

⑧ 26-35, 封底 / 电池, 太阳能电池, 发展

新能源. -1995.17(1). -26~35, 封底

# 高效太阳能电池研发进展综述

A

苏中启

TM914.4

摘要 对单晶硅、多晶硅和非晶硅等各种类型太阳能电池的研发现状做了全面、系统、深入的论述,并展望了太阳能电池的未来。

近年来,由于燃用化石燃料引起环境问题,使太阳能发电作为一种清洁的新能源,正在受到高度关注。为了广泛地应用太阳能光伏技术,需要开发高效率、低成本的太阳能电池。为实现这一目标,各领域的科学家和工程师们曾于1989年和1991年在日本札幌举行了第一次和第二次高效太阳能电池专题讨论会,交流高效太阳能电池的技术及其应用。日本在通产省(MITI)、新能源和工业技术发展组织(NEDO)以及光伏发电技术研究协会(PVTEC)共同实施“阳光计划”的情况下,太阳能光伏取得了重大进展。正是在这种情况下,1992年10月5~6日在日本富山县黑布市举行了第三次太阳能电池专题讨论会。本文是这次专题讨论会的技术总结。

## 1 太阳能光伏发电技术的开发与太阳能电池技术的新进展

### 1.1 光伏技术的开发现状

全球能源需求量在逐年增加。在太阳能、煤炭气化和液化、氢能等可再生能源技术中,光伏是未来最有希望的一种能源。在过去10年中,光伏技术已取得了显著进展。世界太阳能电池的产量逐年持续增加(图1)。日本太阳能电池系统的市场规模,取决于光伏系统的成本。图2示出根据“阳光计划”作出的预测。当系统成本达到500~600日元/W水平时,预计日本市场规模可达几十兆瓦,并将在1995年左右实现。在2000~2010年间,太阳能光伏市场规模预计会扩展到数千兆瓦级,将在日本国家能源需求中占有重要份额。

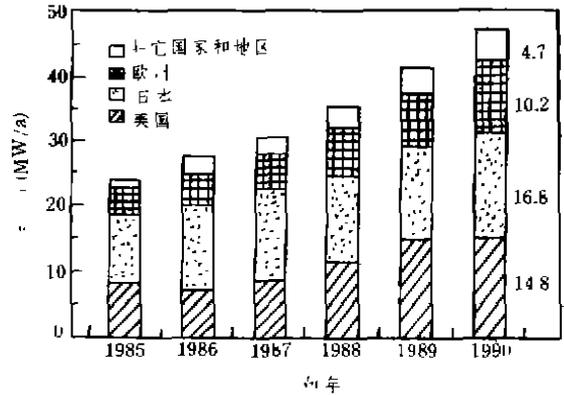


图1 世界PV年产量变化情况

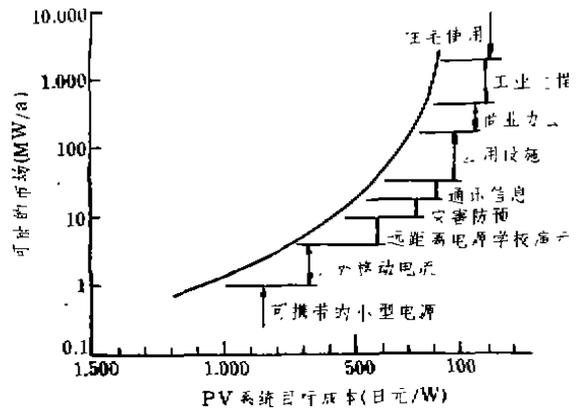


图2 日本PV系统目标成本及其相应的市场规模

根据美国能源部(DOE)的五年(1987~1991)研究计划,DOE已实现了短期和长期的成本目标,按目前美元价格计算,分别达到0.12美元/kWh和0.06美元/kWh。如图3所示,要使太阳能电池发电系统得到广泛的应用,

需要开发低成本、高效率太阳能电池和组件。

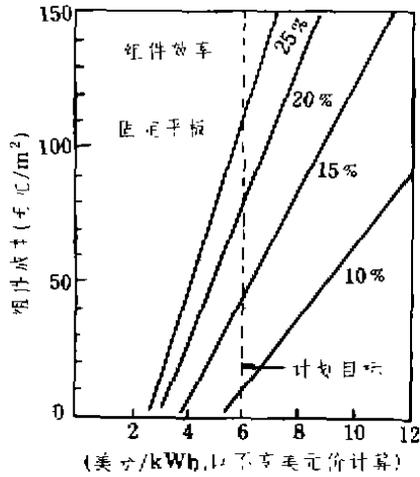


图3 平板(固定式)光伏系统组件成本及其效率与30年相应电力成本之关系

DOE 的长期目标要求,固定平板系统的面积相关最低系统平衡(BOS)成本预计为 50 美元/m<sup>2</sup> 左右。日本太阳能电池技术委员会会议预期到本世纪末的太阳能电池组件的长期目标成本为 100~200 日元/W<sub>p</sub>,与 DOE 的目标价格相近。根据某些世界组织对太阳能电池年产量的调查预测(图4),随着太阳

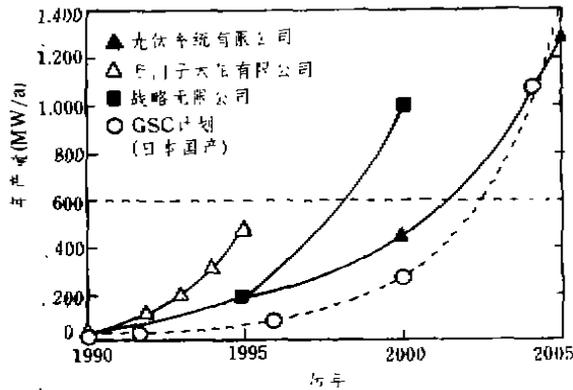


图4 世界太阳能电池年产量预测

能电池组件和系统的批量生产,成本下降,PV 系统将能够与传统能源相竞争。在下一个十年中,预计太阳能电池技术将分两步发展,

第一步是采用自动硅铸模工艺的低成本多晶硅技术,第二步是薄膜技术(如非晶硅(a-Si)和多晶薄膜技术)。太阳能光伏不仅是一种稳定的能源,就开发有益于人类的新的清洁能源的全球能源政策而言,太阳能光伏对缓解化石燃料污染将占有重要的地位,经济可行的太阳能光伏时代将会意想不到地迅速来到。

### 1.2 太阳能电池技术的新进展

太阳能电池技术面临的问题主要是提高转换效率和降低成本。图5 分别示出 Si、a-Si、

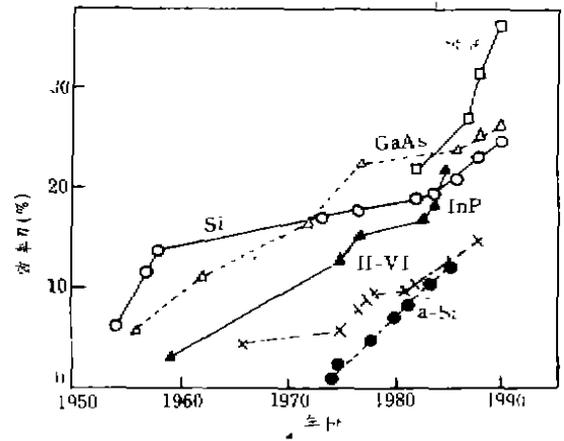


图5 太阳能电池效率改善状况

I - VI 族化合物、GaAs、InP 和级联太阳能电池效率逐年提高的情况。在八十年代中期, Si、GaAs 和级联电池的效率已获得了显著提高。就大规模太阳光伏系统而言, Si 是最有前途的材料,因为资源丰富,对环境无害。单晶硅和多晶硅太阳能电池应用于太阳能发电,不仅资源丰富,而且转换效率和可靠性均比较高。澳大利亚新南威尔士大学制作成功的高效单晶硅太阳能电池,其效率超过 20%,这一结果得益于表面钝化的基础研究,以及超大规模集成电路(VLSI)技术在太阳能电池工艺中的应用。为了进一步提高效率,许多研究小组正在对硅电池的薄型化、光约束电池结构等进行研究。目前,在美国国家可再生能源实验室(NREL)已获得 GaAs 电池的效率

可达 25.7%，这是已报道过的单结太阳能电池中最高。由日本应用太阳能中心、三菱电机公司等制作的 GaAs 电池，已用作航天电源。由日本电报电话公司 (NTT) 开发的 InP 太阳能电池，也已用作航天电源。为了解决衬底问题 (笨重与昂贵)，许多研究小组正在对 N-V 族化合物半导体在硅表面上的异质外延进行广泛的研究。目前，硅基 InGaAs (InGaAs-on-Si) 电池效率已达到 20%，然而要达到 GaAs-on-GaAs 电池相当的水平，还需要进一步减小位错密度。研究表明，级联和聚焦太阳能电池有望成为效率超过 35% 的经济电池。最近，由美国波音公司与桑迪亚国家实验室制作的机械叠层 GaAs/GaSb 和 GaAs/Si 电池，在 100 和 300 个太阳的聚光条件下，其效率分别达到了 35.6% 和 31%。就即将来临的下一代 PV 技术而言，不仅仅是要提高效率，还要降低成本，开发批量生产技术。对于多晶硅电池，提高效率的关键技术是钝化表面和晶粒边界。为此，正在验证 SiO<sub>2</sub>、SiN、氢的钝化，以及磷吸气等项技术。新南威尔士大学与日立公司在面积为 4cm<sup>2</sup> 和 100cm<sup>2</sup> 的多晶硅太阳能电池上分别获得了 17.8% 和 16.8% 的转换效率。为了在一个合理的生产时间内提供大量的 Si 衬底，正在研究一种改进的铸型工艺。非晶硅太阳能电池要获得高效率，关键在于高质量的 p-i-n 层及其界面。尽管三洋和其它公司的大面积非晶硅太阳能电池在线批量生产的电池效率仅为 8~9%，但在实验室阶段，三井东压化学公司的非晶硅异质结电池效率为 13.2%，ECD 的 a-Si/a-SiGe 叠层结电池效率为 13.4%，大坂大学的非晶硅/多晶硅四端叠层结电池效率为 21%。在过去 10 年中，太阳能电池已广泛地应用于民用电子产品、抽水泵、铁路和公路信号装置等。目前，一些新应用 (例如汽车太阳能顶棚、染色窗、太阳能空调和太阳能飞机等) 都得到了验证。降低非晶硅太阳能电池的光致衰减，对提高其稳定性是十分重要的。采用级联太阳能电池结构可以增强稳定性，富

士电机公司的电池衰减之后的稳定效率可达 10%。多晶薄膜太阳能电池使用 I-V 族和铜矿化合物材料对低成本电池的生产十分有益。美国南佛罗里达大学制作的小面积 CdS-CdTe 电池效率为 15.8%。日本松下公司采用丝网印刷法已制作出 900cm<sup>2</sup> 的 CdS-CdTe 薄膜电池，其效率为 8.7%，并应用于时钟、计算器和交通标志。最近，CuInSe<sub>2</sub> (CIS) 引起了人们的关注，因为其光吸收系数大，很适合用作级联电池中的小能隙材料。西门子太阳能公司的 CdS-CIS 单结电池已取得 14.6% 的效率，a-Si/CIS 级联电池的效率也达到 15.6%。然而仍存在一些技术问题，例如化学计量的控制、掺杂和晶粒边界钝化等。此外，正在验证各种廉价衬底，如陶瓷材料薄片的制作新工艺。

## 2 日本光伏研究与发展计划 (“阳光计划”)

“阳光计划”于 1974 年 7 月正式启动，目标是开发新的可替代能源，以取代石油，建立起多样化且稳定的能源供应结构。至 1992 年，19 年间对太阳光伏发电研究开发的预算总投资为 1160 亿日元。

### 2.1 研究与开发现状——提高效率

为了促进太阳能电池的广泛应用，必须进一步降低成本，建立批量生产技术。正如图 6 所示，结晶硅和非晶硅太阳能电池的研发已取得进展，提高了能量转换效率，开发出了批量生产技术和低成本硅原料的生产技术。到 1992 年，已制作出 100cm<sup>2</sup> 面积的薄衬底结晶硅太阳能电池，其效率已达到 17.1%。1992 年 100cm<sup>2</sup> 面积非晶硅太阳能电池的效率已实现了 11.1%，这是世界上已报道的同类型电池的最高效率值。超高效率太阳能电池的研发计划也已开始实施，其目标是到 21 世纪初实现商品化。此外，对太阳能 PV 发电系统，包括联网型、独立型和混合型等也进行了研制。

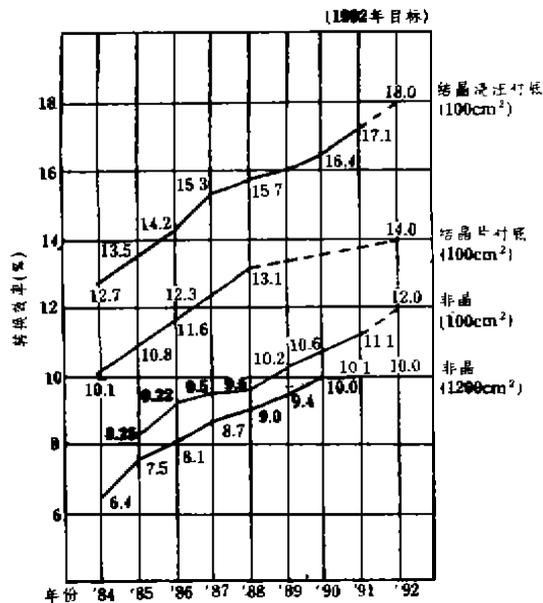


图6 太阳能电池转换效率的进展

## 2.2 成本下降趋势和目标

作为“阳光计划”实施的成果,过去10年来,太阳能电池及其组件的制造成本已降低了一个数量级。目前的成本约为635日元/W。(图7),相当于电力成本120日元/kWh。短期的成本目标为发电成本达到20~30日元/kWh,使之可与电网电力相竞争。为此,正在开发降低生产成本的新技术。对于太阳能电池,其目标成本为100~200日元/W。

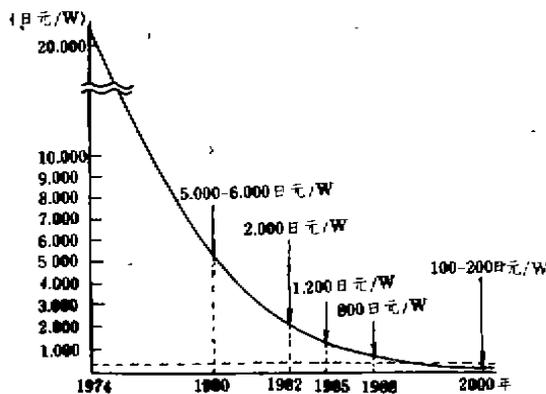


图7 太阳能电池的研究与制造成本预测

## 2.3 未来计划

1991年10月,日本修订了可替代能源供应的目标。预测到2000年,一次能源年供应总量将达到5940亿升石油当量,到2010年达到6570亿升石油当量,新能源提供的能量将在相应年份总供中分别占到3.0%和5.3%,即174亿升和345亿升石油当量。此外,九家日本电力公司计划到2000年,将投运50MW太阳能PV发电系统。为此,人们对尽快采用PV发电寄予了厚望,计划将下列技术开发作为下一阶段的研发目标。

### 2.3.1 短期目标(到2000年)

①发电成本目标:20~30日元/kWh。

②低成本多晶硅、非晶硅和CdTe太阳能电池;多晶硅电池降低衬底、电池和组件的成本;a-Si电池降低组件成本,实现批量生产的高可靠性;CdTe电池降低成本。

③PV系统通过简化外围设备和提高系统的总效率,使PV系统的装置成本降到260~320日元/W。以下;确定不同PV发电系统及其运行控制技术的优化设计方法。

### 2.3.2 长期目标(到2010年)

①PV系统的广泛应用与开发。

②薄膜多晶硅和CIS电池实现20%的高效率和批量生产;单晶硅和化合物电池实现超高效率(30~40%),以及先进的材料和电池开发。

③PV系统的开发;不同类型大规模PV系统的应用;进一步降低成本及PV系统的优化。

## 3 第三届高效太阳能电池专题讨论会要点

高效太阳能电池专题讨论会覆盖了太阳能电池及其系统应用的全部领域,包括基础物理与化学,以及在结晶硅、非晶硅、化合物半导体太阳能电池和材料、工艺技术等方面的创新和重大改进。表1列出大会报告中各种太阳能电池的重大进展。重点报告了高效

率(20.4%)单晶硅电池、效率为16.4%的大面积(225cm<sup>2</sup>)多晶硅电池、高效率(13.2%)非晶硅电池、效率11.1%的大面积非晶硅电池、高效率(21%)非晶硅/多晶硅叠层电池、效率为20%的GaAs-on-Si薄膜电池、效率为16.3%的AlGaAs/Si级联电池,以及效率为11.7%的CuInSe<sub>2</sub>薄膜太阳能电池。

### 3.1 晶硅太阳能电池

日立公司的代表在报告中指出,单晶硅和多晶硅太阳能电池目前主要应用于光伏发电。为了实现23%以上的高效率,需要进行一些技术改进,包括高寿命(>1ms)硅衬底和薄型衬底;抗反射和光约束(纹理衬底等);降低表面复合速度(表面钝化、漫射层结构、在接触层实现低表面复合);提高开路电压(表面复合与异面结构)。

表1 第1~3届高效太阳能电池专题讨论会介绍的典型电池

电池材料和结构		第一届会议	第二届会议	第三届会议
晶硅	单晶硅	19.8%.4cm <sup>2</sup> .①	20.5%.4cm <sup>2</sup> .①	20.4%.25cm <sup>2</sup> .②
		18.1%.100cm <sup>2</sup> .②	19.3%.78.5cm <sup>2</sup> .⑬	18.5%.100cm <sup>2</sup> .③
	多晶硅	15.7%.100cm <sup>2</sup> .③、①	16.4%.100cm <sup>2</sup> .②	16.4%.225cm <sup>2</sup> .④
非晶硅	非晶硅单结	12.0%.1cm <sup>2</sup> .①		13.2%.1cm <sup>2</sup> .⑫
	双结	9.6%.100cm <sup>2</sup> .①	10.6%.100cm <sup>2</sup> .④	11.1%.100cm <sup>2</sup> .①
		11.3%.1cm <sup>2</sup> .⑤		12.0%.1cm <sup>2</sup> .⑤
		9.3%.100cm <sup>2</sup> .⑥	10.1%.100cm <sup>2</sup> .⑥	10.5%.1200cm <sup>2</sup> .⑤
非晶硅/多晶硅	13.5%.0.25cm <sup>2</sup> .⑦	16.8%.1cm <sup>2</sup> .④	21.0%.⑬	
III-V族化合物	3结	10.7%.1cm <sup>2</sup> .②	11.0%.②	11.8%.②
	InP	16.7%.⑧		航天飞行器.⑨
	GaAs-on-Si	18.3%.1cm <sup>2</sup> .⑨		20.0%.2cm <sup>2</sup> .⑨
	AlGaAs/GaAs TJMJ	20.0%.0.25cm <sup>2</sup> .⑩		
	(Al)GaAs/Si TJMJ		12.9%.0.25cm <sup>2</sup> .⑪	16.3%.⑪
I-IV族化合物	CdS-CdTe			10.3%.1200cm <sup>2</sup> .⑦
	CdZnS-CuInSe <sub>2</sub>	7.5%.⑩	10.5%.0.08cm <sup>2</sup> .⑤	11.7%.0.08cm <sup>2</sup> .⑤

①日立公司;②夏普;③京都陶瓷;④三洋;⑤富士电机;⑥Kaneka;⑦三菱电机;⑧信州大学;⑨日本电报电话公司;⑩东京仪器有限公司;⑪名古屋仪器有限公司;⑫三井东压化学公司;⑬大阪大学;⑭Hoxan.

#### 3.1.1 转换效率达到16.4%的大面积多晶硅太阳能电池

日本京都陶瓷公司采用15cm见方的多晶硅衬底(图8),在大面积太阳能电池上成功地获得了世界上最高的转换效率16.4%。此外,采用最小反射表面结构和减小电极尺寸等技术,225cm<sup>2</sup>的多晶硅电池也获得了16.4%的高效率。为减小电池上的光反射,对电池表面进行了蚀刻,使其粗糙化。表面的不规则图案有效地减小了短波和长波光线的反射率,提高了电池效率0.5%(绝对值)。通过试验,将电极宽度从80μm减小到70μm,并形成较厚的电极,这一方法可使电流增大,而电阻不增大,转换效率提高了0.3%(绝对

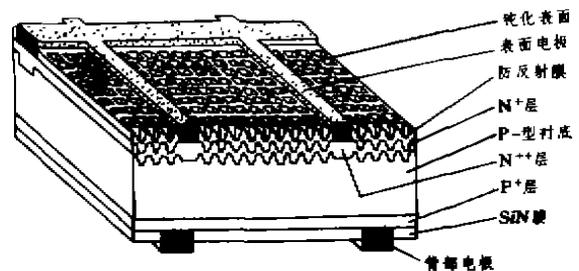


图8 多晶硅太阳能电池结构及特性值

电池尺寸:15cm×15cm×270微米;转换效率:16.4%;最大输出:3.7W;最佳电压:0.502V;最佳电流:7.37A;释放电压:0.611V;短路电流:7.96A;测试条件:AM1.5.100mW/cm<sup>2</sup>.25℃。

值)。京都陶瓷公司综合应用上述技术,在面积  $225\text{cm}^2$  的多晶硅电池上获得了 16.4% 的效率。

### 3.1.2 高效率(20.4%)单晶硅太阳能电池

日本夏普公司在  $25\text{cm}^2$  面积的单晶硅电池(图 9)上获得了 20.4% 的高效率。该电池采用了  $5\text{cm}$  见方的单晶硅衬底,具有正电极图案和背表面反射。为了提高效率,对正电极导向槽间距做了优化,因为窄间距会使短路电流下降,而宽间距又会导致电阻损失增加。此外,增大了栅极厚度,以减小电极电阻。采用上述方法,效率提高了 0.9%(绝对值)。采用背表面反射实现光约束对提高电池效率也是十分有益的。已把 Al、Ti 和 Ag 作为背电极材料分别进行了验证,结果表明可提高电池效率 0.2%(绝对值)。上述技术综合应用的结果, $5\text{cm}^2$  见方硅衬底单晶硅电池效率实现了 20.4%(图 10)。

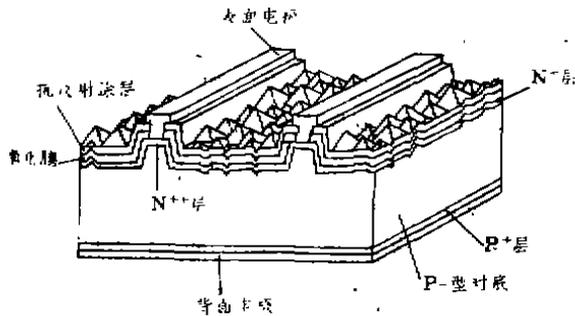


图 9 单晶硅太阳能电池结构

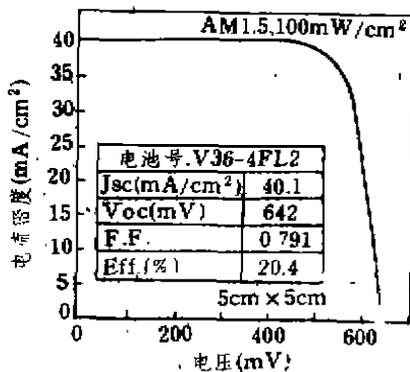


图 10 单晶硅太阳能电池 I-V 曲线

### 3.1.3 表面、晶体缺陷和氧对结晶硅太阳能电池性能的影响

就结晶硅太阳能电池而言,已对电池表面、晶体缺陷杂质对电池性能产生的影响进行了基础研究。北海道大学报告了一种采用光致发光确定硅电池表面复合速度的方法。根据光致发光效率和由一维半导体分析方法所得的表面复合速度的计算机分析结果来调节实验激光束激发强度,从而确定出  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  界面的复合速度为  $3000\text{cm/s}$ , Si 表面的复合速度为  $50000\text{cm/s}$ 。预测多晶硅薄膜电池的生产成本可下降。三菱电机公司已在  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  衬底上制作出  $10\text{cm}$  见方、厚度为  $50\mu\text{m}$  的多晶硅薄膜电池。随着结晶硅电池腐蚀坑密度的增加,电池效率会急剧下降,因此减小多晶硅材料的晶粒边界和晶体缺陷,对于获得高效率电池是十分重要的。Hoxan 公司已采用浇铸带工艺制作出多晶硅太阳能电池。当多晶硅材料氧浓度增加时,电池效率急剧下降。通过减小多晶硅中氧的浓度,并采用双层抗反射涂层,已制作出效率达 13.2% 的  $4.7\text{cm}$  见方的多晶硅太阳能电池。

### 3.2 非晶硅太阳能电池

富士电机的代表认为,非晶硅电池在原材料生产量、温度和光强特性等方面同结晶硅电池相比具有许多优点。然而,考虑到非晶硅电池今后的实际应用,应对以下方面引起注意。第一,不断地提高电池效率仍然是十分重要的,因此需要改善 TCO(透明导电氧化膜)/p 和 p/i 界面处结的性能,以便在使用窄能隙合金材料时,增强对长波的敏感性。第二,需要增强非晶硅太阳能电池的稳定性,级联结构的非晶硅太阳能电池具有较好的抗光致衰降能力。目前已开发出双层级联结构的低衰减 a-Si 组件,其衰降率小于初始输出功率的 15%。第三,开发低成本、大面积非晶硅组件的生产技术。已研制出  $30 \times 40\text{cm}$  大面积非晶硅级联结构的子组件,平均效率为 9.21%,顶电池效率为 10.5%。

### 3.2.1 效率为 11.1% 的大面积非晶硅太阳能电池子组件

三洋公司已制得面积  $100\text{cm}^2$  的集成型单结非晶硅太阳能电池子组件,其转换效率达 11.1%,为世界最高,也是几种先进技术综合应用的结果。先进技术包括超薄 i/n 界面层和通过烧蚀获得的低损激光图案制作工艺。非晶硅电流性能会受到器件设计、组合材料质量(例如 p 层、i 层、n 层、透明电极、背电极及其界面等)的影响(图 11)。已开发出一

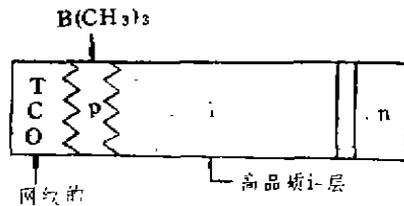


图 11 高效率 a-Si 太阳能电池的研究

种在 i 层与 n 层之间超薄的界面,这一新界面层可减小 n 层缺陷密度。采用新颖的定向烧蚀激光刻图法制得了低故障集成型非晶硅太阳能电池(图 12),有效面积和短路电流均

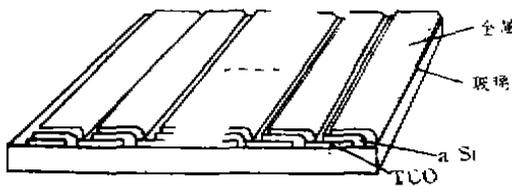


图 12 非晶硅太阳能电池子组件

得以增加。此外,在集成型单结非晶硅电池子组件生产过程中采用了超级分离式超高压反应腔,在 p 型 a-Si : H 中掺杂三甲基硼  $[\text{BC}(\text{CH}_3)_3]$ ,同时采用了高网纹的 TCO,制得的电池效率达 11.1%(图 13),这是  $100\text{cm}^2$  非晶硅电池(包括多结电池)的最高效率值。最值得注意的是填充因子 FF 得到了改善。

### 3.2.2 高效率(13.19%)非晶硅太阳能电池

三井东压化学公司制作的高效率单结非晶硅电池效率已达到 13.19%。为了有效地

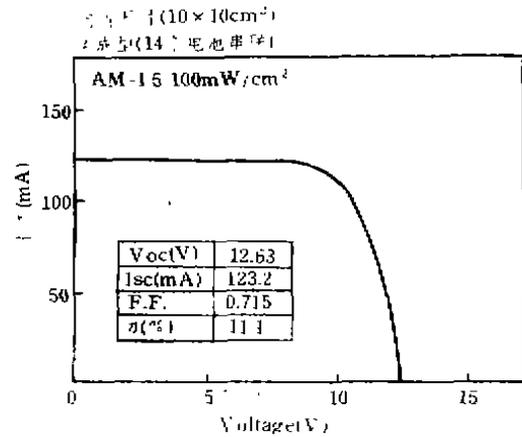


图 13 a-Si 太阳能电池子组件 I-V 曲线

利用电池上的输入光,该公司改进了玻璃表面的抗反射涂层,增加背电极反射,减少在 p 层、i 层与 n 层的吸收,并通过降低 i 层结构温度,进而减少较底层部分的故障。在玻璃表面上涂覆多层抗反射涂层之后,电池对  $400 \sim 700\text{nm}$  波长范围的反射损失减至 1% 以下。通过使用 ITO(透明导电薄膜)/Ag 背电极(改进了 n 层界面特性)和 Ag 电极,使  $560\text{nm}$  以上波长范围的聚光效率得到了提高。在低温条件下制备 i 层,使较低部分层(TCO、p 层和 n 层)及其界面的故障减少。应用上述技术已制得具有 ARC/玻璃/TCO/碳梯度 p 层/i 层/n 层/ITO/Ag 结构的高效率非晶硅单结太阳能电池,转换效率达到 13.19%(图 14)。

### 3.2.3 改善高效率非晶硅太阳能电池的可靠性

富士电机公司制作成功一种稳定的大面积( $30 \times 40\text{cm}$ )非晶硅子组件,其初始效率为 10.5%。为了研制效率稳定的非晶硅电池及组件,对非晶硅/非晶硅两层级联结构进行了验证,同时将一种宽禁带材料 a-SiO : H 应用于 p 层,以改善 p 层透明度。结果,制得转换效率分别为 12% 和 10.5% 的双层非晶硅级联电池和子组件,电池面积分别为  $1\text{cm}^2$  和  $30 \times 40\text{cm}$ 。美国国家可再生能源实验室已制

作出初始效率为 10.25% 的大面积非晶硅子组件,在连续光照 1000h 后,电池获得了 8.9% 的稳定效率(图 15)。

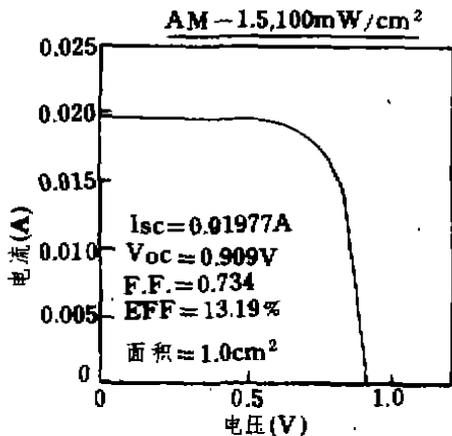


图 14 高效率 a-Si 电池 I-V 曲线

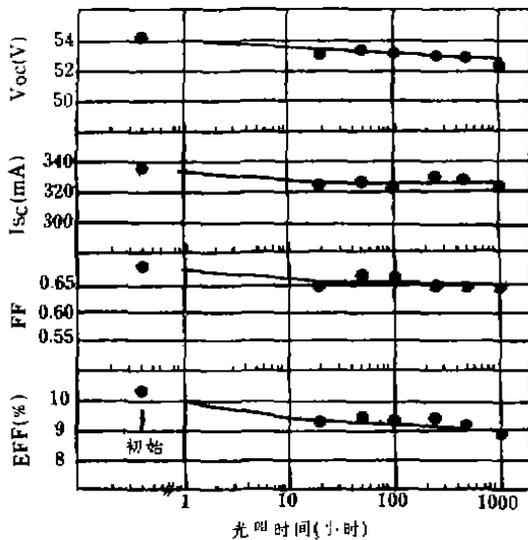


图 15 非晶硅级联电池子组件连续光照试验结果

### 3.2.4 高效率(21%)非晶硅/多晶硅四端叠层电池

大坂大学成功地制得效率高达 21% 的非晶硅/多晶硅四端叠层电池(图 16),并就此进行了一系列试验。对于 a-Si 基的顶电池,采用涂覆 ITO/SnO<sub>2</sub>/ZnO 的玻璃衬底,以及具有宽能隙和高导电性的 p 型微晶硅

( $\mu\text{c-SiC}$ )作为 p 层,使电池的  $V_{oc}$  和 FF 得到改善,效率达到 7.2%。对多晶硅基的底电池,采用 p 型  $\mu\text{c-SiC}$  作为宽能隙窗口层,a-SiC 作为界面缓冲层,用 n 型  $\mu\text{c-SiC}$  作为背欧姆接触层,使具有 ITO/p- $\mu\text{c-SiC}$ /n 非晶硅/n- $\mu\text{c-Si}$  异质结结构的底电池获得了 17.2% 的转换效率。大坂大学采用光学透明的 a-Si p-i-n 电池作为顶电池,并且在顶电池与多晶硅底电池之间嵌入了一只光学耦合器,制得效率达 21% 的高效率电池(图 17),这一效率值是非晶硅基级联太阳能电池效率的世界记录。

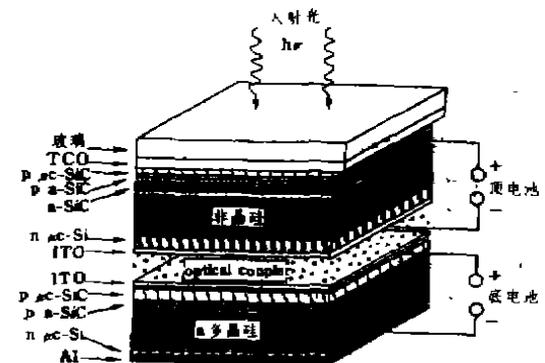


图 16 非晶硅/多晶硅叠层电池结构

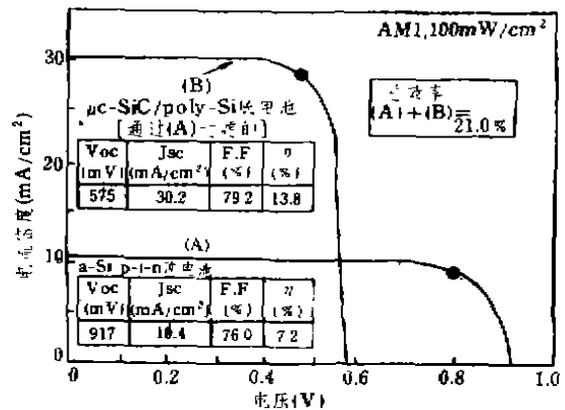


图 17 非晶硅/多晶硅叠层电池 I-V 曲线

### 3.2.5 有关非晶硅太阳能电池的其他研究课题

非晶硅太阳能电池的性能不仅受非晶硅膜自身的影响,而且受到玻璃衬底上的透明

导电氧化(TCO)膜的影响。实验表明,ZnO膜经过强等离子体曝光后,其透过性或电阻均无变化。日本旭玻璃公司报告了一种低电阻射频溅射 ZnO 膜涂层的 SnO<sub>2</sub> 衬底。通过氢等离子体处理,已获得具有低电阻和高迁移率(70cm<sup>2</sup>/V sec)的 TCO 膜衬底。东京仪器有限公司报告了一种大面积(10cm<sup>2</sup>)的低片电阻与高透射率的 ZnO 薄膜,它是用光学金属有机化学蒸发沉积(Photo-MOCVD)工艺制备的。采用这一技术生长 ZnO 膜,作为 TCO 膜,制出了效率为 11%的非晶硅太阳能电池。半导体能源实验室和东京电气化学工业公司(TDK)报告了退火对在涂有 TCO 膜的网纹玻璃衬底上制作非晶硅电池所产生的影响。在 150℃的空气中退火,减小了上部 a-Si 层的缺陷密度,进而提高了 a-Si 电池的转换效率。级联结构是实现 a-Si 基电池高效、稳定的有效途径之一。青田工业公司报告了非晶硅/非晶硅多层电池性能采用 ZnO/Ag 背电极结构后的改进。通过优化 ZnO 膜和 i 层厚度,获得了效率为 9.95%的稳定的非晶硅/非晶硅级联电池。夏普公司报告了 a-SiC/a-SiGe/a-SiGe 三层级联电池在效率和稳定性方面所做的改进。通过每种元素的带隙剖面设计,获得效率为 11.8%的三层级联电池。三洋公司报告了一种非晶硅 p-i/n 型多晶硅不均匀结构太阳能电池,1cm<sup>2</sup> 和 10cm<sup>2</sup> 的电池转换效率分别达到了 15.5%和 13.6%。1cm<sup>2</sup> 的 a-Si/单晶硅有均匀结构电池的效率达到了 18.1%。

### 3.3 先进的太阳能电池与材料

#### 3.3.1 高效率(20%)GaAs-on-Si 太阳能电池

日本电报电话公司已获得效率为 20%的硅基 GaAs 太阳能电池。单晶 W-V 族化合物薄膜电池(例如 GaAs-on-Si、InP-on-Si 和 GaAs-on-Ge)都是有希望实现高效率、低成本的电池。然而,还存在一些问题,最主要的是要减小由于晶格失配和热膨胀系数差异(作用犹如复合中心)而引起的位错密度。通过采

用热循环退火(TCA)技术和采用 MOCVD 方法嵌入 In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As/GaAs 超点阵应变层,使位错密度减小了 3.5×10<sup>6</sup>cm<sup>-2</sup>。在硅衬底上制作的 GaAs 薄膜电池已达到 20%的高效率,这一效率在已报道的 GaAs-on-Si 电池中是最高的。

#### 3.3.2 效率为 16.3%的 AlGaAs/Si 级联太阳能电池

名古屋仪器公司已制得在 AM0 条件下有效面积效率达 16.3%的 AlGaAs/Si 级联电池。有迹象表明,多结太阳能电池的效率有可能超过 35%。采用 MOCVD 技术进行热循环退火,使 Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As 顶电池的位错密度已减小到 10<sup>7</sup>cm<sup>-2</sup>。借助在非晶硅衬底内的热扩散技术,制作出 p-n 结硅底电池。Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As/Si 单片双端级联电池(图 18)在 AM0 条件下有效面积效率为 16.3%(表 2)。

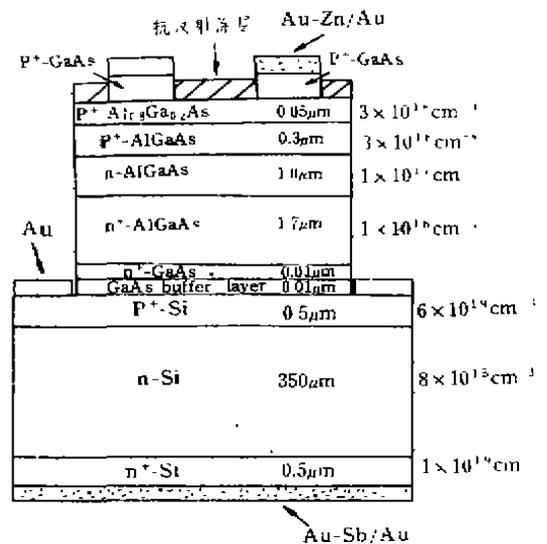


图 18 级联电池结构

表 2 级联电池特性

	$J_m$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_m$ (V)	FF(%)	$\eta$ (%)
顶电池	17.0	0.851	69.6	8.85
底电池	17.3	0.561	72.3	6.19
级联电池	17.1	1.41	77.4	16.3

### 3.3.3 效率为 11.7% 的 $\text{CuInSe}_2$ 薄膜太阳能电池

富士电机已制造出效率达 11.7% 的  $\text{CuInSe}_2$  (CIS) 薄膜太阳能电池。CIS 作为一种有前途的高效电池材料已引起了关注。为制备 CIS 薄膜,并获得相应的薄膜性能,有两种方法可供选择,一是三源联合蒸发,二是硒化  $\text{Cu/In/Se}$  叠层。综合应用这两种技术,已制得玻璃/Mo/CIS/CdZnS/ZnO 结构的 CdZnS-CIS 薄膜电池,其效率为 11.7%。

### 3.3.4 与先进太阳能电池及材料相关的研究课题

InP 太阳能电池具有极强的抗辐射损害力,因而有很大的航天应用潜力。日本电报电话公司、日本矿业公司、日本航天与航空科学研究所 (ISAS) 以及日本电气公司报告了在航天飞行中首次使用 InP 电池的实验结果。为了在航天应用 InP 电池,已对质子辐射对电池的影响做了研究。就级联电池的实用化,已对以硅和 GaAs 为衬底的 GaAs 薄膜的制备方法 & GaAs 薄膜特性进行了验证。日立公司报告了 Si 衬底上 GaAs 薄膜中位错密度减小的计算机分析结果。在 GaAs 表面上选择面生长或硅掺杂技术可减小 GaAs 的位错密度。日立电缆公司报告了在 GaAs 衬底上 GaAs 异质面电池的稀释剂结构。现制成一种 n 层、厚度为  $4\mu\text{m}$ 、有效面积效率为 16.9% 的太阳能电池。为了制成超高效率太阳能电池,已试制了 InN/Si 和 InGaAs/Si 单片级联太阳能电池。福井大学就 InP/Si 级联电池的应用报告了采用 MOCVD 方法在硅衬底上实现 InN 的异质外延生长。为了解决硅衬底上掺氮所引起的问题,需要一个 GaN 或 AlN 缓冲层。京都大学报告了在 1 个太阳和聚焦条件下,对 InGaP/Si 级联电池的计算机模拟结果,在 100 个太阳的聚焦条件下,将能获得 35% 以上的高效率。对应用于薄膜电池的 CIS 膜的制作及其特性进行了试验。青山大学报告了采用蒸发硒化  $\text{Cu/In}$  叠层制备的 CIS 薄膜,与用三源联合蒸发及三源溅射制

备的薄膜相当。ZnO:Al/CdS/Mo/玻璃结构的 CIS 电池已获得 6% 的效率。东京仪器公司介绍了硒化方法制得的 CIS 薄膜的光致发光与喇曼扩散特征。此外,采用溶液生长 CdS 层和 MOCVD 生长网纹 ZnO 层,已制得 ZnO/CdS/CIS/Mo/玻璃结构的 CIS 薄膜电池,其效率为 6%。松下电气公司报告了采用三源联合蒸发技术制作的前壁 (front-wall) 型和后壁 (back-wall) 型 CIS 薄膜太阳能电池。ITO/ZnO/CdS/富铜 CIS/富铜 CIS/Mo/玻璃结构的后壁型 CIS 薄膜电池的效率为 7.4%。CdTe 电池已获得了实际应用。松下电池公司介绍了在提高大面积 CdS/CdTe 电池效率方面所取得的进展。对大面积 ( $30 \times 40\text{cm}$ ) CdS/CdTe 电池,通过对每层烧结条件、丝网印刷术、低电阻 CdS 膜制备以及 YAG 激光刻图进行优化处理后,获得了 10.3% 的有效面积效率。

### 3.4 地面系统技术

北陆电力公司报告了 PV 发电的进展概况。该公司一直在对应用于山区的  $5\text{kW}$  PV 系统和装有  $1.6\text{kW}$  PV 系统的试验房进行技术开发。现已弄清楚雪对发电系统的干扰,并应用光电状态测定装置实现对负载的控制,同时完成了  $5\text{kW}$  连网 PV 系统和移动式 PV 系统 ( $2\text{kW}$  和  $3\text{kW}$ ) 的研发。计划到 1995 年将有  $100\text{kW}$  左右太阳能 PV 系统投运。日本机械与金属检验学会的代表报告了太阳能 PV 系统的评价技术。系统评价技术的开发包括三个方面:①设计和建造各种典型 PV 发电系统的模拟装置;②收集不同条件下的运行数据,建立 PV 发电系统的数据库;③确立 PV 发电系统的最优设计方法和运行技术。预期,通过以上技术的开发,PV 发电系统的总效率和经济可行性将会得到改善。聚焦 PV 系统是一种有希望的低成本、高效率系统。东京大学与美国电话电报公司 (A&T) 报告了一种无跟踪系统的低辐射聚焦器系统的设计及其性能,今后将开发约 5 个太阳的低辐射聚焦器系统。

(下转封底)