

面向大规模太阳能并网发电及建筑集成化的工程手册

大规模太阳能发电 与建筑集成化工程设计

Large-Scale Solar Power System Design

[美] 彼得·戈沃尔基 著

王伟 李祥立 译

翟志强 (Z. John Zhai) 审校



中国建筑工业出版社

面向大规模太阳能并网发电及建筑集成化的工程手册

大规模太阳能发电与建筑集成化工程设计

[美] 彼得·戈沃尔基 著

王 伟 李祥立 译

翟志强 (Z. John Zhai) 审校



中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字：01-2011-7573 号

图书在版编目(CIP)数据

大规模太阳能发电与建筑集成化工程设计/ (美)
戈沃尔基著; 王伟等译. —北京: 中国建筑工业出版社, 2014. 7

书名原文: Large-Scale Solar Power System Design
ISBN 978-7-112-16676-3

I. ①大… II. ①戈…②王… III. ①太阳能发电-
发电厂-建筑设计 IV. ①TU271.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 064640 号

Copyright © 2011 by The McGraw-Hill Companies Inc.
All rights reserved.

The authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education
(Asia) and China Architecture & Building Press. This edition is authorized for sale in the
People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.
Copyright © translation 2013 by China Architecture & Building Press.
本书由美国麦格劳-希尔图书出版公司正式授权我社翻译、出版、发行本书中文简体字版。

责任编辑: 石枫华 程素荣

责任设计: 张 虹

责任校对: 张 颖 赵 颖

大规模太阳能发电与建筑集成化工程设计

[美] 彼得·戈沃尔基 著

王 伟 李祥立 译

翟志强 (Z. John Zhai) 审校

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京盛通印刷股份有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 19¼ 字数: 476 千字

2015 年 1 月第一版 2015 年 1 月第一次印刷

定价: 66.00 元

ISBN 978-7-112-16676-3
(25471)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

翻译组成员（按姓氏笔画为序）

于乃功 王 伟 王 凯 刘 红

任 坤 李祥立 汪 浩 张维奇

胡定科 脱瀚斐 谢静超

作者简介

彼得·戈沃尔基 (Peter Gevorkian) 博士，美国矢量三角设计公司总经理，该公司位于加利福尼亚州 La Canada Flintridge，主要从事常规电气工程和太阳能发电系统的设计咨询工作。彼得·戈沃尔基曾获得电气工程本科学位，计算机科学硕士学位以及电气工程博士学位。他在太阳能发电设计，可再生能源系统设计等方面获得了多项奖励。

彼得·戈沃尔基曾讲授过计算机科学、自动控制以及可再生能源系统工程等方面课程，并在国内外会议上发表多篇科技论文，曾在 McGraw-Hill 出版社出版了多部著作，包括：《建筑设计中的可再生能源系统》、《可再生能源系统工程》、《建筑设计中的太阳能发电》以及《房屋设计中的可替代能源系统》。

序 言

《大规模太阳能发电及建筑集成化工程设计》一书，用简练的语言，清晰地介绍了太阳能发电系统所涵盖的一系列神秘而深奥的工程问题，再一次展示了彼得·戈沃尔基（Peter Gevorkian）博士对该类工程超群的理解和掌控能力。本书作为太阳能发电系统设计和运行的百科全书，是解决环境与能源危机的必备工具。

戈沃尔基博士是一位知识的传播者，他将各类知识加以综合，把深奥问题的实质揭示给广大读者，给我们带来了一份特别的礼物。本书的读者群可包括：工程师，数学家，物理学家，建筑师，政府官员，建筑开发商和业主，甚至一些非专业人士。Gevorkian 博士从宏观的角度看待太阳能发电系统，向包括：关注政府可再生能源策略的群体和从事太阳能发电技术产业的人员，呼吁太阳能发电系统的重要性。本书远超越于一般太阳能技术的综述类书籍。

戈沃尔基博士将复杂问题简单化，大大提高了本书的可读性，书中给读者讲述了一个又一个有趣的故事，本书的突出特色在于作者巧妙地在“已知”与“未知”之间建立了联系。戈沃尔基博士在本书中是一位导师，他并非仅提供大量佐证使读者信服他的观点，而是通过定义和再定义、分类和再分类，使读者建立自己的观点，他希望通过本书激发读者的智慧。

任何一本书籍的写作都是从相关知识的定义与评估，发展到相关问题（如：马克斯·普朗克和爱因斯坦所提问题）的实践，此书从如何理解知识，发展到指导太阳能发电工程产业化大规模应用，是一本有价值的读物，也是戈沃尔基博士的一个杰作。

对于未来的人们，可再生能源的发展将是一个常识性的事物，大多数人将致力于系统的效率和控制，而戈沃尔基博士的工作已处于可持续能源发展的前沿。当若干年后，太阳能已应用到人类生活的各方面中，回想起本书，将会再次感受到此书的重要。

Dr. Lance A. Williams

Lance A. Williams 博士是美国绿色建筑委员会洛杉矶分会的执行主任，他是 LEED 认证的专家，见识丰富，视野宽广，见解深刻，目前主要致力于推动可持续能源系统的发展。

译者序

当今社会,为替代“化石”能源,人们一直在努力追寻各种可再生能源。太阳能以其节能环保、取之不尽、用之不竭、方便快捷等特点,已被广泛接受,并大规模应用于能源、建筑、工业等多个领域。但太阳能作为一种低品位能源,在其利用过程中,也存在着能量密度低,受气象条件影响等不足之处,如何应对太阳能的时变特性,开发满足用户侧需求的高效太阳能利用系统,寻求最佳的太阳能利用形式以及优化系统设计与运行参数,都是目前急需解决的关键问题。另一方面,太阳能利用形式主要包括太阳能光热和光电转换。前者相对简单,而后者涉及物理化学、材料科学、制造安装、土木建筑、电工电子、能源电力、环境气象等多学科知识的综合与集成。目前,由于缺少对太阳能光电利用技术整体认识和把握,尚缺乏一本可涵盖各专业领域知识,适合于指导工程实践的参考书。

针对这一现状,中国建筑工业出版社引进了由美国 McGraw-Hill 公司出版,由美国太阳能光电利用工程资深专家彼得·沃尔戈基博士所著的《大规模太阳能发电与建筑集成化工程设计》一书。本书较为全面地综述了太阳能发电技术的基本原理(第1章);揭示了太阳能光伏发电系统受物理及环境的影响规律(第2章);介绍了太阳能光伏发电组件的工作原理(第3章);深入讲解了太阳能发电项目的可行性分析(第4章)、工程成本分析(第5章)、项目管理(第9章)以及投融资(第12章)等方面内容。该书还结合实际工程,介绍了太阳能发电系统的设计(第6章)及工程建设(第7章)的关键问题;较为详细的阐述了太阳能聚光发电(第8章)以及太阳能热发电(第11章)技术的核心内容;讲述了美国智能电网在太阳能发电工程中的应用(第10章)。本书对于致力于太阳能发电的从业人员,学生和研究人员,是一本宝贵的学习和参考资料。

负责本书翻译工作的有:北京工业大学建筑工程学院王伟教授、谢静超博士,北京工业大学材料科学与工程学院汪浩教授,北京工业大学电子信息与控制学院于乃功教授、任坤博士,大连理工大学土木工程学院李祥立副教授,石家庄铁道大学机械工程学院胡定科副教授,广东电网电力调度控制中心张维奇工程师,西安交通大学能源与动力工程学院王凯博士,美国亚利桑那大学航天与机械工程系刘红博士和美国伊利诺伊大学香槟分校脱瀚斐博士。全书由王伟、李祥立统稿,美国科罗拉多大学翟志强教授审校。在本书的翻译过程中,刘慧敏、李林涛、朱佳鹤、盖轶静、董兴国等同学参与了部分文字与图片的整理工作。最后,衷心感谢中国建筑工业出版社对本书翻译出版工作的大力支持!

译者

2013年12月于北京

目 录

序言

译者序

第 1 章 太阳能发电技术	1
1.1 引言	1
1.2 太阳能电池电子技术	1
1.3 太阳能电池技术、制造和封装	2
1.4 实现电网平价	11
1.5 定制的 BIPV 太阳能电池	13
1.6 多晶硅光伏太阳能电池	14
1.7 非晶硅光伏太阳能电池	14
1.8 碲化镉薄膜电池技术	14
1.9 砷化镓电池技术	14
1.10 染料敏化太阳能电池	14
1.11 多结光伏电池	18
1.12 聚合物太阳能电池	19
1.13 对比分析	20
1.14 生物—纳米发电机	21
1.15 聚光型光伏系统	21
1.16 太阳能发电系统应用概述	22
第 2 章 太阳能发电系统受物理及环境参数变化的影响	27
2.1 引言	27
2.2 太阳能电池的物理背景：光子	27
2.3 光伏组件的性能特征	30
2.4 载流子分离	32
2.5 PN 结太阳能电池技术	32
2.6 太阳能电池的等效电路	32
2.7 能量转换效率	34
2.8 电池温度	35
2.9 太阳能电池能量转换效率的比较分析	38
2.10 大气和气候对光伏组件的影响	38
2.11 太阳辐射测量设备	42
2.12 太阳能电池阵列方位	42
2.13 太阳能强度的物理学	43

2.14 阵列方位角	44
2.15 日射量	44
第3章 太阳能光伏发电系统组件	50
3.1 引言	50
3.2 逆变器	50
3.3 蓄电池技术	59
3.4 雷电保护	63
3.5 中央监控和记录系统	64
3.6 光伏组件安装和支撑结构	66
3.7 屋顶安装装置	67
3.8 太阳跟踪系统	69
第4章 光伏发电系统可行性研究	72
4.1 引言	72
4.2 可行性研究	72
4.3 现场勘察	73
4.4 太阳能发电系统初步设计的注意事项	78
4.5 气象数据	86
4.6 结构设计要素	86
4.7 项目前期成本估算	87
4.8 能源价格因素	88
4.9 太阳能发电系统规模的估计	88
4.10 可行性研究报告的准备	97
4.11 太阳能发电可行性研究报告示例	98
第5章 太阳能发电系统成本分析	110
5.1 引言	110
5.2 美国加州太阳能初始计算器	110
5.3 太阳能发电成本分析软件	111
5.4 太阳能咨询模型 (SAM)	112
5.5 商业太阳能项目的激励政策	123
第6章 太阳能发电系统设计	129
6.1 引言	129
6.2 太阳能发电系统文档	129
第7章 大规模太阳能发电系统工程建设	159
7.1 引言	159
7.2 工程规划研究及文档	159
7.3 项目负责人的职责和现场安全程序和措施	161
7.4 施工监理	162
7.5 现场特性检查和竣工验收调试流程	163
7.6 应避免的安装问题	164

7.7	系统综合测试与调试	166
7.8	调试与竣工验收	166
7.9	调试目的	176
7.10	故障诊断和排除过程	180
7.11	太阳能发电系统安全隐患综述	183
7.12	太阳能发电系统损失预防	184
第 8 章	聚光光伏系统	186
8.1	引言	186
8.2	聚光光伏技术	186
8.3	与传统光伏技术相比 CPV 系统的优势	187
8.4	被动冷却模块的聚光器设计	187
8.5	CPV 技术的最新进展	188
8.6	AmonixCPV 技术	188
8.7	Concentrix FLATCON®CPV 技术	194
8.8	SolFocusCPV 技术	197
8.9	CPV 技术与环境的可持续发展	201
第 9 章	太阳能发电系统工程的项目管理	203
9.1	引言	203
9.2	项目发展阶段	203
9.3	关键链项目管理	203
9.4	合同事宜	204
9.5	技术事宜	205
9.6	承包商经验	206
9.7	购电协议 (PPA) 合同	206
9.8	项目完成进度	207
9.9	太阳能发电系统支出概况	208
9.10	加利福尼亚州能源委员会和贴现计划	208
9.11	项目管理培训课程	212
第 10 章	智能电网	213
10.1	引言	213
10.2	美国联合智能电网计划	214
10.3	欧洲洲际智能电网计划	214
10.4	智能电网的概念	214
10.5	智能电网的网络结构	215
10.6	电网的同步互联	215
10.7	美国电网简介	216
10.8	智能城网与配电系统	218
10.9	可再生能源与电网运行	219
10.10	智能电网的增值服务与设备	219

10.11	智能电网的数据通信	221
10.12	智能电网与网状网络通信	222
10.13	G.hn 家庭网络标准	223
10.14	智能电网与环境保护	224
第 11 章	太阳能热发电	227
11.1	引言	227
11.2	太阳能聚光集热发电技术的优势	229
11.3	槽式太阳能聚光集热发电系统	229
11.4	塔式太阳能聚光集热发电技术	233
11.5	碟式太阳能聚光集热发电技术	234
11.6	线性聚焦菲涅尔反光镜	236
11.7	太阳能热发电实验系统	237
11.8	热电太阳能发电系统	237
11.9	太阳能集热发电成本及发展问题	238
11.10	总结	239
第 12 章	太阳能发电补贴、融资及上网电价方案	240
12.1	引言	240
12.2	加州太阳能计划的补贴方案	240
12.3	总结	250
12.4	加利福尼亚州上网电价政策	250
附录 A	单位换算和设计参考表	253
A.1	可再生能源资料表和太阳能发电要点概述	253
A.2	单位转换表	254
附录 B	能源系统	256
B.1	能量守恒定律	256
B.2	不同的科学领域中能量的概念	256
B.3	温度	257
B.4	化学能	257
B.5	辐射能	257
附录 C	洛杉矶消防部门相关规定	259
C.1	太阳能光电系统	259
C.2	参考文献	259
C.3	计划审查	260
C.4	标记、标签和警示标志	260
附录 D	图片集	264
附录 E	美国各州太阳能奖励刺激计划	271
E.1	亚利桑那州	271
E.2	加利福尼亚州太阳能发电刺激计划	274
E.3	加利福尼亚州能源标准	275

E. 4 美国联邦政府	276
E. 5 佛罗里达	281
E. 6 密歇根州	283
E. 7 内华达州	285
E. 8 新墨西哥州	287
E. 9 俄勒冈州	289
E. 10 德克萨斯州	291
参考文献	294

第 1 章 太阳能发电技术

1.1 引言

太阳能电池或光伏 (PV) 电池本质上是一种将太阳能转化为电能的电子设备。太阳能电池的物理基础源于与二极管和晶体管相同的半导体理论, 这一基础构成了整个电子工业的大厦。

只要有阳光, 太阳能电池就可以转化太阳光的能量。但是在傍晚或者多云的天气情况下, 这种转化将会减弱。当夜幕降临, 转化过程完全停止, 当黎明出现, 转化过程又会恢复。太阳能电池不能储存电能, 但是蓄电池可以。

太阳能电池最吸引人的一个方面是它可以大量且毫无限制地将光能转化为电能, 并且不需要通过运动部件来完成这一过程。此外, 与化石燃料、水力发电或核能发电等大多数已知的不可再生能源生产方式相比, 太阳能发电不会产生破坏生态系统的污染物。

在本章中, 我们将综述各种太阳能光伏发电系统的技术、制造工艺及平板电池间的内部连接技术。

1.2 太阳能电池电子技术

经过光子的撞击, 在太阳能电池内的 PN 结可形成一个静电场, 产生 $0.5 \sim 0.6\text{V}$ 的势能, 这是大多数硅基 PN 结光伏技术的基本特征。太阳能电池产生的电势在功能上类似于小型电池。当正负极通过导线并联或者串联时, 就像传统的电池一样, PN-互连电池能够产生更大的直流电流和电压。

通常情况下, 传统的光伏面板由一系列互连的电池构成, 每个电池又包括数百个并联的 PN 结, 从而形成一个电池组件。每个组件产生 $0.5 \sim 0.6\text{V}$ 的电压和几个安培的电流, 其大小与并行连接的数量成正比。

在光伏面板中, 多个电池的串行互连产生的电压值正比于串联电池单元的数量。例如, 当串联一个有 48 个电池的组件, 光伏面板将产生一个具有电池组件特性的额定电流, 及一个与串行互连的电池组件成正比并乘以 $0.5 \sim 0.6\text{V}$ 的电压。这样可制作出一块额定电压为 24V 的面板。图 1.1 描绘了在一块光伏面板中电池组件的互连结构。

在将光伏面板以串联或并联方式串行互连后, 太阳能电池组列可产生所需的电流和电压, 使其与直流 (DC)—交流 (AC) 转换器相兼容。图 1.2 描绘了太阳能光伏组列的互连结构。

在典型的商业和工业太阳能发电系统设备中, 组列的电压变化范围为 $300 \sim 1000\text{V}$, 电流变化范围为 $5 \sim 10\text{A}$ 。多数太阳能发电系统中的光伏面板, 电压通常为 12V 、 24V 、 48V 和 96V 。

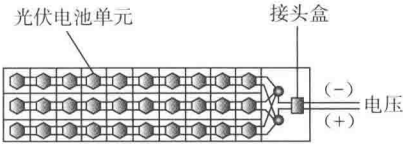


图 1.1 光伏电池的内部连接结构

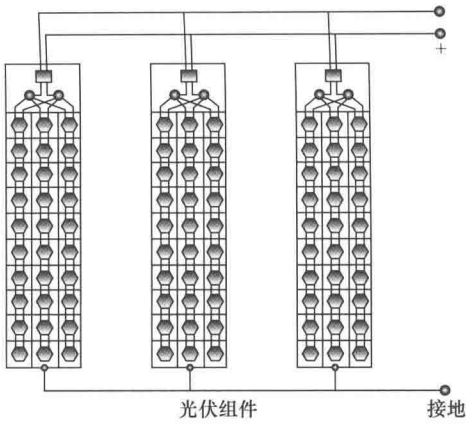


图 1.2 光伏太阳能组列的互连结构

1.3 太阳能电池技术、制造和封装

目前，太阳能电池主要分三类：单晶硅（单晶结构）、多晶硅（半结晶）和非晶硅薄膜。

太阳能电池主要由单晶硅、多晶硅和非晶硅薄膜材料制造而成。近期一种不为人们所熟知的太阳能发电技术，即有机太阳能光伏技术也在向商业化方向发展。每一种技术都有其独特的物理、化学、制造和性能特点，并具有各自特殊的用途。

在本节中，我们将讨论太阳能电池基本的生产原理。在之后章节中，我们将综述几种太阳能电池的生产和制造工艺。

1.3.1 单晶硅和多晶硅电池

大多数单晶硅和多晶硅太阳能电池的核心是一个半导体晶体硅。通过提纯、铸锭制造、硅片切割、刻蚀和掺杂等制备工艺，这种半导体最终形成了能够捕获光子的 PNP 结，其结果是电子越过 PNP 结势垒得以释放，从而产生一个持续的电流。

一块光伏电池的制造仅仅是整块太阳能电池面板制造部分中的一个环节。若想制作可持续正常工作 25 年的产品，则要求对材料经过严格的组装、密封和包装，以保护电池免受自然气候环境的影响，并提供合适的导电性、电绝缘性和机械强度。

用于密封太阳能电池的重要材料之一是由杜邦公司生产的含氟聚合物 Elvax，这种化合物是从醋酸乙烯树脂中合成出来的。将这种密封胶挤压成膜，用来封装被夹在钢化玻璃片之间的硅片，以形成太阳能面板。Elvax 密封胶的一个物理特性是具有良好的透光性，同时与玻璃和硅材料的折射率相匹配，从而可减少光子的反射。图 1.3 描绘了制造单晶硅太阳能电池的各个步骤，图 1.4 描绘了一个典型的太阳能光伏组件的组装结构。

另一种由杜邦制造的化学材料叫 Tedlar，是一种聚氟乙烯（PVF）薄膜。它用聚酯膜挤压制备而成，在硅基光伏电池的底部用作底板，提供电绝缘并保护电池，防止自然气候环境和风蚀的影响。其他一些公司，如三井化学、普利司通，也生产类似于 Tedlar 的产品，并广泛用于光伏电板的制造和装配中。

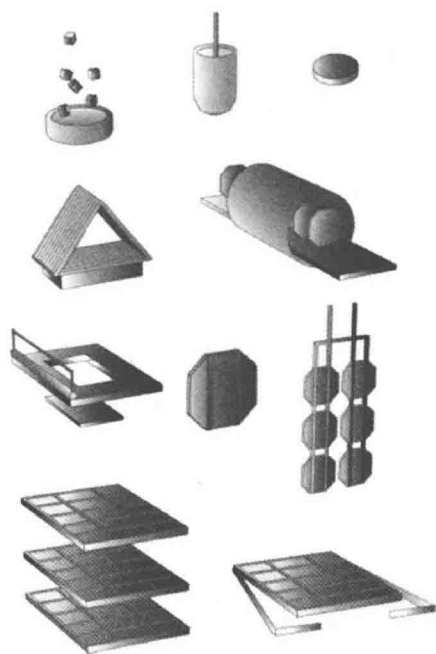


图 1.3 单晶硅太阳能电池面板的制造及组装过程

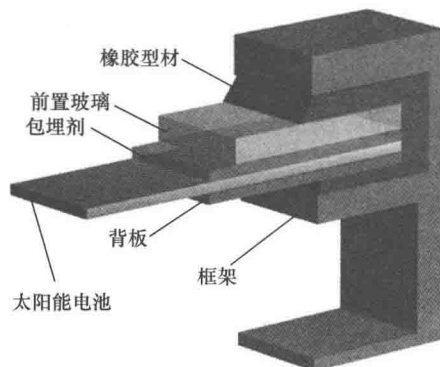


图 1.4 典型光伏组件的组装结构

由杜邦公司制造的另一个重要的产品是 Solamet，一种银制金属涂剂，用于在组件内传导每个单独太阳能电池产生的电流。Solamet 是一种非常薄的微米级导体，不会遮挡太阳光线。

在光伏电板的制造中用到的一种氮化硅电介质产品，可产生一种喷镀的效果，能够更加有效地提升硅捕获太阳光的能力。多晶硅的主要生产商是美国的道康宁和通用电气公司，以及日本的信越半导体和三菱材料公司。

由于全世界范围的硅短缺，太阳能电池的运营成本已成为降低制造成本的限制因素。现在，硅占太阳能面板生产成本的最大部分。为降低硅的成本，目前该产业的发展趋势是将硅晶片的厚度从 $300\ \mu\text{m}$ 减小至 $180\ \mu\text{m}$ 。值得注意的是，铸块的切片过程将浪费 30% 的材料。为了降低这种浪费，通用电气最近正在开发一种用硅粉铸造硅晶片的技术。从目前的情况来看，与传统切割而成的硅片相比，铸造晶片的厚度较厚，效率较低，但制造过程更快，而且能避免晶片切割过程中产生的 30% 的材料浪费。

1.3.1.1 晶体光伏太阳能组件产品

在这一节，我们将介绍晶体型太阳能电池组件的生产和制造工艺周期。这里介绍 Solar World Industries 的产品制造过程，这也是商业化的单晶硅太阳能电池组件的常用基本加工流程，可由大多数制造商提供。

多晶硅光伏电池的制造是从硅晶体开始的，这些硅晶体大量存在于自然界的火石中。硅一词源于拉丁语 *silex*，意思是坚硬的石头，是一种自然界中的无定形物质。它由一个硅原子和两个氧原子组成 (SiO_2)。Jons Jacob Berzelius 于 1823 年首次提炼出硅。当时他通过对钾金属加热，分离自然存在的四氟化硅 (SiF_4)。1902 年，硅开始商业化生产，出现了含铁量约为 25% 的硅铁合金，这种合金在钢的生产中是一种有效的脱氧剂。如今，超过 100 万吨的纯度达 99% 的冶金级硅被用于钢铁行业。约 60% 的硅用于冶金，35% 的硅用于

有机硅的生产，还有约 5% 的硅用于半导体级硅的生产。

通常，硅中常见的杂质有铁、铝、锰和钙元素。在半导体应用中，最纯净硅的杂质含量约为十亿分之一。硅的提纯过程包括多种复杂的精炼技术，如化学气相沉积、同位素富集法和结晶过程。图 1.5 描绘了硅锭制造前开采硅晶体的过程。

1.3.1.2 化学气相沉积

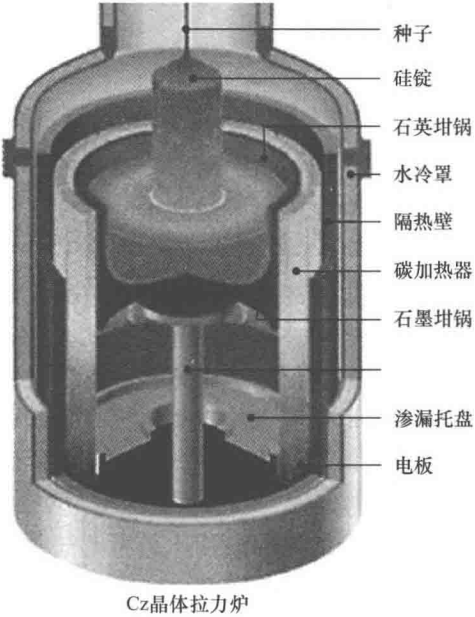
化学气相沉积是一种早期的硅精炼过程，用于生产较高等级的冶金用硅。该过程包括高温气相状态下的四氯化硅（ SiCl_4 ）和锌（Zn）通过如下化学反应生成高纯硅：



该过程的主要问题是四氯化硅中通常会带有三氯化硼（ BCl_3 ），当与锌混合时，会分解出硼，该物质是一种十分严重的污染物。1943 年，化学气相沉积问世，并用氢代替了锌。这种方法能生产出纯净的硅，因为跟锌不同的是，氢不会将三氯化硼还原为硼。进一步提纯可以用三氯硅烷（ SiHCl_3 ）取代四氯化硅，因为前者较容易还原为纯硅。图 1.6 描述了硅晶体熔融和用于铸锭的反应仓。



图 1.5 硅晶体



Cz晶体拉力炉

图 1.6 提拉结晶炉腔

1.3.1.3 Czochralski 晶体生长

1916 年，波兰冶金学家 Jan Czochralski 发明了一种生产晶体硅的技术并以他的名字命名。在这一结晶过程中，将金属晶须插入熔融的硅中然后快速拉出。纯的晶体沿着金属丝生成，这成为一种生长单晶体的成功方法。通过把小的硅晶体拉成线材，这一过程得到了加强。通过附加一个可旋转的种子和垂直方向移动的主轴，可以进一步提高生产效率。同时，这种设备还装配了专门用于掺杂的小孔，P-或 N-型的掺杂剂可通过小孔掺入到晶体上，用于产生 PN 或 NP 结型晶体。这些晶体被用在 NPN 或 PNP 晶体管、二极管、发光二极管、太阳能电池和几乎所有的高密度、大规模集成电路中。

化学蒸发和结晶均属能源密集型过程，需要消耗大量的电力。为了以一个合理的方式

生产纯硅锭，生产厂家都设在大型的水力发电厂附近，以获得源源不断的低成本电力供应。在这一过程中生产的是圆形或方形的铸锭，它们被清洗、抛光之后，交给不同的半导体材料生产厂家，图 1.7 是形成硅锭柱体的图片。

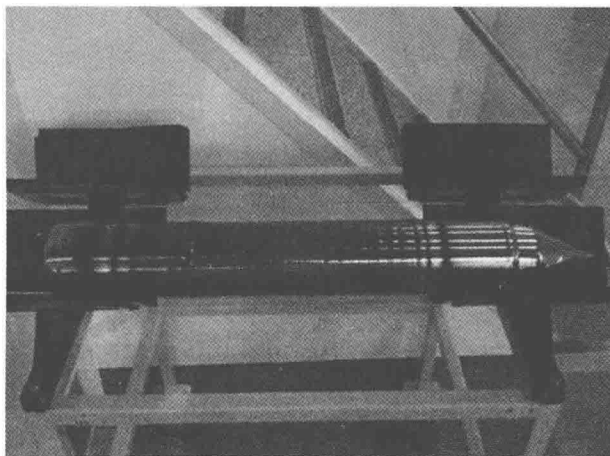


图 1.7 一个制成的硅锭柱体

1.3.2 太阳能光伏电池的生产

生产光伏电池组件的第一步包括入厂铸锭检验、硅片清洗和质量监控。在入厂之后，铸锭在清洁的环境中被切成毫米级厚的晶片，并且两面抛光、刻蚀和扩散，形成 PN 结。在涂覆增透膜后，电池将被涂上金属涂层，并且在高温下烘烤。每个电池都要测试达到 100% 的功效，为组件集成做准备。

光伏组件的生产过程涉及到机器人和自动控制，一系列机器人分步地组装电池，铺设组件，按照预定的模式焊接电池，然后压膜、组装成为成品。在组装完成后，每一个光伏电池组件都要在人工日照条件下进行测试，结果将被记录并序列化。生产的最后一步包括附属组件测试、清洗、封装和装箱。通常，用这种技术生产的光伏电池组件的效率为 15%~18%。

光伏电池组件的寿命和回收

为了延长光伏电池的寿命，电池组件被压在两层保护层之间。通常，顶部保护膜是 6~16mm 厚的钢化玻璃，底层保护膜是钢化玻璃或硬质塑料。聚氨酯膜用作粘合剂，将夹层式的光伏板组件粘合在一起。除用作胶粘剂外，聚氨酯膜还可以密封上下两层保护膜，防止进水或氧化。作为一个密闭的组件，硅基太阳能光伏组件能够暴露在恶劣的环境下。尽管光伏电池组件可保证至少 20 年的使用寿命，但在实际使用过程中，其预期寿命可超过 45 年并且性能基本不降低。

为减少环境污染，SolarWorld 已经找到了材料回收的方法，使得废弃、损坏或者用过的光伏电池组件（包括铝制框架、钢化玻璃和硅片）能够得到充分的回收和重复使用，并且可用于生产新的光伏电池组件。图 1.8 展示了一个太阳能面板压膜机械臂，图 1.9 展示了一个太阳能电池面板检测台。