

太 阳 电 池

〔美〕 胡晨明 R.M.怀特 著

李采华 译

姜中和 校

北 京 大 学 出 版 社

内 容 简 介

太阳能的利用有着诱人的前景，它是人类能源的一个重要分支。太阳电池是将太阳能直接转换成电能的器件。本书分别介绍了太阳电池的工作原理、聚光器和整套光生伏打系统以及降低太阳电池系统成本的种种设想与途径。书中从叙述基本知识出发，由浅入深地介绍太阳电池的物理原理及工艺结构，反映了该领域中最新研究方向和成果，并从经济学观点论证了其可行性。

本书侧重物理概念，除给出必要的公式外，数学推导从简，每章都有习题和参考文献，还给出较多的数据和图表供参考。

本书可供大学生、研究生、专业研究人员、自学者以及对能源问题有兴趣的各类读者阅读。

SOLAR CELLS

Chenming Hu and Richard M. White

McGraw-Hill

太 阳 电 池

〔美〕胡晨明 R.M. 怀特 著

李采华 译 奚中和 校

责任编辑：周月梅

*

北京大学出版社出版

（北京大学校内）

北京大学印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

850×1168毫米 32开本 9.5印张 238千字

1990年1月第一版 1990年1月第一次印刷

印数：0001—2,000册

ISBN7-301-00958-5/O.168

定价：4.80元

序

本书的前身是一门选修课用的讲稿。这门课曾在两所大学开设，学生来自不同部门、不同领域：有大学教师和学生，有太阳能电池研究人员，有通用事业公司的工程师，有政府部门的职员，有律师和投资顾问，还包括有兴趣在其大牧场装设太阳能电池的用户。本书广泛吸取了各类学生的建议，在原有材料的基础上经补充和修订而成。

本书可供大学生或一年级研究生作教材用，也可作为自修或参考读物。全书采用模块式编写方式，共分三大部分十二章，每章都编有习题和参考文献。内容安排由浅入深，也考虑了各种不同读者的需要。书中的三大部分分别讨论了太阳能电池原理、一个完整的太阳能电池系统以及改进太阳能电池的可能性。

在第一部分太阳能电池原理中，第一章综述光生伏打能的产生及其诱人的前景。第二章探讨太阳光及其地理分布。第三章从讨论半导体的性质开始研究太阳能电池的工作原理。因此，读者所需具备的基础知识不必比大学所学的数学和物理的知识更多。不过增加些半导体方面的知识将有助于阅读本书。第四章探讨制备常规PN结电池的材料及其加工方法，以此为第一部分的总结。

第二部分讨论浓集光和整套光生伏打系统。浓集光（第五章）和功率调整、能量贮存装置（第六章）与太阳能电池结合使用，可以提高效率，既方便又便宜。第七章中给出有关太阳能电池应用方面的例子。第八章讨论光生伏打电的经济问题。

第三部分讨论进一步降低太阳能电池成本的种种设想与途径，即太阳能电池的改进。第九章讨论制造半导体的新技术，第十章探

讨论薄膜化途径，第十一和第十二章分别简要总结新的电池结构以及非常规的电池系统。

此外，九个附录提供的资料是：附有简明注释的书目；太阳能电池供应厂商表；光生伏打系统运行资料以及它们的关键设计要点；最新的实验室电池效率表(按材料和设计类型编排)。附录也描述了可用简单的实验装置完成的一些太阳能电池实验。附录中还介绍了缩略语和简称，并讨论太阳能电池和光伏系统的计算机模拟，相信这些材料对某些读者也可能有用。

或许，没有一本书能完整地概括一个跨学科的、飞速发展着的课题，本书也不例外。但我们仍试图增加书中的信息量，并努力为读者提供进一步提高的基础和构架。

在写本书时，我们得到了许多朋友的支持和帮助，在此谨向他们表示感谢。Lifetime Learning 出版社的 Alex Kugushev 建议我们写这本书，成书过程中曾得到 Ned Birdsall 教授和许多同事们的鼓励。Joan Stern 出色地完成了编辑工作。Bettye Fuller 帮助打印了原稿。我们亲属的支持更是无价的。

Chenming Hu

Richard M. White

目 录

序	(i)
---------	-------

第一部分 太阳电池原理

第一章 综述	(1)
--------------	-------

*地球上还有多少石油?	(2)
-------------------	-------

§ 1.1 太阳电池系统如何工作	(2)
------------------------	-------

§ 1.2 电池类型	(3)
------------------	-------

§ 1.3 多少功率? 什么时间?	(6)
-------------------------	-------

参考文献	(10)
------------	--------

习题	(10)
----------	--------

第二章 太阳能及其利用	(12)
-------------------	--------

§ 2.1 太阳及太阳-地球相对运动	(12)
--------------------------	--------

*太阳像一个核反应堆	(12)
------------------	--------

§ 2.2 大气层对太阳辐射的影响	(15)
-------------------------	--------

§ 2.3 太阳辐射测量及装置	(19)
-----------------------	--------

§ 2.4 平均日照的地理分布	(22)
-----------------------	--------

§ 2.5 收集器倾斜的影响	(30)
----------------------	--------

§ 2.6 小结	(31)
----------------	--------

参考文献	(32)
------------	--------

习题	(32)
----------	--------

第三章 太阳电池工作原理	(34)
--------------------	--------

§ 3.1 太阳电池工作要素	(34)
----------------------	--------

§ 3.2	半导体	(34)
§ 3.3	光吸收与载流子产生	(39)
§ 3.4	载流子的复合	(42)
§ 3.5	PN 结	(44)
§ 3.6	短路电流	(50)
§ 3.7	效率	(54)
	*光传感器: 光电二极管与光电导体	(57)
§ 3.8	影响转换效率的因素	(57)
§ 3.9	小结	(64)
	参考文献	(65)
	习题	(66)
第四章	材料及加工	(67)
§ 4.1	材料性质和加工技术	(68)
	*制造集成电路	(68)
§ 4.2	常规硅电池工艺	(74)
§ 4.3	硫化镉电池工艺	(83)
§ 4.4	环境及其他	(84)
§ 4.5	小结	(88)
	参考文献	(89)
	习题	(89)

第二部分 聚光器与整套光生伏打系统

第五章	阳光的浓集	(91)
§ 5.1	太阳聚光器	(91)
	*照相机镜头的 f 数	(94)
	*时差	(95)
§ 5.2	聚光器光生伏打系统的经济问题	(101)
§ 5.3	聚光器太阳电池	(104)
§ 5.4	冷却与热能的收集	(106)

§ 5.5 小结	(107)
参考文献	(108)
习题	(109)
第六章 功率调整、能量贮存与联网问题	(110)
§ 6.1 最大功率点跟踪	(111)
§ 6.2 最大功率点跟踪装置原理	(112)
§ 6.3 独立的逆变器	(115)
§ 6.4 有联网功能的逆变器	(116)
§ 6.5 功率调整器的费用	(118)
§ 6.6 关于能量贮存问题的争议	(119)
§ 6.7 能量贮存技术	(121)
§ 6.8 小结	(124)
参考文献	(124)
习题	(125)
第七章 电池与系统的运行特性	(126)
§ 7.1 商品太阳能电池的性能	(126)
§ 7.2 应用类型	(133)
§ 7.3 运行中的光生伏打系统及器件	(136)
§ 7.4 小结	(151)
参考文献	(151)
习题	(152)
第八章 光生伏打电力的经济问题	(154)
§ 8.1 一般规律	(154)
*参考数据	(156)
§ 8.2 光生伏打发电的费用分析	(157)
§ 8.3 工业化国家中有关电力公司的问题	(169)
§ 8.4 发展中国家的有关问题	(172)

§ 8.5 小结.....	(173)
参考文献	(173)
习题	(173)

第三部分 太阳电池的改进

第九章 现代电池的加工技术 (175)

§ 9.1 固化和热激活.....	(176)
§ 9.2 形成薄的自支撑半导体带和片.....	(181)
§ 9.3 在基片上形成半导体层.....	(185)
§ 9.4 离子注入 激光和电子束的应用.....	(188)
§ 9.5 光涂层、接触及封装.....	(191)
§ 9.6 自动化工厂中电池的连续生产.....	(193)
§ 9.7 小结.....	(196)
参考文献	(196)
习题	(198)

第十章 薄膜及非传统电池材料..... (199)

§ 10.1 引言.....	(199)
§ 10.2 非晶形半导体.....	(203)
§ 10.3 用作太阳电池的其他材料.....	(206)
§ 10.4 大规模制造薄膜电池的展望.....	(209)
§ 10.5 小结.....	(217)
参考文献.....	(217)
习题.....	(218)

第十一章 电池结构变化 (220)

§ 11.1 电池的基本结构.....	(220)
§ 11.2 特殊的非浓集光电池.....	(221)
§ 11.3 特殊的浓集光电池.....	(224)

§ 11.4 小结	(232)
参考文献	(232)
习题	(233)
第十二章 非传统电池系统	(234)
§ 12.1 复式电池系统: 分段谱和级联电池	(234)
§ 12.2 热光生伏打 (TPV) 系统	(241)
§ 12.3 光电解电池	(244)
§ 12.4 卫星电力系统 (SPS)	(247)
§ 12.5 小结	(251)
参考文献	(251)
习题	(252)
附录	(254)
1 资料目录注解	(254)
2 单位及有关数据	(256)
3 太阳光谱——大气质量 1.5	(257)
4 缩略语和简称	(258)
5 各类电池效率表	(263)
6 太阳电池实验	(265)
7 光生伏打电池和系统的计算机模拟	(270)
8 供应太阳电池的厂商	(275)
9 某些工作系统的综述	(278)
索引	(281)

第一部分 太阳能电池原理

第一章 综 述

太阳能电池是这样一种器件，当受阳光照射时，在它的内部释放出电荷，这些电荷能在半导体中自由移动，最终流过一个像白炽灯或电动机这样的电负载。以这种方法产生电压和电流的现象称为光生伏打效应。

太阳能电池所用的燃料——阳光——是无需耗费代价的、丰富的。在地球表面上最高光强大约是 $1000\text{W}/\text{m}^2$ ，这样在光伏电力系统中电池占有的面积可能会相当大，在计算电力生产成本时必须考虑这一项的费用。要测算某一地点是否能用太阳能电池供电，首先要考虑每单位输出功率的价格(与交流电源比较)，它包括光伏系统的制备、安装以及运转的费用。

太阳能电池已开始在地面上的一些地区使用，在这些地区用交流电很贵，例如离电力线很远的电力通讯设备、泵和冰箱等。随着传统能源价格的上涨，随着工艺的改进和制造规模的扩大，太阳能电池的价格将会下跌，可以预期太阳能电池的市场会很快地扩大。这些经济要点中居首位的是传统能源价格继续不断的上涨，特别是那些使用资源有限的化石燃料发电的地区。居第二位的是降低太阳能电池系统发电的成本，这是当今世界范围内研究和开发的一个课题。增加太阳能电池的经济吸引力必须选择以下的一种或多种途径：

1. 提高电池效率。

2. 降低制造电池、组件和辅助设备的成本,同时降低安装费用。

3. 设计新的电池或系统,以降低每单位功率输出的总费用。

*地球上还有多少石油?

有时可以听到这样的议论:如果我们全力去寻找石油,那末能源问题将不会成为问题。现用以下例子来说明上述观点是荒谬的。

设想,地质学家们弄错了我们的石油资源,他们极度地低估了地球的石油蕴藏量。再设想,地球上除了人类生活的一层很薄的固体壳层外,其余地方都储满了油。地球半径为 $6.4 \times 10^6 \text{ m}$,1970年全世界的年耗油量为 1.67×10^{10} 桶(Barrel)。从以上两个数字可以算出:如果今后每年的耗油量按1970年的耗油量计,则全部地球的储油能舒舒服服地用上 4.1×10^{11} 年。但如果年耗油量像1890—1970年那样按7%递增的话,则满地球的油也只能用344年。

这个例子(Barnett, 1978)说明,年耗油量的指数增长破坏了供求关系。假如年耗油量维持现有的比率增长,可以相信,目前地球上的储油在几个十年内将会被耗尽。

§ 1.1 太阳能电池系统如何工作

所有的太阳电池中,最重要的物理现象如图1.1所示。太阳光射入半导体中产生可以自由移动的一个电子和一个空穴——一个负电荷粒子和一个正电荷粒子。这些粒子在半导体中扩散,最终到达势垒层。该势垒层允许带一种电荷的粒子通过,而将另一种带电粒子反射回去。于是,正电荷被上接触电极收集,负电荷被下接触电极收集(见图1.1)。由电荷聚集所形成的电流通过金属导线流向电负载,见图1.1的右侧。

从电池来的电流可以直接通过负载,也可先经电力调整装置变成不同于原电池的电压和电流数值的交流电。其它可能用到的辅助设备包括能量贮存装置,如蓄电池、聚光镜或反射镜,后两种将阳光聚焦于较小的区域,因而减少了昂贵的半导体电池。如果用

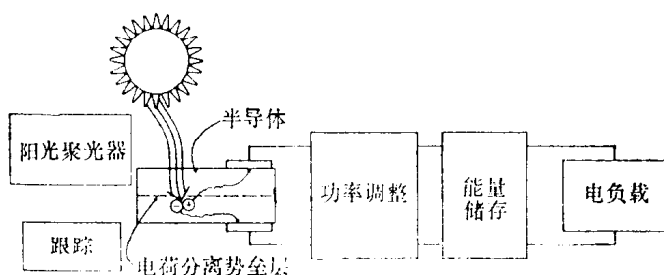


图1.1 太阳能电池系统功能元件示意图

了阳光聚光器，则跟踪辅助装置看来是必须的，这样，太阳电池阵列可以整天指向日照的位置。

§1.2 电池类型

浏览一下最近发表的文献资料(见附录)，可以看到大多数文章都是关于太阳电池设计和材料方面的。在技术发展的初级阶段这种情况是常见的。虽然在1839年已经知道了光生伏打效应，但太阳电池的地面应用，实现地面发电还是最近的事。硅太阳电池的研究成果最先发表于1954年，此后，在大部分的宇宙飞船上已使用太阳电池了。用于空间目的太阳电池要经受各种恶劣条件，还要求工作绝对可靠，制造费用就相当昂贵，它不属于本书的讨论范围。本书专门研究地面上用的太阳电池。

有关各类太阳电池的详细论述需涉及固态物理、化学和材料科学等内容，这里只简单评述各种不同的电池类型。

1. 因为硅已被广泛用于集成电路中，它的制造工艺比较成熟，所以当前人们很自然地就选中了硅太阳电池，其他的一些途径也正在探索之中。

2. 用薄膜或多晶电池来代替单晶电池，可以更经济一些，因为单晶要求大范围内的加热，以及细致的晶体生长和切片，在

制造过程中费用和能量消耗都较大。

3. 由于聚光镜和反射镜每单位面积的制造费用比大多数的半导体要低，将它们用到“聚光器”系统中，使阳光通过它以后再聚集到较小的半导体电池上可达到同样的效果，所以用它们在价格上会有利些。

4. 只用单一波长的光的电池可以工作得特别好，所以把光谱分裂成单色光，再将这些单色光分别投向对它们的最佳频谱设计的电池（“分裂谱”电池或“多色”电池）上，这可能是一种比较经济的设计。

5. 既可利用阳光，又能满足能量起伏要求的电池是有吸引力的。在这种电池内部因电解作用提供固有的能量贮存（“光电化学”电池）。

图1.2中给出的几类电池是按照所用材料、半导体形式以及使用时的阳光浓集度等级排列，图中还提出了原材料的特性或电池设计。

单晶硅制成的电池已大量生产，它们一般不用浓集光（见图1.2左上角）。硅电池有的用大尺寸的单晶硅锭片做，也有的用薄的硅带或硅条制成，而不必切片。已经研究过许多其他单晶电池材料，其中半导体化合物砷化镓因其效率高并能在高温下工作，因而在实验室中得到了最广泛的应用。Si和GaAs两种材料已用来制造浓集光电池系统。浓集光电池与非浓集光电池（“平板”电池）在使用中有所区别，前者有较高的电池电流，所以必须经受住高温，还必须有较低的电阻损耗。由于分裂谱电池是由几个电池组成的，想要降低系统成本，起初就应使用聚光透镜或聚光镜。另一类浓集光电池是“热光伏”电池，这种电池通过光谱变换来提高效率。被聚焦的阳光先加热电极板，从电极板辐射出来的波长较长的光再照到热光伏电池上。

大部分电池采用所谓的PN结，它是由两个邻接的半导体（如

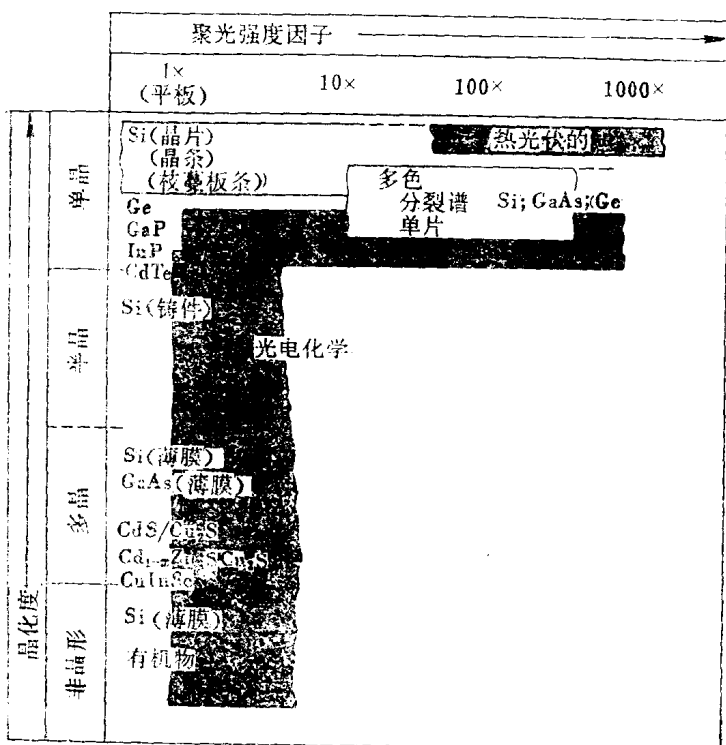


图1.2 按半导体的晶化度以及使用的阳光浓集度等级排列的各种太阳电池，其中单晶硅、GaAs和薄膜CdS/Cu₂S 电池将在本书第一部分中讨论，其他类型的电池和材料将在第三部分中讨论

硅)区域组成，这两个区域的半导体分别含有不同的杂质，因而它们具有不同的电特性。另一种结构是肖特基势垒电池，它是用一相当透明的金属薄层代替PN结电池中的一个半导体区。还有一种很有希望的电池设计是在金属与半导体之间增加一层很薄的绝缘层，形成“金属-绝缘体-半导体”(MIS)或“金属-氧化物-半导体”(MOS)结构。

与常规单晶电池相比，多晶电池的制备及材料的费用通常较低。可以替代通常的单晶棒制备方法的技术已在研究，我们将在

第九章中讨论，包括定边喂膜生长法(EFG)和枝蔓板条电池。薄膜电池是由非晶形半导体薄膜制成，其半导体薄膜沉积在一块基片上。如商品硫化镉电池，这种电池实际上是在硫化镉层与硫化铜层之间有一个PN结。由有机成分制成的实验性电池也正在研究。研究者们预言，薄膜电池可能是一种既有效又便宜的电池，它足以满足各种地面应用的要求。

§ 1.3 多少功率？什么时间？

一个现代化的中心发电厂，其额定功率一般为1000MW($1\text{MW} = 10^6\text{W} = 1000\text{kW}$)，而目前全世界太阳电池的年产量仅为几个MW，相比之下后者确实很小。那末，有什么理由认为在今后的几个十年中太阳电池在世界能源结构中可能占有重要的地位呢？

首先，不能仅仅根据输出的电力的多少来评判它的意义。对一个小村庄的居民来说，即使一个100W的太阳能电池电源也可能是十分重要的，因为他们可以用它作为水泵、制冷和对外通讯的电源，而这样的小村庄世界上有几百万个。其次，光生伏打发电没有化石燃料或核动力工厂所面临的问题。后者存在燃料费用逐步上升、废物处理、热分配、(大家关注的)安全问题以及由于二氧化碳的大量释放可能对气候产生影响等问题。第三，光生伏打系统配有标准组件能靠近使用地点安装，而且一接上线就能供电。以上这些固有的优点，加上太阳能电池成本下降的可能性，使人们可以预言：太阳电池系统会对世界能源作出有意义的贡献。

图1.3概括了1978年美国能源的来源以及使用情况。图中数字以“quad”为单位。 $1\text{quad} = 1 \times 10^{15}\text{kW/h}$ ，这是一个很大的能量单位。在这张套管式的图上有一些细节很值得注意。从图最右边的两个能量值的比较中可以看出，1978年有54%的能量未充

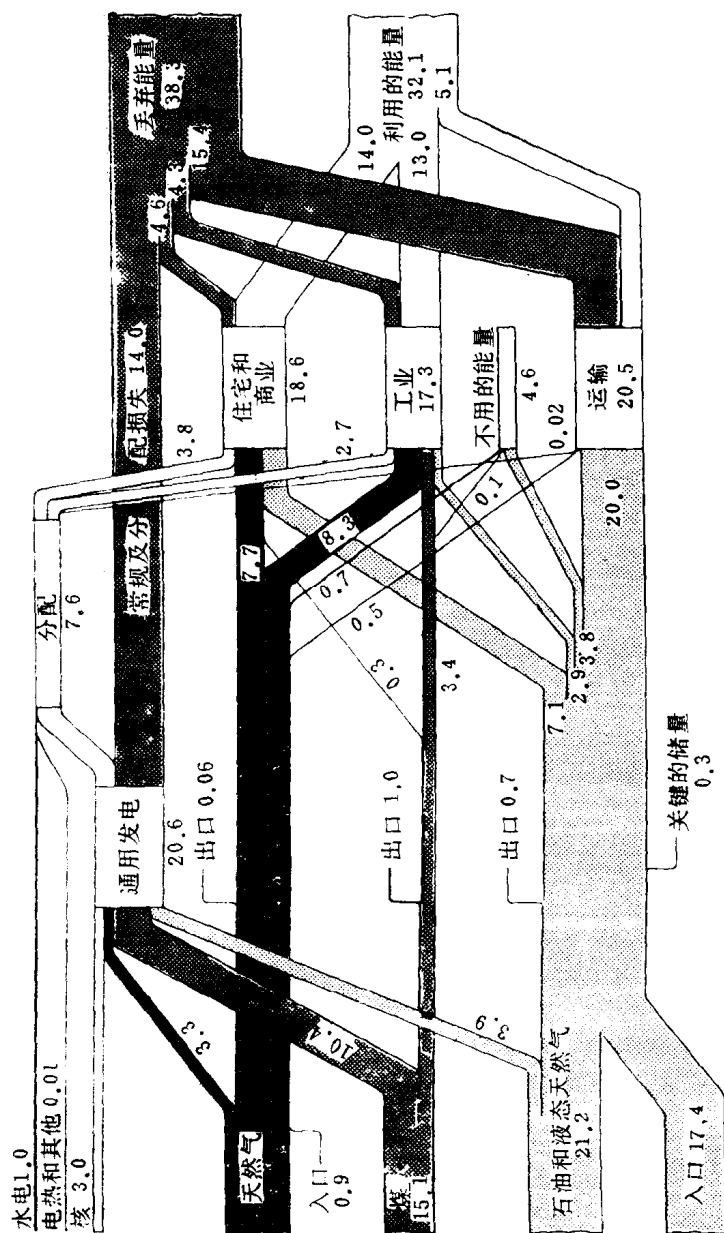


图1.3 1978年美国能流图(Kamsey, 1979), 图中数字的单位为“quau” (10^{15} kW/h)