

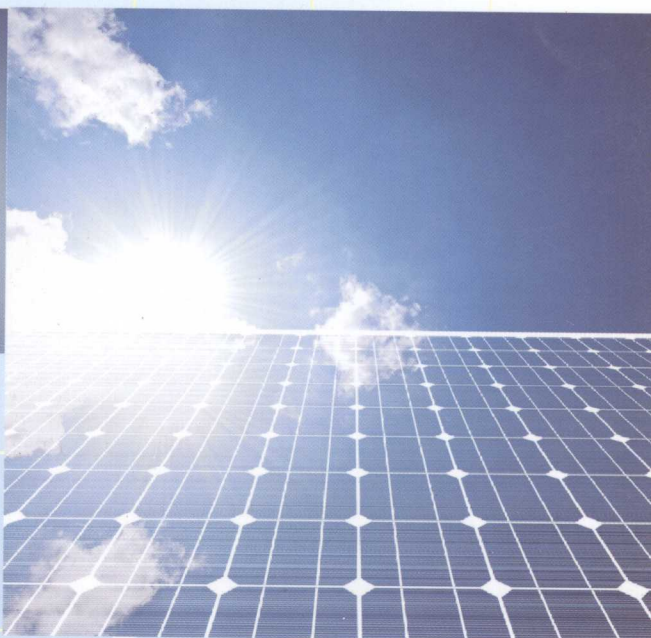
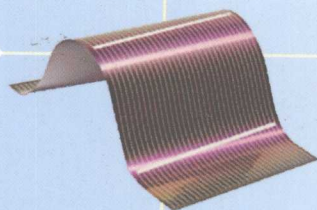
太阳能光伏与照明应用技术系列教材

太阳能 光伏器件技术

taiyangneng guangfu qijian jishu

于军胜 主编

钟建林 慧 副主编



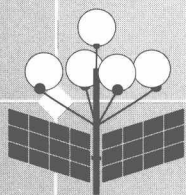
电子科技大学出版社

九江学院图书馆



1810323

1520398



太阳能光伏与照明应用技术系列教材

不外借

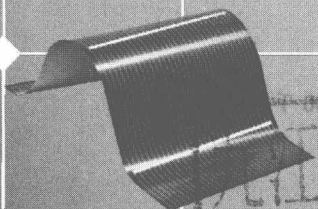
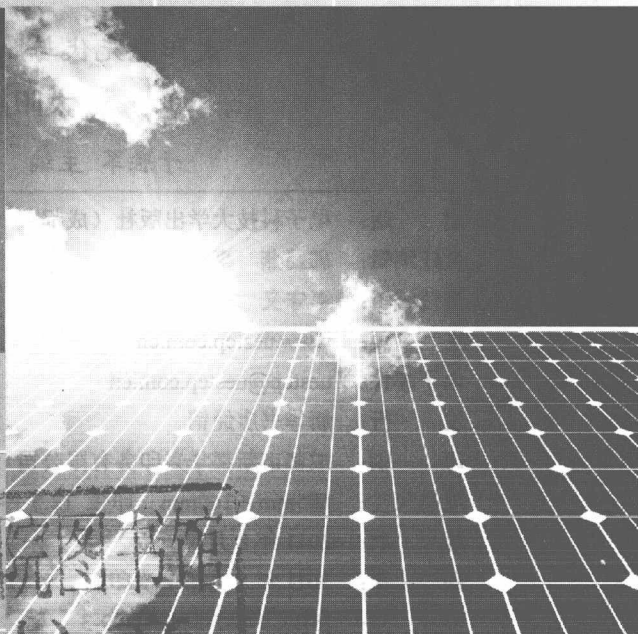
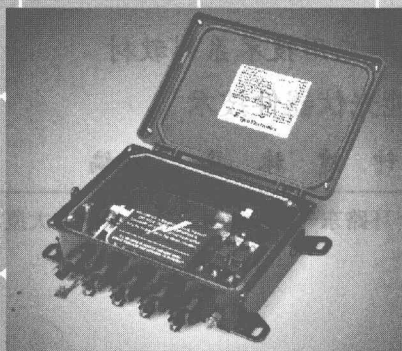
太阳能 光伏器件技术

taiyangneng guangfu qijian jishu

于军胜 主编

钟建林 慧 副主编

TM 914.4 / 3358



九江学院图书馆
藏书章



电子科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

太阳能光伏器件技术 / 于胜军主编. — 成都: 电子科技大学出版社, 2011.8

ISBN 978-7-5647-0899-3

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

国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 151887 号

太阳能光伏与照明应用技术系列教材

太阳能光伏器件技术

于胜军 主编 钟建林 慧 副主编

出 版: 电子科技大学出版社(成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编: 610051)
责任编辑: 郭蜀燕 辜守义
责任编辑: 辜守义
主 页: www.uestcp.com.cn
电子邮件: uestcp@uestcp.com.cn
发 行: 新华书店经销
印 刷: 成都市新都华兴印务有限公司
成品尺寸: 185mm×260mm 印张 12.5 字数 300 千字
版 次: 2011 年 8 月第一版
印 次: 2011 年 8 月第一次印刷
书 号: ISBN 978-7-5647-0899-3
定 价: 36.80 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

- ◆ 邮购本书请与本社发行部联系。电话: (028) 83202323, 83256027
- ◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。
- ◆ 课件下载在我社主页“下载专区”。

前 言

随着人类社会的脚步迈入 21 世纪的第二个 10 年,能源与环境是我们可持续发展所面临的重大问题。特别是近年来化石能源的过度开发与利用,已造成全球性的不足与匮乏,世界范围的冲突甚至战争实质上是对能源的争夺。另一方面,化石能源的开发利用带来一系列环境问题,诸如环境污染和温室效应等。更为严峻的是,化石能源行将枯竭,人类将面临无化石能源可利用的困境。因此,寻找新能源被提上了非常紧迫的议事议程。当前,可以开发的新能源有水能、风能、核能、太阳能、海洋能、地热能和生物能等;其中,太阳能由于具有取之不尽用之不竭、全球分配均衡、环境污染少等优点,受到人们广泛的关注。据统计,太阳光照射到地球上数分钟的能量,可以供人类社会一年的需求。由此可见,太阳能包括太阳能光伏,将为人类可持续发展提供一条全新的途径。近年来,太阳能光伏的开发利用得到了一定的发展,具有成为世界能源结构中的主导能源的趋势;太阳能光伏产业正在飞速发展,成为世界上发展速度最快的高新技术产业之一。为了适应太阳能光伏器件及其技术的发展,我们编写了此书。

全书在内容编排上具有以下特点:

1. 内容新颖:在着重介绍主流太阳能光伏电池的基础上,对最新技术也进行了较详细的阐述,如薄膜太阳能光伏器件、有机太阳能光伏器件和建筑太阳能光伏技术。
2. 理论与实际相结合:本书对太阳能光伏器件的基本原理进行了详细的阐述。在对器件原理的讨论中对现有技术和将来发展在原理上着重加以描述。
3. 立体化教材:除了文字教材这一基本形式外,配有学习指南和习题解答以及实验室的仿真实验指导操作训练。此外,计划采用现代教育技术手段,制作电子出版物(电子幻灯片),以利于学生自学。

本书由多年从该领域科研教学工作的电子科技大学于军胜教授担任主编,钟建副教授和林慧博士担任副主编,适合从事各类光电器件及其技术学科方向的教师和科研人员参考选用。

本书的编写得到了同事蒋泉副教授和张磊博士的支持,研究生王娜娜、黄江、张伟、黄秋炎、高卓、刘峰、代科、高娟等的协助,在此向他们表示衷心的感谢!

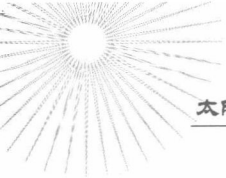
科学技术的发展日新月异,由于编者学识水平有限,书中谬误在所难免,恳请同行专家和广大读者批评指正。

编 者

2011 年于成都

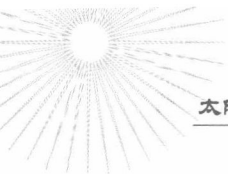
目 录

第一章 绪 论	1
1.1 开发利用太阳能的重要意义	1
1.1.1 化石燃料正面临日渐枯竭的危机状况	1
1.1.2 保护生态环境逐渐受到人们的重视	3
1.1.3 “3E” 矛盾与解决	4
1.2 太阳能发电的特点	5
1.2.1 太阳能发电的优点	5
1.2.2 太阳能发电的缺点	5
1.3 近年来世界光伏产业的发展状况	6
1.3.1 太阳能电池的生产	6
1.3.2 各国光伏发展	9
习题	11
参考文献	11
第二章 太阳辐射	12
2.1 太阳简介	12
2.1.1 日地运动	13
2.1.2 地球绕太阳的运行规律	14
2.2 太阳辐射的光谱	14
2.2.1 大气层外的太阳辐射光谱	16
2.2.2 地球表面的太阳辐射光谱	17
2.3 世界和我国太阳能资源的分布情况	18
习题	20
参考文献	20
第三章 太阳能光伏器件的原理	22
3.1 半导体物理基础	22
3.1.1 固体的能带理论	24
3.1.2 电子和空穴的输运	27
3.1.3 半导体的掺杂特性	28
3.2 太阳能电池的工作原理	30
3.2.1 pn 结	30
3.2.2 半导体的光电转换	35
3.3 太阳能电池的特性参数	36
3.3.1 标准测试条件	36



3.3.2	太阳能电池等效电路	36
3.3.3	伏安特性曲线	37
3.4	太阳能电池分类	40
3.4.1	按电池结构分类	40
3.4.2	按用途分类	41
3.4.3	按光电转换机理分类	41
3.4.4	按基体材料分类	42
习题		42
参考文献		43
第四章	晶体硅太阳能电池	45
4.1	硅材料的制备	45
4.2	单晶硅太阳能电池	47
4.2.1	单晶硅太阳能电池基本原理及结构	48
4.2.2	单晶硅锭的铸造	49
4.2.3	单晶硅片的制造	50
4.2.4	单晶硅电池片的制备工艺	51
4.2.5	单晶硅太阳能电池发展趋势	54
4.3	多晶硅太阳能电池	56
4.3.1	多晶硅太阳能电池制备工艺	56
4.3.2	多晶硅太阳能电池发展趋势	57
4.3.3	多晶硅薄膜太阳能电池	59
4.4	HIT 太阳能电池片及其制造方法	60
4.4.1	HIT 太阳能电池的基本原理及结构	61
4.4.2	HIT 太阳能电池片的特点	62
4.5	太阳能电池组件	65
4.5.1	太阳能电池组件的结构及分类	66
4.5.2	太阳能电池组件的封装	67
4.6	晶体硅太阳能电池的发展趋势	69
4.6.1	高效率的太阳能电池结构	70
4.6.2	高效率太阳能电池的工艺技术	72
习题		74
参考文献		75
第五章	非晶硅及微晶硅薄膜太阳能电池	76
5.1	概述	76
5.2	非晶硅太阳能电池	77
5.2.1	非晶硅太阳能电池结构	78
5.2.2	非晶硅太阳能电池的工作原理	80
5.2.3	非晶硅太阳能电池的制备工艺	81

5.2.4 非晶硅太阳能电池的衰减及其可靠性	82
5.3 薄膜微晶硅 ($\mu\text{c-Si:H}$) 太阳能电池及其性能	84
5.3.1 薄膜微晶硅太阳能电池的结构	85
5.3.2 微晶硅的基本特性	85
5.3.3 微晶硅的材料及其制备	89
5.3.4 微晶硅薄膜太阳电池的发展趋势	91
5.4 非晶硅 / 微晶硅型叠层太阳能电池	92
习题	94
参考文献	94
第六章 无机化合物半导体太阳能电池	96
6.1 III-V 族太阳能电池	96
6.1.1 引言	96
6.1.2 III-V 族化合物半导体的材料特性	97
6.1.3 III-V 族系半导体太阳能电池的结构和特点	98
6.1.4 GaAs 系太阳能电池	100
6.1.5 InP 系太阳能电池	104
6.1.6 III-V 族量子阱结构太阳能电池	106
6.1.7 III-V 族聚光太阳能电池	107
6.1.8 III-V 族化合物太阳能电池的制备方法	108
6.1.9 研究动态	110
6.2 CIGS 太阳能电池	113
6.2.1 引言	113
6.2.2 CIGS 半导体的材料特性	114
6.2.3 CIGS 系太阳能电池的结构和性能	115
6.2.4 CIGS 系太阳能电池的制备方法	117
6.2.5 CIGS 太阳能电池的研发动态	119
6.3 CdS/CdTe 太阳能电池	122
6.3.1 引言	122
6.3.2 CdS/CdTe 半导体的材料特性	122
6.3.3 CdS/CdTe 器件结构 and 特点	122
6.3.4 CdS/CdTe 太阳能电池的制备方法	123
6.3.5 CdS/CdTe 太阳能电池的研发动态	125
习题	125
参考文献	126
第七章 染料敏化太阳能电池	128
7.1 引言	128
7.2 染料敏化太阳能电池的结构与组成	129
7.2.1 导电电极	130



7.2.2	光阳极	130
7.2.3	反电极	131
7.2.4	染料	132
7.2.5	电解质	132
7.2.6	基底	132
7.2	工作原理	133
7.2.1	染料敏化太阳能电池原理	133
7.2.2	性能表征及制备	135
7.3	主要材料及制备方法	142
7.3.1	半导体纳米材料	142
7.3.2	电解质	148
7.3.3	染料敏化剂	150
7.4	染料敏化太阳能电池研究进展	154
7.4.1	染料敏化纳米晶太阳能电池的最新进展	154
7.4.2	研究方向	158
	习题	158
	参考文献	159
第八章	有机薄膜太阳能电池	162
8.1	有机薄膜太阳能电池简介	162
8.1.1	引言	162
8.1.2	有机太阳能电池的工作原理	163
8.1.3	等效电路	170
8.2	有机小分子太阳能电池	171
8.2.1	有机小分子光敏材料	171
8.2.2	小分子有机太阳能电池的制备方法	173
8.2.3	基于有机小分子的太阳能电池的器件结构	176
8.3	聚合物有机薄膜太阳能电池	179
8.3.1	引言	179
8.3.2	聚合物电子给体材料	179
8.3.3	富勒烯族电子受体材料	181
8.3.4	聚合物太阳能电池的制备方法	182
8.3.5	聚合物太阳能电池的器件结构	185
	习题	188
	参考文献	188

第1章 绪论

1.1 开发利用太阳能的重要意义

1.1.1 化石燃料正面临日渐枯竭的危机状况

随着世界人口的持续增长和经济的不断发展,人们对于能源供应的需求量日益增加,而在目前的能源消费结构中,主要还是依赖煤炭、石油和天然气等化石燃料。

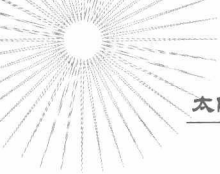
自20世纪50年代以来,随着工农业生产的迅速发展和交通工具数量的增加,世界能源消耗速度急剧增加,尤其是发达国家,个人能源消耗水平越来越高,因此发达国家能耗占世界能耗比例很大。其中,能源消耗最多的是美国,按人均能耗来计算,1986年美国人均能耗是发展中国家的34倍,是世界平均能耗的5倍。20世纪80年代,只占世界人口23%的发达国家却消耗了世界能源消耗量的77%,这反映出世界能源消耗的极端不平衡。相比较而言,中国人均能耗是最低的,1980年为0.61吨煤/人,1986年增加到0.76吨煤/人;而美国为9.43吨煤/人,日本为3.62吨煤/人和英国为5.33吨煤/人。与此同时,由于人口增长和发展中国家能耗的需求增大,世界平均能耗强度仍在继续上升。全球一次能源消费量在1971~2002年的平均年增长率是2%,在2001~2004年为3.7%,其中2003—2004年为4.3%^[1]。增长率不断提高的主要原因是:亚太地区在2001~2004年的平均年增长率为8.6%,特别是中国,随着改革开放的深入和经济的崛起,在2003~2004年间高达15%。

美国能源部能源信息管理综合分析及预测办公室(EIA)于2009年7月发表的《2009能源形势》《Energy Outlook 2009》(DOE/EIA-0484(2009))估计,世界能源消费量从2006年到2030年预计将增加44%。在燃料中,石油一直占有最大份额,2006年占36%,到2030年将降低为32%。煤炭是消费量增长最快的燃料,在世界能源份额中从2005年的26%,只经过一年,2006年就提高到27%。表1-1所示为1990~2030年世界各种燃料能源消费量的统计和预测。

表 1-1 1990~2030 年世界各种燃料能源消费量的统计和预测 (单位: $\times 10^{24}$ Btu^①)

年度	历史数据			预测数据					2006~2030 年 平均增长率 (%)
	1990	2005	2006	2010	2015	2020	2025	2030	
石油	136.4	170.4	172.4	174.7	183.3	194.2	204.6	215.7	0.9
天然气	75.3	107.1	108.1	118.5	131.0	141.7	151.3	158.0	1.6
煤炭	89.2	121.7	127.5	140.6	150.7	161.7	175.2	190.2	1.7
核能	20.4	27.5	27.8	29.0	31.9	35.4	38.1	40.2	1.6
其他	26.3	35.5	36.8	45.6	54.6	62.8	68.1	74.1	3.0
总计	347.7	462.1	472.4	508.3	551.5	595.7	637.3	678.3	1.5

① Btu 为英热单位符号, 1 Btu=2.93071×104kW·h



由表 1-1 可见, 到 2030 年, 全世界消耗的一次能源要比 1990 年增加 120%。然而地球上化石燃料的蕴藏量是有限的, 根据已探明的储量, 全球石油可开采约 45 年, 天然气约 61 年, 煤炭约 230 年, 铀约 71 年。据世界卫生组织估计, 到 2060 年全球人口将达 100 亿~110 亿, 如果到时所有人的能源消费量都达到今天发达国家的人均水平, 则地球上主要的 35 种矿物中, 将有 1/3 在 40 年内消耗殆尽, 包括所有的石油、天然气、煤炭(假设为 2 万亿吨)和铀。所以, 世界化石燃料的供应正在面临严重短缺的危机局面。

中国的经济正在高速发展, 能源消耗量也在迅速增加, 根据 EIA 的《Energy Outlook 2009》的统计和预测(见表 1-2), 预计中国到 2030 年一次能源消费的平均年增长率为 3.2%, 居世界第一。虽然中国的能源资源总量比较丰富, 目前能源产量居世界第二, 但是由于人口众多, 人均能源资源拥有量在世界上处于较低的水平, 能源的储量(使用年限)低于世界平均值(见图 1-1), 能源供应形势不容乐观。

表 1-2 1990—2030 年部分国家和地区能源消费量(单位: $\times 10^{15}$ Btu)

国家/地区	历史数据			预测数据					2006~2030 年 平均增长率(%)
	1990	2005	2006	2010	2015	2020	2025	2030	
美国	84.7	100.5	100.0	99.9	102.9	105.4	109.1	113.6	0.5
加拿大	11.0	14.2	14.0	14.6	15.6	16.5	17.4	18.3	1.1
墨西哥	5.0	6.9	7.4	6.6	7.4	8.3	9.1	9.9	1.2
日本	18.7	22.7	22.8	21.9	22.9	23.4	23.2	23.0	0.0
韩国	3.8	9.2	9.4	11.0	11.6	12.0	12.7	13.2	1.4
澳大利亚/新西兰	4.5	6.4	6.5	6.7	7.3	7.7	8.0	8.4	1.1
俄罗斯	39.4	30.1	30.4	32.2	34.3	36.0	36.9	37.7	0.9
中国	27.0	66.8	73.8	90.5	105.9	124.0	140.7	155.8	3.2
印度	7.9	16.3	17.7	19.1	22.9	26.8	29.6	32.3	2.5
中东	11.2	22.7	23.8	27.7	30.3	32.2	34.6	37.7	1.9
非洲	9.5	14.5	14.5	16.2	17.7	19.1	20.6	21.8	1.7
中南美洲	14.5	23.4	24.2	28.3	30.3	32.5	35.2	37.7	1.9
全球总量	347.3	462.1	472.4	511.1	559.4	607.0	653.7	701.6	1.8

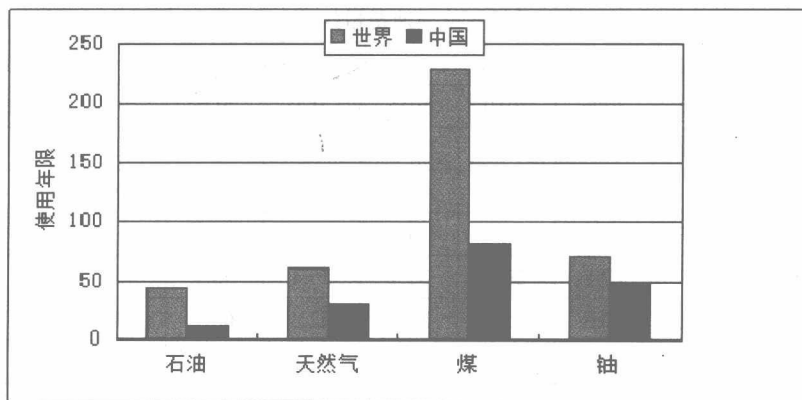


图 1-1 中国与世界化石燃料储量的比较

为了应对化石燃料逐渐短缺的严重局面，必须逐步改变能源的消费结构，大力开发以太阳能为代表的可再生能源，在能源供应领域走可持续发展的道路，才能保证经济的繁荣发展和人类社会的不断进步。

1.1.2 保护生态环境逐渐受到人们的重视

由于人类的能源消费活动，主要是化石燃料的燃烧，造成了环境污染，导致全球气候变暖、冰山融化、海平面上升、沙漠化日益扩大等现象的出现，自然灾害频繁发生。人们逐渐认识到，减少温室气体的排放，治理大气环境，防止污染已经到了刻不容缓的地步^[2]。

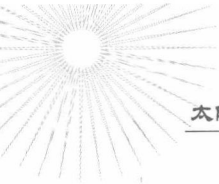
2007年1月10日，世界经济论坛等机构在日内瓦发布的“2007年全球风险”报告称，气候变化是21世纪全球面临的最严重挑战之一，由全球变暖造成的自然灾害在今后数年内可能会导致某些地区人口大规模迁移、能源短缺以及经济和政治动荡。

2007年2月2日，汇聚了来自130多个国家的2500多名专家的联合国“政府间气候变化专门委员会”发表了第4份全球气候变化评估报告。这份报告综合了全世界科学家6年来的科学研究成果，报告称气候变暖已经是“毫无争议”的事实，过去50年全球平均气温上升“很可能”（指正确性在90%以上）与人类使用化石燃料产生的温室气体增加有关。报告预测，到2100年，全球气温将升高1.8~4℃，21世纪海平面将至少上升19~37cm，如果近年出现的北极冰层大量融化的趋势继续发展，海平面最多将升高28~58cm，有不少海岛和沿海城市将沉入海底。《Energy Outlook 2009》统计并预测了部分国家和地区在1990~2030年的CO₂排放量，见表1-3。

表1-3 部分国家和地区1990~2030年的CO₂排放量（单位：百万吨）

国家/地区	历史数据			预测数据					2006~2030年平均增长率（%）
	1990	2005	2006	2010	2015	2020	2025	2030	
美国	4989	5975	5907	5801	5904	5982	6125	6414	0.3
加拿大	471	629	611	622	645	675	705	731	0.8
墨西哥	302	403	431	371	414	466	510	557	1.1
日本	1054	1250	1247	1169	1204	1219	1188	1157	-0.3
韩国	243	497	515	598	614	617	651	680	1.2
澳大利亚/新西兰	298	454	455	454	469	491	507	530	0.6
俄罗斯	2393	1699	1704	1803	1894	1945	1950	1978	0.6
中国	2293	5429	6018	7222	8204	9417	10707	11730	2.8
印度	573	1192	1292	1366	1572	1783	1931	2115	2.1
中东	704	1393	1456	1686	1830	1939	2088	2279	1.9
非洲	659	985	982	1086	1161	1239	1325	1409	1.5
中南美洲	695	1093	1123	1311	1368	1437	1547	1654	1.6
全球总量	21 488	28 296	29 028	30 967	33 111	35 428	37 879	40 385	1.4

由表1-3可见，世界CO₂排放量的年平均增长率是1.8%，到2030年CO₂的排放量将是1990年的两倍多。而中国是以年平均增长率3.4%的速度在增加，虽然中国的CO₂人均



排放量不算高，但由于中国人口众多、高能耗产业比重大，可以预测，碳排放总量很快就将超过美国而成为世界第一位。不容回避的是，中国的能源利用率还普遍不高，能源消费以燃煤为主，煤炭中所含的硫等有害成分很高，所以受到了人们的普遍关注。据世界银行估计，到 2020 年中国由于空气污染造成的环境和健康损失，将达到 GDP 总量的 13%。减少 CO₂ 排放量，保护人类生态环境，已经成为当务之急。太阳能是清洁无公害的新能源，而光伏发电不排放任何废弃物，大力推广光伏发电将对减少大气污染，防止全球气候变化作出巨大的贡献。

1.1.3 “3E” 矛盾与解决

在经济（Economy）发展的过程中，伴随着能源（Energy）的消费，以化石能源为主体的资源需求结构会造成对地球环境（Environment）的破坏，这就是“3E”矛盾。解决这一矛盾的方法如图 1-2 中箭头所示，就是要依靠清洁能源技术的开发，实现从弯箭头切换到直箭头所示的良性循环。因此，在新世纪的世界能源需求展望中，必须考虑随能源的消费而引起的对环境负荷的影响这一重要问题。

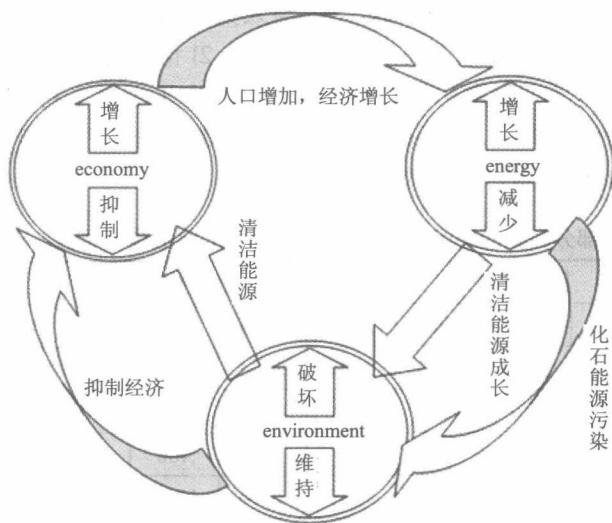


图 1-2 “3E” 矛盾循环图

随着经济的发展、社会的进步，人们对能源提出越来越高的要求，寻找新能源成为当前人类面临的迫切课题。现有能源主要有三种，即火电、水电和核电。

火电需要燃烧煤、石油等化石燃料。一方面化石燃料蕴藏量有限、越烧越少，正面临着枯竭的危险。据估计，全世界石油资源再有 30 年便将枯竭；另一方面燃烧燃料将排出 CO₂ 和硫的氧化物，因此会导致温室效应和酸雨，恶化地球环境^[3]。

水电要淹没大量土地，导致生态环境的恶化和物种的消失，而且大型水库一旦塌崩，后果将不堪设想。另外，一个国家的水力资源也是有限的，而且还要受季节的影响。

核电在正常情况下固然是干净的，但万一发生核泄漏，后果同样是可怕的。苏联切尔诺贝利核电站事故，已使 900 万人受到了不同程度的伤害，而且这一影响并未终止。另外，核废料的处理，也将引起严重的生态和环境问题。

针对现有能源的问题,迫使人们去寻找新的清洁能源。新能源应该同时符合两个条件:一是蕴藏丰富不会枯竭;二是安全、干净,不会威胁人类和破坏环境。目前,新能源主要有太阳能、生物能、地热能、海洋能(潮汐能)、风能、核能、氢能等,其中最理想的能源应该是太阳能。照射在地球上的太阳能非常巨大,数分钟照射在地球上的太阳能,便足以供全球人类一年能量的消费。可以说,太阳能是真正取之不尽、用之不竭的能源,而且,太阳能发电干净,不产生公害。所以,太阳能发电是理想的能源。现在全球还有将近 20 亿人口没有用上电,其中大部分生活在经济不发达的边远地区,由于居住分散,交通不便,很难通过延伸常规电网的方法来解决用电问题,没有电力供应严重制约了当地经济的发展。而这些无电地区往往太阳能资源十分丰富,利用太阳能发电是最理想的选择。

1.2 太阳能发电的特点

1.2.1 太阳能发电的优点

太阳能的热能利用和光能利用是其两个重要的应用领域,之所以特别引人注目,是由于太阳能自身的特殊性所决定的。到达地球的太阳能,在大气层外的太阳光强度为 1.38kW/m^2 ,其中有 30%向宇宙反射,剩余 70%可达到地球。太阳的寿命据推算达几十亿年,所以太阳能可称为无穷大能源。此外,太阳能不会产生 CO_2 等有害物质,不会产生温室效应,是一种清洁、环保的能源^[4]。

太阳能发电的主要优点如下:

(1) 太阳能取之不尽,用之不竭,地球表面接受的太阳辐射能,足够满足目前全球能源需求的 1 万倍。只要在全球 4%的沙漠上安装太阳能光伏系统,所发电力就可以满足全球的需求。太阳能发电安全可靠,不会遭受能源危机或燃料市场不稳定的冲击;

(2) 太阳能随处可得,可就近供电,不必长距离输送,避免了长距离输电线路的损失;

(3) 太阳能不用燃料,运行成本很低;

(4) 太阳能发电没有运动部件,不易损坏,维护简单,特别适合于无人值守情况下使用;

(5) 太阳能发电不产生任何废弃物,没有污染、噪声等公害,对环境无不良影响,是理想的清洁能源;

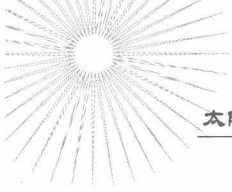
(6) 太阳能发电系统建设周期短,方便灵活,而且可以根据负荷的增减,任意添加或减少太阳能电池方阵容量,避免了浪费。

1.2.2 太阳能发电的缺点

毋庸置疑,太阳能发电也存在一定的不足,主要缺点如下:

(1) 地面应用时有间歇性和随机性

由于受到昼夜、季节、地理纬度和海拔高度等自然条件的限制以及晴、阴、云、雨等随机因素的影响,所以,到达某一地面的太阳辐照度既是间断的,又是极不稳定的,这给太阳能的大规模应用增加了难度。为了使太阳能成为连续、稳定的能源,从而最终成为能够与常规能源相竞争的替代能源,就必须很好地解决蓄能问题,即把晴朗白天的太阳辐射



能尽量贮存起来,以供夜间或阴雨天使用,但目前蓄能也是太阳能利用中较为薄弱的环节之一。

(2) 能量密度较低,标准条件下,地面上接收到的太阳辐射强度为 $1000\text{W}/\text{m}^2$

到达地球表面的太阳辐射的总量尽管很大,但是能流密度很低。平均而言,北回归线附近,夏季在天气较为晴朗的情况下,正午时太阳辐射的辐照度最大,在垂直于太阳光方向 1 平方米面积上接收到的太阳能平均有 1000W 左右;若按全年日夜平均,则只有 200W 左右。而在冬季大致只有一半,阴天一般只有 $1/5$ 左右,这样的能流密度是很低的。因此,在利用太阳能时,想要得到一定的转换功率,往往需要面积相当大的一套收集和转换设备,造价较高,大规模使用时需要占用较大面积。

(3) 目前价格仍较贵,为常规发电的 $5\sim 15$ 倍,初期投资高

目前太阳能利用的发展水平有些方面在理论上是可行的,技术上也是成熟的。但有的太阳能利用装置,因为效率偏低,成本较高,总的来说,经济性还不能与常规能源相竞争。在今后相当一段时期内,太阳能利用的进一步发展,主要受到经济的制约。

以上的缺点,可以根据太阳的运转规律和依靠科学技术的进步,伴随着太阳能光伏电池的大规模应用,相信会逐步得到解决,太阳能发电也将世界能源结构中占有重要地位。

1.3 世界光伏产业的发展状况

1.3.1 太阳能电池的生产

1954 年美国贝尔实验室^[5]的恰宾、富勒和皮尔松制成第一个效率为 6% 的太阳能电池,(又称为太阳能光伏器件),经过逐渐的改进后,效率达到了 10% ,并于 1958 年装备于美国的先锋 1 号人造卫星上,成功地运行了 8 年。在 20 世纪 70 年代以前,光伏发电主要是在外层空间应用,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,光伏电源为人类航天事业作出了重要的贡献。70 年代以后,由于技术的进步,太阳能电池的材料、结构、制造工艺等方面不断改进,降低了生产成本,开始在地面上得到应用,光伏发电逐渐推广到很多领域。但是由于价格偏高,在相当长的时期内,陷入了要使市场扩大,太阳能电池应降价,而太阳能电池要进一步降价,就要大规模生产,须依赖于市场的扩大,而市场的扩大又总不能满足进一步降价的要求,这样一个相互牵制的“怪圈”中。到 1997 年,这个怪圈开始被打破,此前太阳能电池产量的年增长率平均为 12% 左右,由于一些发达国家宣布实施“百万太阳能屋顶计划”,1997 年增长率就达到了 42% 。

1999~2007 年的太阳能电池产量如图 1-3 所示,2007 年的产量达到了 4000MW 。在 1997~2007 年的 10 年中,平均年增长率为 41.3% ,最近 5 年,更是达到了 49.5% 。可见,近年来光伏产业正在加速发展,已成为世界上发展速度最快的高新技术产业之一。

在很长时间内,太阳能电池产量基本上一直是美国居第一位,1999 年开始被日本超过,并长期保持领先地位,到 2007 年,中国迅速崛起,产量已经超过日本而成为世界第一位。全球 2006~2007 年太阳能电池产量如表 1-4 所示。

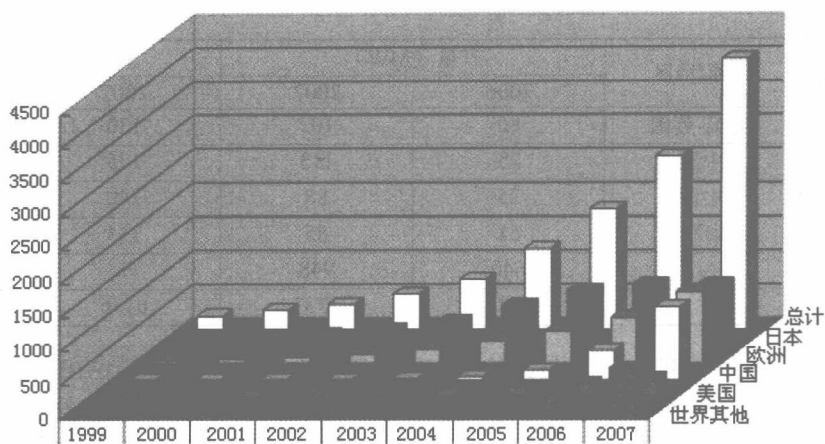


图 1-3 全球 1999~2007 年太阳能电池产量（单位：MW）

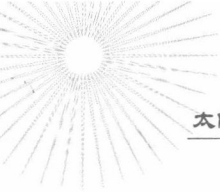
表 1-4 全球 2006~2007 年太阳能电池产量

国家/地区	2006 年		2007 年	
	产量 (MW)	比例 (%)	产量 (MW)	比例 (%)
日本	926.8	36.19	920.0	23.00
中国大陆	438.0	17.10	1088.0	27.2
中国·台湾	169.5	6.62	368.0	9.20
德国	508.0	19.83	810.0	20.25
欧洲其他	172.3	6.73	252.8	6.32
美国	179.6	7.01	266.1	6.65
世界其他	166.9	6.62	295.15	7.38
总计	2561.2	100	4000.05	100

据欧盟在 2008 年 4 月发表的 Photovoltaic Energy Barometer 统计，世界前 15 个最大光伏公司 2006 年和 2007 年的产量见表 1-5。其中，容量是指年生产能力。

表 1-5 世界前 15 个最大光伏公司 2006 年、2007 年的产量

公 司	国家/地区	产量 (MW)		容量 (MW)	
		2006	2007	2007	2008
Q-Cells	德国	253	389	516	925
Sharp	日本	434	363	710	710
无锡尚德	中国	158	327	540	1000
Kyocera	日本	180	207	240	300
First Solar	美国	60	207	308	323
茂迪	中国·台湾	102	196	240	400
Sanyo	日本	155	165	265	350
Sun Power	美国-菲律宾	63	150	214	414
保定英利	中国	35	143	200	400
Solarworld	德国	86	130	205	260
Mitsubishi	日本	111	121	150	150



(续表)

公 司	国家/地区	产量 (MW)		容量 (MW)	
		2006	2007	2007	2008
BP Solar	美国-英国	86	102	130	130
晶奥太阳能	中国	25	113	175	425
江苏林洋	中国	25	88	240	360
Isofoton	西班牙	61	85	135	180
其他公司		640	948	1	908
总计		2474	3733	6176	10249

由于光伏公司生产的大多数是晶体硅电池，需要的多晶硅原材料也在迅速增加。以生产 1MW 晶体硅电池需要 12 吨原材料计算，2005 年太阳能电池用多晶硅的总需求量达到了 2.04 万吨，其中多晶硅厂商供应了 1.5 万吨，利用半导体行业废弃的硅大约 0.3 万吨，还有 0.24 万吨缺口由历年的库存弥补。由于供求关系紧张，多晶硅原材料价格持续上涨，2001~2003 年世界太阳能级硅每千克的销售价格不到 25 美元，到 2006 年已经上涨到 100~250 美元，导致晶体硅太阳能电池的生产成本也随之上涨。多晶硅原材料紧缺，已成为严重制约晶体硅太阳能电池发展的瓶颈^[6]。

针对多晶硅原材料供不应求，价格飞速上涨的形势，光伏界采取了多种应对措施：

(1) 大力发展多晶硅原材料的生产

除了美国 Hemlock 公司、德国 Wacker 公司和日本 Tokuyama 公司等著名多晶硅原材料的生产厂家大量扩大生产以外，世界各地纷纷兴建新的生产厂，包括中国江西赛维 LDK 公司等一大批生产企业正在逐渐投入市场。根据预测，到 2015 年世界多晶硅产量将达到 40 万吨，多晶硅原材料供应紧张的局面将会得到缓解。

(2) 减小硅片厚度，节省材料

随着制造工艺和装备的改进，减小硅片厚度成为降低硅材料的消耗、节省成本的有效措施。30 多年来，硅片厚度减小了将近一半，大大节约了使用的硅材料，对于降低太阳能电池的成本起到了重要的作用。表 1-6 为不同时期硅片厚度的变化情况。

表 1-6 不同时期硅片厚度的变化情况

时 期	厚度 (μm)	单位功率硅材料用量 (t/MW)
20 世纪 70 年代	450~500	>20
20 世纪 80 年代	400~450	16~20
20 世纪 90 年代	350~400	13~16
2010 年	150~200	~12
2020 年 (预计)	80~100	8~10

(3) 发展薄膜太阳能电池

薄膜太阳能电池由于用硅量很少，即使是非晶硅电池，用硅量也不及晶体硅电池的 1/100。并且价格便宜，还可以做成柔性衬底，甚至不规则形状，可以具有不同颜色和透明程度，容易实现与建筑的一体化，因此近年来发展很快。世界薄膜太阳能电池 2006 年的产量是 181MW，2007 年增加到 400MW，占世界光伏总产量的 12%。其中，CdTe 电池 2006

年的产量是 68MW，2007 年为 219MW，年增长率达 222.1%，而 CIGS 电池 2006 年的产量只有 4.9MW，2007 年为 40MW，年增长率更是达到了 716.3%。

CdTe 电池发展很早，由于金属镉是有毒元素，会对环境造成污染，所以一直没有得到大规模实际应用。近年来，美国 First Solar 公司通过长期研发，采用独特的蒸气输运法沉积过程，开始进行批量生产。该公司 2004 年销售 6MW，2005 年为 20MW，2006 年开始在德国建造年产量为 100MW 的生产工厂。德国的 ANTEC 公司在 2001 年建成了 10MW 全自动生产线，其技术特点是硫化镉薄膜采用升华方法沉积。美国 United Solar 公司主要生产柔性衬底的非晶硅电池，计划 2010 年年产量将达到 300MW。日本 Showa Shell Sekiyu K. K 公司已建成年产量为 20MW 的 CIGS 电池生产厂，2007 年 8 月宣布投资 150 亿日元，兴建第二座年产量为 60MW 的 CIGS 电池生产厂，将在 2009 年投产。Honda Soltec 公司投资 70 亿日元兴建的 CIGS 电池生产厂已于 2007 年投产，生产功率为 112W 的组件，年产量为 27.5MW。还有不少光伏公司，如 Global Solar Energy Inc、Nanosolar Inc、Daystar Technologies Inc、Miasole 公司等都在从事 CIGS 电池的生产和研究开发工作，日本 Sharp 公司宣布年产量为 1GW 的薄膜太阳能电池工厂即将投产^[7]。

1.3.2 各国光伏发展

自 20 世纪 70 年代光伏发电开始在地面应用以来，在相当长时期内，主要是在无电地区离网应用，为解决偏远地区农牧民的基本生活用电发挥了积极的作用，同时还为航标灯、微波通信中继站、铁路信号、太阳能水泵等提供了安全可靠的电源。离网光伏系统应用的规模和领域不断扩大，为解决工农业特殊用电需要作出了贡献。

1990 年德国率先提出了“一千个太阳能屋顶计划”，在居民住宅屋顶上安装容量为 1~5kW 的光伏并网系统，由于采取了一些优惠政策，项目结束时共安装了屋顶光伏系统 2056 套。以此为契机，德国在 1995 年安装光伏系统容量为 5MW，1996 年增加了一倍，达到 10MW，1999 年更是扩大为 15.6MW。1999 年 1 月德国开始实施“十万屋顶计划”。2000 年安装光伏系统容量超过 40MW，2006 年为 850MW，2007 年增加到 1103MW，累计安装量已经达到 3846MW，其中，离网光伏系统 35MW，其余都是并网系统。目前，德国的光伏市场已从探索阶段发展成为繁荣的专业市场，其安装总量遥遥领先于其他国家^[8]。

EPIA 在 2008 年 2 月发表的 Global Market Outlook for Photovoltaics 研究报告中，对 2012 年之前一些国家的光伏市场发展进行了预测，根据政府和有关机构对光伏的支持力度，提出了两种方案：低方案是指完全按照市场运作规律，没有任何额外的支持机制的情况；高方案是指在很多国家实行政策支持的机制。不同的方案下，光伏市场的发展速度也截然不同，各国光伏市场数据分析及预测如表 1-7 所示。

表 1-7 各国光伏市场数据统计及预测（单位：MW）

国家/地区	低方案				高方案			
	2009	2010	2011	2012	2009	2010	2011	2012
德国	1500	1500	1650	1800	1750	2000	2200	2400
西班牙	300	400	400	400	500	600	600	600
意大利	130	200	270	360	300	400	540	730