

Progress of Magnetic Confined Fusion Energy Research

Li Jiangang

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences)

Fusion is the process that powers the sun and the stars. Magnetic Confined Fusion (MCF) research offered developing a safe, abundant and environmentally responsible energy source. Fusion energy application is very important for China. Significant progresses have been made in MCF for past 50 years. Tokamak is the leading configuration which will lead to future fusion reactor. ITER which designed to demonstrate the scientific and technological feasibility of fusion power will be the world's largest experimental fusion facility by seven party's joint efforts. Efforts have been made for the past few years within world fusion community for solve the scientific and technical problems to ITER construction and safe operation. Successful control of edge localized mode instability (ELM) and adopt W as divertor material are the key progresses. Chinese fusion scientists and engineers have contributed many efforts for ELM control and W material on EAST superconducting tokamak and HL-2A tokamak. EAST also achieved world records for the longest H-mode duration and over 400s divertor plasma discharge. Combining microwave beams for ELMs suppression with the advanced lithium wall treatment on EAST could provide a fruitful new direction for fusion-energy development. This combination of techniques offers an attractive regime for high-performance, long-pulse operations for next generation device. By joining ITER project together with fast domestic MCF program, Chinese MCF will be further enhance in near future for a goal to build Chinese fusion engineering test reactor around 2020.

3.4 太阳能技术新进展

沈文忠 王如竹

(上海交通大学)

太阳能技术主要是指人类主动利用太阳能资源,并将其作为一种有效的能源形式用于生活、生产的技术方式。根据原理与技术的不同,太阳能技术可分为两大类,即光热技术与光伏技术。太阳能光热技术(包括光热发电)是将太阳辐射能转换为热能并加以利用,主要由光热转换和热能利用两个部分组成。太阳能光伏技术的核

心器件是太阳电池，其主要原理是利用半导体材料的光伏效应与半导体器件工艺来实现发电。下文将重点介绍该两类技术的发展现状，并展望其未来。

一、国际重大研发进展

（一）太阳能光热技术

世界各国，特别是欧美等发达国家和地区纷纷制定政策规划，以推进太阳能的利用。较为著名的有欧盟的“2020 战略”，即到 2020 年欧盟各国可再生能源占总能耗的 20%，其中太阳能热利用达到 12 兆吨油当量^①，2010 ~ 2020 年的年增长率为 23.1%；太阳能热发电规模将达 15 吉瓦，发电量为 43 太瓦时，2010 ~ 2020 年的年增长率为 31.1%。近 3 年来，欧盟还开始了太阳能中温集热技术的工业应用——太阳能锅炉，并通过一系列示范推进了太阳能空调的使用。美国能源部于 2008 年启动的“太阳计划”（SunShot Initiative）^[1]，连续多年为太阳能热发电技术的研发提供了支持，2013 年该计划资助了多个美国国家实验室承担热发电方面的研究项目。

1. 太阳能光热利用

太阳能光热利用是以热能转换为主的太阳能转换和利用过程，主要涉及太阳能中低温热利用，如太阳能常规利用、太阳能热利用与建筑一体化、太阳能空调制冷、太阳能海水淡化等。近期，国际上的主要进展包括太阳能中温集热技术、太阳能空调技术及与此相关的太阳能蓄热技术。

（1）太阳能中温集热技术：主要是利用太阳能获得 80 ~ 250℃ 范围的热能，涉及：①真空管中温集热涂层技术。涂层技术的突破，可以使 150℃ 的集热效率达 45%；②采用菲涅耳透镜线聚焦技术，可产生 200℃ 左右的热能；③采用槽式集热器线聚焦技术，可产生 200℃ 以上的热能。原来用于中高温热发电（槽式和菲涅耳式）的太阳能集热器正通过降低集热管的成本来扩大其工业应用的范围。

（2）太阳能空调技术。主要有溴化锂-水吸收式制冷、硅胶-水吸附式制冷、氨-水吸收式制冷，以及利用干燥剂除湿的除湿制冷^[2]。太阳能低温干燥储粮技术、太阳能中央空调、住宅用空调制冷/供热系统已有应用。德国 SolarNext 公司开发了

^① 吨油当量（ton of oil equivalent, toe）是指量 1 吨原油所含的热量相当于某种能源品种多少所含热量，约为 42 吉焦耳。

半效溴化锂-水吸收式制冷机和硅胶-水吸附制冷机,可实现75℃热水制冷^①。日本矢崎(Yazaki)公司开发成功10~30千瓦低热水温度(68℃)驱动太阳能溴化锂吸收式空调^②。随着太阳能热利用与常规化石能源(天然气)的结合,单双效结合的太阳能溴化锂-水吸收式空调应运而生。由于太阳能中温集热技术的突破,太阳能驱动的可单-双效转化的溴化锂-水吸收式空调获得成功应用。

(3) 太阳能蓄热技术。近年潜热蓄存材料已经商品化。2011年,英国PCMP公司推出的A164相变材料,在相变温度为164℃时蓄热密度达到306千焦/千克^[3]。2012年,德国Zschimmer & Schwarz化学公司推出的RT110相变材料,在相变温度为112℃时蓄热密度达到213千焦耳/千克。德国巴斯夫(BASF)公司2011年推出的Micronal相变蓄存材料为封装型材料,具有高传热率、不腐蚀金属等特点,可用于太阳能空调的蓄冷,寿命可达30年。利用吸附和吸收过程储热的化学蓄热技术也已经成为国际储热研究的热点。

2. 太阳能热发电技术

太阳能热发电主要采用聚焦集热技术,以产生发电时驱动热力机所需要的高温液体或蒸汽。根据聚焦技术的不同,聚光光热发电(CSP)可分为槽式、塔式、碟式和菲涅耳式发电技术。槽式发电已有多年商业运行的经验,塔式发电已证明了商业运行的可行性。常规火力发电机组的技术已经成熟,而太阳能热发电的热-功转换部分与常规火力发电机组基本相同,因此特别适宜于大规模使用。2012年全球CSP容量增长超过60%,其总规模达到了2550兆瓦电量^[4]。

(1) 槽式热发电系统的结构相对简单,采用串、并联排列方式,可构成较大容量的热发电系统,已较早实现了商业化。随着技术的不断发展,系统的效率已由初始的11.5%提高到13.6%,发电成本已由26.3美分/千瓦时降到9.1美分/千瓦时。德国肖特公司研发的集热管涂层,发射率 $\leq 9.5\%$,吸收率 $\geq 95.5\%$;热损耗循环测试证实,其工作温度400℃时热损小于250瓦/米。集热管利用太阳能辐射加热专用的合成导热油,可使最高温度达到400℃;直接采用水做传热介质,可降低太阳能热电站的建设和运营成本。2010年,Abengoa公司在美国建设的直接蒸汽型槽式系统的示范工程成功发电。2011年,德国肖特公司生产的槽式系统采用熔盐作为导热介质,其最高工作温度可达550℃^[5]。

(2) 塔式太阳能热发电可实现高聚光比,使吸热器能够在500~1500℃范围内

① 参见: http://www.solarnext.eu/eng/home/home_eng.shtml

② 参见: <http://www.yazakienergy.com/products.htm>

运行，在提高发电效率方面具有很大的潜力。塔式系统从光到电的年平均效率已提高到 20%。传统的中央接收器温度低于 600℃，热力循环效率约为 40%；在较高温度下，熔盐工质变得不稳定。使用固体颗粒直接吸收，接收器的最高温度可达到 1000℃ 以上，循环效率达 50% 以上^[6]。美国桑迪亚国家实验室（Sandia National Laboratories）联合德国航天局太阳能研究所，于 2012 年获得美国能源部的资助，正在合作进行相关的研究。

（二）太阳能光伏技术

太阳能光伏产业主要涉及光伏材料、太阳电池与组件、光伏逆变器、光伏系统集成技术等^[7]。其核心器件是太阳电池，目前已商业化的太阳电池主要是晶体硅太阳电池与薄膜太阳电池两大类。研发的热点是效率>20% 的高效晶体硅电池和先进薄膜电池。

1. 效率超过 20% 的高效晶体硅电池

在效率超过 20% 的高效太阳电池研发方面，美国与日本的企业走在了前面。他们所采用的技术是全背电极（IBC）和晶体硅-非晶硅异质结（HIT）两种技术；美国阳光电力（SunPower）公司和日本松下（Panasonic）公司都实现了 22% ~ 24% 的转换效率，并先后实现了产业化。

2010 年，美国阳光电力公司推出了其第三代 IBC 电池，进一步改进了表面结区掺杂和其他工艺，减小了金属接触区域的复合；同时还采用热加工工艺，加强了对氧化堆垛层错的控制，在 n 型直拉（CZ）硅衬底上使电池达到了 24.2% 的光电转换效率^[8]。最近几年，除了美国阳光电力公司之外，有许多研究机构和太阳电池公司也开始研制 IBC 电池。其中，典型的有位于比利时的欧洲独立微电子研究中心（IMEC）研发的尺寸为 2 厘米×2 厘米的 IBC 电池，其光电转换效率达到 23.3%^[9]。它采用了美国阳光电力公司第一代和第二代 IBC 电池的 n⁺ 与 p⁺ 区域相连接的自对准结构。

2013 年，日本松下公司进一步提升了它的非晶硅膜生长工艺，在一块面积为 101.8 平方厘米、厚度为 98 微米的硅片上创造了 n 型硅电池的最新世界纪录：24.7% 的光电转换效率^[10]。由于近年来 HIT 的专利已过期，国内外多家公司开始研制异质结的电池。如德国 Roth&Rau 公司的 HJT 电池，效率已达到 21% 以上。

2. 先进薄膜电池

碲化镉（CdTe）和铜钢镓硒（CIGS）薄膜太阳电池技术也是目前世界各国重

点开发的光伏技术。随着专业的光伏真空设备技术的发展,近些年,这两种薄膜电池的研究发展非常迅速,尤其是实验室太阳电池光电转换效率的提高^[11]。2013年6月,美国通用电气全球研发中心(GE Global Research)最新的CdTe太阳电池的光电转换效率达到19.6%;CIGS太阳电池的最高转换效率是由德国太阳能和氢能研究中心(ZSW)于2013年10月创造的20.8%。瑞士联邦材料科学与技术实验室(EMPA)2012年9月在柔性衬底上也成功制备出光电转换效率达到20.4%的CIGS太阳电池。

CdTe薄膜电池目前真正实现大规模生产的只有美国第一太阳能(First Solar)公司。2013年,第一太阳能公司的光伏组件的转换效率超过了16%,产能超过2吉瓦,在薄膜电池领域一家独大。目前,CIGS薄膜电池处于产业化的初级阶段,主要是美国、德国和日本等发达国家的公司在进行这种电池的产业化。其工艺各具特色,但都采用真空溅射技术,制备CIGS吸收层的部分工艺有差别。2013年6月,日本昭和壳牌石油公司旗下的Solar Frontier公司成功生产出组件面积为1.23平方米、光电转换效率达14.7%的CIGS太阳电池组件,使CIS薄膜太阳电池的转换效率达到多晶硅电池的水平。2013年11月,韩国三星SDI公司最新的大面积(1.44平方米)CIGS薄膜太阳电池经过德国莱茵TüV认证,其光电转换效率达到15.7%。美国MiaSole公司也实现了15.7%的转换效率。从事CIGS太阳电池开发和生产的还有美国的Nanosolar(印刷技术)、美国的SoloPower(柔性技术)、德国的Avancis和德国Q-Cells的子公司Solibro等公司。但以上多数公司的产品还处在研发阶段,少数能达到数十到几百兆瓦的生产规模。2010年,CIGS实际产量在0.5吉瓦之内,2012年为2吉瓦。

二、国内同类研发的现状

(一) 太阳能光热技术

2012年底,全球热水集热器的产量已达到255吉瓦热量,中国占70%以上。2012年中国累计热水器的安装已超过2亿平方米以上。在太阳能中温集热器的研发方面,我国处于世界领先地位,真空管集热器从质量到成本均领先世界,已大量出口国外。力诺太阳能公司和皇明太阳能公司都开发了10吨以上的太阳能锅炉。力诺太阳能公司生产的用于驱动太阳能空调的太阳能中温集热器的集热效率已达到40%以上(集热温度150℃),2013年已有一批太阳能锅炉获得实际应用。我国在利用太阳能中温集热器驱动的太阳能空调技术已取得突破,有可能初步实现商业化应用。

上海交通大学积极推进太阳能建筑的一体化应用、太阳能中温集热及其工业应用，以及与各类太阳能热源温度匹配的太阳能空调技术的研发，并同时积极推动空气源热泵热水系统、空气源热泵热水、空调和采暖的研发和应用。上海交通大学与国内企业合作开发了硅胶-水吸附式空调、单-双效转化的溴化锂-水吸收式空调，以及适用于变热源温度的 1. n 效溴化锂-水吸收式空调。

涉足太阳能光热发电的公司有皇明太阳能公司、力诺太阳能公司、浙江中控太阳能公司、浙江三花股份、湘电集团有限公司和中航工业西安航空发动机（集团）有限公司等。皇明太阳能公司开发了可用于热发电的太阳能槽式集热器，其工作温度可达 400℃，效率高于 50%；还成功开发出塔式定日镜系统。浙江中控太阳能公司成功开发出基于智能小镜、熔盐蓄热、模块化等技术的塔式热发电系统。2013 年 7 月，该公司投资建设的中国第一座商业化 50 兆瓦电量塔式太阳能光热发电站一期 10 兆瓦电量顺利并网发电^[12]。湘电集团公司的碟式太阳能光热发电装置的研制已取得突破性进展，在布雷顿循环、斯特林循环关键技术的研制上取得实质性成果，整机效率提高到 38%，适应了商业化发展的需求；同时，建成具有完全自主知识产权的第二代 25 千瓦电量碟式太阳能光热发电装备系统^[13]。

中国科学院电工研究所在槽式、塔式、碟式太阳能集热和热发电技术方面有较强的研究基础。该所研制的 1 兆瓦电量塔式太阳能热电站于 2012 年 8 月成功发电。

（二）太阳能光伏技术

从 2005 年以来，我国光伏产业发展迅猛，近几年来世界 60% 以上太阳电池都产自我国，预计未来 10 年内我国作为太阳电池第一大国的地位不会改变。目前，我国常规工艺单晶硅电池的光电转换效率可达 19% 左右，多晶硅电池的光电转换效率可达 17% 左右，光伏企业几乎全部集中在常规工艺晶体硅电池领域，这一领域的太阳能光伏产业处在国际领先水平。这使得太阳能光伏产业成为我国为数不多的具有国际竞争优势的战略性新兴产业^[7]。

目前，我国一些骨干企业已经开始将效率为 20% 的晶体硅太阳电池的规模化生产作为重点突破方向。金属贯孔（metal-wrap-through, MWT）电池具有减少前表面遮光的优势。采用 MWT 电池结构，英利绿色能源控股有限公司与荷兰能源研究中心（ECN）合作，在 n 型 CZ 硅片上获得了 20% 光电转换效率的太阳电池^[14]；阿特斯阳光电力有限公司也在 n 型 CZ 硅片上实现了 21.5% 的光电转换效率。杭州赛昂电力有限公司生产的隧穿异质结电池，结构与 HIT 电池类似，其 5 英寸电池已达 729 毫伏的开路电压和 21.4% 的光电转换效率^[15]。IBC 和异质结电池的研发工作已经成为国内热点。

在先进薄膜电池的研发方面，我国与国际先进水平的差距是巨大的。国内许多高校和科研机构很早就开展了 CdTe 薄膜太阳能电池研究，在材料物性和制作工艺方面有较好的基础，但目前唯一能规模生产 CdTe 组件产品的企业只有龙焱能源科技（杭州）有限公司。该公司有一条年生产能力 30 兆瓦、全国产化、全自动化的 CdTe 薄膜太阳能电池组件的生产线；研制的 0.72 平方米的 CdTe 薄膜光伏组件的光电转换效率达到 12.03%，小面积单体电池和薄膜组件的转换效率达到 14% ~ 15%。高校和科研院所也长期开展了 CIGS 薄膜太阳能电池的基础物性和新材料新工艺的研发工作。目前，国内 CIGS 太阳能电池的转换效率最高的是中国科学院深圳先进产业技术研究院的样品，其小面积 CIGS 薄膜太阳能电池的光电转换效率是 19.06%，大面积的为 12.6%。汉能控股集团于 2012 和 2013 年先后收购了德国 Q-Cells Solibro、美国 MiaSole 和 Global Solar Energy 三家 CIGS 公司，开始大举进军 CIGS 薄膜电池领域。

三、发展趋势及前沿展望

太阳能热利用技术正向高效低成本的方向发展。太阳能中温利用技术将在不同的工业部门拓展其应用范围。它可以为太阳能锅炉提供适当的解决方案，以实现太阳能的高效集热系统与化石燃料的一体化综合利用。中温太阳能集热器和各类吸收或吸附制冷机的有机组合是未来太阳能空调的一个发展方向。太阳能热利用还需要拓展到更多的领域（如太阳能海水淡化）。太阳能蓄热技术的突破有可能为太阳能热利用带来新的商机。

太阳能热发电将朝着以下方向发展：①高反射率、高耐久性的反射材料；②有高性能涂层的反射器或接收器；③高温、高效率的太阳能接收器的材料和设计；④新型高温传热流体；⑤高温、低成本储热材料和系统；⑥高效率电力循环；⑦新型低耗水水电站的运行和维护技术；⑧高度自动化的生产设施和设备；⑨快速的现场安装和最简单的整地技术；⑩新型 CSP 元件及系统；等等。槽式集热器的成本近期将下降至 235 美元/米²。通过场地、集热系统、蓄热、发电循环等全方位的创新，太阳能热发电的成本力争到 2020 年降到 6 美分/千瓦时^[16]。

目前，光伏产业链的发展路线图已经比较清晰。对于晶体硅电池来说，大规模生产的太阳能电池的光电转换效率要求达到 20% ~ 25%，甚至更高，其开发热点是 IBC、HIT 和双面电池。这些高效电池都基于 n 型单晶硅片，n 型磷掺杂单晶硅片技术的前景较为明朗；多晶硅材料采用流化床反应器方法呈上升趋势，多晶硅材料及硅片将以更加集群的方式发展，单个企业产能将达到每年 10 万吨或更大规模；太阳能电池组件将出现规模化集群式的发展，单个企业产能将达到 1 ~ 3 吉瓦甚至更高；单

个电站在沙漠地带可达到 1~10 吉瓦甚至更大规模；光伏发电可以采用多种应用形式来推广，如屋顶电站、地面电站以及分布式能源等。

薄膜太阳能电池因为低材料消耗和不断提高了转换效率，在未来光伏电池技术中将占有重要的位置，柔性薄膜是其最重要的特色之一。柔性太阳能电池一直是太阳能电池研发的一个热点，可以利用塑料、金属等柔性片材作为电池的衬底材料，这也是薄膜电池的优势。可以设想，在不久的将来，薄膜电池目前面临的问题将逐一得到解决，其性能不断得到提高，将满足未来消费者对能源的差异化需求。

参 考 文 献

- [1] US Department of Energy, Solar Energy Technologies Program, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. Multi Year Program Plan 2008-2012. 2008: 8-12.
- [2] 王如竹, 代彦军. 太阳能制冷. 北京: 化学工业出版社, 2007: 38-46.
- [3] Barlev D, Vidu R, Stroeve P, Innovation in concentrated solar power. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2011, 95: 2703-2725.
- [4] Sawin J L. Renewables 2013 global status report. <http://www.ren21.net> [2013-12-05].
- [5] Joseph S, Levi I, Ranga P. Technical challenges and opportunities for concentrating solar power with thermal energy storage. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2013, 5: 021011-(1-11).
- [6] Greenpeace International, 2009 IEA SolarPACES, ESTELA. Global concentrating solar power outlook 2009. <http://www.greenpeace.org/international/en/publications/reports/concentrating-solar-power-2009/56-60> [2013-12-20].
- [7] 沈文忠. 太阳能光伏技术与应用. 上海: 上海交通大学出版社, 2013.
- [8] Smith D, Cousins P, Masad A. SunPower's Maxeon Gen III solar cell: high efficiency and energy yield. 39th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, Tampa, 2013, Paper #256.
- [9] Alemana M, Dasa J, Janssens T, et al. Development and integration of a high efficiency baseline leading to 23% IBC cells. Energy Procedia, 2012, 27: 638-645.
- [10] Taguchi M, Yano A, Tohoda S, et al. 24.7% record efficiency HIT solar cell on thin silicon wafer. 39th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, Tampa, 2013, Paper #884.
- [11] Green M A, Keith E, Yoshihiro H, et al. Solar cell efficiency tables (Version 42). Progress in Photovoltaics: Research and Application, 2013, 21: 827-837.
- [12] 浙江中控太阳能技术有限公司. 中控德令哈 50MWe 塔式太阳能光热发电一期顺利并网发电. <http://solar.supcon.com/view.asp?id=62> [2013-12-21].
- [13] 湘潭电机股份有限公司. 湘电碟式太阳能光热发电装备. <http://www.xemc.com.cn/product/Product.aspx?channel=4&productID=144> [2013-12-12].

- [14] Guillevin N, Heurtault B J B, Geerligs L J, et al. 279 watt metal-wrap-through module using industrial processes. 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Germany, 2012; 2025-2029.
- [15] Beitel C, A greater than 20- percent efficient crystalline cells without silver. Photon's 8th PV Production Equipment Conference, Shanghai, 2012.
- [16] US Department of Energy. Concentrating solar power, key activities. <http://www1.eere.energy.gov/solar/sunshot/csp.html> [2013-12-12] .

Recent Advancement in Solar Technologies

Shen Wenzhong, Wang Ruzhu
(Shanghai Jiao Tong University)

Solar technologies include conventional solar thermal applications, solar thermal power technologies and photovoltaic technologies. In conventional solar thermal applications, medium temperature solar collector (80-250°C), solar thermal energy storage technologies as well as solar air conditioning and refrigeration technologies have achieved significant progress in recent years. United States and European countries are leading countries in developing advanced solar thermal power technologies. The US DOE programs SunShot Initiative has set a goal to achieve US \$ 0.06/kW · h in concentrated solar power through continuous efforts. Chinese researchers have worked actively and made great contributions in solar air conditioning and refrigeration technologies, while Chinese companies have also made substantial progress in developing cost-effective technologies on middle temperature solar boilers for industry uses. The universal application of solar photovoltaic depends on the conversion efficiency of solar cells and the cost of the required materials. The rapid progress of current photovoltaic R&D and material science greatly promote the development of this cost-competitive renewable energy technology. Chinese photovoltaic industry has shown great advantages on the traditional crystalline silicon solar cells, however, United States, Japan and European countries dominate the recent achievements in novel solar cells and photovoltaic technologies, especially on the high efficiency (>20%) crystalline silicon solar cells and advanced thin film solar cells.