



Solar
Cell

太 阳 能 电 池

〔日〕辻高輝 著

机械工业出版社

32
54

太阳能电池

[日] 辻高辉 著
权荣硕 译
鲜于七星
姜钟淳
安 舍 校



机械工业出版社

本书系统地介绍了太阳能电池的基本原理、设计方法、制造工艺、可靠性试验以及应用实例等。本书密切结合实际，从实用角度出发，深入浅出地介绍了日本在太阳能电池研制方面的一些新技术。本书可供我国从事太阳能电池研制人员和实际应用的工程技术人员及大专院校有关专业师生参考。

新技术シリーズ(1)

太陽電池(Solar Cell)

〔原理、製法から応用システムまで〕

〔日〕 辻高輝 著

1983年

パワー社

● ● ●
太 阳 能 电 池

〔日〕 辻高輝 著

权荣硕 鲜于七星 译

姜钟淳 安 舍 校

●
责任编辑：高金生 责任校对：刘志文
封面设计：王 伦 版式设计：霍永明
责任印制：张俊民

●
机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经销

●
开本787×1092¹/₃₂·印张5·字数105千字

1989年1月北京第一版·1989年1月北京第一次印刷

印数0,001-1,670·定价：2.90元

●
ISBN 7-111-00722-0/TM·101

译者的话

我国从1958年开始研制太阳能电池，并且成功地应用于人造卫星、交通、邮电、农牧业、通讯等部门。目前，对于新型太阳能电池，我国也在积极地进行研讨。为了学习和借鉴国外的经验，我们将日本新技术丛书之一的《太陽電池》(Solar Cell)一书译成中文，以对我国的太阳能电池电源研制工作有所裨益。

本书第一、二、三章由鲜于七星翻译，第四、五章由权荣硕翻译，全书由姜钟淳、安舍校。

限于译者水平，疏漏之处在所难免，谨请读者批评指正。

1987年7月

前 言

能把太阳能直接转换为电能的太阳能电池，具有结构简单，几乎不需要检查维修等优点，它作为自动电源，最初用在人造卫星和航标灯等上面。太阳能电池自从1958年付诸实用以来，已有20多年的历史。但是，由于它的利用范围有限，因此还没有引起人们的普遍关心。

然而，1981年年内装太阳能电池的小型电子计算器却成了当时受欢迎的三大畅销品之一。从此，作为配套元件的太阳能电池很快就成了人们日常生活的必需品。

另一方面，以能源危机为契机，旨在寻求新能源的“太阳能利用计划”等的研究和开发工作正在顺利地进行，并取得了成绩。因此，太阳能电池的应用领域也在不断地扩大。例如，使用太阳能电池供电的有农牧业用供水泵、快速游艇、野营场地和偏僻地区的电视机、药品贮藏设备等等。

基于上述情况，近年来，有许多人希望掌握有关太阳能电池方面的基本知识和基础理论，其中包括对太阳能电池感兴趣并想进一步了解其原理的用户和产销太阳能电池商品的人们，以及有志于从事太阳能电池研制工作的专业人员等等。

本书以这些人为对象，在阐述太阳能电池的基本概念、基础理论和制造技术等问题时，力求生动，简明形象，容易理解，尽量避免过多的数学公式。

太阳能电池是一种使用半导体的固体的电子装置。如果

本书对读者加深理解和掌握太阳能电池的基本知识、基础理论、工作原理和制造工艺等有所帮助的话，笔者将感到荣幸。

作者

1983年6月

目 录

前言

第 1 章 太阳能发电原理	1
1.1 太阳光的性质	1
1.1.1 太阳光的光谱分布特性	1
1.1.2 地面太阳光的成分	3
1.1.3 有关日照的观测值 (日射强度、日射量和日照时间)	4
1.2 半导体中的光能转换 (光电效应)	7
1.2.1 光能 (光子能与光的波长的关系)	8
1.2.2 半导体的性质	10
1.3 与太阳能电池的电流-电压特性相关的诸特性	20
1.4 转换效率	28
1.4.1 定义	28
1.4.2 影响转换效率的因素	26
1.5 太阳能电池的等效电路	33
1.5.1 等效电路与 $I-V$ 曲线	3
1.5.2 等效电路与电流、电压的关系式	3
第 2 章 太阳能发电装置的种类和组成	4
2.1 太阳能电池的分类	40
2.2 太阳能电池元件的结构	45
2.2.1 半导体的光吸收	45
2.2.2 各种元件的结构	5
2.3 太阳能电池组合件 (嵌板) 的结构	5
2.4 太阳能电池元件阵列的结构	5
2.5 聚光型太阳能电池装置的组成	6

2.5.1	光学系统利用装置	60
2.5.2	利用吸光-发光剂的聚光器	63
2.6	光热混合装置	64
第3章	太阳能电池的制造方法	67
3.1	制造工艺概况	67
3.2	晶体类硅太阳能电池的制造方法	68
3.2.1	原料的精制	68
3.2.2	晶体的制造方法	71
3.2.3	块状晶体(锭)的切割	77
3.2.4	元件及组合件制造工艺的自动化	79
3.3	非晶体类太阳能电池的制造方法	80
3.3.1	非晶硅薄膜制造方法	81
3.3.2	非晶硅太阳能电池批量生产技术	85
3.4	不用硅材料的其它太阳能电池制造技术	86
3.4.1	CdS/CdTe系太阳能电池的印刷烧结法	86
3.4.2	GaAs系太阳能电池的剥离薄膜法	87
3.5	结束语	88
第4章	可靠性试验	90
4.1	可靠性试验的目的和现状	90
4.2	各种可靠性试验项目及其试验方法举例	92
4.3	在可靠性试验前和试验过程中需要测试的特性项目	94
4.3.1	组合件特性	95
4.3.2	材料特性	96
4.4	非晶体太阳能电池性能随光照射的变化	96
4.5	可靠性试验顺序	101
第5章	太阳能电池应用系统	104
5.1	应用系统的基本组成	105
5.2	应用系统的设计方法	107
5.2.1	日照数据和太阳能电池组合件(板)的入射能量	108

5.2.2	负载的耗电规律.....	128
5.2.3	太阳能电池组合件的特性.....	129
5.2.4	蓄电池.....	132
5.2.5	直交流转换器.....	136
5.2.6	应用系统的设计实例.....	137
5.3	太阳能电池的应用领域.....	147

第1章 太阳能发电原理

为了便于理解太阳能电池的工作原理，有必要搞清楚作为能源用的太阳光的性质以及受其辐射而在固体中发生电的机理。

从物理学角度来看，光兼有波(动)和粒子的性质。但为了便于理解，一般把太阳光本身当作波(动)来研究，而在固体(半导体)内部则把它当作粒子来研究。这样，根据不同情况从两个不同角度来研究光现象。如果将波(动)和粒子的关系定性表示，则波长越短的光(频率高的)作为粒子所具有的能量就越高。

1.1 太阳光的性质

正如我们日常生活所体验的那样，太阳光辐射的变化相当大，而能有效地捕集、利用太阳光(发电)便是太阳能电池，因此定量分析太阳光的成分及其变化是十分重要的。

1.1.1 太阳光的光谱分布特性

太阳光是混合光，波长范围很广。它包含紫外线、可见光和红外线，在大气层中受到散射和吸收。因此，在地面上的不同地点即使在同一地点也因时间或水汽量的不同，其光谱分布(不同波长的光强度)也不同。典型的太阳光的光谱分布，如图1-1所示。图中大气质量AM(AIR MASS)后标有数字，写成AM1是表示太阳光所通过的大气量；数字0表示大气层外(宇宙空间)；数字1表示在赤道上海拔高度

为零处，在标准大气压下，把太阳光垂直照射时穿透大气层的距离作为基准值。

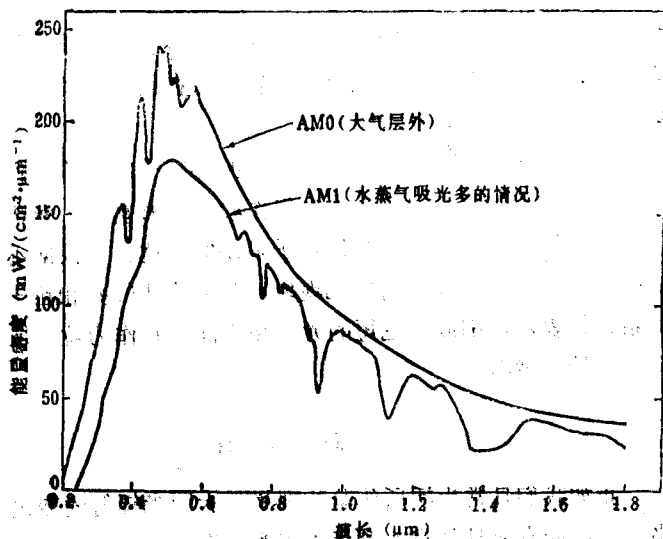


图1-1 太阳能波长分布 (太阳辐射光谱)

其它情况时的大气质量值可以以1为基准，根据图1-2给出的简单的三角函数关系来计算，正如式(1-1)所示，可用太阳高度或者天顶角的函数来表示（在标准大气压下），即

$$m = \frac{1}{\sin a} = \operatorname{cosec} a \quad (1-1a)$$

或者

$$m = \frac{1}{\cos z} = \operatorname{sec} z \quad (1-1b)$$

式中 m ——空气质量值；
 a ——太阳高度(角)；

天顶角 $z = 90^\circ - a$ 。

一般觉得用太阳高度(角)表示的式(1-1a)是容易理解的。但是用天顶角表示的式(1-1b)是把AM1(垂直入射时)的天顶角作为零(起始点)来考虑的。另一方面,春分(秋分)正午时的天顶角等于该地区的纬度,这一点也便于做基准(夏至(冬至)正午时的天顶角等于其纬度减去(加上) 23.5°)。因此使用式(1-1b)是很方便的。例如,在日本的中心纬度 35° 地

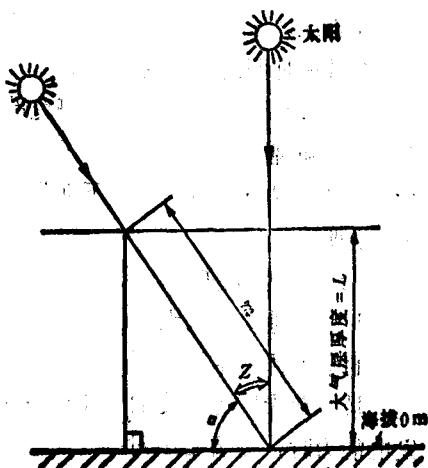


图1-2 大气质量值的说明

区,求出正午时的大气质量 m ,夏至时的值为1.02,冬至为1.91。

从图1-1的AM1曲线中可见到若干波谷,波长为 $0.76\mu\text{m}$ 附近的是被氧气吸收,其它是被水汽吸收所致。

1.1.2 地面太阳光的成分(直射和散射)

前节中已说明对应不同波长的太阳光光谱分布,但对照射在地面上的太阳光还可以按入射方向来区分。即入射于地面上的太阳光由直接从太阳到达地面的光和通过大气层时受到大气分子和雪的散射而以不同角度到达地面的光所组成。前者叫做直射,后者叫做散射,两者之和叫做总日射。

1.1.3 有关日照的观测值(日射强度、日射量和日照时间)

太阳能电池应用系统的设计将在等4章中详细介绍。应用系统的设计依据是在该系统的安装场所或其附近处所观测的日射量或日照时间。这些观测值几乎都是利用气象站的观测资料,但最近太阳能利用的研究部门也开始利用自己观测的资料。随观测部门和地区的不同,观测值的种类及其所采用的测量仪器也有所不同。下面举几个有代表性的测量参数加以说明。

(1) 日射强度

照射到地面上的太阳光强度并不是一定的,每瞬间都以不同的强度照射地面。因此利用太阳光发电的太阳能电池的发电量也随太阳光强度的大小而变化。当表示太阳能电池的发电能力时,需要给出对应于某一确定的日射强度的输出功率。

在确定日射量时,也要连续测试日射强度;并把其按日或按月汇总(累计)的数据用来表示日射量。

日射强度是表示太阳能电池工作特性和各种测试中的重要参数,尤其是在应用系统的设计中更是基本参数。

日射强度可用单位面积、单位时间的能量密度来表示,其单位为 $\text{cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 、 $\text{kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 、 mW/cm^2 、 kW/m^2 、 $\text{J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 。这些单位之间的换算关系如下:

$$1\text{cal}/\text{min} = 69.8\text{mW} = 4.186\text{J}/\text{min}$$

$$1\text{kcal}/\text{h} = 1.163\text{W}$$

其中, J为焦耳, h为小时。

(2) 日射量

日射量的数值通常以每一天的入射能量的月平均值来表

示。经常使用的日射量的单位是 cal/cm^2 、 kcal/m^2 和 MJ/m^2 。在太阳能电池的设计中需用 $\text{W}\cdot\text{h}$ 单位，为此要进行如下单位之间的换算，即

$$1\text{kcal}=1.163\text{W}\cdot\text{h}$$

$$1\text{MJ}=227.8\text{W}\cdot\text{h}$$

其中， $1\text{MJ}=10^6\text{J}$ 。

由于实际的日射量是以1h、1日或一个月照射量的累计值表示的，因此在数据表的单位中累计范围也在分母内，例如 $\text{kcal}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。

图1-3图1-4分别为总日射仪和直射强度仪外形图



图1-3 总日射仪外形图

图1-4 直射强度仪外形图

日射量观测值的种类分为：总日射量和直射量。总日射量原则上在水平面上进行测量，但在已发表的资料中也有在倾斜面上观测的。倾斜面上的数据是太阳能电池和太阳能收集器实际应用所需要的，所以往往是在受光板安装角度上的观测值。

总日射仪有许多种，其原理如图1-5所示，都装有传感器和水平仪。传感器装在球形透明罩内的基准面上，而水平仪的作用是保持基准面经常处在水平位置。关于所用传感器，过去曾使用过双金属片式传感器（卢比奇式），但因其精度不高，目前大多使用热电偶式传感器（埃布里·格鲁金斯基式）。最近又开始采用硅元件（与太阳能电池结构相同）传感器。

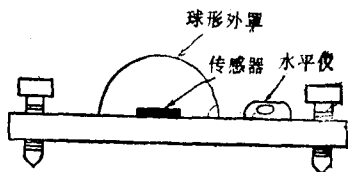


图1-5 总日射仪结构原理图(断面图)

直射强度仪从其功能来说，应具备只接受直射光的圆筒和使圆筒的轴经常与太阳方向一致的跟踪装置。其结构如图1-6所示。迄今为止，都把银盘日射仪（银盘作为传感器）和斯屈朗日射强度表（铜锰镍合金薄片作为传感器）作为标准仪器使用，但它们存在着连续测量的困难，观测数据有限等缺点。近年来太阳能利用研究部门不断积累着大量有关测量直射光的数据。特别是把聚光型装置（只能对直射光起聚光作用）作为主要研究对象的时候，直射光的数据是必不可少的。

另一方面，考虑平面型（普通太阳能电池）聚光器的最佳倾角时，也需要直射光的数据，因为倾斜的效果（入射量的增加）决定于直射光的成分多少。在这种情况下，在总日射仪上，遮蔽直射光，使它只测量散射量，然后由总日射量减去散射量，这样得到的数据比由完全跟踪太阳的直射强度仪测得的数据更符合于实际应用条件。这种为测量散射光而装有遮蔽环的总日射仪，在观测中也被应用（见图1-7）。为了跟踪每天的太阳高度，必须调整日射仪和遮蔽环的相对位置。

另一方面，考虑平面型（普通太阳能电池）聚光器的最佳倾角时，也需要直射光的数据，因为倾斜的效果（入射量的增加）决定于直射光的成分多少。在这种情况下，在总日射仪上，遮蔽直射光，使它只测量散射量，然后由总日射量减去散射量，这样得到的数据比由完全跟踪太阳的直射强度仪测得的数据更符合于实际应用条件。这种为测量散射光而装有遮蔽环的总日射仪，在观测中也被应用（见图1-7）。为了跟踪每天的太阳高度，必须调整日射仪和遮蔽环的相对位置。

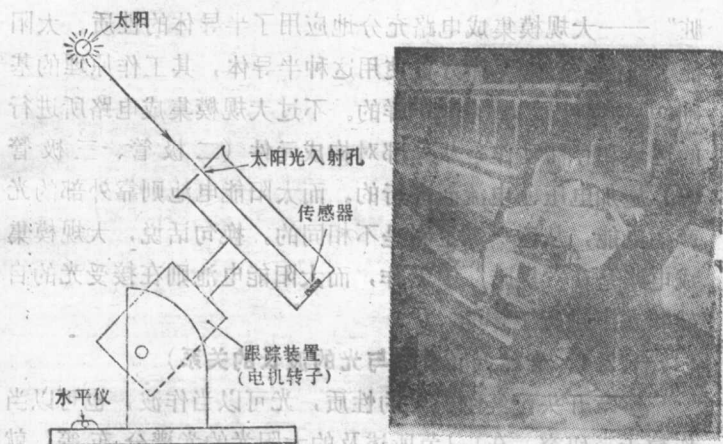


图1-6 直射强度仪的结构 图1-7 带遮蔽环的总日射仪

(3) 日照时间

直射太阳光照射的时间叫做日照时间。世界各地已公布了很多日照时间的观测数据，由日照时间换算出自射量，是利用从实测值求得的系数进行的。

代表性的日照时间观测仪器有两种：一种是乔唐式日射仪（日本气象厅），其原理是把穿过小孔的太阳光记录在感光纸上；另一种是坎贝尔-斯托克日射仪（国际标准），其原理是采用环状透镜聚光，烧焦记录纸。两种日射仪都是把受光面倾斜到与纬度相同的角度上进行记录的。能够记录的下限为 $20\text{mW}/\text{cm}^2$ 的日照强度（相当于直射光最大强度的 $1/4$ ）。

1.2 半导体中的光能转换（光电效应）

所谓半导体，就是把固体按其导电性质分类时，其导电性介于绝缘体和导体之间的物体，它具有各种有趣的性质。

我们常用的电子计算器、电子表和微型电子计算机的芯

脏”——大规模集成电路充分地应用了半导体的性质。太阳能电池的“心脏”部分也使用这种半导体，其工作原理的基础(即物理性质)是完全一样的。不过大规模集成电路所进行的运算和存储动作是从外部对构成元件(二极管、三极管等)施加电压、电流而进行的。而太阳能电池则靠外部的光产生电能，从这一点上看是不相同的。换句话说，大规模集成电路是在“黑暗”中工作，而太阳能电池则在接受光的自然状态下进行工作的。

1.2.1 光能(光子能与光的波长的关系)

本章开头已经阐明光的性质，光可以当作波，也可以当作粒子来研究。在1.1节所述及的太阳光的光谱分布等，就是把光当作熟知的波来研究的。然而，在研究光对半导体的作用时，把这种作用当作光子和半导体内的电子之间的相互影响就容易理解。把光当作粒子来处理时，以光子(或称光量子)为单位，其能量值与各自的波长相对应。这种观点是近代物理的基本概念，因此稍作详细介绍。

光子所具有的能量，与按波来研究时的波的振动频率成比例，用公式可表示为

$$E = h\nu \quad (1-2)$$

式中 E —— 光子能量；

h —— 普朗克常数；

ν —— 振动频率。

式(1-2)经常出现在与太阳能电池有关的书籍中，并且在图表中经常用 $h\nu$ 的形式表示光子。

若把式(1-2)改写成波长的函数，则从波动的基本关系可知，波长(λ)等于光速除以振动频率，因此 $\nu = c/\lambda$ (c 为光速)，把它代入式(1-2)就得出式(1-3)，即