

电能变换与应用丛书

DIANNENG BIANHUAN YU YINGYONG CONGSHU

太阳能发电 原理与应用

冯垛生 主编

宋金莲 赵慧 林珊 赵海波 编著

- 第1章 太阳能发电概述
- 第2章 太阳能电池的发电原理和特性
- 第3章 太阳能电池的种类及其特点
- 第4章 太阳能发电系统的结构和设计
- 第5章 太阳能发电系统的控制
- 第6章 太阳能光伏发电系统的应用



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

中国可再生能源学会会刊 (CJRE)

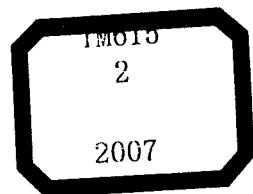
太阳能发电

原理与应用

第1卷 第1期

2008年 1月 15日 第15卷 第1期

- 1. 太阳能发电技术现状与展望
- 2. 太阳能发电系统的设计与仿真
- 3. 太阳能发电系统的性能评价
- 4. 太阳能发电系统的可靠性分析
- 5. 太阳能发电系统的经济性分析
- 6. 太阳能发电系统的政策与法规



电能变换与应用丛书

太阳能发电原理与应用

冯焱生 主编

宋金莲 赵 慧 林 珊 赵海波 编著

人 民 邮 电 出 版 社

北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

太阳能发电原理与应用 / 冯堃生主编; 宋金莲等编著.

—北京: 人民邮电出版社, 2007.7

(电能变换与应用丛书)

ISBN 978-7-115-15955-7

I. 太... II. ①冯...②宋... III. 太阳能发电 IV. TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 033158 号

内 容 提 要

本书分为 6 章, 前 4 章叙述太阳能光伏发电的基础知识, 如光伏发电原理、太阳能电池的原理与分类、并网发电和离网发电, 同时还介绍了重要部件光伏电池模块、控制器 (特殊变频器) 和蓄电池的类型, 可供读者设计时参考。第 5 章讲解系统控制方法, 介绍了最大功率点跟踪控制的几种方案, 可供科研工作者选题时参考。第 6 章介绍光伏发电系统的应用, 主要涉及太阳能 PV 空调器和太阳能电动车两种典型应用, 并给出电路图、计算机控制软件和实验数据曲线, 内容翔实。

本书读者对象为新能源、电力电子专业技术人员或相关专业的师生。

电能变换与应用丛书

太阳能发电原理与应用

-
- ◆ 主 编 冯堃生
编 著 宋金莲 赵 慧 林 珊 赵海波
责任编辑 张 伟
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京铭成印刷有限公司印刷
新华书店总店北京发行所经销
 - ◆ 开本: 700×1000 1/16
印张: 15.75 彩插: 2
字数: 254 千字 2007 年 7 月第 1 版
印数: 1—5 000 册 2007 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-15955-7/TN

定价: 29.00 元

读者服务热线: (010)67129264 印装质量热线: (010)67129223

序

人类当前使用的能源主要来自煤炭、石油等多年储藏在地下的石化能源，按照目前的开发力度，几十年或许一百多年后，地球所储存的这些能源就将枯竭。因此，节约能源和开发可再生能源已经成为当务之急。在可再生能源中，水能已经得到了广泛的利用，但水能资源终究是有限的；相反，太阳能和风能则是取之不尽、用之不竭的，只要宇宙中太阳系存在，就是如此。

“万物生长靠太阳”，这是人人皆知的真理。自从地球诞生以后，太阳能就自然地利用着，而人为地利用则是近代的事情。首先得到开发的是太阳能的热利用。在我国大中城市，特别是像昆明这样年日照时间长的城市，屋顶放置太阳能热水器已成了一道独特的风景。但太阳能发电就不那么容易了，在这方面，我国尚落后于世界发达国家。

太阳能发电的发展，无非受两方面因素的限制：一是降低太阳能电池的价格，二是研制出高效价廉的控制器。二者相比，前者成为发展的“瓶颈”。经过半个多世纪的开发，太阳能电池的价格已降低了 100 多倍，但目前几美元/瓦的价格仍过高。至于光伏发电系统中的控制器，主要依赖电力电子技术和自动控制技术，我国已经具备扎实的基础。只要太阳能电池的价格继续下降，在不久的将来太阳能发电装置也会像太阳能热水器一样，在千家万户中得到应用。

广东工业大学冯焱生教授在日本进修期间，一直注意收集太阳能光伏发电的资料，回国后又从事过该项技术的研究，现将研究成果整理出版，相信会引起电力电子界同行和企业界的注意，促进高质量的控制器的研发，同时也会增加广大读者对太阳能发电的兴趣。

原中国电工技术学会电力电子学会副理事长

上海大学教授



2007 年 4 月 16 日

前 言

太阳能的应用主要有两种形式：一是把太阳能转换为热能，二是把太阳能转换为电能。前者包括人们所熟悉和广泛应用的太阳能热水器，后者称为太阳能光伏发电技术（简称 PV 技术）。发达国家如美国、德国、日本等，由于相对重视，研发经费充足，半个世纪来太阳能电池的成本已由每瓦 1500 美元降至每瓦几美元，应用的领域也从航天、国防、工业转向民用。太阳能光伏发电是一种清洁能源，其意义不仅是部分代替石化燃料发电，而且可以减少 CO_2 和有害气体的排放，防止地球环境恶化。

我国的能源政策也一贯重视新能源开发，历来都把信息、新材料、新能源及生物工程作为科研开发的方向和四大支柱产业。关于太阳能电池的应用，在航天方面，太阳能电池板供电的卫星、飞船在几十年前已遨游太空；在民用方面，由于太阳能电池价格偏贵，除西藏等无电地区（约 100 个县）建设太阳能发电站外，内地城市用于建筑供电（每户 1~2kW）或家用电器（100W 以上），价格上尚不能承受。太阳能作为新能源发展的方向，相信不久是会普及的。以太阳能电池生产企业来说，几年前中国太阳能电池占世界产量的份额微不足道。但这两年突飞猛进，已占世界第三位，且出口数量巨大。太阳能发电在中国的广泛应用将指日可待。

本书以太阳能光伏发电为主题，是国内不多的几本专著之一。本书前半部分（第 1 章~第 4 章）向广大读者展示太阳能光伏发电的知识和前景，后半部分（第 5 章、第 6 章）则提出太阳能光伏发电系统电力电子和自动控制方向的科研课题，相信能对广大控制界的学者和研究人员起到抛砖引玉的作用。

关于光伏发电的课题，即使对于大学本科电气工程和自动化专业的大学生，也会感到陌生。相信这方面的开发研究会逐渐地兴旺起来，太阳能光伏发电的家用电器也会像太阳能热水器一样，普及到千家万户。同时希望本书能为我国能源政策的改进和完善起一定的促进作用。任何国家新能源产业的发展均有赖于政府政策的促进。在国外，家庭若采用太阳能光伏产品政府要补助消费者一定的费用

以资鼓励。美国“能源政策法”规定，从2004~2006年每年都拨款给州政府用于购置节能产品。德国“百万屋顶计划”使许多家庭不仅利用太阳能光伏发电解决自家供电，而且这些家庭还办成了一所所私人“小型电站”，源源不断地向公用电网输送电能。

广东省深圳市是我国推广太阳能光伏发电最好的城市之一。由国家建设部牵头于2006年1月成立了“深圳市可再生能源（太阳能）建筑应用城市级示范可行性研究报告”编制组，经专家评审选出全国7个城市35个项目为示范项目，其中深圳就占了15个，深圳园博园光伏并网发电系统是目前亚洲最大的太阳能发电系统。此外，深圳还是世界太阳能光伏产业聚集地，从事太阳能光伏发电产品开发生产的企业超过20家，每年产值约20亿元，占全国产值的70%。

本书由冯垛生教授主编，宋金莲参与编写第1章~第3章，赵海波参与编写第4章，林珊参与编写第5章，赵慧参与编写第6章。华立学院机电系关友谊老师在文字的录入和绘图方面做了大量工作，在此表示感谢。

由于太阳能光伏发电技术在国内尚属于一项新技术，因此作者在编写本书时参考了大量的文献，为了尊重原稿，在编写过程中对专业性术语和符号、下标等未作统一，请读者见谅。如用“水平不够、错漏在所难免”这样的套话，尚不足以推卸自己的责任。只能说，这是一项新技术，作为专著撰写很不成熟，请读者不吝提出宝贵意见，以便我们在重印和修订时改正。

冯垛生

于广东工业大学

目 录

第 1 章 太阳能发电概述	1
1.1 太阳能电池和太阳能发电	1
1.1.1 太阳能	1
1.1.2 太阳能变为电能	2
1.1.3 利用太阳能进行分散型发电和供电	2
1.1.4 小结	3
1.2 太阳能发电发展史	3
1.2.1 太阳能电池开发史	3
1.2.2 产量和价格的变化	5
1.2.3 太阳能发电系统和太阳能电池的价格	6
1.3 太阳光发电和环保的关系	7
1.3.1 3E 的概念	7
1.3.2 各种发电设备价格、性能的比较	8
1.4 太阳能发电的过去、现在和未来	10
1.5 国内外太阳能发电的现状与趋势	20
1.5.1 美国光伏发电的“百万屋顶计划”	21
1.5.2 日本的“阳光计划”	22
1.5.3 德国的“10 万屋顶发电计划”	25
1.5.4 中国的“光明工程”计划	26
1.5.5 我国港澳地区太阳能发电项目简介	32
第 2 章 太阳能电池的发电原理和特性	37
2.1 太阳光的性质	37
2.1.1 评价太阳光性质的物理量	37
2.1.2 直射光和散射光	38

2.1.3	太阳光强度与波长的关系	40
2.2	太阳能电池的发电原理和变换效率	42
2.2.1	光电变换	42
2.2.2	二极管和光伏器件	43
2.2.3	太阳能电池光伏变换效率	48
2.2.4	太阳能电池的等值电路和伏安特性	52
2.3	太阳能电池特性的测量	55
2.3.1	太阳能电池组件	55
2.3.2	室外测量注意事项	55
2.3.3	带负荷测量电压、电流	55
2.3.4	四端测量法	56
第3章	太阳能电池的种类及其特点	57
3.1	太阳能电池的分类	57
3.2	几种常用太阳能电池的特点	58
3.3	建材一体型太阳能电池	63
第4章	太阳能发电系统的结构和设计	65
4.1	太阳能发电系统概述	65
4.1.1	太阳能电池阵列	67
4.1.2	系统设计原则	69
4.2	功率控制器	73
4.2.1	功率控制器的组成	73
4.2.2	功率控制器电路举例	76
4.3	蓄电池	92
第5章	太阳能发电系统的控制	95
5.1	最大功率点跟踪控制	95
5.1.1	最大功率点跟踪控制的概念	95
5.1.2	MPPT控制的几种不同算法	96

5.2	太阳能发电系统与交流电网系统并联的控制	133
5.2.1	不带耦合变压器方案	133
5.2.2	带耦合(隔离)变压器方案	138
第6章	太阳能光伏发电系统的应用	143
6.1	太阳能空调器的开发	143
6.1.1	家用太阳能空调器系统的开发背景	143
6.1.2	太阳能空调器系统的构成	145
6.1.3	实际应用效果	156
6.2	与单相民用电网并联的太阳能光伏发电系统应用实例	157
6.2.1	系统结构	158
6.2.2	系统控制原理	159
6.3	模拟太阳能电池伏安特性的直流电源装置	163
6.3.1	太阳能电池的特性	163
6.3.2	模拟电源装置的电路结构	164
6.3.3	太阳能电池的动特性	166
6.3.4	模拟电源装置的动特性	169
6.4	双方向太阳能空调器试验系统	172
6.4.1	双方向太阳能空调系统的结构和技术规格	172
6.4.2	太阳光伏系统中的逆变器	173
6.4.3	系统的逆变器控制	174
6.4.4	连接实际负载(空调器)并与交流电网(220V, 50Hz)并网试验	175
6.5	太阳能电动车	183
6.5.1	太阳能电动车的发展概况	183
6.5.2	蓄电池充放电控制技术	185
6.5.3	系统总体设计	197
6.5.4	实验结果及分析	208
6.6	民用型绿色电源——太阳能数码设备移动充电器	215
6.6.1	移动电源特点	216
6.6.2	应用举例	217

6.7 深圳国际园林花卉博览园 1MW 并网太阳能光伏电站简介	218
6.8 20kW 光伏屋顶并网发电系统简介	219
6.9 2.5kW 住户用光伏发电系统 (BIPV) 简介	220
附表	224
参考文献	237

第1章 太阳能发电概述

1.1 太阳能电池和太阳能发电

1.1.1 太阳能

太阳能的热能利用和光能利用是其两个最重要的应用领域，之所以特别引人注目，是由太阳能的特殊性所决定的。太阳能具有如下优点：

- ① 储量巨大；
- ② 不会枯竭；
- ③ 清洁能源；
- ④ 不受地域限制。

到达地球的太阳能，在大气圈外的太阳光强度为 1.38kW/m^2 ，其中有 30% 向宇宙反射，残余的 70% 可到达地球。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。由于太阳距地球约 $1.5 \times 10^8\text{km}$ ，故有害的放射能不会对地球产生影响。此外，太阳能不会产生 CO_2 等有害物质，不会引起地球温暖化，是一种清洁能源。

火力发电或原子能发电所需的燃料常受到地域限制，而太阳能不存在地域差别，是一种无所不在的能源。在这方面它和计算机的互联网有些相似。

太阳能的缺点是能量密度低、容易受气象条件的影响，不具备蓄电功能等。因此，对于大容量的太阳能发电装置，需要附加储能设备，例如蓄电池组，或把太阳能发电系统和交流电网联网进行能量互补。此外，太阳能发电本身虽然没有对环境造成污染，但太阳能电池、电力电子变换装置的制造过程仍会产生环境污染，这在综合考虑发电效益时也应计及。

1.1.2 太阳能变为电能

太阳能电池主要由半导体硅制成。半导体的导电性能介于导体和绝缘体之间。在半导体上照射光后，由于其吸收光能会激发出电子和空穴（正电荷），从而半导体中有电流流过，这可称为“光发电效应”或简称“光伏效应”。

下面就硅晶体做成的半导体加以说明。众所周知，掺有磷杂质的硅含有多余电子，称为 N 型半导体；掺有硼杂质的硅含有多余正电荷，称为 P 型半导体。若将两者结合，称为 PN 结，这就是半导体器件的最基本结构。太阳能电池同样是利用了 PN 结的光伏效应。

在 PN 结中，P 型半导体的电子受到拉力，N 型半导体的正电荷受到拉力，在结合处形成正负抵消的区域，形成阻挡层。此时，若有光照射，则激发电子自由运动流向 N 型半导体；正电荷则集结于 P 型半导体，从而产生了电位势。如果外接灯泡（负荷），就有电流流动。光生电的工作原理如图 1-1 所示。

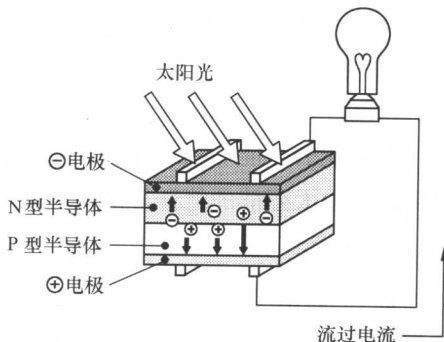


图 1-1 光生电原理

1.1.3 利用太阳能进行分散型发电和供电

① 对难于供电的无电地区，如上所述，由于太阳能不受地域限制、无处不在的特点，可将太阳能发电用于远离大陆的海岛灯塔、距离城市远的山区小屋、山顶的无线电转播台等最能发挥太阳能发电优势的地区。

② 能减少输电损耗。由于太阳能发电是分散型发电，一般只需满足本区域用电，无需远距离送电，故减少了输电损耗。

③ 对城市供电高峰时的平峰贡献。发电设备建设周期很长，运行以后无法在短时间内增加尖峰负荷所需电力。而且城市供电的负荷十分不均衡，例如，白天比夜晚的用电量大，一般中午 13~15 时为峰值；夏季由于用空调用电量要比冬季用电量增大很多。其应对的方法，如核电就用抽水蓄能电站来平峰，黑夜负荷低时，就利用多余的电力抽水蓄能；白天负荷高时，用蓄能水力发电以削平电力峰值。太阳能发电就可以在城市电力高峰时，与交流电网并网，以补足峰值负荷

的不足,起到“平峰”作用。而且太阳能发电的电力负荷曲线刚好与城市电力的需求相吻合。例如,太阳能发电输出最大功率刚好是中午 12~15 时,太阳能发电也是夏季比冬季高。目前,国外“太阳能空调器”产品已实用化,太阳能发电提供的容量约等于空调器功率的 50%,主要起“平峰”作用(详见后章)。

④ 电源多样化,可以安全可靠供电。常规能源有火力、水力、核电等;新能源则有风力、太阳能等。多种能源发、供电,对一个国家的安全、可靠供电有利,将不会依赖特定的燃料供给。特别是发生自然灾害之际,学校、医院、公园都需事先设置紧急的太阳能发电备用电源。

1.1.4 小结

太阳光发电系统有如下优点:

- ① 直接利用太阳能;
- ② 光电直接变换;
- ③ 分散型发电系统。

现具体将其特点汇总于表 1-1。

表 1-1 太阳光发电系统特点

直接利用太阳能	• 储量大、清洁能源 • 无所不在 • 能量密度低、受气候影响、无蓄电功能
光电直接变换	• 阴雨天也可发电(发电量降低) • 构造简单、无运动部件、使用方便、可无人化管理 • 以模块为单位选择容量 • 可作为建材,代替屋顶和窗 • 制造所需能耗低,只要 2~3 年即可收回投资
分散型发电系统	• 无需供电、输电设备 • 联网以后对城市用电有平峰作用 • 作为新能源之一,对供电可靠性做出贡献

1.2 太阳能发电发展史

1.2.1 太阳能电池开发史

太阳能发电发展史如表 1-2 所示。太阳光发电的历史可以追溯到 1800 年,伯

克莱氏发现对某种半导体材料照射光后，会引起其伏安特性改变。最终，发现了光伏效应，并以此半导体制成太阳能电池。其后，对硒、氧化铜等半导体材料研究，同样发现此种光伏效应，也制成类似的太阳能电池。

表 1-2 太阳能发电发展史

年 代	成 就
1800	发现光伏效应
1876	硒的光伏效应研究
1904	Cu、Cu ₂ O 对光的敏感性研究
1940	PN 结理论的研究
1954	单晶硅太阳能电池发明（美国贝尔实验室）
1955	CdS 太阳能电池发明
1956	GaAs 太阳能电池发明
1958	在先驱者 1 号通信卫星上应用太阳能电池
1972	美国制订新能源开发计划
1974	日本制订太阳能发电发展的“阳光计划”
1976	非晶硅太阳能电池的发明
1984	美国 7MW 太阳能发电站建成
1985	日本 1MW 太阳能发电站建成
1991	制定再生能源发电与公共电力并网法规（德国）
1992	制定逆流供电与公共并网法规（日本）
1994	住宅用太阳光发电系统技术规程（日本）
2003	RPS 法（新能源法案）（日本）

1954 年，美国贝尔实验室的皮尔松、佛朗等三名科学家利用硅晶体材料开发出性能良好的太阳能电池，其变换效率达 6%，经过不断改良后成为现在硅太阳能电池的原型。

在应用方面，硅太阳能电池最早用于人造卫星（美国先驱者 1 号）的电源，继后用于孤岛的灯塔、远离城市的山顶无线电中继站等特殊场合。

1976 年，美国 CA 公司的卡尔松发明了非晶硅太阳能电池。该电池的变换效率虽低于单晶硅，但制造时可以任意选配电压电流比，故大量用于计算机、手表和各种家用电子产品作为电源。

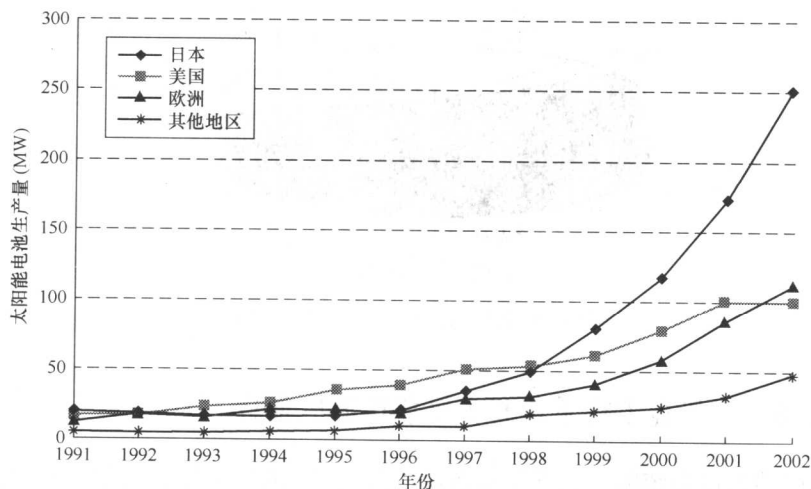
下面简述各国“新能源政策”对太阳能发电的促进作用。由于太阳能电池较其他能源价格高，目前，它在与常规能源（火力、水力发电）的竞争中尚处于劣势地位，需要政府在政策与法律方面给予资助才能促进其发展与普及。例如，德国在 1991 年发布了鼓励“再生能源发展法”，从法律上规定，电力公司有义务以一定合理价格，收购太阳能发电的多余电力。日本从 1992 年开始规定电力公司收购太阳光发电和水

力发电等分散型电源的多余电力的具体办法(例如,安装逆潮流电度表及如何计价)。2003年,日本又颁布RPS法(新能源利用的特别措施),其内容包含设立清洁能源电力发展基金和市民安装小型太阳能发电装置的资金补助(一般补助金额可达全部设备购置费的50%)。以上举措均对太阳能发电等新能源的发展起了促进作用。

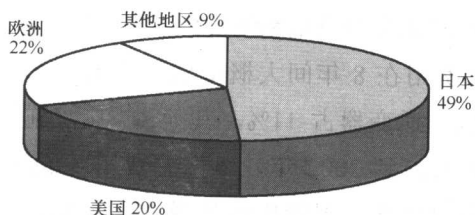
日本从1994年开始制订住宅用太阳光发电系统的规划,预计到2010年实施的总发电量目标为 $5 \times 10^9 \text{W}$ 。

1.2.2 产量和价格的变化

由于各国对新能源开发的重视,太阳能电池产量逐年增加;由于研发经费的大量投入,也使太阳能电池的价格逐年下降。从图1-2可以看出,全世界太阳能电池产量有逐年增长的趋势。图1-3则表示太阳能电池的几大大类在总产量中所占的份额。其中,单晶硅和多晶硅太阳能电池占总量的84%。



(a) 产量



(b) 所占比例

图 1-2 全世界太阳能电池产量分布

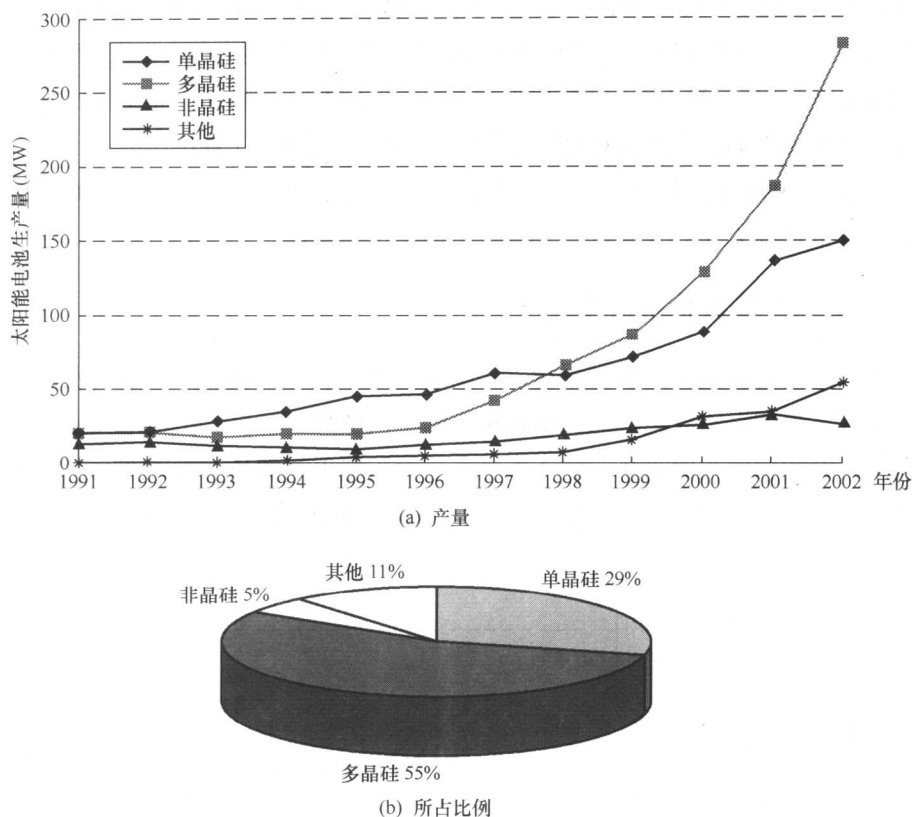


图 1-3 已生产的太阳能电池中不同材料的分布

1.2.3 太阳能发电系统和太阳能电池的价格

太阳能发电系统的广泛开发与普及，关键在于太阳能电池价格的降低。一般单个住宅所需的电力容量约为 3kW。现以此来计算其平均价格，图 1-4 表示 1994~2002 年 3kW 级太阳能发电系统价格下降的情况。

由图可见，总费用在 8 年间大概降低了 2/3，但以 2000 年为例，模块价格占总费用的 68%，逆变器占 11%，其他占 8%，施工费用占 13%，其中模块费用所占比例较大；到 2002 年，纵然总费用降低约 2/3，但模块的价格变化不大。因此，努力降低太阳能电池的成本，依然是全世界新能源界奋斗的目标。