

太阳电池新进展*

赵玉文[†]

(北京太阳能研究所 北京 100083)

摘要 介绍了各种太阳电池技术和发展概况,其中晶硅太阳电池技术发展比较成熟,商业化程度最高,许多技术和理论问题带有普遍性,对其他电池的研究开发有借鉴作用,文章对此作了较详细的介绍.薄膜电池是未来发展方向,文章对目前国际上研究得最多的几种薄膜电池,如非晶硅($a\text{-Si}$)、碲化镉(CdTe)、铜铟硒(CuInSe_2 , CIS)、多晶硅、染料敏化 TiO_2 等电池的技术发展概况作了介绍,并简要说明了不同电池的商业化生产情况.

关键词 太阳电池,单晶硅,多晶硅,高效电池,带硅,薄膜电池,非晶硅,碲化镉,铜铟硒,多晶硅薄膜,染料敏化电池

Recent progress in solar cells

ZHAO Yu-Wen[†]

(Beijing Solar Energy Research Institute, Beijing 100083, China)

Abstract Recent progress in the development of various solar cells is reviewed. Of these crystalline silicon solar cells have already reached a mature stage and have the highest commercial value. The technology and theoretical issues of these crystalline silicon cells are of universal significance to other solar cells, and so are described in more detail. Thin film solar cells are the focus of development for the future, hence their technology and commercial production are also mentioned with special reference to amorphous silicon($a\text{-Si}$), CdTe , CuInSe_2 (CIS), poly-Si and dye-sensitized TiO_2 cells.

Key words solar cells, single-crystalline silicon, multi-crystalline, high efficiency cell, ribbon silicon, thin film solar cells, $a\text{-Si}$, CdTe , CIS, poly-Si thin film, dye-sensitized TiO_2 cell

1 引言

典型的太阳电池本质上是一个大面积半导体二极管,它利用光伏效应原理把太阳辐射能转换成电能.当太阳光照射到太阳电池上并被吸收时,其中能量大于禁带宽度 E_g 的光子能把价带中电子激发到导带上去,形成自由电子,价带中留下带正电的自由空穴,即电子-空穴对,通常称它们为光生载流子.自由电子和空穴在不停的运动中扩散到 p-n 结的空间电荷区,被该区的内建电场分离,电子被扫到电池的 n 型一侧,空穴被扫到电池的 p 型一侧,从而在电池上下两面(两极)分别形成了正负电荷积累,产生“光生电压”,即“光伏效应”(photovoltaic effect).若在电池两侧引出电极并接上负载,负载中就有“光生电流”通过,得到可利用的电能,这就是太阳电池的工

作原理,如图 1 所示.

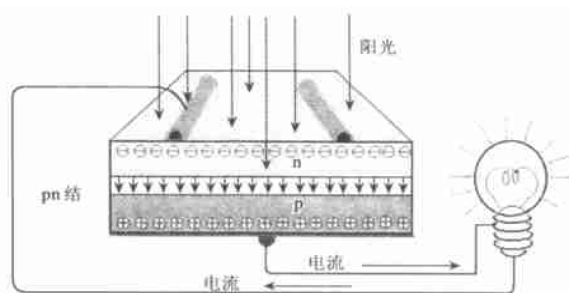


图 1 太阳电池的工作原理

光伏效应是 1839 年法国 Becquerel 第一次在化学电池中观察到的. 1876 年在固态硒(Se)的系统中

* 2003 - 04 - 21 收到初稿,2003 - 06 - 23 修回

[†] E-mail: zhaobts@public.bta.net.cn

也观察到了光伏效应,随后开发出 Se/CuO 光电池. 硅光电池的报道出现于 1941 年. 1954 年,贝尔实验室 Chapin 等人开发出效率为 6% 的单晶硅光电池,为太阳能光伏发电奠定了技术基础,成为现代太阳能电池时代的划时代标志.

作为能源,硅太阳能电池于 1958 年首先在航天器上得到应用. 在随后 10 多年里,硅太阳能电池在空间应用中不断扩大,工艺不断改进,电池设计逐步定型. 70 年代初,许多新技术引入电池制造工艺,转换效率有了很大提高. 与此同时,硅太阳能电池开始引入地面应用,70 年代末,地面太阳能电池产量已经超过了空间电池产量,促使成本不断降低. 80 年代初,硅太阳能电池发展进入快速发展时期,技术进步和研究开发使太阳能电池效率进一步提高,商业化生产成本持续降低,应用不断扩大.

在太阳能电池的整个发展历程中,先后开发出各种不同结构的电池,如肖特基(MS)电池、MIS 电池、MINP 电池、异质结电池等,其中同质 p-n 结电池自始至终占着主导地位,其他结构电池对太阳能电池的发展也产生了重要影响^[1-4]

在材料方面,有晶硅电池、非晶硅薄膜电池、铜铟硒(CIS)薄膜电池、碲化镉(CdTe)薄膜电池、砷化镓薄膜电池等. 由于薄膜电池被认为是未来大幅度降低成本的根本出路,因此成为太阳能电池研发的重点方向和主流,在技术上得到快速发展,并逐步向商业化生产过渡. 多晶硅薄膜电池和 Gratzel 电池在 90 年代中后期开始成为薄膜电池的研发热点,技术发展比较迅速.

2 晶硅电池的技术发展

2.1 地面应用推动各种新型电池的出现和发展^[2-6]

单晶硅电池在 70 年代初引入地面应用. 在石油危机和降低成本的推动下,太阳能电池开始了一个蓬勃发展时期,这个时期不但出现了许多新型电池,而且引入了许多新技术. 例如:

(1) 背表面场(BSF)电池——在电池背面接触区引入同型重掺杂区,使电池的开路电压、短路电流和填充因子得到改进,提高了电池效率;

(2) 紫光电池——这种电池最早是为通讯卫星开发的,因其浅结、密栅、减反射而获得高效率;

(3) 表面织构化电池——也称绒面电池,最早也是为通信卫星开发的,电池效率 18%. 这种技术后来被高效电池和工业化电池普遍采用;

(4) 异质结太阳电池——即不同半导体材料形成的太阳电池,如 SnO_2/Si , $\text{In}_2\text{O}_3/\text{Si}$, $\text{ITO}(\text{In}_2\text{O}_3 + \text{SnO}_2)/\text{Si}$ 电池等. 由于 SnO_2 、 In_2O_3 、ITO 等带隙宽、透光性好、制作工艺简单,曾引起许多研究者的兴趣,目前这类电池因其效率不高等问题研究得不多,但 SnO_2 、 In_2O_3 、ITO 是许多薄膜电池的重要构成部分,用作收集电流和窗口材料;

(5) MIS 电池——是肖特基(MS)电池的改型,即在金属(M)和半导体(S)之间加入 15—30Å 绝缘层(I),使 MS 电池由多数载流子支配暗电流变成少数载流子隧穿支配暗电流,其中 I 层起到减少表面复合的作用,这种电池的优点是工艺简单,但反型层的薄层电阻太高;

(6) MINP 电池——可以把这种电池看作是 MIS 电池和 p-n 结的结合,其中氧化层对表面和晶界复合起到抑制作用,这种电池后来过渡到高效电池;

(7) 聚光电池——聚光电池的特点一是电池面积小,二是因开路电压在高光强下升高而使电池效率有所提高,因此有降低成本的潜力,美国斯坦福大学的点接触聚光电池是这类电池的典型,聚光比为 140 时其转换效率达到 26.5%.

2.2 晶硅太阳电池向高效化方向发展

晶硅电池在过去 20 年里有了很大发展,许多新技术的采用和引入使太阳能电池效率有了很大提高. 在硅电池研究中,人们探索了各种各样的电池结构和技术来改进电池性能,如背表面场、浅结、绒面、钝化、Ti/Pd 金属化电极和减反射膜等. 高效电池是在这些实验和经验基础上发展起来的.

2.2.1 单晶硅高效电池

单晶硅高效电池的典型代表是斯坦福大学的背面点接触电池、新南威尔士大学的钝化发射区电池(PERL)以及德国 Fraunhofer 太阳能研究所的局域化背场电池等. 我国北京太阳能研究所在 90 年代也进行了高效电池研究,取得了可喜的结果.

硅电池进展的重要原因之一是表面钝化技术的提高. 此外,倒金字塔技术、双层减反射膜技术以及陷光理论的完善也是高效晶硅电池发展的主要原因. 新南威尔士大学的钝化发射区电池(PERL)如图 2 所示. 这种电池的前接触电极有相当大的厚/宽比和很小的接触面积,整个背面铝合金接触用点接触来代替;用氧化层钝化电池的正、背面;采用表面织构化、双层减反射和背反射技术使电池具有极好的陷光效应. 这些综合措施使电池效率达到 24.7%^[7],接近理论值,是迄今为止的最高记录. 单

晶硅效率从 6% 发展到 24.7%，经历了 40 多年，其进程如图 3 所示。

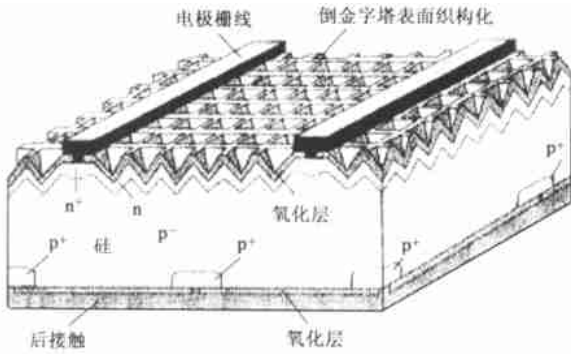


图 2 钝化发射区和背面局域化 (PERL) 电池

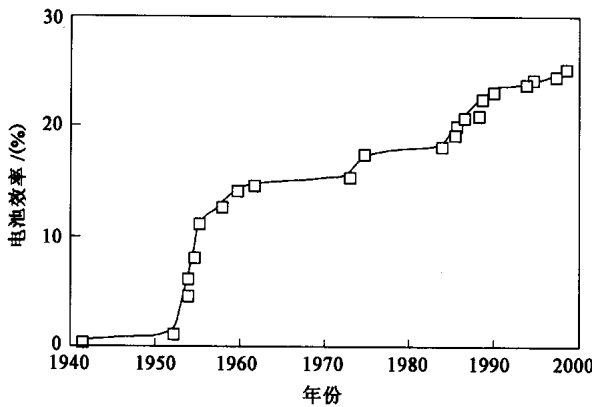


图 3 单晶硅电池效率的发展进程

新南威尔士大学开发的激光刻槽埋栅电池如图 4 所示。该电池用激光在前面刻出 20 μ m 宽、40 μ m 深的沟槽，用化学镀在槽内植入金属电极。减少了栅线的遮光面积。电池效率达到 19.6%。

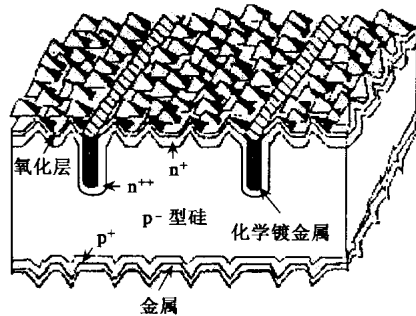


图 4 激光刻槽埋栅太阳能电池

日本 Sanyo 公司的 HIT 电池^[8]是近年来光伏电池开发上的一个创新，该电池的结构如图 5 所示，采用 PECVD 工艺在 n 型单晶硅片的上下表面沉积非晶硅层，构成异质结电池。该电池集中了非晶硅和单晶

硅电池的优点，在大面积上获得了接近 21% 的高效率。最值得注意的是，这种电池近年来商业化生产速度发展很快，仅仅两三年时间，产品已占整个光伏市场的 5%。

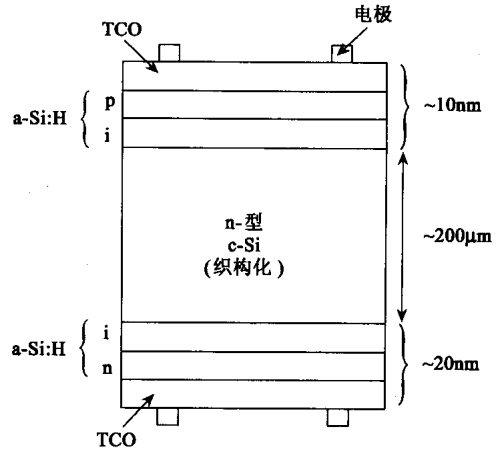


图 5 HIT 电池结构

我国北京市太阳能研究所从 90 年代起进行高效电池研究开发。采用倒金字塔表面织构化、发射区钝化、背场等技术，使电池效率达到了 19.8%^[9]；激光刻槽埋栅电池效率达到了 18.6%^[10]。

2.2.2 多晶硅高效电池

由于多晶硅材料制造成本低于单晶硅 CZ 材料，同时能直接制备出适于规模化生产的大尺寸方型硅锭，设备简单，制造过程简单、省电、节约硅材料，因此比单晶硅电池具有更大降低成本的潜力。多晶硅电池受晶界影响效率一般比单晶硅低，提高效率的研究工作受到普遍重视。近 10 年来提高多晶硅电池效率的研究工作取得了很大成绩，其中比较有代表性的工作是乔治亚工大、新南威尔士大学和日本京瓷 (Kysera) 等。乔治亚 (Georgia) 工大光伏中心采用磷杂质和双层减反射膜技术，使电池的效率达到 18.6%^[11]；新南威尔士大学光伏中心采用类似 PERL 电池技术，使电池的效率达到 19.8%^[12]，成为多晶硅电池的世界最高记录；日本 Kysera 公司^[13]采用了 PECVD-SiN 技术，起到钝化和减反射双重作用，加上表面织构化和背场技术，使 15 × 15cm² 大面积多晶硅电池效率达 17.1%，此种电池技术已经实现了工业化生产，商业化电池效率在 14% 以上。

我国在多晶硅电池方面作了大量研究工作，其中北京市太阳能研究所的多晶硅电池效率达到 14.5%。云南半导体器件厂与云南师范大学合作，多晶硅电池效率达到 14%。

2.3 晶硅太阳能电池向薄片化方向发展

2.3.1 硅片减薄

硅片是晶硅电池成本构成中的主要部分. 制造成本高和切片损耗大是硅片成本高的主要原因. 早期的硅片通常是用内圆锯切割, 厚度约 350—400 μm , 切片损耗约 50% 左右. 线锯发明后, 不但硅片厚度大大减薄, 而且切片损耗大大降低. 目前硅片的一般厚度为 280—320 μm , 未来可以薄到 150—180 μm , 从而大大降低成本.

2.3.2 带硅技术

为了减少切片损失, 在过去几十年里开发过多种生长带硅或片状硅技术. 其中几种比较成熟的带硅技术有: (1) 限边喂膜 (EFG) 带硅技术. 采用石墨模具从熔硅中拉出正八面硅筒, 总管径约 30cm, 管壁(硅片)厚度约 200—400 μm , 管长约 5m. 采用激光将硅管切成边长 10—15cm 方形硅片, 电池效率可达 13%—15%. 该技术于 90 年代初实现了商业化生产, 目前属于 RWE(ASE) 公司所有. (2) 枝蔓蹼状带硅技术. 在表面张力的作用下, 插在熔硅中的两条枝蔓晶的中间会同时长出一层如蹼状的薄片, 所以称为蹼状晶. 切去两边的枝晶, 用中间的片状晶制作太阳能电池. 蹼状晶为各种硅带中质量最好的, 但其生长速度相对来说较慢. (3) Astropower 的多晶带硅制造技术. 该技术基于液相外延工艺, 衬底为可以重复使用的廉价陶瓷. 实验室太阳能电池效率达到 15.6%^[14], 该技术实现了小规模商业化生产.

我国北京有色金属研究院于 20 世纪 80 年代中期开展了碳网控制带硅研究, 西北工业大学进行了滴硅旋转法形成硅片的探索性研究, 并达到了一定的水平.

3 薄膜太阳能电池

3.1 硅基薄膜太阳能电池

3.1.1 非晶硅(a-Si)太阳能电池

非晶硅(a-Si)是硅和氢(约 10%)的一种合金. 非晶硅的若干特性使它成为一种非常吸引人的薄膜太阳能电池材料: (1) 硅是一种资源丰富和环境安全的材料; (2) 非晶硅对光的吸收系数高, 太阳能电池活性层只需要 1 μm 厚, 大大降低材料的需求量; (3) 沉积温度低, 可以直接沉积在廉价低成本衬底上, 如玻璃、不锈钢和塑料膜上等, 便于工业化大面积制造, 有大幅度降低成本的潜力.

1976 年, 美国 RCA 实验室的 Carlson 和 Wronski 首次报道了非晶硅薄膜太阳能电池^[15], 引起普遍关

注, 全世界开始了非晶硅电池的研制热潮.

与晶硅电池不同, 典型非晶硅电池为 p-i-n 结构, 如图 6(a) 所示. 非晶硅电池的 p 层和 n 层非常薄, 只有几百 Å, 为了有效收集非平衡载流子, 必须建立完整内电场和减少 p、n 界面复合, 因此在 p 和 n 之间加一 i 层(本征层). 早期非晶硅电池的严重不稳定性限制了它作为室外大功率能源应用. 虽然由于材料科学和非晶硅组件制造技术的发展促进非晶硅电池效率和稳定性不断提高, 但到 90 年代初, 这种电池的商业化组件稳定效率现场测试仅为 4%, 对于大功率应用来说仍然太低.

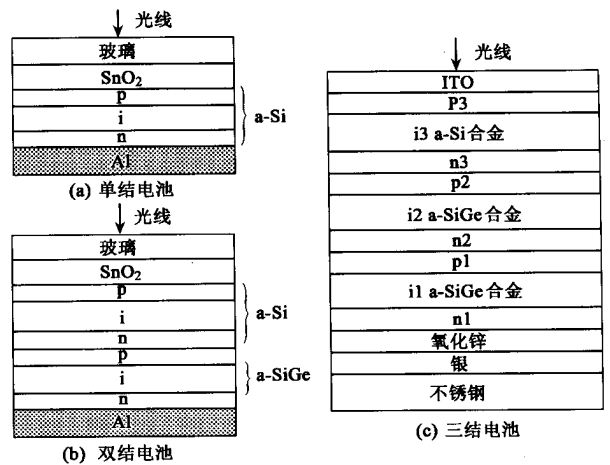


图 6 非晶硅电池结构

(a) 单结; (b) 双结; (c) 三结

非晶硅电池效率因光诱导衰减随时间降低. 研究工作主要集中在提高效率和稳定性方面, 这些工作包括: (1) 通过有不同带隙的多结迭层电池提高效率 and 稳定性. (2) 降低表面光反射; (3) 改进电池结构; (4) 使用更薄的 i 层, 以增强内电场, 降低光诱导衰减. 这些努力已经取得了很大进展, 使单结、双结、三结电池的实验室稳定效率分别达到 6%—8%、10% 和 13%^[16,17], 电池结构如图 6 所示. 自非晶硅电池出现以来, 商业化生产制造技术发展很快. 1980 年开始商业化生产, 1982 年达到 1MW, 1987 年达到 12MW, 占当年总市场份额的 41%, 大有超过晶硅的趋势. 但由于效率低和稳定性差, 主要市场是室内弱光或消费产品上应用, 如计算器等, 室外大功率电源应用受到一定限制. 提高效率和稳定性的工作在技术上取得了很大进展, 但增加了生产工艺的复杂性和难度, 从而增加了成本. 目前双结和三结电池的实际生产没有达到经济生产规模, 因此成本大于晶硅电池的成本. 商业化非晶硅电池的的稳定效率, 单结、

双结、三结分别为 4%—5%, 6%—7%, 7%—8%。2002 年非晶硅电池产量约 30MW, 约占世界太阳能电池总产量的 6%。

我国非晶硅电池研究在 20 世纪 80 年代中期形成了高潮, 分布在高等学校和研究机构中的 30—40 个研究组从事非晶硅电池的研究, 并且取得了很好的进展, 1cm^2 单结电池的实验室初始效率达到 11.4%^[18], $30 \times 30\text{cm}^2$ 单结电池实验室初始效率达到 6.2%^[19]。80 年代后期, 哈尔滨和深圳分别从美国 Chrona 公司引进了 1MW 生产能力的单结非晶硅生产线, 成为我国光伏产业的一部分, 商业化电池的初始效率在 4%—6% 之间。受引进技术影响, 我国非晶硅电池的研究工作自 90 年代后期有较大收缩。2000 年, 以双结非晶硅电池为重点的硅基薄膜太阳能电池研究被列入国家重点基础研究发展计划(973)项目, 我国非晶硅电池的研究又进入一个新阶段。

3.1.2 多晶硅薄膜电池

多晶硅薄膜电池既具有晶硅电池的高效、稳定、无毒和资源丰富的优势, 又具有薄膜电池节省材料、大幅度降低成本的优点, 因此多晶硅薄膜电池成为国际上近几年研究开发的热点。

(1) CVD 多晶硅薄膜及电池。各种化学气相沉积技术, 如 PECVD(等离子强化 CVD), RTCVD(快速热 CVD), Hot-wire CVD(热线 CVD) 等, 被用来生长多晶硅薄膜, 有些技术获得了重要的实验结果。例如日本 Kaneka 公司采用 PECVD 技术在 550 以下和玻璃衬底上制备出具有 pin 结构的多晶硅薄膜电池, 电池总厚度约 $2\mu\text{m}$, 效率达到 12%^[20]; 德国 Fraunhofer 太阳能研究所使用 SiO_2 和 SiN 包覆陶瓷或 SiC 包覆石墨为衬底, 用 RTCVD 沉积多晶硅薄膜, 硅膜经过区熔再结晶后制备太阳能电池, 两种衬底的电池效率分别达到 9.3% 和 11%^[21]。

北京市太阳能研究所自 1996 年开始开展多晶硅薄膜电池的研究工作。该所采用 RTCVD 技术在不同衬底上制备了多晶硅薄膜电池, 其中模拟陶瓷衬底(即在 Si 衬底上衬一层 Si_3N_4 或者其他陶瓷薄膜)的电池效率达到 10.21%^[22]。

(2) 迭层多晶硅薄膜电池。澳大利亚新南威尔士大学于 1994 年提出了一种迭层多晶硅薄膜电池的概念和技术^[23]。最近报道, Pacific Solar 公司采用这种技术已经开发出 $30 \times 40\text{cm}^2$ 的中试电池组件, 效率 6%。薄膜采用 PECVD 工艺沉积, 衬底为玻璃, 通过激光刻槽和化学镀实现接触、互联和集成。这种多层电池的结构和制作过程如图 7 所示。

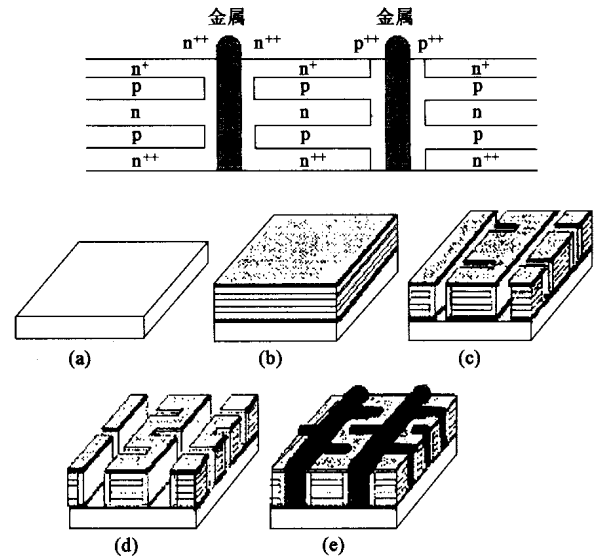


图 7 迭层多晶硅薄膜电池结构及制作过程

(a) 玻璃衬底; (b) 多层薄膜沉积; (c) 第一次电极刻槽; (d) 第二次电极刻槽; (e) 金属化

(3) 硅球太阳能电池。这种电池是由在铝箔上形成连续排列的硅球所组成的, 硅球的平均直径为 1.2mm, 每个小球均有 p-n 结, 小球在铝箔上形成并联结构。100 cm^2 面积的电池效率可达到 10%^[24]。硅球电池在技术上有一定的特色, 但规模化生产仍存在许多技术障碍。我国复旦大学曾对此种太阳能电池工艺进行过探索性实验, 初步掌握部分技术要点。

3.2 化合物半导体薄膜电池

化合物半导体薄膜电池是指薄膜中产生光生载流子的活性材料为化合物, 其中 GaAs, CdTe, CuInSe₂ (CIS) 等的禁带宽度在 1—1.6eV 之间, 与太阳光谱匹配较好, 同时这些半导体是直接带隙材料, 对阳光的吸收系数大, 只要几个微米厚就能吸收阳光的绝大部分, 因此是制作薄膜太阳能电池的优选活性材料。在化合物半导体薄膜太阳能电池中, GaAs 电池成本高, 主要用于空间; CdTe 和 CIS 电池被认为是未来实现低于 1 美元/峰瓦成本目标的典型薄膜电池, 因此成为最热的两个研究课题。

3.2.1 CdTe 电池

CdTe 为 II-VI 族化合物, 带隙 1.5eV, 与太阳光谱非常匹配, 具有很高的理论效率(28%), 性能很稳定, 一直被光伏界看重, 是技术上发展较快的一种薄膜电池。已经开发出制备 CdTe 多晶薄膜的多种工艺和技术, 如近空间升华(CSS)、电沉积、丝网印刷、溅射、真空蒸发等, 实验室电池效率不断攀升, 最近突破 16.4%^[25]。20 世纪 90 年代初, CdTe 电池已实现

了规模化生产,但市场发展缓慢,市场份额一直徘徊在 1%左右.商业化电池效率平均为 8%—10%.

我国 CdTe 薄膜电池的研究工作开始于 80 年代初.内蒙古大学采用蒸发技术、北京太阳能研究所采用电沉积技术(ED)研究和制备 CdTe 薄膜电池,后者的电池效率达到 5.8%^[26].80 年代中期至 90 年代中期,研究工作处于停顿状态.90 年代后期,四川大学采用近空间升华技术研究 CdTe 薄膜电池,并取得很好的成绩,最近电池效率已经突破 13.38%^[27].“十五”期间,CdTe 薄膜电池被列入国家高技术研究发展计划(863)重点研究项目,并计划建立 0.5 兆瓦/年规模的中试线.

3.2.2 铜铟硒(CIS)薄膜太阳电池

CIS 是 II-VI 族三元化合物半导体,带隙 1.04eV.70 年代中后期,波音公司用真空蒸发方法制备的 CIS 薄膜电池效率达到 9%^[28].自 80 年代开始,ARCO Solar 公司在 CIS 研发工作中逐渐处于领先地位,并与我国太阳能研究所合作,使 CIS 薄膜电池得到快速发展.90 年代后期,美国国家再生能源实验室一直保持着 CIS 电池效率的世界记录,并在 1999 年使电池效率达到 18.8%.

自 90 年代初起,以 Simens Solar 为代表的许多公司一直在努力实现 CIS 薄膜电池的商业化生产.该电池目前仍处在 1MW 以下的中试生产阶段.国际上几种薄膜电池的效率进展情况如图 8 所示.

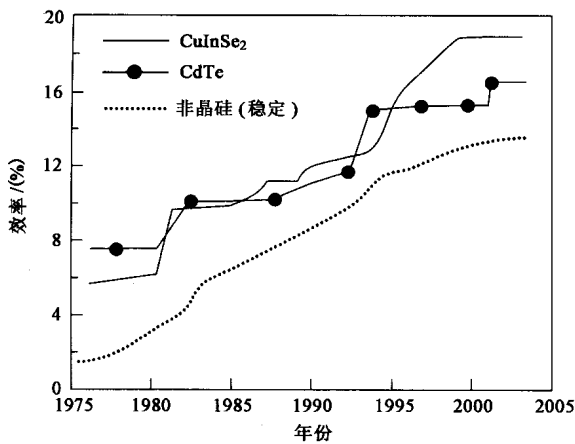


图 8 几种薄膜电池的效率进展

我国南开大学、内蒙古大学和云南师范大学等单位于 80 年代中期先后开展了 CIS 薄膜电池研究,南开大学采用蒸发硒化法制备的 CIS 薄膜电池效率目前达到 9.13%^[29].“十五”期间,CIS 薄膜电池被列入国家高技术研究发展计划重点项目,并要求建立 0.3 兆瓦/年的中试生产线.

3.3 染料敏化 TiO₂ 太阳电池

染料敏化 TiO₂ 太阳电池实际上是一种光电化学电池.早期的 TiO₂ 光电化学电池存在着严重的稳定性差和效率低等问题,技术上一直没有获得突破性进展.1991 年,瑞士的 Grätzel 将染料敏化引入到该种电池中,电池效率达到 7.1%^[30].此后该种电池成为太阳电池前沿研究中的热点之一.目前这种电池的实验室最高效率达到 12%.我国已将该种电池研究列入“973”重大课题研究,小面积电池效率已突破 11%.由于液体电解质的存在,这种电池的稳定性还存在问题.引入固态电解质解决稳定性问题是这种电池研究的重要方向.

4 太阳电池的商业化发展趋势

各种太阳电池技术的商业化进程是不同的.1998 年以前,单晶硅电池占世界光伏生产的主导地位,其次是多晶硅电池.从 1998 年起,多晶硅电池开始超过单晶硅跃居第一.非晶硅从 80 年代初开始商业化生产,由于效率低和光衰减问题,市场份额增加不快.CdTe 电池从 80 年代中期开始商业化生产,市场份额增加缓慢,除了技术因素外,人们对 Cd 毒性的疑虑也是原因;CIS 电池的产业化进程比较缓慢,原因是生产过程中化学剂量比难于控制,大面积均匀性和重复性较差.最引人注目是日本 Sanyo 公司开发的 HIT 电池(非晶硅/n-单晶硅),商业化生产仅两三年,2001 年就达到 18MW,发展迅速.表 1 为 2001 年各种不同电池技术的市场份额和开始商业化的大致时间,可以从中看出不同技术在近期的商业化发展趋势.

太阳能光伏工业主要是指太阳电池及组件的制

表 1 2001 年各种电池技术的市场份额和开始商业化时间

电池技术	市场份额 (%)	商业化时间
单晶硅	35.12	20 世纪 70 年代初 (地面应用)
多晶硅	35.12	20 世纪 70 年代末
非晶硅	8.62	20 世纪 80 年代初
HIT 电池 (非晶硅/n-单晶硅)	4.61	20 世纪 90 年代末
带硅	4.61	20 世纪 80 年代中
薄硅/陶瓷	4.61	20 世纪 90 年代中
CdTe	0.39	20 世纪 80 年代中
CIS	0.18	2000 年代初

造和生产. 在过去 20 年内, 世界光伏工业平均年增长率约 15%, 90 年代后期发展更加迅速, 最近 10 年的平均年增长率为 22% (从 1991 年的 55MW 增加到 2001 年的 400MW), 最近 5 年的年平均增长率为 35% (从 1996 年的 88.6MW 增加到 2001 年的 400MW), 2002 年达到 540MW. 20 年来, 光伏组件成本下降了两个数量级, 2001 年世界光伏组件成本已经下降到 2.4 美元/峰瓦. 预计 2010—2015 年光伏组件成本可以下降到 1 美元/峰瓦. 生产自动化程度不断提高, 产业向 50—100MW 规模发展, 大企业集团参与并占主导地位, 2001 年世界前 10 名厂商生产量占世界总产量的 86%. 由此可以看出光伏工业的快速发展趋势.

参 考 文 献

- [1] Green M A, Wenham S R, Zhao J *et al.* IEEE 1991. CH2953 - 8/91/0000 - 0046
- [2] 赵建华. 电源技术, 1994, 18(6): 18; 1995, 19(1): 33 [Zhao J H. Power Technology, 1994, 18(6): 18; 1995, 19(1): 33 (in Chinese)]
- [3] Gøtzberger A, Kröblich J, Voss B H. Crystalline Silicon Solar Cells, New York, 1998
- [4] Green M A. Solar Cells. Kensington: University of New South Wales Press, 1992
- [5] 赵富鑫, 魏彦章编. 太阳能电池及其应用. 长沙: 国防工业出版社, 1985 [Ed. Zhao F X, Wei Y E. Solar Cells and its Applications. Changsha: National Defence Industry Press, 1985 (in Chinese)]
- [6] Fahrenbruch A L, Brube R H. Fundamental of Solar Cells, Academic Press, 1983
- [7] Zhao J, Wang A, Green M A. 11th PVSEC, Sept. 1999, 557
- [8] Sakata Hitoshi *et al.* 20.7% Highest Efficiency Large Area (100.5cm²) HITTM Cell. 0 - 7803 - 5772 - 8/00/ \$10.00, 2000 IEEE, 7—12
- [9] He S Q, Wang Y T, Zhao Y W *et al.* In: 2nd World Conference and Exhibition on PV Solar Energy Conversion. Vienna Austria, July 1998, 1446—1448
- [10] Zhao Y W, Li Z M, Mo C D *et al.* In: ISES 1997 Solar World Congress, Aug. 1997, Vol. 3, 137—140
- [11] Rohrig A *et al.* 25th IEEE PVSC. Washington D C, May 1966, 741—744
- [12] Zhao J H, Wang A H, Green MA. In: 2nd World Conference and Exhibition on PV Solar Energy Conversion. Vienna Austria, July 1998, 1681—1684
- [13] Fukui K O *et al.* International PVSEC - 9, Miyazaki Japan, 1996, 93 - 96
- [14] Okuno T, Moriuchi S *et al.* 11th EPSEC, Montreux, Oct. 1992, 408 - 411
- [15] Carlson D F, Wronski C R. Applied Physics Letters, 1976, 28(11): 671
- [16] Harkonen J *et al.* 26th PVSC, Anaheim, CA, Sept. 1997, 163
- [17] Guha S, Yang J, Banerjee A *et al.* AIP Conf. Proc., 1988—1993, 462
- [18] 孙云, 王广才, 胡京康等. 太阳能学报, 1992, 13(2): 203 [Sun Y, Wang G C, Hu J K *et al.* Acta Energiae Solaris Sinica, 1992, 13(2): 203 (in Chinese)]
- [19] 吴选之, 肖德全, 高伟. 第三届中国光伏会议, 1991. 100 [Wun X Z, Xiao D Q, Gao W. In: 3rd China Photovoltaic Conference, 1991. 100 (in Chinese)]
- [20] Yamamoto K J, Yoshimi M *et al.* PVSEC - 11 Japan, 1999, 225 - 228
- [21] Hebling C, Gunz S W *et al.* 14th EPSEC, Barcelona, 1997, L81
- [22] Xu Y, Yu Y, Li X D. Acta Energiae Solaris Sinica, 2002, 23: 108
- [23] Sproul A B, Shi Z *et al.* WCEPC - 1 Hawaii, USA, 1994, 1410
- [24] Hammerbacher M D, Levine J D, Hotchkiss G B *et al.* PVSEC - 7, 1993, 625
- [25] Wu X, Dhare R G, Albin D S *et al.* NCPV Program Review Meeting Lakewood, Colorado, October 2001
- [26] Yin W P, Lu L B, Zhao Y W. Proceedings of the 1985 International Conference on Solar and Wind Energy Applications. 1985, 119—124;
- [27] 冯良桓. 2003 年 1 月 30 日的 e-mail
- [28] Chen W S, Mickelsen R A. Applied Physics Letters, 1980, 36: 371
- [29] 孙云, 王俊清等. 太阳能学报, 2001, 22(2): 192 [Sun Y, Wang J Q *et al.* Acta Energiae Solaris Sinica, 2001, 22(2): 192 (in Chinese)]
- [30] Gr-tzel O B M. Nature, 1991, 353: 737

封面说明 ·

金属板能阻挡电磁波吗？ ——分形透明金属板

众所周知, 电磁波是无法透过金属板而会发生全反射的. 即使刻有狭缝而缝长比电磁波波长短的情况下, 金属板亦可有效地阻挡电磁波的传播. 例如微波炉透明面板上的金属网格其作用就是用来防止微波的泄漏. 但是, 如果在一金属板上刻有一系列具有分形图的狭缝, 如图右下角所示, 即使缝长为波长的十至二十分之一, 其电磁波仍会透过金属板而成为“电磁波透明金属”. 详细报道见本期第 106 页文章.

(香港科技大学 温维佳)