

非晶硅太阳能电池研究动向

徐 温 元

(南开大学电子科学系)

氢化非晶硅材料对太阳光比通常的晶体硅材料具有较好的吸收特性,因此用非晶硅材料做太阳能电池所需材料较少。此外非晶硅可制成大面积薄膜太阳能电池组件,有大大降低电池造价的前景。因此国际上对非晶硅材料及电池等器件投入了较大的研究力量。近几年已在非晶硅太阳能电池转换效率上取得迅速进展。低功耗小型电池在日本已大量投放市场。不过,要使非晶硅电池作为动力能源供应市场,仍有不少尚待解决的课题,因此发展非晶硅电池这一新领域尚属一项长期的任务。下面就美国和日本在这方面的情况以及一些研究课题作一介绍。

一、美国和日本在发展非晶硅 电池方面的路线

美国和日本在发展非晶硅电池研究方面均有一个长期的规划,但在发展步骤上仍有些不同。日本太阳能利用计划(阳光计划)中除一些基础性研究课题外,对提高非晶硅电池的转换效率,大面积薄膜电池的工艺,电池的稳定性以及提高薄膜的淀积速率等技术课题均与有关单位签定具体研究协议。而日本几家主要公司例如三洋电机、富士电机、夏普等公司在研究和开发大面积高效能非晶硅电池的同时,在电池效率尚不太高的条件下,大力发展低功耗集成电路的生产技术。已生产出各种低功耗产品百余种,配合日本小型电子器件(计算器、电子钟表等)投入市场。也就是说,在现阶段已获得经济效益。1983年全日本的生产能力为3.5MW,1984年接近6MW,而1985年预计可达7.5MW。

其生产自动化也由于产量的逐年提高而大大完善,相应从事生产设备设计和制造的工厂也较多。例如,日电、岛津、日本真空、牛尾等公司都有定型的产品。预计不久将有大功率的非晶硅电池产品投放市场。美国发展太阳能电池的工作是在美国能源部支持下由美国太阳能研究所安排的。该所与美国有关公司和学校签订合同,推动该研究项目。在1984至1988年的五年规划中,已明确重点支持非晶硅太阳能电池的研制开发。从规划的着眼点来看,美国对太阳能电池供电或光伏电池发电站供电,要求从经济和性能上可与常规的供电方法竞争。规划提出在五年内或到1990年,非晶硅电池组件的转换效率要求能达到13—17%,成本能降到40—75美元/m²,器件系统寿命希望能达到30年。如果这些指标能达到的话,光伏电池产生的电力每千瓦小时的价格可降至6.5美分。为此目的,他们对非晶硅材料、电池结构、单片电池的指标、工艺过程的评价,组件装备技术等五个方面的研究和开发都提出了要求。美国政府对前三个研究领域给予集中的支持。提出单结电池和多结电池两个主攻方向和五个次级研究领域,即光致缺陷(Steaale-wronski)效应的研究、提高膜淀积速率的研究、其他淀积方法的研究、器件可靠性的研究以及有关理论和等离子体动力学的研究,并拟出逐年要达到的技术指标。例如,1985年要求面积为100cm²的单结电池的转换效率达到7%,面积为1cm²的多结电池转换效率达到12%,1986年面积为1cm²的单结电池转换效率达到12%,面积为1000cm²的单结电池转换效率达到8%,进一步对稳定性问题获得了解并得到解决。1987年使淀

积速率达到 $20 \text{ \AA}/s$, 面积为 1cm^2 的单结电池转换效率达到 10%, 1988 年使面积为 100cm^2 单结电池的转换效率达到 12%, 而面积为 1cm^2 的多结电池转换效率达到 18%。从上述两国对发展非晶硅电池的路线来看, 日本采取的路线比较实惠, 即在目前的技术水平下(转换效率不高的条件下)就有大量产品投入市场, 获得

经济效益。但美国在基础研究方面比较扎实深入。

二、目前非晶硅电池所达到的水平

目前非晶硅电池所达到的水平如表 1 所示。

表 1

电 池 类 型	电 池 面 积	转 换 效 率 (%)	公 司
单结电池(实验室)	$107 \times 107\text{mm}^2$	6	美国 Arco 公司
单结电池(产品)	$30 \times 30\text{cm}^2$	4—5	美国 Arco 公司
单结电池	1cm^2	8	美国 Arco 公司
单结电池	0.203cm^2	10.5	美国 Solarex 公司
单结电池(产品)	$30 \times 30\text{cm}^2$	4	美国 Chronar 公司
单结电池(不锈钢衬底)	$30 \times 30\text{cm}^2$	9.4	美国 ECD 公司
双层电池	$30 \times 30\text{cm}^2$	9.42—9.94	美国 ECD 公司
三层电池	1cm^2	11.2	美国 ECD 公司
绒面 TCO (光 CVD)	1cm^2	11.5	日本三洋公司
绒面 TCO (实验室)	100cm^2	9	日本三洋公司
单结电池	$40 \times 30\text{cm}^2$	8.13	日本富士电机公司
	1cm^2	11.1	日本富士电机公司
三层电池	$10 \times 10\text{cm}^2$	8.6	日本三菱公司
光 CVD 单结电池	0.084cm^2	9.64	日本东京工业大学

三、非晶硅材料及电池方面的研究动向

1. 非晶硅材料方面的研究课题

目前对氢化非晶硅材料的研究较集中于以下几个方面:

(1) 研究如何获得较高质量即缺陷态较少、 $\mu\tau$ 值较高的氢化非晶硅膜。如最近发展起来的光 CVD 方法, 即是一种为避免在辉光放电过程中由于离子轰击造成膜的缺陷而提出的新方法。

(2) 对不同掺杂浓度所引起的缺陷态分布的分析以及对有效掺杂率与掺杂浓度的依赖关系的测定等问题进行研究, 以便在器件制备过程中选择最佳工艺条件。

(3) 高速淀积速率的研究: 用常规辉光放电法分解硅烷 (SiH_4) 的方法, 其生长速率一

般为 $2-4 \text{ \AA}/s$, 目前利用硅烷和乙硅烷 (Si_2H_6) 的适当配比, 可获得高于 $20 \text{ \AA}/s$ 的高生长速率。但目前这种膜的质量尚不好, 今后研究的方向是一方面要提高乙硅烷的纯度, 另一方面是探索新的生长条件使膜的质量得到提高。

(4) 窄带隙和宽带隙材料的研究: 从发展多结电池考虑, 带隙宽度为 $2.00-2.2\text{eV}$ 的材料以及带隙宽度为 $1.3-1.5\text{eV}$ 的材料, 受到人们的重视。目前集中研究的材料为 $a\text{-SiC:H(F)}$, $a\text{-SiN:H(F)}$ 合金和 $a\text{-SiGe:H(F)}$, $a\text{-SiSn:H(F)}$ 合金。对上述两类合金材料的制备及其光电特性分析虽进行了不少工作, 但总的来说, 材料的性能尚不令人满意。一般都是缺陷态密度较大, 光电特性不好, 改善这类材料的质量是提高多结电池转换效率的关键。

(5) 光致亚稳态缺陷效应的研究: 由于光致缺陷效应是影响电池稳定性原因之一, 故

受到不少人的关注。大量实验说明,光致缺陷效应是材料的一种本征性质(弱 Si-Si 键断裂),所产生的亚稳态缺陷有两类,一类影响材料的 $\mu\tau$ 值,属于悬挂键类,另一类与材料的隙态吸收有关。对于这类缺陷,有人提出所谓三中心键 Si-H-Si 模型。这类课题不仅要研究这些状态在带隙的分布情况以及产生光致缺陷的光能量阈值等,而且还要搞清楚它们影响材料特性的根本原因。目前已注意到不同掺杂元素如磷、硼等和不同浓度的氧、氮、碳元素在光致缺陷形成过程中的作用,正期待着进一步探索出避免这一效应的途径。

2. 非晶硅电池的器件物理研究课题

(1) 对单结和多结(层)电池结构的转换效率进行过理论计算研究(即所谓最优化电池结构设计):目前进行这方面工作的人不少。由于选择的参数值包含了不少主观因素(例如内建场的分布、材料吸收系数的变化以及界面和表面态的影响均与实际情况有很大差别),所以不同作者在理论计算的结果上有一些出入。表 2 列出的数值只是一个预计可能达到的范围,将来能否达到这些指标,器件工艺方面有待克服的因素还很多。

表 2*

电池类型	I 层带隙宽度 $E_g(I)$	转换效率 (%)
单结电池	$V_{oc}/E_g = 0.61, V_{oc}/E_g = 0.58,$	10.9
	$V_{oc}/E_g = 0.53, E_g(I) = 1.8eV$	12.3
	$E_g(I) = 1.7eV, E_g(I) = 1.5eV$	13.4
双结电池	$E_{g1} = 2.00-2.15eV,$	19.9
	$E_{g2} = 1.3-1.45eV$ $E_{g1} = 1.7eV, E_{g2} = 1.2eV$	21
三结(层)电池	$E_{g1} = 2.1eV, E_{g2} = 1.65eV,$	22.1
	$E_{g3} = 1.1-1.2eV$ $E_{g1} = 2eV, E_{g2} = 1.7eV,$ $E_{g3} = 1.47eV$	24

* V_{oc} 为电池开路电压, E_g 为材料带隙宽度, $E_g(I)$ 为电池 I 层的带隙宽度。

(2) 对器件界面的传输机理以及获得完整界面方法的研究:不同金属及透明导电膜(TCO)与非晶硅合金的界面特性,不同非晶硅

薄膜之间的界面特性以及相关的传输问题,是大家关心的课题。首先界面态的测定和界面结构的分析以及有关界面态在载流子输运过程中的作用,目前还不甚清楚。虽有人提出复合传输和隧道效应等模型,但尚未得到统一的认识。至于在器件工艺方面如何能获得比较完整的界面以提高器件转换效率更是大家所急于解决的问题。例如 D.C. 辉光淀积和 A. C. 辉光淀积两种方法对形成界面的影响有何不同?对光 CVD 淀积的界面质量如何估价,以及器件工艺中分室反应系统和单室反应系统在界面质量和经济效益上如何评价等都是正在探索的问题。

(3) 大电池组件的研究和开发:由于非晶硅薄膜电池的面积扩大,随之带来一系列工程方面课题。目前富士电机公司和三洋电机公司均制成面积约 $6000cm^2$ 的大面积非晶硅薄膜,美国 ECD 公司在塑料衬底上制成超薄型电池组件。这就提出了一系列工程问题,包括大面积集成电池的优化电池尺寸设计,电池衬底的机械强度及薄膜所受的应力以及电池转换效率与电池组件面积的合理设计等。同时也提出了一些经济问题,例如对设备投资的经济效益的评价等。

除上述一些关于开发非晶硅电池的课题外,以下两个问题也在国际上受到很大关注。一是关于乙硅烷的质量问题。各家公司选用的硅烷和乙硅烷的技术指标都是互相保密的,一般规定杂质含量要达到 1ppm 以下。据报道生产乙硅烷的公司在日本主要有 Mitsui Toatsu, Shin Etsu 和 Showa Denko 三家,在美国则有 Chronar 和 Matheson 两家。价格均较贵,质量都有待提高。乙硅烷的纯度直接影响高速成膜的质量。显然,若成膜速率提高五倍,则在同样设备条件下产量即可相应提高,无疑成本则大大降低。另一问题是关于非晶硅电池光伏特性的测试标准。由于测试条件不统一,如被测器件面积、测量温度、光源的光谱要求以及所用仪器标准等一系列问题都还没有统一,故目前对各家报道的电池转换效率很难作出公正的评价。