



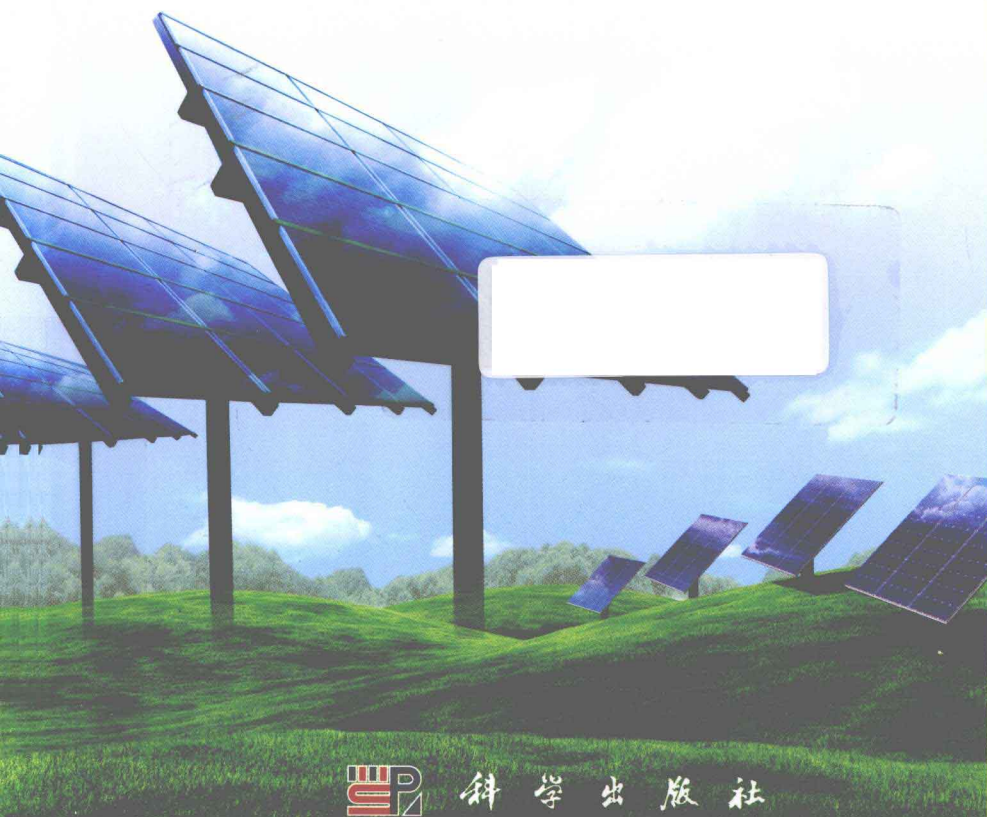
太阳能电池

材料·制造·检测技术



翁敏航 编著

刘 玮 审校



科学出版社

太阳能电池

——材料·制造·检测技术

翁敏航 编著

刘 玮 审校

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书作者总结多年的研究经验,由浅入深地对太阳能电池进行详细的介绍。首先对太阳能光电产业的历史演进及基本理论做简单的介绍,并对太阳能电池的半导体物理基础、基本原理、损失与测定进行了说明。本书重点在于太阳能电池相关原理的说明,并纳入许多读者感兴趣的议题,包括晶硅太阳能电池、染料敏化太阳能电池、硅基薄膜与高效率化合物的太阳能电池等知识。

本书使用浅显易懂的词句,并尽量按条理进行说明,同时配有丰富的图片,使读者减少不必要的阅读困难。

本书适合各大、中型院校能源、环境、电力及相关专业的师生参考阅读,同时适合作为太阳能电池研发工程师的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

太阳能电池:材料·制造·检测技术/翁敏航编著;刘玮审校. —北京:
科学出版社,2013.4

ISBN 978-7-03-036720-4

I.太… II.翁… III.太阳能电池 IV.TM914.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第030085号

责任编辑:孙力维 杨 凯 / 责任制作:董立颖 魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:张 楠

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

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>

北京源海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年4月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2013年4月第一次印刷 印张: 25 1/4

印数: 1—4 000 字数: 490 000

定 价: 58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前言

目前,太阳能电池已经成为一个热门的产业与研究领域。地球的平均温度在过去 20 年间升高了 0.2°C 以上,因此开发与使用无污染的绿色能源已成为 21 世纪人类生活中最重要的工作。在众多的绿色能源中,太阳能光电以其低环境冲击的优点,成为主要的替代能源。

本书的编撰构想源于 2006 年,当时主编有幸与几位热情的年轻朋友共同研究用于太阳能电池的光电薄膜材料,有感于当时相关的太阳能电池参考书太少,虽然国外已有许多大师级学者撰写的太阳能电池的经典书籍,但是对于国内的初学者而言似乎要一段相当长的时间才能理解,因而兴起编写一本轻松入门且可读性高的中文书籍。经过几年时间,坊间已经有许多优秀的太阳能电池的专业书籍。从太阳能电池的技术观点来看,可分为原理、材料、器件、检测、制备、封装、模块、设备、系统、应用与市场趋势等。有些书着重讲原理,有些书着重讲制备,有些则着重讲封装或应用,每本书都有其切入点与特色。作者在多年研究太阳能电池的过程中发现,太阳能电池是一门跨领域的学问。因此本书定位在太阳能电池的入门书,重点在于太阳能电池的相关原理的说明,并纳入许多读者感兴趣的议题,包括晶硅太阳能电池、染料敏化太阳能电池、硅基薄膜与高效率化合物的太阳能电池等基础知识。本书的内容汇集了多位编写者多年来的读书笔记、教学与研究数据,并参考了许多书籍与文献资料。大致说来,本书非常适合各大、中型院校能源、环境、电力及相关专业的师生参考阅读,同时适合作为太阳能电池研发工程师的参考书。

作者使用浅显易懂的词句,并尽量按条理进行说明,使读者减少不必要的阅读困难。虽然作者力求翔实,但难免有疏漏之处,请读者不吝指教。在此特别感谢过去及现在的众多同学给我的启发与协助资料收集,他们是叶佑名、王昱杰、黄健玮、庄明战、陈坤贤、林成、张峻逸、李家兴、郭恭佑、涂在根、邱宥浦、田伟辰、徐政杰、王詮文、庄子谊、陈伟修、李鸿升、彭昱铭、黄俊智、蔡水峰、何宜

璟、李宗育等。太阳能电池的知识广泛,要编辑一本书需要许多人的协助。特别感谢张育绮小姐(第1章、第3章与第5章)、叶昌鑫先生(第4章与第6章)、陈皇宇先生(第2章、第7章与第10章)、陈威宇先生(第8章与第9章)协助初稿整理。祝他们早日获得博士学位! 特别感谢洪政源博士与吴宏伟博士对本书提出的教学意见。也感谢施明昌教授、周春禧教授、熊京民教授、廖庆聪教授、于剑平教授、朱孝业教授、吴信贤教授长期在光电薄膜研究上给予的宝贵意见。感谢杨茹媛教授、管鸿教授与晁成虎博士对本书的编辑做出的相当多的贡献。主编与共同作者深深地感谢多位教导过的师长,苏炎坤教授、张守进教授、黄正亮教授、陈建富教授、梁从主教授、戴宝通教授等,让我们能在知识的领域里作一点小小贡献。

完成一本浅显易懂的太阳能电池的入门书,心中感觉踏实。能为这块土地做一点事,作者深感荣幸又谦卑。

作 者

2012年11月

目 录

1 章 太阳能电池概论	1
1.1 章节重点与学习目标	2
1.2 能源现状	2
1.2.1 全球变暖	3
1.2.2 能源危机	4
1.3 可再生能源	4
1.3.1 发展可再生能源的必要性	4
1.3.2 可再生能源的种类	5
1.3.3 发展可再生能源的策略	7
1.3.4 发展太阳能电池的必要性	8
1.4 太阳光的使用	10
1.4.1 太阳光谱	10
1.4.2 太阳辐射与吸收	10
1.4.3 太阳光的光电转换	12
1.5 太阳能电池的种类	12
1.6 太阳能电池的发展	19
1.7 世界主要国家和地区对太阳能电池的补助政策	22
1.8 关于太阳能电池的知识	23
1.9 结 语	24
2 章 太阳能电池的半导体物理基础	29
2.1 章节重点与学习目标	30
2.2 半导体材料分类	31

2.2.1	元素半导体	32
2.2.2	化合物半导体	33
2.2.3	有机半导体	35
2.2.4	非晶态半导体	35
2.3	晶体结构与能带结构	36
2.3.1	晶体结构	36
2.3.2	能带结构	41
2.4	电子传输性质	46
2.5	本征半导体及非本征半导体	48
2.6	半导体中的电性行为	51
2.7	半导体的结	54
2.7.1	PN 结	54
2.7.2	肖特基结	58
2.7.3	异质结	59
2.8	半导体中的复合过程	60
2.9	半导体的光电性质	62
2.10	结 语	64
3	章 太阳能电池的基本原理、损失与测定	69
3.1	章节重点与学习目标	70
3.2	太阳能电池的基本原理	70
3.2.1	太阳光谱的基本特性	70
3.2.2	太阳能电池产生电力的基本原理	72
3.2.3	太阳能电池的暗特性	73
3.2.4	太阳能电池的光特性	75
3.3	太阳能电池的效率损失	77
3.3.1	太阳能电池效率的损失原因	77
3.3.2	减少太阳能电池效率损失的方法	79
3.3.3	量子效率	80
3.4	太阳能电池的电性参数	81

3.4.1	短路电流	81
3.4.2	开路电压	82
3.4.3	填充因子与转换效率	83
3.5	太阳能电池的等效电路	84
3.5.1	理想太阳能电池的等效电路	84
3.5.2	考虑到串联电阻及并联电阻的等效电路	85
3.5.3	串联电阻(R_s)对电性的影响	87
3.5.4	并联电阻(R_{sh})对电性的影响	88
3.5.5	照度对电性的影响	90
3.5.6	温度对电性的影响	90
3.5.7	串联电阻(R_s)与并联电阻(R_{sh})的计算	91
3.6	太阳能电池的测定环境	93
3.6.1	太阳光模拟器	93
3.6.2	温度测定	95
3.6.3	组件测定	96
3.7	结 语	97

4 章 晶硅太阳能电池器件与制造

4.1	章节重点与学习目标	102
4.2	多晶硅原料的制造技术	103
4.2.1	三氯硅烷的制造与提纯	106
4.2.2	硅烷热分解法	108
4.2.3	四氯化硅还原法	111
4.3	单晶硅片制造技术	111
4.3.1	单晶生长的关键设备及制备	111
4.3.2	柴式生长法	112
4.3.3	浮区生长法	115
4.3.4	单晶硅晶圆的加工成型	116
4.3.5	单晶硅中的杂质	118
4.4	多晶硅片制造技术	121

4.4.1	多晶硅材料	122
4.4.2	多晶硅片加工成型	125
4.4.3	多晶硅片	126
4.4.4	多晶硅中的杂质	128
4.5	晶硅太阳能电池的种类与结构	129
4.5.1	晶硅太阳能电池的种类	130
4.5.2	晶硅太阳能电池的结构	132
4.6	晶硅太阳能电池制造技术	137
4.6.1	前段器件制备	137
4.6.2	后段封装与模块	144
4.7	前瞻性制造技术	147
4.7.1	高效率单晶硅太阳能电池	148
4.7.2	具有本征薄膜的异质结太阳能电池	150
4.7.3	球状硅基太阳能电池	153
4.7.4	六边形晶圆封装模块	156
4.8	结 语	157

5 章 非晶硅薄膜太阳能电池 163

5.1	章节重点与学习目标	164
5.2	非晶硅薄膜太阳能电池的发展背景	164
5.3	非晶硅材料的结构与特性	166
5.4	非晶硅材料的光致衰退与改善方法	170
5.5	非晶硅薄膜太阳能电池结构	172
5.6	非晶硅薄膜太阳能电池制备	176
5.6.1	非晶硅薄膜太阳能电池的模块化	176
5.6.2	透明导电膜技术	177
5.6.3	非晶硅薄膜制备技术	181
5.6.4	激光切割技术	183
5.7	非晶硅薄膜太阳能电池的封装技术	188
5.8	研发趋势	190

5.9	结 语	192
6	章 前瞻硅基薄膜太阳能电池	197
6.1	章节重点与学习目标	198
6.2	晶硅薄膜太阳能电池的发展背景	198
6.2.1	晶硅薄膜太阳能电池技术——单结太阳能电池	198
6.2.2	次世代硅薄膜太阳能电池技术——叠层太阳能 电池	199
6.2.3	叠层太阳能电池的原理	201
6.3	晶硅薄膜太阳能电池的种类	202
6.3.1	a-Si/ μ c-Si 叠层太阳能电池	202
6.3.2	a-Si/SiGe 叠层太阳能电池	204
6.3.3	a-Si/poly-Si 叠层太阳能电池	205
6.4	晶硅薄膜太阳能电池的制备技术	206
6.4.1	a-Si/ μ c-Si 型太阳能电池的技术发展	206
6.4.2	a-Si/SiGe 型太阳能电池的制备技术	208
6.4.3	a-Si/poly-Si 叠层太阳能电池的制备技术	209
6.5	微晶硅薄膜的制备技术	210
6.6	多晶硅薄膜的制备技术	213
6.6.1	直接沉积法	214
6.6.2	再结晶法	215
6.7	大面积硅基薄膜镀膜技术	221
6.8	硅基薄膜太阳能电池的发展趋势	225
6.9	结 语	227
7	章 染料敏化太阳能电池	233
7.1	章节重点与学习目标	234
7.2	染料敏化太阳能电池的发展历史	234
7.3	染料敏化太阳能电池的基本组成	236
7.3.1	透明导电板	236

7.3.2	工作电极	237
7.3.3	光敏化剂	239
7.3.4	电解质	240
7.3.5	反电极	241
7.4	染料敏化太阳能电池的工作原理与制备	241
7.4.1	电流产生原理	241
7.4.2	传输损失机制	244
7.4.3	电池制备的基本方法	246
7.5	染料敏化太阳能电池的研究重点	248
7.5.1	透明导电膜的研究	249
7.5.2	工作电极的研究	250
7.5.3	染料的研究	253
7.5.4	电解质的研究	256
7.5.5	其他的研究重点与趋势	261
7.6	染料敏化太阳能电池的专利探讨	265
7.7	国际研发现状	267
7.8	结 语	269

8 章 化合物太阳能电池

8.1	章节重点与学习目标	280
8.2	化合物半导体	281
8.3	碲化镉基太阳能电池	282
8.3.1	硫化镉/碲化镉太阳能电池的发展历史	282
8.3.2	硫化镉/碲化镉的材料特性	283
8.3.3	硫化镉/碲化镉太阳能电池的结构	283
8.3.4	硫化镉/碲化镉薄膜层的制备	285
8.3.5	硫化镉/碲化镉太阳能电池的模块	286
8.3.6	CdTe 基薄膜太阳能电池的未来课题	287
8.4	铜铟硒基太阳能电池	288
8.4.1	发展历史	288

8.4.2	铜铟硒太阳能电池	289
8.4.3	铜铟镓硒太阳能电池	293
8.4.4	铜铟硒基薄膜型太阳能电池的模块化制备	294
8.4.5	铜铟硒基薄膜型太阳能电池的未来课题	296
8.5	III-V族太阳能电池	296
8.5.1	III-V族太阳能电池的基本概念	296
8.5.2	砷化镓型太阳能电池	300
8.5.3	磷化铟型太阳能电池	302
8.5.4	氮化镓型太阳能电池	303
8.5.5	多结III-V族太阳能电池	303
8.5.6	III-V族太阳能电池制备	305
8.5.7	III-V族太阳能电池的未来课题	309
8.6	聚光型太阳能电池	310
8.6.1	聚光型太阳能电池模块	312
8.6.2	太阳追踪系统	315
8.7	结 语	316

9 章 次世代太阳能电池

9.1	章节重点与学习目标	322
9.2	多结、多带隙及叠层型太阳能电池	324
9.3	中间能带型太阳能电池	327
9.4	热载流子太阳能电池	328
9.5	热光伏太阳能电池	330
9.6	频谱转换太阳能电池	331
9.6.1	频谱上转换	331
9.6.2	频谱下转换	332
9.6.3	频谱转换集中	333
9.7	有机太阳能电池	334
9.7.1	有机太阳能电池的发展历史	335
9.7.2	有机太阳能电池的基本原理	337

9.7.3	单层结构	337
9.7.4	双层异质结结构	338
9.7.5	混合层异质结结构	338
9.7.6	多层薄膜型结构	339
9.8	塑料太阳能电池	340
9.8.1	塑料太阳能电池的材料特性及种类	340
9.8.2	共轭聚合物/ C_{60} 复合有机太阳能电池	341
9.9	纳米结构太阳能电池	343
9.10	结 语	346

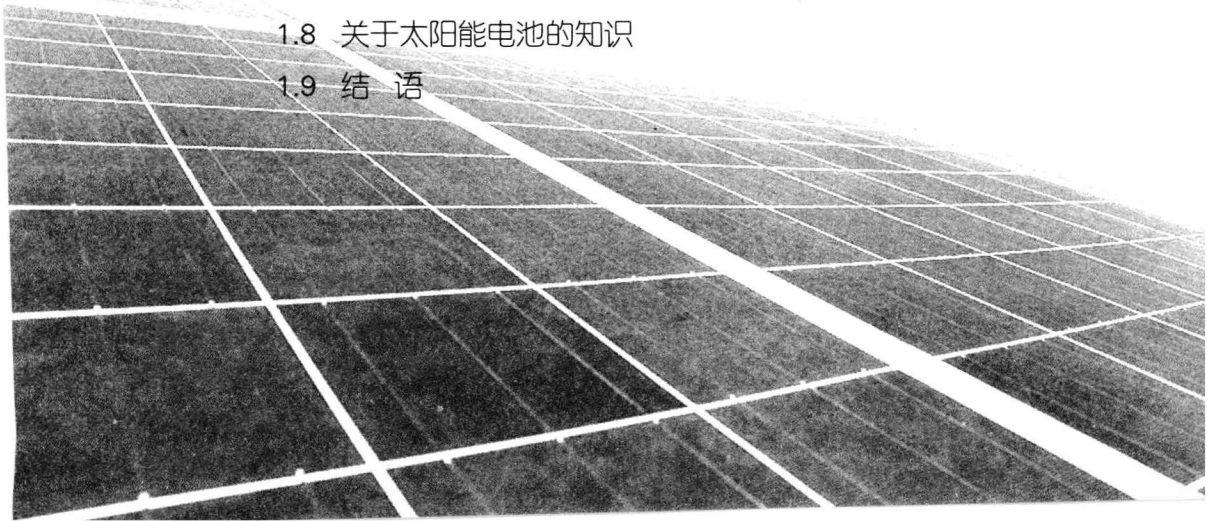
10 章 太阳能电池材料分析技术 351

10.1	章节重点与学习目标	352
10.2	表面形貌与微结构分析	353
10.2.1	扫描电子显微镜	353
10.2.2	透射电子显微镜	356
10.2.3	原子力显微镜	360
10.3	晶体结构与成分分析	363
10.3.1	能量色谱仪	363
10.3.2	X射线衍射分析仪	365
10.4	光学特性分析	368
10.4.1	紫外线/可见光吸收光谱	368
10.4.2	傅里叶转换红外线光谱仪	370
10.4.3	拉曼光谱仪	375
10.5	电特性分析	378
10.5.1	霍尔量测	378
10.5.2	直流电性量测系统($I-V$)	380
10.5.3	微波光电导衰减器	382
10.5.4	光电转化效率测定仪	384
10.6	结 语	385

1 章

太阳能电池概论

- 1.1 章节重点与学习目标
- 1.2 能源现状
- 1.3 可再生能源
- 1.4 太阳光的使用
- 1.5 太阳能电池的种类
- 1.6 太阳能电池的发展
- 1.7 世界主要国家和地区对太阳能电池的补助政策
- 1.8 关于太阳能电池的知识
- 1.9 结 语



1.1

章节重点与学习目标

由于近年来全球气候的异常以及各国经济发展而消耗大量石油燃料,已造成大气中二氧化碳等温室气体的浓度急速增加,产生越来越明显的全球增温、海平面上升及气候变迁加剧等现象,对水资源、农作物、自然生态系统及人类健康等层面都造成日益明显的负面冲击。全球变暖与能源危机成为亟待解决的问题,因此,可再生能源技术的开发成为当前能源产业的发展趋势。绿色可再生能源之中,具有诸多优点的太阳能光电的发展受到极大瞩目。在本章中,我们先说明发展可再生能源的必要性,目前环境污染造成的全球变暖,传统能源所面临的问题,以及国际上产学研相应的对策。接着介绍替代能源、可再生能源以及绿色能源的意义,说明发展太阳能电池的必要性。本章还将介绍太阳光的基本知识,包含太阳光谱、太阳辐射以及各种太阳能电池种类、技术概论与目前的市场评价。最后将给有志从事太阳能电池的工作者一些入门学习的建议。读者在读完本章后,应该能回答:

- (1) 发展可再生能源的必要性与紧迫性。
- (2) 发展太阳能电池的理由。
- (3) 太阳能电池的发展历史。
- (4) 太阳能电池的种类与目前效能。
- (5) 各种太阳能电池的优缺点。
- (6) 太阳能电池的发展现状与待解决的研发重点。
- (7) 可以学习太阳能电池知识的途径。

1.2

能源现状

我们应当了解目前我们所居住的环境正面临两个亟待解决的问题:

- (1) 全球变暖。
- (2) 能源危机。

1.2.1 全球变暖

全球变暖(Global Warming)是指地球表面的温度越来越高,造成海平面上升及全球气候变迁加剧等现象,对水资源、农作物、自然生态系统及人类健康等层面都造成明显的冲击。图 1.1 所示为北极冰层俯视图,从 1979 年到 2003 年,北极冰层有 8% 的冰层面积溶化。图 1.2 所示为 1928 年与 2004 年阿根廷的冰河消退对照图。在全球变暖日益严重的影响下,喜马拉雅山上游的冰河也有逐渐溶化的趋势。全球变暖的原因大致包括^[1]:

(1) 自然的改变:太阳辐射的变化与火山活动。

(2) 外来因素的影响:主要是温室气体产生的温室效应,亦即大气中二氧化碳和其他温室气体的含量不断增加,使得地球表面的热气被局限在地表上。燃烧化石燃料、清理林木和耕作等都增强了温室效应。

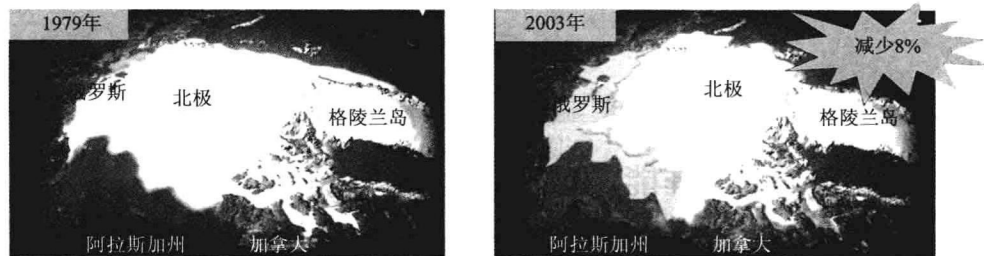


图 1.1 1979 年与 2003 年北极冰层前后对照图(www.erec-renewables.org)

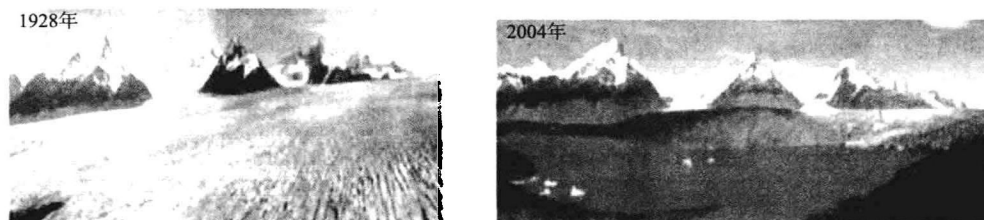


图 1.2 阿根廷的冰河消退对照图(www.erec-renewables.org)

温室效应的观测是 1897 年由瑞典化学家阿伦尼乌斯(Arrhenius)提出的,全球性的温度增量可能造成地球环境的变动,包括海平面上升和降雨量及降雪量在数额和样式上的变化,如洪水、旱灾、热浪、飓风和龙卷风。除此之外,还有其他后果,包括更高或更低的农产品产量、冰河消退、夏天时河流流量减少、物

种消失及疾病肆虐等。多位气候学家同意,自从1950年以来,太阳辐射的变化与火山活动所产生的变暖效果比人类所排放的温室气体还要低,关于温室气体的产生,大部分与燃烧化石燃料有关。传统化石能源发电的 CO_2 排放量约 $530 \text{ t}/(\text{GW} \cdot \text{h})$,而太阳能发电制造的 CO_2 排放量仅 $5 \text{ t}/(\text{GW} \cdot \text{h})$ 。目前地球平均温度已经比20年前高 0.2°C 以上,解决全球变暖问题已经刻不容缓了。

1.2.2 能源危机

随着工业与物质文明的发展,人类对能源的依赖程度加深了能源的过度使用,表1.1列出了各种传统能源的储藏量与可用年限估计。多数传统能源的储藏量都是有限的,即会有用尽的一天。依据估算,石油储藏量剩下3.08亿桶,可使用至2050年;天然气储藏量剩下 136 Mm^3 ,可使用至2069年;煤储藏量剩下9822亿t,可使用至2237年;铀储藏量剩下385万t,可使用至2071年^[2]。

表 1.1 各种传统能源估计的储藏量年限

	石油	天然气	煤	铀
储藏量	3.08 亿桶	136 Mm^3	9822 亿 t	385 万 t
2010 年后 可用年限	40	59	227	61

1.3 可再生能源

1.3.1 发展可再生能源的必要性

由前节所述,发展其他非传统的能源非常必要,并且具有急迫的需求。非传统的能源有一些常见的分类^[3~7]。

可再生能源(Renewable Energy)是自然界中已存在的能源,且在自然界中生生不息,具有与耗能同等速度的再生能力,因而不会造成能源的短缺,有着再生及再利用的可能性。可再生能源是取之不竭、用之不尽的资源,如风能、生物质能、太阳能、波能和潮汐能、水力发电以及地热能等。