



聚合物有机太阳能电池

材料·制造·检测技术

吕梦岚◎著

清华大学出版社

聚合物有机太阳能电池

材料·制造·检测技术

吕梦岚◎著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书结合国内外的最新研究进展,对聚合物有机太阳能电池的材料和器件进行了详细介绍。本书分为7章:第1章绪论介绍了太阳能电池的发展历史,器件的分类、结构、性能参数表征和工作原理,以及聚合物光伏材料的要求和分类;第2章介绍了聚合物有机太阳能电池给体光伏材料;第3章介绍了聚合物有机太阳能电池受体光伏材料;第4章介绍了聚合物有机太阳能电池光活性层的形貌调控;第5章介绍了聚合物有机太阳能电池界面修饰材料;第6章和第7章分别介绍了叠层聚合物有机太阳能电池和柔性太阳能电池的结构、光伏材料、电极的优化、工作原理和相关研究进展。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

聚合物有机太阳能电池:材料·制造·检测技术/吕梦岚著. —北京:清华大学出版社,2017
ISBN 978-7-302-48579-7

I. ①聚… II. ①吕… III. ①薄膜太阳能电池—研究 IV. ①TM914.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 242984 号

责任编辑:袁琦

封面设计:何凤霞

责任校对:刘玉霞

责任印制:王静怡

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市少明印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:12.5

字 数:304千字

版 次:2017年11月第1版

印 次:2017年11月第1次印刷

定 价:55.00元

产品编号:072975-01

随着能源消费量的持续上升,以煤炭为主的化石能源的大规模开发利用对环境会造成很大污染,生态环境的压力与日俱增,改善我们赖以生存的自然环境,迫切需要我们进行能源的绿色转型。因此,未来开发可再生、廉价、安全、清洁的能源成为我国能源发展的必修课题。作为清洁能源的代表,近年来太阳能电池光伏材料成为发展最为迅速、最具活力的研究领域之一。聚合物有机太阳能电池由于其制作成本低廉、质轻、制备工艺简单、易于制备大面积的柔性器件等明显优势,引起了科学工作者们的极大关注。

本书结合国内外最新研究进展,对聚合物有机太阳能电池的材料和器件进行了详细介绍。本书分为7章:第1章绪论介绍了太阳能电池的发展历史,器件的分类、结构、性能参数表征和工作原理,以及聚合物光伏材料的要求和分类;第2章介绍了聚合物有机太阳能电池给体光伏材料;第3章介绍了聚合物有机太阳能电池受体光伏材料;第4章介绍了聚合物有机太阳能电池光活性层的形貌调控;第5章介绍了聚合物有机太阳能电池界面修饰材料;第6章和第7章分别介绍了叠层聚合物有机太阳能电池和柔性有机太阳能电池的结构、光伏材料、电极的优化、工作原理和相关研究进展。全书的重点放在第2、3、5章的内容上。

聚合物有机太阳能电池的材料和器件的研究发展日新月异,新材料、新结构和能量转化效率的最高值不断被刷新。近几年基于有机小分子的给体和受体材料的有机太阳能电池的发展也非常迅猛,能量转化效率已超过12%,但鉴于本书以介绍聚合物材料为主,因此未对该部分内容进行详细介绍。此外,作者已努力将有关材料和器件的研究报道收入本书,但由于研究的更新速度过快,本书若有重要研究成果未能介绍,请读者谅解。此外,书中难免有错误和不当之处,也请读者们批评指正,作者不胜感激。

感谢陈希文研究员对作者研究工作的悉心指导和帮助。本书的出版得到了国家自然科学基金(21502033)、贵州省科技合作计划(黔科合LH字[2015]7094)、中国科学院-澳大

利亚联邦科学与工业研究组织联合项目(CAS-CSIRO joint project, GJHZ1124)、贵州省普通高等学校科技拔尖人才支持项目(黔教合 KY 字〔2017〕082)和贵州理工学院高层次人才启动基金的支持,特此致谢!

吕梦岚

2017年5月

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 太阳能电池发展简史	2
1.3 有机太阳能电池的分类和结构	4
1.3.1 单层肖特基型太阳能电池	4
1.3.2 双层 D/A 异质结结构电池	5
1.3.3 共混型 D/A 异质结结构电池	6
1.3.4 叠层有机太阳能电池	7
1.4 有机太阳能电池的工作原理	8
1.4.1 激子的产生	9
1.4.2 激子的扩散	9
1.4.3 激子的电荷分离	10
1.4.4 载流子的传输	10
1.4.5 电荷的收集	12
1.5 有机太阳能电池的光伏性能参数	12
1.6 聚合物有机太阳能电池的制备	14
1.7 聚合物有机太阳能电池光伏材料	16
1.7.1 聚合物有机太阳能电池光伏材料的分类	16
1.7.2 聚合物有机太阳能电池光伏材料需要具备的性质	17
参考文献	18

第 2 章 聚合物有机太阳能电池给体光伏材料	22
2.1 基于乙烯和乙炔构筑单元的给体材料	23
2.2 基于噻吩构筑单元的聚合物给体材料	24
2.3 基于噻咯给体单元的 D-A 共聚物给体材料	26
2.4 基于芴给体单元的 D-A 共聚物给体材料	27
2.5 基于咪唑给体单元的 D-A 共聚物给体材料	29
2.6 基于环戊烷并二噻吩给体单元的 D-A 共聚物给体材料	31
2.7 基于二噻吩并噻咯给体单元的 D-A 共聚物给体材料	32
2.8 基于二噻吩并吡咯给体单元的 D-A 共聚物给体材料	34
2.9 基于苯并二噻吩给体单元的 D-A 共聚物给体材料	35
2.9.1 烷基和烷氧基取代的 BDT 单元的 D-A 共聚物	35
2.9.2 共轭基团取代的 BDT 单元的 D-A 共聚物	37
2.10 基于并吡咯二酮(DPP)受体单元的 D-A 共聚物给体材料	40
2.11 基于噻吩并吡咯二酮(TPD)受体单元的 D-A 共聚物给体材料	41
2.12 基于并二噻吩(TT)受体单元的 D-A 共聚物给体材料	43
2.13 主链含有金属的聚合物给体光伏材料	44
参考文献	45
第 3 章 聚合物有机太阳能电池受体光伏材料	54
3.1 基于聚苯乙烯撑的聚合物受体材料	55
3.2 D-A 共聚物受体光伏材料	56
3.3 富勒烯衍生物受体光伏材料	60
3.3.1 PC ₆₁ BM 和 PC ₇₁ BM 受体光伏材料	61
3.3.2 PCBM 改性受体光伏材料	63
3.3.3 单加成、双加成和多加成的富勒烯衍生物受体光伏材料	66
3.3.4 其他的富勒烯衍生物受体光伏材料	69
3.4 D-A 双链型聚合物光伏材料	70
参考文献	72
第 4 章 聚合物有机太阳能电池光活性层的形貌调控	78
4.1 给/受体共混比例对活性层形貌的影响	78

4.2	溶剂效应对光活性层形貌的影响	80
4.3	退火处理对活性层形貌的影响	83
4.3.1	热退火	83
4.3.2	溶剂退火	86
4.4	添加剂对活性层形貌和器件光伏性能的影响	89
	参考文献	96
第5章	聚合物有机太阳能电池界面修饰材料	99
5.1	界面修饰层在聚合物有机太阳能电池中的作用	100
5.1.1	调控光活性层/电极界面的能级匹配	100
5.1.2	改善电荷运输和电极的选择性	103
5.1.3	引入光学效应提高器件的光捕获能力	104
5.1.4	调控本体异质结光活性层的形貌提高光伏器件的稳定性	105
5.2	阳极界面修饰材料	106
5.2.1	导电高聚物阳极界面修饰材料(PEs)	106
5.2.2	氧化石墨烯阳极界面修饰材料(GOs)	108
5.2.3	水溶性过渡金属氧化物阳极界面修饰材料(TMOs)	114
5.3	阴极界面修饰材料	117
5.3.1	有机小分子阴极界面修饰材料	117
5.3.2	富勒烯衍生物阴极界面修饰材料	122
5.3.3	有机聚合物阴极界面修饰材料	128
5.3.4	有机聚合物电解质阴极界面修饰材料	132
5.3.5	金属氧化物阴极界面修饰材料	137
5.3.6	低功函数金属及金属盐阴极界面修饰材料	140
5.3.7	有机-无机杂化阴极界面修饰材料	141
5.3.8	氧化石墨烯阴极界面修饰材料	144
	参考文献	146
第6章	叠层有机太阳能电池	164
6.1	叠层有机太阳能电池的结构和工作原理	164
6.2	叠层有机太阳能电池的分类	166
6.2.1	小分子叠层有机太阳能电池	166

6.2.2 聚合物叠层有机太阳能电池	167
6.2.3 聚合物/小分子叠层有机太阳能电池	170
6.3 叠层有机太阳能电池的中间连接层	171
6.4 叠层有机太阳能电池存在的问题及发展方向	176
参考文献	177
第7章 柔性有机太阳能电池	180
7.1 柔性透明电极	182
7.2 柔性有机太阳能电池的制备工艺	184
7.3 柔性有机太阳能电池的研究进展	188
参考文献	190

1.1 引言

自 20 世纪 70 年代世界范围内爆发石油危机,引发了一场又一场争夺能源和资源的战争,化石能源(如石油、煤炭、天然气、核能)推动了世界现代化经济的进程。但是,由于人类的过度开发和利用,化石能源已经迅速接近枯竭,化石能源中断所导致的经济、社会问题将引发一场世界范围的能源危机。与此同时,化石能源的滥用给地球的生态环境带来了前所未有的污染和破坏。面对日益枯竭的化石能源及其带来的对生态环境的巨大破坏,我们必须找到可再生、廉价、安全且清洁的能源作为替代,于是对取之不竭的清洁能源——太阳能等的研究受到了人们的广泛关注^[1-7](图 1-1)。

2012 年《中国能源政策》白皮书中提到^[8]: 能源是支撑人类文明进步的物质基础,是现代社会发展不可或缺的基本条件。目前,我国已经发展成为世界上最大的能源生产国,但同时也是世界上最大的能源消费国。我国的能源资源十分有限,煤炭、石油、天然气的人均占有量较低。随着能源消费量的持续上升,以煤炭为主的化石能源的大规模开发利用,对环境会造成很大污染,生态环境的压力与日俱增,改善我们赖以生存的自然环境,迫切需要我们向绿色能源转型^[8,9]。因此,未来开发可再生、廉价、安全、清洁的能源成为我国能源发展的必修课。

我国的太阳能资源非常丰富(图 1-1)。我国地处北半球,东西、南北的跨距都达到 5000 km 以上,大多数地区年平均日辐射量在 $4 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ 以上,西藏最高可达 $7 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ 。与同纬度的其他所有的国家相比都遥遥领先,因此具有巨大的开发潜能^[9]。近 30 年,全球的光伏产业迅猛发展,我国得天独厚的地理优势,使得光伏产业也迅速崛起,成为世界上最大的

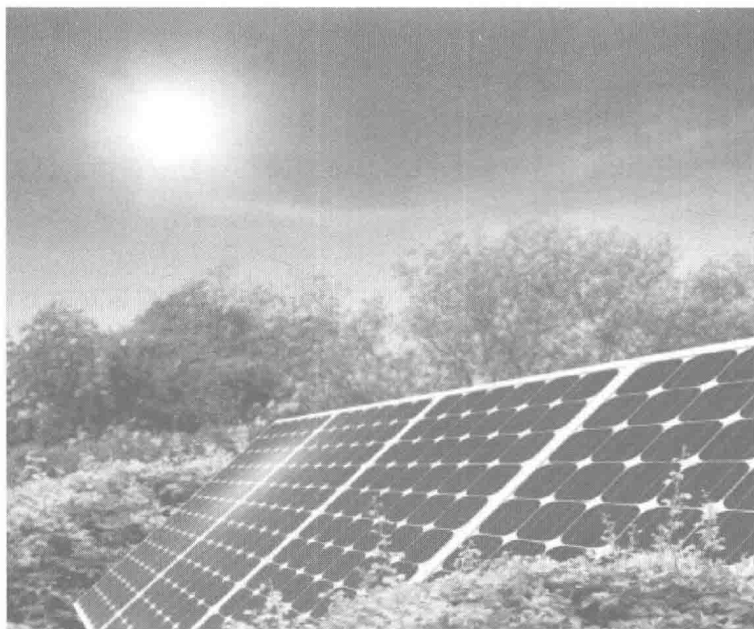


图 1-1 太阳能电池板

太阳能光伏的生产国、使用国,占据了世界 76% 的份额。科学家们预计在不远的将来,太阳能光伏发电将占据全球能源消费的重要位置,不仅会取代大多数的常规能源,还将有望成为世界能源供给的主体。根据我国的《可再生能源中长期发展规划》,预计到 2020 年,我国力争使太阳能发电装机容量达到 1.8 GW。未来十几年,我国太阳能发电装机容量的复合增长率将高达 25% 以上^[10]。

作为清洁能源的代表,近年来太阳能光伏成为发展最迅速、最具有活力的研究领域之一。目前研究和开发的太阳能电池有单晶硅、多晶硅、非晶硅、薄膜半导体、染料敏化和有机太阳能电池等,前三种电池已经实现了商业化,转化效率可以达到 18% 左右,其缺点是器件制备成本高、原材料生产过程的能耗高且污染大,因此,极大地限制了其推广和应用。有机太阳能电池由于其制作成本低廉、质轻、制备工艺简单、易于制备大面积的柔性器件等明显优势,引起了科学工作者们的极大关注。

1.2 太阳能电池发展简史

太阳能电池,是指通过光电效应、光化学效应将光能直接转换为电能的装置。从美国贝尔实验室 1954 年诞生第一块太阳能电池到现在,它的发展经历了很多代的演变,跨过了整整 60 个年头(图 1-2)^[11]。

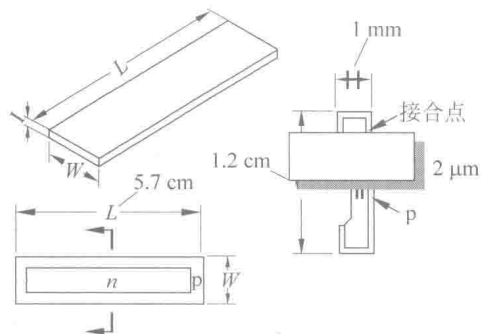


图 1-2 1954 年在贝尔实验室诞生的第一块太阳能电池及其发明者

第一代太阳能电池分为单晶硅、多晶硅和非晶硅电池,发展历时最长久,也是技术最为成熟的一类电池。高效的光电转化率,使得单晶硅太阳能电池目前在工业生产和大规模的应用中仍然占据了主导地位。

第二代太阳能电池是基于薄膜制作工艺的电池,例如碲化镉、铜铟硒化物、铜铟镓化物、砷化镓电池。其优点是对热不敏感,抗辐照能力强、对光的吸收效率高,但由于其原材料的毒性和制作过程对环境的污染较大,还不能作为一种理想的太阳能电池的替代产品。于是,第三代有机太阳能电池(organic photovoltaic devices)应运而生。

第三代电池在制作过程中引入了有机化合物以及纳米技术,主要分为有机太阳能电池、染料敏化电池、纳米结晶电池。由于早期的研究工作让化学家和物理学家们发现了无机半导体材料所存在的一些缺陷,于是他们开始考虑通过对有机化合物进行化学修饰来改变它的光学、电学和光电性质,从而实现对其导电性能和光的能带吸收宽度的控制,进而运用其制备高性能的光电器件,如有机发光二极管(organic light-emitting diodes)^[12]、场效应晶体管(field-effect transistors)^[13]和光电探测器(photodetector)^[14]等,他们发现有机半导体材料的性能能够达到甚至超过同类型的无机半导体材料。而最新一代的太阳能电池根据薄膜对光吸收的不同范围进行组装得到了叠层结构太阳能电池。

尽管新型的有机太阳能电池(包括有机小分子太阳能电池和聚合物有机太阳能电池)的光电转换效率还不能与传统的无机太阳能电池相媲美,但其拥有质量轻、制作成本低、具有柔性、可加工性强、制作工艺简单(可通过印刷、旋涂、喷涂和气化等方法制备)且制作过程对环境的污染较小等优点,另外有机聚合物材料的种类繁多、器件结构可设计性强,很容易通过结构和材料的改性来优化太阳能电池的光伏性能,因此具有重要的开发和应用前景。

1.3 有机太阳能电池的分类和结构

有机太阳能电池经历了单层肖特基型太阳能电池, 双层 D/A 异质结结构的电池, 混合型 D/A 本体异质结结构的太阳能电池, 包括后来发展起来的染料敏化电池和叠层太阳能电池等类型。

1.3.1 单层肖特基型太阳能电池

最早问世的有机太阳能电池可以追溯到 1958 年, Kearns 和 Calvin 用镁酞菁染料为原料, 得到了历史上第一块“肖特基型太阳能电池”(图 1-3)。其工作原理为: 有机半导体内的电子在光照下被从 HOMO 能级激发到 LUMO 能级, 产生一对电子和空穴。电子被低功函数的电极抽取, 空穴则被来自高功函数电极的电子填充, 由此在光照下形成光电流。理论上, 有机半导体膜与两个不同功函数的电极接触时, 会形成不同的肖特基势垒, 这是光致电荷能定向传递的基础。但是这类电池激子的分离效率很成问题, 光激发形成的激子, 只有在肖特基结的扩散层内, 依靠结区的电场作用才能得到分离。其他位置上形成的激子, 必须先移动到扩散层内才可能形成对光电流的贡献, 导致这类器件的短路电流都非常低, 虽然其开路电压比较高, 但是能量转换效率非常低(一般远低于 0.1%)^[15-17]。

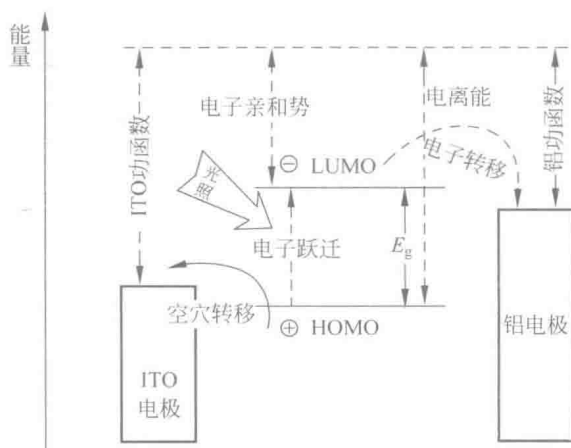


图 1-3 肖特基型太阳能电池的工作原理

1.3.2 双层 D/A 异质结构电池

由于单纯由一种纯有机化合物夹在两层金属电极之间制成的肖特基型太阳能电池的效率很低。时隔 30 年,柯达公司的华人科学家邓青云实现了有机太阳能电池里程碑式的突破。1986 年,他发明了一种新型的双层 D/A(电子给体层和电子受体层)异质结结构的有机太阳能电池(heterojunction solar cells)^[18,19],这一器件核心结构是四羧基茝的衍生物和铜酞菁染料组成的双层膜异质结构(图 1-4)。

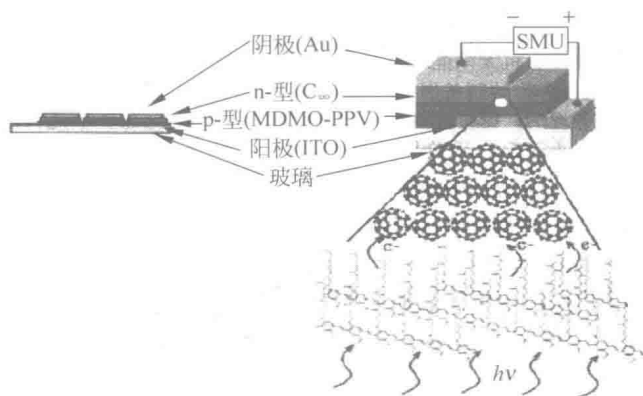


图 1-4 双层 D/A 异质结构电池的工作原理

这种类型的电池将 p-型半导体材料(电子给体材料 donor,简称 D)和 n-型半导体材料(电子受体材料 acceptor,简称 A)复合,发现两种材料的界面电子空穴对的解离非常有效,也就是最初的双层 D/A 异质结结构的有机太阳能电池^[18]。作为电子给体的有机小分子在受到光激发之后会产生激子(exciton),其中电子会传输到电子受体层被吸收,空穴在电极正极处被收集,从而实现了激子的分离,形成了光电流。与肖特基型电池相比,这类电池的进步之处在于电荷的分离,光电效率有了明显提高。但与传统的无机半导体硅材料相比仍然存在很多缺陷,因为传统的无机半导体材料在受到光激发之后产生自由电子的同时会留下一个空穴,而有机分子在受到光激发之后产生的激子是通过静电作用形成的,激子的寿命非常有限,未成功分离的电子和空穴又会重新复合(recombination),而这部分激子对于光电流是没有任何贡献的。此外,目前的研究发现激子的扩散距离只有 10 nm,而双层结构中膜的有效厚度是 20 nm 左右,载流子需要在两层中传输一段距离才能到达电极进行收集,双层膜结构所能提供的界面面积非常有限,从而限制了光电效率的提高,因此有机太阳能电池的光电转换效率要明显低于传统无机太阳能电池。双层异质结有机太阳能电池的提出之所以被称为革命性的突跃在于它为人们日后的研究指明了发展的方向,奠定了坚实

的基础,有效地提高了光子的吸收,最大限度降低激子的复合,这都是实现有机太阳能电池光电转换效率飞跃的必由之路。

1992年,Heeger小组发现了光致电子转移的现象,当使用富勒烯作为电子受体材料的时候,激发态的电子能够有效地被 C_{60} 分子吸收。富勒烯这种表面共轭结构的大分子,可以有效地稳定外来电子,使其在 C_{60} 原子轨道形成的分子轨道上离域,使得激子可以在双层D/A异质结的膜界面上高效地完成电荷分离的过程^[19]。自此,富勒烯作为一种突出的电子受体材料开始得到了越来越广泛的应用。

1.3.3 共混型D/A异质结结构电池

20世纪90年代后期,科学家们提出了一种新型电池结构——共混型D/A本体异质结太阳能电池(bulk-heterojunction)^[20-23]。双层D/A异质结结构的太阳能电池的软肋在于它的界面,激子只能在界面附近的区域完成有效的分离,而离界面较远地带的激子分离之后还未到达界面就又会重新与空穴结合,所以光电转换效率一直无法得到质的飞跃。于是,科学家们提出将电子的给体材料和受体材料按照一定比例混合,溶解于同一种溶剂中制成薄膜,通过溶液旋涂的方法在基底上形成一个纳米级别的混合薄膜结构,由于D相和A相相互渗透形成网络连续相,能够大大提高给体材料和受体材料的接触面积,激子能够在给受体界面上有机离解,从而增大了电荷分离效率,使得电荷分离的过程更为快速、有效,从而大幅提高能量转换效率。同时正负载流子可以快速地传输到电极形成光伏效应,大大弥补了空穴迁移率和电子迁移率的不足,光生载流子在到达电极之前复合的概率大为降低。在该体系中,微相分离的互相渗透的连续网络对光电特性有着重要意义。因此,这一类本体异质结结构的太阳能电池由于在激子电荷分离的有效性和载流子传输的优越性上都略胜一筹而得到了长足发展。时至今日,基于这一结构的单层太阳能电池的光电转换效率已达到约10%^[21]。

此类型的有机太阳能电池可依据其结构分为正向和反向两种类型^[24,51],如图1-5所示。

正向结构的有机太阳能电池的基片由玻璃、聚酯或其他一些透明材料组成,可以使入射光完全透过,一般是在玻璃上覆盖钢锡氧化物ITO。为防止光活性层(active layer)和电池的阳极之间形成电荷捕获中心,通常会在它们之间加入阳极缓冲层聚(3,4-亚乙二氧基噻吩)-聚(苯乙烯磺酸)(PEDOT:PSS),它不仅能阻隔电子,帮助空穴顺利传输至阳极,还能使得ITO基片的表面变得更加平滑,使得光活性层能够很好地铺展。光活性层一般由给体和受体材料组成,通过共混旋涂的方式形成光活性层薄膜位于电池的两极中间。在光活性层和电池的阴极中间插入阴极界面修饰层,在阻隔空穴的同时还能帮助电

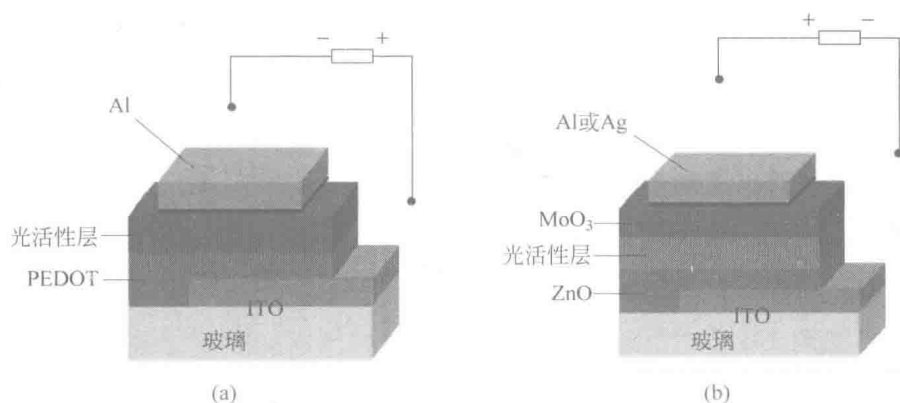


图 1-5 典型共混型 D/A 本体异质结太阳能电池的正向器件结构(a)和反向器件结构(b)

子有效传输,在光活性层上形成保护,防止高温蒸镀金属电极对光活性层性能的破坏。电池的金属电极材料一般为铝(Al)等具有合适功函数的金属,以实现电子的最佳传输状态。

为了能够很好地收集电子,正向结构的有机太阳能电池的阴极一般都是采用低功函数的金属,这类金属电极较为活泼,与空气接触后易与空气中的水和氧反应,影响器件的寿命。反向结构的太阳能电池中,为了防止具有腐蚀性和易吸水的 PEDOT-PSS 材料在旋涂和退火处理时对光活性层的破坏,一般使用蒸镀的 MoO_3 作为空穴传输层。其结构通常以 ITO 基片作为阴极,金属电极 Ag 作为阳极,依次加入阴极界面修饰层、光活性层和空穴传输层(如 MoO_3)。收集空穴的阳极一般为不活泼金属,即用稳定性良好的 Ag 取代低功函数稳定性欠佳的 Al,这类金属与空气接触时不易与空气中的水和氧反应,从而能大幅提高有机太阳能电池的寿命。这些因素决定了反向电池具有更优于正向器件的稳定性和高效性,从而得到了越来越广泛的应用。

1.3.4 叠层有机太阳能电池

此外,科研工作者们还提出了一种新型的基于共混型 D/A 本体异质结结构的电池——叠层串联太阳能电池^[25]。单节太阳能电池并不能吸收所有波长的太阳光,为了使太阳辐射的利用更为有效,最直接的办法就是将光吸收范围互补的光活性层堆积,得到叠层的有机太阳能电池。经典的叠层太阳能电池一般由两个部分组成,如图 1-6 所示,第一层是以宽带隙材料作为光活性层的电池,第二层是以窄带隙材料作为光活性层的电池,两层电池中间一般有连接层,通常是第一层电池的空穴传输层(PEDOT-PSS)和第二层电池的阴极修饰层(ZnO)。宽带隙的材料作为叠层器件的第一层,负责吸收高能量的光子,从而为器件提供了更高的 V_{oc} 。与传统单一光活性层的电池相比,这种新型的串联

叠层电池可以大幅降低光电子在转化过程中光能的热损耗,还可以实现开路电压的最大化。杨阳小组报道的叠层太阳能器件的能量转换效率最高可达到 10.6%^[25],同时该小组还提出器件的光吸收波长最多扩展到 900 nm,而最理想的光活性层的膜厚应该控制在 100 nm 左右,这样可以控制全部的光吸收在 60%~80%之间。此外,他们还提出了基于同一个光活性材料的子电池单元去构建串联的叠层光伏器件,同样可以通过最大限度地增加光吸收来改善能量转换效率。这种基于同一子电池单元堆积的叠层器件能量转换效率最高值已达到 10.2%^[25b]。

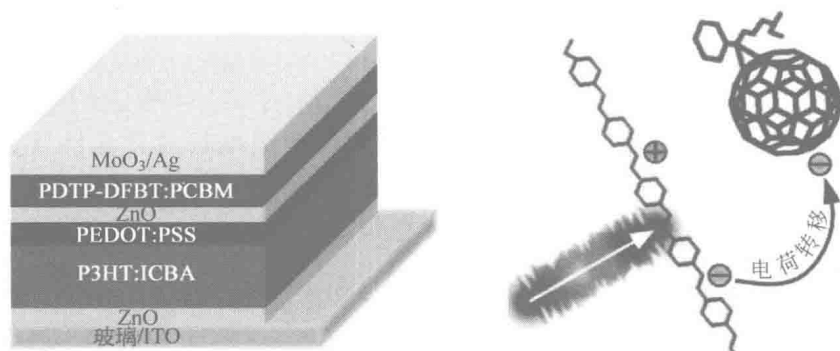


图 1-6 叠层太阳能电池的结构和电荷转移示意图

1.4 有机太阳能电池的工作原理

有机太阳能电池的工作原理见图 1-7。一般大致可以分为这样几个过程:①光的吸收和激子的产生;②激子的扩散和解离;③载流子的传输;④电荷的收集。对应的损失机制见图 1-8^[26-28]。

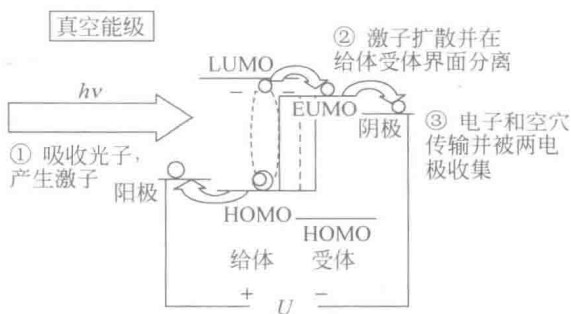


图 1-7 太阳能电池的工作原理示意图