



【美】H·J·霍维尔 等著
高元恺 叶奕锦 编译

太阳能电池

AIYANGNENGDIANCHI

黑龙江科学技术出版社

封面设计：张晓岚

太 阳 能 电 池

〔美〕 H.J.霍维尔 等著

高元恺 叶奕镛 编译

黑龙江科学技术出版社

(哈尔滨市南岗区分部街 28 号)

新华附属印刷厂印刷·黑龙江省新华书店发行

开本 787×1092 毫米 1/32·印张 5.75·字数 119 千

1984 年 10 月第一版·1984 年 10 月第一次印刷

印数：1—1,520

书号：15217·143

定价：0.70 元

内 容 提 要

本书是我社编发的《能源技术译丛》之一。

本书叙述了太阳能电池的工作原理和基本制造工艺。在编译过程中，总结了国内外的主要实践和成果。同时，对太阳能电池的材料选用与制备，以及太阳能电池的测试，也作了相应的介绍。

本书可供半导体器件、电池技术和能源技术工作者阅读，也可供有关专业大专院校师生参考。

编译者的话

作为能量转换器件的一种,太阳能电池,已日益引起人们的重视。从基本理论的研究到新材料制备、工艺的改进、新型电池制造等工作,正广泛地开展着。人们迫切希望对于太阳能电池的工作原理,使用的材料和制造工艺能有较系统的了解。鉴于目前国内有关这方面的书籍不多,我们编译了本书。

本书比较系统地叙述了太阳能电池的工作原理、太阳能电池常用材料的制备方法,更多的侧重介绍了各种太阳能电池的制造工艺。此外,对其性能的测试方法也作了简要的介绍。

本书是以 H.S.RAUSCHENBACH 的“SOLAR CELLS ARRAY DESIGN HANDBOOK”,PAUL N.CHE-REMISINOFF 的“SOLAR ENERGY TECHNOLOGY HANDBOOK”以及 H.J.HOVEL 的“SEMICONDUCTORS AND SEMIMETALS Vol11,SOLAR CELL”等书为基础,并结合近期发表的有关文献编译而成。

由于我们水平所限,本书肯定会有谬误和欠妥之处,切望批评指正。

一九八三年九月
于哈尔滨工业大学

绪 论

电能可以由其它形式的能量（化学的、热的、原子的或生物的）间接或直接地转换而来。例如，火力发电，首先是煤的燃烧，把化学能转换为热能（加热蒸汽），然后，热能转换为机械能（使汽轮机的轴旋转），最后，经发电机转换为电能。这就是间接的能量转化过程。电能的直接转化过程包括由化学的、光化学的、热离子的、热电的、光电的、光伏的以及其它形式的能量，不经过中间过程直接转为电能。太阳能电池就是根据光生伏打原理，将太阳的光能直接转变为电能的一种器件。

太阳能电池是一种小型的半导体器件，当阳光投射到它的表面时，它把光能转换为电能。地球大气层外空间的阳光包含的能量大约是 1.4 千瓦/米^2 ，而在地球表面，晴朗的阳光只包含大约 1.0 千瓦/米^2 的能量，有 10—20% 的能量因地球大气层的反射和散射而损失掉了。在实际应用中，太阳能电池只转换入射太阳能的 5—20%，这取决于它的结构，所用的材料，制造工艺以及使用条件。

自 1839 年贝克勒尔（Becquerel）报导了他的光电试验工作以后，才开始有了光生伏打效应的研究记载。经过一百多年的理论和试验研究，直到 1954 年贝尔电话实验室才试制了第一个具有实际价值的太阳能电池。它是平面结单晶硅形

式，是当今太阳能电池的前身。这是在硅材料的提纯，切赫劳斯基 (Czochralski) 法制备硅单晶，高温汽相扩散等工艺取得突破性的进展后获得成功的。那时的太阳能电池是由直径 3 厘米的 n 型硅片扩散 p 型杂质后制成的。由于内电阻高 (5—10 欧姆) 所以转换效率只有 6%。根据当时的计算，对于 AM1 (空气质量 1) 光谱，1 千瓦/米² 的太阳强度，理论的最大效率大约在 18—22% 之间。

美国最初用来制造太阳能电池的材料是 n 型硅，而苏联主要使用 p 型硅。其主要原因是：(1) 苏美两国在科学上的对抗。(2) 在苏联，p 型硅比较便宜。以后又发现用 p 型硅制成的太阳能电池在宇宙航行的应用中具有较好的抗粒子辐射性能。从 1960 年以后，美国也开始用 p 型硅制造太阳能电池了。

1961 至 1971 年的十年间，硅单晶太阳能电池的工艺没有重大进展。主要的研究集中于获得抗辐射能力、减轻重量和降低成本的几个方面上。其中主要是枝晶太阳能电池和掺锂的太阳能电池的研制。两者都是利用单晶硅。

1972 年宣布了过去十年间在太阳能电池的效率方面所取得的初步结果，空间用电池的效率提高了 30%。主要原因是严格的检验，以及修正了现有的理论，因而提高了电池的蓝光响应，降低了电池的内阻 (到 0.05 欧姆)，改善了载流子的收集过程。

同年宣布的另一项有价值的进展是垂直结太阳能电池。顾名思义，它是由许多 n 型和 p 型硅层交替叠成的，类似于“叠饼”的一种器件。转动“叠饼”使各层垂直立起。

阳光照到各层上，每两层间的 p-n 结分离载流子，在较低的电流下电池的总电压较高，是各层结电压的代数和。内阻比较小。

1972 到 1976 年间，制造了各种太空中应用和商用硅单晶太阳能电池，如蓝漂移的、超蓝的、紫光电池等。由于扩散较浅，因此改善了波长在 300 到 800 毫微米间的太阳能谱的灵敏度。p⁺ 电池的输出较高，这是由于在电池的背表面建立起一个附加静电场的缘故，这个场有助于载流子的收集。为了减少太阳能电池表面的光反射，不同表面的处理导致非反射的、黑的、绒式的、织构化的太阳能电池的出现。更有效的减反射膜，如氧化钛、五氧化二钽代替了氧化硅。

另一项成就是超薄单晶硅太阳能电池。到 1978 年，具有背场的超薄电池的效率达到了 12.5%。它的优点是效率高、重量轻、抗辐射性能好，有利于在太空中应用。

在七十年代期间，地面应用的硅太阳能电池也紧跟着发展起来。其重点不是提高电池的效率，而是降低成本。主要进展是生长大的、纯的、无应力的硅单晶，利用新的切片加工技术减少材料中的加工损伤。显然，把太阳能电池制造得越来越大，未必能降低电池的单位功率输出的价格。因为硅片大了，包含的缺陷就更多，这是大面积太阳能电池效率降低的重要因素。降低太阳能电池价格的措施之一是努力降低单晶硅的成本或利用多晶硅。

近十年来，非硅太阳能电池和 III—V 族、II—VI 族化合物半导体的太阳能电池的研究工作有了很大的进展。1971 年

苏联报导了 GaAlAs 太阳能电池的结构之后,世界范围的研究活动在一些研究中心兴起。作为“窗孔”的 GaAlAs 薄层被沉积到 GaAs 电池上,使表面复合的损失显著降低。这种新电池的设计为提高效率铺平了道路。到 1977 年,在 AMO 条件下,表面积为 $2 \times 2\text{cm}$ 电池的效率超过 16.0%,在 AM1 条件下,0.25 平方厘米面积的电池的效率超过 23%。有些人证明,效率随浓度比的增加而提高。但是,另一些人得出相反的结论。有些人证明 GaAs 电池比硅电池具有更高的辐射阻力,而另一些人的观点正好相反。尽管如此,这种电池已经成为硅电池的对手,尤其是在 Ga 和 As 材料的价格迅速降低之后。预计到 1990 年, GaAs 和硅电池的材料价格将有可能相等。

CdS 单晶和薄膜的光生伏打效应是在 1954 年发现的。五十年代后期,人们寻找半导体材料薄膜以便降低太空用电池的材料价格和提高功率与单位面积的重量比。CdS、CdTe、GaAs 和其它一些材料可以用来在玻璃、金属箔或塑料薄膜上生长薄膜半导体层。

六十年代以后, CdS 和其它薄膜半导体的研究规模较小。在七十年代, CdS 电池已在控制的条件下应用成功。其寿命在几年以上。迄今,室温时测得的转换效率在 8% 以上,理论极限效率为 15%。极限效率虽然较小,但并没有降低人们对它的兴趣。因为它的制造成本可望低于 Si 或 GaAs 电池的一个数量级。因此,对 CdS 电池的研究一直在进行着。

作为第二代太阳能电池的非晶硅,多晶硅薄膜电池和第三代太阳能电池的有机半导体电池更引起人们极大兴趣,并

进行着广泛的研究。目前，非晶硅太阳能电池的最高效率可达7—10%以上，多晶硅电池的转换效率已达10%以上。

早在五十年代，我国已开始对太阳能电池的研究。当时制造的单晶硅电池已用作晶体管收音机的电源。经多年的努力，目前在全国进行着各种材料的、不同类型的太阳能电池的研究和生产。从事这方面工作的科技力量正不断壮大。

目前限制太阳能电池作为普通电源使用的主要障碍，仍然是成本高和效率低，这是研究工作有待解决的主要课题。有关太阳能电池的新理论、新设计、新材料、新工艺和新产品不断涌现。可以断言，不用多久，把太阳能这个可以不断使用的、绝对安全的、取之不尽的巨大能源转换为电能的廉价、高效的太阳能电池将会出现，并得以大规模的应用，为解决人类的能源问题开拓新的途径。

目 录

编译者的话

绪论.....	1
第一章 太阳能电池的结构及种类.....	1
1.1 太阳能电池的基本结构.....	1
1.2 太阳能电池的种类.....	2
1.3 太阳能电池应用简介.....	10
第二章 太阳能电池的工作原理及其模型.....	14
2.1 半导体的基本原理.....	14
2.2 太阳能电池对光的吸收和反射.....	23
2.3 载流子的分离机理.....	30
2.4 载流子的收集.....	34
2.5 太阳能电池的数学模型.....	39
2.6 太阳能电池的特性.....	44
第三章 太阳能电池材料.....	48
3.1 太阳能电池材料及其基本参数.....	48
3.2 各种材料的太阳能电池的现状和前景.....	70
3.3 选择材料的原则.....	74
3.4 硅的制备.....	82
第四章 太阳能电池制造工艺.....	88
4.1 硅太阳能电池制造工艺.....	88

4.2 肖特基势垒太阳能电池.....	98
4.3 砷化镓 MOS(金属—氧化物—半导体)	
太阳能电池.....	101
4.4 薄膜 GaAlAs-GaAs 太阳能电池	105
4.5 InP-CdS 太阳能电池	109
4.6 CdS-Cu ₂ S 薄膜太阳能电池.....	110
4.7 有机半导体太阳能电池.....	111
4.8 离子注入和激光退火工艺.....	118
4.9 太阳能电池栅条的最佳设计.....	128
4.10 欧姆接触	133
4.11 减反射膜	137
4.12 晶硅太阳能电池的实际极限效率	143
第五章 太阳能电池的电学性能及测试.....	156
5.1 太阳能电池的电学性能.....	156
5.2 太阳能电池的测试.....	164
参考文献	

第一章 太阳能电池的结构及种类

1.1 太阳能电池的基本结构

最常见的太阳能电池的结构如图 1.1 所示。

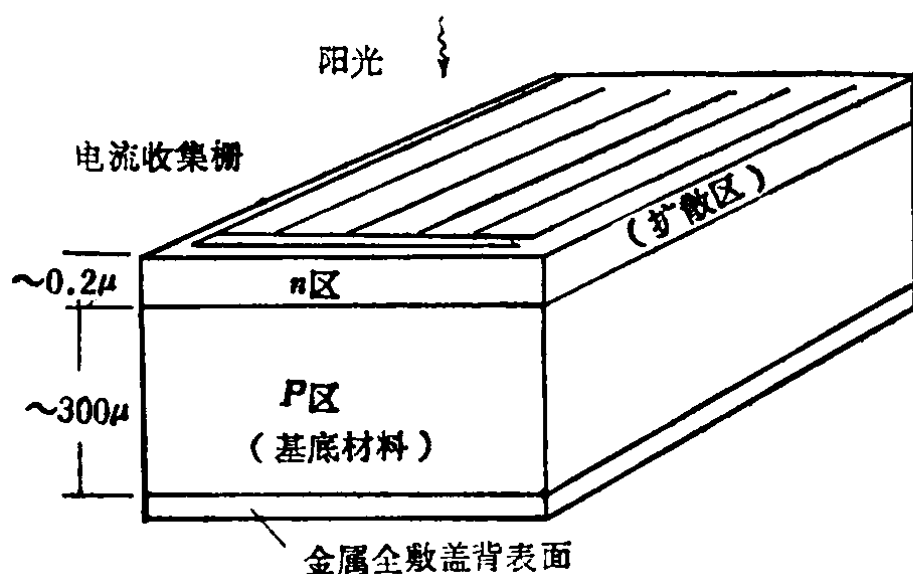


图 1.1 太阳能电池的结构示意图

图中在 p 型和 n 型半导体的交界区（称为 p-n 结），可以提供一个固有电场，其作用是分离光生载流子。得到 p-n 结的常用方法是把原始的 p 型（或 n 型）材料，放入含有 n 型（或 p 型）掺杂剂气氛的扩散炉中进行扩散，其杂质扩散深度约为 0.2 微米，从而在材料的表面下形成一个较浅的

结。当光线垂直入射到结上时，吸收光子所产生的正、负载流子被激励后移向太阳电池的正面和背面。背面完全被金属接触所敷盖，以便把电荷移向负载。正面指状的窄的金属细栅有助于从电池的正面收集电荷。导电的收集极表面敷盖占总面积的 5%，以便尽可能地使更多的光到达有源的结面。在电池的顶部是减反射层。

为满足在特殊应用条件下的电压、功率及可靠性要求，把单个太阳能电池进行串、并联，组成阵列。用透明的“敷盖涂料”，把空间电池敷盖起来，以便吸收空间中的高能粒子。否则它们能引起电池的输出性能下降，甚至导致电池的破坏。地面使用的太阳能电池，其面板一定要封装好，使电池与大气隔离。正面盖盘应清晰，并能防风雨。一般均用玻璃、聚丙烯、硅环氧树脂等材料制作。

1.2 太阳能电池的种类

太阳能电池的种类很多，但目前对于多数批量生产和研制的太阳能电池，还没有公认的命名法。现把它们大致的分类情况介绍如下：

1.2.1 按照应用分类

(1) 地面太阳能电池 在设计、制造和测试等各方面，没有空间太阳能电池那样严格。其特点是，价格较低。由于大多数紫外太阳能已被大气层吸收，因此电池的最佳光谱响应在长波区。

(2) 空间太阳能电池 它是按照严格的质量标准和工艺

要求制造的器件。它的可靠性很高，能经受极高的温度和其它太空环境的考验。在太空应用中，其重量要求很严格。所以设计空间电池时，必须使单位重量的实际输出功率(瓦/公斤)达到最大。

(3) 一个天文单位电池 所谓一个天文单位，就是地球到太阳的平均距离，等于 1.496×10^{11} 米。实际上这样的电池是无需特殊设计的。因为大多数地面和空间电池都设计成在距太阳接近一个天文单位处的太阳强度下工作，其效能为最佳。而在极低或极高的照射强度时工作都较差。

(4) 低强度电池 这类电池在比较低的光照强度下，其工作效能为最佳，和高强度电池相比，它们的串联内阻较大，而分路电阻较低。一般地说，这种电池是在低温和低光强状态下工作的。

(5) 高强度电池 这类电池在高太阳强度下，其工作效能为最佳。它的主要特点是栅线密度高，电池的串联内阻小。这种电池一般是在高温和高强度状态下工作的。

1.2.2 按照使用的材料和工艺分类

太阳能电池根据使用的半导体材料分为硅，砷化镓、硫化镉等多种。

(1) 硅太阳能电池 又可分为单晶硅太阳能电池和多晶硅太阳能电池。前者的原材料是从单晶硅棒上切割下来的硅片。目前直径大于 10 厘米，长 50 厘米以上的硅棒已很易生长。多晶硅电池的原材料是通过铸造和热处理而获得多晶硅。在热处理过程中，单个的小晶粒联合长成线度为几厘米的大晶粒。

对于使用者来说，最感兴趣的材料性能是原材料的电阻率。按照电阻率，可分为 $1\sim 3$ 欧姆·厘米， $7\sim 14$ 欧姆·厘米和其它电阻率范围的电池。用低电阻率材料制造的电池一般其效率较高，辐射阻力较小。

扩散过程能够影响硅太阳能电池的光谱响应。按照扩散的结深，亦可分为深扩散和浅扩散两种电池。前者的结深约 0.5 微米，它对低于 450 毫微米波长的光响应小。浅扩散电池显示出较大的短波响应，而串联内阻损耗较大。浅扩散电池也称为兰敏、兰光或紫外光电池。它的栅线密度较高，可减少串联内阻损耗。

硅太阳能电池形成结的方法是不同的。大多数是采用扩散法，也可以用离子注入法，用离子枪把杂质原子“射入”基底半导体材料中。

掺锂的硅太阳能电池是一种改进的电池。它具有相当高的质子和中子辐射硬度。该电池是在 n 型硅的基底上加入锂而制成的。锂可以明显消除辐射的有害影响，使电池在辐照后部分地恢复输出性能。

硅太阳能电池还有 N-P 和 N-P-P⁺ 之分。上述的电池是单 p-n 结型。图 1.2a, b 示出了它们的结构。

图中，除掺锂的硅电池外，p 和 n 层都颠倒过来。现在有一类通用的太阳能电池，称为，P⁺ 和背场电池 (BSF)，它们的结构如图 1.2b 所示。从图可以看出，在紧靠近电池的背面接区有一附加的 P⁺ 层。它形成的场有助于分离光生电子—空穴对并且收集少数载流子。空间辐射效应使这个场的作用降低。在 1×10^{15} 兆电子伏/厘米² 的辐射量

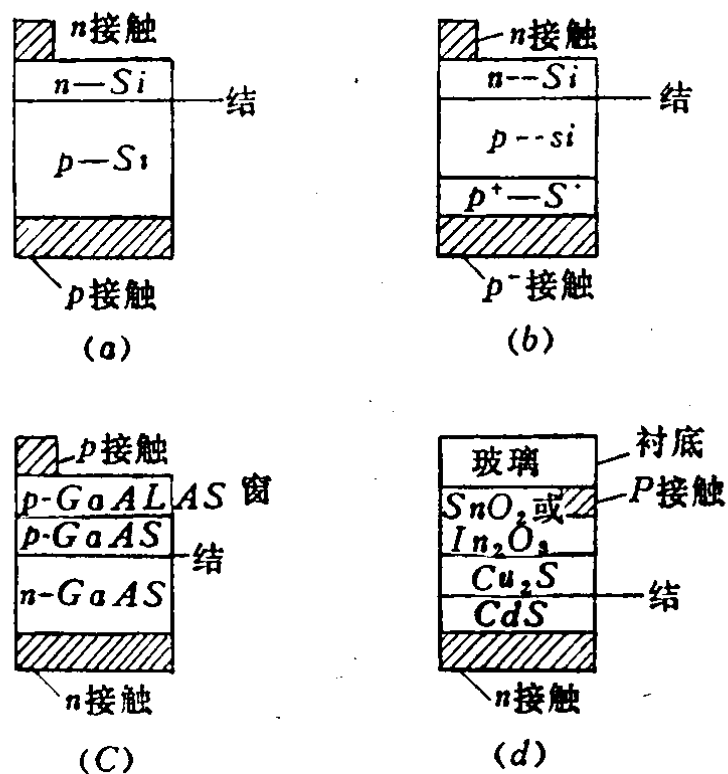


图 1.2 几种太阳能电池的结构

- (a) n/p 硅电池 (b) 有 P⁺ 层的 n/p 硅电池
(c) 砷化镓电池 (d) 硫化镉电池

级下,和等效的非 BSF 电池相比,BSF 电池的效率并不高。由于它们内部载流子机理稍有不同,太阳能电池专家划分了 BSF 和 P⁺ 太阳能电池。

(2) 砷化镓(GaAs)太阳能电池

这种电池目前仍处于试制阶段。以后,有可能代替硅电池应用于空间和地面。常见的 GaAlAs-GaAs 结构如图1.2c 所示。这种 p 在 n 上的电池,在 AMO 条件下效率已达到 16%。

近年来,已经可以利用外延生长法,在单晶的 GaAs 基

片上生长外延层来制造这类电池。然而 GaAs 是一种昂贵和稀少的材料，目前正寻找一种方法能够在廉价材料做成的基片上，外延生长一层极薄的 GaAs 来制造这种电池。

(3) 硫化镉电池 这一类是属于化合物半导体薄膜电池。最有希望的 CdS 电池类型具有 $\text{Cu}_x\text{S}-\text{CdS}$ 结构，如图 1.2d 所示。在硫化铜层中， x 的典型值近似地等于 2。但是实际上可以存在多种不同形式的铜—硫化合物，一般通称为硫族化合物。

CdS 电池是用低成本的喷涂或浸沾工艺，而不是采用晶体生长工艺制成的。CdS 层非常薄，所以当把它们沉积在金属箔或塑料薄膜的基片上时，就十分柔软，容易变形。因此在近代工艺中，把 CdS 膜沉积在玻璃上，它比塑料薄膜更防潮。

(4) 其它类型的电池 这些包括化合物半导体电池和金属氧化物电池。实际使用的化合物半导体可以由 III-V 族和 II-VI 族元素组成。例如 GaAs 和 GaAlAs 是 III-V 族化合物， Cu_2S 是 I-VI 族化合物，而 CdS 是 II-VI 族化合物。

金属—绝缘体—半导体(MIS)电池是肖特基势垒型，除了在金属和半导体间存在一层极薄的绝缘层(通常是氧化物)外，完全与肖特基势垒电池相同，这类电池的效率有所提高。由于它的绝缘层总是氧化物，所以又称为金属—氧化物—半导体(MOS)电池。

1.2.3 按照结构分类

太阳能电池如果属于 n 在 p 上的，或 p 在 n 上的类型，那么可分别用 n/p 或 p/n 代号表示。第一个字母表示光敏表