达到 10% 以上; 到 2040 年, 可再生能源将占总能耗的 50% 以上, 太阳能光伏发电将占总电力的

收稿日期: 2012-10-15; **收到修改稿日期:** 2012-11-26; **网络出版日期:** 2013-01-31

基金项目: 辽宁省教育厅科学研究一般项目(L2012401)资助课题。

作者简介: 周涛(1983—), 男, 硕士, 助教, 主要从事晶硅太阳能电池相关技术方面的研究。

E-mail: bhuzhoutao@163.com

20%以上;到21世纪末,可再生能源在能源结构中占到80%以上,太阳能发电将占到60%以上。这说明光伏发电将在未来的能源结构中占有重要的战略地位,并将成为未来的一种主要能源形式。

太阳能电池是光伏发电系统的核心器件,其发展水平直接决定了光伏发电的发展水平。自从1954年太阳能电池发明以来,经过半个多世纪的发展,目前太阳能电池种类十分繁多,且结构日趋多样,转换效率也明显提高。目前市场上的太阳能电池按照材料不同,可分为3个系列^[2]:晶硅太阳能电池(包括单晶硅和多晶硅)、薄膜太阳能电池和光电化学太阳能电池(如染料敏化太阳能电池)。尽管薄膜太阳能电池和染料敏化太阳能电池均已取得许多重大技术突破,但也必须看到,大多数这类太阳能电池仍处于实验室研制阶段,其技术水平、效率水平和市场接受程度仍无法与晶硅电池相比。

在已实用化的太阳能电池中,晶硅电池一直占据着太阳能电池市场垄断地位。截至2010年^[3],在全球光伏组件市场中,晶硅电池组件所占比例高达85~90%,据EPIA预测:至少到2020年,晶硅光伏组件仍将占据光伏技术的主导地位(到那时其仍将占约50%的市场份额)。因此晶硅电池仍将是未来光伏市场的主流产品。由于晶硅太阳能电池在能源领域的重要性,本文在简要介绍其产业发展状况的基础上,着重分析了其成本和效率,并对其各项技术的未来发展趋势做了展望。

2 晶体硅太阳能产业发展现状

2.1 国际晶体硅太阳能产业现状

随着近年来全球太阳能光伏市场的快速发展,全球太阳能电池产量呈现迅速增长的态势。表1为2004~2012年全球范围内太阳能电池产量的增长情况^[4]。从表1中可以看出:2004~2012年,全球晶硅太阳能电池产量的增长率始终保持在30%~40%。2009年全球太阳能电池产量首次突破7000 MW,同比增长42.59%。从2009年起,全球光伏市场呈现出新一轮的增长态势,年均增长率约为34%,其中晶硅太阳能电池的市场份额虽有所下降,但其绝对产量仍在增长。可以预见:在未来相当长的时间内,凭借成熟的制造工艺和良好的市场接受程度,晶硅电池的市场主导地位不会发生根本性变化。

表1 2004~2012年全球晶硅太阳能电池增长情况

Table 1 Global crystalline silicon solar-cell growth during 2004~2012

Year	Global solar-cell production /GW	Growth rate /%	Global crystalline silicon solar-cell production /GW	Growth rate /%
2004	1.20		1.1	
2005	1.65	37.50	1.5	36.36
2006	2.38	44.24	2.1	40.00
2007	3.50	47.06	2.8	33.33
2008	5.40	54.29	4.3	53.57
2009	7.70	42.59	6.2	44.19
2010	10.70	38.96	8.8	41.94
2011	14.20	32.71	11.7	32.95
2012	18.90	33.10	15.7	34.19

2.2 国内晶硅太阳能产业发展现状

从1959年成功研制成功第一块有实用价值的太阳能电池开始,经过50多年的发展,目前我国已涌现出一大批优秀的晶硅太阳能电池片和电池组件生产企业^[5],如无锡尚德、河北晶澳、天威英利和常州天合等,这些企业的产能和技术水平已处于世界领先水平。表2为2002~2012年中国国内晶硅太阳能电池产量增长情况^[4],其中第5列表示的是我国晶硅电池产量在全球晶硅电池总产量中所占的比例。从表2中可以看出:2002~2005年,我国晶硅太阳能电池片的年均增长率为100%,在2007年,我国晶硅太阳能电池片产量达到了1021.5 MW,同比增长154.80%,成为世界第一大晶硅太阳能电池生产国;2008年,我国晶硅太阳能电池片产量达到1900.5 MW,同比增长86.04%,在全球晶硅太阳能电池产量中的份额继续提高,占比达44.19%。从2009年起,由于受到国际光伏市场和全球金融危机的影响,我国晶硅太阳能电池的增长率及其在全球晶硅电池总产量中所占的份额有所下降,但其绝对产量仍以25%的年均增长率稳步增长。

表 2 2002~2012 年中国晶硅太阳能电池增长情况
Table 2 Crystalline silicon solar-cell growth in China during 2002~2012

Year	Crystalline silicon solar-cell production in China /MW	Growth rate /%	Global crystalline silicon solar-cell production /GW	Ratio /%
2002	15.0			
2003	30.0	100.00		
2004	60.0	100.00	1.1	5.45
2005	118.7	97.83	1.5	7.91
2006	400.9	236.98	2.1	19.09
2007	1021.5	154.80	2.8	36.48
2008	1900.5	86.04	4.3	44.19
2009	2775.0	46.01	6.2	44.75
2010	3477.6	25.32	8.8	39.52
2011	4362.7	25.45	11.7	37.28
2012	5092.9	16.73	15.7	32.44

3 晶硅太阳能电池发电成本分析

为了促进光伏发电的广泛应用,其发电成本必须接近甚至低于普通的市电价格每千瓦时 0.6 元,但目前光伏发电成本却为每千瓦时 1.26 元^[6],所以有效降低发电成本是光伏应用面临的主要问题。光伏发电成本结构主要取决于两方面的因素,即组件成本和电池效率。下面针对晶硅电池组件成本和电池效率进行深入分析。

3.1 晶硅太阳能电池组件成本构成分析

根据晶硅电池组件生产的一般流程,组件的总成本主要由以下几部分组成:晶硅原材料成本、晶体硅锭成本、硅片成本、晶硅电池制造成本和光伏组件的封装成本。为了使电池组件成本结构的分析有意义,采用 2010 年报道的最优数据(包括原材料价格、各生产过程的成品率和最终电池效率等),对组件的成本结构进行核算。在 2010 年,多晶硅的市场价格为 40 €/kg,切割面积为 156 mm×156 mm,厚度为 220 μm 的硅片(Kerf 损失为 200 μm)。加工过程中,各部分的成品率如下:晶体铸锭的成品率约为 95%,晶片切割的成品率约为 92%,电池加工过程中的成品率约为 93%;组件生产过程的成品率约为 97%。根据以上数据,并按市售电池的一般效率为 15% 计算,那么各部分成本结构如图 1 所示。由图 1 可见,组件封装部分的成本所占的比重为 40%,其余部分所占的比重为 60%。除组件封装外,其余部分属于半导体材料及芯片的加工制作过程,其受加工制作过程的技术水平影响较大,而组件封装受技术水平的影响相对要小,但受其他行业原材料成本的影响却较大,所以太阳能电池组件的成本对技术水平和市场环境都非常敏感。可以预计:随着技术水平的提高,硅锭生长、切片及电池加工等几个部分的总成本会呈现不断下降的趋势,进而推动晶硅太阳能电池发电成本的不断降低。

太阳能电池的组件加工过程属于半导体器件加工过程,所以对组件的各部分成本还可按人、机、料、法等环节进行细分。表 3 给出了细分后的各部分成本的构成情况^[7],其中第 5 列表示组件的各部分成本在总成本中所占的比例。由表 3 可见:材料成本和工艺过程成本占组件总成本的比重最大(分别为 27.22% 和 45.54%);按电池组件加工顺序看,晶硅电池制造和组件封装两个步骤占总成本的比重最大(分别为 27.23% 和 39.44%)。从降低晶硅电池组件的成本角度看,不断降低组件加工过程中的原材料成本和持续改进加工技术,无疑将是降低晶硅电池组件成本的基本途径。

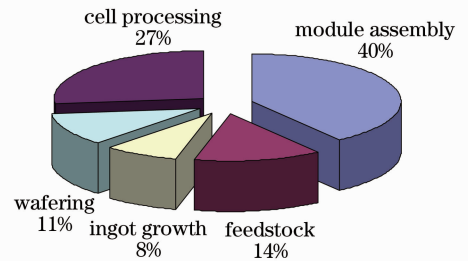


图 1 影响晶硅电池组件成本的各个因素在总成本中所占的比例

Fig. 1 Proportion of the various factors affecting the crystalline silicon solar cell module cost in the total cost

表 3 晶硅电池组件的各部分成本构成

Table 3 Cost composition of the crystalline silicon solar-cell module

	Feedstock	Ingot growth	Wafering	Cell processing	Module assembly	Total	Ratio
Labour		0.03	0.05	0.11	0.17	0.36	16.9%
Equipment		0.03	0.03	0.09	0.07	0.22	10.33%
Material	0.27	0.04	0.08	0.15	0.42	0.97	45.54%
Manufacturing process		0.10	0.08	0.22	0.17	0.58	27.22%
Total	0.27	0.20	0.24	0.58	0.84	2.13	

从降低原材料成本角度看,组件生产过程中各部分原材料成本的降低都会使原材料总成本降低,但能否有效降低原材料成本主要取决于能否有效降低晶硅的原材料成本和光伏组件封装的原材料成本。由于组件封装过程中所使用的一些原材料,如接线盒、辅助材料和铝边框等,属于其他行业的产品,技术均已比较成熟,所以降低的空间十分有限。相对而言,由于晶硅电池所使用的晶硅片与微电子行业所用晶硅片要求的技术重点不同,所以客观上利用有别于微电子晶片的生产技术进行太阳能电池领域的晶硅片生产,是完全可能降低成本的。目前,太阳能电池领域已经出现了许多新型晶片生产技术,其中最具有吸引力的技术是带状多晶硅制造技术[包括限边喂膜(EFG)带硅技术、枝蔓蹼状(WEB)带硅技术、Delaware 大学多晶片状硅制造技术和应力感生剥离(Stress-induced lift-off)技术等]^[8,9]。这些技术已经显示出可明显降低原材料成本的优势,例如可有效避免线锯切片过程的 Kerf 损失。由于这些技术还存在着成品率和生产效率的问题,距离大规模应用还有一定距离,但不可否认,这些技术已为降低晶硅原材料成本指明了努力的方向。

从降低工艺过程成本的角度来看,除晶体硅材料外,其余过程都涉及到工艺过程的成本,都存在着过程成本降低的必要性,但重点应是晶硅电池制造和光伏组件封装两个部分。根据有关研究结果^[10],降低工艺过程成本的基本途径是扩大生产规模,加强生产过程的流程控制。由于生产规模的扩大与市场需求关系密切,所以有效降低工艺过程的成本不仅需要光伏企业不断加强自身生产过程的流程控制,而且也依赖于各国持续对光伏产业给予产业政策和资金的支持。

其他方面,如劳动力成本和设备成本,也是构成各部分成本的关键因素。尽管二者各自所占的比重很小,但二者之和却占到组件总成本的 27.23%。这两部分成本存在着一种矛盾关系,即在一定时期内,自动化水平越高的设备,设备的投入成本越高,但相应的劳动力成本却较低,反之亦然。从长远来看,随着设备制造技术的进步,自动化水平高的设备成本会逐渐降低,相应的劳动力成本也会随之降低,所以随着光伏企业自动化水平的持续提高,这两部分成本将会呈现下降的趋势。

3.2 晶硅太阳能电池组件转换效率分析

除组件的成本外,晶硅电池组件的转换效率也与其发电成本直接相关,其间的关系为:晶硅电池效率每提高 1%,光伏发电的成本可下降约 6%^[6]。经过多年的发展,晶硅电池的效率已从最初的 6%(1954 年)发展到目前的 25%(2012 年)。尽管其效率已经大幅提高(图 2^[11,12]),但仍不能满足目前光伏发电对成本的要求。

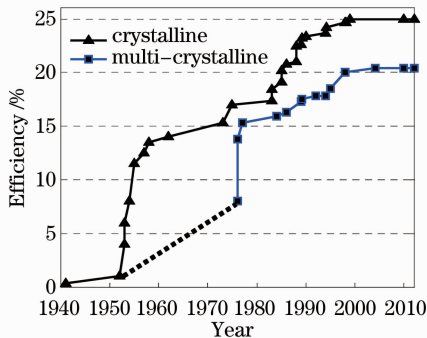


图 2 晶硅太阳能电池实验室转换效率的变化趋势^[11,12]
Fig. 2 Trends of crystalline silicon solar-cell conversion efficiency in laboratory^[11,12]

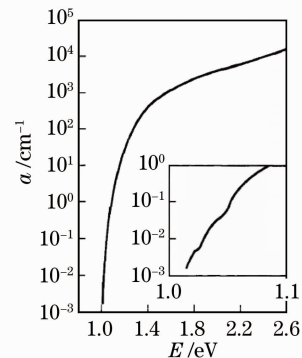


图 3 300 K 下硅能带边缘附近光的吸收系数 α ^[16]
Fig. 3 Light absorption coefficient α of the band around the edge of silicon at 300 K^[16]

晶硅电池的效率问题可分为两个层面。首先,基于效率对晶硅组件发电成本的影响,应努力提高现有批产化晶硅电池的效率。在这方面,人们已开展了大量而有益的工作,并出现了若干高效电池技术^[13],如背电场技术、浅结技术、绒面技术、密栅金属化技术、钝化技术、吸杂技术、选择性发射区技术及双层减反射膜技术等,同时产生了多种高效电池结构^[14,15],如钝化发射极,背面局部扩散(PERL)、点接触(PCC)、局部背表面场(LBSF)等。其次,确保新开发的超薄晶硅电池的效率保持甚至超过现有晶硅电池的效率。为降低发电成本,晶硅电池的厚度将越来越薄(已从早期的450~500 μm 降到目前的150~200 μm),但同时也产生了多种不利的效应,表现为:1)晶片越薄,单次通过晶片可完全吸收的最大波长越向短波方向移动。如光波单次通过200 μm 和50 μm 厚晶硅电池的最大吸收波长分别是1.05 μm 和0.85 μm (图3^[16])。2)晶片越薄,截止波长附近光场的完全吸收就越困难。此外,晶片变薄还意味着同等条件下(光生载流子产生总数相等)晶片内少数浓度增加,导致缺陷对载流子输运过程的影响会更为显著^[17]。正因如此,与厚晶硅电池相比,超薄晶硅芯片的短路电流下降很多(图4^[16],其中顶部曲线表示经表面织构处理的晶硅电池,底部曲线表示未经表面织构处理的晶硅电池),从而引起晶硅电池效率的降低(图5^[16],顶部曲线只考虑辐射复合,底部曲线除考虑辐射复合外,还考虑了俄歇复合和自由载流子吸收)。

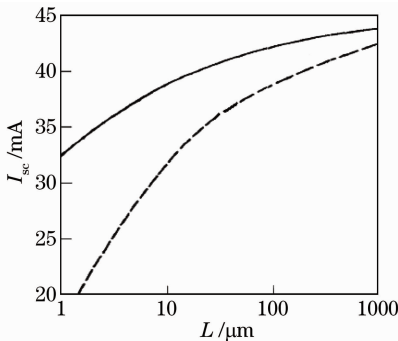


图4 短路电流 I_{sc} 与电池厚度 L 的关系^[16]

Fig. 4 Relation between the short-circuit current I_{sc} and cell thickness L ^[16]

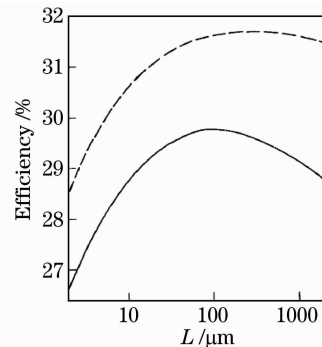


图5 转换效率与电池厚度的关系^[16]

Fig. 5 Relation between the conversion efficiency and cell thickness^[16]

为了提高晶硅电池的效率,设计具有优异光学和电学增效的电池结构无疑是研发的重点内容。传统晶硅电池所采用的光学增效措施主要包括:增加入射光场与芯片表面的耦合效率^[18~20];抑制芯片内光场向体外泄漏^[18~22],延长芯片体内的光程^[18~22];拓展材料吸收光谱范围^[23];增加芯片的有效吸光面积^[24]等。电学增效措施主要包括:采用表面钝化技术减小载流子在芯片表面的复合速率^[25,26];减小载流子在芯片体内的复合速率^[26,27];采用选择性发射极结构增强载流子收集效率^[26]等。目前,综合应用上述增效措施所实现的晶硅电池最高实验效率为25%,其电池结构被称为PERL结构

(New South Wales 大学开发),如图6所示^[11]。PERL 电池结构的特点为:1)采用“倒金字塔”结构,增加入射光场与芯片表面的耦合效率;2)采用铝背电极,该背电极本身又可作为金属背反射器,抑制芯片内光场向体外泄漏,延长了电池片体内的光程;3)在电池受光区域采用淡磷扩散,改善了短波响应,拓展材料吸收光谱范围;4)采用细栅技术,增加芯片的有效吸光面积;5)采用双面 SiO_2 钝化技术,大大降低了表面态密度,减小载流子在芯片表面的复合速率;6)采用选择性发射极结构,即在上表面栅电极下采用浓磷扩散,在受光区域采用淡磷扩散,既减少了栅指电极接触电阻,又减少了表面复合,增强载流子的收集效率。

因上述 PERL 电池在表面织构过程中会使表面损伤达10~30 μm ,所以其仅适用于厚度大于120 μm 的晶硅电池^[28],而对于更薄(厚度在10~50 μm)的晶硅电池,采用微纳等级的陷光结构无疑是必然的选择。

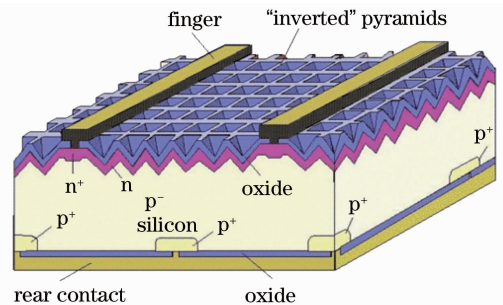


图6 PERL 单晶硅电池结构^[11]

Fig. 6 Structure of PERL mono-crystalline silicon solar cell^[11]

4 晶硅电池技术的未来发展趋势

结合上述对晶硅电池组件成本和效率的分析,可见:为了有效降低晶硅电池的成本,必须将组件成本的降低与电池效率的提高有机结合在一起,使组件成本降低,同时确保晶硅电池效率能保持甚至超过当前的水平。下面分别从晶硅电池组件制备工艺和效率提高的角度,对晶硅电池技术的未来发展趋势做具体分析。

4.1 晶硅电池组件制备技术的未来发展趋势

按照晶硅电池组件的成本构成,即晶硅原材料、晶体硅锭生长、硅片切片、晶硅电池制造和光伏组件封装等,对晶硅电池组件制备技术的未来发展趋势分析如下。

4.1.1 晶硅原材料生产技术

晶硅原材料的成本约占晶硅电池组件总成本的13%,其高昂的市场价格成为阻碍光伏产业发展的首要因素,因此,在不影响电池效率的前提下,降低晶硅原材料的成本是降低晶硅电池组件成本的关键。根据CTM集团的预测^[29],到2020年,为实现全面降低光伏发电总成本的目标,晶硅原材料价格至少需要降低50%,如图7所示。

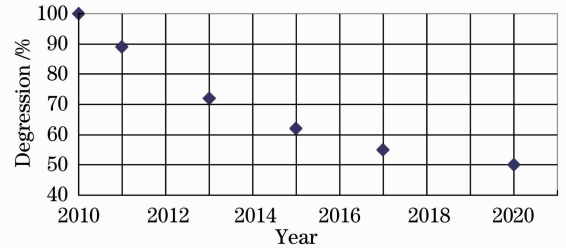


图7 多晶硅原材料价格下降趋势^[29]

Fig. 7 Price depression of poly-crystalline silicon^[29]

多晶硅原材料价格的降低主要依靠多晶硅原材料生产技术的进步来实现。目前生长多晶硅材料的主要方法为冶金法和西门子法。这两种方法中^[30~32],冶金法比传统的西门子法及改良的西门子法的能耗低很多(约低25%的能耗),且西门子法产生的 Cl_2 、 SiCl_4 等会对环境造成严重污染,所以未来一段时间内冶金法会被更广泛地采用。另一方面,开发低成本、低污染的新型晶硅材料生长技术,将成为这一领域的主要挑战和首要任务。

4.1.2 晶体硅锭生长技术

目前,晶体硅锭的生长主要有两种方法,即定向凝固法和浇铸法^[33]。未来晶体硅锭生长技术的发展趋势主要体现在解决晶体硅锭生长过程中的一些关键技术问题上,需要解决的关键技术问题主要包括以下几个方面:

1) 盛硅容器的材质。硅熔体冷凝时会牢固地粘附在坩埚的内壁,硅固化时体积增加9%^[33],若两者的膨胀系数不同,会使硅锭产生裂纹或破碎。此外,熔化硅几乎能与所有材料起化学反应,因而需要进一步减少坩埚材料中的杂质及氧、碳的含量,减少坩埚对硅料的污染,提高晶体硅锭的质量。

2) 晶体结构。为了提高晶硅电池的效率,在晶体硅锭的生长过程中需要采取有效的方法来控制晶体结构,以生长出大小适当(数毫米)的具有单向性的晶粒,并需要减少晶体中的缺陷。

3) 晶体硅锭质量。为了提高晶体硅锭生长工序的产能,生长出来的晶体硅锭主要朝大尺寸晶锭的方向发展。在2010年,铸出的单晶硅锭重可达150 kg左右,多晶硅锭重可达430 kg左右,CTM集团预测了未来单晶硅和多晶硅硅锭质量的增加趋势,如图8所示^[29]。

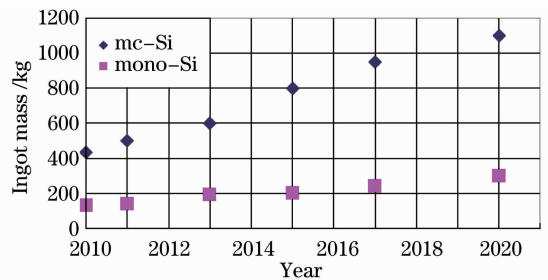


图8 单晶硅和多晶硅硅锭质量增加的趋势^[29]

Fig. 8 Trends for ingot mass for multi-crystalline (mc) Si and mono-Si material^[29]

4.1.3 硅片切片技术

硅片切片技术作为硅片加工工艺流程中的关键工序,其加工效率和加工质量直接关系到整个硅片生产的全局。受组件成本压力的影响,晶硅电池的硅片厚度将不断呈现出减薄的趋势。图9给出了未来硅片厚度的变化趋势的预测^[29]。随着硅片厚度的减薄,对于切片工艺中的切割精度、表面平行度、翘曲度和厚度公差等的要求会更高,尤其是大幅降低切片过程中的Kerf损失,已成为有效控制组件成本的必然要求。EPIA已给出了未来Kerf损失的变化情况^[1],如表4所列。

随着硅片厚度不断减薄,切片过程遇到的技术挑战表现为:1) Kerf损失在硅片切片工序中占有的比例不断加大,由表4可知,Kerf损失所占的比例在2005年为46%,到2020年将会增加到50%;2) 材料的切屑

粒微小,将混杂在研磨液中,造成切割效率下降^[34];3) 分离切屑粒与研磨液的成本变高,实施更为困难^[34]。因此,开发出适用于薄晶硅电池的切片技术,进一步减小 Kerf 损失,提高研磨料利用率,将是未来晶硅片切片技术的发展趋势。

表 4 未来硅片切割中的 Kerf 损失

Table 4 Kerf loss of slicing silicon in the future

Year	Wafer thickness / μm	Kerf loss / μm
2005	230~270	200~220
2010	180	160
2020	100	100

另外,许多新型的硅片成型技术将会获得快速发展,如带状多晶硅制造技术(包括 EFG 带硅技术、WEB 带硅技术、Delaware 大学多晶片状硅制造技术和 Stress-induced lift-off 技术等)^[8,9]。这些技术省去了切片环节,从而使传统晶硅片加工过程的切片损失及相关费用降到最低,是未来极具竞争力的晶片成型技术。

4.1.4 晶硅电池制造技术

由于晶硅电池是朝着大面积、薄片化和高效率的目标发展,因此,开发适合超薄晶硅电池的制造技术,并兼顾生产线的产能与电池的效率,是这一领域的未来发展趋势,具体如下:

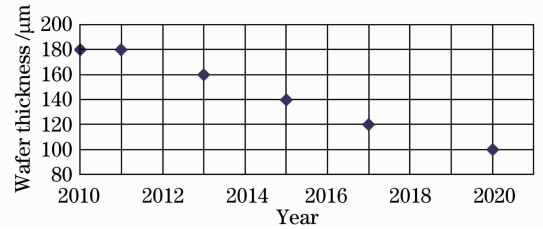
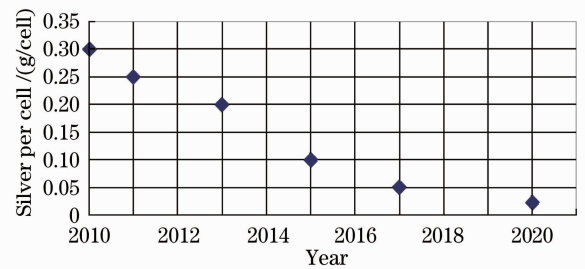
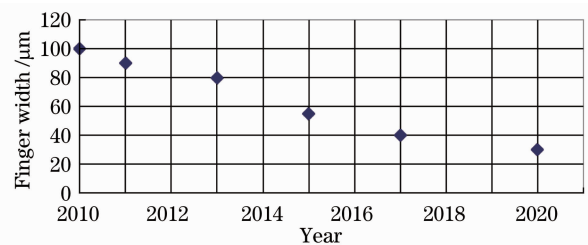
1) 干法腐蚀技术的重要性逐渐显现。随着晶硅电池片厚度进一步减薄,传统的湿法腐蚀(酸腐蚀和碱腐蚀)技术将不再适合薄电池片的表面织构加工,而干法腐蚀技术(如等离子体刻蚀技术)将在这一领域受到日益广泛的重视。

2) 低温扩散工艺将被广泛地采用。随着芯片厚度逐渐变薄,为有效控制芯片生产的成品率、结深和掺杂浓度,传统的高温扩散工艺将逐渐被低温工艺取代,如掺杂过程采用离子注入和相应退火技术来实现^[35]。

3) 新的互连和叠层技术的开发。随着晶硅电池片厚度进一步减薄,由合金工艺及硅与电极之间的热失配引起的应力场扩展会使得硅片明显弯曲。为了保证高成品率,电池片翘曲必须要低于 2 mm。预计到 2015 年^[29],将开发出适用于厚度小于 150 μm 晶片的新互连和叠层技术。

4) 新电极浆料的开发。除硅原材料外,电池电极制备过程中所用浆料也是影响晶硅电池成本的另一个主要因素。未来晶硅电池电极制备所用电极浆料的要求首先是要减少银、铝浆料的使用量。图 10 是尺寸为 156 mm \times 156 mm 的晶硅太阳能电池银浆料使用量减少的趋势^[29]。其次,采用较廉价的材料来代替银。从 2015 年开始,银可能被大规模取代,铜有望成为替代银的材料。最后,出于环保考虑,需要采用无铅的浆料/油墨来替代含铅的浆料/油墨,并且要确保获得与使用含铅浆料时相同的或更高的晶硅电池转换效率。

5) 细栅线制备技术的开发。为了进一步提高晶硅电池的转换效率,需要不断减小金属栅极的遮光面积。图 11 为不明显降低电导率的情况下栅极宽度的变化趋势^[29]。由图 11 可见:未来的金属电极制备技术应适合细栅线的制备,且应满足更高的发射区方块电阻要求,并能使栅极与浅发射区间建立起可靠的欧姆接触。

图 9 晶硅电池用硅片厚度的变化趋势^[29]Fig. 9 Trend of wafer thickness of crystalline-silicon solar cell^[29]图 10 对于规格为 156 mm \times 156 mm 的太阳能电池银浆料使用量预期减少的趋势^[29]Fig. 10 Trend of silver per cell usage for 156 mm \times 156 mm solar cell^[29]图 11 晶硅电池前表面栅线宽度的变化趋势^[29]Fig. 11 Trend of crystalline silicon cell front surface grid-line width^[29]

另外,随着 PERL 与类 PERL 等高效电池概念的引入,实际生产中有望更多地采用背接触电极结构^[35]。因背接触式太阳能电池的效率较高(无阴影),且属于平面加工范畴,可与现行工艺兼容,所以未来晶硅电池电极结构的发展趋势将主要是背接触式电极结构。

6) 为了提高整个晶硅电池生产线的产能,未来应通过改进组件制造技术和提高设备自动化程度来保证前道工序(化学和热处理)和后道工序(金属化和分选)具有相同的生产能力。表 5 表示的是当前、后道工序的产能接近时,电池生产线预期的产能值^[29]。预计到 2015 年,采用先进的金属化技术和设备可以减小前道工序和后道工序产能的差距,使得整个生产线的产能大幅度提高。

表 5 当前、后道工序的产能接近时预期的产能值

Table 5 Expected throughput values with synchronized front-end and back-end processes

Year	Front end (chemical+thermal) /(wafer/h)	Single line back end (metallization+classification) /(wafer/h)
2011~2012	3600	3000
2013	5000	3600
2015	6400	5400
2020	7200	7200

4.1.5 光伏组件封装技术

光伏组件封装技术的发展主要是围绕着如何提高晶硅电池组件的转换效率以及如何提高组件封装工序的产能而进行。为了提高晶硅电池组件的转换效率,更加充分地利用太阳光,需要减小电池上表面的玻璃-空气界面的光反射率,通过采用抗反射玻璃可以将反射率从典型值 4%降低到 2%,从 2013 年起,在光伏组件的封装中将普遍采用抗反射玻璃。另外,也需要减小光在玻璃和封装材料中的吸收率,使得组件的功率损耗最小。图 12 是未来电池组件中玻璃的光吸收率以及玻璃-空气界面反射率的变化趋势^[29]。到 2013 年,当普遍采用减反射玻璃后,光伏组件功率比(组件功率与电池功率和电池数量乘积之比)将有大约 1.5%的提高。

为了提高光伏组件封装工序的产能,从长远来看,发展自动化封装技术及相应的加工设备是必然的趋势^[36],同时,光伏组件封装技术自动化水平的提高可以确保电池组件产品的质量,提高产品的成品率,进而降低生产成本。

4.2 晶硅电池增效技术的未来发展趋势

由于超薄晶硅电池是未来晶硅电池的发展方向,因此未来晶硅电池增效技术的发展将主要围绕着如何增加超薄晶硅电池对太阳辐射能量的收集及扩大超薄晶硅电池中可收集到的光频率范围而进行。目前,国内外研究人员已提出多种可用于提高超薄晶硅电池效率的增效技术,其中比较具代表性并有望在未来超薄晶硅电池批量生产中采用的新型增效技术主要包括以下几种:

1) 光子晶体背反射技术。对于超薄晶硅电池,为了能够有效吸收长波(可见-近红外波段)光子,需要在超薄晶硅电池底部设计合适的背反射结构^[37],以使穿透到电池底部而未被吸收的长波光子反射回电池内部,从而实现二次或更多次吸收的效果,最终达到提高薄晶硅电池效率的目的。据相关研究报道^[38],可以采用光子晶体技术来制备高效全角度晶硅电池的背面反射器,由于光子晶体是不同的电介质在空间的周期分布,其主要特点是存在光子禁带,因此,可以通过设计不同的光子晶体结构来控制光子禁带,获得较大范围的电磁波反射。光子晶体背反射器相比于金属背反射器,其优势在于光吸收较小,光反射率较高;相比于其他介质反射器,其优势在于适用波长范围宽及对光线入射方向不敏感,从而容易实现全反射角。同时光子晶体背反射器还具有结构简洁、工艺简单、相应波段反射率高及角度宽容性良好等优点。

2) 光栅技术。在薄晶硅电池上、下表面可采用光栅结构来实现陷光的目的,由于光栅结构的存在,电池

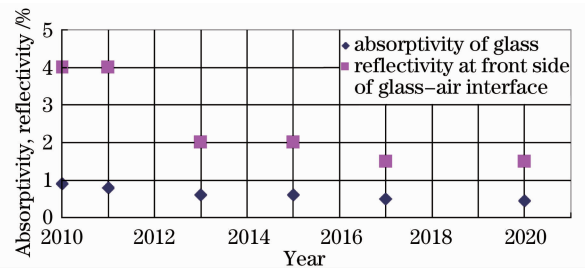


图 12 未来光伏组件中玻璃的光吸收率以及玻璃-空气界面反射率的变化趋势^[29]

Fig. 12 Trends of light absorptivity of photovoltaic module glass and glass-air interface reflectivity in the future^[29]

表面与太阳光的接触面积增大,光在电池内部出现多次反射,反射的光子也可在表面产生多次反射的效果,同时也使光子在电池体内的运动路径变长(光程变长)。另外,当入射光垂直入射到电池表面时,产生衍射效应,使得电池表面反射减弱,从而电池表面的吸收率增加。对不同的光栅结构进行优化组合可以增加整个波段范围内的光吸收率,优化后的光栅结构能够更好地激发微腔效应,将太阳光谱辐射能量束缚在高低错落的光栅槽内,这样减弱了电池表面的反射,从而可增强光的吸收,提高电池的转换效率。通过合理设计光栅结构,如光栅周期、光栅深度和光栅宽度等,可大幅改善电池光栅结构表面对不同波长的光谱响应。

目前,很多研究人员都致力于把光子晶体和光栅结合起来增加太阳能电池的陷光能力。如 Mutitu 等^[39]在太阳能电池中同时运用了平面增透膜和纳米光栅结构对太阳能电池进行优化,从而提高了装置的短路电流。在运用微纳米光栅结构时分别使用矩形光栅和三角光栅对太阳能电池进行优化,都能在在一定程度上改善太阳能电池的光波吸收率以及短路电流,从而达到提升转换效率的效果。

3) 表面纳米织构技术。薄晶硅电池由于其厚度原因而不能采取传统绒面结构,因此可以在薄晶硅电池表面采用纳米织构来增加电池的陷光能力。表面纳米织构主要包括金属纳米颗粒、纳米线、纳米锥和纳米孔等^[40,41],这些低维结构材料具有独特的光电特性,如量子尺寸效应、热电特性、比表面积增加引起的光敏度和生化灵敏度增强等。研究结果表明^[42],与其他几种表面纳米织构相比,纳米孔吸收波段范围更宽、陷光能力和机械稳定性更好,因而引起了人们的广泛关注。尽管这种织构结构的性能十分优越,但在其实用化之前,必须先解决好加工成本偏高、大面积加工困难等问题。

4) 先进的电池表面钝化技术。开发适合于超薄晶硅电池的表面钝化材料和钝化膜制备技术,除采用传统的等离子体增强化学气相沉积制备 SiN_x 钝化膜之外,国内外研究者近来又开发出了一些新型钝化膜材料,如 $\text{SiC}_x\text{:H}$ 、 Al_2O_3 、 $\alpha\text{-Si}$ 等。研究结果表明:采用等离子体辅助原子沉积技术制备的 Al_2O_3 钝化薄膜相比于其他钝化膜,由于其具有优异的场效应钝化和化学钝化特性^[43],因此对电池表面具有最佳的钝化效果,如采用 Al_2O_3 钝化低阻的 p 型或 n 型硅片获得的表面复合速度可分别降低到 13 cm/s 和 2 cm/s ^[44]。而且 Al_2O_3 钝化膜中含有大量的负电荷,相比于传统的 SiO_2 、 SiN_x 等钝化膜,对高掺杂的 p 型或 p^+ 发射极的钝化效果更好^[45]。因此,随着研究的深入和技术的不断进步, Al_2O_3 钝化薄膜会取得更大的进展,并有望在未来晶硅电池工业生产中得到广泛的应用。

5 结束语

对过去 10 年全球光伏产业的发展情况进行了综述,说明了在未来的光伏发电领域中,晶硅太阳能电池仍将长期占据重要地位。对影响晶硅电池成本问题的若干因素进行了分析,并重点分析了晶硅原材料成本、晶体硅锭/硅片成本、晶硅电池加工成本、晶硅电池组件封装成本以及晶硅电池的光电转换效率与晶硅电池组件成本之间的关系。最后,分别从晶硅电池组件制备工艺和效率提高的角度,对晶硅原材料生产技术、晶体硅锭生长技术、硅片切片技术、晶硅电池制造技术、组件封装技术以及电池增效技术的未来发展趋势进行了展望。

参 考 文 献

- 1 光电产业研究报告. 2011 年中国及海外太阳能光伏产业发展报告 [OL]. <http://wenku.baidu.com/view/a95718f77c1cfad6195fa7c4.html>, 2011-02-18
- 2 Luo Chunming, He Wei, Zhou Ke *et al.*. Crystal silicon solar cell thin film material current situation and development trend [J]. *Insulation Material*, 2012, **45**(3): 29~33
罗春明, 何伟, 周柯等. 晶硅太阳能电池薄膜材料现状及发展趋势[J]. *绝缘材料*, 2012, **45**(3): 29~33
- 3 International Energy Agency (IEA). Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy[R]. 2010
- 4 Luo Dawei. Research on the Preparation of Solar Grade Silicon (SOG-Si) by Metallurgical Method [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. 7~18
罗大伟. 太阳能级硅冶金制备技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011. 7~18
- 5 Wu Dacheng. PV Market Current Situation and Development Trend in China[R]. 2012
吴达成. 我国光伏发电市场现状及发展趋势[R]. 2012

- 6 Ma Shenghong, Li Bin, Chen Dongbing *et al.*. The analysis on the Chinese photovoltaic power generation cost, price and technology progress[J]. *Solar Energy*, 2010, (4): 6~13
马胜红, 李斌, 陈东兵等. 中国光伏发电成本、价格及技术进步作用的分析[J]. 太阳能, 2010, (4): 6~13
- 7 C. del Cañizo, G. del Coso, W. C. Sinke. Crystalline silicon solar module technology: towards the 1€ per watt-peak goal [J]. *Prog. Photovolt. : Res. Appl.*, 2009, **17**(3): 199~209
- 8 Hyo-Min Jeong, Han-Shik Chung, T.-W. Lee. Computational simulations of ribbon-growth on substrate for photovoltaic silicon wafer[J]. *J. Crystal Growth*, 2010, **312**(4): 555~562
- 9 Jack I. Hanoka. An overview of silicon ribbon growth technology[J]. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2001, **65**(1-4): 231~237
- 10 太阳能光伏产业"十二五"发展规划[OL]. <http://www.miit.gov.cn/n11293472/n11293907/n11368223/14473431.html>, 2012-02-24
- 11 Martin A. Green. The path to 25% silicon solar cell efficiency: history of silicon cell evolution[J]. *Prog. Photovolt. : Res. Appl.*, 2009, **17**(3): 183~189
- 12 Martin A. Green. Solar cell efficiency tables (version 40)[J]. *Prog. Photovolt. : Res. Appl.*, 2012, **20**(5): 606~614
- 13 M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa *et al.*. Solar cell efficiency tables (version 38)[J]. *Prog. Photovolt. : Res. Appl.*, 2011, **19**(5): 565~572
- 14 Jianhua Zhao, Aihua Wang, Pietro P. Altermatt *et al.*. 24% efficient PERL silicon solar cell: recent improvements in high efficiency silicon cell research[J]. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 1996, **41-42**: 87~99
- 15 赵建华. 高效率晶体硅太阳能电池技术的进展[OL]. <http://wenku.baidu.com/view/bd517f40a8956bec0975e3ae.html>, 2011-05-11
- 16 Tom Tiedje, Eli Yablonovitch, George D. Cody *et al.*. Limiting efficiency of silicon solar cells[J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1984, **31**(5): 711~716
- 17 G. P. Willeke. Thin crystalline silicon solar cells[J]. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2002, **72**(1-4): 191~200
- 18 H. Nakaya, M. Nishida, Y. Takeda *et al.*. Polycrystalline silicon solar cells with V-grooved surface[J]. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 1994, **34**(1-4): 219~225
- 19 R. A. Sinton, Y. Kwark, J. Y. Gan *et al.*. 27.5-percent silicon concentrator solar cells[J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 1986, **7**(10): 567~569
- 20 H. C. Yuan, V. E. Yost, M. R. Page *et al.*. Efficient black silicon solar cell with a density-graded nanoporous surface: optical properties, performance limitations, and design rules[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(12): 123501
- 21 A. Banerjee, S. Guha. Study of back reflectors for amorphous silicon alloy solar cell application[C]. *J. Appl. Phys.*, 1991, **69**(2): 1030~1035
- 22 D. Madzharov, R. Dewan, D. Knipp. Influence of front and back grating on light trapping in micro-crystalline thin-film silicon solar cells[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(S2): A95~A107
- 23 W. Wanga, E. A. Schiff. Polyaniline on crystalline silicon heterojunction solar cells[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(13): 133504
- 24 E. V. Kerschaver, G. Beaucarne. Back-contact solar cells; a review[J]. *Prog. Photovolt. : Res. Appl.*, 2006, **14**(2): 107~123
- 25 J. Schmidt, A. Merkle, R. Brendel *et al.*. Surface passivation of high-efficiency silicon solar cells by atomic-layer-deposited Al₂O₃[J]. *Progress Photovolt. : Res. Appl.*, 2008, **16**(6): 461~466
- 26 T. C. Röder, S. J. Eisele, P. Grabitz *et al.*. Add-on laser tailored selective emitter solar cells[J]. *Progress Photovolt. : Res. Appl.*, 2010, **18**(7): 505~510
- 27 A. Cuevas, M. Stocks, S. Armand *et al.*. High minority carrier lifetime in phosphorus-gettered multicrystalline silicon[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**(8): 1017
- 28 J. John, V. Prajapati, B. Vermang. Evolutionary process development towards next generation crystalline silicon solar cells: a semiconductor process toolbox application[C]. Photovoltaic Technical Conference (PVTC 2011) EPJ Photovoltaics, 2012, **3**: 35005
- 29 Crystalline Silicon PV Technology and Manufacturing (CTM) Group. International Technology Roadmap for Photovoltaics (ITRPV.net) Results 2010(Second Edition)[R]. 2011
- 30 Md Saiful Islam, Muhammad A. Rhamdhani, Geoffrey A. Brooks. Solar-grade silicon: current and alternative production routes[C]. Chemeca 2011, 2011
- 31 K. Kaneko, D. Landaud, P. Gillon. Cost estimates of silicon manufacture by metallurgy[J]. *Photovolt. Bulletin*, 2002,

2002(12): 8~10

- 32 S. Pizzini. Bulk solar grade silicon: how chemistry and physics play to get a benevolent microstructured material[J]. *Appl. Phys. A.*, 2009, **96**(1): 171~188
- 33 Anis Jouini, Damien Ponthenier, Helene Lignier *et al.*. Improved multicrystalline silicon ingot crystal quality through seed growth for high efficiency solar cells[J]. *Prog. Photovolt. : Res. Appl.*, 2012, **20**(6): 735~746
- 34 程志华, 李秀雯, 裴仁清. 硅片切割技术的现状和发展趋势[OL]. <http://www.21tyn.com/news/echo.php?id=6656.htm>, 2008-08-01
- 35 T. Janssens, N. E. Posthuma, E. van Kerschaver *et al.*. Advanced phosphorus emitters for high efficiency Si solar cells [C]. 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2009. 878~882
- 36 H. Ullal, R. Mitchell, B. Keyes *et al.*. Progress of the PV technology incubator project towards an enhanced U. S. manufacturing base[C]. 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2011. 3287~3291
- 37 Zhou Zhou, Zhou Jian, Sun Xiaowei *et al.*. Design of an irregularly shaped DBR for thin film solar cells[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0731002
周舟, 周健, 孙晓玮等. 薄膜太阳能电池异型布拉格背反射结构设计[与制作[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0731002
- 38 Li Xiujie, Han Peide, Yang Yibiao *et al.*. Reflector of solar cells based on photonic crystal heterostructures[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(10): 1786~1789
李秀杰, 韩培德, 杨毅彪等. 基于光子晶体异质结的高效太阳能电池反射器研究[J]. *光子学报*, 2010, **39**(10): 1786~1789
- 39 James G. Mutitu, Shouyuan Shi, Caihua Chen *et al.*. Thin film solar cell design based on photonic crystal and diffractive grating structures[J]. *Opt. Express*, 2009, **16**(19): 15238~15248
- 40 Zhou Zhen, Shi Linxing. Optimized design of plasmonic thin film solar cells with metal nanogratings[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(11): 112303
周朕, 史林兴. 金属纳米栅格薄膜等离激元太阳能电池的优化设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(11): 112303
- 41 Jiang Yurong, Qin Ruiping, Bian Changxian *et al.*. Texturing of silicon nanowire arrays by post-treatment in alkali solution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(8): 0816002
蒋玉荣, 秦瑞平, 边长贤. 碱溶液修饰硅纳米线阵列绒面[J]. *光学学报*, 2012, **32**(8): 0816002
- 42 J. Zhu, Z. Yu, S. Fan *et al.*. Nanostructured photon management for high performance solar cells[J]. *Mater. Sci. Engng. R*, 2010, **70**(3-6): 330~340
- 43 Wu Dawei, Jia Rui, Wu Deqi *et al.*. Al₂O₃ passivation for crystalline silicon solar cells [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2011, **48**(8): 529~535
吴大卫, 贾锐, 武德起等. 氧化铝钝化在晶体硅太阳能电池中的应用[J]. *微纳电子技术*, 2011, **48**(8): 528~535
- 44 B. Hoex, S. B. S. Heil, E. Langereis *et al.*. Ultralow surface recombination of c-Si substrates passivated by plasma-assisted atomic layer deposited Al₂O₃[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(4): 042112
- 45 B. Hoex, J. Schmidt, R. Bock *et al.*. Excellent passivation of highly doped p-type Si surfaces by the negative-charge-dielectric Al₂O₃[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(11): 112107