

太阳能电池硅材料

唐雅琴 编著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

太阳能电池硅材料

唐雅琴 编著



北京

冶金工业出版社

2019

内 容 提 要

本书系统阐述了半导体硅材料电池的工作原理,硅材料的提纯、生产和加工工艺及其测试分析技术。主要内容包括太阳电池的研究、应用现状与发展趋势,太阳能光电转换材料及物理基础,硅太阳电池的结构与制备,硅及其化合物,硅的提纯,单晶硅材料,多晶硅的制备及其缺陷和杂质,硅材料加工,硅薄膜材料,硅材料的测试与分析。

本书可供从事新能源材料与器件、新能源科学与工程、太阳能光伏等研究的科研人员与相关领域的工程技术人员阅读,也可供高校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

太阳电池硅材料/唐雅琴编著. —北京:冶金工业出版社, 2019. 7

ISBN 978-7-5024-8182-7

I. ①太… II. ①唐… III. ①硅太阳能电池—材料—研究 IV. ①TM914. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 140771 号

出版人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcbcs@cnmp.com.cn

责任编辑 杨 敏 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 郭惠兰 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-8182-7

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2019年7月第1版,2019年7月第1次印刷

169mm×239mm; 11.75 印张; 228 千字; 178 页

55.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

随着人类生活及工商业活动对能源的需求越来越大，能源问题日趋突出。传统能源的开采难度越来越高，不少能源的储量只能维持几十年时间；与此同时，化石能源在使用时产生的二氧化碳、二氧化硫、颗粒物、重金属等污染物，不可避免地造成温室效应、酸雨、雾霾等各类污染问题，已经影响到人类的生活甚至生命。因此，人们迫切地希望找到新的、清洁的、可替代传统能源的新能源，以解决日益严峻的能源问题和环境问题。

太阳能是一种十分重要的新能源，它具有清洁、可再生、储量丰富等优点，极具应用前景。在太阳能的有效利用研究中，太阳电池是近年来最受瞩目、发展最快的研究领域之一。硅太阳电池是目前应用最为广泛的一类太阳电池，它是以半导体硅材料为基础，其工作原理是利用半导体硅材料吸收光能后发生光电转换效应。由于制造工艺上的不同，硅太阳电池可分为单晶硅太阳电池和多晶硅太阳电池两种结构。

近年来，硅太阳电池技术在理论和应用上都有了很大的发展，也增添了许多新的内容，本书从材料制备和性能的角度，着重介绍了硅材料太阳电池光电转换的基本原理、硅太阳电池的结构与制备工艺、原料硅的提纯、单晶硅和多晶硅生产加工工艺、硅材料的性能测试与分析等，系统总结了目前太阳电池硅材料的主要制备技术及其进展。

本书由贵州理工学院唐雅琴编著。在撰写过程中，贵州理工学院刘仪柯老师提出了许多编写意见，提供了有关参考资料，并参与了最后的校稿工作。

感谢贵州理工学院一流教学团队建设（新能源材料与器件一流教学团队）、省级本科高校一流课程“神奇的材料世界”建设项目（16001 黔财教 [2016] 70 号，17008 黔财教 [2017] 142 号）和贵州省科技厅基础研究计划项目（黔科合基础 [2017] 1064 号）对本书内容涉及的有关研究的资助；感谢贵州理工学院对本书出版的支持。

由于作者水平、时间、精力所限，书中不足之处，望各位专家学者和广大读者能予以谅解，并提出宝贵意见。

作者

2019 年 5 月

冶金工业出版社部分图书推荐

| 书 名 | 作 者 | 定 价(元) |
|---------------------------|--------|--------|
| 中国冶金百科全书·金属材料 | 编委会 编 | 229.00 |
| 特殊钢丝新产品新技术 | 徐效谦 著 | 138.00 |
| 现代材料表面技术科学 | 戴达煌 等编 | 99.00 |
| 能源消费结构评价与优化 | 黄光球 著 | 62.00 |
| 物理化学(第4版)(本科教材) | 王淑兰 主编 | 45.00 |
| 理科物理实验教程(本科教材) | 吴 平 主编 | 36.00 |
| 金属材料学(第3版)(本科教材) | 强文江 主编 | 66.00 |
| 现代冶金工艺学——钢铁冶金卷(第2版)(本科教材) | 朱苗勇 主编 | 75.00 |
| 冶金与材料热力学(本科教材) | 李 钊 编著 | 70.00 |
| 耐火材料工艺学(本科教材) | 武志红 主编 | 49.00 |
| 电磁冶金学(本科教材) | 亢淑梅 编著 | 28.00 |
| 传热学(本科教材) | 任世铮 编著 | 20.00 |
| 能源与环境(国规教材) | 冯俊小 主编 | 35.00 |
| 半导体材料(本科教材) | 贺格平 主编 | 39.00 |
| 合金相与相变(第2版)(本科教材) | 肖纪美 主编 | 37.00 |
| 金属学原理(第2版)(本科教材) | 余永宁 编 | 160.00 |
| 金属学原理习题解答(本科教材) | 余永宁 编著 | 19.00 |
| 金属学及热处理(本科教材) | 范培耕 主编 | 38.00 |
| 传输原理应用实例(本科教材) | 朱光俊 主编 | 38.00 |
| 现代焊接与连接技术(本科教材) | 赵兴科 编著 | 32.00 |
| 有色金属塑性加工(本科教材) | 罗晓东 主编 | 30.00 |
| 固态相变原理及应用(第2版)(本科教材) | 张贵锋 编著 | 35.00 |
| 材料成形技术(本科教材) | 张云鹏 主编 | 42.00 |
| 洁净钢与清洁辅助原料(本科教材) | 王德永 主编 | 55.00 |
| 加热炉(第4版)(本科教材) | 王 华 主编 | 45.00 |
| 冶金热工基础(本科教材) | 朱光俊 主编 | 36.00 |
| 材料科学基础教程(本科教材) | 王亚男 等编 | 19.00 |
| 材料现代测试技术(本科教材) | 廖晓玲 主编 | 45.00 |
| 相图分析及应用(本科教材) | 陈树江 等编 | 20.00 |
| 热工实验原理和技术(本科教材) | 邢桂菊 等编 | 25.00 |
| 传输原理(本科教材) | 朱光俊 主编 | 42.00 |
| 材料研究与测试方法(本科教材) | 张国栋 主编 | 20.00 |
| 金相实验技术(第2版)(本科教材) | 王 岚 等编 | 32.00 |
| 金属材料工程专业实习实训教程(本科教材) | 范培耕 主编 | 33.00 |
| 特种冶炼与金属功能材料(本科教材) | 崔雅茹 等编 | 20.00 |
| 耐火材料(第2版)(本科教材) | 薛群虎 主编 | 35.00 |
| 机械工程材料(本科教材) | 王廷和 主编 | 22.00 |



目 录

| | |
|-------------------------------|----|
| 1 绪论 | 1 |
| 1.1 能源与环境 | 1 |
| 1.2 新能源 | 1 |
| 1.3 太阳能 | 3 |
| 1.4 太阳电池的研究和应用历史 | 4 |
| 1.5 中国太阳电池的产业现状与未来 | 5 |
| 2 太阳能光电转换材料及物理基础 | 9 |
| 2.1 半导体材料 | 9 |
| 2.2 半导体中载流子的统计 | 13 |
| 2.3 费米能级和载流子的统计 | 13 |
| 2.3.1 费米分布函数 | 13 |
| 2.3.2 费米能级 | 14 |
| 2.4 本征半导体的载流子密度 | 15 |
| 2.4.1 本征半导体 (intrinsic) | 15 |
| 2.4.2 本征半导体的费米能级 | 15 |
| 2.4.3 本征载流子密度 n_i | 16 |
| 2.5 PN 结 | 17 |
| 2.5.1 PN 结的形成及其杂质分布 | 17 |
| 2.5.2 PN 结的空间电荷区与内建电场 | 19 |
| 2.5.3 热平衡状态下的 PN 结能带结构 | 19 |
| 2.5.4 PN 结的伏安特性曲线 | 20 |
| 2.5.5 偏置条件下的 PN 结 | 21 |
| 2.5.6 理想 PN 结的伏安特性 | 24 |
| 2.6 半导体材料的光吸收 | 25 |
| 2.7 光生伏特效应 | 26 |
| 2.7.1 PN 结的光伏效应 | 26 |
| 2.7.2 光照 PN 结的电流-电压方程 | 26 |

| | |
|------------------------------|----|
| 3 硅太阳能电池的结构和制备 | 29 |
| 3.1 硅太阳能电池的结构和光电转换效率 | 29 |
| 3.1.1 硅太阳能电池的结构 | 29 |
| 3.1.2 硅太阳能电池的光电转换效率及测试 | 31 |
| 3.2 晶硅太阳能电池的基本生产工艺 | 34 |
| 3.2.1 硅片检测 | 34 |
| 3.2.2 表面制绒 | 34 |
| 3.2.3 扩散制结 | 35 |
| 3.2.4 去磷硅玻璃 | 36 |
| 3.2.5 等离子刻蚀 | 36 |
| 3.2.6 镀减反射膜 | 36 |
| 3.2.7 丝网印刷 | 37 |
| 3.2.8 快速烧结 | 37 |
| 4 硅及其化合物 | 39 |
| 4.1 硅元素 | 39 |
| 4.2 硅单质及其性质 | 39 |
| 4.2.1 硅的物理性质 | 39 |
| 4.2.2 硅的化学性质 | 42 |
| 4.2.3 硅的分类及应用 | 43 |
| 5 硅的提纯 | 45 |
| 5.1 太阳能电池用硅材料 | 45 |
| 5.2 化学提纯 | 45 |
| 5.2.1 中间产物的合成 | 45 |
| 5.2.2 中间产物的提纯 | 45 |
| 5.2.3 中间产物的还原 | 46 |
| 5.3 物理提纯 | 46 |
| 5.3.1 湿法提纯 (酸浸) | 46 |
| 5.3.2 分凝现象 | 47 |
| 5.3.3 正常凝固 | 48 |
| 5.3.4 定向凝固 | 48 |
| 5.3.5 区域提纯 | 50 |
| 5.3.6 杂质蒸发 | 53 |

| | |
|--------------------------------|-----|
| 6 单晶硅材料 | 54 |
| 6.1 单晶硅的生长 | 54 |
| 6.1.1 硅单晶的区熔生长 (FZ) | 54 |
| 6.1.2 硅单晶的直拉生长 (CZ) | 56 |
| 6.2 单晶硅中的缺陷和杂质 | 63 |
| 6.2.1 单晶硅中的缺陷 | 64 |
| 6.2.2 单晶硅中的杂质 | 67 |
| 6.2.3 单晶硅中杂质和缺陷的控制与利用 | 72 |
| 7 多晶硅的制备及其缺陷和杂质 | 74 |
| 7.1 冶金级硅的制备 | 74 |
| 7.1.1 冶金级硅生产工艺 | 74 |
| 7.1.2 工业硅熔炼过程反应机理 | 75 |
| 7.2 高纯多晶硅制备方法 | 77 |
| 7.2.1 三氯氢硅还原法 (SIMENS 法) | 77 |
| 7.2.2 硅烷热分解法 | 79 |
| 7.2.3 太阳能级多晶硅制备新工艺及技术简介 | 81 |
| 7.3 铸造多晶硅的制备及其杂质和缺陷 | 82 |
| 7.3.1 铸造多晶硅的制备 | 82 |
| 7.3.2 铸造多晶硅中的缺陷和杂质 | 93 |
| 8 硅材料加工 | 107 |
| 8.1 单晶硅的加工 | 108 |
| 8.1.1 硅抛光片的几何参数及一些参数定义 | 109 |
| 8.1.2 割断 | 112 |
| 8.1.3 滚圆和切方块 | 113 |
| 8.1.4 切片 | 113 |
| 8.1.5 倒角 | 114 |
| 8.1.6 磨片 | 114 |
| 8.1.7 化学腐蚀 | 115 |
| 8.1.8 抛光 | 115 |
| 8.1.9 包装和储存 | 118 |
| 8.2 多晶硅的加工 | 119 |
| 8.3 硅片腐蚀和抛光工艺的化学原理 | 120 |
| 8.3.1 硅片腐蚀工艺的化学原理 | 120 |

| | | |
|--------|------------------------|-----|
| 8.3.2 | 抛光工艺的化学原理 | 121 |
| 8.4 | 硅片清洗及原理 | 122 |
| 8.4.1 | 清洗的作用 | 122 |
| 8.4.2 | 清洗的原理 | 122 |
| 9 | 硅薄膜材料 | 125 |
| 9.1 | 非晶硅薄膜材料 | 125 |
| 9.1.1 | 非晶硅薄膜的特征及基本性质 | 126 |
| 9.1.2 | 非晶硅薄膜的制备 | 127 |
| 9.1.3 | 非晶硅薄膜的缺陷及钝化 | 130 |
| 9.2 | 多晶硅薄膜材料 | 132 |
| 9.2.1 | 多晶硅薄膜的特征和基本性质 | 132 |
| 9.2.2 | 多晶硅薄膜的制备 | 133 |
| 9.2.3 | 多晶硅薄膜的晶界和缺陷 | 138 |
| 10 | 硅材料的测试与分析 | 139 |
| 10.1 | 硅材料的电学参数测量 | 139 |
| 10.1.1 | 导电型号的测量 | 139 |
| 10.1.2 | 电阻率的测量 | 141 |
| 10.1.3 | 少子寿命的测量 | 144 |
| 10.1.4 | 霍尔系数的测定 | 153 |
| 10.1.5 | 迁移率的测量 | 155 |
| 10.2 | 硅材料物理化学性能的分析 | 156 |
| 10.2.1 | X射线分析 | 156 |
| 10.2.2 | 光谱分析 | 158 |
| 10.2.3 | 质谱与能谱分析 | 163 |
| 10.3 | 硅晶体结构特性的检测 | 165 |
| 10.3.1 | 表面机械损伤和硅单晶中应变的测量 | 165 |
| 10.3.2 | 晶向的测定 | 166 |
| 10.3.3 | 膜厚的测量 | 167 |
| | 参考文献 | 169 |

1 绪 论

1.1 能源与环境

能源是人类赖以生存和发展的重要物质基础，是整个世界发展和经济增长的最基本的驱动力，在工业、农业、国防、交通运输等方面扮演着重要的角色。从能源发展史可以看出，能源开发与利用是人类生产活动重要的动力来源，是社会经济进步的重要支撑条件。从“火与柴草”时代的亚非农耕文明，到英国主导的“煤炭与蒸汽机”工业革命时代，再到美国主导的“石油与内燃机”的能源变革，每一次能源的变革，都标志着社会生产力的巨大跃迁。

目前，石油、天然气和煤炭这三种能源占据了全球 80% 以上的能源份额。这三种能源又被称为“化石能源”，因其是由远古时代的动植物化石埋藏于地下演变而来的。化石能源有着独特的优点：（1）能量密度高；（2）便于开采、运输和储存；（3）储量相对较大，成本相对低。

化石能源曾经一度被认为是用之不竭的。这使得化石能源在第一次、第二次工业革命得到广泛的应用，而且，在之后相当长一段时间里在人类经济社会的发展中占据重要地位。

随着人类生活和工业、商业活动对于能源的需求越来越大，传统能源的开采难度越来越高，易开采的煤矿、油田不断枯竭，不少能源的储量只能维持几十年时间。与此同时，化石能源在使用时产生的二氧化碳、二氧化硫、颗粒物、重金属等污染物，不可避免地造成温室效应、酸雨、雾霾等各类污染问题，这些污染已经影响到人类的生活甚至生命。随着国际社会对能源安全、生态环境、异常气候等问题的日益重视，减少化石能源燃烧、加快开发和利用可再生能源已成为世界各国的普遍共识和一致行动。目前，全球能源转型的基本趋势是实现化石能源体系向低碳能源体系的转变，最终目标是进入以可再生能源为主的新能源时代。

1.2 新能源

新能源（new energy）是相对常规能源而言的，所以又称非常规能源，是指传统能源之外的各种能源形式。一般来说，常规能源是指技术上比较成熟且已被大规模利用的能源，而新能源通常是指尚未大规模利用、正在积极研究开发的能源。因此，煤、石油、天然气以及大中型水电被看作常规能源，而太阳能、风

能、现代生物质能、地热能、海洋能以及氢能等被看作新能源。

(1) 太阳能。太阳能作为直接从太阳获得能量的清洁可再生能源, 目前在我国得到较大范围的使用, 主要体现为太阳能热水器等的普及使用。近年来, 在政策的大力支持下, 太阳能产业得到快速发展, 太阳能相关技术如太阳电池等也日臻成熟。中国光伏行业协会公布的数据显示, 2017年, 我国多晶硅产量为24.2万吨, 占全球总产量的56%; 硅片产量约为90GW, 占全球总产量的83%; 电池片产量68GW, 占全球总产量的67%; 电池组件产量达到74GW, 占全球总产量的71%。截至2018年9月底, 我国太阳能光伏发电累计装机容量达到16474.3万千瓦, 新增装机连续6年保持世界第一。

(2) 风能。我国风能资源较为丰富, 风能在我国的利用也较为成熟。2017年我国风电新增并网装机容量占全部电力新增并网装机容量的比例为14.6%, 累计并网装机容量占全部发电装机容量的比例为9.2%。风电新增装机容量占比近几年均维持14%以上, 累计装机容量占比则呈现稳步提升的态势。发电量方面, 2016年全国风电发电量2410亿千瓦时, 占全部发电量的4.1%, 2017年全国风电发电量3057亿千瓦时, 占全部发电量的4.8%, 发电量逐年增加, 市场份额不断提升, 风电已成为继煤电、水电之后我国第三大电源。然而, 风电产业快速发展的同时也遭遇了输出的技术瓶颈, “弃风”现象时有发生。

(3) 核电。核电目前是我国主要的发电来源之一, 地位仅次于煤炭和水电。目前, 我国在运核电机组45台, 装机容量4590万千瓦, 位居全球第三; 在建核电机组11台, 装机容量为1280万千瓦, 规模居世界第一位。

(4) 洁净煤技术。由于煤炭在我国能源结构中的重要地位, 今后很长一段时期内, 煤炭仍将是我国主要的一次能源, 因此, 煤炭的清洁燃烧显得尤为重要。洁净煤技术包括两个方面: 一是直接烧煤洁净技术; 二是煤转化为洁净燃料技术。目前比较成熟的洁净煤技术主要包括型煤加工、洗选煤、水煤浆、动力配煤、煤炭气化、煤炭液化、洁净燃烧和煤气化联合循环发电技术等。

(5) 氢能。近年来, 随着氢能应用技术逐渐成熟, 氢能的发展在世界各国备受关注。氢能可广泛应用于燃料电池车辆、发电、储能, 也可掺入天然气用于工业和民用燃气。氢能具有可规模化储存的特性, 其广泛应用可部分替代石油和天然气, 成为能源消费的重要组成部分。

我国在氢能研究领域已经取得很多重要成果, 燃料电池、燃料汽车技术都已成熟。近年来我国燃料电池汽车产销量保持每年千辆左右, 2018年我国燃料电池汽车产量达到1619辆, 相比2017年增加27%, 燃料电池需求51MW。

(6) 生物质能。生物质能是指生物排泄和代谢的有机物质所蕴含的能量。生物质能是接近零排放的绿色能源, 越来越多的国家将发展生物质能作为替代化石能源、保障能源安全的重要战略措施, 生物质能在许多国家能源供应中的作用

正在不断增强。生物质发电技术是目前生物质能应用方式中最普遍、最有效的方法之一，在欧美等发达国家，生物质能发电已形成非常成熟的产业，成为一些国家重要的发电和供热方式。生物质发电分为直接燃烧发电、混合燃烧发电、生物质气化发电和沼气发电等不同类型。

(7) 地热能。地热应用前景广阔，主要指的是有效利用地下蒸汽和地热水，用途可以发电、供暖等。地热能通常分为浅层地热能、水热型地热能、干热岩型地热能。受资源所限，地热发电站主要集中在西藏地区。在其他地区，地热也正得到越来越广泛的应用。“十二五”期间，中国地质调查局组织完成全国地热能资源调查，对浅层地热能、水热型地热能和干热岩地热能资源分别进行评价。结果显示，中国大陆 336 个主要城市浅层地热能年可采资源量折合 7 亿吨标准煤，可实现供暖（制冷）建筑面积 320 亿平方米，其中黄淮海地区和长江中下游地区最适合。

(8) 潮汐能。潮汐能是一种海洋能，是由于太阳、月球对地球的引力以及地球的自转导致海水潮涨和潮落形成的水的势能。我国海岸线绵长，潮汐能丰富，主要集中在浙江、福建、广东和辽宁等省。我国潮汐能发展已有 40 多年的历史，建成并长期运行的潮汐电站八座，最大的是温岭市江夏潮汐试验电站。

1.3 太阳能

太阳能是资源潜力最大的可再生能源，可利用的技术包括制热、发电、采光和制冷等，目前得到广泛利用的是太阳能热水器和光伏发电。根据能源中长期规划纲要，到 2020 年，要使中国太阳能热水器总集热面积达到 2.7 亿平方米，年替代 3500 万吨标准煤。光伏发电今后较长时间仍主要集中在解决偏远地区无电人口的用电方面，同时开展并网光伏发电的试点和示范。到 2020 年，将使光伏发电总容量达到 100 万千瓦。

太阳能热水器作为我国近年来迅速发展的新型产业，已形成完整的产业体系，年总产值已经接近 110 亿元。2007 年，中国太阳能热水器产量的增长速度约为 30%，年产量达 2340 万平方米，总保有量约为 10800 万平方米。2007 年，太阳能热水器市场销售额约为 320 亿元人民币，产值亿元人民币以上的企业有 20 多家。太阳能热水器的出口额增长约为 28%，6500 万美元左右，产品出口欧洲、美洲、非洲、东南亚等 50 多个国家和地区。但在应用技术方面，我国与欧盟、日本和美国等还有一定差距。目前，发达国家的太阳能热水器与建筑进行了较好的结合，向太阳能建筑一体化方向发展。

太阳能光伏发电作为最有发展前途的发电方式，目前由于建设成本较高，还难以大规模商业化发展，但在解决偏远地区用电方面已经发挥了重要的作用。我国已经建成 1000 多个太阳能光伏电站，解决了约 100 万人口的用电问题。

目前太阳能光伏发电居世界各国前列的是日本、德国和美国。中国光伏发电产业于 20 世纪 70 年代起步, 90 年代中期进入稳步发展时期, 太阳能电池及组件产量逐年稳步增加。经过 30 多年的努力, 已迎来了快速发展的新阶段。在“光明工程”先导项目和“送电到乡”工程等国家项目及世界光伏市场的有力拉动下, 我国光伏发电产业迅猛发展。到 2007 年年底, 全国光伏系统的累计装机容量达到 10 万千瓦, 从事太阳能电池生产的企业达到 50 余家, 太阳能电池生产能力达到 290 万千瓦, 太阳能电池年产量达到 1188MW, 超过日本和欧洲, 并已初步建立起从原材料生产到光伏系统建设等多个环节组成的完整产业链, 特别是多晶硅材料生产取得了重大进展, 突破了年产千吨大关, 冲破了太阳能电池原材料生产的瓶颈制约, 为我国光伏发电的规模化发展奠定了基础。

目前, 从能源供应安全和清洁利用的角度出发, 世界各国正把太阳能的商业化开发和利用作为重要的发展趋势。欧盟、日本和美国把 2030 年以后能源供应安全的重点放在太阳能等可再生能源方面。预计到 2030 年太阳能发电将占世界电力供应的 10% 以上, 2050 年达到 20% 以上。大规模的开发和利用使太阳能在整个能源供应中将占有一席之地。

中国《可再生能源法》的颁布和实施, 为太阳能利用产业的发展提供了政策的保障; 《京都议定书》的签订、环保政策的出台和对国际的承诺, 给太阳能利用产业带来机遇; 西部大开发, 为太阳能利用产业提供巨大的国内市场; 中国能源战略的调整, 使得政府加大对可再生能源发展的支持力度, 所有这些都为中国太阳能利用产业的发展带来极大的机会。

1.4 太阳能电池的研究和应用历史

太阳像是一座聚合核反应器, 它一刻不停地向四周空间放射出巨大的能量。它的发射功率为 $3.865 \times 10^{26} \text{ J/s}$ (相当于烧掉 $1.32 \times 10^{16} \text{ t}$ 标准煤释放出来的能量)。地球大气表层所接收的能量仅是其中的 22 亿分之一, 但是地球一年接收的太阳的总能量却是现在人类消耗能源的 12000 倍。另外, 根据文献记载, 太阳的质量为 $1.989 \times 10^{30} \text{ kg}$, 根据爱因斯坦相对论 ($E=mc^2$) 可以计算出太阳上氢的含量足够维持 800 亿年, 而由地质资料得出的地球年龄远远小于这个数字。因此, 可以说太阳能是取之不尽、用之不竭的。

以太阳能发展的历史来说, 光照射到材料上所引起的“光起电力”行为, 早在 19 世纪的时候就已经发现了。

1839 年, 光生伏特效应第一次由法国物理学家 A. E. Becquerel 发现。1849 年术语“光伏”才出现在英语中。

1883 年第一块太阳能电池由 Charles Fritts 制备成功。Charles 用锗半导体上覆上一层极薄的金层形成半导体金属结, 器件只有 1% 的效率。

到了1930年代,照相机的曝光计广泛地使用光起电力行为原理。

1946年 Russell Ohl 申请了现代太阳电池的制造专利。

到了1950年代,随着半导体物性的逐渐了解,以及加工技术的进步,1954年当美国的贝尔实验室在用半导体做实验发现在硅中掺入一定量的杂质后对光更加敏感这一现象后,第一个太阳电池在1954年诞生在贝尔实验室。太阳电池技术的时代终于到来。

1960年代开始,美国发射的人造卫星就已经利用太阳电池作为能量的来源。

1970年代能源危机,让世界各国察觉到能源开发的重要性。

1973年发生了石油危机,人们开始把太阳电池的应用转移到一般的民生用途上。

1983年,美国在加州建立世界上最大的太阳能电厂,它的发电量可以高达16MW。南非、博茨瓦纳、纳米比亚和非洲南部的其他国家也设立专案,鼓励偏远的乡村地区安装低成本的太阳电池发电系统。

目前,太阳电池产品是以半导体为主要材料的光吸收材料,在器件结构上则使用P型与N型半导体所形成的PN结产生的内电场,从而分离带负电荷的电子与带正电荷的空穴而产生电压。由于晶体硅材料与器件在技术的成熟度方面领先于其他半导体材料,最早期的太阳电池极为晶体硅制成,直到近几年晶体硅太阳电池仍有大约90%的市场占有率。除了技术与投资门槛较低以外,不用担心硅原料匮乏等都是造成其市场占有率高的主因。

在晶体硅太阳电池之后,大约从1980年起开始有非晶硅薄膜太阳电池产品进入市场,率先应用于小型电子产品(如计算机、手表等),接着因技术演进而有大面积的太阳电池模块用于建筑物,甚至以其可弯曲的特性创造更宽广的多元应用。只要是具有直接能隙的半导体材料,因其光吸收系数很高,如GaAs、CdTe、CIGS等,都可以作为薄膜太阳电池结构中的光吸收层,厚度只有数微米。比起间接能隙的晶体硅材料(一般需要数百微米的厚度),薄膜太阳电池用料较少,再加上晶体硅原料价格居高不下,在材料成本上会显著低于晶体硅太阳电池。若未来技术成熟度和自主性提升,将有利于市场占有率的提高。

1.5 中国太阳电池的产业现状与未来

地球上太阳能资源的分布与各地的纬度、海拔高度、地理状况和气候条件有关。资源丰度一般以全年总辐射量(单位为 $\text{kW}/\text{m}^2 \cdot \text{年}$)和全年日照总时数表示。我国属太阳能资源丰富的国家之一,辐射总量在 $3.3103 \sim 8.4106 \text{kJ}/\text{m}^2$ 之间。全国总面积2/3以上地区年日照时数大于2000h。我国西藏、青海、新疆、甘肃、宁夏、内蒙古高原的总辐射量和日照时数均为全国最高,属世界太阳能资源丰富地区之一;四川盆地、两湖地区、秦巴山地是太阳能资源低值区;东部、

南部及东北为资源中等区。

随着全球经济的快速发展,煤炭、石油等不可再生能源供应日趋紧张,开发使用新能源已成当务之急。太阳能作为一种丰富、洁净和可再生的新能源,它的开发利用对缓解能源危机、保护生态环境和保证经济的可持续发展意义重大。加快发展我国太阳能光伏产业,做大经济总量,调优产业结构,推进经济转型,是提升国家整体竞争力的必然选择。发展光伏产业的同时,相关技术的发展更新与积累也为以后的可持续发展打下坚实的基础。

中国光伏发电产业于 20 世纪 70 年代起步,当时我国对太阳电池的研究开发工作高度重视。在“七五”期间,非晶硅半导体的研究工作已经列入国家重大课题;“八五”和“九五”期间,我国把研究开发的重点放在大面积太阳电池等方面;90 年代中期进入稳步发展时期,太阳电池及组件产量逐年稳步增加。经过 30 多年的努力,光伏发电已迎来了快速发展的新阶段。在“光明工程”先导项目和“送电到乡”工程等国家项目及世界光伏市场的有力拉动下,中国光伏发电产业迅猛发展。也正是发展过于迅猛,导致目前中国光伏发电产业存在一些不足和问题,归纳总结如下:

(1) 产业全面提升下的隐忧。2008 年以来,我国太阳能光伏产业的发展受全球金融危机的冲击,订单缩减、业绩有所下滑,不过,受国际、国内的市场拉动以及国内相关产业政策的推动,我国太阳能光伏产业出现了快速增长。其中,太阳能多晶硅产量已突破 4000t,太阳电池产量接近 2000MW,居全球首位。但是,当前我国太阳能光伏产业整体水平,尤其在事关产业发展的核心关键技术、装备以及相关产业政策等诸多方面,与技术领先国家相比较还存在较大的差距,导致光伏产业发展面临一系列问题。

(2) 国家战略层面缺乏系统完备的“顶层设计”。德国、西班牙、美国、日本等发达国家的光伏产业发展实践表明,制定并确立长远的光伏产业发展规则、遵循或建立保障机制、实施政府补贴等政策是光伏产业发展与壮大的动力和源泉。当前,全球最受世人瞩目的光伏产业发展计划是美国、日本制定的“面向 2030 年的光伏工业线路图”。该计划均是立足于国家层面的光伏产业发展计划,其中美国的目的是由“以出口带动光伏产业发展转变为”投资国内技术和市场,扩大内需,带动产业显著增长,设定了 2030 年累积装机容量达 200GW 的宏大目标,每年新增装机容量 19GW。届时,光伏发电将占据电力市场较大份额,并成为电力的主要来源。

日本的目的是使未来的光伏研发从“政府指引研发以创建初期光伏系统市场”转变为“基于学术界、产业界和政府间的任务共担与合作的研发模式以创建成熟的光伏系统市场”,设定了 2030 年累积装机容量达 100GW 的发展目标。届时,其光伏发电可以提供约 50% 的日本居民电力消费(约占总电力消费

的10%)。

我国出台的《国民经济和社会发展“十一五”规划纲要》《可再生能源中长期发展规划》《可再生能源发展“十一五”规划》等均涉及太阳能光伏产业发展，明确了未来发展的长远目标。但是，从当前我国光伏产业发展现状、总体趋势看，《可再生能源中长期发展规划》中，2010年的光伏装机容量300MW、2020年的1.8GW、2030年的10GW以及2050年的100GW等发展目标设定明显偏低，相比当前世界光伏产业发展势头显得滞后。在涉及制约产业发展的核心技术、装备等方面，所需攻克的关键技术、突破方向、发展路径等尚未提出明确目标；在涉及光伏并网发电问题方面，并网及运行管理行业标准、并网价格以及系统维护等缺乏相对完整、系统的管理办法和政策细则。

(3) 产业链构建畸形，高纯多晶硅材料成为产业发展瓶颈。从全球太阳能光伏产业发展整体视角看，产业上中下游构成一个典型的“金字塔”模型，即产业上游企业数量相对较少，产业中游企业数量比上游多，产业下游企业数目最多。为此，相对完整、合理的产业链结构，有利于太阳能光伏产业的发展与壮大，但是，当前全球光伏产业链的结构已经发生了明显变化。

当前，我国太阳能光伏产业已逐步拓展步入蓬勃发展时期，多晶硅产能、产量不断扩大，2008年太阳能光伏电池产量已接近2GW。据有关统计数据，自2005年以来，我国多晶硅产量、产能出现爆发式增长，2008年产量接近4480t，产能超过1万吨；预计2009年的产量将超过3万吨，产能面临巨大过剩风险。从产业链的构成、产业发展的整体看，产业链发展已经呈现出“畸形”，“金字塔”模式不复存在，未来产业前景不容乐观。

2008年，全球光伏产业受金融危机影响，多晶硅现货价格一路滑落，使未来我国相关企业面临严峻挑战。同时，在高纯多晶硅制备方面，我国与美、日以及德、意、挪威等欧盟技术领先国家存在较大差距，这是制约我国太阳能光伏产业发展的瓶颈。

(4) 自主知识产权缺乏核心技术和设备有待突破。多晶硅制备，是一项相对复杂的高技术，涉及化工、电子、电气、机械和环保等多个学科。当前，太阳能级多晶硅技术主要包括物理法和化学法。目前，最常用的方法是“改良西门子法”，占据了全球太阳能级多晶硅产量的76%以上，但是，“改良西门子法”对原材料、技术要求很高。与国外技术领先国家相比，我国国内多晶硅厂商主要采用引进“改良西门子法”，整体的制备工艺、关键核心设备仍依赖引进。

另外，其他太阳能级多晶硅制备技术方面，如日本川崎制铁公司及德国的湿法精炼法、日本德山公司的熔融析出法、美国国家可再生能源实验室的无氯技术等工艺已经逐步成熟，并步入规模化生产，而我国在上述相关技术、工艺方面尚无突破。