

# 2017年有机功能材料研发热点回眸

孟瑞璇, 卢秋霞, 解士杰

山东大学物理学院; 晶体材料国家重点实验室, 济南 250010

**摘要** 从高效柔性有机半导体器件、高效有机太阳能电池、高效有机白光二极管、有机光伏器件的磁效应、有机自旋光伏器件设计等5个方面, 盘点了2017年有机功能材料领域的重要研究进展; 从有机电子学、有机光电子学和有机自旋电子学等多个角度, 回顾了有机功能材料新奇的物理现象及原理; 预测了该领域未来的发展方向。

**关键词** 柔性有机半导体; 有机光伏器件; 有机发光二极管; 有机自旋电子学

自20世纪70年代首例有机导电高分子聚合物聚乙炔发现以来<sup>[1]</sup>, “导电塑料”的出现不仅打破了有机材料绝缘的传统观念, 也打开了有机半导体领域的大门, 该项成果并因此获得了2000年诺贝尔化学奖。最初, 有机半导体仅突出表现为其独特的电性质, 也就是柔性导电塑料。随着研究不断深入和合成及探测技术的逐渐发展, 20世纪90年代有机材料又表现出优越的光学性能, 例如正负载流子在有机材料内复合发光或光照条件下聚合物内可以产生自由载流子, 也就是目前所熟知的有机发光二极管(OLED)或有机太阳能电池(OSC)原理。这些研究成果和理论架构逐步形成了有机光电子学这一学科。而近十几年, 在完善有机光学和电学特性的同时, 有机材料再次刷新人们的认识, 表现出新奇的自旋电子学效应。例如, 在不含有任何磁性元素的有机材料内, 其电光性会表现新奇的磁效应<sup>[2-3]</sup>。自旋信息在有机半导体实验中屡屡出现新奇的现象促使有机自旋电子学开始蓬勃发展。

有机功能材料资源丰富, 价格低廉, 并集质轻、柔

性、可拉伸、光谱可调、可大面积制备等优势于一身, 成为最具发展前景的人工材料。其相关研究与应用逐步涉及众多领域, 例如航空、电子消费、医疗保健、机器人和工业自动化等, 也吸引了涉及物理、化学、材料、信息、生物、医学等不同学科科研工作者的兴趣, 开启了从实验室走向市场的崭新旅程。

碳基材料是材料领域的庞大一族, 既包括金刚石、石墨、石墨烯、碳纳米管和碳团簇等全碳材料, 也包括由碳、氢、氧、氮等轻元素组成的有机小分子和高分子聚合物材料, 以及有机金属络合物、有机-无机复合材料。有机材料独特的功能性来源于碳原子最外层电子的杂化方式, 其 $sp$ 、 $sp^2$ 和 $sp^3$ 杂化的多样性带来了有机材料结构和性质的丰富性。其 $sp^2$ 的电子杂化使得材料内形成连通的电子传输通道, 为能量和载流子的传输提供可能。但另一方面, 这种特殊的电子结构也是有机体内诸多问题的来源。在晶态的聚合物体系内, 由于有机材料的分子骨架被连通的电子关联, 电子在传输通道内运动的过程中, 会同时引起分子骨架的运动,

收稿日期: 2017-12-19; 修回日期: 2018-01-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(11574180); 高等学校学科创新引智计划项目(B13029)

作者简介: 孟瑞璇, 博士研究生, 研究方向为有机光电子学, 电子信箱: rxmeng@foxmail.com; 解士杰(通信作者), 教授, 研究方向为有机自旋电子学, 电子信箱: xsj@sdu.edu.cn

引用格式: 孟瑞璇, 卢秋霞, 解士杰. 2017年有机功能材料研发热点回眸[J]. 科技导报, 2018, 36(1): 46-52; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.01.005

就像电子被晶格“黏连”需要拖着附近笨重的晶格共同行走,导致有机材料的迁移率很低。这种电子和晶格相互“黏连”的作用被称为电子晶格耦合,也称电声耦合。正是因为这种相互作用,有机材料才会显示出独特的电磁光性质,出现很多有趣的现象,例如有机半导体材料内的载流子不是通常的电子或空穴,而是具有自陷态特征的孤子、极化子或双极化子,它们具有独特的电荷-自旋关系。在实际利用有机功能材料制备器件的过程中,一方面需要充分发挥有机材料的功能性,另一方面又要避免这种耦合带来的负面效应。合理控制和利用有机功能材料需要对其有更加深入的研究。

2017年有机功能材料领域取得诸多突破性进展,进一步加快了有机功能材料市场化、商业化的步伐。本文盘点2017年若干具有代表性的工作成果,概述有机功能材料在力学、光学和电磁学等方面的重大进展。力学方面主要介绍最新合成的柔性有机半导体器件,光学方面主要介绍目前最高光电转换效率的聚合物太阳能电池和最优的白光二极管,电磁学方面主要介绍有机光伏器件的基态自发磁化和激发态磁性以及自旋光伏器件设计。

## 1 研究热点

### 1.1 高效柔性有机半导体器件

柔性可穿戴电子器件在身体检测、体内植入治疗、电子皮肤等生物医学领域有着巨大的应用前景,是前沿科学研究热点之一(图1)<sup>[4-5]</sup>。人体在运动过程中,不可避免会导致电子器件形变,这就要求可穿戴电子器件在具备良好电性能的前提下,兼具优越的柔韧性、可拉伸性。一种策略是通过引入褶皱、波纹状图案或采用剪纸工艺等器件构型设计手段,赋予其良好的柔韧性,但是该方法制备过程复杂且成本高昂,难以实现商业化制备。另一种策略是采用本身具备柔性特征的导电材料进行电子器件构筑,能够显著提高其力学性能,有机光电功能材料的出现提供了这种可能性。对共轭聚合物分子进行结构优化、共混掺杂改性以及纳米线/纤维网络结构的构筑能够显著提升器件的柔性,但有可能导致其载流子迁移率降低,使其性能受到限制,仿佛“鱼和熊掌不可兼得”。

美国斯坦福大学鲍哲南研究组采用了一种基于聚合物纳米限域效应的策略来提高聚合物半导体的可拉

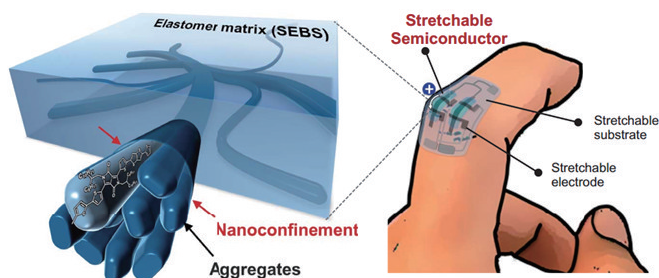


图1 高拉伸度、可穿戴的薄膜晶体管及其材料微观结构

伸性,并且不影响电荷迁移率<sup>[6]</sup>。纳米限域效应是指将聚合物限制在纳米尺度,基于尺寸效应和界面效应,能够限制聚合物大尺寸晶体的生成,增强无定型区域的聚合物分子链动力学,从而对聚合物的物理性能产生显著影响,如降低聚合物的模量、玻璃化转变温度,提高聚合物的韧性等。基于上述效应,鲍哲南团队将表面能相匹配的共轭聚合物 DPPT-TT 与弹性体 SEBS 进行纳米尺度共混,使共轭聚合物与弹性体相分离,产生纳米限域效应,以抑制聚合物结晶、增强聚合物链的运动能力,从而制备了高电荷迁移率的柔性半导体器件。该研究成果发表在2017年1月6日的《Science》杂志上,这种可拉伸导电塑料能够很好地运用到可穿戴设备中,甚至还能够植入生物体内而不危害身体健康。这样的新型材料能够为未来科技的进步和改善人们生活带来巨大的帮助,无疑加速了柔性电子时代的来临。

### 1.2 有机太阳能电池光电转换效率再创历史新高

有机太阳能电池(OSC)是一种利用有机功能材料将太阳能转换成电能的新型光伏技术。与无机太阳能电池相比,它的优点是耗材廉价、重量轻、制备过程无污染、可通过印刷的方式大面积制备、可弯折折叠等。评价有机太阳能电池性能的主要参数是光电转换效率,而活性层是决定电池转换效率的关键因素。它主要由p型半导体材料和n型半导体材料构成。活性层吸收太阳光产生的激发态,也就是激子,借助两种材料的化学势差异发生电子-空穴解离,产生自由载流子对外电路供电。研究者可以通过分子设计策略优化这两种半导体材料的基本性能,例如展宽两者的吸收光谱、调整分子能级及提升迁移率,从而提升开路电压、短路电流、填充因子,优化电池的光电转换效率。大多数的聚合物太阳能电池采用富勒烯衍生物为受体材料,基于这两者的高性能电池光电转换效率约在11%。但是

富勒烯基的太阳能电池存在巨大的能量损失问题,这对进一步提升光电转换效率是巨大的障碍。而最近有研究显示,部分非富勒烯的小分子是一个颇具潜力的受体材料,光伏效率可达12%,因此受体小分子的结构设计对进一步提升效率至关重要。

目前有效的分子设计方法主要有给受体结构修正、侧基修饰等。通过这些方法,分子的前线轨道和能带结构、分子间相互作用都会得到一定程度的改变。其中,已证明利用具有负电性的氟进行分子修饰是一种行之有效的办法。中国科学院化学研究所侯剑辉课题组,通过分别对聚合物给体PBDB-T和小分子受体ITIC材料加氟的分子策略设计合成了PBDB-T-SF和IT-4F,这种新的材料组合得到超过13%的光电转换效率(图2)<sup>[7]</sup>,原因在于氟化的有机分子有几个明显的优势:1) 氟化效应同时下移最高占据分子轨道(HOMO)和最低未占分子轨道(LUMO),而不会导致目标分子的强空间位阻。2) 由于F和H,S和F等之间的非共价相互作用,在氟化分子中观察到增强的分子间/分子内相互作用,这提高了它们的结晶度,从而促进电荷传输。3) 氟化后的分子有更强的极化,降低了电子-空穴之间的束缚能,并且氟化半导体材料有时具有比其非氟化分子更高的吸收系数。此外,基于PBDB-T-SF:IT-4F的电池表现出较好的膜厚容忍性。他们的研究同时表明该类器件有较好的稳定性。该成果发表在2017年5月13日的《Journal of American Chemical Society》杂志上。这一研究成果表明非富勒烯有机太阳能电池具有更为广阔的发展空间,在未来的工业化应用中具有巨大的潜力。

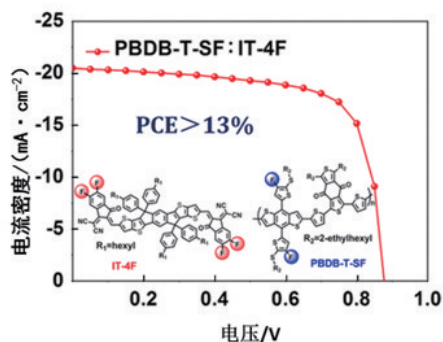


图2 氟化的二元异质结电池电流-电压曲线及最高光电转换效率

2017年是有机光伏器件效率屡创新高的一年。继上半年达到13%的光电转换效率后,2017年底,国家纳

米科学中心丁黎明课题组利用三元太阳能电池再次刷新了有机光伏转换效率的最高值。

在普遍的二元体系有机太阳能电池中,给受体共混形成纳米尺度互穿网络结构,可提供足够激子解离的界面和载流子快速传输的通道。但在二元体系内,由于有机共轭分子有限的光吸收范围,活性层吸光范围较窄,不能充分覆盖太阳辐射光谱,造成了光能根本上的损失。由互补吸收的多种材料构筑的多元有机太阳能电池便成为另一个研究热点。

丁黎明课题组<sup>[8]</sup>将富勒烯受体PC<sub>71</sub>BM引入CO<sub>8</sub>DFIC和PTB7-Th的二元体系中,经过系统优化,获得14.08%的光电转换效率,该效率为目前报道的单节有机太阳能电池最高值。添加一定量的PC<sub>71</sub>BM,使活性层在短波和长波区的吸光能力明显增强,活性层电子迁移率明显提高,实现了更加平衡的载流子传输,电荷复合被进一步抑制,短路电流和填充因子有显著提高。该三元电池在近红外区有较高的外量子效率,响应波长达1050 nm(图3),该研究成果发表在2017年11月2日《Science Bulletin》杂志上。

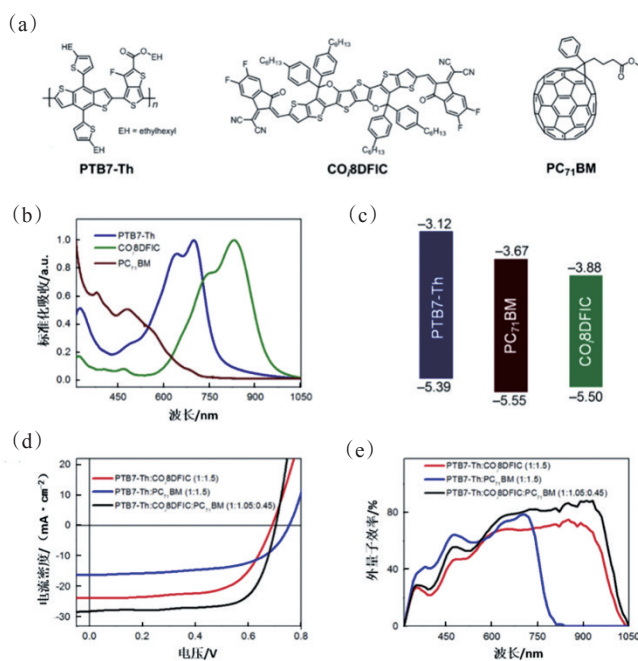


图3 三元太阳能电池的给受体材料以及器件性能参数

### 1.3 高效有机单分子白光 OLED

有机发光二极管(OLED)是一种能在较低的电压下将电能转化为光能的器件,能为人们日常生活提供方便。OLED核心部件由有机发光材料构成。一方面要求有机层发光尽可能在可见光区域,满足照明和显

示的需求。另一方面需要在满足发光亮度的基础上提升发光效率,以节约成本。而白光OLED则要求更为苛刻,除需满足上述要求,还要有很好的发光色度。尽管白光OLED的实现难上加难,但在照明和显示领域表现出巨大的应用前景仍然吸引了众多研究者的兴趣。自1994年日本山形大学Kido工作组报道的首个白光有机发光二极管<sup>[9]</sup>,白光OLED经过20多年的发展,器件性能和理论研究都有了长足的进步。

与单色光不同的是,白光需要通过混合至少2个互补色光得到。因此很多白光OLED的核心部件是把覆盖全光谱的有机分子结合起来形成的多组分的复合物,用来进行多光复合。如此一来,这种复合的发光层将面临相分离、器件老化、色度不稳定等问题。相对而言,单分子白光发射体则表现出更优越的性能,例如没有相分离、没有色老化、更优的稳定性、更优的可重复性、更简单的器件制造流程等,所以单分子发光体的研究与合成更加吸引眼球。

单分子白光需要同时获得两束不同的光用来颜色混合。原则上通过单分子第一激发态和第二激发态共同辐射跃迁发光,获得白光的几率就会大大提升。但是使这两种激发态合成白光需要二者的寿命、数量、能量等参数相匹配,这对于单分子发光体而言该限制条件过于苛刻,因此一直以来没有单分子纯磷光白光发射体。最近香港科技大学唐本忠和中国科学院化学研究所彭谦等报道了几种含有羰基(C=O)、重卤素原子(F、Cl或Br)和 $\pi$ -延伸硫茈萘基团的纯有机磷光体,在晶态均显示出室温磷光(RTP)发射现象<sup>[10]</sup>。有趣的是,在CIBDBT分子中可观察到纯白色磷光发射,其CIE1931色度坐标为(0.33,0.35)。白光发射来自两种具有不同波长和寿命的室温磷光能带混合。该研究成功地攻克了单分子白光OLED的历史难题,并在2017年9月的《Nature Communication》杂志上发表(图4)。研究人员也证实系统内混合低激发和高激发的三线态发射双重室温磷光是一种构筑无金属纯磷光的单分子白光OLED通用的策略。

除了多色度白光混合,发光效能是白光OLED另一个亟待解决的问题。之前的OLED只具有40~60 lm/W的发光效能,虽然部分已经满足商业化要求的100 lm/W,所应用的技术也是复杂的外部光学耦合技术。发光效能的理论上限为240 lm/W,且没有任何外部耦合技术的单器件超过100 lm/W的效能一直是研发高效的白光

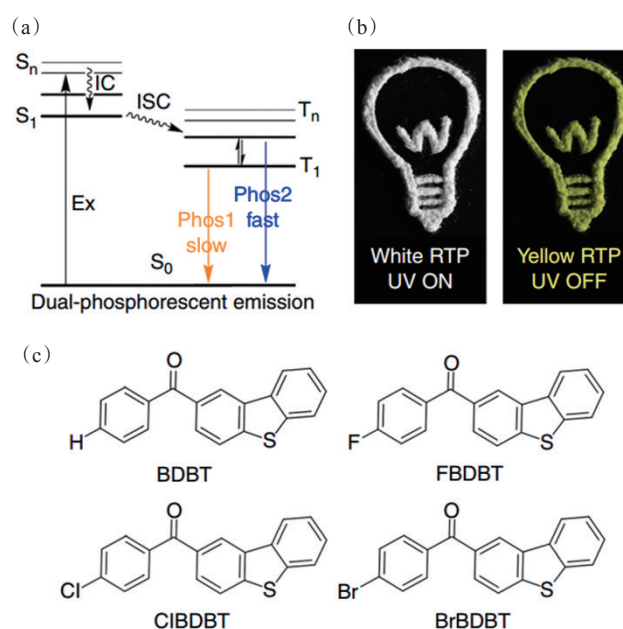


图4 单分子白光OLED发光机理及分子结构

OLED的一个瓶颈。而高发光效能需要满足3项重要指标:外量子效率高、电子和空穴注入层相对发光层的注入势垒需要被完全解除、主客体能量输运和无激子泄漏器件的构型。

苏州大学冯敏强团队通过采用激光复合物作为主体,将其与彩色磷光染料混合的方法,使得发光效率得到显著提高(发光效能为105.0 lm/W,电流效率为83.6 cd/A,外量子效率为28.1%),同时实现了良好的色彩稳定性<sup>[11]</sup>。多次实验的峰值发光效能和外量子效率分别为210.0 lm/W和56.2%,非常接近理论的上限效率。除了说明激子约束对整体器件性能的影响外,该团队还描述了“零”注入或传输屏障的重要性,并且几乎没有能量损耗,通过合理设计器件结构达到高发光效率。该研究成果发表在2017年6月14日《Advanced Functional Materials》杂志上,为超高发光效率的OLED在显示和照明领域的市场化和商业化起到了积极地推动作用。

#### 1.4 有机电荷转移复合物的铁磁性机理

铁磁性常存在于过渡金属无机材料中,如Fe、Co、Ni。根据洪特定则,如果原子的最外层轨道是非满占据的,则电子优先平行排列,产生磁性。而在纯有机材料中,原子序数小,自旋相关的相互作用微弱,表现磁性似乎不太可能。但是,将开壳层的自由基与大分子耦合,可以出现长程的自旋关联效应,分子显示出铁磁性,如POLY-BIPO。2012年Temple大学任申强课题组

在 P3HT 纳米线和富勒烯 ( $C_{60}$ ) 的复合物光伏器件中发现了室温下的铁磁性。这两种材料都是有机太阳能电池的常用材料,并且实验证实单组分的 P3HT 纳米线和  $C_{60}$  是不显示磁性的,由此可以推断,磁性一定来源于 P3HT 纳米线和  $C_{60}$  复合物之间的相互作用。更为有趣的是,这种铁磁性不仅可以在黑暗条件下产生,在光照条件、电场作用和机械压力下,材料的磁性都有了明显的增强(图 5)<sup>[12]</sup>。2014 年,他们在半导体 SWCNT 和  $C_{60}$  组成的异质结和 P3HT 纳米线和 PCBM 组成的异质结中也发现了类似的激发铁磁性(图 6)<sup>[13-14]</sup>。如何解释这种室温下有机电荷转移物的激发铁磁性,以及如何找到具有更强激发铁磁性的有机复合物成为需要研究的问题,因此对此理论上的解释也成为必要的一步。

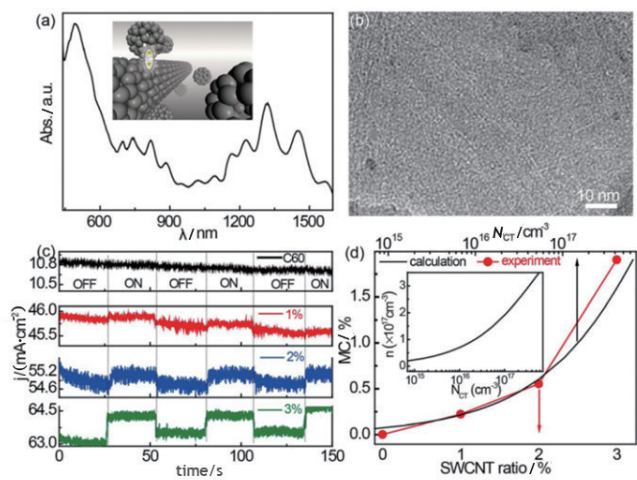


图 5  $C_{60}$ -SWCNT 纳米线结构以及黑暗/光照条件下的磁响应强度

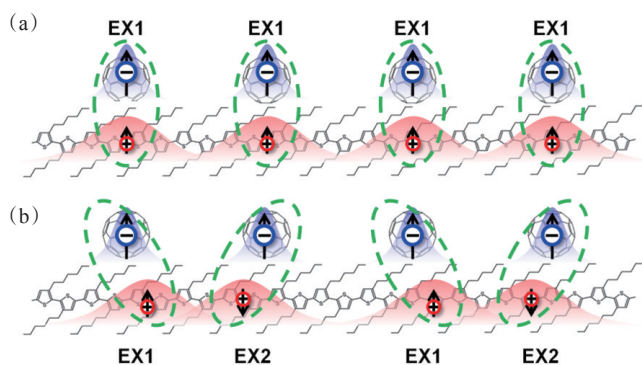


图 6 P3HT/ $C_{60}$  复合物激发磁矩结构示意图

山东大学解士杰课题组长期致力于有机功能材料研究,特别是有机自旋电子学的理论研究。将有机材

料的软特性,即电声耦合,与库仑相互作用、自旋-轨道耦合、超精细相互作用等相结合是准确认识有机自旋注入、输运、探测;有机磁场效应;有机泵浦和有机多铁等丰富特性的基本出发点。他们认为,电荷转移打破了 P3HT 和 PCBM 等分子的闭层结构,由于电子和空穴分处于不同的有机分子内,它们具有不同的自旋极化,从而导致整体出现净磁矩。通过构建分子模型,成功解释了有机电荷转移复合物中激发铁磁性的来源。通过增加光强提高转移电荷浓度,实验和理论都发现系统磁性会进一步增强<sup>[15-16]</sup>。该项研究发表在 2017 年 8 月 21 日的《Scientific Report》杂志上,为有机自旋电子学中有磁性的调控、有机电荷转移复合物的潜在应用提供了强大的理论支撑。

### 1.5 有机多功能分子器件设计

有机小分子或高分子聚合物半导体材料主要由原子序数较低的轻元素组成,其自旋-轨道耦合作用弱、自旋弛豫时间长,在实现高效自旋输运方面蕴藏着巨大潜力。将有机半导体材料中自旋信息的有效调控与丰富的光电性质相结合,进而实现光、电、磁等多方面的功能性,是探索构建全新功能性有机自旋电子器件并实现有机自旋电子学研究领域突破和应用的新途径,也是自旋电子学中的新兴研究方向。近年来,基于有机半导体材料的自旋存储器件、自旋-发光二极管器件、自旋光响应器件、自旋泵浦器件及逆自旋霍尔效应器件等不断涌现,极大地推动了有机自旋电子学应用研究的发展,并为功能性有机自旋器件的持续探索奠定了坚实的基础。

国家纳米科学中心孙向南和西班牙巴斯克纳米科学中心 Hueso 等合作,基于自旋阀的器件结构和富勒烯 ( $C_{60}$ ) 分子材料,采用低温速控技术制备了具有全新功能的分子自旋光伏器件<sup>[17]</sup>。该器件的独特之处在于利用磁场调控太阳能电池开路电压,并在室温下利用特定操控模式实现可控完全自旋极化电流输出、磁控交流电信号输出、磁控电池开关等功能。由此可见,分子自旋光伏器件在光、磁复合场作用下,输出电流与复合电流相异的自旋相关性是实现全新自旋器件功能性的关键。

该分子自旋光伏器件具有典型的分子自旋阀结构,由两个铁磁电极 Co 和  $Ni_{80}Fe_{20}$  与富勒烯分子中间层组成。在自旋阀模式下,一个铁磁电极用于向富勒烯半导体层中注入自旋极化载流子,另外一个铁磁电极

用于自旋检出,而自旋极化的载流子通过富勒烯薄膜实现自旋输运。在恒定偏压下,该器件输出电流随两个铁磁电极的相对磁化方向变化。该器件优化后在室温下实现了6.5%的磁电流,可用于实现室温信息存储功能(图7)。

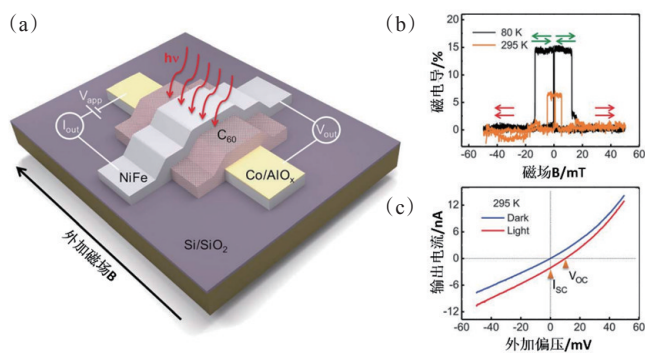


图7 分子自旋器件结构及其磁电流和光伏特性

另外,分子自旋光伏器件作为一个简单的分子光伏电池,在 $7.5 \text{ mW/cm}^2$ 白光照射下可观察到微弱的光伏效应,虽然光电转换效率远远不足以应用于光伏产业,但产生的微弱光伏电压已足够用于操控自旋。在短路条件下,富勒烯层中的光生载流子受内建电场的驱动扩散到两个铁磁电极,产生输出电流,这些载流子因为通过磁性电极输出后在极短的时间内完全自旋弛豫,因此并不会产生自旋阀效应;而在开路条件下,改变两侧电极的相对取向,会检测到不同的开路电压,而这种不同的开路电压是由界面电极处不同的载流子浓度造成的,因此该器件可以检测分子材料/阳极界面处积累的自旋极化电荷的浓度。

总体来说,该研究团队提出的分子自旋光伏器件首次实现了外部磁场和光照作用下自旋和电荷的相互耦合作用;作为一种新型器件,在高灵敏度光、磁复合场传感器,单器件磁控电流转换等方面具有潜在的应用价值;相较于传统的分子自旋阀,该器件获得相同磁电流响应信号的运行功率降低至1%以下;该器件复杂功能性的实现和原理分析还可应用于分子半导体材料自旋输运和自旋光电子学等研究领域的探索中,为有机自旋电子学自旋探测、光伏性能改善、自旋调控以及内在机制的研究提供了重要的实现手段。该研究成果发表在2017年8月18日的《Science》杂志上。

## 2 结论

有机功能材料凭借其柔软的力学特性和丰富的电磁光性能为人类社会的发展提供了无限的可能;有机功能材料内部独特的相互作用为材料物理基础研究带来了新鲜活力。2017年有机光电材料在力学、电磁学和光学性能上的重大突破,为有机功能材料和器件的发展添加了浓墨重彩的一笔。该领域在本年度取得的丰硕成果远不止于此,并且一些新兴的有机结构和奇异特性崭露头角,比如有机钙钛矿结构、有机电荷转移结构、有机手性结构,其性质体现为丰富的有机铁磁性、铁电性及磁电耦合性等<sup>[13-14,18-20]</sup>。从中可发现,有机功能材料与技术发展迅速,有机电子产品的数量与日俱增,应用领域越来越广泛,这预示着更加环保、高效、舒适、人性化的有机时代的到来指日可待。同时,有机材料仍然存在许多新奇的物理现象需要探索和发现。期待在新的一年里会有更多、更具划时代意义的理论工作和实验成果为有机功能材料研发增光添彩。

**致谢:**在本文撰写过程中,得到了秦伟教授的指导。

## 参考文献(References)

- [1] Chiang C K, Fincher C R J, Park Y W, et al. Electrical conductivity in doped polyacetylene[J]. *Physical Review Letters*, 1977, 39(17): 1098-1101.
- [2] Dediu V, Murgia M, Maticotta F C, et al. Room temperature spin polarized injection in organic semiconductor[J]. *Solid State Communications*, 2002, 122(3): 181-184.
- [3] Kienberger R, Goulielmakis E, Uiberacker M, et al. Atomic transient recorder[J]. *Nature*, 2004, 427(6977): 817-821.
- [4] Rao Y L, Chortos A, Pfattner R, et al. Stretchable self-healing polymeric dielectrics cross-linked through metal-ligand coordination[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2016, 138(18): 6020-6027.
- [5] Oh J Y, Rondeau G S, Chiu Y C, et al. Intrinsically stretchable and healable semiconducting polymer for organic transistors[J]. *Nature*, 2016, 539(7629): 411-415.
- [6] Xu J, Wang S, Wang G N, et al. Highly stretchable polymer semiconductor films through the nanoconfinement effect[J]. *Science*, 2017, 355(6320): 59-64.
- [7] Zhao W, Li S, Yao H, et al. Molecular optimization enables over 13% efficiency in organic solar cells[J]. *Journal of the*

- American Chemical Society, 2017, 139(21): 7148–7151.
- [8] Xiao Z, Jia X, Ding L. Ternary organic solar cells offer 14% power conversion efficiency[J]. Science Bulletin, 2017(62): 1562–1564.
- [9] Kido J, Hongawa K, Okuyama K, et al. White light-emitting organic electroluminescent devices using the poly(N-vinylcarbazole) emitter layer doped with three fluorescent dyes[J]. Applied Physics Letters, 1994, 64(7): 815–817.
- [10] He Z, Zhao W, Lam J, et al. White light emission from a single organic molecule with dual phosphorescence at room temperature[J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 416.
- [11] Wu S, Li S, Wang Y, et al. Organic light-emitting diodes: White organic LED with a luminous efficacy exceeding 100  $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$  without light out-coupling enhancement techniques [J]. Advanced Functional Materials, 2017(27): 1701314.
- [12] Ren S, Wuttig M. Organic Exciton Multiferroics[J]. Advanced Materials 2012, 24(6): 724–727.
- [13] Wei Q, Gong M, Shastry T, et al. Charge-transfer induced magnetic field effects of nano-carbon heterojunctions[J]. Scientific Reports, 2015, 4(4): 6126.
- [14] Qin W, Jasion D, Chen X, et al. Charge-transfer magnetoelectrics of polymeric multiferroics[J]. Acs Nano, 2014, 8(4): 3671–3677.
- [15] Han S, Yang L, Gao K, et al. Spin polarization of excitons in organic multiferroic composites[J]. Scientific Reports, 2016 (6): 28656.
- [16] Liu Y, Han S, Ma X, et al. Ferromagnetic mechanism in organic photovoltaic cells with closed-shell structures[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 8384.
- [17] Sun X, Vélez S, Atxabal A, et al. A molecular spin-photovoltaic device[J]. Science, 2017, 357(6352): 677–680.
- [18] Qin W, Xu H, Hu B. Effects of spin states on photovoltaic actions in organo-metal halide perovskite solar cells based on circularly polarized photoexcitation[J]. Acs Photonics, 2017 (4): 2821–2827.
- [19] Qin W, Xu B, Ren S. An organic approach for nanostructured multiferroics[J]. Nanoscale, 2015, 7(20): 9122–9132.
- [20] Qin W, Gong M, Chen X, et al. Multiferroicity of carbon-based charge-transfer magnets[J]. Advanced Materials, 2015, 27(4): 734–739.

## Progresses of organic functional materials in 2017

MENG Ruixuan, LU Qiuxia, XIE Shijie

State Key Laboratory of Crystal Materials; School of Physics, Shandong University, Jinan 250010, China

**Abstract** In order to review the significant progress made in the field of organic functional materials in 2017, the latest research achievements are summarized in terms of organic semiconductor flexibility, organic solar cell efficiency, organic light emitting diode efficiency, magnetic effect of organic photovoltaic devices, and spin photovoltaic device design. The novel phenomenon and principle of organic functional materials in the field of organic electronics, organic optoelectronics and organic spintronics are reviewed and analyzed, and the future development in this field is also predicted.

**Keywords** flexible organic semiconductors; organic photovoltaic devices; OLED; organic spintronics ●



(责任编辑 傅雪)