

太阳电池 及其应用

〔日〕桑野幸德 著

科学出版社

太阳电池及其应用

〔日〕桑野幸德 著

钟伯强 马英仁 译

王永令 校

科学出版社

1990

内 容 简 介

本书概括地介绍了太阳能电池的发展历史、发电原理、现有种类、光谱特性、照度特性和温度特性,以及太阳能电池组件等,着重阐述太阳能电池在电子产品和发电方面的应用,并论述了应用方法和发电系统的基本电路设计。本书文字简单明了,内容深入浅出,反映了当前的最新成果。

本书可供从事太阳能电池研制的科技人员和太阳能电池应用感兴趣的有关人员参考。

桑野幸德 著

太陽電池とその応用

(エレクトロニクス製品から電力用発電まで)

パワー社, 1985

太阳电池及其应用

[日] 桑野幸德 著

钟伯强 马英仁 译

王永令 校

责任编辑 杨家福

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1990年2月第一版 开本: 787×1092 1/32

1990年2月第一次印刷 印张: 6 1/4

印数: 0001—1 600 字数: 138 000

ISBN 7-03-001363-8/TB·39

定 价: 5.20 元

序

把赐予地球的无限太阳能直接变为电能，对于人类是最美好的理想。实现这种理想的器件——太阳电池已经问世。1973年石油危机后，由于日本推行了阳光计划，美国推行了以能源部为中心的国家计划等，太阳电池的开发得到迅速发展，高性能、低成本的太阳电池取得了进展。太阳电池开始用于计算器和收音机等，与我们的关系变得愈来愈密切。太阳电池发电时代的到来已不是那么遥远了。

本书的撰写是以头一次碰到太阳电池而又要想使用它的初学者为背景的，以使他们了解“太阳电池是什么？”“原理怎样？”“怎样使用？”“在电子产品中怎么应用？”“如何应用于电力系统？”“应该注意的问题”等，因而在内容安排上力求做到使应用太阳电池的人易于接受。对太阳电池感兴趣的读者可参考本书所列出的文献。另外，以了解太阳电池系统为主要目的的读者，可以从第一章、第二章跳读到第五章。

作者是从从事非晶硅太阳电池开发的，热切地希望通过太阳电池的实用，使无公害、价廉的太阳能造福于人类，并从内心期望本书成为有些读者应用太阳电池的指南，使太阳电池的应用更加广泛。

对于本书的出版，作者衷心地感谢日本通产省工业技术院阳光计划本部向井保开发官和以新能源开发机构太阳技术开发室堀米孝室长为首的有关人员，他们欣然批准了本书引用阳光计划工作中的部分内容。另外还要感谢美国能源部M. B. Prince博士以及有关人员。同时对于大阪大学基础工

目 录

第一章 太阳电池的发展史(为什么现在要讲太阳电池)	1
1.1 能源的枯竭	1
1.2 太阳电池时代的到来	1
1.3 太阳电池出现在电子产品中	3
第二章 太阳电池的发电原理和特点(电是怎样发生的)	5
2.1 太阳电池的发电原理	5
2.2 太阳光发电的特点	6
2.3 太阳电池的结构	8
2.4 太阳电池的特性	9
第三章 太阳电池的种类和制法(有哪些太阳电池)	15
3.1 太阳电池的种类	15
3.2 晶体硅太阳电池	17
3.3 非晶硅(a-Si)太阳电池	22
3.4 化合物半导体太阳电池	29
第四章 太阳电池的光谱特性、照度特性和温度特性(光照下的特性)	33
4.1 用于太阳电池的光源	33
4.2 各类太阳电池的光谱特性	38
4.3 各类太阳电池的照度特性	41
4.4 太阳电池的温度特性	45
4.5 转换效率和输出特性的计算方法	46
第五章 太阳电池组件(实际使用的太阳电池的构成)	51

5.1	用于电子产品的组件	51
5.2	用于电力的组件	54
5.3	聚光式组件	62
5.4	混合型组件	63
第六章	太阳电池的应用方法(如何使用).....	67
6.1	阅读太阳电池说明书的方法	67
6.2	电路设计的基本考虑方法	72
6.3	太阳电池在使用时应注意的问题	74
6.4	可靠性试验方法	78
第七章	太阳电池发电系统的基本电路设计.....	87
7.1	基本电路	87
7.2	太阳电池的工作点	88
7.3	各种控制电路	91
7.4	组件设计	96
7.5	太阳电池和二次电池的匹配	99
7.6	设计流程图	101
第八章	在电子产品中的应用及其实例.....	103
8.1	在计算器中的应用	103
8.2	在钟表中的应用	106
8.3	在收音机中的应用	107
8.4	在充电器中的应用	110
8.5	其他的应用	113
第九章	太阳光发电(在能源方面的应用).....	115
9.1	能源用发电系统的基本设计法	115
9.2	小规模发电系统	125
9.3	中规模发电系统	135
9.4	大规模发电系统	140
第十章	用于太阳电池电路的各种蓄电池.....	146
10.1	二次电池	146
10.2	镍镉(Ni-Cd)电池	148

10.3 氧化银电池	150
10.4 铅蓄电池	153
第十一章 太阳电池的未来	159
11.1 提高转换效率	159
11.2 扩大生产量	159
11.3 未来的太阳电池系统	164
结束语	167
附录 太阳电池特性测量(补充)	169
1. 关于电路特性的换算	169
2. 关于测量光源强度的校正	171
3. 关于输出特性的换算	181
汉日名词对照索引	184

第一章 太阳能电池的发展史

(为什么现在要讲太阳能电池)

能直接从太阳光得到电的太阳能电池，由于它以半永久性的太阳光作能源，所以是无限的、无公害，而且能在使用现场获得电能。太阳电池至今约有30年的历史，但在石油危机之前与我们的关系并不太密切。最近由于新型太阳电池、非晶太阳电池的开发，并开始用于计算器，所以我们周围到处都能看到太阳电池。本章将叙述现今太阳电池引起人们注意的原因。

1.1 能源的枯竭

随着人类文明的发展，消耗的能源也随之增加。迄今大部分能源都是当初自然界生长的木材，这些木材后来变为煤、石油。这些就是所谓的化石燃料，它们总有一天会被消耗殆尽。第一次使人类感到能源危机的是1973年发生的石油危机，即阿拉伯石油产油国使石油价格一举上涨了三倍，给世界经济带来了大混乱。以此为转机，人们提高了对“资源是有限的”的认识，于是替代能源的开发便在世界范围内着手进行。

1.2 太阳能电池时代的到来

在替代能源的开发中特别引起人们注意的是能直接从太

阳能得到电的太阳电池。这是因为太阳具有以下优点:

(1) 与人类的历史(约 30 万年)相比具有长得多的寿命, 所以对于人类来说几乎是无限的能源;

(2) 如后面将要叙述的那样, 太阳光大约以 $40 \text{ Gcal}^3/\text{s}$ 的功率倾注于地球, 30 min 赐予的能量估计就能满足全世界一年的能源消耗量, 给予了地球如此大量的能源;

(3) 太阳能不会造成公害;

(4) 在使用现场就能从太阳光获得能量。

表 1-1 太阳电池的历史

公 历	
1954	单晶太阳电池 (Pearson)
1956	GaAs 太阳电池 (Jenny)
1958	发射装有太阳电池的卫星(先锋 1 号, 美国)
1962	发表装有单晶太阳电池的收音机
1973	石油危机
1974	“阳光计划”开始执行
1975	能控制 a-Si 的 p、n 型 (Spear)
1976	a-Si 太阳电池 (Carlson)
1978	单晶硅太阳电池用于计算器 集成型 a-Si 太阳电池(桑野)
1980	销售装有 a-Si 太阳电池的计算器(三洋、富士)
1981	p 型 a-SiC 太阳电池(浜川)
1982	销售装有 a-Si 太阳电池的手表(三洋)
1983	销售 a-Si 太阳电池充电器(三洋)
1984	销售装有 a-Si 太阳电池的收音机(三洋) 销售作为独立电源用的 a-Si 太阳电池组合板

如表 1-1 所示, 太阳电池早在 1954 年由美国的 Pearson 等发明, 后于 1958 年装于人造卫星(美国先锋 1 号)用作通信装置的电源。此后应用于收音机等电子产品和位于山顶的

1) $1 \text{ cal} = 4.1868 \text{ J}$.

无线电中继站、灯塔等,但由于其价格高未能广泛普及.不过,在石油危机以后(1973年),它作为替代能源被人们所注意.低成本太阳电池的开发已列入许多国家的计划.美国能源部、日本通产省工业技术院均制定了阳光计划,以便对其进行技术开发.图 1-1 示出了日本阳光计划和美国能源部(DOE)降低太阳电池成本的目标.两个计划都是以 1990 年达到 100 日元/峰瓦(相当于 0.4 美元/峰瓦)为目标.现在太阳电池的价格是最初价格(数万日元/峰瓦)的十分之一,大约是 1500 日元/峰瓦.

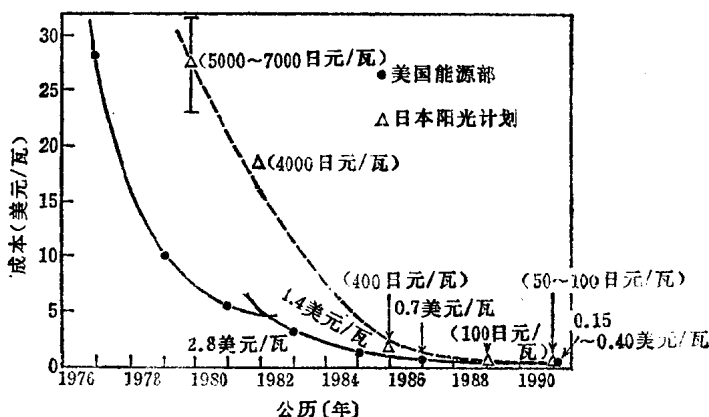


图 1-1 日本和美国太阳电池成本降低的情况和预测

1.3 太阳电池出现在电子产品中

太阳电池在电子产品即所谓的民生用装置中的应用开始于 1962 年,用在收音机中,因为当时的电子产品采用早期的晶体管,它们耗电较大,所以不能说是成功的.

太阳电池第二次用于电子产品始于 1980 年,这是因为当

时集成电路、大规模集成电路已相当发达,电子产品的耗电大幅度地减小,以及如后所述的新型集成型非晶硅太阳电池得到了开发。应特别指出,因为太阳电池具有(1)不论发电系统的规模大小,例如 100 W、1 W、0.1 W 等各种发电系统,其发电效率是一样的,(2)即使是散射光也能发电,(3)在荧光灯或者白炽灯光下也能发电等特点,而传统的化学电池寿命短,太阳电池与其相比几乎能半永久地使用,不需更换,所以近年来在计算器、收音机、钟表、太阳光充电器上的应用得到很快的发展。

第二章 太阳能电池的发电原理和特点

(电是怎样发生的)

太阳能电池的发电原理是全新的，与至今已有的火力、水力、原子能发电根本不同。它是根据半导体的光电效应，也就是说光辐照到太阳电池而产生电的。本章就太阳电池的发电原理、太阳光发电的特点以及太阳电池的典型结构予以叙述。

2.1 太阳能电池的发电原理

通常的发电系统如火力发电，就是燃烧石油或煤以其燃烧能来加热水，使之变为蒸气，推动涡轮机而发电；原子能发电是以核裂变放出的能量代替燃烧石油或煤，而水力发电则是太阳能使海洋和地面的水蒸发，从而变成雨水再降到地面

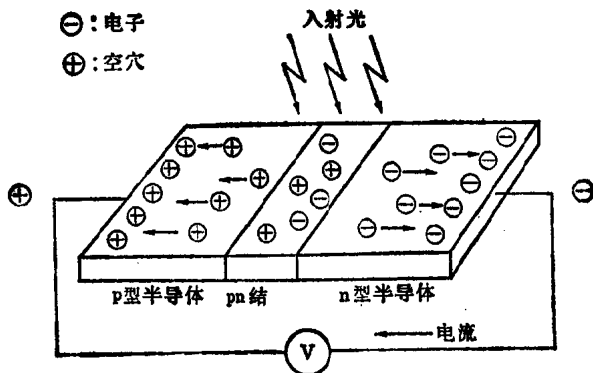


图 2-1 太阳能电池的发电原理

并累积在水库里，用水的差落能使发电机旋转而发电。与此相比，太阳电池的发电则完全不同。

太阳电池的发电原理是利用光入射于半导体时所引起的光电效应。如图 2-1 所示那样，当具有适当能量的光子入射于半导体时，光与构成半导体的材料相互作用产生电子和空穴（因失去电子而带正的电荷）。如半导体中存在 pn 结，那么电子向 n 型半导体扩散，空穴向 p 型半导体扩散，并分别聚集于两个电极部分，即负电荷和正电荷聚集于两端。这样如用导线连接这两个电极，就有电荷流动产生电能⁽¹⁾。这与传统的发电方式是完全不同的，既没有使马达旋转的转动部分，也不排出气体，是清洁的、无噪声的发电机。

2.2 太阳光发电的特点

利用太阳电池实现太阳光发电，能直接由光获得电能，因而具有与传统的发电方式极不相同的特点。

优点

(1) 太阳光的能量是无穷无尽的。

太阳位于离地球一亿五千万公里远的地方，因核聚变反应而产生的巨大能量，赐予地球的能量亦达 1.77×10^{14} kW。

太阳的寿命与人类历史相比可以说是半永久的，而且它供应的燃料是免费的。

(2) 无污染的能源。

太阳电池是利用半导体中的一种量子效应即光生伏特效应，直接由光变为电，所以什么燃料燃烧呀、一直视为必不可

1) 因本书以太阳电池的应用为中心，故想要详细了解有关半导体的原理的，请参阅有关文献。

少的马达等的运动部件呀，均不需要了。因此既无废弃物排出，也无噪音。

(3) 无论规模大小，其发电效率几乎是相同的。

如上所述，由于是根据半导体中的量子效应来发电的，因此无论是 1 W 的发电系统，还是 100 kW 的发电系统，其效率几乎是相同的。

(4) 能在用电的现场发电。

以往的发电系统从发电站到消费地需要送电，而太阳光发电，只要把装置安装在有阳光的地方，即在用电的现场就能发电。

(5) 即使是散射光也能发电。

太阳电池不只在直射的日光下能发电，即使是阴天的阳光或者是室内的荧光灯等也能发电，其转换效率一般几乎不随光的强弱而变化。

必需考虑的特点

(1) 入射能量较弱。

太阳光的强度在晴天时约为 1 kW/m^2 ，假如用转换效率为 10% 的太阳电池，每平方米只能得到 100 W 的电力。所以想得到大的电力，就需要大面积的太阳电池。

(2) 输出取决于气象条件和入射光。

因是光生伏特效应，所以当入射光随气象条件而变化时，输出亦变化。

(3) 输出是直流。

半导体光生伏特效应产生的电流是直流，因此如负载机器是用交流驱动的，则必需把直流变换为交流。

(4) 没有蓄电的功能。

仅当光照射时才能发电，因此在需要恒定输出的情况时，

必需配备蓄电池等。

尽管有这些必需注意的问题,但由于有上述的优点,太阳能电池的开发仍取得了明显的进展。

2.3 太阳能电池的结构

太阳能电池正如以后将要叙述的那样,分为单晶硅(c-Si)、非晶硅(a-Si)以及化合物半导体等。

其典型结构如图

2-2 所示。

(1) 单晶硅。

单晶硅太阳能电池通常是以P型Si为衬底,扩散n型杂质,形成如图2-2(a)所示结构。为取出电流,P型衬底的整个下表面涂银并烧结,以形成银电极,接通两电极即能得到电流。

(2) 非晶硅。

(a) 玻璃衬底型。

玻璃衬底型非晶硅太阳能电池是先在玻璃衬底上沉积透明导电薄膜,然后依次用

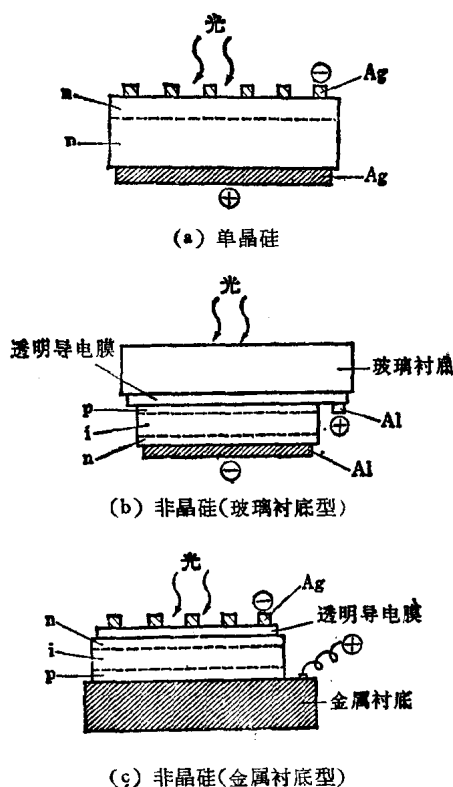


图 2-2 各种太阳能电池的结构

等离子反应沉积 p 型、i 型和 n 型三层 a-Si,接着再蒸涂金属电极铝,电池电流从透明导电薄膜和电极铝引出。

(b) 不锈钢衬底型。

此型如图 2-2(c) 所示,在金属(一般为不锈钢)上沉积 pin 非晶硅层,其上再沉积透明导电薄膜¹⁾,最后与单晶硅电池一样制备梳状的银收集电极。

电池电流从下面的不锈钢和上面的梳状银电极引出。

2.4 太阳电池的特性

2.4.1 太阳电池的输出特性—— $I-V$ 特性曲线

太阳电池的输出特性示于图 2-3(a),为了比较,图 2-3(b) 示出了锰干电池的输出特性。不论是一般的化学电池还是太阳电池,其输出特性一般都是用如图所示的电流-电压($I-V$) 曲线来表示,这是因为它们都有随着电流增大,电池的

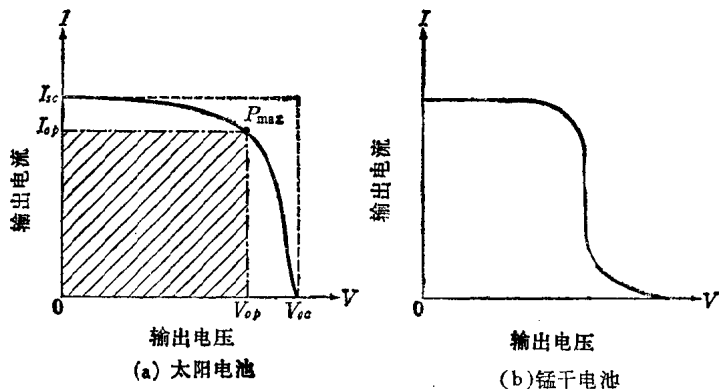


图 2-3 电池的电流-电压特性

- 1) 透明导电薄膜又叫 TCO (Transparent Conductive Oxide),其主要成分是 InO_2 或 SnO_2 ,它通过蒸发或气相热分解等形成 $2000\text{\AA} \sim 1\mu\text{m}$ 的薄膜,既导电(电阻为 $10\Omega/\square \sim 100\Omega/\square$),又透光。透过率在可见光范围是 80%。

电压减小的特性。实际上图 2-3 所示的特性就是电池的基本特性。

在 (a) 图太阳电池的 $I-V$ 特性上, 下面四个参数是特别重要的:

(1) 开路电压 V_{oc} 。

曲线上标记为 V_{oc} 的点被称作开路电压, 即在太阳电池的 + (正) 极和 - (负) 极之间什么也不连接时的电压。单位用 mV 或 V 来表示。

(2) 短路电流 I_{sc} 。

曲线上标记为 I_{sc} 的点被称作短路电流, 即太阳电池的正负两极直接用导线连接、短路时的电流, 单位用 μA 、mA、A 等来表示。单位面积太阳电池的短路电流用短路电流密度来表示, 单位用 $\mu A/cm^2$ 、mA/cm² 等来表示。

(3) 填充因子 F. F.。

填充因子 (或曲线因子) F. F. 用下式来定义。

$$F. F. = \frac{V_{op} \times I_{op}}{V_{oc} \times I_{sc}} = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (2.1)$$

式中 V_{op} (最佳工作电压) 和 I_{op} (最佳工作电流) 如图 2-3(a) 所示, 是最大输出功率点 (输出电压和输出电流的乘积为最大的点) 的电压和电流。如果简单易懂地来说明 F. F. 的意义, 就是图 2-3(a) 中斜线所示的长方形面积 ($P_{max} = V_{op} \times I_{op}$) 与虚线所示的长方形面积 ($V_{oc} \times I_{sc}$) 之比, 所以是无量纲的。F. F. 等于 1 就意味着在图 2-3(a) 中的虚线和点划线重合, 这是理想的太阳电池特性, 一般 F. F. 的值均比 1 小。

式 (2.1) 改写为

$$P_{max} = V_{oc} \times I_{sc} \times F. F. \quad (2.2)$$

因此可以说特性好的太阳电池就是能获得较大功率输出的太