



硅基异质结太阳电池 物理与器件

PHYSICS AND DEVICES OF
SILICON HETEROJUNCTION SOLAR CELLS

沈文忠 李正平◎编著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

硅基异质结太阳电池 物理与器件

PHYSICS AND DEVICES OF SILICON
HETEROJUNCTION SOLAR CELLS

沈文忠 李正平 编著

科学出版社
北京

内 容 简 介

本书在分析当今高效晶体硅太阳电池技术的基础上引出硅基异质结太阳电池,是一本全面反映硅基异质结太阳电池研究和技术进展的著作。全书首先简要介绍了半导体异质结基本知识和异质结太阳电池的特征与测试手段,然后系统阐述了非晶硅/晶体硅异质结太阳电池的制造工艺与技术、涉及的基本物理问题和模拟研究情况,最后综述了新型无机物硅基异质结太阳电池的研究进展。

本书可作为高等院校半导体材料与器件、光电子、光学工程和光伏科学与技术等相关专业师生的参考用书,也可供太阳能光伏及相关技术领域的研发和工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

硅基异质结太阳电池物理与器件/沈文忠,李正平编著. —北京:科学出版社,2014.8

ISBN 978-7-03-041514-4

I. ①硅… II. ①沈… ②李… III. ①硅基材料-异质结-太阳电池-研究 IV. ①TM914.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第176760号

责任编辑:周 涵/责任校对:张小霞

责任印制:钱玉芬/封面设计:铭轩堂

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>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年8月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014年8月第一次印刷 印张:20 1/2

字数:396 000

定价:118.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

太阳及其提供的能量是人类社会得以产生、存在和延续的最基本要素。近几十年来,以太阳能光伏发电为代表的可再生能源发展迅速,并正在逐步替代传统的化石能源。更高效、更经济并且更环境友好地利用太阳能,尤其是太阳能光伏发电,无疑是相关科技界乃至全人类面临的重大课题。

迄今为止,受益于硅为代表的半导体材料科学技术的蓬勃发展,最广泛的应用和相对低廉的成本使得已经较大规模产业化的太阳能光伏发电技术仍是以硅基 p-n 结为基本电池结构。虽然多种其他材料结构,包括多种半导体薄膜乃至有机材料,正在与硅基光伏结构竞争,但在看得见的未来,硅基材料和结构仍会占主导地位。

近年来,以晶体硅为代表的太阳能光伏产业高速发展,我国在 2007 年以 1088 MW_p^① 的太阳电池产量一举跃居世界第一光伏生产国,2013 年又以超过 12 GW_p 的新增光伏发电装机容量成为世界第一光伏应用国,不到十年时间我国实现了从光伏生产大国到应用大国的转变,太阳能光伏产业目前已经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。2014 年我国新增光伏发电装机容量目标为 14 GW_p,其中分布式发电占 8 GW_p。而目前应用最为广泛的分布式光伏发电系统是建在建筑物屋顶的光伏发电项目,由于屋面资源有限,一般需要转换效率较高的光伏电池组件。

该书重点讲述的非晶硅/晶体硅异质结太阳电池是将半导体能带工程应用于硅基材料和结构实现高效电池的典型成功范例。不同于目前传统的硅基 p-n 同质结,它由于使用非晶硅薄膜和单晶硅形成 p-n 异质结,从能带结构上保证了电池具有获得较高开路电压的可能,而本征非晶硅薄膜的化学钝化作用又使高开路电压的特性得以成功实现,同时结合其他技术提高电池的短路电流和填充因子,最终实现了非晶硅/晶体硅异质结太阳电池的高转换效率。

着眼于此,作者基于对太阳电池长远应用前景的估价,参与相关重大研究课题的实践和经验,或许还有个人偏爱,在全面系统梳理各种太阳电池结构的基础上,在该书中着重论述了非晶硅/晶体硅异质结太阳电池的基本原理、结构特点、制造工艺、相关物理问题和计算模拟优化研究,并详细探讨这类电池结构的科学技术问

① W_p 代表峰值功率,为太阳电池或组件在标准测试条件下最大功率点所对应的功率。

题和实现大规模量产应克服的、目前已可预见的困难。该书具有科学的深度又兼顾实际研发应用，同时指明了该种电池可能的完善途径和技术问题。

该书作者长期潜心于半导体光电过程和光伏电池研究，学有成就，为著作该书付出诸多辛劳。我初读该书后，深感是相关领域的一本好书，一定能使从事太阳能光伏能量转换和相关半导体光电物理基础研究、产品研发、教育乃至推广的学者、工程师和学生获益。

沈学礎

2014年4月

前 言

化石燃料能源的使用促进了人类社会的进步,但是化石燃料的过度消耗也引起了全球气候变暖和生态环境的恶化,给人类的生存带来了巨大的威胁。改变能源消费结构,大力发展可再生能源,已成为世界各国的共识。在众多的可再生能源中,太阳能因其具有取之不尽、用之不竭、清洁安全无污染、应用地域广阔等特点,因此特别受到人们的重视。太阳能的利用主要包括光热转换和光电转换。光热转换是指将太阳散发的能量聚集起来,转换成热能,如太阳能热水器等,也包括将太阳能转换成热能,再利用热能发电的光热发电。光电转换是指利用半导体的光生伏特效应,通过太阳能电池器件将太阳光转换成电能,即光伏发电,如太阳能光伏电站和发电系统。

世界太阳能光伏发电科技和应用发展迅猛,到2012年年底全世界光伏累计装机容量已突破100 GW_p的里程碑节点,仅2013年单年全球光伏发电系统新增装机容量超过37 GW_p,预计光伏发电将在2030年占到世界能源供给的10%,对世界的能源供给和能源结构调整做出实质性的贡献。光伏发电需要通过太阳能电池组件实现能量转换,目前仍以第一代的晶体硅太阳能电池组件为主,其市场份额超过80%,未来10~20年内仍将是市场主流,因此提高晶体硅太阳能电池的转换效率对于确保其优势地位特别重要。

随着技术的进步,晶体硅太阳能电池的转换效率逐年提高。在当前光伏工业界,单晶硅太阳能电池的转换效率已达到20%以上,多晶硅太阳能电池的转换效率已达18%以上。然而大规模生产的、转换效率达21%以上的硅基太阳能电池有美国SunPower公司的背接触太阳能电池和日本松下公司的带本征薄层的非晶硅/晶体硅异质结太阳能电池。其中,非晶硅/晶体硅异质结太阳能电池是以晶体硅为衬底,在其上沉积非晶硅薄膜形成p-n异质结,其电池结构和工艺与常规晶体硅太阳能电池有很大的区别,但是非晶硅/晶体硅异质结太阳能电池结合了晶体硅电池和硅基薄膜电池的优点,具有制造流程短、工艺温度低、适合使用薄型硅片、转换效率高和发电量多等特点。

在当今众多的高效晶体硅太阳能电池方案中,非晶硅/晶体硅异质结太阳能电池无疑是关注度很高的一种。在非晶硅/晶体硅异质结太阳能电池的研发和生产领域,日本松下公司可谓一枝独秀,2013年其报道的最高电池效率达24.7%,电池面积~100 cm²,

达到商用规格大小。随着松下公司关于带本征薄层的非晶硅/晶体硅异质结太阳能电池的主体专利在 2010 年到期,国内外诸多研究机构和企业都加大了对非晶硅/晶体硅异质结太阳能电池的研发与投入,然而所得电池效率与松下公司都存在较大的差距。

除了关注太阳能电池转换效率的提高,其低成本制造更显重要,这是关系到太阳能光伏发电能否与其他能源技术相竞争的关键问题。我国为实现高效率、低成本的硅基异质结太阳能电池,在“十二五”期间启动了两个“MW 级薄膜硅/晶体硅异质结太阳能电池产业化关键技术”863 计划课题,力图能够深入理解薄膜硅/晶体硅异质结太阳能电池高效机理,开发出高性能薄膜硅/晶体硅异质结太阳能电池成套制备技术,实现薄膜硅/晶体硅异质结太阳能电池中试,建成 MW 级产能的中试示范线,使我国具有高效薄膜硅/晶体硅异质结太阳能电池产业化的能力。

本书作者有幸参加上述 863 计划课题之一,在非晶硅/晶体硅异质结太阳能电池的理论研究和实际研发方面做了大量的工作,总结课题研究成果,得以形成本书。我们旨在深入论述非晶硅/晶体硅异质结太阳能电池的结构特征、制造工艺与技术、涉及的基本物理问题和相关模拟研究的情况,同时还涉及其他新型无机物硅基异质结太阳能电池的研究进展。本书是国内第一部全面介绍硅基异质结太阳能电池研究和进展的学术专著,在编著本书时作者希望尽可能反映当前硅基异质结太阳能电池的科研和生产最先进水平和技术,同时力求写成一本既具有基础理论阐述,又具有实际指导意义和实用价值的参考用书。

全书共 7 章,从内容上可以分为三个层面:①高效晶体硅太阳能电池、异质结基本知识和相关表征测试技术的介绍(第 1、2、3 章);②非晶硅/晶体硅异质结太阳能电池的制造工艺与技术、涉及的物理问题和模拟研究(第 4、5、6 章);③新型无机物硅基异质结太阳能电池的介绍(第 7 章)。其中,第 1 章为绪论,全面介绍了当今高效晶体硅太阳能电池技术,并引出非晶硅/晶体硅异质结太阳能电池,阐述了硅基异质结太阳能电池的历史、结构与特点、效率进展情况等,通过本章的介绍,读者能基本了解当今晶体硅电池的前沿技术和硅基异质结太阳能电池的进展。第 2 章概括了半导体异质结的基本知识,为读者能够理解非晶硅/晶体硅异质结太阳能电池作必要的铺垫。第 3 章介绍了与异质结太阳能电池相关的表征与测试。第 4 章则按照非晶硅/晶体硅异质结太阳能电池的制作工序,逐一叙述每一步工艺过程中的科学与技术问题,并简单介绍了异质结太阳能电池组件的应用。第 5 章论述了非晶硅/晶体硅异质结太阳能电池中涉及的物理问题,力图从理论上描述异质结太阳能电池。第 6 章对硅基异质结太阳能电池的计算机模拟研究进行介绍。第 7 章介绍新型无机物硅基异质结太阳能电池的研究状况。

本书的出版得到了国家科学技术学术著作出版基金的资助，特别感谢我国半导体物理和半导体器件物理专家、中国科学院上海技术物理研究所沈学础院士欣然为本书作序。作者同时感谢国家 863 计划项目组(2011AA050502)成员的帮助和鼓励；感谢上海交通大学太阳能研究所曾洋、华夏、钟思华等博士生帮助收集资料，并在本书成稿后仔细阅读和校核。

虽然作者在写作过程中精益求精，力求介绍全面、表述清晰、叙述流畅，但是限于作者学识和水平，加之时间仓促、收集的资料有限，因此本书错误和遗漏在所难免，恳请读者和同行批评指正。

作 者
2014 年 4 月
于上海交通大学

目 录

序

前言

第 1 章 绪论——高效晶体硅和异质结太阳电池	1
1.1 太阳和太阳能	1
1.2 太阳电池	2
1.3 晶体硅太阳电池的结构	4
1.4 晶体硅太阳电池的效率分析	5
1.5 高效晶体硅太阳电池介绍	6
1.5.1 钝化发射极太阳电池	6
1.5.2 氧化铝钝化的太阳电池	10
1.5.3 选择性发射极太阳电池	12
1.5.4 MWT 太阳电池	18
1.5.5 n 型晶体硅太阳电池	20
1.5.6 IBC 太阳电池	24
1.6 非晶硅/晶体硅异质结太阳电池	28
1.6.1 HIT 太阳电池的结构与特点	29
1.6.2 获得高效率 HIT 太阳电池的方法	31
1.6.3 HIT 太阳电池的效率进展	32
1.6.4 非晶硅/晶体硅异质结太阳电池的其他单位研发情况	33
1.7 本书的安排	36
参考文献	37
第 2 章 半导体异质结基本知识	44
2.1 异质结基本概念	44
2.1.1 理想异质结的能带图	44
2.1.2 反型异质结的主要公式	46
2.1.3 异质结中的界面态	48
2.1.4 有界面态的异质结能带图	50
2.2 异质结的伏安特性	51
2.2.1 尖峰势垒高度的影响因素	52

2.2.2	理想突变异质结的伏安特性	53
2.2.3	有界面态的异质结的伏安特性	59
2.3	异质结的注入特性	62
2.3.1	高注入特性	62
2.3.2	超注入特性	63
2.4	异质结的光电特性	64
2.4.1	反型异质结的光伏特性	65
2.4.2	反型异质结的光电流和光谱响应	66
2.5	晶体硅和非晶硅薄膜的基本物理参数	72
	参考文献	74
第3章	与异质结太阳能电池相关的表征与测试	75
3.1	太阳能电池的基本表征参数	75
3.1.1	太阳能电池等效电路	75
3.1.2	太阳能电池的基本参数	78
3.1.3	非晶硅/晶体硅异质结太阳能电池的 $I-V$ 曲线	81
3.1.4	太阳能电池的温度系数	81
3.1.5	太阳能电池的标准测试条件	83
3.2	太阳能电池的光谱响应和量子效率	84
3.2.1	光谱响应	84
3.2.2	量子效率	85
3.3	少数载流子寿命及其测量	88
3.3.1	非平衡少数载流子	88
3.3.2	少数载流子寿命	89
3.3.3	少数载流子寿命对太阳能电池性能的影响	92
3.3.4	少数载流子寿命的测量	94
3.4	薄膜的表征测试技术介绍	97
3.4.1	拉曼光谱	98
3.4.2	傅里叶变换红外吸收光谱	101
3.5	异质结太阳能电池的电容效应及其 $I-V$ 检测对策	103
3.5.1	p-n 结的电容	103
3.5.2	电容效应对太阳能电池 $I-V$ 测试的影响	105
3.5.3	异质结太阳能电池的 $I-V$ 检测对策	108
	参考文献	112
第4章	非晶硅/晶体硅异质结太阳能电池制备	115
4.1	非晶硅/晶体硅异质结太阳能电池的结构	115

4.2	非晶硅/晶体硅异质结太阳能电池的制作工序	117
4.3	硅片的湿化学处理	118
4.3.1	去损伤层	120
4.3.2	制绒	121
4.3.3	表面氧化层的去除和表面调控	124
4.4	非晶硅薄膜的沉积	126
4.4.1	硅薄膜沉积设备	126
4.4.2	本征非晶硅薄膜	129
4.4.3	掺杂非晶硅薄膜	141
4.4.4	非晶硅薄膜的光吸收	147
4.5	TCO 薄膜的沉积	148
4.5.1	TCO 薄膜的制备方法和设备	149
4.5.2	硅异质结太阳能电池对 TCO 薄膜的要求	153
4.5.3	TCO 薄膜在硅异质结太阳能电池上的应用	155
4.6	电极制作	159
4.6.1	电极制作的方法	160
4.6.2	丝网印刷在硅异质结太阳能电池上的应用	161
4.7	非晶硅/晶体硅异质结太阳能电池的薄片化	165
4.7.1	硅片减薄对太阳能电池的影响	166
4.7.2	薄型 HIT 太阳能电池	166
4.8	发射极在背面的硅异质结太阳能电池	168
4.8.1	背发射极硅异质结太阳能电池	169
4.8.2	背接触硅异质结太阳能电池	170
4.9	非晶硅/晶体硅异质结太阳能电池组件的应用	173
4.9.1	HIT 电池组件	173
4.9.2	HIT 双面组件	175
4.9.3	关于 HIT 组件的 PID	177
	参考文献	179
第 5 章	非晶硅/晶体硅异质结太阳能电池中的物理问题	189
5.1	非晶硅/晶体硅异质结太阳能电池的能带	189
5.1.1	非晶硅/晶体硅异质结太阳能电池的能带图	189
5.1.2	非晶硅/晶体硅异质结的带阶	193
5.1.3	TCO 薄膜对非晶硅/晶体硅异质结能带的影响	197
5.2	非晶硅/晶体硅异质结太阳能电池中的钝化机制	198
5.2.1	硅异质结太阳能电池的开路电压和钝化	198
5.2.2	本征非晶硅的钝化	202

5.2.3	掺杂非晶硅的钝化	206
5.2.4	其他钝化方案	208
5.3	非晶硅/晶体硅异质结太阳能电池的界面	210
5.3.1	本征非晶硅/掺杂非晶硅界面	210
5.3.2	掺杂非晶硅/TCO 薄膜界面	212
5.4	非晶硅/晶体硅异质结太阳能电池中的电输运特性	216
5.4.1	非晶硅/晶体硅异质结电池中的电荷输运基本过程	217
5.4.2	电流-电压特性	218
5.5	结语	225
	参考文献	226
第 6 章	硅基异质结太阳能电池的模拟	233
6.1	太阳能电池模拟的基本原则	233
6.1.1	光学模拟	234
6.1.2	电学模拟	234
6.2	用于异质结太阳能电池模拟的软件简介	237
6.2.1	AFORS-HET 软件简介	237
6.2.2	AMPS 软件简介	238
6.3	非晶硅/晶体硅异质结太阳能电池的模拟研究	239
6.3.1	以 n 型单晶硅为衬底的硅异质结太阳能电池模拟	239
6.3.2	以 p 型单晶硅为衬底的硅异质结太阳能电池模拟	246
6.4	IBC-SHJ 太阳能电池的二维模拟	249
6.4.1	模拟用 IBC-SHJ 太阳能电池的基本结构	250
6.4.2	IBC-SHJ 太阳能电池的背面几何尺寸模拟优化	251
6.4.3	前表面钝化对 IBC-SHJ 太阳能电池影响的模拟	255
6.4.4	背表面钝化和界面缺陷对 IBC-SHJ 太阳能电池影响的模拟	256
6.5	新结构硅基异质结太阳能电池的模拟研究	260
6.5.1	硅基同质-异质结太阳能电池的模拟研究	260
6.5.2	纳米柱阵列硅异质结太阳能电池的模拟	264
6.5.3	硅基金属化合物半导体异质结太阳能电池的模拟	266
	参考文献	271
第 7 章	新型硅基异质结太阳能电池	277
7.1	硅量子点/晶体硅异质结太阳能电池	277
7.1.1	氧化硅基体中的硅量子点/晶体硅异质结电池	279
7.1.2	碳化硅基体中的硅量子点/晶体硅异质结电池	282
7.1.3	氮化硅基体中的硅量子点及异质结太阳能电池	284

7.2	II-VI族半导体/晶体硅异质结太阳电池	285
7.2.1	CdSe/Si 异质结太阳电池	285
7.2.2	ZnO/Si 异质结太阳电池	287
7.3	III-V族半导体/晶体硅异质结太阳电池	291
7.3.1	GaN/Si 异质结太阳电池	292
7.3.2	InAs/Si 异质结太阳电池	294
7.4	碳/晶体硅异质结太阳电池	295
7.4.1	非晶碳/硅异质结太阳电池	295
7.4.2	CNT/Si 异质结太阳电池	297
7.4.3	石墨烯/硅太阳电池	302
7.5	新型硅基异质结太阳电池的展望	303
	参考文献	304
	索引	311

第 1 章 绪论——高效晶体硅和异质结太阳能电池

能源是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础,也是经济社会发展的重要制约因素,能源安全事关经济安全和国家安全^[1]。目前,世界能源供应主要依赖石油、煤炭、天然气等化石燃料。随着社会的进步和经济的发展,全球能源消费不断增长,而可供人类利用的这类化石能源的储量却越来越少。另一方面,这些传统的化石能源在使用过程中所产生的废弃物,如 CO₂、SO₂、NO_x、尘埃等,对环境的污染和排放温室气体引起的气候变化,给人类社会的生存和发展带来越来越严重的危害。为应对化石能源的不可再生性和对环境的严重污染,必须逐步改变能源消费结构,限制化石能源消费,推动节能和替代能源发展,大力开发可再生的、对环境友好的新能源。世界各国把水能、风能、太阳能、生物质能、潮汐能等各种低碳和无碳的新能源作为今后的发展方向^[1]。其中太阳能无处不有、应用地域广阔,清洁安全无污染,是十分理想的可再生能源,因此特别受到人们的重视,世界各国都在加大对太阳能的开发利用。

1.1 太阳和太阳能

太阳是太阳系的中心天体,是距离地球最近的恒星。太阳的直径约为 1.39×10^6 km,是地球直径的 109 倍;太阳的体积约为 1.412×10^{18} km³,是地球体积的 130 万倍;太阳的质量约为 1.989×10^{27} t,是地球质量的 33 万倍。从化学组成来看,太阳质量的 80%是氢,19%是氦。太阳的表面温度约为 5700 K,而中心温度约为 1.5×10^7 K,压强约为 2000 多亿个大气压。

太阳内部处于高温、高压状态,不断地进行由氢聚变成氦的热核反应,因而每时每刻都在稳定地向宇宙空间辐射能量,太阳的总辐射功率约为 3.8×10^{26} J · s⁻¹。在地球大气层之外,地球—太阳平均距离处(约为 1.5 亿千米),垂直于太阳光方向的单位面积上的辐射功率基本为一个常数。这个辐射强度称为太阳常数(solar constant),相当于大气质量为零(AM0)时的辐射,世界气象组织 1981 年推荐的太阳常数数值为 (1367 ± 7) W · m⁻²。太阳能到达地球的总辐射能量应该是太阳常数与地球表面投影面积的乘积,经推算约为 1.73×10^{17} J · s⁻¹,约为太阳辐射能量的 22 亿分之一。

阳光穿过大气层时至少衰减了 30%,只有约 70%的光线能透过大气层,以直射

光或散射光到达地球表面。到达地球表面的太阳光一部分被表面物体所吸收,另一部分又被反射回大气层。由于地球表面大部分被海洋覆盖,到达陆地表面的太阳能仅占到达地球范围内太阳辐射能的约 10%,即达到陆地表面的能量大约只有 $1.7 \times 10^{16} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$,即使是这个能量也相当于全球一年内消耗总能量的 3.5 万倍。因此太阳提供给地球的能量是巨大无比的。

太阳能是极具潜力的新能源,与石油、煤及核能相比,它具有独特的优点:①太阳能取之不尽,用之不竭,属可再生能源;②太阳能发电不使用燃料,不会产生废弃物,对环境无不良影响,属清洁能源;③太阳能没有地域和资源的限制,有阳光的地方就有太阳能,使用方便安全。因此,太阳能的研究和利用是人类未来能源发展的主要方向之一。

太阳能能量的转化方式主要分为光化学转化、太阳能光热转化和太阳能发电三种。光化学转化是指在阳光的照射下,物质发生化学、生物反应,从而将太阳能转化成其他形式的能量。最常见的植物光合作用,是在植物叶绿素的作用下,二氧化碳和水在光照下发生反应,生成碳水化合物和氧气,从而完成太阳能的转换。太阳能光热转化是指通过反射、吸收等收集太阳能辐射能,使之转化成热能,如在生活中广泛应用的太阳能热水器、太阳能水泵、太阳能温室、太阳能灶等。太阳能发电主要包括光热发电(solar thermal power, STP)和光伏发电(photovoltaic, PV)两种。太阳能光热发电,也叫聚焦型太阳能热发电(concentrating solar power, CSP),它是通过大量反射镜以聚焦的方式将太阳直射光聚集起来,加热工质,产生高温高压的蒸气,蒸气驱动汽轮机发电。光热发电只有接受较高的直接辐射,太阳能才会有价值,受地域限制。而光伏发电是利用光电转换器件将太阳能直接转化成电能,它可用在地球上任何有阳光的地方,不受地域的限制。

1.2 太阳电池

用于光电转换的器件是太阳电池及其组件等光伏产品。太阳电池的工作原理是基于光生伏特效应。1839 年法国的 Becquerel 首先发现了液体电解液中的光电效应。之后人们发现金属-半导体结和半导体 p-n 结上也存在光伏效应。直到 1954 年美国贝尔实验室的 Chapin 等^[2]研制出世界上第一块真正意义上的硅 p-n 结太阳电池,效率为 6%,经过改进后达到 10%,从而拉开了现代太阳能光伏的研发和利用的序幕。20 世纪 70 年代以前,太阳电池主要用于太空卫星和航天器上,至今人类发射的航天器绝大多数是用光伏发电作为动力的,光伏电源为航天事业做出了重要的贡献。20 世纪 70 年代以后,由于技术的进步,太阳电池的材料、结构、制造工艺等方面不断改进,生产成本不断降低,开始在地面应用,光伏发电逐步推广到很多领域。

20世纪90年代,由于太阳电池成本的持续降低,太阳电池实行并网发电,建立太阳能电站成为可能并在全世界范围内逐渐发展。美国、欧洲、日本等先后制定了各种太阳能发展计划和产业扶持政策,促进了太阳能光伏产业的发展。进入21世纪,全球光伏发电迅猛发展,中国在2007年成为全球最大的太阳电池和组件生产国。到2012年全球光伏累计装机容量达到100 GW_p^[3],2013年中国安装光伏组件达12 GW_p以上,成为全球最大的安装应用市场。

迄今为止,人们已研制了100多种太阳电池,分无机太阳电池和有机太阳电池。而无机太阳电池按基体材料分类,一般分为晶体硅(c-Si)太阳电池和薄膜太阳电池。晶体硅太阳电池包括单晶硅太阳电池和多晶硅太阳电池,薄膜太阳电池可分为硅基薄膜太阳电池、化合物薄膜太阳电池等。图1-1为无机太阳电池的分类图。

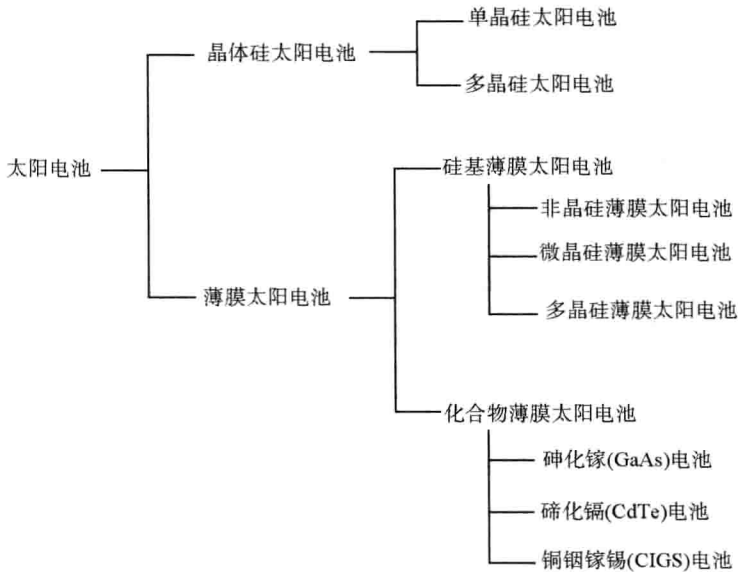


图 1-1 无机太阳电池的分类

到目前为止,太阳能光伏工业仍然是建立在硅材料的基础上,晶体硅太阳电池已经成为当今光伏工业的主流,市场上80%以上的太阳电池是晶体硅太阳电池。尽管被称为“第二代光伏器件”的薄膜太阳电池也取得了长足的进展,但在短期内仍然无法替代晶体硅太阳电池。在晶体硅太阳电池中,单晶硅太阳电池是最早被研究和使用的,至今它仍然是太阳电池的主要品种。多晶硅太阳电池的制造成本相比单晶硅太阳电池而言更具优势,因此其所占市场份额反而超过了单晶硅太阳电池。目前,在实验室中,单晶硅太阳电池的最高转换效率是24.7%(后修正为25%,电池面积4 cm²)^[4],多晶硅太阳电池的最高转换效率是20.3%(电池面积1 cm²)^[5]。在工业化生产中,单晶硅太阳电池的转换效率普遍比多晶硅太阳电池高出1.5%~2%,因此基于晶体硅的

高效太阳能电池技术主要还是以单晶硅太阳能电池为主。

1.3 晶体硅太阳能电池的结构

为方便后面的讨论，首先分析晶体硅太阳能电池的结构和制造工艺。

以 p 型晶体硅太阳能电池为例，常规晶体硅太阳能电池的结构示意图如图 1-2 所示。它是以 p 型硅片为基体，在上表面形成一个 n^+ 层，构成一个 n^+/p 型结构，然后在上表面覆盖一层减反射膜，再在顶区引入前电极；在背面制作背场和背电极。

常规晶体硅太阳能电池的制作工序包括：

(1) 清洗制绒。通过腐蚀去除表面损伤层，并在表面进行制绒，以形成绒面结构达到陷光效果，减少反射损失。

(2) 扩散制结。通过热扩散等方法在硅片上形成不同导电类型的扩散层，以形成 p-n 结。

(3) 刻蚀去边。去除扩散后硅片周边的边缘结。

(4) 去磷硅玻璃。扩散过程中，硅片表面会形成一层含磷的氧化硅，称为磷硅玻璃(PSG)，需要用氢氟酸腐蚀掉。

(5) 镀减反射膜。为进一步提高对光的吸收，在硅片表面覆盖一层减反射膜。目前工业上用等离子体增强化学气相沉积(plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD)方法在硅片上沉积一层 SiN_x 薄膜，这层薄膜同时起到钝化层的作用。

(6) 制作电极。在电池的正面丝网印刷栅线电极，在背面印刷背场(back surface field, BSF)和背电极，并进行干燥和烧结。

(7) 电池测试及分选。

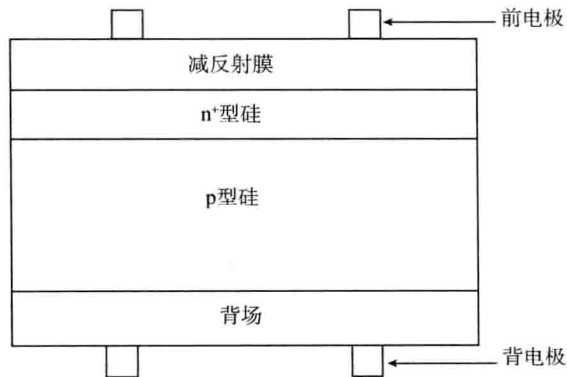


图 1-2 常规晶体硅太阳能电池结构示意图