

几种产业化太阳能电池板的户外实际发电性能比较

崔 骏 李胜章 李 霖 贺 凡 杨世航 陈旺寿 刘 壮 张擻秋

(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

摘 要 随着传统化石能源的日益消耗, 各种可再生能源技术备受关注, 其中, 可直接将太阳能转换为电能的太阳能电池技术已成为新能源领域的主要研究方向之一。文章介绍了一种可连续测量多个太阳能电池板户外发电性能的测试设备, 实际测量了目前市场上主流的太阳能电池板在不同天气条件下的发电性能, 包括多晶硅、单晶硅、非晶硅、铜铟镓硒等电池, 比较了单位面积和单位标称发电功率的实际发电性能, 并对各种电池实际发电性能和特点进行了总结分析。

关键词 能源; 太阳能电池; 户外天气; 发电性能

中图分类号 TM 615 **文献标志码** A

Performance Comparison of Mainstream Commercial Solar Panels

CUI Jun LI Shengzhang LI Lin HE Fan YANG Shihang CHEN Wangshou

LIU Zhuang ZHANG Xieqiu

(Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

Abstract With the increasing consumption of traditional fossil energy, progress on the renewable energy attracts more and more attentions. Solar cells that convert the solar energy into electric energy, has been one of most important technology in the renewable energy domain. In this paper, an instrument which can continuously measure the electricity generation of several solar panels is developed and tested. Under different weather conditions, performance of several mainstream solar cells that available in the market was compared. The generated electricity by different solar panels was normalized to the area and nominal power. Based on the experimental results, performance and characteristic of different solar cells at different outdoor conditions are provided and analyzed.

Keywords energy; solar cell; outdoor weather; electricity generation

收稿日期: 2016-08-25 修回日期: 2016-10-27

作者简介: 崔骏, 助理工程师, 研究方向为铜铟镓硒太阳能电池缓冲层的性能与制备; 李胜章, 助理工程师, 研究方向为共蒸法制备铜铟镓硒电池及其工业生产应用; 李霖, 技术员, 研究方向为材料学; 贺凡, 工程师, 研究方向为大面积铜铟镓硒电池透明导电层的性能与制备; 杨世航, 副研究员, 研究方向为柔性太阳能电池工艺开发; 陈旺寿, 工程师, 研究方向为产业化设备研发; 刘壮, 副研究员, 研究方向为半导体薄膜和纳米结构的合成及光电性质的研究; 张擻秋(通讯作者), 副研究员, 研究方向为铜铟镓硒电池产业化工艺开发, E-mail: xq.zhang@siat.ac.cn。

1 引言

随着常规能源的逐渐减少和人类对能源需求的日益增加,逐步改变能源结构,大力开发以太阳能为代表的可再生能源,走可持续发展的道路,已经成为普遍的共识。太阳辐射到地球大气圈外的辐照度为 1.367 kW/m^2 , 由于大气的吸收,辐照到地球表面的能量密度会有所减少,但其总量仍然达到每年 $3.850 \times 10^6 \text{ EJ}$ ($1 \text{ EJ} = 1 \times 10^8 \text{ J}$)。全球每年所消耗的初次能源只相当于太阳辐照到地球表面几个小时的能量,所以仅需要在全世界 0.1% 的土地上铺上转化效率为 10% 的太阳能电池,就能满足全球的能量供应^[1]。

2 太阳能电池产业化现状

在过去的几十年里,光伏产业有了飞速的发展。目前市场上主流的商用太阳能电池主要包括单晶硅太阳能电池、多晶硅太阳能电池、非晶硅太阳能电池、铜铟镓硒太阳能电池、碲化镉太阳能电池以及砷化镓太阳能电池等。

2.1 单晶硅太阳能电池

最早的硅太阳能电池是半个多世纪前采用微电子行业的直拉单晶硅制造法制备的。后来,基于区熔法制备的单晶硅实现了目前实验室的世界最高效率 (26.33%)^[2], 而商业化的单晶硅太阳能电池模组的效率一般在 13%~20%^[3-5]。单晶硅太阳能电池的优势在于其原料来源丰富、工艺成熟^[6], 但单晶硅的制作成本高,制作工艺复杂,并且制造过程中要消耗大量的能源,成本难以被压缩,因此也衍生了替代产品:多晶硅太阳能电池和非晶硅太阳能电池。

2.2 多晶硅太阳能电池

与单晶硅相比,多晶硅电池虽然在效率上相对比较低,目前实验室最高转化效率为 21.3%^[2],但是在生产成本和原材料的要求上

有很大的优势。此外,利用拉制的单晶硅棒切片制作的单晶硅太阳能电池是圆片,而多晶硅电池具有长方形或正方形的硅片外形,可以更好地利用组件面积^[7]。多晶硅在提炼的高温过程需要消耗大量的能源,同时还会在生产过程中排放一些有毒物质。因此,如何改善其工艺、控制生产污染、进一步降低成本是其研究的重点。目前多晶硅太阳能电池是市场上主流的产品,市场占有率达到 75% 以上^[5]。

2.3 非晶硅太阳能电池

无论是单晶硅太阳能电池还是多晶硅太阳能电池,器件制备工艺都需要高温,因而需要消耗大量的能源。非晶硅薄膜太阳能电池的制备所需的能源较少,属于第二代薄膜太阳能电池。其结构是在玻璃上沉积透明导电膜,再利用等离子反应依次沉积 p 型、本征和 n 型非晶硅,最后蒸上铝电极。由于其反应温度只需要 200°C ^[8],而且消耗的硅材料比多晶硅少,因此引发人们的关注。但非晶硅的转化效率较低,并会随着光照时间的增加而衰退,影响了它在实际产业化中的应用。

2.4 铜铟镓硒太阳能电池

铜铟镓硒 (Copper Indium Gallium Selenide, CIGS) 太阳能电池也属于第二代薄膜太阳能电池,其结构主要包括衬底钠钙玻璃、钼背电极、铜铟镓硒吸收层、硫化镉缓冲层、本征氧化锌 (ZnO) 和掺铝氧化锌 (AZO) 导电窗口层。CIGS 太阳能电池起步较晚,其模组在 1998 年以后才开始商业化^[9], 但因其能量回报时间短,性能良好,不存在光致衰退问题^[10], 并且对弱光也有较好的吸收^[11], 被认为是未来有很强竞争力的太阳能电池之一^[12]。

世界上已经有多家公司从事 CIGS 太阳能电池组件生产,但由于 CIGS 太阳能电池工艺复杂,技术门槛高,设备投入大,产业化规模一直不大。目前实现产业化生产的主要厂商有日本的

Solar Froniter 公司、中国汉能集团下的 Solibro 和 GSE 公司、中国台湾的台积电公司、德国的 Manz、美国的 Ascent Solar 公司等。

2.5 碲化镉太阳能电池

碲化镉 (CdTe) 太阳能电池是一种以 p 型 CdTe 和 n 型硫化镉 (CdS) 的异质结为基础的薄膜太阳能电池, 其禁带宽度为 1.47 eV, 与太阳光谱非常匹配。理论上碲化镉太阳能电池的转化效率可以达到 30% 左右, 目前实验室效率已经达到 22.1%^[2], 具有高转化率、性能稳定、结构简单、成本较低的优点, 但需防范在极端情况下镉元素泄漏对环境造成污染。经过长期的发展, 碲化镉太阳能电池的产业化已趋于成熟, 目前碲化镉太阳能电池组件的供应商主要是美国的 First Solar 公司, 电池组件效率达到 16.8%。

2.6 砷化镓太阳能电池

砷化镓 (GaAs) 太阳能电池包括单结砷化镓太阳能电池和多结砷化镓太阳能电池。其中, 目前单结砷化镓太阳能电池实验室最高转化效率为 27.5%^[2]; 而多结砷化镓太阳能电池以三结为主, 非聚光和聚光系统中的三结电池最高效率分别达到 37.9%、44.4%^[2], 其特点为工艺复杂、价格昂贵、高转化效率和高抗辐射能力, 主要用于航空航天器和聚光太阳能电池系统中。目前国际上砷化镓太阳能电池主要供应商是 Emcore 公司和波音公司下属的 Spectrolab 公司。

3 发电性能分析

为了更好地比较这几种电池今后产业化的潜力, 本文中分别选取几家具有代表性的光伏模组产品 (表 1), 覆盖了目前市场主流的多晶硅和单晶硅太阳能模组, 以及薄膜太阳能电池中的铜铟镓硒和非晶硅太阳能模组, 名称缩写代表了电池的种类和不同的供货商。为了实时比较各个模组的发电功率, 我们设计了可连续性测量多个太阳能平板的设备 (图 1), 每次测量把一组太阳能模组的输出接入电压电流曲线测量仪, 测量的数据收集到电脑中, 并根据电压电流曲线计算出最大输出功率。每个模组的一次电压电流曲线测量耗时大约为 10 秒, 测量完毕后自动切换电路接入下一个模组, 所有模组测完后进入新的循环。

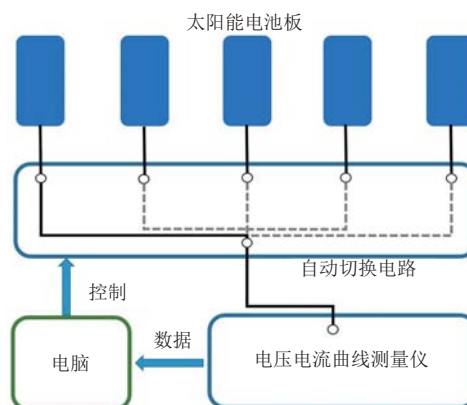


图 1 太阳能电池实时连续测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of continuous real time measurement system for solar panels

测量系统安装在中国科学院深圳先进技术研

表 1 不同电池规格及标称功率

Table 1 The dimensions and nominal powers of different solar panels

模组	尺寸 (cm×cm)	标称功率 (W)	供货商	面积 (m ²)	标称效率 (%)
单晶硅电池 (SCSi-S)	81×158	175	S 公司	1.28	13.7
多晶硅电池 (MCSi-R)	99×166	220	R 公司	1.64	13.4
CIGS 电池 (CIGS-T)	65.5×166	160	T 公司	1.09	14.7
CIGS 电池 (CIGS-S)	63.5×120	70	S 公司	0.762	9.2
非晶硅电池 (ASi-D)	111×141	100	D 公司	1.57	6.4

究院龙岗中试基地实验楼的楼顶,如图2所示。在不同的天气条件下测量了电池模组的户外发电性能。我们选择了典型的几种天气条件:晴天(最高气温 16°C 、最低气温 9°C),晴转多云(最高气温 16°C 、最低气温 10°C),多云(最高气温 18°C 、最低气温 12°C)和雨天(最高气温 19°C 、最低气温 16°C),计算出每个模组的发电功率在一天中随时间变化的曲线。测量过程中由于附近新建高层建筑在上午阻挡太阳光直射,因此,上午11点以前的测量数据作为阳光被遮挡条件下的发电能力,11点以后测量数据可以作为直射光线条件下的发电情况。

3.1 最大实际发电功率

图3是不同天气情况下几种电池的最大输出功率的比较。从数据上来看,在晴天、晴转多云



图2 龙岗铜铟镓硒中试基地屋顶太阳能电池实时连续测量系统

Fig. 2 Continuous real time measuring system for solar panels on the rooftop of Longgang base for CIGS pilot production line

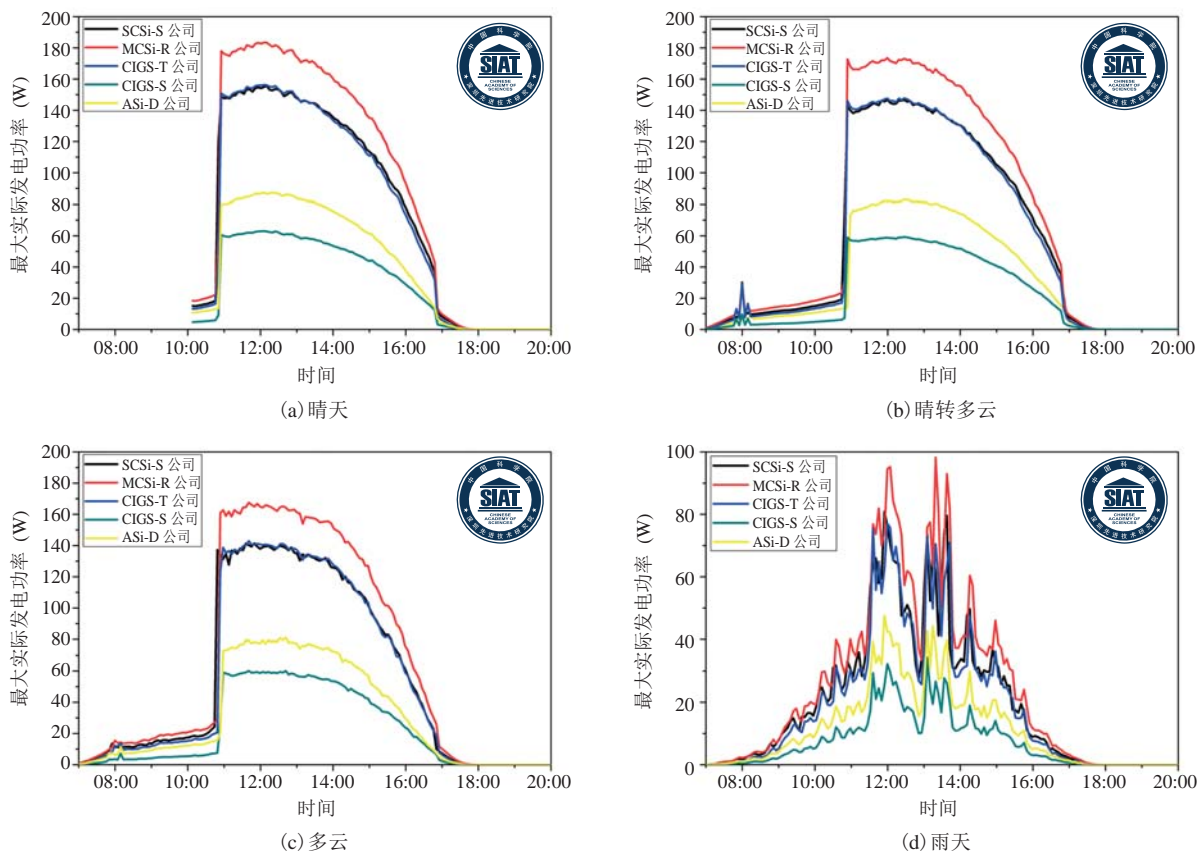


图3 不同电池在不同天气下的最大实际发电功率的比较

Fig. 3 Comparison of maximum actual generation powers of different solar cells at different weather conditions

以及多云的天气下, 多晶硅太阳能电池相对铜铟镓硒太阳能电池、非晶硅太阳能电池和单晶硅太阳能电池有较大的输出功率, T 公司的铜铟镓硒太阳能电池和 S 公司的单晶硅电池表现相差不大。在雨天天气下, 几种太阳能电池表现差距不大。将几种太阳能电池的最大功率对时间积分得到不同天气条件下的总发电量, 结果如表 2 所示。

从表中数据可以直观地得出, 在晴天、晴转多云以及多云的天气下, 几种太阳能电池一天总发电量: MCSi-R 公司 > SCSi-S 公司 > CIGS-T 公司 > ASi-D 公司 > CIGS-S 公司。

3.2 实际功率/标称功率

每一块合格的太阳能电池都有参数铭牌, 标注了电池在出厂检测时的各项性能, 包括功率、转化效率、开路电压以及短路电流等。这些参数的数值大多数是在实验室标准情况下测量的, 而在实际使用过程中, 其相关参数会随着天气的变化而改变, 我们使用实际功率/标称功率来衡量这种变化, 最终结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 电池在实际的使用过程中, 发电功率达不到其标称功率: 天气越是恶劣, 其表现出的差别越明显。相对而言, CIGS 太阳能电池具有明显优势, 表现在应对各种天气的情况下时, 其实际功率/标称功率的结果要优于其他三种材料的太阳能电池。这也说明, CIGS 太阳能电池在面对各种天气的情况下, 可以保持相对较为稳定的输出。而在非光照直射条件下(上午 11 点以前阳光被遮挡情况下), 非晶

硅太阳能电池有着较好的表现。为了定量地分析出几种电池的差异, 我们将实际功率/标称功率对时间进行了积分, 结果如表 3 所示。

在太阳能电池的市场销售过程中, 通常是按单位功率来标价, 因此每单位标称功率的实际发电量是个很重要的性价比参考数据。在晴天的测量结果中, 每单位标称功率发电优势依次为: CIGS-T 公司 > CIGS-S 公司 > SCSi-S 公司 > ASi-D 公司 ≈ MCSi-R 公司。

不同公司生产的 CIGS 有差别, 但都明显优于其他三种电池。以晴天为例, 其中 T 公司的 CIGS 电池的每单位标称功率的实际发电量, 分别比后几种电池多出 3.8%、6.9%、12.6% 和 14.0%。同时, 不同公司的制作工艺和封装性能也影响其最后产品的性能, 如 T 公司的 CIGS 太阳能电池的实际发电性能要优于 S 公司的 CIGS 太阳能电池。

3.3 实际能量转化效率(单位面积的发电功率)

每单位标称功率的实际发电量是衡量在太阳能平板上的投资的实际回报率, 但建设太阳能发电站的另一个重要成本是占地面积和工程施工, 所以实际的系统能量转化效率是衡量太阳能电池性能最重要的参数之一: 转化效率越高, 说明太阳能电池对能量和土地的利用率越高。

我们将效率对时间积分, 得到结果如表 4 所示。结合表 4 和图 5 不难看出, 在我们所选取的几种电池中, T 公司的 CIGS 太阳能电池具有明显的优势, 在晴天、晴转多云和多云的天气下均

表 2 几种太阳能在电池不同天气下的总发电量

Table 2 Total generating electricity capacity of several solar panels at different weather conditions

天气条件	一天总发电量 (W)				
	SCSi-S 公司	MCSi-R 公司	CIGS-T 公司	CIGS-S 公司	ASi-D 公司
晴天	760.13	894.45	743.32	294.40	411.72
晴转多云	749.51	887.62	734.56	291.03	413.77
多云	717.78	854.65	704.01	289.40	395.76
雨天	258.48	315.22	241.90	94.27	147.37

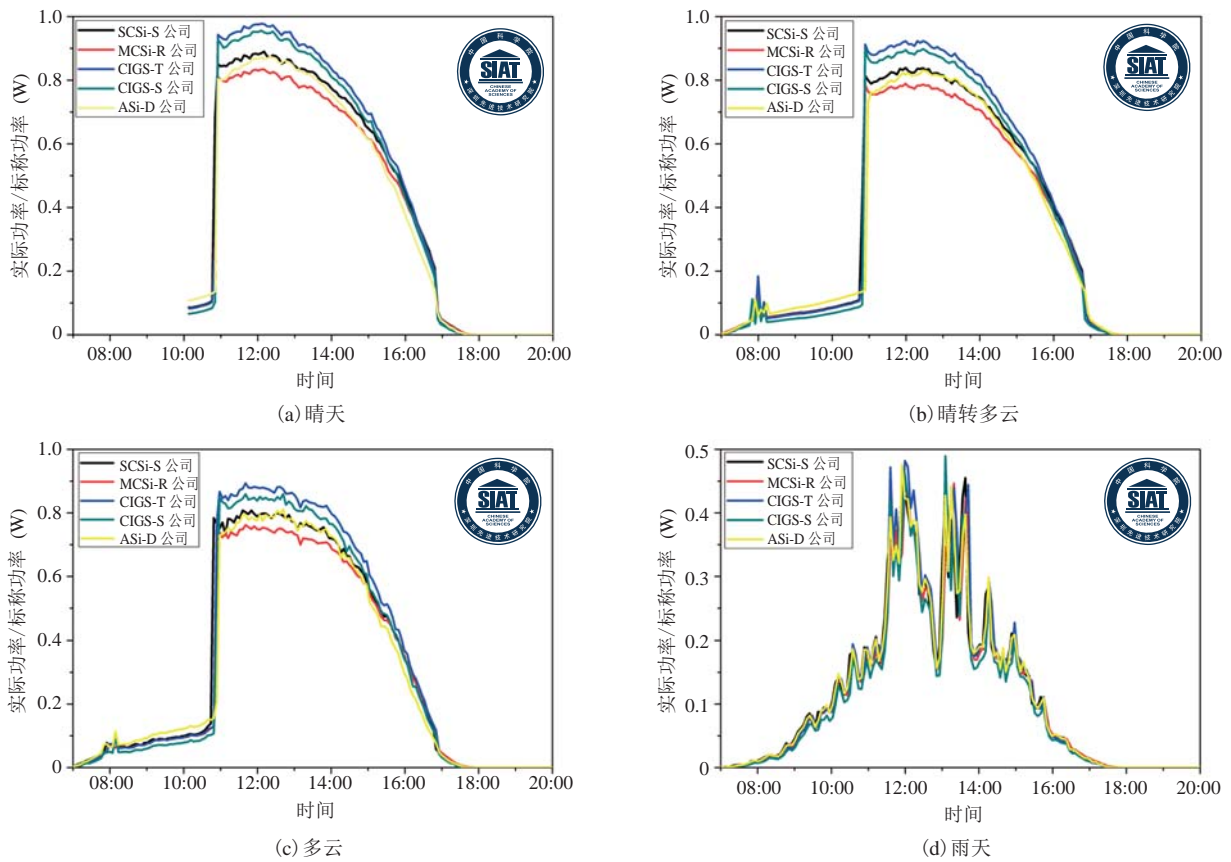


图4 不同电池在不同天气下的实际功率比标称功率的比较

Fig. 4 Comparison of normalized power of different solar cells at different weather conditions

表3 不同太阳能电池在不同天气下实际功率/标称功率数据的时间积分总值

Table 3 The time integral of the normalized power of different solar panels at different weather conditions

天气条件	实际功率/标称功率数据的时间积分总值				
	SCSi-S 公司	MCSi-R 公司	CIGS-T 公司	CIGS-S 公司	ASi-D 公司
晴天	4.34	4.07	4.64	4.47	4.12
晴转多云	4.28	4.03	4.59	4.37	4.14
多云	4.10	3.88	4.40	3.96	4.13
雨天	1.47	1.43	1.51	1.35	1.47

表4 不同太阳能电池在不同天气下效率对时间积分

Table 4 The time integral of actual efficiency of different solar cells at different weather conditions

天气条件	效率对时间积分				
	SCSi-S 公司	MCSi-R 公司	CIGS-T 公司	CIGS-S 公司	ASi-D 公司
晴天	0.59	0.55	0.68	0.41	0.26
晴转多云	0.59	0.54	0.67	0.40	0.26
多云	0.56	0.52	0.65	0.38	0.25
雨天	0.20	0.19	0.22	0.12	0.09

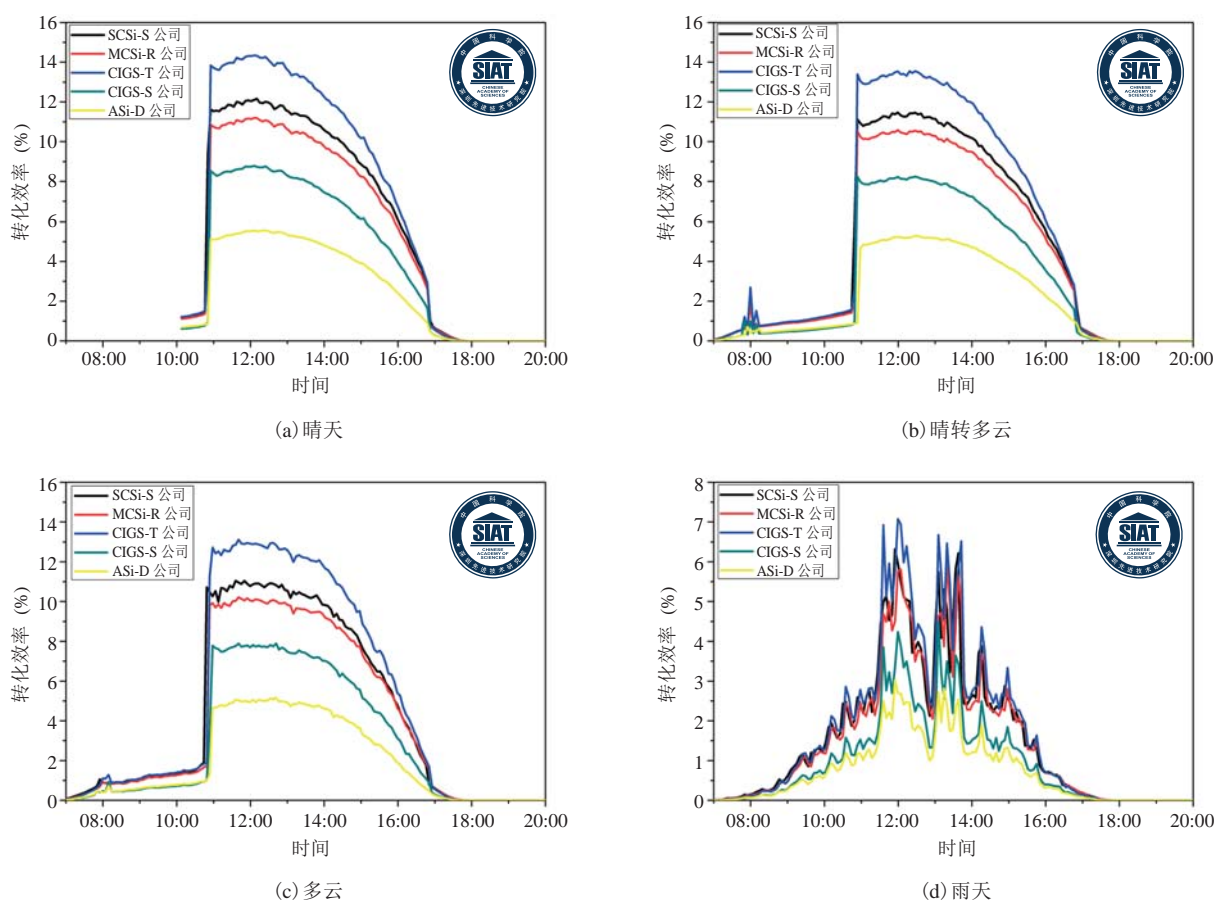


图 5 不同电池在不同天气下的实际能量转化效率的比较

Fig. 5 Comparison of actual energy conversion efficiency of different solar panels at different weather conditions

能保持较高的能量转化效率, 其次是 S 公司的单晶硅太阳能电池、R 公司的多晶硅太阳能电池、S 公司的 CIGS 太阳能电池和 D 公司的非晶硅太阳能电池。在雨天天气下, 几种太阳能电池的差距较大, 但总发电量较小。

T 公司的 CIGS 模组产品曾经创下 CIGS 模组产品的记录, 代表了 CIGS 产业化的顶尖水平, S 公司的 CIGS 产品性能属于一般水平。我们采购的多晶硅和单晶硅电池均属市场主流产品, 不管哪种太阳能电池, 其工艺都在不断进步中, 我们所测的结果代表了目前市场的主流水平, 如果以后采购到不同公司的电池模组, 将会加入测量系统进行对比测量。

4 结论以及展望

当前世界面临着经济和社会可持续发展的双重挑战, 光伏的发展可以帮助人类协调能源与环境之间的关系。经过半个多世纪的发展, 光伏技术已经趋于成熟, 其产品也走向实际应用, 从太阳能计算器到光伏电站, 广泛的应用也推动产业化不断发展。

在推进光伏产业化的这条道路中, 选择合适的太阳能电池至关重要。从文中几种电池的发电性能比较来看, 单晶硅和多晶硅太阳能电池及 T 公司的 CIGS 太阳能电池在发电性能上表现不俗。D 公司的非晶硅太阳能电池虽然在发电

性能方面不如前两种电池,但是在无直射阳光的弱光条件下,其单位功率的发电性能最为突出;另外,非晶硅太阳能电池的成本较低,在不追求效率的应用场景下,非晶硅电池也可占有一席之地。

同时,我们也看到,T公司的CIGS太阳能电池性能明显优于S公司,但T公司的市场价格也较高。这也说明,CIGS太阳能电池的产业化优势需建立在技术成熟的基础之上,这与其工艺难度大、设备复杂有关,如何攻关其制备工艺、降低设备成本对其今后产业化前途至关重要。多晶硅和单晶硅电池因为技术成熟,工艺门槛比薄膜太阳能电池低,市场成熟度高,而且其商业化模组效率仍在不断提升中,尤其最近因为中国的产能较大,价格一直处于低位。可以预见,在较长一段时间内,晶硅太阳能电池仍将继续占有市场主流位置。综上所述,这几种主流太阳能电池在产业化方面都有其独到优势,需要根据企业的不同需求和应用场景来选择合适的产品。

参 考 文 献

- [1] Grätzel M. Photoelectrochemical cells [J]. *Nature*, 2001, 414: 338-344.
- [2] National Renewable Energy Laboratory. Best research-cell efficiencies [OL]. [2016-08-24]. http://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency_chart.jpg.
- [3] U.S. Energy Information Administration. International energy outlook 2010 [OL]. 2010-07-27[2016-08-24]. <http://www.eia.gov/forecasts/archive/ieo10/index.html>.
- [4] Miles RW, Hynes KM, Forbes I. Photovoltaic solar cells: an overview of state-of-the-art cell development and environmental issues [J]. *Progress in Crystal Growth & Characterization of Materials*, 2005, 51(1-3): 1-42.
- [5] International Energy Agency. IEA technology roadmaps technology roadmap: solar photovoltaic energy [J]. *SourceOCDE Energie*, 2010(40): i-48.
- [6] Goetzberger A, Knobloch J, Voß B. *Crystalline Silicon Solar Cells* [M]. Wiley & Sons Ltd., 1998.
- [7] Beaucarne G, Bourdais S, Slaoui A, et al. Thin-film polysilicon solar cells on foreign substrates using direct thermal CVD: material and solar cell design [J]. *Thin Solid Films*, 2002, 403-404: 229-237.
- [8] Ortabasi U. Concentrating photovoltaic cavity converters for extreme solar-to-electric conversion efficiencies: US, US6689949 [P]. 2004.
- [9] Wieting RD. Second plenary: CIS manufacturing at the megawatt scale [C] // *Conference Record IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2002: 478-483.
- [10] Mitzi DB, Yuan M, Liu W, et al. Hydrazine-based deposition route for device-quality CIGS films [J]. *Thin Solid Films*, 2009, 517(7): 2158-2162.
- [11] Hernandez Velasco M. Performance evaluation of different PV-array configurations under weak light conditions and partial shadings [J]. *Energy & Environmental Technology*, 2014.
- [12] Shi JH, Li ZQ, Zhang DW, et al. Fabrication of Cu(In,Ga)Se₂ thin films by sputtering from a single quaternary chalcogenide target [J]. *Progress in Photovoltaics Research & Applications*, 2011, 19(2): 160-164.