

太阳能光伏发电技术研究评述^①

孟 浩^②

(中国科学技术信息研究所 北京 100038)

摘 要 评述了太阳能光伏发电技术的基础理论、无机材料与有机材料及光伏‘发电技术’应用等方面研究的最新进展,主要结论如下:提高“人造树叶”效率,发现光合作用的蛋白质、“最优路径”及微观结构规律是基础研究的重大突破;纳米材料、高分子聚合物材料及量子点电池材料等是材料研究领域的新亮点;而改变微观结构及不断完善太阳电池制造方法是实现光伏发电技术应用突破的重要途径。为促进太阳能光伏发电技术的健康、有效与可持续发展,需要加强基础理论、技术与产业化政策等方面研究。

关键词 太阳能光伏发电,太阳电池,材料,最新进展,评述

0 引 言

太阳能作为一种清洁、环保和广泛持久存在的新能源,是人类应对能源短缺、气候变化与节能减排的重要选择之一,因而太阳能利用技术研究受到各国普遍关注。太阳能利用技术研究大致分为三类:一是把太阳辐射能转换成热能并加以利用(包括用以发电),称为太阳能热利用技术;二是利用半导体等材料的光伏效应原理制造太阳电池,将光能转换成电能,称为太阳能光伏发电技术;三是利用光化学原理(如光解水作用和光合作用)制造氢气等新的能源产品的技术。随着各国政府、科研机构与企业的高度重视,太阳能技术取得快速发展,2010 年使用太阳能技术的国家增加到 100 多个^[1]。光伏发电技术发展尤其迅猛,太阳电池能量转换效率不断提高,如超高效硅太阳电池转换效率高达 42.8%^[2],染料敏化电池最高效率达 11%^[3],而相关制造成本不断下降;全球光伏市场持续强劲增长,据统计,2010 年太阳能光伏市场新增 15.8GW,年增速超过 100%,全球光伏新增市场迈进 10GW 时代^[4]。本文从基础理论、电池材料、系统应用等方面研究了近年来太阳能光伏发电技术的主要进展,并做了评述,同时指出了今后研究应注意的问题。

1 基础研究

1.1 模拟植物光合作用

模拟植物光合作用提高转化效率是太阳电池基础研究的重要课题。

(1)“人造树叶”。自“人造树叶”概念提出以来,科学家一直对其寄予厚望。2011 年科学家展示其“人造树叶”,但当时太阳能驱动水分解的有线装置的转化效率为 4.7%,而无线装置的转化率为 2.5%^[5]。2013 年科学家继续研究论证与再设计“人造树叶”,提出更经济地利用现有太阳能电池技术(如硅或碲化镉)的方案,模拟分析显示:使用晶体硅等单一带隙半导体,结合钴、镍基氧化催化剂,最大转化效率可达 16% 或更高;而碲化镉电池系统效率限值可达 18%^[6]。可见,“人造树叶”可有效促进太阳电池输出功率和电化学反应系统的结合,并有望带来实用、廉价的商业化样机。

(2)发现可光合作用的蛋白质。目前新式非硅基太阳电池成本低、转化效率高、性能优异,但超过 60 小时后转化效率仅为最初的 10%,其原因是阳光和氧气混合会产生破坏作用。如果能发现可进行光合作用的蛋白质,重新自我组装成新的太阳电池,就能阻碍这种破坏。为此,研究者从植物中提取出可进行光合作用的蛋白质、具有黏附性的磷酸脂和良

① 国家软科学重点项目(2010GXSIK087)资助。

② 男,1972 年生,博士,副研究员;研究方向:能源与低碳发展,科技创新管理及科技政策等;联系人, E-mail: mhchx@163.com (收稿日期:2012-03-31)

好电学性能的碳纳米管以及表面活性剂;磷酸脂组合成圆盘,两边分别黏附着植物蛋白质反应中心和碳纳米管,反应中心收集太阳光线,释放出电子,通过磷酸脂,进入碳纳米管内,聚合在一起形成电流;表面活性剂会打散某些分子,使其保持隔离状态,当从混合物中抽出表面活性剂时,由不同物质调和成的混合物会自我组装成大小仅为几纳米、能模拟植物光合作用机制进行自我组装和修复的“迷你”型太阳电池^[7]。该电池理论转换效率可接近 100%,实际最高转换效率达 40%,是目前转化效率最高的商业化太阳电池的两倍,未来进一步完善与提高溶液中形成太阳电池的浓度,可提高转化效率。

(3)发现光合作用的“最优路径”。天线蛋白是植物光合作用吸收太阳能并将其转化为能量的关键。研究者选一种天线蛋白作为研究对象,先用两种不同频率的激光将其激活,再用第三种激光脉冲照射蛋白质,使其释放能量,从而开发出探测植物光合作用过程的新方法,使光合作用产生的能量以近乎无损的方式进行传递,找到“最优路径”,这是光合作用转换效率高效的“秘密”所在^[8]。与科学家曾以精确的时控脉冲激光促使天线蛋白发生量子叠加的方法相比,新方法开创了激活天线蛋白的全新方式,只需改变激光的频率,相对更简单有效,便于深入理解光合作用中能级和色素耦合,构建出拥有类似功能的系统,改进现有太阳电池的设计,提高其转换效率。

1.2 揭示微观结构,发现铜铟分离温度规律

染料敏化太阳电池(dye-sensitized solar cells, DSCs)模拟自然界光合作用系统,被认为是二十一世纪可能取代化石能源的可再生、低能耗(价格)的关键能源技术之一。综述 DSCs 半导体光阳极、敏化剂、电解质和对电极等组件在材料及光电性能等基础研究方面的最新进展,介绍其器件集成和产业化现状,总结其所面临的挑战并展望其未来发展方向^[9],有利于研究者系统了解 DSCs 的基础研究进展与产业化发展。

(1)揭示微观结构

研究者在原先揭示花青苷自然染料在 TiO_2 纳米线界面有快速的电子注入的基础上,利用基于含时密度泛函电子动力学的第一性原理计算,细致研究影响 DSCs 电子注入效率的主要因素并总结其物理规律,揭示染料分子尺寸大小、分子分解和吸附状态、表面处原子缺陷等因素都会影响到电子空穴分离的时间尺度,从而影响负电极收集激发态电子的

效率^[10]。结果表明:电子-空穴在 200fs ($1\text{fs} = 10^{-15}\text{s}$) 以内的时间尺度上在空间上分离,保证了染色太阳能器件能正常工作,但其过程可受到分子种类、大小、吸附构型和表面缺陷的调控,从而为精确调控微观、超快过程、进一步优化 DSCs 光电转化效率奠定基础。

结合可精确调控纳米微结构的连续离子层吸附与反应技术,采用超长 ZnO 纳米线阵列为模板,研究者成功实现 TiO_2 纳米管阵列在 FTO 导电基底上的直接生长;采用独特的水热粗化技术,显著提高纳米管阵列的表面粗糙度、结晶性和染料负载量;通过在 ZnO 纳米柱表面连续沉积多层 TiO_2 、 ZnO 薄层,获得了同轴、多壁 TiO_2 纳米管光阳极,并可精确调控管壁的层数(1-6 层)及厚度(5-15 nm);通过生长枝状 ZnO 并构建 ZnO-TiO_2 核壳结构,制备出具有枝状结构的 TiO_2 纳米管光阳极,其光电转换效率为 5.74%,比无粗化纳米管阵列提高 30%;采用具有超低密度(0.03g/cm^3)和超高比表面积($1177\text{m}^2/\text{g}$)的 SiO_2 气凝胶为模板,制备出 $\text{SiO}_2-\text{TiO}_2$ 复合气凝胶,再将其与传统的 TiO_2 纳米颗粒光阳极复合,得到了气凝胶复合光阳极,可显著增强光阳极对染料的负载量和对入射光的散射效果,所得 DSCs 的光电转换效率达到 9.4%,比传统光阳极结构提高了 16%^[11]。这些工作为开发新一代具有可控微结构及高光电转换效率的 DSCs 提供了有益思路。而采用钛箔做阳极基板,钛网做阴极基板,光线从阴极入射,以“三明治”方式组装了大面积柔性 DSCs,在户外光强 55mW/cm^2 的太阳光辐照下, 100cm^2 电池的光电转化效率为 6.69%,输出功率为 0.368W。金属钛良好的延展性、导电性、稳定性和对电解质的抗腐蚀性使之成为 DSCs 柔性基板的优选材料,采用钛网和背投式的光入射(光阴极),使太阳光能被电池充分吸收,有利于提高电池的光电转化效率^[12]。此项研究成果将加速柔性 DSCs 的实用化进程。

(2)发现铜铟分离温度规律

目前铜铟镓硒(CIGS)薄膜太阳电池是光电转化率最高的,可达 20%,但要超过 30% 的理论值,其难题是材料中的铜、镓分布和比例难以达到理想值。研究者借助电脑模拟程序发现 CIGS 材料的铜铟分离温度^[13]:在稍低于正常室温的情况下,铜铟会完全分开且分布不均匀,从而导致材料的光电作用减弱;而超过这个温度后,铜铟会相互融合,且温度越高其分布得就越均匀。这表明薄膜太阳电池生产过程需要较高的温度,只要最后的制冷步骤足够快就

能“定格”这种均匀性。因此, 铜铟分离温度规律的发现为提高 CIGS 太阳薄膜电池转换效率奠定了基础。

2 材料研究

太阳能电池材料分为无机半导体材料与有机半导体材料, 前者包括 Si、Ge、GaAs、GaP、GaN 和 SiC 等, 相关材料的太阳电池发展迅速, 拥有约 90% 左右的市场, 但制作太阳电池存在生产工艺复杂、成本高、制作过程耗能高等不足; 作为聚合物太阳电池核心的有机光伏材料具有制备工艺简单、低成本、质量轻、可弯曲和面积大等优点, 近年来受到各界广泛关注。下面简要评述不同材料的最新研究进展。

2.1 无机半导体材料

(1) 氧化铁半导体材料。2012 年瑞士科学家利用丰富而廉价的氧化铁和水, 采用氧化铁作为半导体材料的串联电池技术, 研发出新型染料敏化太阳电池(DSCs), 其转换效率最终将能达到 16%, 同时成本也很低廉。这样就能利用太阳能制备氢气。虽然该成果目前仍处于实验室阶段, 但它代表了氧化铁和 DSCs 研究方面的新突破^[14]。

(2) 镓化合物滤膜材料。研究者开发出一种由两张铝镓砷半导体膜夹一张 6.8 nm 厚的砷化镓半导体膜制成的滤膜, 只允许在目前技术条件下能实现光电转化、有特定波长的光穿过并照射太阳能电池, 从而提高光电转换的实际效率。当阳光透过这种滤膜再照射太阳能电池后, 电池的光电转换效率可提高到 40% 以上^[15]。

(3) 纳米材料。①发明纳米捕光“天线”。科学家从植物的光合作用装置——捕光天线中汲取灵感, 通过整合在 DNA 和半导体研究方面的先进成果, 让某些类型的纳米粒子相互依附在一起, 自我组装成最新的纳米天线复合物, 从而研制出新一代纳米捕光“天线”, 能控制和引导从光中吸收的能量^[16]。这填补了“可用多种不同类型的纳米量子点构建出复合物”的空白; 与植物叶子的光捕捉天线原理相同, 最新的纳米天线复合物能捕捉各种波长的光, 增加被吸收光的数量, 并将光释放到其内特定的位置上。②碳纳米管。碳纳米管是理想的光电二极管, 可充分利用传统太阳电池中以热能形式流失的多余能量。研究者把半导体性单壁碳纳米管作为光敏量子线材料, 跨接于两个分别具有高、低功函数的非对称金属电极上, 在碳纳米管中形成单向内建

电场, 分离管内产生的光生电子和空穴, 研发出一种结构简单、新型的理论转换效率高达 60% 左右、实际转换效率已达 12.6% 的碳纳米管太阳电池^[17]。该电池制作工艺要求碳纳米管与金属电极间形成良好的肖特基势垒接触, 需要依靠一种新发明的超声纳米焊接技术来实现, 这将为高性能光电子器件的发展提供新途径, 在光伏电池、光电探测器、电光发射源和光电子电路器件等方面具有良好的应用前景。随后研究者利用碳纳米管代替传统硅管材料, 制造出光电二极管, 利用不同颜色的激光对这种二极管进行研究, 发现在光电转化过程中, 可使电流强度加倍, 在实验室中研制出高效太阳电池^[18]。

(4) 外量子效率高的叠层量子点太阳电池。当光子入射到太阳电池表面时, 部分光子会激发光敏材料产生电子空穴对, 形成感光电流, 此时产生的电子数与入射光子数之比称为感光电流的外量子效率。目前还没有任何一种太阳电池在太阳光照射下, 显示超过 100% 的外量子效率。科学家研制出一种新式的叠层量子点太阳电池, 由具有减反光涂层的玻璃(包含有一薄层透明的导体)、一层纳米结构的氧化锌、一层经过处理的硒化铅量子点以及薄薄一层用作电极的金组成, 当其被太阳能光谱的高能区域发出的光子激活时, 基于载子倍增(MEG)过程, 单个被吸收的高能光子能激发多个电子空穴对, 从而产生外量子效率最高达 114% 的感光电流^[19]。为改善太阳电池的转化效率, 该研究在量子点太阳电池的感光电流内展示了 MEG, 结果显示, 在模拟太阳光的照射下, 新量子点太阳电池的光电转化效率高于 4.5%。与传统的太阳能电池相比, 量子点太阳电池内的 MEG 能将电池的理论热能转化效率提高 35%, 且可使用廉价、高产、卷对卷制程制造; 单位面积制造成本很低, 有望成为第三代太阳电池。

2.2 有机半导体材料

(1) 胶体量子点电池。近年来, 胶体量子点电池已成为广泛研究的主题。作为下一代太阳电池的候选者之一, 胶体量子点电池理论转化效率可高达 42%, 超过硅基太阳电池 31% 的理论转化率, 是现存硅基太阳电池最有希望的替代者。胶体量子点电池的加工性能解决方案有利于集成不同太阳电池的优势, 相关研究极具吸引力。Emin 等人综述不同量子点太阳电池在制备方法、工作概念、不同装置结构的优缺点等方面的最新进展, 重点评述综合性的胶体量子点太阳电池, 包括肖特基太阳电池、耗尽型异质结太阳电池、超薄吸收型太阳电池、有机无机混合

型太阳电池、大容量异质结太阳电池、量子点敏化太阳电池等,目前胶体量子点太阳电池转化效率约为5%^[20]。吸光纳米粒子量子点是纳米尺度的半导体,既可吸收可见光,也可吸收不可见光,并将其转化为能源。科学家研究发现由可捕捉太阳可见光的吸光层与捕捉不可见光吸光层可组成新式高效串接的全光谱胶体量子点太阳电池^[21]。研究者用纳米材料串联成一个名为分级重组层的设备,能往返运输可见光层和不可见光层之间的电子,有效地将捕捉可见光的吸光层和捕捉不可见光的吸光层结合在一起。新式串联 CQD 分级重组层太阳电池捕捉光波的波长范围比普通太阳电池更宽泛,未来5年内将有望整合到建筑材料、手机和汽车零件中。随后科学家研制出转化效率为4.2%的胶体量子点太阳电池,但其最大挑战是如何使量子点紧密结合在一起,提高转化效率。量子点通常由多出其1-2纳米的有机分子包裹,而有机分子是制造胶体的重要成分。为此,研究者考虑使用无机配位体来让量子点紧紧依附在一起,以尽可能节省空间。研究表明^[22]:在每个量子点周围包裹一单层原子,将量子点包裹成非常紧密的固体,而量子点紧密地结合在一起并消除电荷陷阱,从而使电子能快速且平滑地通过太阳电池,这样,不使用“庞大”的有机分子也能获得胶体的特征,还使新研制出的胶体量子点太阳电池创下电流达到最高值且整体能量转化效率高达6%的纪录。

(2) 聚合物太阳电池 (polymer solar cells, PSCs)。PSCs 具有质量轻、柔性好、生产成本低、易于大面积加工等独特优势。近年来以共轭聚合物作为电子给体,富勒烯及其衍生物作为电子受体的聚合物/富勒烯太阳电池受到研究人员的广泛关注,成为光伏研究的热点之一。PSCs 研究的重要突破有两点:①高效节能的有机小分子太阳电池。科学家克服 PSCs 一般在大小和性能上很难达到统一标准的难题,研制出只要进行适当合成,每一个分子都一样的高效节能的有机小分子太阳电池,其转化效率是6.7%^[23]。这令溶液处理有机光电技术取得重大进步,并证实利用小分子制成的太阳电池可与其聚合体版本一争高下,使像报纸一样印刷的太阳电池板距离变成现实更近一步。②高效有机小分子光伏材料。科学家合成一系列一维 D-A-D 有机小分子电子给体,与富勒烯衍生物电子受体 PC71BM 共混制备的全小分子电池效率可达3.7%;进一步发展了三维共轭的有机小分子电子给体(具有溶液

加工性好、光吸收和电荷传输各向同性、吸收强而宽、迁移率高等优点),用其与 PC71BM 共混制备的全小分子太阳电池,在未经任何后处理的情况下,能量转换效率高达4.3%;还发展了三维共轭的有机小分子非富勒烯电子受体,在电池中得到了1.18伏的高开路电压^[24]。

(3) 高效率的有机混合材料。研究者在太阳电池中加入有机半导体并五苯后,开发出有机混合电池,可以激发每个光子从蓝色光谱中产生两个电子(通常情况下太阳电池可使一个光子产生一个电子),在吸收红光的同时,利用额外蓝光能量产生更大的电流,使电池转换效率提高到44%,可像报纸印刷的卷带式系统一样低成本大量生产,因此比硅基太阳电池具有技术优势^[25]。2013年2月中国研究团队研制出一种基于二氧化钛/聚3-己基噻吩异质结的杂化太阳电池,这种无机-有机杂化太阳电池构造简单,制作容易,在紫外光辐照(标准光强)下其光电转化效率为1.28%^[26],紫外光响应的杂化太阳电池的成功研制将拓展太阳辐射的应用领域,具有重要意义。

3 应用研究

基础研究与材料研究都是为太阳能光伏发电利用技术的应用打下了良好基础。

3.1 改变微观结构

太阳电池的内部结构决定其光电转化效率。主要进展包括:

(1) 利用硅柱“森林”改变结构。研究者为改变普通硅薄膜太阳电池无法吸收波长比其薄膜厚度更大的光子,在薄膜太阳电池中硅的表面蚀刻出很多纳米尺寸的像森林中树木的硅柱,当光线射入硅柱组成的“森林”后,光线就会在“森林”的底部以及“树木”间不断进行反射,无法轻易“脱身”^[27]。每一次反射都会增加吸收光子的机会。而每个纳米支柱的上半部分还可通过添加掺杂剂的方式制成电极。通过电脑模拟,已确定该薄膜太阳电池的最佳外形和性能。

(2) 利用纳米材料改变结构。①利用纳米和光纤技术相结合,形成独特的三维主体结构,包括光纤和垂直生长于光纤表面的氧化锌(ZnO)纳米线阵列的 DSCs,入射光在每一次反射中通过 ZnO 纳米线与其表面附着的染料相互作用,并在光纤内传播过程中多次反射,增加入射光子与纳米线表面染料相互

作用的次数,大大提高对光线的吸收及光电子的输运效率,从而提高其光电转换效率,相对于光线照射在光纤侧壁,光线沿轴向传播将 DSCs 的能量转换效率提高 6 倍^[28]。在 AM 1.5 照明水平(100 mW/cm²)光照下,基于 ZnO 纳米线的三维 DSCs 的光电转换效率达到 3.3%。这比同类型二维 DSCs 的最高效率高 120%,比 TiO₂ 薄膜涂层的 ZnO 纳米线的染料太阳电池效率高 47%^[28]。该成果开辟了设计使用光纤和有机、无机材料混合结构的三维高效多功能太阳电池的崭新方法和思路。②利用很轻、很强韧的碳纳米管纤维材料构建出微型线状超级电容器。在世界范围内首次在一根碳纳米管纤维上同时实现光电转换和储能,新研制的太阳电池最高光电转化效率超过 9%^[29],大大提高太阳能利用效率。这对开发全纤维状能源系统,迈出了关键一步。③利用金纳米粒子层形成特殊三明治结构。研究者通过简单地将金纳米粒子层植入电池两个光吸收区中,形成特殊三明治结构,能吸收更宽光谱范围的光能,制造出高效等离子体高分子串联太阳电池。出现在连接层中间的等离子体效应能同时改善上、下两层光吸收区的工作状态,可在薄薄的有机光电层中产生强电磁场,将光能聚集使其更多地被光吸收区捕获,从而使串联太阳电池的转化率从以前的 5.22% 提高到 6.24%,增比达 20%^[30]。金纳米粒子近区的增强提高了太阳电池效率,夹层结构作为开放平台能应用于多种高分子材料,为获得高效多层串联太阳电池创造了机会,等离子体效应对未来高分子太阳电池的开发具有极大的潜力。而科学家通过将金纳米壳直接嵌入量子点吸收膜,开发出一种可显著改善太阳能电池效能的新技术,可在近红外光谱区将太阳能转换效率提高 35%,总体转换效率(全光谱)由此增加 11%^[31],展示了通过调节纳米粒子特性以提高太阳能电池效率的潜力,从而使量子点光伏成为替代现有太阳能电池技术的极佳候选者。④通过转基因病毒改善碳纳米管结构与性能。碳纳米管容易发生团簇、导电性不均匀,降低其效果。科学家发现一种 M13 的转基因病毒可用于控制碳纳米管的排列,让碳纳米管变得分散、不会团簇在一起,从而避免电流因为碳纳米管而发生短路,将这种病毒加入染料敏化太阳电池,发现电池能量转化率从 8% 显著提高到 10.6%^[32]。加入 M13 病毒的太阳电池能量转化率还能进一步提高,并且步骤很简单,有望很快实现太阳电池产业化生产。

(3)改善有机小分子太阳电池结构。目前有机

分子的太阳电池有超过 13% 的能源转化效率(50% 太阳光照射下)和较长时间的稳定性。研究者通过分析有机太阳能的典型界面 C60/CuPc 的原子结构和电子耦合,发现界面处不同的分子排列方式(水平或垂直)对太阳光吸收性能影响不大,但对于电子能级排布却有重要作用。其中水平排列的 C60/CuPc 界面两层的分子能级更为接近,比垂直排列界面提供高出 0.3V 左右的电压^[33]。这对于提高太阳能转化效率有着重要影响。研究者通过使用纳米结构的金属和塑料“三明治”新结构的有机太阳电池来抑制反射和捕获光线,新电池的顶层取代以往的铟-锡-氧化物材料,使用极精细金属网,金属厚度为 30nm,网孔直径为 175 nm,间隔为 25 nm,都小于所收集的光的波长。这些次波长结构使其能够创建一个光吸收率高达 96% 的光陷阱,阳光直射时光电转换效率提高 52%;捕捉斜射光线,新结构可额外提升 81% 的效率,从而使最终的效率增长达到 175%^[34]。这项廉价的柔性塑料装置技术也应能提高传统的无机太阳能集热器,如标准的硅太阳电池板的效率,从而或将成为太阳能发电的未来。

3.2 太阳电池制造方法

(1)湿式化学蚀刻法

研究者使用湿式化学蚀刻制造出三维的电极界面,在模板内进行氧化先驱物的电泳披覆,制造出性价比合适的氧化铟锡(ITO)纳米线数组构成的电极,尽量增大 TiO₂ 和 ITO 界面的面积,降低电子空穴对的复合率,提升 DSCs 的转化效率。通过电子显微镜观察纳米线的结构及其组成的数组,并量测三维电极 DSCs,发现其转化效率比传统平板式电极增加 13% 到 46%^[35]。

(2)材料与工程改良组合法。目前有效提高太阳电池效率的方法一般很复杂,虽然太阳电池效率可达 40%,但通常需要 18 层半导体材料。而研究者采用镓氮砷(GaNAs)合金材料和简单的工程改良组合法,使用单一材料,制造出 4 层到 5 层的多带型太阳电池;由于形成多种带隙,故能吸收多波段的太阳光谱,效率超过 40%;同时,该电池具有独特的电子带状结构,制造工艺简单容易,成本更合算,应用更广泛,商业化前景广阔^[36]。

(3)压电光电子学效应法。当该电池受到应力时,纳米光电子学效应能有效提高光生电子-空穴对的分离和传输,科学家利用这一特性,制造出基于单根单晶外延 Cu₂S/CdS 芯-壳结构纳米线的太阳电池,性能可提高多达 70%^[37],并研究压电光电子学

效应对该电池性能的调制。这提供了一种新的提高太阳电池,尤其是柔性太阳电池性能的思路和方法,在自驱动、环境监测,甚至国防科技方面都将有很大的应用前景。

(4)量子点制备的新方法。科学家采用金属硫族络合物(MCC)为前驱体,MCC吸附到二氧化钛(TiO_2)纳米颗粒表面后,将 TiO_2 纳米膜进行温和的热处理,MCC分解为量子点并吸附在 TiO_2 纳米颗粒上形成量子点敏化光阳极,制备的量子点和纳晶氧化物表面直接接触,在 TiO_2 表面覆盖率高,发展了量子点敏化太阳电池中量子点制备的新方法^[38]。

(5)聚合物太阳电池活性层微观形貌调控方法。研究者首次引入三元混合溶剂,对基于PD-PP3T和PC71BM的聚合物太阳电池表面形貌、本体相区、结晶行为进行系统的研究,并运用共振软X射线衍射、二维掠入射广角X射线衍射等一系列手段分析从单一溶剂到三元混合溶剂的聚合物太阳电池活性层给受体形貌的演变过程。通过系统的变量调节发现,三元混合溶剂比例为DCB/CF/DIO = 76:19:5 (v/v)时结晶性最好,相区尺寸较小,相区纯度最高,相区界面较粗糙,从而获得6.71%的能量转换效率^[39],这是目前基于DPP类材料的单层电池的最高效率之一,同时,PDPP3T是极有潜力的红吸光材料($\lambda_{\text{edge}} > 900\text{nm}$, $\text{VOC} > 0.65\text{V}$, $\text{PCE} > 6\%$),有望用于高效叠层器件的构筑中。该研究是首次将三元混合溶剂引入聚合物太阳电池制备中获得成功的范例,揭示了溶剂体系的理性选择对器件性能提升有重要影响,也为高效率材料的器件优化提供了一个新的途径。

(6)太阳电池沉积制造法。太阳电池的制造方法要么非常耗时,要么需要使用昂贵的真空装置或有毒的化合物。科学家利用气相沉积法,开发出一项造价低廉、商业应用广的新印刷技术,仅仅需要蒸汽和不超过 120°C 的环境温度,就能成功地利用未经处理的普通纸张、衣服和塑料当作电池的制造材料,制造出纸质太阳电池;但该技术要通过同样纸质的蒙版固定电池表面的花纹样式,将五层导电性材料重复地沉积到一张纸的同一位置上,整个过程必须在真空中进行^[40]。此外,研究者还利用聚对苯二甲酸乙二醇酯塑料制成另一种电池,将其反复折叠1000次后检测,发现其并未出现明显的性能损失。而如果将同样材料制成的商业太阳电池折叠一次后则就无法使用。目前该电池的转化效率只有约1%,如何改进技术,大幅提升转化效率是下一步的

研发重点。基于溶液的沉积过程,科学家还研究出简单、快捷、直接的方法制造高质量的CIGS薄膜太阳电池,通过控制低成本金属盐前体化合物在分子层面的结构,可以方便地获得安全、简单、稳定的墨水^[41]。借助该技术,最终能快速制造出性能极佳、成本超低的薄膜太阳能电子设备,利用喷墨技术制造出精确的图样,能减少90%的原材料浪费,大大提高转换效率,引领新一代太阳能技术的发展。

4 太阳能光伏发电技术的思考

随着新的储能材料、太阳能光伏发电技术研究成果的不断出现,太阳能光伏发电利用技术前景广阔,但距离大规模的商业化应用和大众型民用普及还有比较长的路要走。笔者对于加快太阳能光伏发电技术的发展有如下思考。

(1)加强物理学、化学、材料学等基础学科及纳米技术等跨学科领域的联合研究,力争在重大基本原理、关键材料、核心工艺、制备装备与方法等方面取得突破。没有新理论的突破、没有新材料的发现、没有新工艺与制备方法的创新,低成本高效率的太阳能光伏发电技术就不可能出现。因为高效率的太阳能发电技术与开发需要坚实的科技创新及其服务体系的支撑。

(2)为太阳能光伏发电技术的设计提供不同的技术路线图,从而规避潜在系统的风险。有关太阳能光伏发电的所有研究,一般应以研制实用有效的系统为目的,由确定、设计的技术路线图来引领,当然随着新的太阳能光伏发电技术的出现,原来的技术路线图要及时动态地去更新。技术路线图经充分论证被确定后,应根据系统的各项技术要求,有针对性地进行材料、工艺、制造装备等方面相关研究,降低潜在的各种风险,这样更有助于促进与太阳能光伏发电技术的相关研究向纵深方向发展。

(3)需要加强太阳能发电技术在投入、研发、成果示范与推广等方面的政策研究。太阳能利用技术是否得到广泛应用取决于成本、转化效率、易用性、安全性等制约因素,只有在切实可行的太阳能相关政策支持下,建立良性的运行机制,形成有效的商业模式,投入才有保障,研发才有效率,成果示范与推广才有可能,才能加快太阳能光伏利用技术的产业化。

(4)积极探索太阳能光伏发电技术商业模式。太阳能光伏发电技术的发展离不开科研、技术与政

策的支持,但更重要的是要有能够支撑自身发展的商业运营模式。这样,才能调动太阳能光伏产业政-产-学-研-用等各个相关利益者的主动性、积极性和创造性,真正实现创新链、产业链与价值链的有机统一,为技术与产业的健康、持续发展提供不竭的动力。

5 结 论

太阳能光伏发电技术在基础研究、材料研究及应用研究方面取得了显著进展,但是,需要加强基础理论研究,如果没有基础理论研究的重大突破,仅仅依靠太阳能领域相关材料的进步与工艺技术的更新,要带来太阳能利用领域更大的突破是很难的。因此,必须加强物理学、化学、材料科学等基础学科以及纳米技术等相关交叉学科的基础研究。随着越来越多的重大基础理论的突破,新技术工艺与制作方法的不断涌现,新型储能材料、新一代太阳电池等新兴技术必将兴起,最大限度地捕捉太阳发出的各种光线,大幅度降低成本,有效应对能源短缺与全球气候变暖问题,未来太阳能光伏发电技术将会有更广阔的发展前景。

参考文献

- [1] REN21. Renewables 2011 Global Status Report. 2011
- [2] 中国科学技术信息研究所前沿领域课题组. 能源技术领域分析报告 2008. 北京: 科学技术文献出版社, 2008
- [3] Ogura R Y, Nakane S, Morooka M, et al. High-performance dye-sensitized solar cell with a multiple dye system. *Appl Phys Lett*, 2009, 94(7): 3308
- [4] 李俊峰. 风光无限: 中国风电发展报告 2011. 北京: 中国环境科学出版社, 2011: 56
- [5] Reece S Y, Hamel J A, Sung K, et al. Wireless solar water splitting using silicon-based semiconductors and earth-abundant catalysts. *Science*, 2011, 334 (6056): 645-648
- [6] Winkler M T, Cox C R, Nocera D G, et al. Modeling integrated photovoltaic-electrochemical devices using steady-state equivalent circuits. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(12): E1076-E1082
- [7] Moon-Ho Ham, et al. Photoelectrochemical complexes for solar energy conversion that chemically and autonomously regenerate. *Nature Chemistry*, 2010 (2): 929-936
- [8] Dawlaty J M, et al. Mapping the spatial overlap of excitons in a photosynthetic complex via coherent nonlinear frequency generation. *J Chem Phys*, 2011, 135, 044201: 1-12
- [9] 孙惠成等. 染料敏化太阳能电池基础研究及产业化新进展. *硅酸盐学报*, 2011, 39(7): 1045-1052
- [10] Meng S, et al. Electron and hole dynamics in dye-sensitized solar cells: Influencing factors and systematic trends. *Nano Lett.*, 2010, 10(4): 1238-1247
- [11] Bai Y, Yu H, Li Z, et al. In situ growth of a ZnO nanowire network within a TiO₂ nanoparticle film for enhanced dye-sensitized solar cell performance. *Advanced Materials*, 2012, 24(43): 5850-5856
- [12] Wu J H, Xiao Y M, Tang Q W. Large-area light-weight dye-sensitized solar cell based on all titanium substrates with an efficiency of 6.69% outdoors. *Advanced Materials*, 2012, 24(14): 1884-1888
- [13] Christian D R, Ludwig, et al. Indium-Gallium segregation in CuIn_xGa_{1-x}Se₂: An Ab Initio-based Monte Carlo study. *Phys. Rev. Lett.* 2010, 105(2): 5702-5705
- [14] Hardin B E, Snaith H J, McGehee M D. The renaissance of dye-sensitized solar cells. *Nature Photonics*, 2012, 6: 162-169
- [15] Zoysa M D, Asano T, Mochizuki K, et al. Conversion of broadband to narrowband thermal emission through energy recycling. *Nature Photonics*, 2012, 6: 535-539
- [16] Tikhomirov G, et al. DNA-based programming of quantum dot valency, self-assembly and luminescence. *Nature Nanotechnology*, 2011(6): 485-490
- [17] Chen C X, et al. Nanowelded carbon-nanotube-based solar microcells. *Small*, 2008, 4(9): 1313-1318
- [18] Gabor N M, et al. Extremely efficient multiple electron-hole pair generation in carbon nanotube photodiodes. *Science*, 2009, 325(5946): 1367-1371
- [19] Semonin O E, et al. Peak external photocurrent quantum efficiency exceeding 100% via MEG in a quantum dot solar cell. *Science*, 2011, 334(6062): 1530-1533
- [20] Emin S, et al. Colloidal quantum dot solar cells. *Solar Energy*, 2011, 85 (6): 1264-1282
- [21] Wang X H, et al. Tandem colloidal quantum dot solar cells employing a graded recombination layer. *Nature Photonics*, 2011(5): 480-484
- [22] Tang J, Kemp K W, Hoogland S, et al. Colloidal-quantum-dot photovoltaics using atomic-ligand passivation. *Nature Materials*, 2011(10): 765-771
- [23] Sun Y M, Welch G C, Leong W L, et al. Solution-processed small-molecule solar cells with 6.7% efficiency. *Nature Materials*, 2012(11): 44-48
- [24] Lin Y Z, Li Y F, Zhan X W. Small molecule semiconductors for high-efficiency organic photovoltaics. *Chem. Soc. Rev.*, 2012, 41: 4245-4272
- [25] Ehrler B, Wilson M W B, Akshay Rao, et al. Singlet exciton fission-sensitized infrared quantum dot solar cells. *Nano Lett.*, 2012, 12 (2): 1053-1057
- [26] Wu J H, Yue G, Xiao Y M, et al. An ultraviolet responsive hybrid solar cell based on titania/poly(3-hexylthiophene). *Scientific Reports*, 2013 (3): DOI: doi: 10.

- 1038/srep01283
- [27] Wong S M, et al. Design high-efficiency si nanopillar-array-textured thin-film solar cell. *Electron Device Letters, IEEE*, 2011, 31(4): 335-337
- [28] Weintraub B, et al. Optical fiber/nanowire hybrid structures for efficient three-dimensional dye-sensitized solar cells. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2009, 48:1-6
- [29] Chen T, Qiu L B, Yang Z B, et al. Inside Cover: An Integrated “Energy Wire” for both Photoelectric Conversion and Energy Storage. *Angewandte Chemie International Edition*, 2012, 51(48): 11908-11908
- [30] Yang J, et al. Plasmonic polymer tandem solar cell. *ACS Nano*, 2011, 5(8): 6210-6217
- [31] Jeong K S, Pensack R D, Asbury J B. Vibrational spectroscopy of electronic processes in emerging photovoltaic materials. *Acc. Chem. Res.*, DOI: 10.1021/ar300300m
- [32] Dang X N, et al. Virus-templated self-assembled single-walled carbon nanotubes for highly efficient electron collection in photovoltaic devices. *Nature Nanotechnology*, 2011(6): 377-384
- [33] Ren J, Meng S, Kaxiras E. Research article theoretical investigation of the C60/copper phthalocyanine organic photovoltaic heterojunction. *Nano Research*, 2012, 5(4): 248-257
- [34] Chou S Y, Ding W. Ultrathin, high-efficiency, broad-band, omni-acceptance, organic solar cells enhanced by plasmonic cavity with subwavelength hole array. *Optics Express*, 2013, 21(S1): A60-A76
- [35] Hong-Wen Wang et al. Three-dimensional electrodes for dye-sensitized solar cells: synthesis of indium-tin-oxide nanowire arrays and ITO/TiO₂ core-shell nanowire arrays by electrophoretic deposition. *Nanotechnology*, 2009, 20(5): 5601
- [36] N. López, et al. Engineering the electronic band structure for multiband solar cells. *Phys. Rev. Lett.* 2011, 106(2): 8701:1-4
- [37] Pan C F, Niu S M, Ding Y, et al. Enhanced Cu₂S/CdS Coaxial nanowire solar cells by piezo-phototronic effect. *Nano Lett.*, 2012, 12(6): 3302-3307
- [38] Yu X C, Zhu J, Zhang Y H, et al. SnSe₂ quantum dot sensitized solar cells prepared employing molecular metal chalcogenide as precursors. *Chem. Commun.*, 2012, 48: 3324-3326
- [39] Ye L, Zhang S Q, Ma W, et al. From binary to ternary solvent: morphology fine-tuning of D/A blends in PD-PP3T-based polymer solar cells. *Advanced Materials*, 2012, 24(47): 6335-6341
- [40] Barr M C, et al. Direct monolithic integration of organic photovoltaic circuits on unmodified paper. *Advanced Materials*, 2011, 23(31): 3500-3505
- [41] Wang W, et al. Inkjet printed chalcopyrite CuIn_xGa_{1-x}Se₂ thin film solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011, 95(9): 2616-2620

A review of the researches on solar photovoltaic power generation technologies

Meng Hao

(Institute of Scientific and Technical Information of China, Beijing 100038)

Abstract

The latest research advancements in the studies of basic theories, inorganic materials, organic materials and application for photovoltaic power generation are reviewed. Main conclusions are as follows. The major breakthroughs in the basic researches include improving the efficiency of “artificial leaf”, finding the protein of photosynthesis, “optimal path” and the law of microcosmic structure. The new bright spots in the field of materials researches include nanometer materials, polymer materials and quantum dot solar cells materials and so on. The important ways of promoting the application breakthrough in photovoltaic power generation technologies include changing the microstructure and improving manufacturing method of solar cells. It is necessary to strengthen researches on the basic theories, technologies and industrial policies, so as to promote the healthy, effective and sustainable development of solar photovoltaic power generation technologies.

Key words: solar photovoltaic power generation, solar cells, materials, latest advancements, review