

决策咨询系列



国家科学思想库

太阳能电池发展现状及 性能提升研究

王启明 褚君浩 郑有炘 等 编著

 科学出版社

太阳能电池发展现状及 性能提升研究

王启明 褚君浩 郑有炆 等 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍各类主要太阳电池的发展现状及性能提升研究,并对太阳电池发展过程中若干值得深思的问题进行剖析和阐述。全书共8章,主要包括光伏新能源的发展态势,硅基太阳电池、化合物太阳电池、有机聚合物太阳电池的研发与发展态势,提高太阳电池效率的新途径,包括宽光谱响应、纳米技术,储能器件锂离子电池的研发进展和技术提升途径,以及太阳电池发展过程中存在的若干问题等。

本书可作为高等学校电子科学与技术、材料科学与技术类相关专业的高年级本科生和研究生教材,也可供从事太阳电池相关领域生产或研究的工程技术人员和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

太阳电池发展现状及性能提升研究/王启明等编著. —北京:科学出版社, 2014

ISBN 978-7-03-041056-6

I. 太… II. 王… III. 太阳能电池-研究 IV. TM914.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 127621 号

责任编辑:魏英杰 / 责任校对:韩 杨

责任印制:肖 兴 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 6 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2014 年 6 月第一次印刷 印张:19

字数:382 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

随着社会发展对能源的需求急速提升,化石能源面临枯竭,国际能源供应市场动荡。而化石能源使用中产生的大量碳排放也对自然环境产生了难以消除的破坏。这引起了世界各国的深切关注,着力开发可再生绿色新能源已迫在眉睫,很多国家已将其列为一项重要的战略任务。

从可再生和清洁性的角度考虑,光伏能源无疑是取之不尽的绿色新能源。随着技术的进步和各国政府强力政策的推动,光伏能源产业已成为当前世界上发展规模和发展速度都位居前列的新兴产业之一。在过去 10 年内,光伏产业的平均年增长率达 40%。

在民间和政府部门的大力支持下,经历了大约 10 年的艰苦创业和快速发展,我国已成为世界上最大的太阳能电池组件制造国。2010 年我国太阳能电池产量占世界总产量的近 50%。然而,我国自身对光伏能源的利用却仅为世界总额的约 3%。这种发展模式隐藏着巨大风险。世界尤其是欧洲次债危机的长久徘徊以及美国等国家和地区贸易壁垒政策的复活,使这种潜在的风险转化为残酷现实。当前我国光伏产业的发展应“何去何从”“以何为策”的课题被紧迫地提上日程。

正是在这种背景下,中国科学院信息技术科学部于 2010 年 6 月成立了“太阳能电池技术与光伏新能源产业的发展态势和对策建议”咨询研究组。在研究组组长的悉心组织下,全体成员对太阳能电池技术内涵和国际研发动态进行了全方位的调研、讨论、分析和总结,从宏观和微观两方面对光伏能源产业有了比较全面的掌握,并形成了初步的结论;继而在组长带领下,研究组到全国各地 20 多家代表性光伏企业单位进行了实地考察、座谈与交流,在第一线验证了研发进展及产业技术的实际状况,同时也了解了各单位发展的艰难历程,倾听了他们对走出困境的想法和期望。同时,研究组特意邀请了政府和行业部门的相关领导,就报告内容尤其是对策建议的合理性、可行性和必要性征询了意见。经中国科学院领导审阅批准后,该咨询报告已呈送国务院并受到中央领导重视,顺利完成了咨询任务。

在完成宏观对策咨询任务的同时,我们也希望从科学技术的层面对目前各类太阳能电池的既得成就、发展路线和创新意念加以剖析研究并升华提炼,从而提出我们对光伏技术发展的看法和思路,与关注和从事本领域及相关领域研究的科技与管理人员及在校学生共同切磋,为我国早日成为光伏强国作出贡献,也期望广大读者能对我们的工作进行检验和批评指正。

本书采取宏微兼顾、内外结合的形式,首先概括介绍了全球可再生绿色光伏能

源产业技术的发展现状与趋势;之后,用3章的篇幅分类详述了硅基太阳能电池、化合物太阳能电池,以及有机太阳能电池的研发与发展态势;另外用3章着重介绍了拓宽光谱响应的重要性与新途径、纳米技术对提升太阳能电池效率的贡献,以及作为重要储能器件的锂离子电池的研发进展和利用纳米技术提升其储能性能的重要性;最后从宏观的角度提出了若干在发展过程中值得深思的重要问题,并略作剖析作为本书的结束语。

本书初稿经由王启明、赵雷、薛春来反复斟酌调整和修改,并由王启明统一审阅了全稿。期盼我国的太阳能电池及光伏新能源产业能以创新发展为契机、以应用开拓为前导、以行业调整为依靠,在不久的将来使我国从“太阳能电池制造大国”转变为真正的“光伏新能源强国”,期望本书的出版能够起到抛砖引玉的作用。

本书相关的研究项目得到了中国科学院院士工作局、咨询委员会、信息技术科学部以及学部办公室的大力支持与指导,得到了国务院、国家能源局、国家发展和改革委员会、国家科学技术部、国家工业和信息化部、国家自然科学基金委员会、中国科学院高技术研究与发展局等有关领导的关注与指导,受到了国内诸多光伏企业的热情接待、支持和倾心交流。咨询研究组全体成员对决策建议进行了反复推敲、多次讨论。本书凝结了很多参与人员的务精求实、认真负责的辛勤劳动。对此一并表示深深的感谢和由衷的敬意!

本书虽几经修改,但时间仓促,加上作者水平有限,资料掌握未必充分全面,遗漏和欠缺之处在所难免,恳请读者不吝指正。

作 者

目 录

前言

第 1 章 国内外太阳电池和光伏新能源的发展态势	1
1.1 光伏能源的优势及其在新能源中的地位	1
1.2 太阳电池是发展光伏新能源的基石	3
1.3 国外太阳电池产业的发展现状与策略	4
1.4 我国太阳电池的发展现状与趋势	5
1.5 光伏能源的发展态势	6
第 2 章 硅基太阳电池及其发展态势	8
2.1 硅基太阳电池产业化技术发展方向	8
2.1.1 产业背景	8
2.1.2 晶硅太阳电池	10
2.1.3 硅薄膜太阳电池	28
2.1.4 制约硅基太阳电池发展的材料和设备问题	34
2.1.5 结语	35
2.2 晶硅太阳电池硅材料现状和发展趋势	36
2.2.1 引言	36
2.2.2 硅原料制备	37
2.2.3 硅晶体的生长	39
2.2.4 硅片切割	42
2.2.5 结语	44
参考文献	44
第 3 章 化合物太阳电池及其发展态势	51
3.1 引言	51
3.1.1 化合物半导体太阳电池发展概况	51
3.1.2 化合物半导体太阳电池的特点	52
3.1.3 化合物半导体太阳电池的现状与发展态势	55
3.2 砷化镓基太阳电池及其应用	57
3.2.1 引言	57
3.2.2 砷化镓基太阳电池的发展历史	58
3.2.3 砷化镓基太阳电池的材料制备与关键工艺	59

3.2.4 砷化镓基化合物聚光多结太阳电池	61
3.2.5 砷化镓基化合物多结电池性能优化	61
3.2.6 砷化镓基太阳电池的国内外发展现状与态势	66
3.2.7 关键科学技术问题与突破的方向和途径	69
3.2.8 结语	72
参考文献	73
3.3 铜铟镓硒薄膜太阳电池	73
3.3.1 引言	73
3.3.2 铜铟镓硒太阳电池的结构原理和特点	74
3.3.3 铜铟镓硒太阳电池的工作原理	78
3.3.4 铜铟镓硒材料的特点	79
3.3.5 铜铟镓硒太阳电池的特点	82
3.3.6 铜铟镓硒吸收层的制备工艺	87
3.3.7 国外研究现状和发展趋势	94
3.3.8 国内研究及产业化现状和发展趋势	96
3.3.9 关键科学技术问题与突破的方向和途径	99
3.3.10 结语	101
参考文献	102
3.4 碲化镉薄膜太阳电池及其应用	105
3.4.1 引言	105
3.4.2 材料制备与关键工艺	106
3.4.3 电池结构和性能优化	109
3.4.4 衬底的选择	110
3.4.5 国外现状与发展态势	111
3.4.6 国内现状与发展态势	112
3.4.7 碲化镉薄膜太阳电池的优势与局限性	112
3.4.8 关键科学技术问题与突破的方向和途径	113
3.4.9 结语	114
参考文献	115
3.5 II型异质量量子同轴线太阳电池	115
3.5.1 引言	115
3.5.2 II型异质量量子同轴线材料设计	117
3.5.3 II型异质量量子同轴线太阳电池	123
3.5.4 国内外发展现状与态势	125
3.5.5 结语	126

参考文献	127
第 4 章 有机聚合物太阳电池及其发展态势	130
4.1 有机聚合物太阳电池及其应用	130
4.1.1 引言	130
4.1.2 器件的制作与性能	131
4.1.3 材料的设计与制备	138
4.1.4 目前国内外发展现状	146
4.1.5 关键科学技术问题与突破的方法途径	147
4.1.6 结语	148
参考文献	148
4.2 柔性有机太阳电池的现状与未来	153
4.2.1 引言	153
4.2.2 柔性有机太阳电池的重要应用	154
4.2.3 2011 年有机太阳电池的水平	155
4.2.4 有机太阳电池效率的理论极限	156
4.2.5 柔性有机太阳电池的关键问题	156
4.2.6 我国的差距和发展建议	158
参考文献	159
4.3 染料敏化太阳电池	159
4.3.1 引言	159
4.3.2 染料敏化太阳电池结构及其性能	160
4.3.3 染料敏化太阳电池的分类	161
4.3.4 染料敏化太阳电池产业化道路	163
4.3.5 结语	166
参考文献	166
第 5 章 宽光谱响应提高硅基太阳电池效率的新途径	169
5.1 提高晶硅太阳电池短波响应的纳米技术	169
5.1.1 引言	169
5.1.2 纳米硅的吸收特性与制备方法	172
5.1.3 上表面短波/可见光转换器和纳米硅单结电池	173
5.1.4 多结硅基太阳电池——光学与电学的串联	176
5.1.5 国内已开展的基础性工作	178
5.1.6 结语	180
参考文献	180

5.2 轴向受光、径向收集的纳米线(柱)结构——解除光吸收长度与载流子输运效率相互制约的重要途径	183
5.2.1 引言	183
5.2.2 硅纳米线的制备	184
5.2.3 径向 p-n 结硅纳米线太阳电池的现状与发展态势	187
5.2.4 结语	194
参考文献	195
5.3 提高晶硅太阳电池全光谱响应的波长上下转换技术	197
5.3.1 引言	197
5.3.2 提高晶硅太阳电池长波响应—— Re^{3+} 的双光子波长上转换	200
5.3.3 国外波长上转换研究进展	202
5.3.4 波长上转换在硅太阳电池中的运用瓶颈及突破点	203
5.3.5 提高晶硅太阳电池短波响应——波长下转换(光子剪裁)	205
5.3.6 国内外波长下转换研究工作进展	208
5.3.7 结语	209
参考文献	210
5.4 提高晶硅太阳电池全光谱响应的杂质带工程运用	211
5.4.1 引言	211
5.4.2 杂质带的特征	212
5.4.3 杂质带获得突破的难点	220
5.4.4 国内外发展动态	224
5.4.5 结语	225
参考文献	226
第 6 章 纳米技术提高太阳光有效收集和增强吸收的方法	229
6.1 引言	229
6.2 纳米材料的多重激子效应与多光子吸收	231
6.2.1 多重激子效应	231
6.2.2 多光子吸收	234
6.3 纳米结构组装太阳电池透明导电窗口层	236
6.3.1 碳纳米管组装网络窗口层	236
6.3.2 金属纳米线组装网络窗口层	238
6.4 基于表面等离子体激元提高太阳电池光吸收	238
6.4.1 基于金属纳米颗粒散射增强效应的太阳电池	239
6.4.2 基于金属纳米颗粒局域增强效应的太阳电池	241
6.4.3 基于背面金属光栅结构表面等离子体激元增强的太阳电池	243

6.4.4 基于表面等离子体激元纳米天线的太阳电池	244
6.4.5 其他类型表面等离子体激元增强的太阳电池	245
6.5 基于纳米结构增强太阳电池的陷光效果	246
6.5.1 光子晶体光栅结构	246
6.5.2 纳米线结构	248
6.5.3 其他结构	250
参考文献	251
第7章 纳米技术提高锂离子电池储能容量的方法	255
7.1 引言	255
7.2 储能电池的发展及工作原理	255
7.2.1 锂离子电池的发展历程及工作原理	256
7.2.2 锂离子电池的性能及其优越性	259
7.2.3 锂离子电池的主要组成材料	260
7.3 纳米技术对提升锂离子二次电池性能的研究进展	263
7.3.1 锂离子电池正极的纳米化	264
7.3.2 锂离子电池负极材料的纳米化	266
7.4 储能电池的未来发展	277
7.4.1 锂硫电池	277
7.4.2 锂空气电池	278
7.4.3 三维锂电池	279
7.4.4 超级电容器	281
7.5 结语	284
参考文献	284
第8章 发展中值得深思的若干问题	290
8.1 挽救陷入困境的我国光伏制造产业	290
8.2 全面考虑光伏能源在新能源中的位置	290
8.3 光伏新能源产业的规模特别是太阳电池的生产规模需要 健康发展	291
8.4 光伏能源系统总容量的提升速度要与智能化并网、储能技术特别 是大容量蓄电装置的成熟度相适应	292
8.5 环保问题的统筹考虑	292
8.6 光伏电站的安全性问题	292
8.7 通向光伏能源强国之路	293

第1章 国内外太阳能电池和光伏新能源的发展态势

王启明¹ 赵雷² 薛春来¹

1.1 光伏能源的优势及其在新能源中的地位

人类社会的发展对能源的需求越来越大。据国际能源署(IEA)发布的《世界能源展望 2010》预测,2008~2035年,世界主要能源需求预计将增加36%,即年增长1.2%。到2035年,全球石油需求将从2009年每日8400万桶增长18%,达到每日9900万桶。根据英国石油公司(BP)发布的《世界能源统计 2011》,2010年全球能源消费比上年增长5.6%,而截至2010年年底,全球原油探明可采储量为1.383万亿桶(不含加拿大油砂),按2010年的年开采速度计算,可开采46.2年(储采比为46.2);全球常规天然气探明可采储量为187.1万亿立方米,储采比为58.6;煤炭全球探明可采储量为8609.38亿吨,储采比为118。该报告的数据同时显示,2010年美国能源消费量占全球的19%,我国占全球的20.3%,是世界上最大的能源消费国。截至2010年年底,我国原油剩余探明可采储量为148亿桶,仅占全球总量的1.1%,储采比为9.9;天然气剩余探明储量为2.8万亿立方米,仅占全球总量的1.5%,储采比为29.0;煤炭剩余探明储量为1145亿吨,占全球总量的13.3%,储采比为35。《世界能源统计 2011》中的这些数据说明,无论是全世界还是我国,常规能源都面临日益严重的供给短缺问题。我国是世界煤炭第一大消费国,石油第二大消费国,天然气的消费量也在逐年增加,能源供给短缺正对我国经济的可持续发展构成严重威胁。

此外,化石能源的大量开发利用是造成人类生存环境持续恶化的主要原因之一。化石能源燃烧排放出的二氧化碳和含硫氧化物直接导致了温室效应和酸雨。在能源和环保上,人类面临着双重挑战,在有限资源和环保要求的双重制约下如何发展经济已成为全球热点问题。发展各类可再生新能源已被世界各国政府看作解决能源危机和减少环境污染的重要战略任务。大力发展可再生新能源还可以提高国家能源安全,降低对别国的能源依赖,同时提高社会稳定性,促进社会进步。

欧盟1997年明确指出,2020年和2050年可再生能源比例要分别达到20%和50%,2010年更是探讨了2050年实现100%可再生能源的可能性。美国2007年出台《清洁能源法》,并提出到2030年清洁能源要达到30%。日本政府推出绿色

1 中国科学院半导体研究所,集成光电子学国家重点实验室,北京 100083

2 中国科学院电工研究所,中国科学院太阳能热利用及光伏系统重点实验室,北京 100190

能源新政,提出到 2050 年要依靠提高能源效率和发展可再生能源减排温室气体 80% 以上。澳大利亚提出 2020 年可再生能源要满足 20% 的电力需求。我国提出到 2015 年,非化石能源在能源消费中的比重要达到 11.4%,到 2020 年达到 15%,并相继出台了《中华人民共和国可再生能源法》、《中国应对气候变化国家方案》、《中国可再生能源中长期发展规划》等政策和法规,将新能源产业明确列入《依靠科技创新加快培育和发展战略性新兴产业总体方案》。

新能源中最具代表性的是核能、风能、生物质能和太阳能。核能包括裂变能和聚变能,聚变能离实际发电应用还比较遥远,核裂变能发电是利用铀燃料核裂变连锁反应产生的热将水加热成高温高压的蒸汽来推动蒸汽轮机发电。核能发电的优点是核燃料能量密度高、用量小、不排放巨量污染物到大气中,也不产生二氧化碳,缺点是投入高、建设周期长、技术复杂。例如,2004 年建成的秦山二期核电站装机容量 1.2GW,总投入达 150 亿元,建设周期 8 年,核心技术 300 多项。此外,核废料的洁净处理问题至今尚未解决,反应堆的安全问题也需要不断监控和改进,潜在风险高,如果发生突发不测事故,放射性物质释放到外界环境中,会对生态环境和人民健康造成长期的严重危害。2011 年 3 月发生的日本福岛核泄漏事件已对此产生警示。核能是不可再生能源,我国的铀资源比较贫乏,大力发展核能未来会受到原料消耗的制约。风力发电作为清洁可再生能源的最大优点是成本相对较低,技术也比较成熟,但风能能量密度小,分布波动大,发展会受地域限制,即便是有风的地区,许多地方风力也有间歇性,造成发电不稳定。风力发电过程中虽没有污染物排放,但存在低频噪声,可能会对生态和人居环境产生影响。生物质能是太阳能以化学能形式储存在生物质中的能量形式,即以生物质为载体的能量,直接或间接来源于绿色植物的光合作用,可转化为常规的固态、液态和气态燃料,但其使用仍然有二氧化碳的排放。从广义上讲,生物质能也是太阳能的一种表现形式,但植物仅能将极少量的太阳能转化成有机物,单位土地面积上的有机物能量偏低,栽种植物会消耗大量土地。

作为新能源之一的太阳能具有无污染、可再生、总量大、分布广等优点,正受到人们的广泛重视。太阳辐射到地球的能量高达 17.3 万 TW,每秒钟照射到地球上的能量相当于 500 万吨标准煤。当今世界各国都加大了开发利用太阳能资源的力度。欧洲、美国、澳大利亚、日本等地区和国家纷纷加大投入,积极探索实现太阳能规模化利用的有效途径。德国等欧盟国家更是把太阳能作为替代化石燃料的主要能源来大力扶植发展。我国也有十分丰富的太阳能资源,陆地表面每年接受的太阳能就相当于 1700 亿吨标准煤,西藏、青海、新疆、内蒙古南部、山西、陕西北部、河北、山东、辽宁、吉林西部、云南中部和西南部、广东东南部、福建东南部、海南岛东部和西部以及台湾省的西南部等广大地区的太阳辐射总量都很可观。因此,我国也把开发利用太阳能作为发展可再生能源的重要组成部分纳入国家中长期科技发展规划纲要。

太阳能可分为光热能源和光伏能源。光热能源包括直接热利用和光热发电。太阳能光热发电利用大规模阵列的抛物状或碟形镜面收集太阳热能,通过换热装置提供蒸汽,带动传统汽轮发电机发电。光热发电必须规模化利用,并且对太阳辐照度要求高,同时需要大量水资源进行冷却,目前发电成本仍然偏高。光伏能源基于光生伏特效应,利用半导体材料构筑太阳能电池,太阳能电池将接收的太阳光的部分能量直接转换为电能。光伏能源既可以规模化利用,也可以分布式甚至便携式利用。光伏能源建设周期短,在运行发电时,不产生废渣、废水、CO₂和其他污染物、不会造成温室效应,也没有噪声,更不会影响生态平衡,从而可以改善气候和环境。光伏发电系统几乎可以安装在任何有太阳光的地方,不存在运输问题,对交通不发达的农村、海岛和边远地区更具可利用价值。此外,发展分布式光伏发电,还能提升能源供应的安全性。

新能源种类很多,并且具有各自的优点和发展空间,但是国际权威机构一致认为,太阳能将在未来的能源供给中占据主导地位。正因如此,虽然光伏能源目前的价格与传统能源相比仍然偏高,但光伏能源产业却已成为世界上发展速度最快的产业之一,在过去10年内其年平均增长率接近40%。根据Clean Edge公司统计,2000年国际光伏市场只有25亿美元,2010年已经增长到712亿美元。光伏技术的不断进步使光伏发电的成本在逐年降低,光伏组件价格从2000年的5美元/峰瓦,已经降低到了目前的接近1美元/峰瓦。相信光伏发电成本将很快与传统发电成本相当,在不远的将来,光伏新能源一定能在解决人类能源需求方面起到关键作用,为人类的可持续性发展作出不可估量的贡献。

1.2 太阳能电池是发展光伏新能源的基石

太阳能电池光电转换的基础是半导体材料的光生伏特效应。目前广泛研究的太阳能电池主要包括元素半导体太阳能电池(单晶硅太阳能电池、多晶硅太阳能电池、硅薄膜太阳能电池),化合物半导体太阳能电池(Ⅲ-V族化合物太阳能电池、铜铟镓硒(CIGS)薄膜太阳能电池、碲化镉(CdTe)薄膜太阳能电池),染料敏化太阳能电池(DSSC),有机聚合物太阳能电池(OPV)以及下一代超高效太阳能电池。随着科研投入的不断增加,各类太阳能电池性能都取得了显著提高。单晶硅太阳能电池的世界最高效率达到25%,多晶硅太阳能电池达到20.4%,硅薄膜太阳能电池达到13.4%,Ⅲ-V族化合物太阳能电池达到37.9%,聚光条件下更是达到44.4%,铜铟镓硒薄膜太阳能电池达到20.3%,碲化镉薄膜太阳能电池达到19.6%,染料敏化太阳能电池达到11.9%,有机聚合物太阳能电池达到10.7%。能够突破常规太阳能电池理论效率极限的下一代超高效太阳能电池的研究也在原理上获得了重要进展。

晶硅太阳能电池技术最成熟,但制造过程特别是硅原料的西门子法化学提纯过

程会消耗较多能量,硅片切割过程会消耗大量硅料,并且由于受到硅片尺寸和制造工艺的限制,晶硅电池面积小,需要很多电池集成为组件进行应用。硅薄膜太阳能电池消耗硅材料少,但转换效率偏低。铜铟镓硒和碲化镉薄膜太阳能电池都还没有特别完善的规模化生产技术,核心技术掌握在少数公司手中,并且采用了对环境不友好的元素或者稀缺元素,大规模推广有可能会受到环保和资源短缺的双重制约。但这几类薄膜太阳能电池与晶硅太阳能电池相比,具有更大的面积和更好的外观,因此更加适合光伏建筑一体化应用。Ⅲ-V族化合物太阳能电池虽然效率最高,但其昂贵的材料和制造工艺成本决定了其只能拓展特殊的空天和军事应用,采用聚光方式也许可以开展一定的地面应用。染料敏化太阳能电池和有机聚合物太阳能电池目前还都刚刚迈入产业的门槛,性能稳定性还有待考验,但它们低廉的价格是吸引人的最大优势,可以开拓消费性便携式能源的广阔市场。

各类太阳能电池都有各自不同的优劣势,可以满足市场的不同需求,目前还不能做出单一性选择,只能各类电池协同发展。

1.3 国外太阳能电池产业的发展现状与策略

在技术进步和各国法规政策的强力驱动下,光伏产业自1995年以来进入了快速发展期,太阳能电池产量从2000年的287MW增加到2009年的11.5GW,年平均增长率近45%。中国、美国、欧洲、日本是世界上最主要的4个制造国家和地区。据2011年5月的PV News报道,2010年世界太阳能电池产量达到23.9GW。其中,晶硅太阳能电池产业最成熟,占比例最大。2010年,单晶硅和多晶硅太阳能电池份额占到87%。世界前十大太阳能电池生产商中只有美国First Solar一家生产的是碲化镉薄膜太阳能电池,产量达到1.4GW,其余全部是晶硅太阳能电池企业。硅薄膜太阳能电池产量最大的是日本夏普(195MW)。铜铟镓硒薄膜太阳能电池产量最大的是德国的Solibro公司,但只有75MW。近两年,多晶硅价格呈下降趋势,薄膜电池原有的成本优势逐渐弱化,而且薄膜太阳能电池转换效率相对较低,单位面积发电量小,需要更大的装配面积,生产设备成本也较高。晶硅太阳能电池在未来5~10年内仍将是光伏发电市场的主流。

在光伏制造业方面,西方国家在大多数方面拥有先进技术,他们着力于质量和效率的提高、装备的改善、环境的保护、专利的占有,然后把量产专利转移到发展中国家,将作为光伏能源使用的光伏组件从国外廉价购进。他们是把能耗、污染转给发展中国家,把清洁能源留给自己。在太阳能电池制造方面,他们集中在太阳能电池先进制备技术开发和高精尖高端设备制造上,单是德国的设备产业规模就与我国的太阳能电池制造产业规模相当。这种回流式的产业格局是一个值得我们深思的问题。

尽管光伏产业规模的扩大和技术的进步已使光伏发电成本下降明显,但仍高

于常规能源的发电成本。光伏应用市场的形成,极大地依赖于政府制定的扶持政策。所以,目前的光伏应用市场仍具有相当高的集中度。欧盟已连续多年是最主要的光伏应用市场,在未来几年内还将保持这种趋势,尽管所占市场份额可能会有所下降。截至2010年,欧盟累计装机容量达到26GW,相当于世界累计装机容量的75%,之后是日本3.6GW和美国2.5GW。在各种光伏应用中,并网发电所占的比例越来越大。全球规模超过10MW的光伏电站已经超过了120个。光伏建筑一体化是光伏能源的另一种主要应用形式。

欧盟光伏应用市场的发展主要得益于德国市场,德国自上网电价出台后一直是最大的光伏应用国。在德国之后,欧洲各国都纷纷制定了相应的上网电价政策来促进本国光伏应用市场的发展。日本主要采取“初投资补贴为主,净电表制为辅”的政策模式,在初投资补贴的基础上,以市场价格采购光伏系统发出的剩余电量。美国各州有不同的政策法规,包括实施强制市场配额、税收优惠、净电表制等。正是通过这些政策,国外光伏应用市场得到了快速扩展。我国的光伏制造产业也因此发展迅速,并形成了近来的产能过剩局面。随着其他各国逐年下调扶持力度,我国光伏制造企业的赢利能力逐渐下降,甚至面临严重亏损的境地。

但从长远来看,光伏产业仍处于上升期,产业规模仍将扩大。光伏发电在世界能源体系中才刚刚崭露头角,平价上网是光伏发电的最终目标。

1.4 我国太阳能电池的发展现状与趋势

在国际上大力发展可再生新能源的背景下,围绕“提高效率、降低成本”的目标,国内有大量研究机构投入到各种太阳电池的研发中。传统晶硅太阳电池的量产水平与国际水平相当,但在新结构高效硅电池方面与国际水平存在一定的差距。各类薄膜太阳电池与国际水平相差较远,缺乏制备高性能太阳电池的关键技术和设备。Ⅲ-V族化合物砷化镓基太阳电池的制备水平与国际水平相差不大,能够满足我国的空天应用需求。染料敏化电池、有机太阳电池,以及下一代超高效太阳电池的研究也基本与国际同步。

在西方光伏应用市场的拉动下,我国太阳电池产业发展迅速,几乎遍地开花。自2007起,我国太阳电池产量一直位居世界第一。2010年,全国总产量超过了12GW,占世界总产量的59%,但出产的基本是晶硅太阳电池。无锡尚德和河北晶澳太阳电池产量都超过了1.4GW,成为全球第一和第二大电池生产企业。河北保定英利、江苏常州天合的产量也突破了1GW,排进了世界前十大太阳电池生产商行列。同期,我国相应的多晶硅料产能也迅速扩大,2010年产量达到约40 000t(1t=1000kg),占世界总产量的近31%,其中保利协鑫旗下的徐州中能硅业公司产能达到21 000万t,位居世界第三。保利协鑫提供的硅片产能达3.5GW,位居世界首

位,江西赛维 LDK 的硅片产能也达到了 3GW。

尽管我国已是太阳能电池生产大国,但电池制造过程中的高端设备,尤其是硅材料制备设备、硅片切割设备等,以及各种高性能的基础材料大部分从国外进口。由于在我国光伏发电的成本比化石发电成本高,光伏电站的建设在国内并不多,储能技术和智能化并网等配套建设也准备不够。我国的光伏发电激励政策一直以补贴政策为主,补贴范围有限,光伏应用市场拓展缓慢。相比于巨大的太阳能电池产量,国内过小的光伏应用市场只能消费掉不到 5% 的电池,95% 以上的电池份额均销往国外。2009 年我国光伏发电装机量只有约 228MW,2010 年也只提升到了约 520MW,仅占当年全球装机总量的大约 3%。

可见,我国只是太阳能电池的制造大国,既不是光伏技术大国,也不是光伏应用大国。这样的结果是生产的能耗和可能的污染留在了国内,而最终的清洁能源却供给了国外。近来,西方政府正逐渐减弱对光伏市场的扶持力度,我国太阳能电池的外销市场正面临挑战,“保增长、拉内需、促发展”的呼声日渐高涨。目前,经过光伏业界的创新拼搏以及国内光伏材料的产能释放,太阳能电池成本已经大幅下降,我国大力发展光伏应用市场的契机正在呈现。2008 年,温家宝总理在斯德哥尔摩对 CO₂减排作出承诺,光伏发电有望成为实现我国节能减排目标的可靠途径。

2011 年 7 月 24 日,《关于完善太阳能光伏发电上网电价政策的通知》出台。光伏上网标杆电价的出台有利于国内市场的逐渐打开,但新的上网标杆电价在细节上还有待完善。对不同地区不同类型电站的上网电价实行同一价格,并且价格偏低,这导致只有在日照资源充沛的西藏、青海等省份才有可能盈利。大规模拓展我国的光伏应用市场仍需要有更加灵活和开放的扶持政策。

1.5 光伏能源的发展态势

化石能源危机引发的因素有两个。首先它是消耗性能源,地球上的蕴藏量有限,世界各国尤其是美国都在不断增大储备量。另一个因素是这种资源地区分布极不均衡,国际形势的动荡随时可能影响甚至切断它的供应,能源供应的安全性受到紧迫威胁。而且,化石能源燃烧排放的 CO₂、SO₂ 等气体已严重破坏了地球的人居环境。因此,在全球范围内,人们都已经认识到了开发可再生、无排放、清洁新能源的紧迫性。

太阳能是取之不尽、用之不竭的可再生清洁能源。技术进步将使光伏发电成本逐年下降,首先在终端消费侧实现平价上网,进而在发电上网侧实现平价上网。德意志银行经过细致的成本测算认为,光伏发电在 2015 年将达到 15 美分/kWh,达到终端消费侧的平价上网。欧洲光伏工业协会(EPIA)认为,2020 年光伏发电将在 76% 的发电市场中成为最有竞争力的发电技术。2011 年发布的“中国光伏发电平价上网路线图”认为,我国在 2015 年光伏发电电价可以达到 1 元人民币/

kWh, 配电侧并网的分布式光伏发电将实现平价上网, 2020 年光伏发电平均上网电价可以达到 0.8 元人民币/kWh 以下, 实现发电侧的平价上网。

据 PV Status Report 2010 年给出的有关部门的预测, 2020 年我国光伏发电的装机容量将达到 20GW, 而欧盟将达到 390GW, 美国达到 350GW。自 2011 年 3 月日本福岛核泄漏以来, 美国、德国、英国、俄罗斯等纷纷关闭了老旧的核电站, 调整了核电发展政策。德国总理默克尔基于核电站隐患的危险性强调指出, 应用光伏是更安全的选择, 并在 3 月间立即采取紧急措施关闭了 7 座危险度高的核电站, 5 月 30 日进一步宣布 2022 年前关闭全部 17 座核电站, 放弃核电。5 月 10 日, 日本首相菅直人宣布调整核电发展计划, 重点研究太阳能和风能等新能源。5 月 25 日, 菅直人称日本将调整能源政策, 在 21 世纪 20 年代前期将太阳能、风能等可再生能源占总电力的比例升至 20% 以上, 在 1000 万户住宅屋顶上安装太阳能电池板。美国奥巴马政府 2011 年下半年已将光伏能源列为绿色新能源的首位。

可见, 无论是国内还是国际市场, 光伏发电的需求都还有很大的拓展空间, 这无疑是光伏产业进一步发展的良好机遇。然而, 事物的发展都有其二重性。光伏产业发展还面临诸多不确定因素。每一种新产品走向市场都离不开政府的培育和鼓励, 初始阶段的价格总是比较高的, 需要有政策的支持来推动它向更大的量产化发展。量产化大了, 技术更成熟了, 生产效率更高了, 成本自然就会下降到平价的水平。为发展光伏发电, 国际上特别是欧盟各国都早早采取了积极的鼓励政策, 我国光伏制造产业的大规模发展就源于国际市场的刺激, 但主要由民间企业兴办, 地方政府支持, 四五年内遍地开花。我国由此迅速成为光伏电池的世界第一大生产国。90% 的产品外销, 欧洲份额最大, 这无疑对增加国家的创汇收入和就业岗位作出了重要贡献, 同时企业也获得了丰厚利润。然而, 由于债务危机爆发, 从 2010 年开始, 欧洲国家纷纷减少了对光伏发电的补贴并大幅降低了上网电价。尽管政策补贴递减是促进新兴产业发展的自然过程, 但欧盟政策补贴的递减程度超出预期, 尤其是 2011 年年底欧债危机进一步加剧, 使欧洲各国财政拮据, 不仅无力补贴, 就连新能源建设也已无暇顾及。作为新兴市场的美国, 尽管大大提升了光伏新能源的地位, 市场开拓度超出预期, 但却出于对避免国内就业岗位缩减和能源硬件受制于外的考虑, 借机以反倾销为理由, 提出门罗主义的关门政策。我国对光伏新能源发展的重视程度远落后于国外, 虽然近两年也加快了光伏市场的开拓步伐, 但仍然缺乏培育和开拓市场的有力战略举措, 光伏电站建设投入不大, 并网和储能技术发展迟缓, 而普及化的大规模民用光伏市场还基本没有开拓, 造成国内光伏应用市场的实际规模非常有限。世界范围的这种光伏应用市场现状, 造成我国光伏企业的订单大为缩水, 我国盛极一时的光伏制造产业, 转眼间陷入了严重困境。要实现光伏发电的美好前景, 首先要克服当前的不利局面, 使我国业已形成的世界第一的光伏制造产业迈过这道坎儿。