



2017 年我国光伏技术发展报告 (3)

中国可再生能源学会光伏专业委员会

3 薄膜太阳能电池研究进展

3.1 薄膜太阳能电池发展概况

自 2011 年以来, 各种薄膜太阳能电池的转换效率不断提高, 新的世界纪录频频出现; 相应地, 组件的转换效率也不断提高。表 3 中列出的是近

几年薄膜太阳能电池和组件的年度最高效率。许多公司不仅拥有小面积电池研制的实验室, 还拥有大面积组件研发线, 表 3 内的组件效率并非一定由产业化生产线制造。

国内进行薄膜太阳能电池的课题组较多, 研究

表 3 国外几种主要薄膜太阳能电池及组件的年度最高效率

电池类型	效率	年份					
		2011	2012	2013	2014	2015	2016
硅薄膜电池	电池效率 /%	16.3 ^①	15.2 ^②	16.1 ^③	12.63 ^④	14.8 ^⑤	—
	组件效率 /%	—	—	—	—	—	12.34
铜铟镓硒电池	电池效率 /%	—	—	20.4	21.7	22.3	22.6
	组件效率 /%	—	—	—	17.5	—	17.9
碲化镉电池	电池效率 /%	17.3	18.7	20.4	21.0	22.1	—
	组件效率 /%	—	—	—	—	18.6	—
砷化镓电池	薄膜电池效率 /%	27.6	28.8	38.8	—	—	—
	薄膜组件效率 /%	—	24.1	31.0	—	—	31.2
	聚光电池效率 /%	—	—	—	46.5	—	—
	聚光组件效率 /%	—	—	—	—	43.4 ^⑥	40.6 ^⑦

注: ①为 pin 型 a-Si/a-SiGe/ μ c-Si 三结电池; ②为 pin 型 a-Si/a-SiGe/ μ c-Si 三结电池; ③为 pin 型 a-Si/a-SiGe/ μ c-Si 三结电池; ④为 pin 型 a-Si/ μ c-Si 双结电池; ⑤为 pin 型 a-Si/ μ c-Si 双结电池; ⑥所示效率的组件面积为 18.2 cm²; ⑦所示效率的组件面积为 287 cm²

工作不仅涉及所有主要的薄膜太阳能电池, 相关产业化技术的研发也得到了高度重视。近 5 年来, 各种薄膜太阳能电池和组件的转换效率不断提高, 表 4 列出了当年的高值。

表 3 和表 4 主要显示了薄膜太阳能电池及组件发展的粗线条轮廓, 表内的高效率有两个含义: 一是不涉及时间顺序, 是在 1 年内的高值; 二是

不涉及同一类电池间的细分区别, 例如, 不区分是否刚性或柔性, 不区分是单结或多结, 不区分关键技术的差别, 不区分器件(电池、组件)面积的大小, 不区分聚光电池测试光强的高低。

3.2 硅基薄膜太阳能电池研究进展

3.2.1 硅基薄膜太阳能电池研究的国际进展

由于基于“蜂巢(honeycomb)”周期性衬底

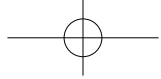


表 4 国内几种主要薄膜太阳电池及组件的年度最高效率

电池类型	效率	年份					
		2011	2012	2013	2014	2015	2016
硅薄膜电池	电池效率 /%	11.80 ^①	12.60 ^②	15.06 ^③	16.07 ^④	—	13.65 ^⑤
	组件效率 /%	—	—	9.59	—	—	—
铜钢镓硒电池	电池效率 /%	17.00	—	—	—	20.00	20.33
	组件效率 /%	12.60	—	—	—	—	12.60
碲化镉电池	电池效率 /%	—	—	—	—	16.28	17.33
	组件效率 /%	—	8.94	—	—	13.10	—
砷化镓电池	薄膜电池效率 /%	—	—	—	—	34.50	—
	薄膜组件效率 /%	—	—	31.00	—	30.15	32.00
	聚光电池效率 /%	—	—	—	—	—	—
	聚光组件效率 /%	—	—	—	—	—	—

注：①为 pin 型 a-Si/ μ c-Si 双结电池；②为 pin 型 a-Si/ μ c-Si 双结电池；③为 pin 型 a-Si/a-SiGe/ μ c-Si 三结电池；④为 pin 型 a-Si/a-SiGe/ μ c-Si 三结电池；⑤为 pin 型 a-Si/ μ c-Si 双结电池

的单结微晶硅电池效率达到了 11.8%^[38]，而且三结叠层电池的的稳定效率也高达 13.6%^[39]。因此，Asman Tamang 等^[40]进一步研究了“蜂巢”周期性衬底的陷光性能与裂纹缺陷之间的相互作用，结果发现，当表面绒面的周期与微晶硅电池的厚度相近时，陷光性能达到最佳。为了在保持良好陷光性能的同时避免裂纹缺陷的形成，绒面的高度与周期尺寸的比例应不大于 0.25。

Sourav Mandal 等^[41]在 n- μ c-Si:H 与本征 a-Si:H 层之间加入 1.0 nm 的 n-a-Si:H，明显减弱了两者之间的界面失配，这种 n- μ c-Si:H/n-a-Si:H 双层结构使得非晶硅电池在 500 nm 之后波段的 QE 响应显著提升。未采用背反射的非晶硅电池效率达到 9.46%，比单纯采用 n-a-Si:H 的电池效率提升了 14.3%。

Eric Johlin 等^[42]设计并实现了一种三维立体结构的非晶硅太阳电池，结构如图 6 所示。首先，在 n 型掺杂非晶硅上面沉积 1000 nm 的本征非晶硅；然后，在本征非晶硅上刻蚀深度为 850 nm、底部直径为 80 nm、开口直径为 150 nm 的纳米孔，再沉积 p 型非晶硅和 ZnO 电极。该类结构具有非常好的陷光效果，相比平面结构的电池，其电流密度提高了 45%，高效率达到 10.4%。

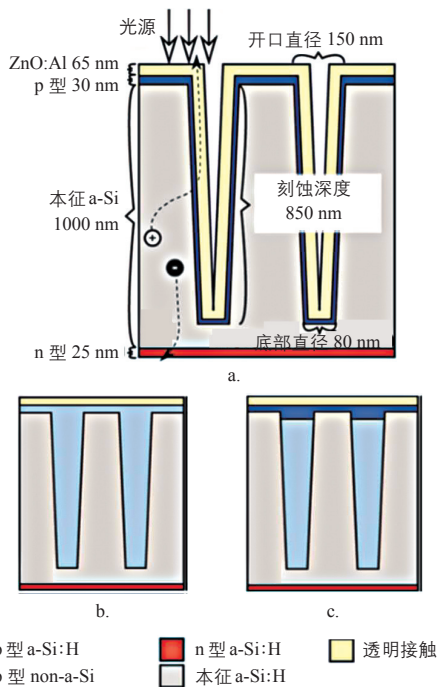


图 6 具有纳米孔结构的 a-SiL:H 太阳电池的截面结构示意图

目前在硅基薄膜太阳电池领域应用广泛的衬底包括两种：溅射后腐蚀的 ZnO:Al 和 LPCVD 制备的 ZnO:B。Etienne Moulin 等^[43]研究了两种衬底对 a-Si:H/ μ c-Si:H 叠层电池性能的影响。从光学角度来说，两种衬底对光的散射有明显的不同：溅射后腐蚀的 ZnO:Al 对短波光的散射值更高，但是对近红外光散射较小，LPCVD 制备的



ZnO:B 则正好相反,结果如图 7 所示。以这两种衬底获得的 a-Si:H/ μ c-Si:H 叠层电池性能如表 5 所示。

由于其具有更好的导电性和适于薄膜生长的表面形貌,以溅射后腐蚀的 ZnO:Al 作为衬底的

a-Si:H/ μ c-Si:H 叠层电池有更高的 V_{oc} 和 FF ,但是 ZnO:Al 的寄生吸收相对偏高,这对于底电池的电流密度不利,而且其表面形貌也限制了入射到电池表面的光耦合进入电池内部。因此,两种衬底制备 a-Si:H/ μ c-Si:H 叠层电池时需要分别优化。

表 5 以溅射后腐蚀的 ZnO:Al 和 LPCVD 制备的 ZnO:B 为衬底获得的 a-Si:H/ μ c-Si:H 叠层电池性能

覆盖物	参数	V_{oc}/V	$FF/\%$	$J_{sc(top)}/mA\cdot cm^{-2}$	$J_{sc(bot)}/mA\cdot cm^{-2}$	$J_{sc(sum)}/mA\cdot cm^{-2}$	$Eff/\%$
LPCVD ZnO:B		1.365	72.2	13.25	12.5	25.75	12.3
光照 300 h 后		1.350	67.6	12.9	12.4	25.3	11.3
溅射后腐蚀的 ZnO:Al		1.395	72.0	11.5	11.8	23.3	11.55
300 h LID 后		1.385	67.2	11.3	11.7	23.0	10.5

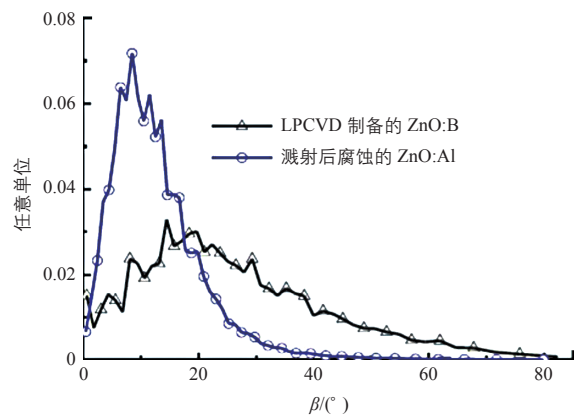


图 7 溅射后腐蚀的 ZnO:Al 和 LPCVD 制备的 ZnO:B 的光散射性能比较

3.2.2 硅基薄膜太阳能电池研究的国内进展

南开大学设计并实现了一种多孔氧化铝形成的空心六角对称蜂巢状绒面结构,陷光性能得到大幅提升,基于这种新型背反射衬底的非晶硅电池效率达到 8.3%,而普通 AZO 衬底的电池效率只有 6.7%^[44]。研究者设计了用于 a-Si:H/ μ c-Si:H 叠层电池的新型隧穿复合结,由于没有高吸收的 n- μ c-Si:H 层,新型隧穿复合结具有更低的光学吸收。另外,当 n- μ c-SiO_x:H 中间反射层厚度达到 70 nm 时,促进了后续生长的微晶硅电池 p 型窗口层的晶化率,从而使两者形成了良好的欧姆接触,有利于使电池保持较低的串联电阻。新型隧穿复合结使电池在获得了良好电学性能的前提下提高了底电池的 EQE 响应,有利于获得高效

的叠层电池。通过优化,基于 MOCVD 技术生长的 ZnO:B 衬底获得了效率为 13.65% 的 a-Si:H/ μ c-Si:H 叠层太阳电池^[45]。

3.3 铜铟镓硒薄膜太阳能电池研究进展

3.3.1 铜铟镓硒薄膜太阳能电池研究概况

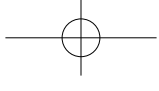
从 2014 年以来,世界电池效率纪录 6 次被打破(ZSW 20.8%, Solar Frontier 20.9%, 汉能 Solibro 21%, ZSW 21.7%, Solar Frontier 22.3%, ZSW 22.6%),从 20.8% 提高至目前的 22.6%。在电池效率世界纪录已经较高的水平上,还能在 2 年多时间获得如此进步,在铜铟镓硒发展历史上是比较少见的。此外,基于黄铜矿类化合物(Cu(In, Ga)Se₂)薄膜太阳能电池的性能得到显著改进。2013 年,瑞士的 EMPA 在聚酰亚胺上研制出 20.4% 的 CIGS 电池。

2015 年,德国的汉能 Solibro 在 30×30 cm² 组件上的电池开口效率达到 18.4%,换算为全面积组件,效率为 17.1%;若为小组件,效率达到 18.7%。2015 年,深圳先进技术研究院研发的小面积电池效率也已达 20%。

3.3.2 铜铟镓硒薄膜太阳能电池研究的国际进展

3.3.2.1 小面积铜铟镓硒薄膜太阳能电池研究进展

2016 年,铜铟镓硒太阳能电池在基础研究和产业化方面取得了较大突破。在实验室研究方面,



小面积电池效率再次被刷新, 已达 22.6%, 此纪录由德国 ZSW 实验室取得^[46]。此款新型电池的面积为 0.5 cm^2 , 使用共蒸镀法制备, 获得弗劳恩霍夫太阳能系统研究所认证。这个效率高出日本 Solar Frontier 制造的电池 0.3 个百分点, 这是 ZSW 第 5 次重新挽回世界纪录。

德国的汉能 Solibro 于 2016 年完成第 3 代柔性产品的开发和认证, 3001 cm^2 的柔性铜铟镓硒组件转换效率达到 17.96%。

与转换效率不断提高相匹配, 技术创新也取得了很好的进展。

1) 电池效率纪录能够不断被刷新的很大原因在于人们对碱金属元素的重新认识与审视。碱金属元素包括 Na、K、Rb、Cs 等。在 CIGS 发展历史上, Na 元素对 CIGS 性能的有利影响和作用机理被认为是具有里程碑意义的发现。虽然针对 Na 元素的作用机理仍存争议, 但是适当含量的 Na 元素掺杂的有利影响已经被广泛认可。在过去很长一段时间内, 关于碱金属对 CIGS 性能影响的研究主要集中于 Na, 对于其他碱金属元素的研究较少。新的研究成果表明, K、Rb、Cs 等碱金属元素在 CIGS 电池中也能够起到提高电池性能的作用, 现在高效率电池 (22.6%) 中就有 Rb 元素的掺杂。碱金属的掺杂方式大多采用在吸收层上进行氟化物蒸发沉积的方式。研究表明, 如果掺杂多种碱金属, 其浓度在膜内深度方向的分布将出现变化, 原子质量较大的碱金属元素将会部分替代原子质量较小的碱金属原子, 例如在原本含有 Na 和 K 的吸收层中掺杂 Cs 后, Na 和 K 的浓度会普遍降低, Cs 浓度会升高。这种离子互换机制对于电池内复合、缺陷的作用可能有较大的影响。

2) 溶液法制备铜铟镓硒吸收层。目前无论是在实验室研究还是在商业化生产方面, 真空方法都是制备铜铟镓硒吸收层的主流方法。真空方法有利于获得单一黄铜矿相、高结晶质量及电学性能良好的吸收层, 从而取得高效率电池及组件。溶液法因其设备相对简单, 在减少吸收层制备成

本方面有潜在优势。2016 年, 采用肼溶液法获得了 17.3% 的认证电池效率^[47], 相比之前高溶液法取得的 15.2% 的电池效率, 有了大幅提高。

3) 宽禁带铜铟镓硒材料的开发及电池制备。目前高效率的铜铟镓硒电池的禁带宽度大约为 $1.15 \sim 1.20\text{ eV}$, 相比理想禁带宽度 $1.40 \sim 1.50\text{ eV}$ 仍有不足。更高禁带宽度的吸收层材料可能带来更高浓度的体缺陷, 还可能造成与缓冲层 CdS 能带结构不匹配的问题, 因此, 宽禁带材料研发长期停滞。2016 年, Solar Frontier 利用铜铟镓硫 (禁带宽度可达 1.50 eV) 制备获得了 15.5% 的电池效率新纪录^[48], 比之前 14.0% 的世界纪录有了大幅提高。实验将缓冲层材料从 CdS 替代为 ZnMgO, 解决了缓冲层与吸收层能带不匹配的问题。

4) 无镉环保缓冲层研究及电池制备。通常为获得高效率电池, 在铜铟镓硒太阳能电池制备中采用 CdS 作为缓冲层。虽然 Cd 以化合物形式存在, 对环境的污染风险较小, 但是对环境的潜在破坏仍然促使人们不断对无 Cd 缓冲层进行研究。德国 ZSW 实验室采用了 Zn(O,S) 缓冲层替代 CdS^[49], 研究中发现, 采用硫代乙酰胺替代硫脲作为 Zn(O,S) 水浴沉积的硫源, 可极大提高 Zn(O,S) 的沉积速率; 为获得 25 nm 厚度的 Zn(O,S), 沉积时间可由 25 min 缩短为 4 min 。研究中还将窗口层材料 i-ZnO 替换为 ZnMgO, 获得了 21.0% 的电池效率。

5) 超薄吸收层电池制备。从理论上讲, $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 的铜铟镓硒吸收层便能吸收利用太阳光谱的大部分光子, 但是高效率铜铟镓硒电池所使用吸收层厚度约为 $1.5 \sim 2.5\text{ }\mu\text{m}$, 这一情况的主要原因在于降低吸收层厚度将会增加吸收层与背电极 Mo 的界面复合。德国卡尔斯鲁厄理工学院在吸收层与背电极 Mo 之间制备了一层厚度约为 $50 \sim 100\text{ }\mu\text{m}$ 的 Al_2O_3 或 MgF_2 薄膜, 能够极大降低界面复合, 在 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 吸收层厚度的情况下, 可取得 9.9% 的电池效率^[50]。如果电池效率能够进一



步突破,有望在未来电池制备中降低吸收层材料使用,减少吸收层材料成本,缩短吸收层工艺制备时间。

3.3.2.2 铜铟镓硒薄膜光伏组件技术进展

在产业化研究方面,商业化生产组件效率获得进一步突破,德国 CIGS 开发商 Avancis(目前已被中建材收购)在 30 cm×30 cm 的基底上开发出效率为 17.9% 的光伏组件,刷新了之前 16.6% 的纪录^[51]。

3.3.3 铜铟镓硒薄膜太阳电池研究的国内进展

2016 年,国内多个研究单位在铜铟镓硒薄膜太阳电池的研究中取得了进展。

3.3.3.1 四方创能光电技术有限公司与清华大学合作研究的进展

1) 小面积 CIGS 太阳电池的研制。

① 钠钙玻璃基底上的 CIGS 电池,效率为 20.33%,有效面积为 0.4 cm²,由中国科学院太阳能光伏发电系统和风力发电系统质量检测中心于 2016 年 11 月 24 日测试。

该电池制备工艺: CIGS 四元靶材溅射加后热处理,利用不同 Ga 含量的四元靶材进行依次溅射,在预制膜中形成 Ga 含量的梯度,在含 H₂Se 气体的气氛下进行高温退火处理,使吸收层最终形成 U 形带隙分布。

② 柔性不锈钢基底上的 CIGS 电池,效率为

19.24%,有效面积为 0.4 cm²,由中国科学院太阳能光伏发电系统和风力发电系统质量检测中心于 2016 年 11 月 24 日测试。

该电池制备工艺: CIGS 四元靶材溅射加后热处理,在含阻挡层的不锈钢衬底上沉积 CIGS,利用不同 Ga 含量的四元靶材进行依次溅射,在预制膜中形成 Ga 含量的梯度,在含 H₂Se 气体的气氛下进行高温退火处理,使吸收层最终形成 U 形带隙分布。

2) CIGS 组件产业化开发: 尺寸为 1245 mm×635 mm 的 CIGS 模组电池的效率高达 12.6%。

该电池制备工艺: 在 1245 mm×635 mm 的玻璃基板上沉积 CIGS,同样利用吸收层梯度带隙方式制备预制膜,退火后形成 Ga 含量的 U 形分布来制备电池。模组采用全激光刻划技术进行内联,可将死区宽度控制在 200 μm 以内。

主要的技术路径: 采用不同 Ga 含量的四元靶材,通过磁控溅射工艺在预制膜中构建 Ga 含量的梯度分布,在含硒气氛下对预制膜进行退火,从而在 CIGS 吸收层中形成 U 形分布的带隙梯度。

3.3.3.2 汉能各下属公司的进展

汉能各下属公司在 2016 年取得的进展,如表 6 所示。

表 6 截至 2016 年汉能各下属公司在 CIGS 太阳电池所取得的效率进展

公司名称 类型	Solibro	MiaSolé	Global Solar Energy
小电池效率	21.1%, 1.0 cm ²	19.4%, 1.0 cm ²	18.74%, 1.0 cm ²
sub-module	18.6%, 900 cm ²	17.96%, 3001 cm ²	16.2%, 963.5 cm ²
组件效率	—	—	15.6%, 7870 cm ²

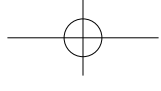
注: 表中所有数据皆为制造单位测试

汉能各子公司在膜层制备、电池互联、封装性能测试、产品户外性能等方面进行了深入的研究工作。具体研究内容如下:

1) 膜层制备。

① Na 掺杂与 K 掺杂技术: 采用 Soda lime

玻璃衬底, Na 离子可以由玻璃衬底通过 Mo 扩散至 CIGS 吸收层。在无 Na 衬底上,如金属、塑料衬底,Na 可以在 CIGS 沉积之前、沉积过程中或沉积之后加入。采用 KF 后沉积 (Post-deposition Treatment, PDT) 可进一步将电池效



率提升至 20.8%。在塑料衬底上, 通过 NaF 和 KF 的后掺杂, 可达到的电池效率为 20.4%^[52]。Solibro 采用 KF 后掺杂技术, 对设备进行升级改造, 在现有产线中实现 KF 后掺杂, 运行结果表明, 可使效率提高约 1%。

② Ga/(In+Ga) 梯度分布: 在 CIGS 膜层制备过程中, 实现 Ga/(In+Ga) 的梯度分布, 可以有效提高器件效率。MiaSolé 的研究人员研究了 PVD 制备 CIGS 薄膜的工艺过程中 Ga/(In+Ga) 的梯度变化, 并分析了温度、硒化、Na 组分等生长条件对 Ga/(In+Ga) 的影响, 研究了 Ga/(In+Ga) 梯度分布对太阳能电池性能的影响^[53]。

2) 新型封装方式: 汉能 GSE 开发了独特的 ICI 封装技术, 如图 8 所示。该技术首先利用光刻技术制备电极, 再用激光焊接方式将前后电极连接起来, 达到减少串联电阻、提升组件转换效率的目的。封装材料包括前板复合膜、EVA 及背板复合膜 (见图 9)。ICI 封装技术不仅可以降低成本、提高转换效率, 还能够降低工艺复杂度、提高组件可靠性。

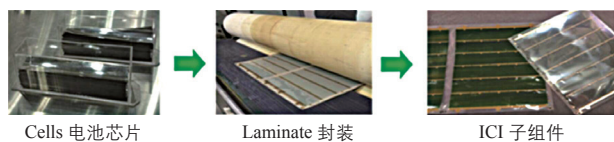


图 8 GSE ICI 组件

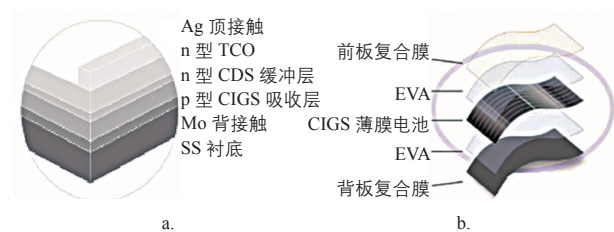


图 9 GSE CIGS 电池结构及柔性组件示意图

3) 测试方法: MiaSolé 的研究人员应用巴西圆盘测试技术 (Brazilian disc test) 测试了冷喷涂 CIG 沉积靶材的机械性能, 如强度、刚度等。该测试方法的主要优势在于其可对 CIG 靶材终产品中的形式进行测试^[54]。

4) 封装材料及户外性能: 除了转换效率, 对

光伏组件在实际使用过程中可产生的能量, 以及其实际使用寿命的研究也具有重要意义。

Solibro 研究了湿气应力在实际应用过程中与加速老化测试中的关系。研究发现, 在非热带区域, IEC 标准的 DH 1000 h 测试是一种有效的测试手段。在热带区域, 实际 25 年的应用, 所承受的湿度荷载比 DH 1000 h 的测试更恶劣, 因此研究认为, 需要延长测试时间。此外, 安装方式对环境应力的作用也有一定的影响^[55]。

MiaSolé 的研究人员分别研究了刚性组件及柔性组件的水汽入侵情况, 并在预测刚性组件边缘封装胶性能方面, 提出了一种新的低成本测试方法, 该理论模型经实验验证是有效的。同时在预测柔性组件的寿命方面, 研究人员提出了一种基于测试 TCO 电阻的测试方法, 并提出了一种基于水汽进入的寿命预测方法的经验模型^[56-58]。

MiaSolé 的研究人员进行了户外性能测试, 在美国 4 个地点进行了相关的性能测试工作, 分别为沙漠——Arizona、地中海气候——California、大陆性气候——Ohio、热带气候——Florida, 从 3 年的测试结果来看, 所有的 MiaSolé 产品仅有较小的衰减^[59-61]。

5) 推广应用方面: 2016 年 8 月, 山东邹城工业园区 3 MW 薄膜太阳能项目完成并网发电, 总面积超过 3 万 m²。该项目中应用的铜铟镓硒薄膜光伏组件, 由德国 Solibro GmbH 使用汉能 Solibro 技术制造。该项目预计全年可发电 400 万 kWh 以上, 创造收益 400 多万元。该项目也是目前全国单体规模最大的铜铟镓硒 (CIGS) 薄膜太阳能电站。

除此之外, 在国内, 汉能 Solibro 的薄膜光伏组件广泛应用于如安徽首府别墅、四川科技馆、河南王举包装有限公司厂房等户用和工商业屋顶; 在国外, 德国哈勒 ERDGAS 体育场屋顶项目、德国阿摩尔兰德地面电站、沙肯特哈尔工商业屋顶项目、法国贝恩布列塔尼户用项目等也得到客户好评。凭借转换效率高、高温及弱光条件下表



现优异、外形美观、安装便捷、易于维护等突出优势,汉能 Solibro 的薄膜光伏组件越来越受到市场青睐。

3.3.3.3 中国建材下属公司 Avancis 取得的进展

2015 年 9 月,中建材凯胜科技集团公司 1.5 GW 铜铟镓硒薄膜太阳能电池项目在安徽蚌埠开工建设,项目总投资达 100 亿元,将建成 10 条生产线,形成 1.5 GW 以上的生产能力。其中,一期投资 25 亿元,建设 2 条 150 MW 的太阳能电池生产线。2016 年 5 月,Avancis 以 17.9% 的效率刷新了封装 CIGS 薄膜组件的世界纪录。该转换效率是在尺寸为 $30 \times 30 \text{ cm}^2$ 、孔径面积为 622 cm^2 的无镉 CIGS 组件上取得的,得到了弗劳恩霍夫太阳能系统研究所的权威认证。

3.3.4 铜铟镓硒薄膜太阳能电池发展趋势展望

1) 近几年内,铟镓硒薄膜电池的转换效率可能达到 25%。从长期发展来看,以 CIGS 作为底电池,与合适的宽带隙吸收层材料结合形成叠层电池,可使太阳能电池效率超过 30%。

2) 在产业化方面,随着有实力的大型企业加大投入,带动我国核心装备的自主研发和设计制造,可望逐步形成 GW 级的产业规模。

3) 从各企业及研究机构的数据来看,CIGS 电池的组件量产效率与研发效率之间有一定差距,缩短量产效率与研发效率的差距,将是未来的一个重要发展方向。在产业化过程中,应解决量产中的技术难题包括:薄膜大面积均匀沉积、电池互联中效率损失、产品良率、柔性衬底上划线和封装等。

4) 成本持续下降的主要动因在于:组件效率由 14% 提升到 18%;规模效应带动的材料成本(BOM)下降,研发带动的成本下降(超薄吸收层,利用较低纯度的原材料);设备投资的下降;下一代设备带动的生产能力的改善(产能、良率及设备稼动率);生产能耗的降低。综合所有成本下降的因素,在 GW 级规模下,铜铟镓硒生产成本会实现 25%~40% 的降低。

3.4 碲化镉薄膜太阳能电池研究进展

3.4.1 碲化镉薄膜太阳能电池发展概况

近几年,美国第一太阳能(FS)以每年研发费用规模达到 1.3 亿~1.4 亿美元的巨大投入,大幅促进了 CdTe 薄膜太阳能电池技术的发展。实验室电池效率自 2011 年打破 NREL 保持长达 10 年之久的 16.7% 的纪录后,在短短 5 年中陆续取得了 9 次突破,并于 2015 年 11 月创造了 22.1% 的电池效率^[62]。这些突破主要得益于短路电流密度(J_{sc})的改进。

与之相比,近几年显现出的技术瓶颈,即开路电压(V_{oc})的改进甚为缓慢的问题已受到了高度重视。在美国政府的支持下,以 NREL 为首的一个联合研究组在 2015 年制备出 V_{oc} 为 1 V 以上的单晶 CdTe 电池^[63]。2016 年,美国 Arizona State University(ASU)也报道了在分子束外延沉积的单晶薄膜 CdTe 电池上,实现了 V_{oc} 大于 1 V^[64]。ASU 的 Zhang Yong hang 团队采用 MBE 外延沉积的 n 型 CdTe 与 p 型氢化非晶硅碳薄膜(a-SiC_y:H)的异质结结构(见图 10),成功获得了达 20.3% 的转换效率,测得的 V_{oc} 已达 1.12 V。这种电池的 a-SiC_y:H 窗口层厚度仅 15 nm, CdTe 单晶薄膜的厚度为 1000~1500 nm,采用的结构为“p-a:SiC_y:H/i-MgCdTe/n-CdTe/n-MgCdTe/n-CdTe/n-InSb 衬底”。该电池在 n-CdTe 吸收层的两面均采用了 MgCdTe 钝化层,将 CdTe 吸收层的载流子寿命提高到了 3.6 μs,超过了现有单晶 GaAs 薄膜的水平,如表 7 所示。

ASU 以独立于 NREL 的技术路线再一次表明,CdTe 作为高效率光伏转换材料,其本身没有根本性限制。不同研究单位连续 2 年分别在 CdTe 单晶片和单晶薄膜上取得的高开路电压电池的结果足以说明,适当提高 CdTe 吸收层的有效掺杂浓度($10^{16} \sim 10^{17}/\text{cm}^3$)和采用宽带隙 II-VI 钝化层限制表面复合速率,是提高转换效率的有效技术手段。从上述数据还可以看到,CdTe 电池在 V_{oc} 方面仍具有较大的提升空间,因此,

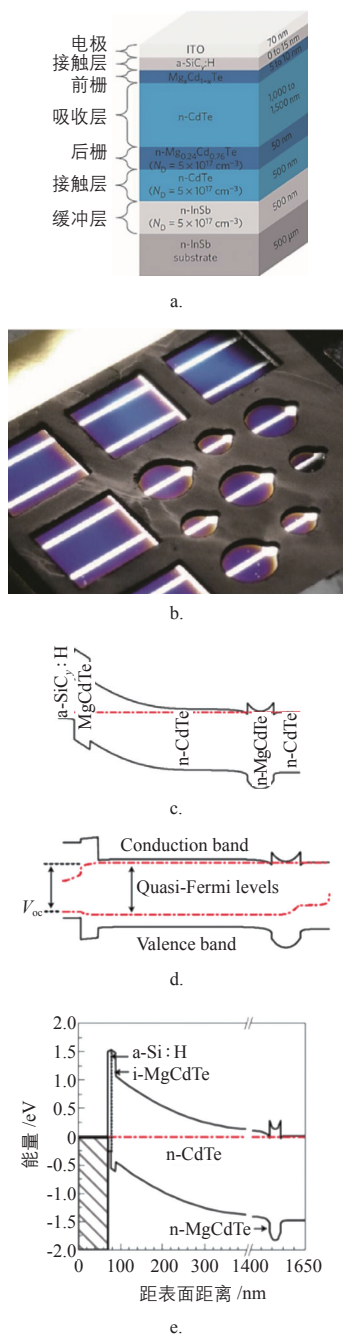
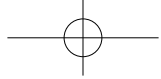


图 10 ASU 研制的碲化镉薄膜太阳能电池的结构示意图及能带图

CdTe 电池效率仍可继续提高。这将成为多晶 CdTe 薄膜电池进一步提升效率的一个重要方向。

在产业化方面，美国第一太阳能在 2015 年已制备出开口面积为 7038.8 cm^2 、效率为 18.6% 的 CdTe 组件。随着生产线的技术进步，特别是组件效率的大幅度提高，美国第一太阳能组件直接生产成本已低于 0.4 美元，使 CdTe 组件更具市场竞争力。

国内有近 10 所大学、研究所和企业从事 CdTe 薄膜太阳电池的研究。目前已发表制备较高效率电池的实验室有：四川大学、中国科技大学、中科院电工所、龙焱能源科技。近几年，国内的大学和研究机构正在加紧 CdTe 薄膜太阳电池的研究，尤其是在电池内部的缺陷、薄膜沉积的生长动力学、蒸汽输运法沉积薄膜的机理、晶界钝化及提高薄膜的少子寿命等基础研究方面，获得了一些新知识，并取得了一些新进展^[65-68]。

企业方面，龙焱能源科技一方面努力提高小面积电池效率，另一方面则更多致力于大面积组件的研制；中建材已收购了德国的 CTF 公司，进行小面积碲化镉薄膜太阳电池的研制和产业化技术开发，并将该公司的技术转移到国内，于成都进行碲化镉薄膜太阳电池生产线的建设。

3.4.2 碲化镉薄膜太阳电池研究的国际进展

1) 小面积 CdTe 电池研制：2016 年 2 月，First Solar 在其官方网站上宣布，其小面积碲化镉薄膜太阳电池的效率提高到了 22.1%^[69]。

2) CdTe 组件产业化开发：First Solar 的 CdTe 组件（面积为 $1200 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ ）平均效率已达到了 16.7%。

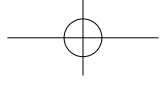
3.4.3 碲化镉薄膜太阳电池研究的国内进展

3.4.3.1 小面积 CdTe 电池研制

四川大学在 2016 年 6 月研制出了效率

表 7 几种典型太阳电池材料的电子学参数与已实现的最高开路电压

材料	E_g/eV	SRH 寿命	n- 型掺杂	p- 型掺杂	$\eta_{\text{ext}}/\%$	Record V_{oc}/V	$E_{g/q}-V_{\text{oc}}/\text{V}$
Si	1.12	$> 1 \text{ ms}$	✓	✓	~ 1	0.750	0.37
GaAs	1.424	$> 1 \mu\text{s}$	✓	✓	> 20	1.12	0.30
poly-CdTe	1.45	$\sim 100 \text{ ns}$	—	low	~ 0.01	0.9	0.55
mono-CdTe	1.5	$> 3.6 \mu\text{s}$	✓	—	3.1	1.12	0.38



为 16.73% 的碲化镉薄膜太阳电池, 面积为 0.5 cm^2 , 碲化镉层用蒸汽输运法沉积, 由成都国家光伏产品质量监督检验中心于 2016 年 7 月 15 日检测^[70]。该电池具体的参数为: V_{oc} 为 829 mV, J_{sc} 为 26.87 mA/cm^2 , FF 为 75.14%。

龙焱能源科技在 2016 年 11 月研制出了面积为 0.554 cm^2 、效率达 17.33% 的碲化镉薄膜太阳电池, 由美国 NREL 于 2017 年 1 月测量。该电池具体的参数为: V_{oc} 为 853.7 mV, J_{sc} 为 26.8 mA/cm^2 , FF 为 75.5%。

成都中国建材光电材料有限公司的碲化镉技术团队在德国德累斯顿的实验室研制的碲化镉薄膜太阳电池, 于 2016 年 5 月上旬, 在其自己的实验室经 $75\text{ }^\circ\text{C}$ 光炼老化 48 h 后进行测试, 获得了 17.81% 的转换效率。该电池具体的性能参数为: J_{sc} 为 27 mA/cm^2 , V_{oc} 为 850 mV, FF 为 77.7%, 面积为 1 cm^2 。

该电池采用的制备技术为典型的碲化镉电池制备技术: 1) 标准 TEC15 导电玻璃; 2) CSS 沉积 CdS/CdTe; 3) $400\text{ }^\circ\text{C}$ 氯化镉退火; 4) 化学清洗表面; 5) Cu 型背接触; 6) Mo 基背电极; 7) 背接触退火。

迄今, 国内各单位取得的效率提高主要是来自于 J_{sc} 的改进, 主要的技术手段是采用了新型缓冲层和窗口层材料。目前, 国内对提高 CdTe 电池 V_{oc} 的研究, 重视和投入程度远远不够; 碲化镉电池的填充因子也有较大的提升空间。

3.4.3.2 CdTe 组件产业化开发

龙焱能源科技自主开发的碲化镉薄膜光伏组件生产线, 在 2015 年组建效率达到 13.1%(光阑面积效率, 由中国计量科学院检测); 在 2016 年通过对设备、工艺和管理的继续优化, 已实现连续生产 9 天 9 夜稳定量产的目标, 生产线实际生产能力已超过 20 MW/年 (其中 90% 的生产设备已具备实际生产能力超过 30 MW/年); 经自己生产线检测, 0.72 m^2 组件的平均效率达到 13%, 高组件效率超过 13.5%。图 11 为 2016 年

的一次生产中, 该生产线连续生产 2298 片组件, 优品率达到 99.7%, 平均组件效率达 13.0%。

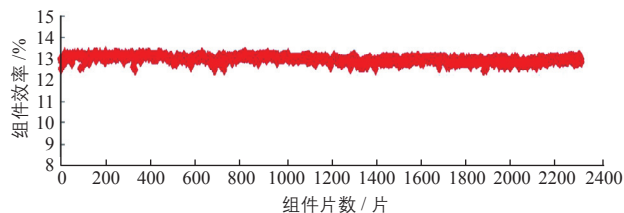


图 11 连续生产 2298 片组件的效率分布图

目前, 龙焱能源科技的组件直接生产成本已降至 2 元/W, 其标准碲化镉薄膜光伏组件与多类定制的碲化镉薄膜光伏 BIPV 组件已用于全国 30 个省市和出口到全世界 37 个国家和地区。2015 年成立的龙瑞新能源工程公司(中外合资), 在 2016 年完成了绍兴金盾 4 MW 分布式碲化镉薄膜光伏电站等多个项目的建设, 年总装机容量超过 16 MW。图 12 展示了宁波兴港货柜 MW 级分布式碲化镉薄膜光伏电站, 已并网发电, 运行良好。



图 12 宁波兴港货柜 MW 级分布式碲化镉薄膜光伏电站

龙焱能源科技致力于大力开发新产品, 扩大 CdTe 薄膜电池的应用, 特别是应用于建筑光伏一体化(BIPV)、农业光伏和汽车光伏方面。在“建筑光伏”和“农业光伏”的光伏应用中, 透光组件是一个重要的产品。CdTe 电池具备温度系数低、弱光效应好、热斑效应小、发电能力高、可在垂直和水平方向应用、双玻封装、无 PID、可做成多种彩色、可制备各种图案、可做成异形组件、透光率可随客户要求定制、光影小、外观均匀美观、色差小、效率高、性价比高等优点。图 13、图 14 分别展示了该公司碲化镉薄膜透光组件在“建筑光伏”和“农业光伏”中的实际应用。

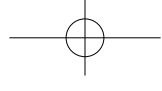


图 13 国家大剧院舞美中心艺术交流楼
(超大 CdTe 薄膜透光组件的应用)



图 14 苏州捷力惠 3000 m² 光伏农业大棚

3.4.4 碲化镉薄膜太阳能电池发展趋势展望

小面积太阳能电池的研制一直引领着组件技术的发展。如何提高小面积碲化镉太阳能电池的效率，是一个需要时刻思考的问题。在 2011~2015 年间，提高碲化镉太阳能电池的短波响应，从而提高短路电流，取得了很大的成效；但在 2014~2016 年出现了一个转折，即提高载流子寿命，进而提高开路电压，取得了令人瞩目的进展；而在引入 p 型氢化非晶硅碳薄膜后，提高开路电压外的另一个非常可喜的进展是，CdTe 吸收层的厚度大幅减小。

目前已经取得的碲化镉薄膜太阳能电池的最佳参数如下： V_{oc} 为 1.12 V， J_{sc} 为 31.69 mA/cm²， FF 为 80%。如果一个电池能兼有这些参数，其转换效率将超过 28%，这应是碲化镉薄膜太阳能电池近几年追求的目标。在国内，一些研究机构加强了对碲化镉太阳能电池的基础研究，都将转换效率达到 20% 作为 2020 年前的目标。

组件制造技术也将在如下几个方面取得进展：1) 将单晶 CdTe 的高开路电压技术移植到多晶 CdTe 薄膜电池中，以提高转换效率和减少碲化镉的使用量；2) 扩大组件面积，使组件的技

术指标达到同面积单晶硅组件的平均水平。美国 First Solar 的具体方案是：全面积 2.16 m²(1.2×1.8 m²，是目前组件面积的 3 倍)，同时组件效率大于 19%，组件输出功率为 400 W，成本则可降低到 0.25 美元/W。在国内，在大力开发组件制造技术的同时，生产线的数量、产能都将有成倍的增长。(待续)

参考文献

- [38] Sai H, Maejima K, Matsui T, et al. High-efficiency microcrystalline silicon solar cells on honeycomb textured substrates grown with high-rate VHF plasma-enhanced chemical vapor deposition[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2015, 54(8): 1 – 6.
- [39] Sai H, Matsui T, Koida T, et al. Triple-junction thin-film silicon solar cell fabricated on periodically textured substrate with a stabilized efficiency of 13.6%[J]. Applied Physics Letters, 2015, (106): 1 – 4.
- [40] Asman Tamang, Hitoshi Sai, Vladislav Jovanov, et al. On the interplay of interface morphology and microstructure of high-efficiency microcrystalline silicon solar cells[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2016, (151): 81 – 88.
- [41] Sourav Mandal, Sukanta Dhar, Gourab Das, et al. Development of optimized n- μ c-Si:H/n-a-Si:H bilayer and its application for improving the performance of single junction a-Si solar cells[J]. Solar Energy, 2016, (124): 278 – 286.
- [42] Eric Johlin, Ahmed Al-Obeidi, Gizem Nogay, et al. Nanohole Structuring for Improved Performance of Hydrogenated Amorphous Silicon Photovoltaics[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, (8): 15169 – 15176.
- [43] Etienne Moulin, Karsten Bittkau, Michael Ghosh, et al. Comparison of LPCVD and sputter-etched ZnO layers applied as front electrodes in tandem thin-film silicon solar cells[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2016, (145): 185-192.
- [44] Huanjing Liu, Qian Huang, Guofu Hou, et al. Cost-effective hollow honeycomb textured back reflector for flexible thin film solar cells[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2016, (155): 128 – 133.
- [45] Jia Fang, Lisha Bai, Tiantian Li, et al. High-efficiency micromorph solar cell with light management in tunnel recombination junction[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2016, (155): 469 – 473.
- [46] Philip Jackson, Roland Wuerz, Dimitrios Hariskos, et al. Effects of heavy alkali elements in Cu(In,Ga)Se₂ solar cells with efficiencies up to 22.6%[J]. Physica Status Solidi-Rapid Research Letters, 2016, (10): 583 – 586.
- [47] Ting Zhang, Yixing Yang, Deang Liu, et al. High efficiency solution-processed thin-film Cu(In,Ga)(Se,S)₂ solar cells[J]. Energy & Environmental Science, 2016, (9): 3674 – 3681.
- [48] Homare Hiroi, Yasuaki Iwata, Shunsuke Adachi, et al. New World-Record Efficiency for Pure-Sulfide Cu(In,Ga)S₂ Thin-Film Solar Cell With Cd-Free Buffer Layer via KCN-Free Process[J]. IEEE Journal Of Photovoltaics, 2016, (6): 760 – 763.

- [49] Dimitrios Hariskos, Philip Jackson, Wolfram Hempel, et al. Method for a High-Rate Solution Deposition of Zn(O,S) Buffer Layer for High-Efficiency Cu(In,Ga)Se₂-Based Solar Cells[J]. IEEE Journal Of Photovoltaics, 2016, (6): 1321 – 1326.
- [50] Pascal Casper, Ruben Huenig, Guillaume Gomard, et al. Optoelectrical improvement of ultra-thin Cu(In,Ga)Se₂ Solar cells through microstructured MgF₂ and Al₂O₃ back contact passivation layer[J]. Physica Status Solidi-Rapid Research Letters, 2016, (10): 376 – 380.
- [51] Module with record efficiency from AVANCIS: Fraunhofer ISE certifies CIGS solar module with an efficiency of 17.9%[J]. <http://www.avancis.de/en/press/news/article/avancis-erzielt-erneuten-wirkungsgradrekord-fraunhofer-ise-zertifiziert-cigs-solarmodul-mit-wirkung/>, 2017-05-01.
- [52] Laemmle A, Wuerz R, Powalla M. Investigation of the effect of potassium on Cu(In,Ga)Se₂ layers and solar cells[J]. Thin Solid Films, 2015, 27 – 30.
- [53] Neil Mackie, Robert Tas, Tim Suen, et al. Control of Ga/In Grading in CIGS from an All PVD Roll to Cell Process[Z]. 2015.
- [54] David Näsval, Ralf Hunger, Peter Neretnieks, et al. Requirements on accelerated testing to ensure 25 years without moisture ingress problems[R]. NREL PVMRW, 2015.
- [55] Kedar Hardikar. Establishing long-term moisture barrier performance from accelerated testing[J]. Polymers in Photovoltaics, 2015.
- [56] Kedar Hardikar, Todd Krajewski, Kris Toivola. On prediction of moisture induced degradation in the field for flexible PV modules[R]. NIST Workshop, 2015.
- [57] Kedar Hardikar, Todd Krajewski, Kris Toivola. Predicting moisture-induced degradation of flexible PV modules in the field[J]. Photovoltaics International, 2015.
- [58] Kristopher Toivola, Paul Robusto, Bill Kessler. Long Term Performance of CIGS Modules in Multiple Environments[R]. 2015.
- [59] Dmitry Poplavskyy, Neil Mackie, Atiye Bayman. Industry Perspective[R]. MiaSole 4th DOE SunShot Thin-Film PV Workshop, 2015.
- [60] Atiye Bayman. Advances in CIGS Thin Film PV Technology at MiaSolé Hi-Tech[A]. Solar TR3[C]. Ankara, Turkey, 2015.
- [61] Geordie Zapalac, Jeff Bailey, David Spaulding, et al. Photoemission and Kelvin probe measurements at atmospheric pressure of Cu(In,Ga)Se₂ surfaces[Z]. 2015.
- [62] Martin A. Green¹, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, et al. Solar cell efficiency tables (version 49) [J]. Progress in Photovoltaics Research and Applications, 2017, (25): 3 – 13.
- [63] Burst J M, Duenow J N, Albin D S, et al. CdTe solar cells with open-circuit voltage breaking the 1 V barrier, [J]. Nature Energy, 2016, 1(2): 16015.
- [64] Yuan Zhao, M B, Shi Liu, et al. Monocrystalline CdTe solar cells with open-circuit voltage over 1 V and efficiency of 17%[J]. Nature Energy Article number, 2016, 16067.
- [65] 曹胜, 武莉莉, 冯良桓, 等. 衬底温度对碲化镉薄膜性质及太阳能电池性能的影响 [J]. 无机材料学报, 2016, 31(2): 141 – 147.
- [66] Xu H, Zeng G G, Feng L H, et al. Application of Lithium Chloride Dopant in Fabrication of CdTe Solar Cells[J]. Journal of Electronic Materials, 2016, (11): 1 – 8.
- [67] Xu H, Liu C, Wu L, et al. Effects of Ar and He atmosphere on CdTe thin film deposition and CdTe solar cell performance[J]. Chalcogenide Letters, 2016, 13(9): 403 – 415.
- [68] Ren A, Liu C, Zhang J Q, et al. Characterization and Annealing of CdTe Thin Film Prepared by Vapor Transport Deposition[J]. Chalcogenide Letters, 2015, 12(11): 555 – 567.
- [69] First solar[EB/OL]. <http://investor.firstsolar.com/releasedetail.cfm?releaseid=956479>, 2017-05-01.
- [70] 武莉莉, 张静全, 曹胜, 等. 高效碲化镉薄膜太阳能电池的研究 [A]. 第十六届中国光伏大会暨展览会 [C]. 天津, 2016-10. 太阳能

(接第39页)

- 术要求及制造工艺探讨 [J]. 超硬材料工程, 2008, 20(6): 12 – 16.
- [8] 李万河. 金刚石内圆刀片及其使用 [J]. 电子工业专用设备, 1997, 26, (3): 32 – 34.
- [9] 邱明波, 黄因慧, 刘志东. 太阳能硅片制造方法研究现状 [J]. 机械科学与技术, 2008, 27, (8): 1117 – 1020.
- [10] Chiba Y, Tani Y, Enomoto T, et al. Development of a high-speed manufacturing method for electroplated diamond wire tools[J]. Annals of the CIRP, 2003, 52, (1): 281 – 284.
- [11] Jutta T. International technology roadmap for Photovoltaic[R]. Germany, 2017.
- [12] Jun S, Hiroshi H, Akira M, et al. Development of fixe-abrasive-grain wire saw with less cutting loss[J]. SEI Technical Review, 2004, (7): 8 – 11.
- [13] Enomoto T, Shimazaki Y, Tani Y, et al. Development of a resinoid diamond wire containing metal powder for slicing a silicon ingot[J]. Annals of the CIRP, 1999, 48, (1): 273 – 276.
- [14] Peng W Y, Liao Y S. Study of electrical discharge machining technology for slicing silicon ingots[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140, (1-3): 274 – 279.
- [15] Wang W, Liu Z X, Zhang W, et al. Abrasive electrochemical multi-wire slicing of solar silicon ingots into wafers[J]. Annals of the CIRP, 2011, 60, (1): 255 – 258.
- [16] Takino H, Ichinohe T, Tanimoto K, et al. Contouring of polished single-crystal silicon plates by wire electrical discharge machining[J]. Precision Engineering, 2007, 31(4): 358 – 363
- [17] Balan A S S, Giridharan A. A progress review in wire electrical discharge machining process[J]. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, 2017, 14(2): 4097 – 4124.
- [18] Wu Shih-jeh. A hybrid method of ultrafast laser dicing and high density plasma etching with water soluble mask for thin silicon wafer cutting[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2018, (74): 64 – 73.
- [19] Fornaroli C, Holtkamp J, Gillner A. Dicing of thin Si wafers with a picosecond laser ablation process [J]. Physics Procedia, 2013, (41): 603 – 609.
- [20] Toftness R F, Boyle A, Gillen D. Laser technology for wafer dicing and microvia drilling for next generation wafer[J]. Proceedings of SPIE, 2005, (5713): 54 – 66. 太阳能