

新形态太阳能电池^{*}

王丹 初增泽 张超 邹德春[†]

(北京大学化学与分子工程学院 北京 100871)

摘要 保护环境、发展可再生资源是关系到国计民生的重大问题,特别是怎样利用取之不尽、用之不竭的太阳能这一问题,逐渐受到世界各国的重视.太阳能电池作为能有效地将太阳能转化为电能的器件,近年来受到了学术界及产业界的广泛关注.目前国际上广泛应用的平板硅太阳能电池存在造价昂贵、质量重、无形变能力等缺点,因此,怎样从降低成本、提高柔性等方面改进太阳能电池的设计与制备就成为了研究的热点.文章结合近年来国内外期刊杂志上发表的相关研究工作,从电池形态上,分类综述了硬性平板、柔性平板、丝网状、纤维态太阳能电池的结构特点、研究历史及发展现状,提出了目前柔性太阳能电池存在的技术难题和部分解决方案.特别是近年来最新研究报道的纤维态柔性太阳能电池,由于完全突破了平面基底的限制,具有质量轻、可弯折、用途广泛等特点,作为新形态太阳能电池的代表在文中进行了较全面的介绍.

关键词 太阳能电池,新形态,柔性,纤维态,网状

New solar cells of various shapes

WANG Dan CHU Zeng-Ze ZHANG Chao ZOU De-Chun[†]

(College of Chemistry and Molecular Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract Protection of the environment and the development of renewable resources are major problems related to the national economy and people's livelihood. In particular, more and more attention is being paid to the use of inexhaustible solar energy. Solar cells, devices that could effectively transform solar energy into electrical energy, have attracted much interest in recent years both in academic and industrial circles. The flat silicon solar cells in wide use today are faced with high cost, heavy weight, rigidity and environment problems, and their deformation flexibility is poor. Much research effort has therefore been devoted to improving the fabrication process, including reducing the cost and increasing the flexibility. This article reviews the works published in recent years on the structure characteristics, history, and status of various types of solar cells according to their shapes: rigid flat, flexible flat, mesh-based, and fiber-shaped. Various technical problems and possible solutions are also mentioned. The fiber-shaped solar cells, newly developed in recent years, are described in detail; they are light in weight, bendable, not restricted to flat substrates, and so have wide applications.

Keywords solar cells, new shapes, flexible, fiber-shaped, net-shaped

1 引言

人类对能源的需求与日俱增,而化石能源短缺问题也逐渐显现,人们开始寻求高效的可再生能源.太阳能具有储量大、可持续利用、清洁环保等突出优点,无疑是首选的清洁能源.因为电能是绝大多数耗能设备的能量输入基本形式,而且电能还具有可远程传输和便于储存的突出优点,因此将太阳能转化为电能是有效利用太阳光能源的方法之一.

目前,虽然太阳能电池产业的发展日新月异,但硅仍是产业界制备太阳能电池的首选材料.硅电池的发展历史可以追溯到1954年,美国Bell实验室Pearson首次报道了能量转化效率为6%的单晶硅太阳能电池,从此拉开了薄膜光伏技术研究与发展

^{*} 国家自然科学基金(批准号:50833001)、国家重点基础研究发展计划(批准号:2011CB933300)、教育部重大项目基金(批准号:309001)资助项目
2010-12-03 收到

[†] 通讯联系人. Email:dczou@pku.edu.cn

的序幕.目前,单晶硅太阳能电池的光电转换效率为16—20%左右,实验室成果可达20%以上,但其造价昂贵,难以大面积制作在非硅衬底上.多晶硅薄膜电池的性能稳定且转换效率较高,但也存在其固有的缺点,通常需要采用长时间热处理工艺,需要能够耐受高温的硼硅玻璃或陶瓷材料作为衬底,同时还面临材料性能改善的技术挑战.

20世纪70年代发展起来的铜铟镓硒($\text{CuIn}_x\text{Ga}_y\text{Se}_2$,简称为CIGS)薄膜太阳能电池,属于多晶化合物半导体异质结太阳能电池.早在1974年,Wagner等人研究了n型硫化镉/p型铜铟硒太阳能电池,其光电转换效率可达12%左右.而后,美国再生能源实验室(NREL)制备的CIGS薄膜太阳能电池的光电转换效率可达19.5%(测试光强为 $100\text{mW}/\text{cm}^2$).虽然这已经是一类很成熟的光伏电池,但由于硒、镓等元素的储量有限以及高纯度半导体原料的提纯等问题,它的大规模应用还存在原材料供应方面的限制;又由于它的制造必须用到的大型高真空系统,从而又带来了庞大投资规模等方面的限制.以另外一种重要的薄膜材料碲化镉(CdTe)为光吸收层的薄膜太阳能电池,理论转化效率在29%左右. CdTe 的禁带宽度非常接近光伏材料的理想禁带宽度,在可见光部分,只需要几个微米的厚度就可以吸收90%的光.但由于Cd元素的毒性,使用此类电池的最大潜在问题就是环境问题.另外,背结的制备工艺以及窗口材料的改进也是提高电池转化效率的关键.

近年来,在新一代光伏电池的研发中,染料敏化太阳能电池和聚合物有机光伏电池是人们关注的两个热点,这主要是由于它们具有原料来源广泛、成本低、质量轻、易携带的特点,并且相对于其他类型的太阳能电池(如小分子光伏电池),其效率也较高.

2 从硬性平板太阳能电池到柔性平板太阳能电池的发展过程

在传统太阳能电池的制备中,由于基底材料的限制,一般电池形态都为硬性平板式.以单晶硅p-n结太阳能电池为例,一般要以导电玻璃或不锈钢为衬底,依次沉积金属电极、p型半导体、n型半导体、无反射覆盖薄膜层和上部电极.而对于CIGS, CdTe/CdS 等薄膜太阳能电池来说,虽然吸光层和载流子传输层所用材料有一定的变化,但基底材料基本相同.由于具有良好的导电性和机械强度,在太

阳能电池发展初期的一段相当长的时间内,导电玻璃和金属板都被普遍应用为基底.

随着效率的逐步提高和基于不同材料体系的电池的出现,制备区别于传统的平板结构,具有柔性好、易于运输和安装的柔性太阳能电池越来越受到关注.简单来说,柔性平板基底的制备就是将导电的ITO(氧化铟锡)/FTO(氟掺杂氧化锡)等材料,通过溅射、涂覆等方式制备在柔软透明的塑料薄膜基底上,而非硬质玻璃基底上.为达到高效率采光的的目的,要求所用塑料基底具有良好的透光性(这一点决定了可用的材料极为有限),并且在基底的制备和电池的制备过程中,操作温度不能超过所用塑料基底的耐温极限,因此在一定程度上限制了一些功能薄膜的制备工艺.尽管柔性基底的制备成本很高,但由于柔性太阳能电池具有柔韧性强、可卷、可拆的特点,并且可适用于弱光、室外等特殊环境,还可与其他产品(如手机、背包、建筑物、帐篷等)结合,近年来发展也较为迅速,同时也有大规模的产品问世.

柔性平板电池发展到一定阶段以后,一些其他的空间自由度更大的(如纤维态、丝网状)基底被尝试应用到太阳能电池的制备中.对于这一类电池来说,提高电池的采光效率和基底的电导率是其更进一步发展的前提;而使用廉价的金属丝或金属网基底,则可使电池的成本大大降低,从而极大地拓宽了材料的选择范围,为电池结构的设计提供了更多的可能.

3 柔性平板太阳能电池

硅太阳能电池的柔性化早在1967年就被提出,但当时只是将硅太阳能电池的厚度减小,同时用柔性塑料基底代替传统的固态基底制备柔性硅太阳能电池.而在1976年,非晶硅薄膜太阳能电池的诞生宣告了薄膜太阳能电池的问世,为硅基太阳能电池的进一步柔性化奠定了基础.1990年^[1],Y. Kishi在透明塑料基底上制备了世界上第一个柔性非晶硅太阳能电池.尽管只有0.12mm厚,弯曲半径只有5mm,但是创造了当时世界上的最高比能值($275\text{mW}/\text{g}$).非晶硅材料具有很高的吸收系数,不到 $1\mu\text{m}$ 的厚度就可以将太阳光完全吸收,这也是降低成本的有利因素.1997年,三结结构的引入,在不锈钢基底上成功地制备了初始效率为14.6%,稳定效率为13%的柔性非晶硅太阳能电池^[2].

目前对非晶硅和多晶硅薄膜柔性太阳能电池的研究很多,而基于单晶硅的柔性太阳能电池到2008

年才取得了突破性进展. 2008年4月, Rogers等^[3]在 *Science* 上报道了应用转印技术, 用单晶硅纳米带阵列制备了可伸缩变形和折叠的集成电路. 同年晚些时候, Rogers等^[4]在 *Nature Material* 上报道了应用转印技术制备的半透明的、柔性的、具有聚光模块设计的超薄单晶硅微电池阵列. 如图1所示, 这是第一次报道的基于单晶硅的柔性太阳能电池, 也是第一次通过传统光刻和掺杂技术在体块硅上制备太阳能微电池. 微电池的厚度最小可以达到100nm, 宽度可以是几个微米. 通过湿法刻蚀工艺, 微电池可以悬挂于硅片上, 然后用软的弹性胶带转移印刷到其他基底(如塑料或者玻璃)上. 如果在适当厚度的硅上制作背反射层, 单个的微电池的转化效率可以达到4—13%. 这项工作的特点是, 大部分的制作过程, 包括高温掺杂、刻蚀等都是在传统的体块单晶硅片上进行, 最后转印到最终的基底上. 唯一的额外工序就是制作金属电极, 因此对基底材料没有限制. 而且这个方法可以使用最少量的晶体硅材料作为光吸收和能量转化材料, 充分利用已经建立起来的完整的硅制备工艺. 可以说它提供了一条包括柔性太阳能电池在内的、低成本的、基于硅材料的大量工业生产柔性器件的道路.

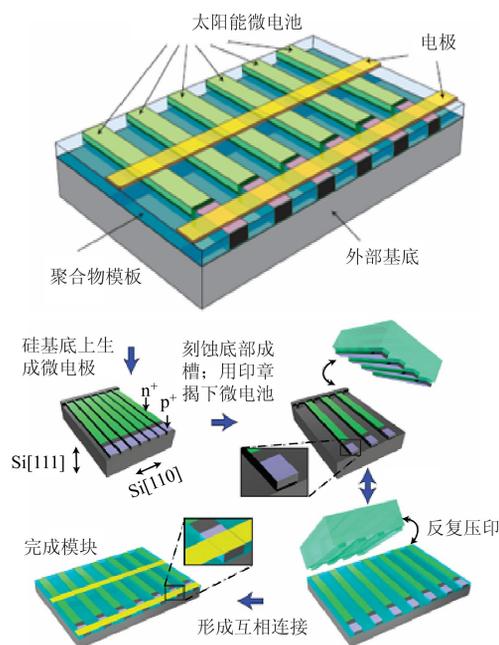


图1 基于多晶硅柔性光伏电池的结构示意图^[4]

对于CIGS柔性太阳能电池来说, 主要是以柔性金属薄板(不锈钢、铝等)和聚合物(聚酰亚胺等)为基底, 器件制备的关键是需要很好的绝缘层. 高的沉积温度虽然有利于活性层的沉积, 但是也加剧了基底材料中不希望出现的杂质元素向活性层的扩散. 如果要制备成单片集成模块, 还要求有基底的电

气绝缘层, 要求其在各个工艺步骤中始终保持绝缘的同时不产生裂纹, 这比杂质扩散阻挡层的要求更高. 而在使用像聚酰亚胺之类的高分子材料时, 有耐热性的问题, 因此有必要开发在低的基底温度就可以得到高效率器件的制备工艺.

有机/无机杂化太阳能电池中研究较多的染料敏化太阳能电池(DSSC)以及有机薄膜光伏电池, 一般是以ITO等导电性高的金属氧化物为基底. 寻找合适的柔性基底制备光电转化效率高的柔性太阳能电池是关键的技术问题. 在柔性有机光伏器件的制备中, 替代玻璃而作为柔性基底使用的聚合物基底, 应该具有良好的结构、光学、机械和化学性能, 如可调节的光透明性, 尺寸、机械和化学稳定性, 耐化学性侵蚀, 热膨胀系数低, 表面光滑, 以及抗空气和水汽的渗透性等. 其中使用最广泛的柔性基板是表面覆有ITO或导电聚合物(如聚噻吩类材料PEDOT:PSS(聚3,4-乙撑二氧噻吩:聚苯乙烯磺酸盐)的聚酯类材料, 如PET(polyethylene terephthalate, 聚对苯二甲酸乙二醇酯)和PEN(polyethylene naphthalate, 聚萘二甲酸乙二醇酯). 另外, 聚酰亚胺和聚碳酸酯在柔性基底制备中也有应用.

表面镀ITO的塑料薄膜在染料敏化太阳能电池的制备中存在一定的问题. 常用的聚酰亚胺(PI)类柔性塑料衬底可承受330℃的高温, 但差的透光性限制了其在太阳能电池中的应用; 而具有优良的透光性的聚酯(PET)衬底最高热稳定温度仅为150℃, 这就使得在制备DSSC时, TiO₂薄膜高温烧结受到了限制, 因为TiO₂薄膜的最佳烧结温度是450—500℃. 研究者探索了多种低温下制备TiO₂薄膜的方法, 如机械压制法、水热法、紫外光辐射法、微波烧结法等, 但通过这些方法制备的器件的效率还是不及传统的烧结方法, 而且也提高了成本. 此外, 由于柔性金属薄膜能够耐高温烧结, 而且其机械强度高, 所以以它为基底的电池研究也比较多, 其中以钛板为基底的染料敏化太阳能电池的最高效率已达7.2%, 但金属基板与TiO₂的粘结强度问题, 以及对电极的透明性与导电性及催化特性的平衡、封装等问题, 均还有待解决, 距离柔性化电池的应用还有一定差距.

4 丝网状太阳能电池

为了解决塑料薄膜电极的耐热性低和金属板的透光性差等问题, 一种创新性的解决思路是采用有一定透光性、目数合适的金属丝网作为太阳能电池的基底.

北京大学邹德春教授学术小组在国际上率先开展了丝网状太阳能电池方面的研究工作^[5],采用与平板电池相似的制备方法,在 120 目数的不锈钢丝网上涂敷 TiO₂ 薄膜作为光阳极,制备了液态染料敏化太阳能电池,如图 2 所示.丝网工作电极具有非常好的柔性、高机械强度以及高热稳定性.在这种电池结构中,光线从工作电极进入,对电极材料同样没有透光性的限制.并且,非平面的结构为入射光提供了散射和漫反射中心,提高了工作电极对光的捕获率,同时也进一步降低了电池对入射光线的角度依赖性,这对于提高电池全天的平均光电转化率是有利的.最初期的电池性能为:开路电压 650mV,短路电流 4.5mA/cm²,光电转化效率 1.49%(100 mW/cm² 的光照条件).

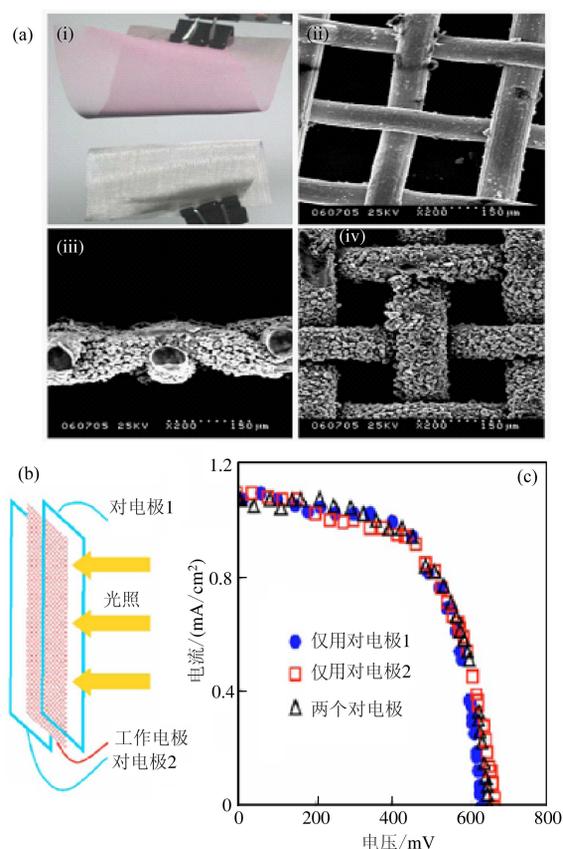


图 2 (a) (i)工作电极(上)和网状基底(下)的光学照片;(ii)丝网基底的 SEM(扫描电镜)图;(iii)电极截面的 SEM 图;(iv)电极正面的 SEM 图;(b)电池的结构示意图;(c) 电流-电压曲线图^[5]

Mano Misra^[6]等人在这项工作基础上,改进了工作电极的制备方法,利用阳极氧化的方法在钛网上制备了 TiO₂ 纳米管电极,此电极透光性好,抗弯折能力强,电池效率可达 1.23%.

最近,William Kylberg^[7]等人发表的工作将基于丝网基底的电池形态扩展到了有机光伏领域.通过将金属线和聚合物共织成网作为基底,同时提供了进光

的透明电极,然后在此基底上涂覆上 PEDOT:PSS 层和活性层,最后蒸镀金属作为阴极制备成有机丝网光伏电池.丝网光伏电池的光电转化效率为 2.2%,与以传统的导电 ITO 玻璃为基底的电池(光电转化效率为 2.4%)相比,虽然略有降低,但由于其避免了 ITO 基底的使用,一方面在降低成本上优势明显;另一方面器件的抗弯折能力也有显著的提高,具体体现在,基底在弯折 100 次后电阻基本没有变化,而 ITO 基底界面电阻则显著提高.

5 柔性纤维态太阳能电池

在新近发展的柔性纤维态太阳能电池中,将活性层制备到圆柱形的基底上,采用光直接从外部照射到活性层,或是通过光导纤维将光从纤维的端部导入内部的方法,使电池形态朝着柔性化、纤维化更进了一步.电池基底的选择空间大大扩大,价格低廉、导电性好的金属丝、光纤、炭等材料可被广泛应用到电极的制备中.同时,这样的结构具有质量轻、柔性好的优点,由于纤维的长度可以无限增长,这就为器件的大面积化提供了空间,为电池模块的立体化构筑找到了可能性.更重要的是,如果将光伏器件通过编织的方式构建,那么得到的光伏产品的外观形态将得到极大的丰富,可以制备成衣服、帐篷、建筑外贴层等.目前报道的纤维电池的工作主要集中于有机薄膜太阳能电池和染料敏化太阳能电池两个领域.

5.1 有机光伏纤维太阳能电池

目前报道的有机光伏纤维太阳能电池主要分为以光纤为基底和以金属为基底两种.这两种电池的采光方式完全不同,以光纤为基底的太阳能电池采用入射光由端面入射或是由透明对电极面入射的采光方式;而缠绕纤维电池结构的引入则突破了透明电极的限制,可以实现活性层的直接采光.下面对这两种结构进行具体的介绍.

5.1.1 镀导电氧化物的光纤作为光阳极

在有机光伏电池的制备中,D. L. Croll^[8]等人用溶胶-凝胶浸蘸法在聚合物光纤表面镀 ITO 层制备了纤维电极,然后依次涂覆 PEDOT:PSS 和 P3HT:PCBM(一种富勒烯衍生物),最后蒸镀 LiF 和 Al,制备了有机纤维光伏电池,结构如图 3 所示.光从纤维端面入射到器件内,光入射角度和纤维的直径对器件的短路电流和效率有很大影响.在小直径(0.6mm)和适当的入射角度下,该纤维电池的最大效率为 0.6%.这是因为大的入射角度一方面可

以增加光线在光纤内部的折返次数,有利于光子穿过光纤塑料/ITO 界面而进入电池的活性层,这对提高电池效率是有用的;而另一方面大的入射角度会增强光在入射端面的反射率,减少进入光纤内部的光量,这对提高电池效率是不利的.因此,入射角度有一个合适的值.至于光纤直径的影响,则是直径越小,光线在光纤内部的折返次数越多,但是电池的制造难度会随光纤直径的减小而显著增大.

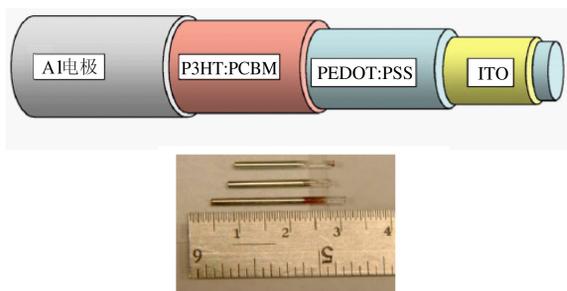


图3 纤维太阳能电池器件的结构示意图以及光学图片^[8]

M. Shtein^[9]等人采用半透明金属层作为阴极,光从半透明阴极入射到电池活性层,从而减小了对光入射角度的依赖.他们在直径为 0.48mm 聚酰亚胺覆盖的硅丝上采用真空蒸镀法制备了结构为 Mg/Mg: Au/Au/CuPc/C₆₀/Alq₃/Mg: Ag/Ag 的纤维电池.在测试光强为 100mW/cm² 的标准太阳光照下,其最大光电转换效率达到 0.5%.虽然这种方法可以允许光从活性层一侧照射,但其光电极还是使用镀有金属的纤维态基底,器件制作工艺相对复杂,特别是不容易制备较长的器件.此外,外层金属电极的透光性和导电性的平衡也难以掌握.

此类以光纤为基底的纤维电池制备的关键技术难题是,从导电基底到功能层以及金属对电极都需要利用涂覆或蒸镀的方法层层制备:一方面要求制备工艺的优化以得到性质优良的薄膜,而由于涂覆的有机层很薄,如果电极表面的平整度不高,就很容易导致两个电极间的短路;另一方面还需要考虑电极透光性和导电性的调控,具有高导电性和透明性的 n 型对电极还没有开发出来,这也极大地制约着柔性线形光伏器件的性能.同时,相对较高的成本和偏低的光电转化效率也将成为制约其发展的瓶颈.

5.1.2 金属作为基底

R. A. Gaudiana 等人^[10]效仿由北京大学邹德春教授学术小组在国际上率先提出并实现的螺旋缠绕结构,将其应用到有机光伏电池中,极大地提高了器件性能.他们采用 P3HT:PCBM 涂覆的不锈钢丝作主电极,再缠绕另一根钢丝作为对电极,如图 4 所

示.他们还进一步利用缠绕结构的曲面特征,引入光学介质层,改变入射光路,提高了光捕获效率.所制备的纤维光伏器件的开路电压超过 0.6V,短路电流达到 11.9mA/cm²,而功率效率可达 3.27%.此工作发表在 *Science* 杂志上,是有机纤维太阳能电池的突破性工作.其中缠绕结构的应用起到了关键性的作用,在回避了透明对电极要求的同时,制备的工艺过程也得到了极大的简化.

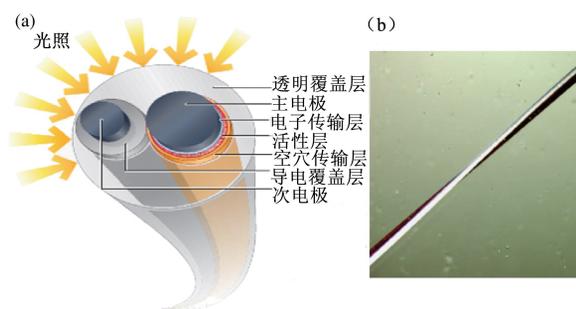


图4 (a)完整的纤维电极结构及工作电极受光、对电极的影响示意图;(b)未封装缠绕结构电池的电极光学照片:白色电极为银包覆的对电极,另一电极为主电极^[10]

5.2 染料敏化纤维太阳能电池

纤维态染料敏化太阳能电池的研究进展很快,目前报道的具有代表性的工作包括基于金属基底的纤维态电池和基于镀导电氧化物的光纤为基底的纤维态电池.这两类电池在制备和应用过程中各有优势,下面分别进行介绍.

5.2.1 金属作为基底

柔性纤维太阳能电池是近年来最新的研究方向,2007 年以前,真正的柔性纤维状太阳能电池几乎没有报道,在染料敏化太阳能电池的相关方面也仅有几篇专利报道.其中一篇专利提出,将多个敏化后的纤维 TiO₂ 电极封装到透明管中,可以组成一个类似于圆柱工作表面的管状电池组件.此专利虽涉及到了纤维结构的 TiO₂ 工作电极的概念,但电池最终的粗细和柔性都与真正意义上的可编织纤维相距甚远.

美国 Konarka 公司的一个专利提出的结构是:将纤维工作电极和填料/电解质混合物封装在塑料套管内,管的内表面镀有透明导电氧化物作为对电极,通过埋藏在透明导电氧化物里的导电纤维将电极引出.此种方法由于基底的特殊形态导致了工艺复杂度的提高和成本的提升,特别是要在细长的塑料套管内壁形成导电性和透明性都良好的导电氧化物层,这些对研究者来说都极具挑战性.

北京大学邹德春教授小组首先提出并实现了无需透明氧化物的柔性纤维太阳能电池.在初期纤维

太阳能电池的制备中,他们以不锈钢丝为基底^[11,12],通过涂敷的方法在细金属丝上制备了TiO₂薄膜.不锈钢是一种机械强度大、相对于ITO等导电性好、轻便、成本低廉的金属,并且具有优良的耐高温性,可保证TiO₂薄膜进行高温烧结.通过这种方法,得到了直径小于100μm的工作电极,而对电极也采用了直径为10到数十微米的铂丝或金丝,通过工作电极与对电极直接缠绕的方式组装成了光伏器件,结构如图5所示.这种材料和结构的选择使得电池的制作过程简单,器件的长度也可任意调控,真正实现了器件的柔性化、纤维化和低成本化.这类器件与其他器件设计的根本不同就在于,将以往的薄膜透光式采光模式变成了纳米颗粒光散射式采光,完全可以不考虑电极本身的透光性问题.目前已报道的液态染料敏化太阳能电池的开路电压、短路电流和效率分别为610mV, 1.3mA/cm²和0.31%.对于器件性能的进一步改进工作还在进行中,并且效率提升的空间还很大.

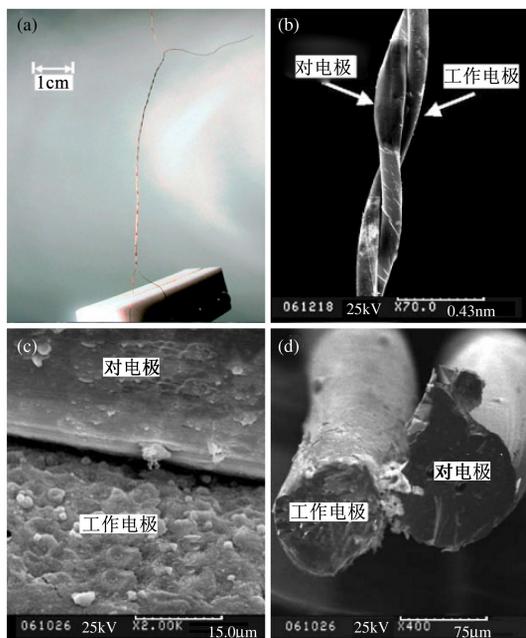


图5 (a)纤维态染料敏化太阳能电池的光学照片;(b)纤维态染料敏化太阳能电池的正面电镜照片;(c)工作电极和对电极界面的扫描电镜照片;(d)纤维态染料敏化太阳能电池的截面电镜照片^[11]

钛是另一类被广泛用作基底的金属, Hong Huang 等人^[13]在螺旋状的钛丝上制备了介孔的TiO₂纳米线,并利用其作为光电极制备了染料敏化太阳能电池,如图6所示,这种三维结构提供了液体电解质有效的传输路径,使得短路电流有一定程度的提高,可以达到2.3mA/cm²,开路电压为

616mV,效率为0.86%.但这种螺旋结构限制了大面积或长形器件的制备.

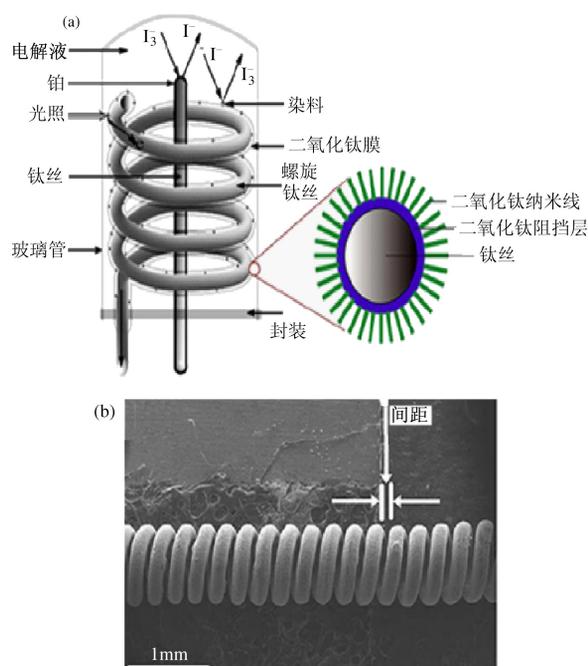


图6 (a)三维光阳极(在螺旋形钛基底上生长具有一定取向的TiO₂纳米线)的设计示意图;(b)电极侧面的电镜图^[13]

5.2.2 镀导电氧化物的光纤作为阳极

Ali Harlin^[14]等人用镀有ZnO:Al的光纤作为光电流收集层,以炭为对电极,制备了液态染料敏化太阳能电池,电池开路电压为0.44V,接近传统的平板电池,但短路电流较小,仅为26nA/cm²,这可能是由于原子层沉积(atomic layer deposition, ALD)方法制备的TiO₂薄膜过于致密,对染料吸附能力较弱造成的.

染料敏化太阳能电池中另一类常用的光阳极材料是ZnO.由于它的禁带较宽,并且导带位置与TiO₂相近,也被广泛应用于活性层的制备. Zhonglin Wang 等人^[15]在光纤的表面修饰时是以ITO作为基底,通过垂直生长ZnO的方法制备了纤维态的柔性电池,电池结构及性能如图7所示,光从光纤的一端通过内部照射的方法引入,由于光在内部被不断折射与反射,使得界面光电转化的效率极大增加.进一步将光纤从圆柱形变为长方体形后,对电极电荷的收集与传输能力得到了改善,器件最高效率可达到3.3%,这也是目前报道的效率最高的基于ZnO的纤维电池的工作.

纤维太阳能电池发展到一定程度后,要真正应用到实际生活和生产中就一定要实现从单根电池到可编织、大面积的转变.编织的网状结构可以将散射

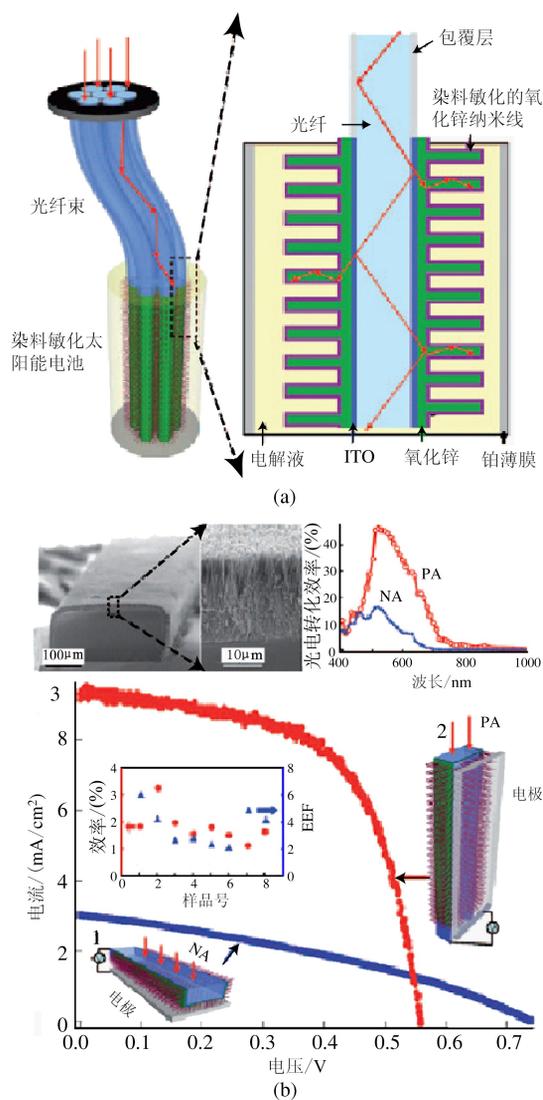


图7 (a)三维染料敏化太阳能电池的设计和原理示意图;(b)以长方形光纤为基底的三维染料敏化太阳能电池及其性能^[15](PA表示入射光平行于光纤轴向,NA表示入射光垂直于光纤轴向,EEF为电池在PA和NA条件下的光电转换效率的比值)

光的损失降至最低,并且通过不同光谱吸收的光学模块的组合,还可以得到全光谱吸收的电池,这也是传统电池所不具备的优点。

6 总结及展望

柔性太阳能电池除了要克服其活性层自身的柔性化难题之外,它们遇到的共同难题就是电池基底的柔性化问题,电池基底的柔性化问题直接与电池光电转换效率、稳定性、成本等密切相关,如何低成本制备高柔性、高导电性、高透明性、高温稳定的基底,是柔性太阳能电池研究的最重要课题之一。纤维态柔性太阳能电池突破了原有太阳能电池在形态、

材料方面的束缚,将金属、光纤、导电纤维等低价、柔性的电极用于光电极的制备,非平板的形态一方面增加了光电极对散射、反射光的吸收,另一方面也大大扩大了太阳能电池对安装环境、工作环境的适应性。

特别要强调的是,近年出现的无透明电极的光伏电池非常值得关注,由于不需要透明电极,因而可以克服迄今为止使用透明电极遇到的各种问题,除此之外,它还具有许多优点,比如电池模块的立体设计,吸收波段的独立设计,对入射光方向的不敏感性,可编织性,单位体积的质量轻,具有自清洁能力和透风性等。当然,与传统的平板电池相比,目前的纤维电池在效率方面还存在着较大的差距,光活性层的制备工艺还需改进,光吸收及电荷传输、收集的效率还需要进一步提高。相信随着研究的深入,纤维态电池在应用上一定会突出更大的优势。目前国内关于纤维态太阳能电池的研究已经逐渐开展起来,这一新兴的领域在未来的几年内将会进入高速发展期,将会有更多相关行业的专家和学者进入到此领域的研究中,从而在理论和产业方面获得更多的成果。

参考文献

- [1] Matsuyama T, Wakisaka K, Kameda M *et al.* Jap. J. Appl. Phys. (Part1), 1990, 29: 2327
- [2] Yang J, Banerjee A, Guha S. Appl. Phys. Lett., 1997, 70: 2975
- [3] Kim D H, Ahn J H, Choi W M *et al.* Science, 2008, 320: 507
- [4] Fan Z Y, Javey A. Nat. Mater., 2008, 7: 835
- [5] Fan X, Wang F Z, Chu Z Z *et al.* Appl. Phys. Lett., 2007, 90: 073501
- [6] Liu Z Y, Subramania V, Misra M. J. Phys. Chem. C, 2009, 113: 14028
- [7] Kylberg W, Castro F A, Chabreck P *et al.* Adv. Mater. 2011, 23: 1015
- [8] Liu J W, Namboothiry M A G, Carroll D L. Appl. Phys. Lett., 2007, 90: 063501
- [9] O'Connor B, Pipe K P, Shtein M. Appl. Phys. Lett., 2008, 92: 193306
- [10] Lee M R, Eckert R D, Forberich K *et al.* Science, 2009, 324: 232
- [11] Fan X, Chu Z Z, Wang F Z *et al.* Adv. Mater., 2008, 20: 592
- [12] Fan X, Chu Z Z, Chen L *et al.* Appl. Phys. Lett., 2008, 92: 113510
- [13] Wang H, Liu Y, Li M *et al.* Appl. Phys. A, 2009, 97: 25
- [14] Toivola M, Ferenets M, Lund P *et al.* Thin Solid Films, 2009, 517: 2799
- [15] Weintraub B, Wei Y G, Wang Z L. Angew. Chem. Int. Ed., 2009, 48: 8981