

江苏高校品牌专业建设工程资助项目



普通高等教育“十三五”规划教材
新能源科学与工程专业系列教材



薄膜太阳能电池 基础教程

侯海虹 张 磊 钱 斌 编著
马玉龙 张 静 黄海宾



科学出版社

普通高等教育“十三五”规划教材
新能源科学与工程专业系列教材

薄膜太阳能电池基础教程

侯海虹 张 磊 钱 斌
马玉龙 张 静 黄海宾 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在简要介绍太阳能电池发展现状及其基本工作原理的基础上,系统讲述非晶硅薄膜太阳能电池、砷化镓薄膜太阳能电池、铜铟镓硒薄膜太阳能电池、碲化镉薄膜太阳能电池以及有机聚合物薄膜太阳能电池等的材料结构特性、材料制备方法、电池类型结构、电池组件工艺过程,以及各类薄膜太阳能电池的基本特性及其未来发展趋势等。

本书深入浅出,通俗易懂,既可作为高等院校新能源及相关专业本科、专科学生的教材,也可作为太阳能光电企业及相关领域工程技术人员的培训及参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

薄膜太阳能电池基础教程/侯海虹等编著. —北京:科学出版社,2016.12
普通高等教育“十三五”规划教材·新能源科学与工程专业系列教材
ISBN 978-7-03-051307-6

I. ①薄… II. ①侯… III. ①薄膜太阳能电池-高等学校-教材
IV. ①TM914.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第313613号

责任编辑:余江 张丽花/责任校对:郭瑞芝

责任印制:霍兵/封面设计:迷底书装

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>

大厂书文印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年12月第一版 开本:720×1000 1/16

2016年12月第一次印刷 印张:7

字数:141 000

定价:25.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

当今世界,随着全球环境污染和能源危机的日益严重,开发可持续发展绿色能源具有重要意义。太阳能光伏发电在保护生态环境和缓解能源危机方面作出了巨大贡献,其使用范围几乎遍及全球。目前光伏产业中主流的电池产品多为晶硅电池,但是硅材料昂贵,晶硅电池制造成本过高。为了解决上述问题,薄膜太阳能电池应运而生。薄膜太阳能电池的优势在于无污染、低耗能、广应用和低成本。在硅材料持续紧张背景下,薄膜太阳能电池已成为国际光伏市场发展的新趋势和新热点。

本书主要围绕薄膜太阳能电池展开,全书共7章。从内容上可分为三个部分。

(1) 薄膜太阳能电池发展的背景、现状及趋势(第1章)。

(2) 太阳能电池基本工作原理和主要性能参数(第2章)。

(3) 各类薄膜太阳能电池的系统介绍(第3~7章)。

第一部分详细介绍国内外太阳能电池,尤其是薄膜太阳能电池的发展状况,并对当前薄膜太阳能电池的研究热点、所面临的主要问题进行分析。

第二部分内容主要是太阳能电池的物理基础,包括PN结形成机理、光生伏特效应、太阳能电池基本工作原理以及主要性能参数表征等,该部分内容为后面章节奠定基础。

第三部分为本书的重点内容。该部分全面系统地介绍非晶硅薄膜太阳能电池、砷化镓薄膜太阳能电池、铜铟镓硒薄膜太阳能电池、碲化镉薄膜太阳能电池以及有机聚合物薄膜太阳能电池的材料与电池基本性质、电池的不同结构、材料与电池及组件的制备工艺,并针对各种电池在产业化生产中的一些关键技术进行讨论。

本书第1~5章由侯海虹负责编写,第6、7章由张磊负责编写。钱斌、张静、马玉龙和黄海宾参与教材的部分编写和整理工作。中山大学太阳能系统研究所所长沈辉教授和常熟理工学院江学范教授对本书的编写提出了宝贵的指导意见,在此表示由衷的感谢。还要特别感谢科学出版社对本书出版和发行提供的鼎力支持。

本书部分内容参阅互联网，由于各种原因，原文作者无法逐一查证和联系，在此深表感谢和歉意！

由于编者水平有限，经验不足，在编写过程中难免存在疏漏和不妥之处，恳请广大读者多提宝贵意见，以帮助本书不断改进和完善。

编 者

2016年10月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 太阳能电池简介	1
1.1.1 太阳能电池的发展背景	1
1.1.2 太阳能电池的发展状况	1
1.1.3 太阳能电池的发展历程及类型	5
1.2 薄膜太阳能电池	6
1.2.1 薄膜太阳能电池的优点	6
1.2.2 我国薄膜太阳能电池的发展现状	6
1.2.3 我国薄膜太阳能电池的发展趋势	11
思考题	12
第 2 章 太阳能电池原理	13
2.1 PN 结	13
2.2 光生伏特效应	14
2.3 太阳能电池工作原理	16
2.3.1 理想太阳能电池	16
2.3.2 实际太阳能电池	17
2.4 太阳能电池的性能参量	18
2.4.1 短路电流	18
2.4.2 开路电压	18
2.4.3 最大输出功率	18
2.4.4 填充因子	19
2.4.5 光电转换效率	19
思考题	20
第 3 章 非晶硅薄膜太阳能电池	21
3.1 非晶硅薄膜太阳能电池的发展状况	21
3.2 非晶硅薄膜材料的基本特点	22
3.3 非晶硅薄膜材料的能带结构	24
3.4 非晶硅薄膜材料的光学特性	25

3.5	非晶硅薄膜材料的光致衰减效应	27
3.6	非晶硅薄膜材料的制备方法	27
3.6.1	等离子体增强化学气相沉积法	28
3.6.2	热丝化学气相沉积法	33
3.6.3	光诱导化学气相沉积法	35
3.7	非晶硅薄膜太阳能电池的类型	36
3.7.1	单结非晶硅薄膜太阳能电池	36
3.7.2	多结非晶硅薄膜太阳能电池	38
3.8	非晶硅薄膜太阳能电池组件制备工艺	40
3.8.1	玻璃衬底非晶硅薄膜太阳能电池组件制备工艺	40
3.8.2	柔性衬底非晶硅薄膜太阳能电池组件制备工艺	43
	思考题	44
第4章	砷化镓薄膜太阳能电池	46
4.1	砷化镓薄膜材料的结构与特点	46
4.1.1	砷化镓薄膜材料的结构	46
4.1.2	砷化镓薄膜材料的特点	46
4.2	砷化镓薄膜材料的制备方法	48
4.2.1	液相外延法	48
4.2.2	有机金属化学气相沉积法	49
4.2.3	分子束外延法	52
4.3	砷化镓薄膜太阳能电池的结构	53
4.3.1	单结砷化镓薄膜太阳能电池	53
4.3.2	双结砷化镓薄膜太阳能电池	55
4.3.3	三结砷化镓薄膜太阳能电池	56
4.4	聚光砷化镓薄膜太阳能电池	58
4.4.1	聚光原理	58
4.4.2	砷化镓薄膜太阳能电池聚光系统	59
4.5	砷化镓薄膜太阳能电池产业发展方向和主要问题	60
4.5.1	砷化镓薄膜太阳能电池产业发展方向	60
4.5.2	砷化镓薄膜太阳能电池产业面临的问题	61
	思考题	61
第5章	铜铟镓硒薄膜太阳能电池	63
5.1	铜铟镓硒薄膜材料的结构及性质	63
5.2	铜铟镓硒薄膜太阳能电池的特点	63

5.3	铜铟镓硒薄膜太阳能电池的发展历程	65
5.4	铜铟镓硒吸收层的制备方法	67
5.4.1	多元共蒸发法	67
5.4.2	金属预置层后硒化法	70
5.4.3	分子束外延法	71
5.4.4	电化学沉积法	71
5.4.5	喷雾热解法	72
5.4.6	纳米颗粒涂覆法	72
5.5	铜铟镓硒薄膜太阳能电池的结构	73
5.6	铜铟镓硒薄膜太阳能电池组件制备工艺	75
5.7	柔性衬底铜铟镓硒薄膜太阳能电池	76
5.7.1	柔性衬底铜铟镓硒薄膜太阳能电池的基本结构	77
5.7.2	柔性衬底铜铟镓硒薄膜太阳能电池的关键技术	78
5.8	铜铟镓硒薄膜太阳能电池的研究热点及前景	80
	思考题	82
第 6 章	碲化镉薄膜太阳能电池	83
6.1	背景介绍	83
6.2	碲化镉薄膜材料的结构和性质	84
6.3	碲化镉薄膜材料的制备方法	85
6.3.1	近空间升华法	85
6.3.2	蒸发单质堆垛层退火法	86
6.3.3	原子层沉积法	86
6.3.4	金属有机物化学气相沉积法	86
6.3.5	溅射法	86
6.3.6	电沉积法	86
6.3.7	喷雾热解法	86
6.3.8	丝网印刷退火法	87
6.4	碲化镉薄膜太阳能电池的结构	87
6.5	硫化镉/碲化镉薄膜太阳能电池产业发展现状	89
	思考题	92
第 7 章	有机聚合物薄膜太阳能电池	93
7.1	引言	93
7.2	有机薄膜太阳能电池简介	94
7.2.1	单质结构有机聚合物薄膜太阳能电池	94

7.2.2 PN 异质结结构有机聚合物薄膜太阳能电池	95
7.2.3 体异质结结构有机聚合物薄膜太阳能电池	96
7.2.4 染料敏化纳米晶结构薄膜太阳能电池	97
7.3 展望	98
思考题	99
参考文献	100

第 1 章 绪 论

1.1 太阳能电池简介

1.1.1 太阳能电池的发展背景

进入 21 世纪,人类生存面临的最大困难之一是煤、石油、天然气等非可再生能源的日益枯竭和环境污染的日益加剧。美国的 Smalley 教授曾经指出,在未来的 50 年里,人类将面临着随之而来的十大问题,其中能源问题排在首位。目前人类使用的能源中,化石能源占 90%以上,而到 21 世纪中叶,其比例将减少到人类使用能源的一半,达到其极值,之后核能和可再生能源将占主导地位。到 2100 年时,可再生能源将占人类使用能源的 1/3 以上。

在诸多可再生能源中,太阳能所蕴藏的能量是所有其他可再生能源能量总和的上千倍。太阳时时刻刻都在向地球发送着能量,并且这种能量取之不尽,用之不竭。如果仅仅将太阳发射到地球的总辐射功率换算成电功率,可以高达 $1.77 \times 10^{12} \text{kW}$,比目前全世界平均消费电力还要大数亿倍。太阳能不但数量巨大,而且源于太阳的各种绿色能源,如风能、潮汐能、生物质能都属于可再生能源,只要有太阳的存在,能源就像阳光一样源源不断。

太阳能的利用有很多种,可以利用光的热效应,将太阳辐射能转化成热能;也可以利用光生伏特效应,将太阳辐射能直接转换成电能等。在太阳能的有效利用中,太阳能的光电利用成为近些年发展最快、最具活力的研究领域,太阳能电池的研究也随之日益迅速发展起来。太阳能电池具有许多其他发电方式所不具备的优点,如不消耗燃料、不受地域限制、规模可灵活组合、无污染、无噪声、安全可靠、维护简单、建设周期短、最具有大规模应用的可能性等。

1.1.2 太阳能电池的发展状况

为了大力发展太阳能产业,世界各国政府采取了各种政策和措施。美国是最早对太阳能开发进行资助的国家之一,从政府到产业界,政策和资金支持使美国太阳能光伏产业发展迅猛,技术不断更新。1997 年 6 月 26 日,美国总统克林顿签署了“百万屋顶太阳能计划”,计划在 2010 年以前,在 100 万座建筑物上安装太阳能系统,主要是太阳能光伏发电系统和太阳能热利用系统。2009 年 1 月 10 日,美国加利福尼亚州投入 32 亿美元,全面推动“百万屋顶太阳能计划”,于

2016 年在加利福尼亚州兴建 3000MW 太阳能电力系统。2010 年 7 月 21 日，美国参议院能源委员会又通过了“千万太阳能屋顶提案”，该提案计划每年投专项资金用于补贴在建筑上安装太阳能系统，目标是在 2020 年之前安装 1000 万个太阳能系统。图 1.1 为美国夏威夷州的百万光伏电站。

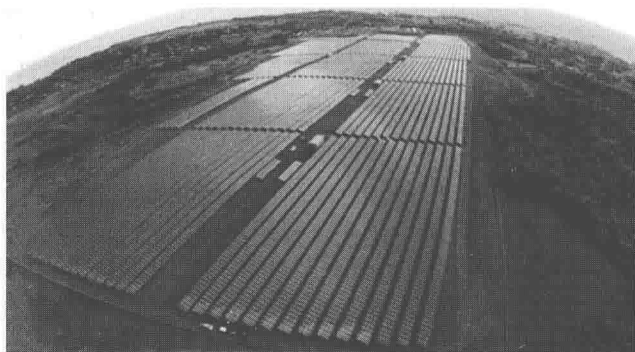


图 1.1 美国夏威夷州的百万光伏电站（图片来源：元器件交易网）

德国的光伏发电研究与应用也一直位于世界前列。早在 1990 年，德国政府就率先推出“1000 太阳能屋顶计划”，为每位安装太阳能屋顶的住户提供补贴。1993 年，该计划被扩展为“2000 太阳能屋顶计划”，至 1997 年完成近万套屋顶光伏发电系统，累计装机容量达 33MW。在此基础上，1998 年，德国政府又进一步提出了“10 万光伏屋顶计划”，于 2000 年开始实施该计划，大量安装光伏发电系统。到 2004 年，德国共安装了 10 万个太阳能屋顶。图 1.2 为德国里伯罗泽太阳能发电站一角。

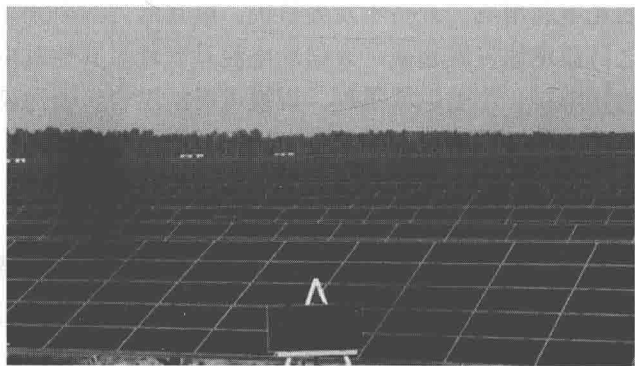


图 1.2 德国里伯罗泽太阳能发电站一角（图片来源：国际在线）

在 1994~2003 年,日本政府通过实施一系列国家补贴政策大力推进了该国光伏产业的发展,2004 年全国累计安装量达 1100MW,成为当时全球光伏容量最大的国家。2010 年,日本又安装了 5000MW 屋顶光伏发电系统。根据汉能发布的《全球新能源发展报告 2015》,2014 年全年日本的光伏累计装机容量全球第三,占全球的 17.4%,仅次于德国和中国。在日本,除了由于积雪等因素日照量不能确保,所有的新建政府办公大楼都按规定采取太阳能发电。日本居民安装太阳能发电设备所花费的投资,可获得 50% 的政府补贴。图 1.3 为日本光伏“水上漂”。

另外,英国、西班牙、瑞士、希腊等国家也为推动各自国内的太阳能产业发展制定了相关的优惠政策和措施,并取得了明显的成效。

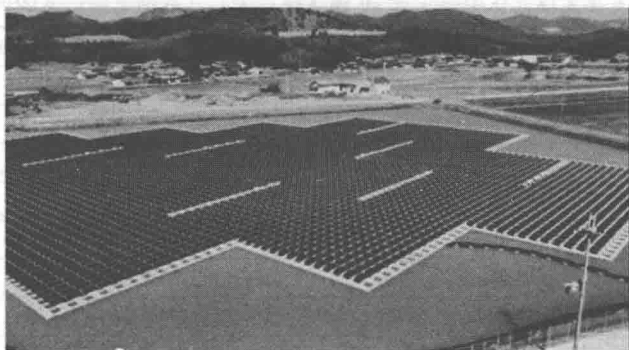


图 1.3 日本光伏“水上漂”(图片来源:北极星太阳能光伏网)

中国光伏发电产业起步于 20 世纪 70 年代,20 世纪 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。2009 年 3 月,财政部、住房和城乡建设部联合发布了《关于加快推进太阳能光电建筑应用的实施意见》与《太阳能光电建筑应用财政补助资金管理暂行办法》,对符合条件的太阳能光电建筑应用示范项目给予相应的补贴。2011 年 6 月河北保定涿源金家井 1MW 太阳能光伏电站成功并网发电,投入商业运行,并且是具备阳光跟踪系统的光伏电站。1MW 光伏发电项目每年可节约标煤约 5500t,减少二氧化碳排放 15000t,减少二氧化硫排放 13.2t。图 1.4 为该项目中依山而建的大面积单晶硅太阳能电池阵列。2011 年 7 月 5 日,山东省最大的企业援藏项目——西藏日喀则太阳能光伏电站一期工程完工并网运行。该电站年发电量 2023 万 kW·h,可满足日喀则市 10 万户农牧民用电需求,每年还可节约标准煤 9000t,减排二氧化碳约 17820t。与此同时,二期 20MW 工程奠基仪式在日喀则经济技术开发区举行。

表 1.1 和表 1.2 分别为 2016 年全球光伏电站企业 20 强(综合类)和 2016 年中国光伏电站企业 20 强(综合类)统计结果。

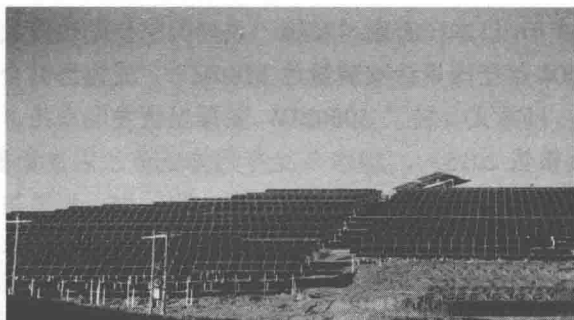


图 1.4 河北保定涞源金家井 1MW 光伏电站（图片来源：中国新闻网）

表 1.1 2016 年全球光伏电站企业 20 强（综合类）（数据来源：太阳能光伏网）

	公司名称	所属国家	营业收入/USD (MILLION)
1	First Solar, Inc.	美国	3600.00
2	阿特斯阳光电力有限公司	中国	3467.63
3	常州天合光能有限公司	中国	3000.00
4	协鑫（集团）控股有限公司	中国	2866.66
5	晶科能源控股有限公司	中国	2477.93
6	Sharp Corporation	日本	2249.86
7	晶澳太阳能控股有限公司	中国	2006.69
8	Hanwha Group	韩国	1799.50
9	SunPower Corp.	美国	1576.50
10	英利绿色能源控股有限公司	中国	1541.00
11	浙江昱辉阳光能源有限公司	中国	1280.00
12	SMA Solar Technology	德国	1092.88
13	顺风国际清洁能源有限公司	中国	1083.63
14	中电科电子装备有限公司	中国	1066.37
15	中利科技集团股份有限公司	中国	1059.74
16	特变电工新疆新能源有限公司	中国	1057.90
17	中盛光电能源股份有限公司	中国	1017.05
18	海润光伏科技股份有限公司	中国	938.31
19	SolarWorld	德国	834.91
20	Renewable Energy Corp.	挪威	755.00

注：1. 此榜单营业收入为光伏电站相关企业的设备收入（组件、逆变器、支架）、电站出售收入、电费收入、电站设计采购施工一体化（Engineering Procurement Construction, EPC）收入、电站设计及电站运维等服务收入；

2. 榜单内企业数据涉及汇率换算均以 2015 年 12 月 31 日汇率为换算标准；

3. 本榜单依据 PVP365 能够调研到的数据形成，如有误差，谨表歉意！

表 1.2 2016 年中国光伏电站企业 20 强（综合类）（数据来源：太阳能光伏网）

	公司名称	营业收入/人民币（万元）
1	阿特斯阳光电力有限公司	2250200.43
2	常州天合光能有限公司	1946700.90
3	协鑫（集团）控股有限公司	1860000.00
4	晶科能源控股有限公司	1608000.00
5	晶澳太阳能控股有限公司	1302200.00
6	英利绿色能源控股有限公司	1000000.00
7	浙江昱辉阳光能源有限公司	830600.00
8	顺风国际清洁能源有限公司	703240.00
9	中电科电子装备有限公司	692000.00
10	中利科技集团股份有限公司	687700.00
11	特变电工新疆新能源有限公司	686500.00
12	中盛光电源股份有限公司	660000.00
13	海润光伏科技股份有限公司	608900.00
14	东方日升新能源股份有限公司	473938.00
15	阳光电源股份有限公司	443100.00
16	常州亿晶光电科技有限公司	441500.00
17	信息产业电子第十一设计研究院科技工程股份有限公司	363000.00
18	江苏爱康科技股份有限公司	321600.00
19	西安隆基硅材料股份有限公司	278600.00
20	昌盛日电太阳能科技股份有限公司	202036.76

注：1. 此榜单营业收入为光伏电站相关企业的关键设备收入（组件、逆变器、支架）、电站出售收入、电费收入、电站 EPC 收入、电站设计及电站运维等服务收入；

2. 榜单内企业数据涉及汇率换算均以 2015 年 12 月 31 日汇率为换算标准；

3. 本榜单依据 PVP365 能够调研到的数据形成，如有误差，谨表歉意！

1.1.3 太阳能电池的发展历程及类型

从目前研究和发展的进程状况来看，太阳能电池主要经历了三个发展阶段。

第一个阶段为晶体硅太阳能电池，即专门使用纯硅生产一种单晶或多晶硅片，由于硅资源有限，生产成本较高，然而，凭借其较成熟的生产技术和较高的光电转换效率，晶体硅太阳能电池目前仍然在太阳能市场上占据主导地位。

第二个阶段的太阳能电池是以半导体薄膜技术为基础的，发展于 20 世纪 90 年代和 21 世纪初期。开发第二代太阳能电池的目标是低成本、低效能、柔软、质

量轻, 电池的转换效率为 10% ~ 15%, 使用廉价的材料和简单、快速的生产工艺实现低成本柔软太阳能电池的生产, 而很少有破损。这些太阳能电池正在被制作到玻璃、塑料薄膜材料或金属箔上。当前已进行大规模化生产的薄膜太阳能电池主要有硅 (Si) 基薄膜太阳能电池、铜铟镓硒 (CIGS) 薄膜太阳能电池、碲化镉 (CdTe) 薄膜太阳能电池、砷化镓 (GaAs) 薄膜太阳能电池、染料敏化薄膜太阳能电池等。

第三个阶段是基于前两个阶段提出的高效、绿色、长寿和价廉的太阳能电池。第三代太阳能电池主要体现在高效上, 如何提高太阳能电池的光电转换效率已经成为当今太阳能电池研究领域最前沿的问题。

1.2 薄膜太阳能电池

1.2.1 薄膜太阳能电池的优点

目前开发的太阳能电池种类繁多, 太阳能发电已经在航天、通信及微功耗电子产品领域中成功地占据了不可替代的位置, 但作为社会整体能源结构的组成部分所占比例还不是很, 出现这种状况的主要原因是太阳能电池的成本较高。要使太阳能发电真正成为能源体系的组成部分, 必须要大幅度地降低成本。薄膜太阳能电池在降低成本方面比晶体硅太阳能电池具有更大的优势。

(1) 晶体硅的光吸收性差, 在大多数太阳能电池中作为吸光半导体。而薄膜半导体是较强的吸收体, 需要较少的半导体材料, 因此实现薄膜化后, 可极大地节省昂贵的半导体材料。

(2) 薄膜太阳能电池的材料制备和电池同时形成, 因此节省了许多工序。

(3) 薄膜太阳能电池通常采用低温工艺技术, 不仅有利于节能降耗, 而且便于采用廉价衬底 (如玻璃、不锈钢等)。

1.2.2 我国薄膜太阳能电池的发展现状

在我国, 薄膜太阳能电池凭借其成本优势, 很早就获得了国家政府的重点支持。早在“七五”规划期间, 原国家科学技术委员会就投入 2000 多万元, 在北京有色金属研究总院建成了年产 100kW 的非晶硅薄膜太阳能电池生产线。进入 21 世纪后, 国家又先后通过科技攻关计划、“863”计划、“973”计划以及各项创新计划, 对薄膜太阳能电池的研发和产业化给予了大力支持。

目前, 我国在硅基薄膜太阳能电池、铜铟硒/铜铟镓硒 (CIS/CIGS) 薄膜太阳能电池、碲化镉 (CdTe) 薄膜太阳能电池、砷化镓 (GaAs) 薄膜太阳能电池以及染料敏化薄膜太阳能电池等方面已取得了良好的进展。

1. 硅基薄膜太阳能电池

我国对非晶硅薄膜太阳能电池的研究始于 20 世纪 70 年代后期,在 80 年代中期达到高潮,并在薄膜材料、电池结构、界面特性、沉积技术、封装技术以及多结技术等方面取得了一些成果:研制出面积为 $1\text{cm}\times 1\text{cm}$ 和 $30\text{cm}\times 30\text{cm}$ 的单结非晶硅薄膜太阳能电池的实验室转换效率分别达到 11.4%和 6.2%。图 1.5 和图 1.6 分别为非晶硅薄膜太阳能电池和非晶硅薄膜太阳能发电站。

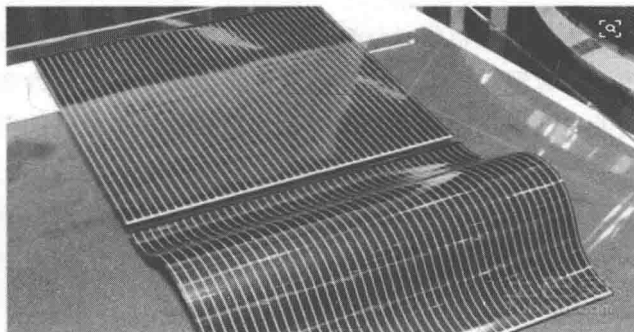


图 1.5 非晶硅薄膜太阳能电池 (图片来源: 搜狗图片)



图 1.6 非晶硅薄膜太阳能发电站 (图片来源: 世纪新能源网)

2000 年以双结非晶硅薄膜太阳能电池为重点的硅基薄膜太阳能电池研究被列为国家重点基础研究发展计划“973”项目。

2008 年,南开大学与福建钧石能源公司合作,建成了国内首条微晶硅/非晶硅叠层薄膜太阳能电池中试线,并试制出效率超过 8%的 0.79m^2 的非晶/微晶硅叠层电池组件。目前,部分国内企业从国外进口生产设备,如美国应用材料公司、日本爱发科、欧瑞康等公司的成套生产线,经过调试,已经能够生产稳定效率大于 8%的微晶硅/非晶硅叠层薄膜太阳能电池组件。

不过,我国薄膜太阳能电池产品还是以非晶硅薄膜太阳能电池为主,电池组件稳定效率 6%左右。国产的硅基薄膜太阳能电池生产设备主要基于美国 EPV 太阳能公司的单室沉积技术。通过不断地消化吸收和完善,目前,国产单室沉积非晶硅薄膜太阳能电池设备的工艺水平及可靠性,已经超过国际同类水平。

硅基薄膜太阳能电池具有轻质、高效、无毒、成本低、耗材少、无污染、能量回收期短、便于大面积连续生产等优点。

2. 砷化镓(GaAs)薄膜太阳能电池

砷化镓薄膜太阳能电池包括单结砷化镓薄膜太阳能电池和多结砷化镓薄膜太阳能电池,单结砷化镓薄膜太阳能电池的平均光电转换效率约为 20%,目前多结砷化镓薄膜太阳能电池以三结为主,国际上光电转换效率最高的空间用三结砷化镓薄膜太阳能电池产品的实验室光电转换效率约为 32%,地面用三结砷化镓聚光薄膜太阳能电池的实验室光电转换效率为 40.7%,三结砷化镓薄膜太阳能电池已凭借高光电转换效率、高抗辐射能力等优势取代了单结砷化镓薄膜太阳能电池,代表了砷化镓薄膜太阳能电池的发展方向。

砷化镓薄膜太阳能电池自诞生以来主要作为空间飞行器用电池,目前已有部分应用于地面聚光发电。国际上空间用三结砷化镓薄膜太阳能电池的实际转换效率已经达到 29.5%,实验室转换效率已经达到 32%;相比而言,我国因起步较晚,目前空间用太阳能电池尚处于由晶体硅太阳能电池向三结砷化镓薄膜太阳能电池过渡的阶段。

我国发射的“神舟八号”“神舟九号”“神舟十一号”“天宫一号”和“天宫二号”均使用了砷化镓薄膜太阳能电池。2016 年 10 月 17 日 7 时 30 分,我国“神舟十一号”载人飞船在酒泉卫星发射中心成功发射,本次所使用的是转换效率为 27.5%的三结砷化镓薄膜太阳能电池。图 1.7 为“神舟十一号”太阳能电池



图 1.7 “神舟十一号”太阳能电池帆板展开示意图(图片来源:新华社)