

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0341-05

1064 nm/532 nm 4 路分光激光刻线系统 刻划非晶硅太阳能电池研究

闵大勇^{1,2} 陈泽民¹ 何 里² 王 中^{1,2} 卢飞星²

(¹ 华中科技大学, 湖北 武汉 430223; ² 武汉华工激光工程有限责任公司, 湖北 武汉 430223)

摘要 通过对叠层非晶硅薄膜太阳能电池制备工艺流程的讨论,提出了在玻璃基材上刻划透明导电氧化物(TCO)层,非晶硅(a-Si:H)层和背电极层时需注意的关键工艺,合适的激光器性能参数以及加工参数,并根据这些理论参数进行了工艺实验的验证。使用输出波长为 1064 nm 的调 Q 激光器和输出波长为 532 nm 的调 Q 倍频激光器作为光源,采用自行设计的 4 路分光聚焦系统,在 1064 nm 激光总功率为 16 W,单路功率为 4 W;532 nm 激光总功率为 3 W,单路功率为 0.75 W,重复频率为 40 kHz,扫描速度为 1.2 m/s 的工作参数下得到了较理想的刻线,同时提高了加工效率,分析了刻划时对刻线附近区域造成明显热影响,导致电池效率下降的因素。提出了需精确控制的系统工作参数。

关键词 激光刻划; 叠层薄膜太阳能电池; 4 路分光刻线系统; 非晶硅薄膜

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200936s1.0341

Research on Amorphous Silicon Solar Cell Scribing with 1064 nm/523 nm 4-Way Light Splitter System

Min Dayong^{1,2} Chen Zeming¹ He Li² Wang Zhong^{1,2} Lu Feixing²

(¹ University of Huazhong Science & Technology, Wuhan, Hubei 430223, China)
(² Wuhan Huagong Laser Engineering Co. Ltd., Wuhan, Hubei 430223, China)

Abstract Through the discussion of tandem amorphous silicon (a-Si:H) film solar cell processing, suitable laser and process parameters are given. Character of scribing area which scribed by 40 kHz, 1.2 m/s scribing speed, 16 W 1064 nm laser, 4 W single way power and 3 W 532 nm laser, 0.75 W single way power with 4-way light splitter focus system are discussed. Factors which cause heat-affected zone and lead to the decrease of efficiency are analyzed. Key process parameters which affect scribing line obviously and which needed to be accurately controlled are given.

Key words laser scribing; tandem solar cell; 4-way light splitter focus system; a-Si:H thin film

1 引 言

随着光伏产业的兴起,高性能太阳能电池的制备成为目前研究的热点。对太阳能电池材料的要求有:半导体材料的禁带不能太宽;要有较高的光电转换效率;材料本身对环境不造成污染;材料便于工业化生产且性能稳定。硅是最理想的太阳能电池材料。

多晶硅和薄膜晶体硅太阳能电池具有转换效率高,衰减小等优点。德国弗莱堡夫琅和费太阳能系统研究所在区熔单晶硅(FZ Si)衬底上制得的多晶

硅电池转换效率达 19%^[1],日本三菱公司制备的多晶硅电池,效率为 16%^[2]。铸造多晶硅(晶硅熔融,然后定向凝固)可省去晶硅拉棒工序,能耗降低且生产效率大大提高,而且方形结构较圆形单晶片更能提高晶硅利用率(因太阳能电池组件多为方形),因此多晶硅太阳能电池已成为单晶硅太阳能电池的替代产品,但其仍无法摆脱对晶体硅的高度依赖。薄膜晶体硅太阳能电池能够大大降低晶硅用量,但目前还处于研发阶段,尚未工业化。

基金项目: 国家科技支撑计划(2007BAQ00120)资助课题。

作者简介: 闵大勇(1971),男,工程师,主要从事激光技术应用方面的研究。E-mail:mdy@hglaser.com

通信联系人。E-mail: lufeixing@hglaser.com

在这种形势下,非晶硅薄膜太阳能电池与化合物薄膜太阳能电池获得了难得的发展机遇。化合物薄膜太阳能电池主要有硒铜铜(CIS)和碲化镉(CdTe)薄膜电池,CIS和CdTe薄膜电池的效率较非晶硅薄膜电池高,成本较单晶硅电池低,并且易于大规模生产,并且没有效率衰减问题。但是这种电池的原材料之一镉对环境有较强的污染,而且硒、铜、碲等都是较稀有的金属。

而非晶硅太阳能电池虽然转换效率较多晶硅低,但通过三叠层结构,转换效率也可达到13%^[3]。其加工原理为使用硅烷(SiH₄)等离子体分解法,通过对SiH₄掺杂乙硼烷(B₂H₆)和磷化氢(PH₃)等气体,在低成本基板上(玻璃、不锈钢)低温成膜。该方

法具有工艺成熟,成本低,制备方便,没有原料瓶颈等优点。

本文使用AWAVE 20 W,1064 nm及AWAVE 5 W,532 nm激光器及自行设计的4路分光耦合聚焦系统,在一组较适宜的加工参数下对非晶硅太阳能电池制备中透明导电氧化物(TCO)层,非晶硅层和背电极层刻线工艺进行了实验,得到了较理想的结果。

2 工艺流程

生产非晶硅薄膜太阳能电池的主要设备和工艺流程如图1所示。

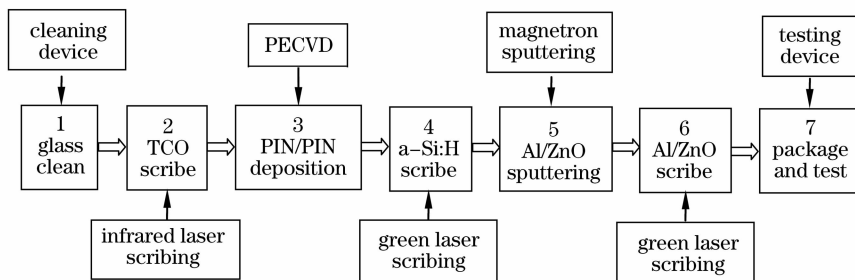


图1 非晶硅叠层太阳能电池生产的主要设备和工艺流程

Fig. 1 Apparatus and process of amorphous silicon (a-Si:H) tandem solar cell production

非晶硅薄膜太阳能电池为叠层结构,横断面及三维示意图,等效电池组如图2、图3所示。

2~3 mm,TCO涂层厚约1~1.5 μm。

由于高阻值会显著降低填充(FF)因数,沉积TCO层的材料要求具有高导电性和高透光系数,以减小该层电阻^[4,5],常见材料为铟锡氧化物(ITO, In₂O₃/ZnO)。一般使用激光二极管(LD)抽运的输出波长为1064 nm的调Q掺Nd激光器通过热效应作用刻划该层。通常选激光器的工作功率范围为15~20 W,重复频率范围为40~100 kHz。为保证在此高重复频率下激光功率仍能够高于材料的烧蚀阈值,脉冲宽度应小于50 ns。要求刻线边缘轮廓整齐一致,所以使用基模,脉冲能量波动小的刻划激光。在以上加工参数下,刻划速度能可到1~2 m/s。还可以通过光束整形装置将高斯光束变换为平顶光束,通过减少刻划光斑的重叠,进一步提高刻划速度。

中间层为非晶硅膜层,即图1中步骤3,4,通过等离子体增强型化学气相沉积(PECVD)法在非硅衬底上制备非晶硅薄膜,即沉积p-i-n膜,膜厚度通常小于1 μm。在p-i-n结构的p-Si层和n-Si层之间有一层较厚的非晶硅本征层,即i层。为防止光致衰退(S-W)效应,通常在p-i-n单结太阳能电池上再沉积一层p-i-n子电池,所以非晶硅膜层的结构为p-i-n/p-i-n结构,其制备温度很低,约为100~200 ℃。

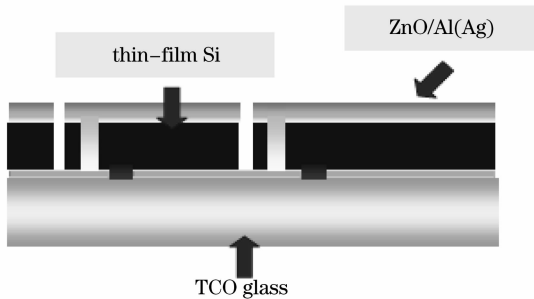


图2 非晶硅叠层太阳能电池横截面

Fig. 2 Cross section of a-Si:H tandem solar cell

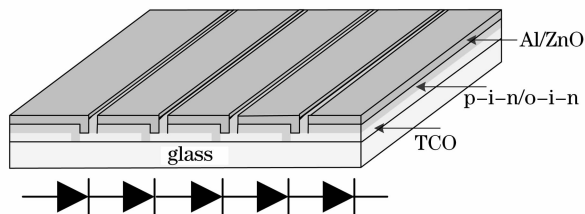


图3 三维示意图及等效电池组

Fig. 3 3D structure and equivalent battery

横断面的最下层为TCO层,即图1中步骤1,2。TCO涂在普通浮法玻璃基材上,通常玻璃厚

层结构如图 4 所示。

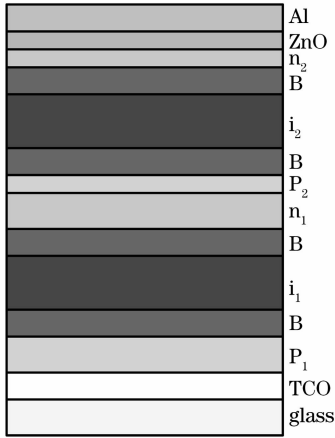


图 4 非晶硅太阳能电池膜层结构

Fig. 4 Layer structure of a-Si:H solar cell

非晶硅(a-Si:H)和微晶硅($\mu\text{c-Si:H}$)对于不同波长光的吸收率对比如图 5 所示,从图中可以看出,吸收峰约在 500 nm 左右,且对绿激光(波长为 532 nm)有较高的吸收率^[6]。由于激光直接照射非晶硅膜层会引起非晶硅的熔化和再沉积,导致 FF 因数和开路电压 V_{oc} 降低,所以 532 nm 激光通常从玻璃一侧入射^[7]。由于非晶硅层的烧蚀阈值较低,可使用 LD 抽运调 Q 倍频掺 Nd 激光器,其平均功率为 4~6 W。为保证高重复频率($f > 40$ kHz),高速度($V_s > 800$ mm/s)下刻划的均匀性,脉宽应控制在 30 ns 以内,光束质量应尽可能好。

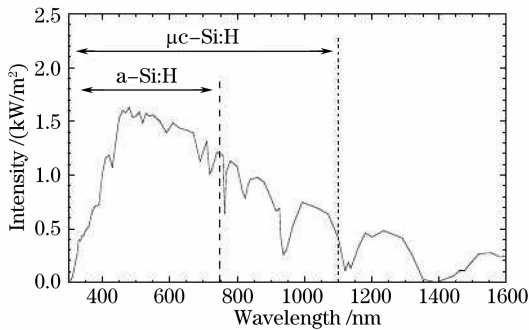


图 5 a-Si:H/ $\mu\text{c-Si:H}$ 的吸收光谱

Fig. 5 Absorption spectrum of a-Si:H/ $\mu\text{c-Si:H}$

最上层为背电极层,如图 6 所示。电池接受光照后,光生电荷集中在 TCO 层和背电极,所以该层的电阻会极大的降低电池的 FF 因数,因此该层材料的选择非常重要^[8~10]。

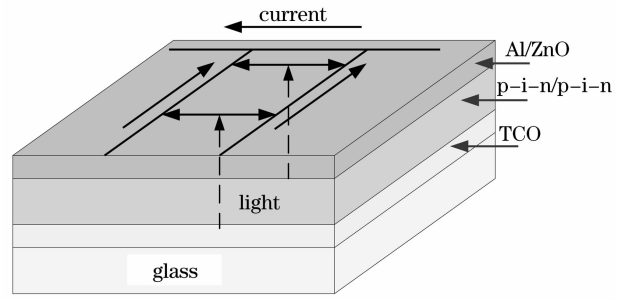


图 6 pin/pin 结构

Fig. 6 pin/pin structure

通常使用 Al 和 ZnO 作为沉积背电极层的材料,Al/ZnO 具有高的导电系数并且该层厚度通常小于 $1 \mu\text{m}$,所以该层电阻很小,可降低光生电流的损耗。相应地,每个电池单元的面积可以增大,从而扩大了电池的有效表面积。

Al/ZnO 薄膜的制备采用磁控溅射沉积,即图 1 中步骤 5,6。该层使用 532 nm 激光刻划,激光从玻璃一侧入射,工艺参数与刻划中间层时基本一致。该层连同非晶硅层一起被切断,从而形成单个电池单元之间的分界线,刻线宽度一般在 $25 \sim 50 \mu\text{m}$ 之间。好的光束质量和脉冲能量稳定性有助于提高刻线质量,并且避免损伤 TCO 膜层;高重复频率和平顶光束整形同样有利于提高刻划速度。

3 实验研究

根据上文的讨论,实验中激光器选用 AWAVE-1064 nm(激光器 1)和 AWAV-532 nm(激光器 2),其性能参数如表 1 所示。

表 1 1064 nm/532 nm 激光器性能参数

Table 1 Device parameters of 1064 nm/532 nm laser

Wavelength /nm	1064	532
Frequency /kHz	1~100	1~100
Power /W	20 (50 kHz)	5 (30 kHz)
Pulse-pulse instability /(RMS)	<2%	<2%
Pulse width /ns	<40	12
	(50 kHz)	(30 kHz)
Spatial mode	TEM ₀₀	TEM ₀₀
M ²	<1.1	<1.1
Divergence angle /mrad	0.9	0.9
Beam size /mm	1.8	1.8
Polarization ratio	100:1	100:1

激光器的近场光斑及远场 3 维分布如图 7 所示,其中图 7(a),图 7(b)为实测光斑,图 7(c)为 AWAVE 激光器技术文档中的标称光斑。

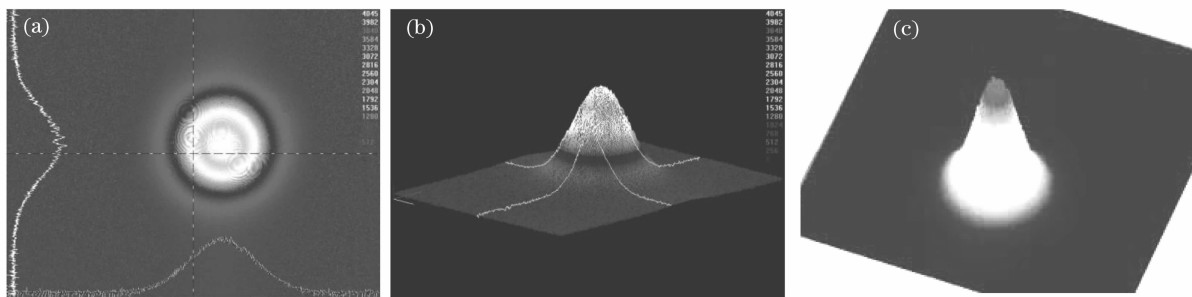


图 7 (a) 激光器 1 的近场光斑; (b) 激光器 1 远场光斑; (c) 激光器 2 的远场光斑

Fig. 7 (a) Near-field beam of laser 1; (b) far-field beam of laser 1; (c) far-field beam of laser 2

由于刻线所需激光功率不高,40 kHz 重复频率下,刻划 TCO 层需要 4~5 W,刻划非晶硅层及背电极层需要 0.75~0.8 W,所以为提高刻划效率,设计了 4 路分光耦合系统,对激光器进行分光,同时刻划四条线,如图 8 所示。

从玻璃侧面拍摄。

由于激光为基模,而且 $M^2 < 1.1$,所以刻线边缘基本整齐一致,刻线宽度约为 $40 \mu\text{m}$ 。实际刻划中,如激光器满功率运行,即单路功率达到 5W,则沿着刻线的 TCO 区会受到较显著的热影响。通过非晶硅膜和背电极膜沉积后,可以从玻璃一层观察到明显的热影响区。用 90 倍 CCD 放大观察,如图 10 所示,该区宽度约 $250 \mu\text{m}$ 。热影响区的电阻比正常 TCO 区大,相当于减小了每个电池单元的面积,导致电池的 FF 因数和开路电压 V_{oc} 降低,光生电流减小。由于刻划 TCO 层的作用机理是热效应,所以刻线边缘必然存在热影响区,但是可以通过选取适当的激光功率尽量减小该区域。

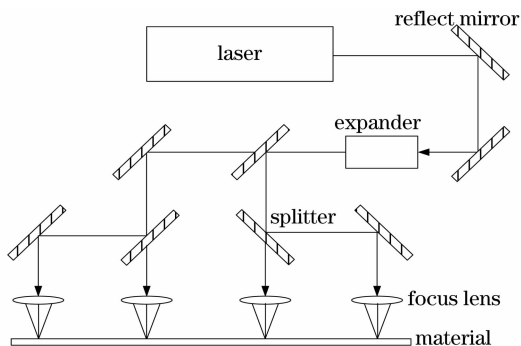


图 8 四路分光聚焦示意图

Fig. 8 4-way light splitter focus system

3.1 刻划基板 TCO 层

使用激光器 1 刻划 TCO 层,工作参数选择如表 2 所示。

表 2 激光器 1 工作参数

Table 2 Operating parameters of laser 1

Wavelength /nm	Power /W	Single-way power /W	Frequency /kHz	Scan speed /(m/s)
1064	16	4	40	1.2

刻线放大照片如图 9 所示,使用 200 倍显微镜,

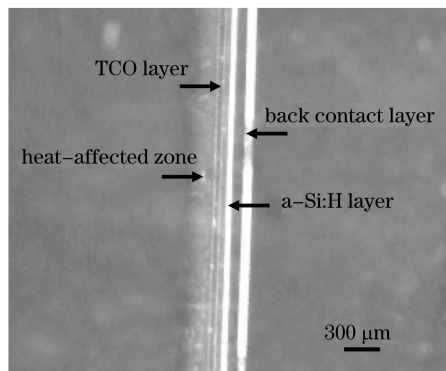


图 10 90×CCD 放大照片

Fig. 10 CCD photography of 90× magnification

3.2 非晶硅层及背电极层

激光器 2 刻划非晶硅层和背电极层,这两层的刻划工作参数是一样的,如表 3 所示。

表 3 激光器 2 工作参数

Table 3 Operating parameters of laser 2

Wavelength /nm	Power /W	Single-way power /W	Frequency /kHz	Scan speed /(m/s)
532	3	0.75	40	1.2

刻划 400 倍放大照片如图 11(a)所示。可以看到,该层的线宽约为 $40 \mu\text{m}$,刻线边缘一致程度比

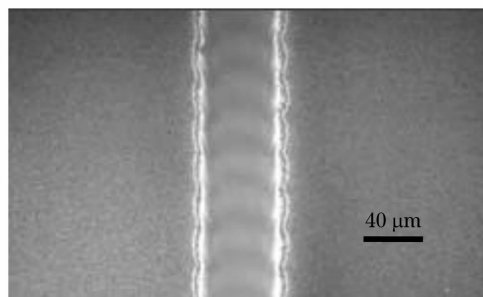


图 9 200 倍放大照片

Fig. 9 Photography of 200× magnification

TCO 层差,一方面由于倍频 532 nm 激光在倍频晶体的走离效应等影响下,光束质量达不到其标称的 $M^2 < 1.1$;另一方面因为刻线两侧非晶硅膜层发生烧蚀。限于实验条件,没有直接对样品表面做电镜 (SEM) 扫描,文献[7]中 SEM 扫描结果可以做出对比,如图 11(b)所示。其中的黑色区域之间为刻线,线宽为 $40 \mu\text{m}$ 左右,黑色区域为发生烧蚀的非晶硅

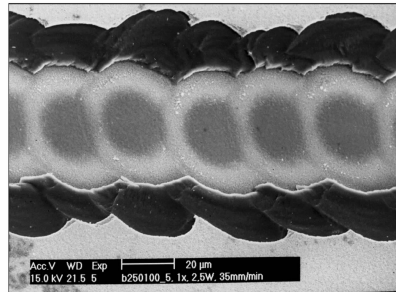
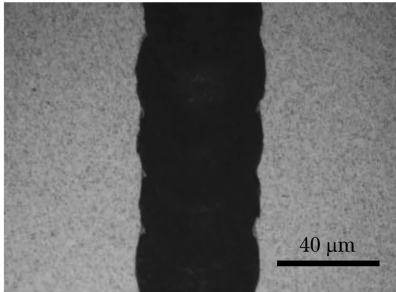


图 11 (a) 400 倍放大照片; (b) SEM 扫描

Fig. 11 (a) Photography of $400\times$ magnification; (b) photography of SEM scanning

背电极层 140 倍 CCD 放大照片如图 12 所示,该层的线宽约为 $70 \mu\text{m}$ 。由于是连同非晶硅层一起切断,所以该层边缘也有非晶硅烧蚀的痕迹,右上角非常明显。背电极层刻线的间距决定了每个电池单元的宽度,通常该宽度为 1 cm 左右。

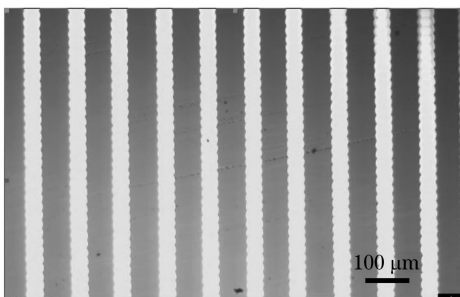


图 12 背电极层照片

Fig. 12 Photography of back contact

4 结 论

使用 1064 nm 和 532 nm 激光器及自行设计的 4 路分光聚焦系统,在 1064 nm 激光总功率为 16 W,单路功率为 4 W;532 nm 激光总功率 3 W,单路功率 0.75 W,重复频率 40 kHz,扫描速度为 1.2 m/s 的工作参数下,刻线效果较理想。实验中观察到了因过高的 1064nm 激光功率导致的刻线外侧热影响区,为减小热影响区及非晶硅层烧蚀区,同时提高加工效率,需要精确控制功率、重复频率及扫描速度等工作参数的稳定性,这有赖于工艺研究和实验的进一步深入。

膜层,由于烧蚀区无法与背电极接触,所以该区域实际上已经无法导电,但不会对导电区有不良影响,仅相当于减小了 $20 \mu\text{m}$ 的导电区宽度,即单个电池单元宽度减小 $20 \mu\text{m}$ 。这样的刻划结果是可以满意的,刻线线宽约为 $40 \mu\text{m}$ 。通过精确控制激光功率,重复频率及扫描速度等参数,可以减小烧蚀区的宽度。

参 考 文 献

- 1 R. Preu, D. Biro. The status of silicon solar cell production technology development at Fraunhofer ISE[C]. Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Waikoloa, Hilton, USA, 2006. 1040~1043
- 2 Arimoto S, Nakatani M. Simplified mass-production process for 16% efficiency multi-crystalline Si solar cells[C]. Proceedings of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anchorage, Alaska, USA 2000. 188~193
- 3 Xunming Deng. Optimization of a-SiGe based triple, tandem and single-junction solar cells[C]. Conference Record of the 31th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Lake Buena Vista, Florida, USA, 2005. 1365~1370
- 4 Steve Golay, Johannes Meier, Sébastien Dubail *et al.*. First pin/pin micromorph modules by laser patterning[C]. Proceedings of 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anchorage, Alaska, USA, 2000. 1456~1459
- 5 Pascal Pernet, Michael Goetz, Xavier Niquill *et al.*. Front contact and series connection problems of a-Si:H solar cells on polymer film substrates [C]. Proceedings of the 2nd World Conference Photovoltaic Energy Conversion, Switzerland, 1998. 976~979
- 6 Fanny Sculati Meillaud. Microcrystalline Silicon Solar Cells: Theory, Diagnosis and Stability[D]: Neuchatel; Institute of Microtechnique, University of Neuchatel, 2006. 4~5
- 7 Steve Golay, Johannes Meier, Sébastien Dubail *et al.*. Laser scribing of p-i-n/p-i-n "micromorph" (a-Si:H/ μc -Si:H) tandem cells. Inst. of Microtechnol, Neuchatel, http://www.micromorph.unine.ch/publications/ps_files/papaer_319.pdf
- 8 B. Rech, T. Roschek, T. Repmann *et al.*. Microcrystalline silicon for large area thin film solar cells[J]. *Thin Solid Films*, 2003, **427**: 157~165
- 9 J. Meier, H. Keppner, S. Dubail *et al.*. Microcrystalline and micromorph thin-film silicon solar cells[C]. Proceedings of the 2nd World Conference on PV Energy Conversion, Vienna, 1998. 375~380
- 10 A. V. Shah, H. Schade, M. Vaneczek *et al.*. Thin-film silicon solar cell technology[J]. *Progress in Photovoltaics*, 2004, **12**: 113~142