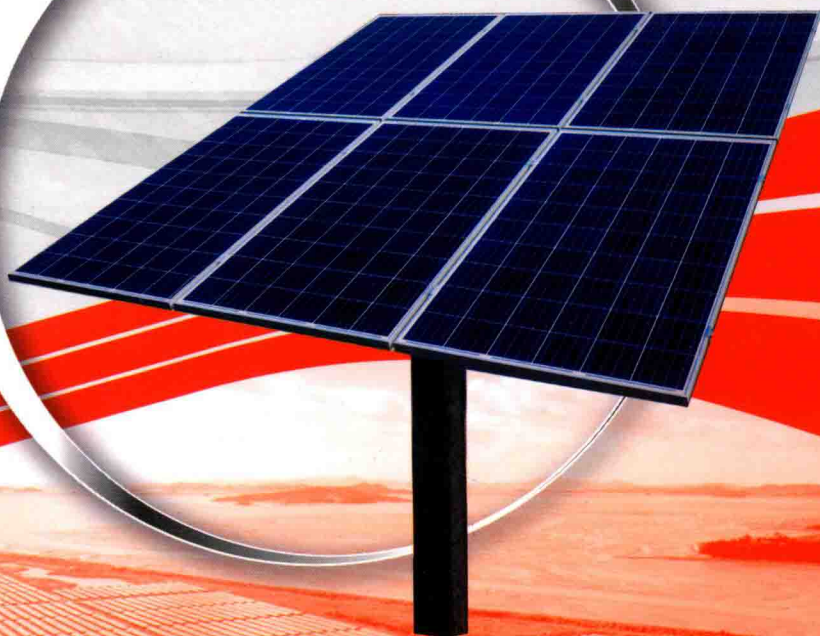


新型太阳电池

材料 · 器件 · 应用

XINXING TAIYANG DIANCHI
CAILIAO QIJIAN YINGYONG

◆ 靳瑞敏 等编著

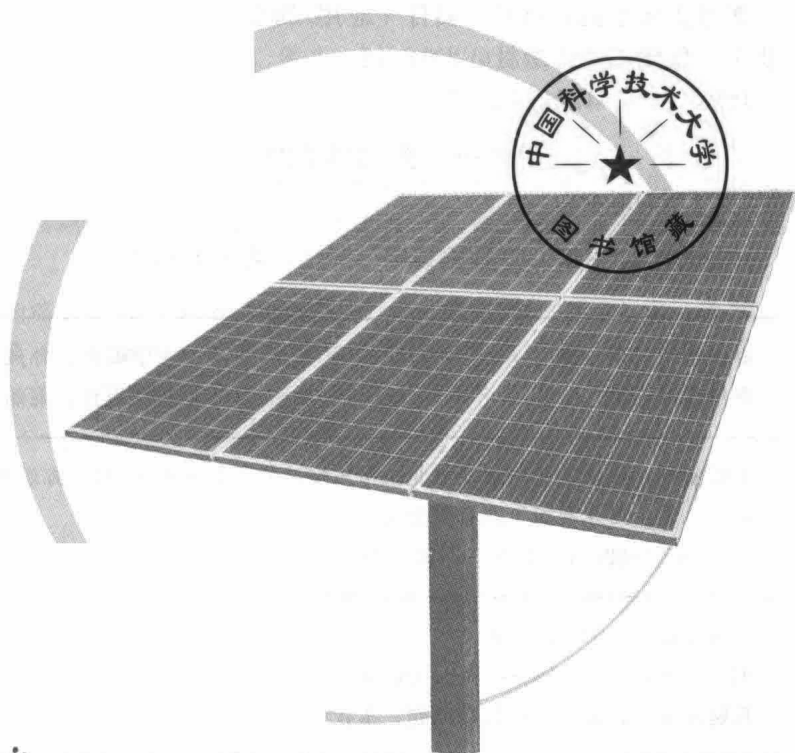


化学工业出版社

新型太阳电池

材料 · 器件 · 应用

◆ 靳瑞敏 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

目前我国光伏太阳能产业与太阳电池行业仍处于高速发展之中。本书以作者长期实践经验和成果为基础,汲取国内外新技术,主要包括:太阳能利用与太阳电池;太阳电池硅材料;生产太阳电池多晶硅技术(如硅片加工、晶硅太阳电池生产、晶硅太阳电池组件生产、太阳电池浆料、硅太阳电池背场铝浆等);还重点介绍了各类新型太阳电池(如上转换材料、钙钛矿太阳电池、量子点太阳电池等),以及新型太阳电池应用系统与技术(如独立型太阳电池系统、并网太阳电池系统、独混合型太阳电池系统、光伏建筑一体化等),既重视基础理论又涉及应用。

本书内容丰富,语言精练,具有很强的实践指导意义和实用价值。本书可供广大从事新材料、新能源、光伏发电、光伏器件等科研院所、企事业单位及相关学科的科研人员和工程技术人员使用,也可作为相关专业在校师生的教学参考书或教材。

图书在版编目(CIP)数据

新型太阳电池:材料·器件·应用/靳瑞敏等编著.
北京:化学工业出版社,2018.11

ISBN 978-7-122-33027-7

I. ①新… II. ①靳… III. ①太阳能电池-研究
IV. ①TM914.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 214083 号

责任编辑:朱 彤
责任校对:边 涛

文字编辑:孙凤英
装帧设计:刘丽华

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装:河北鹏润印刷有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 12½ 字数 327 千字 2019 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888

售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:59.00 元

版权所有 违者必究

目前我国光伏太阳能产业与太阳能电池行业仍然处于高速发展之中。我国太阳能光伏产业从小到大、从弱变强，其应用几乎是从无到有，快速发展；到2015年，无论是太阳能光伏电池、组件产量，还是太阳能光伏的年安装总量，我国已经居于世界第一位。太阳能电池能否与常规能源发电技术相竞争并大规模普及，通常存在两个关键问题：一是具有比较低的生产成本；二是具有比较高的光电转换效率。为了解决这些问题，需要太阳能电池材料技术和电池工艺技术的密切配合。需要提及的是，我国作为太阳能电池生产大国，如何在目前生产技术的基础上，更加有效地利用目前已有的生产线，深入研究太阳能电池工艺的改造和太阳能电池材料技术、新型太阳能电池系统应用技术的创新，这是我国光伏行业面临的重要课题。本书重点关注这一问题，即强调将太阳能电池材料和太阳能电池工艺、新型太阳能电池应用系统与技术紧密配合、相互促进、共同发展，这也是当前太阳能电池行业蓬勃发展的显著特征。

本书汲取当前国内外光伏行业更新理论和实践成果编写而成，同时还介绍作者和同仁在这方面的研究和实践。其中，本书第1章介绍太阳能利用与太阳能电池，第2章介绍半导体太阳能电池原理，第3章介绍太阳能电池硅材料，第4章介绍物理法太阳能电池多晶硅，第5章~第9章分别介绍了硅片加工、晶硅太阳能电池生产、晶硅太阳能电池组件生产、太阳能电池浆料、硅太阳能电池背场铝浆等，第10章介绍新型太阳能电池技术及材料，第11章介绍太阳能电池应用。作者希望能为广大太阳能电池技术领域工作者提供一本有参考价值的参考书。另外，本书还结合大量太阳能电池相关生产一线的具体实际操作内容，因此可以作为太阳能电池技术领域和将要进军该领域的企业和公司的专业知识培训教材。本书可供广大从事新材料、新能源、光伏发电、光伏器件等科研院所、企事业单位及相关学科的科研人员和工程技术人员使用，也可作为相关专业在校师生的教学参考书或教材。

全书具体编写分工如下：由靳瑞敏教授编写第1章、第2章，第6章~第11章；洛阳师范学院张相辉博士编写第3章、第4章；洛阳师范学院张伟英博士编写第5章。

由于太阳能电池技术发展迅速。由于作者的知识面和水平有限，书中肯定会存在疏漏，恳请读者批评指正。

编著者

2018年5月

CONTENTS

目 录

第1章 太阳能利用与太阳电池

1.1 太阳能与可再生能源	001	1.3 太阳电池的发展	004
1.2 太阳能光伏应用	003	习题	007

第2章 半导体太阳电池原理

2.1 半导体简介	008	2.2 太阳电池的基本原理	017
2.1.1 晶体结构	009	2.2.1 太阳电池原理表述	017
2.1.2 能带	011	2.2.2 太阳电池的等效电路	019
2.1.3 电子空穴对	013	2.3 太阳电池的特点和分类	020
2.1.4 P-N 结	014	2.3.1 太阳电池的特点	020
2.1.5 P-N 结的能带结构	015	2.3.2 太阳电池的分类	021
2.1.6 P-N 结能带与接触电势差	016	习题	024
2.1.7 光照下的 P-N 结	016		

第3章 太阳电池硅材料

3.1 太阳电池材料对比	025	3.4 化学法太阳电池多晶硅	037
3.1.1 硅材料地位的确定	025	3.4.1 改良西门子法	037
3.1.2 体材料与薄膜材料的对比	026	3.4.2 改良西门子法制备工艺及注意 事项	038
3.1.3 薄膜太阳电池对比	027	3.4.3 锌还原法	041
3.2 太阳电池多晶硅现状	029	3.4.4 硅烷法	043
3.3 硅及冶金硅	031	习题	044
3.3.1 硅的概况	031		
3.3.2 冶金硅的生产	032		

第4章 物理法太阳电池多晶硅

4.1 物理法太阳电池多晶硅简介	045	4.2.3 湿法冶金	048
4.2 物理法除杂方法	046	4.2.4 物理法真空冶炼	048
4.2.1 吹气法	046	4.2.5 多晶硅铸锭	050
4.2.2 造渣静置澄清法	046	4.2.6 直拉单晶法	055

4.2.7 电子束真空熔炼	057	4.3 太阳能级多晶硅存在的问题	062
4.2.8 等离子感应熔炼	058	习题	064
4.2.9 磁场去除法	060		

第5章 硅片加工

5.1 晶体的滚磨与开方	065	5.3.2 硅片研磨工艺	072
5.1.1 晶体的基本特性	065	5.3.3 背损伤	073
5.1.2 晶体滚磨开方设备	065	5.3.4 边缘抛光	073
5.1.3 晶体磨削开方流程	066	5.3.5 预热清洗	073
5.2 晶体切割	066	5.3.6 硅片热处理	073
5.2.1 内圆切割工艺	067	5.3.7 背封	074
5.2.2 单晶硅的多线切割	068	5.3.8 粘片	074
5.2.3 多线切割系统调整与准备	070	5.3.9 硅片抛光	075
5.2.4 其他切割方式	070	5.4 硅片清洗	076
5.2.5 激光刻字	071	5.4.1 硅片表面杂质	077
5.3 硅片研磨及热处理	071	5.4.2 硅片的清洗	077
5.3.1 硅片边缘的倒角	071	习题	078

第6章 晶硅太阳能电池生产

6.1 清洗制绒	079	6.4.2 等离子体增强化学气相沉积法 (PECVD)	088
6.1.1 硅片清洗	079	6.4.3 双层减反射膜应用	089
6.1.2 制绒	079	6.5 丝网印刷	090
6.1.3 工业制绒主要参数对反射率的影响	081	6.5.1 丝网印刷工艺	090
6.1.4 湿法酸性制绒优缺点	082	6.5.2 工业丝网印刷工艺要点	090
6.1.5 金刚线切割硅片湿法制绒	083	6.5.3 烧结	091
6.2 扩散	084	6.6 分类检测	093
6.2.1 扩散原理分析	084	6.6.1 分类检测原理	093
6.2.2 工业级扩散工艺	085	6.6.2 分类检测技术参数	094
6.3 刻蚀	086	6.7 晶硅太阳能电池生产线设备	095
6.3.1 去磷硅玻璃	086	6.8 提高太阳能电池效率的方法	095
6.3.2 湿法酸性刻蚀	087	6.8.1 影响太阳能电池效率的主要因素	095
6.3.3 工业湿法刻蚀	087	6.8.2 提高电池效率的方法	096
6.4 减反射膜	087	习题	097
6.4.1 减反射膜常见制备方法	087		

第7章 晶硅太阳能电池组件生产

7.1 太阳能电池组件的结构	098	7.3.2 正面焊接	103
7.2 太阳能电池组件的封装材料	099	7.3.3 背面串接	104
7.3 太阳能电池组件生产工艺	100	7.3.4 层压敷设	104
7.3.1 电池测试	101	7.3.5 层压工艺	105

7.3.6 修边与装框	106	7.3.9 包装入库	108
7.3.7 焊接接线盒	107	7.4 太阳能电池组件生产设备	109
7.3.8 组件测试	107	习题	110

第 8 章 太阳能电池浆料

8.1 太阳能电池浆料简介	111	8.6 玻璃粉对正银浆料性能的影响及制备	119
8.2 太阳能电池正面浆料历史	112	8.6.1 玻璃粉对正银浆料性能的影响	119
8.3 太阳能电池片的生产及对正银浆料的性能要求	112	8.6.2 玻璃粉的制备	123
8.3.1 太阳能电池片的生产	112	8.7 有机载体和添加剂对银浆性能的影响及制备	124
8.3.2 硅太阳能电池对正银浆料的性能要求	113	8.7.1 有机载体和添加剂对银浆性能的影响	124
8.4 太阳能电池正银浆料构成及形成机理	114	8.7.2 有机载体的制备	125
8.4.1 太阳能电池正银浆料构成	114	8.8 正银浆料及正电极的制备工艺及设备	125
8.4.2 太阳能电池正银浆料形成机理	115	8.8.1 正银浆料及正电极的制备工艺	125
8.5 银粉对正银电极性能的影响及制备	117	8.8.2 生产太阳能电池正银设备	127
8.5.1 银粉对正银电极性能的影响	117	8.8.3 新型太阳能电池浆料及结构	129
8.5.2 导电银粉的制备	118	习题	131

第 9 章 硅太阳能电池背场铝浆

9.1 硅太阳能电池背场铝浆介绍	132	要求	135
9.1.1 背场铝浆的含义	132	9.4 铝背场的技术	136
9.1.2 背场铝浆的原理	132	9.4.1 制备背场的材料	136
9.2 硅太阳能电池背场铝浆的组成	133	9.4.2 制备方法以及热处理方法	136
9.2.1 铝粉	133	9.4.3 铝背场的吸杂作用和钝化作用	136
9.2.2 玻璃粉	133	9.5 几个光伏铝浆技术问题	138
9.2.3 有机载体	133	9.5.1 铝珠产生问题	138
9.2.4 添加剂	134	9.5.2 铝包产生问题	138
9.3 硅太阳能电池背场铝浆的制备	135	9.5.3 附着力问题	139
9.3.1 背场铝浆的形成	135	9.5.4 弯曲度问题	139
9.3.2 背场铝浆对太阳能电池的主要影响及技术		习题	140

第 10 章 新型太阳能电池技术及材料

10.1 上转换材料	141	因素	147
10.1.1 上转换材料的发展历史	141	10.2 钙钛矿太阳能电池	148
10.1.2 上转换材料的应用	142	10.2.1 钙钛矿太阳能电池介绍	148
10.1.3 上转换材料的研究现状	142	10.2.2 钙钛矿太阳能电池结构及工作原理	148
10.1.4 影响稀土上转换材料发光性能的因素	147	10.2.3 钙钛矿太阳能电池各层研究进展	151

10.2.4 电池性能的测量评估及 J - U 滞回效应	153	分类	157
10.2.5 钙钛矿太阳电池稳定性研究	155	10.3.3 量子点敏化太阳电池的优势	158
10.3 量子点太阳电池	156	10.3.4 量子点敏化太阳电池当前存在的问题	159
10.3.1 量子点的定义及其基本性质	156	习题	159
10.3.2 量子点中间能带太阳电池的机理及			

第 11 章 太阳电池应用

11.1 独立型太阳电池系统	160	工具	170
11.1.1 独立太阳电池系统的特点	160	11.6.2 一般家庭屋顶太阳电池系统控制器的规格、型号识别	171
11.1.2 独立太阳电池系统的基本组成	161	11.6.3 一般家庭屋顶太阳电池 DC/AC 逆变器	171
11.1.3 太阳电池用蓄电池	162	11.6.4 一般家庭屋顶太阳电池系统蓄电池	171
11.1.4 太阳电池组件的容量设计	162	11.6.5 一般家庭屋顶太阳电池系统的接线方法	172
11.1.5 控制器	163	11.6.6 一般家庭屋顶太阳电池系统的基本参数	172
11.2 并网型发电系统	163	11.6.7 目前家庭并网光伏发电站的申办流程	173
11.2.1 并网系统电路组成及总体设计	164	11.7 家庭分布式光伏发电设计与安装	174
11.2.2 光伏组件	164	11.7.1 分布式光伏发电系统设计	174
11.2.3 光伏并网逆变器	164	11.7.2 硬件系统的设计	175
11.3 混合型光伏发电系统	165	习题	186
11.4 逆变器	166		
11.5 太阳能庭院灯设计安装	168		
11.5.1 系统设计所需的数据	168		
11.5.2 系统设计参数的确定	168		
11.6 光伏建筑一体化应用	169		
11.6.1 家庭安装太阳电池组件的简单测量			

参考文献



第 1 章

太阳能利用与太阳电池



1.1 太阳能与可再生能源

万物生长靠太阳。地球上的风能、水能、海洋温差能、波浪能和生物质能以及部分潮汐能都是来源于太阳；即使是地球上的化石燃料（如煤、石油、天然气等），从根本上说也是远古以来储存下来的太阳能。太阳是离地球最近的一颗自己发光的天体，它给地球带来了光和热。太阳的活动来源于其中心部分，中心温度高达 1500 万摄氏度，在这里发生着核聚变，太阳能是太阳内部连续不断的核聚变反应过程产生的能量。聚变产生能量并被释放至太阳表面，通过对流过程散发出光和热。太阳核心的能量需要通过几百万年才能到达它的表面，因此使太阳能够发光。到现在为止太阳的年龄约为 46 亿年，它还可以继续燃烧约 50 亿年。因此，可以说太阳能是取之不尽、用之不竭的能源。全球年消耗能量的总和只相当于太阳 40min 内投射到地球表面的能量。太阳辐射能来源于其内部的热核反应，每秒转换的能量约为 $4 \times 10^{26} \text{J}$ ，基本上都是以电磁辐射的形式发射出来。通常将太阳看成是温度 6000K、波长 $0.3 \sim 3.0 \mu\text{m}$ 的辐射体，辐射波长的分布从紫外区到红外区。尽管地球所接收到的太阳辐射能量仅为太阳向宇宙空间放射的总辐射能量的二十二亿分之一，达到地球大气层外的太阳辐射能在 $132.8 \sim 141.8 \text{mW/cm}^2$ 之间，被大气反射、散射和吸收之后，约有 70% 投射到地面，但已高达 $1.73 \times 10^{15} \text{W}$ ；也就是说太阳每秒钟照射到地球上的能量就相当于 500 万吨煤燃烧的能量，是全球能耗的数万倍。

从能源的利用特点划分，能源分为可再生能源和不可再生能源。可再生能源是指原材料可以再生的能源，如风能、生物能、地热能、水能和太阳能等能源。可再生能源不存在能源耗竭的可能，因此日益受到许多国家的重视，尤其是能源短缺的国家。

（1）风能

风能是地球表面大量空气流动所产生的动能。由于地面各处受太阳辐照后气温变化不同和空气中水蒸气含量不同，因而引起各地气压的差异，在水平方向高压空气向低压地区流动，即形成风。风能资源取决于风能密度和可利用的风能年累积时间（小时）。风能密度是单位迎风面积可获得的风的功率，与风速的三次方和空气密度成正比关系。据估算，全世界的风能总量约 1300 亿千瓦。风能资源受地形影响较大，世界风能资源多集中在沿海和开阔大陆的收缩地带。在自然界中，风是一种可再生、无污染而且储量巨大的能源。随着全球气候变暖和能源危机，各国都在加紧对风力的开发和利用，尽量减少二氧化碳等温室气体的排放，保护我们赖以生存的地球。风能利用主要有风能作为动力和风力发电两种形式，其中又以风力发电为主。

(2) 生物能

生物能是太阳能以化学能形式储存在生物中的一种能量形式，一种以生物质为载体的能量，它直接或间接地来源于植物的光合作用。光化学反应不同于热化学反应，只要光的波长能被物质所吸收，就是在较低温度下依然可以进行。光化学应用常见的有绿色植物的光合作用，通过植物的光合作用，太阳能把二氧化碳和水合成有机物（生物质能）并放出氧气。光合作用是地球上最大规模转换太阳能的过程，现代人类所用燃料是远古和当今光合作用所固定的太阳能。目前，光合作用机理尚不完全清楚，能量转换效率一般只有百分之几，对其机理的研究具有重大的理论意义和实际意义。

(3) 地热能

地热能是由地壳抽取的天然热能，这种能量来自地球内部的熔岩，并以热力形式存在，是引致火山爆发及地震的能量。地球内部的温度高达 7000°C ，而在 $80\sim 100\text{km}$ 的深度处，温度会降至 $650\sim 1200^{\circ}\text{C}$ 。透过地下水的流动和熔岩涌至离地面 $1\sim 5\text{km}$ 的地壳，热力被转送至较接近地面的地方。高温熔岩将附近的地下水加热，这些加热了的水最终会渗出地面。运用地热能最简单和最合乎成本效益的方法，就是直接取用这些热源，并抽取其能量。地热能的利用形式：① $200\sim 400^{\circ}\text{C}$ 直接发电及综合利用；② $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ 双循环发电，制冷，工业干燥，工业热加工；③ $100\sim 150^{\circ}\text{C}$ 双循环发电，供暖，制冷，工业干燥，脱水加工，回收盐类，罐头食品；④ $50\sim 100^{\circ}\text{C}$ 供暖，温室，家庭用热水，工业干燥；⑤ $20\sim 50^{\circ}\text{C}$ 沐浴，水产养殖，饲养牲畜，土壤加温，脱水加工。现在许多国家为了提高地热能利用率，采用梯级开发和综合利用的办法，如热电联产联供、热电冷三联产、先供暖后养殖等。

(4) 水能

水能是一种可再生能源，是清洁能源，是指水体的动能、势能和压力能等能量资源。广义的水能资源包括河流水能、潮汐水能、波浪能、海流能等能量资源；狭义的水能资源指河流的水能资源。水不仅可以直接被人类利用，它还是能量的载体。太阳能驱动地球上的水循环，使之持续进行。地表水的流动是重要的一环，在落差大、流量大的地区，水能资源丰富。随着矿物燃料的日渐减少，水能是非常重要且前景广阔的替代资源。目前世界上水力发电还处于起步阶段。河流、潮汐、波浪以及涌浪等水运动均可以用来发电。

(5) 太阳能

地面接收到的太阳能包括直接辐射能和散射辐射能。直接接收到不改变方向的太阳辐射称为直接太阳辐射；被大气层反射和散射后方向改变的太阳辐射称为散射辐射。为了定量描述太

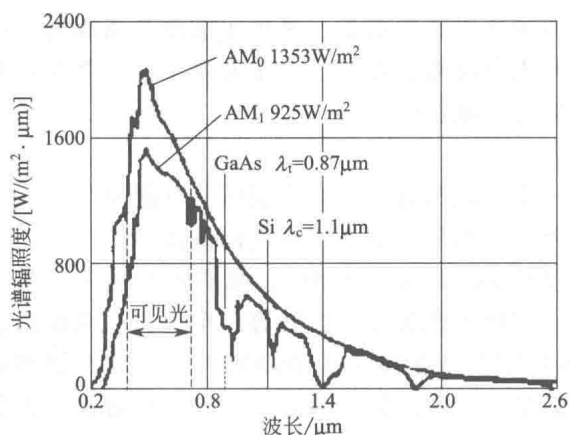


图 1.1 AM_0 和 AM_1 太阳光谱

阳能，需要引入一些概念。在地球位于日地平均距离处时，地球大气上界垂直于太阳光线的单位面积在单位时间内所受到的太阳辐射的全谱总能量，称为太阳常数。太阳常数的数值为 $1353\text{W}/\text{m}^2$ ，常用单位为 W/m^2 。将大气对地球表面接收太阳光的影响程度定义为大气质量 (AM)。大气质量是一个无量纲量，它是太阳光线穿过地球大气的路径与太阳光线在天顶角方向时穿过大气路径之比，并假定在标准大气压 (101325Pa) 和气温 0°C 时，海平面上太阳光垂直入射的路径为 1。AM 数值不同，太阳光谱会产生不同的

变化。当太阳辐射强度为太阳能常数时,大气质量记为 AM_0 , AM_0 光谱适合于人造卫星和宇宙飞船上的情况。大气质量 AM_1 的光谱对应于直射到地球表面的太阳光谱(其入射光功率为 $925\text{W}/\text{cm}^2$)。图 1.1 是 AM_0 和 AM_1 两种条件下的太阳光谱,它们之间的差别是由大气对太阳光的吸收引起的衰减造成的,主要来自臭氧层对紫外线的吸收和水蒸气对红外光的吸收,以及空气中尘埃和悬浮物的散射。图中太阳光谱辐照度 $E_\lambda = dE/d\lambda$, 其中 E 为单位波长间隔的太阳辐射度,给定波长 λ 。太阳光谱的这些特点对太阳能电池材料的选择是一个很重要的因素。

太阳活动同地球上的一些现象存在密切关系。现在,人们已经发现太阳活动在以下几方面对地球有显著影响。太阳活动中的耀斑和黑子对地球的电离层、磁场和极区有显著的地球物理效应,使地面的无线电短波通信受到影响,甚至出现短暂的中断,这被称为“电离层突然骚扰”。这些反映几乎与大耀斑的爆发同时出现。磁场沿磁力线下来,与色球层气体相碰撞,使中性线两侧磁力线的足跟部位发光,成为人们所见到的耀斑。耀斑本身是磁场不稳定的结果。正是由于磁场这种非平衡状态,导致了耀斑的爆发,以达到磁场新的平衡,耀斑的爆发过程同时也是大量能量释放过程。较大的耀斑爆发温度可达几千万度甚至上亿度,并且有很强的 X 射线、紫外线以及高能质子放出。这些强烈的辐射光线增加了氢原子的压力,使氢原子、离子及其他微粒以超过 1000km/s 的速度抛出,成为太阳的微粒辐射。“磁暴”现象说明整个地球是一个大磁场,地球的周围充满了磁力线。当耀斑出现时,其附近向外发射高能粒子,带电的粒子运动时产生磁场,当它到达地球时,便扰乱原来的磁场,引起地磁的变动。发生磁暴时,磁场强度变化很大,对人类活动特别是与地磁有关的工作会有很大影响。太阳影响地球的现象还有极光现象:地球南北纬两极地区,在晚上甚至在白天,常常可以看见天空中闪耀着淡绿色或红色、粉红色的光带或光弧,叫作极光。这是因为来自太阳活动的带电高能粒子流到达地球时,在磁场的作用下奔向极区,使极区高层大气分子或原子激发或电离而产生光。太阳的远紫外线和太阳风会影响大气的密度,大气密度的变化周期为 11 年,显然与太阳活动有关。太阳活动还可能影响到大气温度和臭氧层,进而影响到农作物的产量和自然生态系统的平衡。由于太阳活动对人类有影响,特别是在航天、无线电通信、气象等方面影响显著,因此,研究太阳活动,特别是太阳耀斑发生的规律,并设法进行预报,对太阳能的利用具有重要的价值。

1.2 太阳能光伏应用

从原则上讲,太阳能可以转化为任何形式的能量。太阳能转化为热能(见图 1.2)是最常见的一种,比如家庭用的太阳能热水器。光热利用主要为采暖和制冷。一般来说黑色吸收面吸收太阳辐射性能好,可以将太阳能转换成热能,但辐射热损失大,选择性吸收面具有高的太阳吸收比和低的发射比,吸收太阳辐射的性能好,且辐射热损失小,是比较理想的太阳能吸收面。

太阳能利用涉及的技术问题很多,太阳辐射的能流密度低,在利用太阳能时为了获得足够的能量,必须采用一定的技术和装置,对太阳能进行采集、储存、利用。所以,根据太阳能的特点,具有共性的技术主要有四项,即太阳能采集、太阳能转换、太阳能储存和太阳能传输。

本书主要讲述太阳能-电能转换,称为光伏效应,就是通常所说的太阳能电池,简称太阳电池(见图 1.3~图 1.5)。



图 1.2 太阳能热利用（作者摄于中国西藏自治区布达拉宫前）

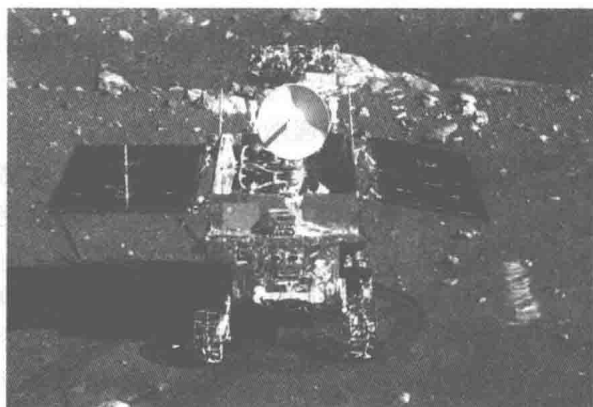


图 1.3 探月工程太阳能光伏发电



图 1.4 太阳能电池汽车



图 1.5 太阳能电池飞机

1.3 太阳电池的发展

在 20 世纪 50 年代，第一块实用化的硅太阳电池在美国贝尔实验室诞生了，不久后它即被用于人造卫星的发电系统上。迄今为止，太空中成千上万的飞行器都装备了太阳电池发电系统。由于当时发电成本过高，太阳电池在地面上的应用一直停滞不前，应用不广，主要在通信、农业灌溉等领域作为补充能源。直到 20 世纪 70 年代世界开始出现“石油危机”后，地面大规模应用太阳电池发电系统才被列上许多国家的议事日程。进入 20 世纪 80 年代，人口快速增长和工业化造成了三个全球性难题：能源短缺、生态破坏和环境污染。因为人类所使用的能源 80% 以上是由矿物燃料提供的，其中煤炭占 28%、石油超过 40%。人类每年要燃烧 40 亿吨煤、25 亿吨石油，并以每年大约 3% 的速度增长。矿物燃料燃烧排放的是温室气体和有毒物质，它们使地球的生态环境急剧恶化。另外，矿物燃料的燃烧每年向大气释放的二氧化碳、二氧化硫以及氮氧化物等有害气体，是造成温室效应和酸雨的主要因素。

人们认识到，常规能源不仅数量有限，而且使用时对环境的污染和生态平衡的破坏日益严重，威胁人类的正常发展。人类要生存下去，现代文明要持续地发展下去，必须寻找一条可持续发展的清洁的能源道路。

我国是“京都议定书”的签字国，我国二氧化硫排放量居世界第一位、二氧化碳排放量居

世界第一位,我国将面临越来越大的减排义务的国际压力。同时,对我国人民来讲,也只有减排温室气体,才能逐步改善我们的生存环境,这都要求我们大力发展可再生能源。自1980年以来,中国的能源总消耗量每年增长约5%,为世界平均增长率的近3倍,目前的能源储量与未来发展需求之间存在巨大的缺口,而这个缺口也将越来越大。由于我国石油产量不可能大幅增长,今后新增的石油需求量几乎要全部依靠进口。我国也是世界第一大油品进口国,作为稀缺资源,石油历来被视为战略物资被世界各国所争夺。石油对外依存度过高使我国能源安全出现问题。因此,国家《可再生能源中长期发展规划》(以下简称“规划”)提出在2020年将可再生能源占一次能源的总比重发展到15%。不过,《规划》并没有给太阳能提出很高目标,到2020年的规划光伏发电量只有180万千瓦,这主要是因为太阳能的能量分布十分分散,并且制造太阳能设备需要比较高的能耗和碳排放量,这就需要我们降低太阳能材料的生产成本并提高其光电转换效率。

太阳能光伏发电具有无污染、资源的普遍性和不枯竭等优点,符合保护环境和可持续发展的要求。因此,全人类再次把目光集中到太阳能发电上,各国政府对此高度重视。如美国政府1970年制定有一系列的建筑法规,1978年又将一些法规作为法律写进了国家能源法,硬性要求建筑必须与节能相结合,对购买太阳能系统的买主实行减免税等优惠政策;1997年又计划到2010年要为100万美国家庭安装3~5kW的光伏屋顶,并公布国家光伏计划和2020~2030年的长期规划。该项规划宏大且富有挑战性,美国将其与阿波罗登月计划相媲美,决心使光伏技术像其他能源技术一样得到发展,使太阳能电池板安装在每一个房屋上。

德国的政策核心是提供优惠贷款、津贴以及向可再生能源生产者给予较高标准的固定补贴。1990年制定的《电力输送法》中规定,对中型到大型电力用户按居民电价的90%支付风能、太阳能、水力以及生物能生产的电力。对于投资可再生能源的企业,国家还以低于市场利率的优惠利率,提供相当于设备投资成本75%的优惠贷款。德国从1999年起开始推行“10万屋顶”计划,准备在6年中资助10万户家庭装备太阳能电池设备,计划的主要手段是由商业银行向消费者直接提供优惠贷款。

荷兰政府通过提供一系列财政、税收和金融优惠,促进可再生能源开发利用,主要包括加速企业折旧、税收抵扣、对可再生能源项目提供低于市场利率的优惠贷款,以及向独立采用可再生能源等有利于环境的家庭给予低息贷款等;对按国家要求购买了新能源电力的电力工地的新能源电力,采取按比例分配方式销售给有关用户,以收回因此投入的燃料和设备成本;对制造污染但无法再循环利用的企业,征收能源税;建立绿色定价计划,使消费者可以在购买可再生能源电力时,得到奖励性津贴;制定以可再生能源为基础的国家电力标准,向被支持企业做出市场化努力。

英国和上述几个国家不同,英国通过一种称为“非化石燃料义务”的政策手段,来促进可再生能源发展。在“非化石燃料义务”政策框架内,电力供应商必须购买一定量的非化石能源电力。

日本开发的重点是太阳能电池和风能。比较突出的项目是1997年之前推行的“万户屋顶”计划。该计划是通过电力消耗征收附加税的方式筹资,对所有装备太阳能装备的家庭,给予相当于设备成本三分之一的津贴;同时,电力部门承诺以市场价格回购太阳能装置生产的超出家庭消耗需求的电。日本1997年通过的新能源法,主要政策手段是政府动员各大能源供应商积极购买通过可再生能源方式生产的电力,电力公司要对用可再生能源设备生产的电力支付零售电价;购电合同期为15年,合同期内购电价水平依市场电价随时调整。

1996年联合国召开了“世界太阳能高峰会议”,再次要求全球共同行动,广泛利用太阳能并发表了一系列重要文件,表示了联合国和世界各国对开发太阳能的坚定决心。欧盟还发布了

《可再生能源白皮书》，要求在 2010 年生产 6000 MW 光伏电池，预计仅美国、日本、欧盟的光伏电池生产就可能超过 15300 MW。从 1999 年开始，光伏产业快速发展；在最近十年中，光伏组件的产量增长近 10 倍，而价格下降了 3/4。据美国有关研究所的报告预测，未来光伏产业将与信息产业、通信产业一起，成为全球发展最快的产业之一。据 2004 年发表的欧盟光伏研发路线图指出，2000 年常规能源和核能在能源结构中的比例大约为 80%，可再生能源的比例为 20%。在可再生能源中主要是生物能，太阳能占的比例很小，但到 2050 年常规能源和核能的比例将下降到 47%，可再生能源则上升到 53%。在可再生能源中，太阳能（包括太阳能热利用和太阳能发电）将占据首位，占总能源的 29%。特别值得指出的是，其中仅太阳能发电就占总能源的 25%，将占世界总发电量的 1/5，太阳能将成为常规能源的重要替代者，如图 1.6 所示。另外，生产规模的扩大与产品的价格成反比。随着太阳能电池制作成本的降低和生产能力的提高，进一步降低成本的潜力使其完全有可能成为替代能源。

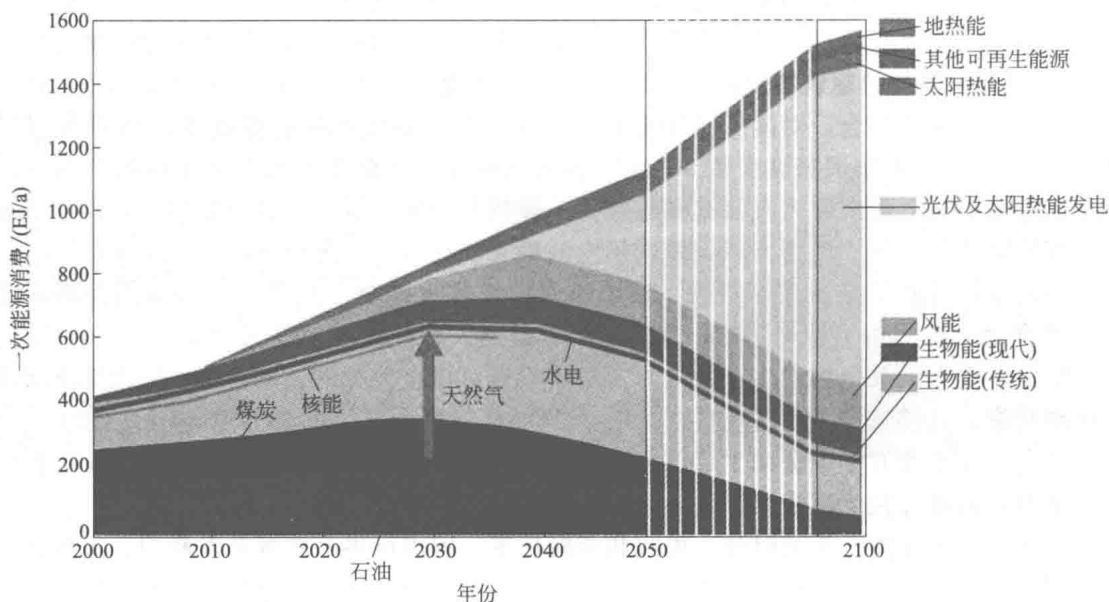


图 1.6 2000~2100 年太阳能发电在能源市场上的预测

我国是能源进口国，能源紧缺已成为我国经济持续快速发展的瓶颈，随着我国经济的高速发展，能源消耗还将有大幅度增加。考虑到环境保护的目标，大力发展可再生能源是最佳选择。我国太阳能极为丰富，我国陆地表面接收的太阳辐射能约为每年 $50 \times 10^{18} \text{ kJ}$ ，年辐射总量达到 $335 \sim 837 \text{ kJ/cm}^2$ 。从全国太阳能年辐射总量的分布来看，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的西南部等广大地区的太阳辐射总量很大，全国 2/3 国土年平均日照 2000h 以上，仅 84 万平方公里的沙漠就有太阳能 8400 亿千瓦，是可再生能源中数量最大的，尤其是青藏高原地区，那里平均海拔在 4000m 以上，大气层薄而清洁，透明度好，纬度低，日照时间长。例如，被人们称为日光城的拉萨市 1961~1970 年年平均日照时间为 3005.7h，年平均晴天为 108.5 天，太阳总辐射为 816kJ。另外，我国仍然有交通不方便的边远山区的供电问题得不到解决，因为长途供应成本太大，而太阳能发电主要应用于独立用户系统，所以，这为我国太阳能电池的发展应用提供了优越的条件和巨大的市场。

2013 年至今，我国政府连续下发一系列文件，大大推进了光伏发电的普及。近年来，我国光伏产业发展迅速，我国应继续抓住这一难得的战略机遇，大力加强太阳能发电新技术的研

究和开发,加快我国太阳电池工业的发展步伐,为我国经济发展提供结构合理的能源保障体系。

太阳能发电原理即光伏效应是 1839 年法国 Becqueral 第一次在化学电池中观察到的;1887 年第一块太阳电池问世,其转换效率为 $1\% \sim 2\%$;硅太阳电池出现于 1941 年;1876 年在固态硒 (Se) 的系统中也观察到了光伏效应。1954 年,贝尔实验室 Chapin 等人开发出效率为 6% 的单晶硅太阳电池;硅太阳电池于 1958 年首先在航天器上得到应用。在随后的十多年里,硅太阳电池在空间应用中不断扩大,工艺不断改进,电池设计逐步定型。20 世纪 70 年代初,许多新技术引入电池制造工艺,转换效率有了很大提高。与此同时,硅太阳电池开始引入地面应用,20 世纪 70 年代末,地面太阳电池产量已经超过了空间电池产量,促使成本不断降低。20 世纪 80 年代初,硅太阳电池进入快速发展时期,技术进步和 research 开发使太阳电池效率进一步提高,商业化生产成本持续降低,应用不断扩大。

从电池效率的发展划分的话,1954~1960 年是第一个发展阶段:1954 年贝尔实验室 Chapin 等开发出效率为 6% 的单晶硅太阳电池;1960 年提升太阳电池效率的主要技术是使硅材料的制备工艺日趋完善,硅材料的质量不断提高,这一期间电池效率为 15% 。1972~1985 年是第二个发展阶段,背电场电池 (BSF) 技术、“浅结”结构、绒面技术、密栅金属化是这一阶段的代表技术,电池效率提高到 17% ,电池成本大幅度下降。1985 年后是电池发展的第三阶段,随着各种各样的电池新技术和新材料的出现,改进了电池性能,提高了其光电转换效率,如表面与体钝化技术、Al/P 吸杂技术、选择性发射区技术、双层减反射膜技术等。目前相当多的技术、材料和设备正在逐渐突破实验室的限制而应用到产业化生产当中来,高效太阳电池的概念也已经提出。

总之,由于太阳能发电具有充分的清洁性、绝对的安全性、资源的相对广泛性和充足性、长寿命以及易于维护等其他常规能源所不具备的优点,光伏能源被认为是 21 世纪最重要的新能源之一,光伏发电对解决人类能源危机和环境问题具有重要的意义。

习 题

问答题。

1. 简述太阳能利用的几种形式。
2. 说明太阳能光伏发电的必要性。

第 2 章

半导体太阳电池原理

2.1 半导体简介

为了说明光伏效应这一概念，我们要从半导体说起。固体材料按照导电性能，可分为绝缘体、导体和半导体。通俗地讲，能够导电的称为导体；不能导电的称为绝缘体；介于导体与绝缘体之间的称为半导体。不同材料的导电性如图 2.1 所示。

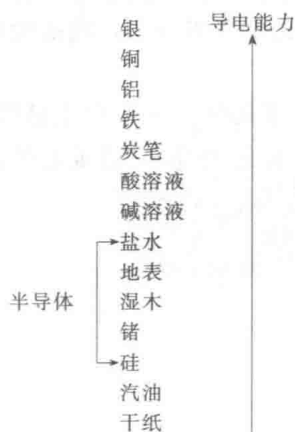


图 2.1 不同材料的导电性

半导体材料的种类很多，可分为无机半导体和有机半导体。又可按其化学成分，分为元素半导体和化合物半导体；按其是否含有杂质，可分为本征半导体和杂质半导体。杂质半导体按其导电类型，又分为 N 型半导体和 P 型半导体。此外，根据半导体材料的物理特性，还有磁性半导体、压电半导体、铁电半导体、有机半导体、玻璃半导体、气敏半导体等之分。目前获得广泛应用的半导体材料有锗、硅、硒、砷化镓、磷化镓、硫化镉、铟化镓等，其中锗、硅材料的半导体生产技术最为成熟、应用得最多。

自然界中物质存在的形态有气态、液态和固态。固体材料是由原子组成的，原子是由原子核及其周围的电子构成的，一些电子脱离原子核的束缚，能够自由运动时，称为自由电子。金属之所以容易导电，是因为在金属体内有大量能够自由运动的电子，在电场的

作用下，这些电子有规则地沿着电场的相反方向流动，形成电流。自由电子的数量越多，或者它们在电场的作用下规则流动的平均速度越高，电流就越大，我们把这种运载电量的粒子，称为载流子。在常温下，绝缘体内仅有极少量的自由电子，因此对外不呈现导电性。半导体内有少量的自由电子，在一些特定条件下才能导电。半导体的导电能力介于导体与绝缘体之间。

半导体材料是一类具有半导体性能、可用来制作半导体器件和集成电路的电子材料，其电导率在 $10^{-3} \sim 10^{-9} \text{ S/cm}$ 范围内。半导体材料的电学性质对光、热、电、磁等外界因素的变化十分敏感，在半导体材料中掺入少量杂质可以控制这类材料的电导率。首先，掺入微量杂质可以使半导体的导电能力大大增强。其次，通过控制温度可以控制半导体的性质。当环境温度升高时，半导体的导电能力就会显著增加；当环境温度下降时，半导体的导电能力就会显著下降。这种特性称为半导体的“热敏性”。热敏电阻就是利用半导体的这种特性制成的。此外，很多半导体对光十分敏感，当有光照射在这些半导体上时，这些半导体就像导体一样，具有较强的导电能力。

尽管半导体材料种类繁多,但是归结起来都有以下相同的基本特征。

① 电阻率特性。电阻率在杂质、光、电、磁等因素的作用下,可以产生大范围的波动,从而使其电学性能可以被调控。

② 导电特性。有两种导电的载流子:一种是电子,为带负电荷的载流子;另一种就是空穴,为带正电荷的载流子。而在普通的金属导体中,导电的载流子仅仅是电子。

③ 负的电阻率温度系数。随温度的升高,其电阻率下降;而金属则恰恰相反,随温度的升高,电阻率也增大。

④ 整流特性。半导体具有单向导电性能。

⑤ 光电特性。能在太阳的光照射下产生光生电荷载流子效应。

正是利用半导体材料的这些性质,才制造出功能多样的半导体器件。半导体材料按化学成分和内部结构,大致可分为以下几类。

① 元素半导体有锗、硅等。20世纪50年代,锗在半导体中占主导地位,但锗半导体器件的耐高温和抗辐射性能较差,到20世纪60年代后期逐渐被硅材料取代。用硅制造的半导体器件,耐高温和抗辐射性能较好,特别适宜制作大功率器件。因此,硅已成为应用最多的一种半导体材料。

② 化合物半导体。由两种或两种以上的元素化合而成的半导体材料。它的种类很多,常用的有砷化镓、磷化铟、锑化铟、碳化硅、硫化镉及镓砷硅等。其中,砷化镓是制造微波器件和集成电路的重要材料。碳化硅由于其抗辐射能力强、耐高温和化学稳定性好,在航天技术领域有广泛应用。

③ 无定形半导体材料。是一种非晶体无定形半导体材料,分为氧化物玻璃和非氧化物玻璃两种。这类材料具有良好的记忆特性和很强的抗辐射能力,主要用来制造阈值开关、记忆开关和固体显示器件。

④ 有机半导体材料。已知的有机半导体材料有几十种,其中有一些目前尚未得到应用。

2.1.1 晶体结构

固态物质可根据它们的质点(原子、离子和分子)排列规则的不同,分为晶体和非晶体两大类。具有确定熔点的固态物质称为晶体,如硅、砷化镓、冰及一般金属等;没有确定的熔点、加热时在某一温度范围内逐渐软化的固态物质称为非晶体,如玻璃、松香等。所有晶体都是由原子、分子、离子或这些粒子集团在空间按一定规则排列而成的。这种对称、有规则的排列,叫作晶体的点阵或晶格子,简称晶格。最小的晶格,称为晶胞。晶胞的各向长度称为晶格常数;将晶格周期地重复排列起来,就构成为晶体。晶体分为单晶体和多晶体。整块材料从头到尾都按同一规则作周期性排列的晶体,称为单晶体。整个晶体由多个同样成分、同样晶体结构的小晶体(即晶粒)组成的晶体,称为多晶体。在多晶体中,每个小晶体中的原子排列顺序的位向是不同的。非晶体没有上述特征,组成它们的质点的排列是无规则的,而是“短程有序、长程无序”的排列,所以又称为无定形态。一般的硅棒是单晶体,粗制的冶金硅和利用蒸发或气相沉积制成的硅薄膜为多晶硅,也可以认为是无定形硅。

图2.2所示为硅的原子结构。图2.3所示为晶体硅的晶胞结构。它可以看作是两个面心立方晶胞沿对角线方向上位移 $1/4$ 互相套构而成。这种结构被称为金刚石式结构。硅(Si)、锗(Ge)等重要半导体均为金刚石式结构。1个硅原子和4个相邻的硅原子由共价键连接,这4个硅原子恰好在正四面体的4个顶角上,而四面体的中心是另一硅原子。硅原子可以作许多间距相同而互相平行的平面,称为晶面。垂直于晶面的法线方向,称为晶向。具有同一晶向的所