

## 光在有机太阳能电池中的约束与捕获

肖 啸<sup>1,2,3,4</sup> 谢世伟<sup>1,3,4</sup> 张志友<sup>1,3,4</sup> 李淑红<sup>1,3,4</sup> 侯宜栋<sup>1,3,4</sup>刘 愈<sup>1,3,4</sup> 胡德娇<sup>1,3,4</sup> 高福华<sup>1,3,4</sup> 杜惊雷<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup> 四川大学物理科学与技术学院 纳光子技术研究所, 四川 成都 610064  
<sup>2</sup> 乐山师范学院物理与电子工程学院, 四川 乐山 614000  
<sup>3</sup> 四川大学 高能量密度物理及技术教育部重点实验室, 四川 成都 610064  
<sup>4</sup> 四川大学 中英联合材料研究所, 四川 成都 610064

**摘要** 有机太阳能电池吸光活性层的电学传输特性和光学吸收特性不匹配,是制约其能量转换效率提升的主要原因之一。采用陷光结构操纵入射光波,提升电池对光的约束和捕获能力以达到“电学薄”和“光学厚”的等效作用,是解决有机太阳能电池光电矛盾的有效手段。从光学和电学的双重视角考察了单结有机太阳能电池的运行机理,详细讨论了等离子体、光子晶体等各类结构的陷光原理与特点,展望了有机太阳能电池陷光结构的发展趋势,有助于拓展其设计思路和理解下一代太阳能电池的先进光学管理理念。

**关键词** 光学器件;陷光结构;有机太阳能电池;活性层;激子

中图分类号 TM914.4 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.050006

## Confinement and Trapping of Light in Organic Solar Cells

Xiao Xiao<sup>1,2,3,4</sup> Xie Shiwei<sup>1,3,4</sup> Zhang Zhiyou<sup>1,3,4</sup> Li Shuhong<sup>1,3,4</sup>Hou Yidong<sup>1,3,4</sup> Liu Yu<sup>1,3,4</sup> Hu Dejiao<sup>1,3,4</sup> Gao Fuhua<sup>1,3,4</sup> Du Jinglei<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup> Institute of Nanophotonics Technology, College of Physical Science and Technology,  
Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

<sup>2</sup> College of Physics and Electronic Engineering, Leshan Normal University, Leshan, Sichuan 614000, China

<sup>3</sup> Key Laboratory of High Energy Density Physics and Technology, Ministry of Education, Sichuan University,  
Chengdu, Sichuan 610064, China

<sup>4</sup> Sino-British Materials Research Institute, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

**Abstract** The mismatch between electrical transmission properties and light absorption properties is one of the main reasons that limit the power conversion efficiency of organic solar cells. This contradiction could be efficiently resolved by light trapping structures which manipulate incident light and enhance light absorption. These structures essentially extend the photoactive layer thickness, therefore achieve light absorption equivalent to that of a much thicker layer, and nevertheless retain good charge transport properties of a thin layer. The characteristics and principles of these architectures such as plasmonics and photonic crystal are discussed in detail. The prospect of light trapping architectures is also presented. It may be helpful to expand the design ideas of organic solar cells and understand the advanced light management of the next-generation solar cells.

**Key words** optical devices; light trapping structure; organic solar cell; active layer; exciton

**OCIS codes** 230.0250; 230.2090; 160.4890

收稿日期: 2013-01-09; 收到修改稿日期: 2013-02-25; 网络出版日期: 2013-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(61078047)、四川省教育厅青年基金(11ZB133)和四川大学青年教师基金(2012SCU11085)资助课题。

作者简介: 肖 啸(1975—),男,副教授,博士研究生,主要从事信息光子学和太阳能电池等方面的研究。

E-mail: xiao\_scu@sohu.com

导师简介: 杜惊雷(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事信息光学、微光学、微电子光学和光电子器件等方面的研究。E-mail: dujl@scu.edu.cn(通信联系人)

## 1 引言

在当前的光伏应用市场中,晶体硅太阳能电池占主要地位,但未来的优胜者取决于成本、效率、寿命和具体的应用市场等多重因素。

与传统晶体硅太阳能电池相比,有机太阳能电池(OSC)具有与大面积柔性衬底制作相兼容、能够在较低温度下进行卷对卷生产以实现低成本大规模制作等优点,已成为近年来的研究热点<sup>[1~3]</sup>。同时,OSC还具有弱光照性能好、质量轻、半透明和可彩色化等特点,在实现发电功能的同时还具备观赏价值,被认为非常适合于光伏建筑一体化以及开拓一些新的应用领域,比如装饰、电子消费品、电子织物和电子皮肤等<sup>[4~8]</sup>。

一般来说,OSC活性层的光学吸收长度 $L_A$ 约100 nm量级,而激子的扩散长度 $L_D$ 仅为几纳米,远小于 $L_A$ <sup>[9,10]</sup>。增加活性层厚度能提高入射光的利用率和激子产额,但过厚的活性层将导致激子和载流子的复合几率增大,电池的电学性能下降;而降低活性层厚度虽然有利于激子离解和载流子的收集,但光能吸收不足,电池的光学性能下降。可见,OSC的 $L_A$ 和 $L_D$ 在长度上严重不匹配是制约其转换效率提升的主要原因之一。从电学的角度来看,希望有较薄的活性层以提升器件电学性能,而从光学的角度上讲,则希望活性层较厚以增加光能的吸收,因此,在设计中必须考虑光学性能和电学性能的匹配问题。实际上,在薄活性层条件下,有目的地设计一些陷光结构,延长光在活性层中的光程或调节光场分布而不增加活性层厚度是兼顾OSC光学和电学性能的有效解决方案。因此,发展能同时实现“电学薄”和“光学厚”等效作用的优秀陷光结构以提高能量转换效率(PCE)是近年来OSC研究的主要方向之一<sup>[11~13]</sup>。

OSC活性层一般仅100 nm左右,无法采用硅太阳能电池中的微米尺度“金字塔”或亚微米尺度“黑硅”陷光结构<sup>[14~16]</sup>,需另辟蹊径设计和制作纳米级或数十纳米尺度的陷光结构。同时,由于OSC材料具备柔性和可溶液处理等特点,为陷光结构的设计和制作提供了更多的思路。本文在考察了近年来提出的单结OSC陷光结构的基础之上,以结构特点为分类依据,详细分析各类陷光结构的特点及其光约束和捕获机理,展望了OSC陷光结构的发展趋势,有助于从光学和电学双重视角理解OSC的运行机理,拓展设计思路和应用先进光学管理手段。

## 2 等离子体陷光结构

表面等离子激元(SP)是金属(金、银、铜、铝等)费米能级附近导带上的自由电子受电磁场的驱动在金属表面产生集体振荡而辐射出的电磁波,可分为局域表面等离子激元(LSP)和表面等离子极化激元(SPP)。利用SP的瞬逝和增强特性,在远低于衍射极限的情况下操纵和约束入射光场,可用于增强薄膜OSC的吸光能力而不降低其电学性能。由于SP陷光结构使得在较小体积范围内获得较大增强吸收效应成为可能,被认为是应用于下一代太阳能电池设计中的最有潜力的先进光学管理技术<sup>[11,17]</sup>。目前OSC的SP增强吸收陷光结构主要有金属纳米粒子(MNP)和金属光栅电极(MGE)两大类<sup>[10~12]</sup>。

### 2.1 金属纳米粒子陷光结构

MNP可以作为亚波长散射中心和耦合中心约束和捕获入射光,其作用主要有等离子体光散射增强和光局域增强两种形式。均匀介质中,球形MNP对入射平面波的正向和反向散射几乎对称,但当MNP位于两种介质分界面时对称性被打破,介电常数大的介质中有更强的散射光<sup>[17]</sup>。具体的散射情况与MNP的金属种类、形状、尺寸、密度和周围介质环境等因素有关。MNP作为散射中心,可置于活性层顶部、底部或植入活性层内部,可随机或周期分布。以球形MNP置于活性层顶部为例(图1),其陷光机理如下:MNP将入射光大角度散射入活性层,超过某一临界角的散射光会被约束在活性层中反复反射而被吸收;其他散射到高反射率阴极的光被强

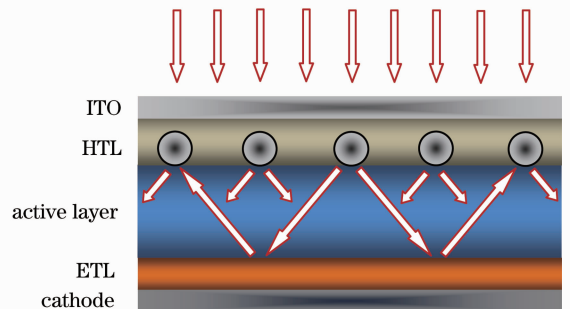


图1 MNP置于活性层顶层的光散射作用示意图  
Fig.1 Schematic diagram of light trapping by scattering from MNP at the surface of the active layer

烈反射,穿过活性层后再经 MNP 重新散射,如此散射-反射循环,使入射光的光程可增大数十倍<sup>[17]</sup>,达到良好的陷光效果。除了光散射作用外,MNP 还可作为亚波长天线耦合中心,将入射光的部分能量以 LSP 的形式约束在粒子周围,使光场产生强烈的局域增强,起到提高活性层光吸收能力的作用。图中 ITO 为氧化铟锡,HTL 为空穴传输层,ETL 为电子传输层。

## 2.2 金属光栅电极陷光结构

当入射光照射到有褶皱的金属膜结构时,在金属/介质的分界面上会产生 SPP。SPP 是金属表面自由电子与入射电磁场相互作用产生的沿金属表面传播的电磁波,在垂直于界面方向被限制在远小于波长范围的表面。

SPP 具有界面高度局域性和近场增强性的特点,其局域场的空间分布与 OSC 活性层厚度相当,并且其共振增强带宽与 OSC 活性层的吸收性质相匹配,因此受到了研究人员的重视。

将 OSC 的金属电极制作为光栅结构可激发 SPP。如在图 2(a)中,顶部为非金属透明阳极,底部为金属光栅阴极;而在图 2(b)中,顶部和底部均为金属光栅<sup>[20,21]</sup>,不过顶部的阳极光栅具有陷光和透光双重作用。图 2 所示 OSC 结构中的光场是多种光约束机理共同作用的结果,比如 LSP、SPP、法布里-珀罗(FP)共振和导波模式<sup>[23,24]</sup>。其中,FP 共振是薄膜谐振腔的干涉效应,导波模式是光在薄膜内部的内反射传播模式。对周期性光栅而言,LSP 和 SPP 均可能被激发,小周期时,LSP 模式占优势,大周期时 SPP 模式开始起主导作用<sup>[21]</sup>。

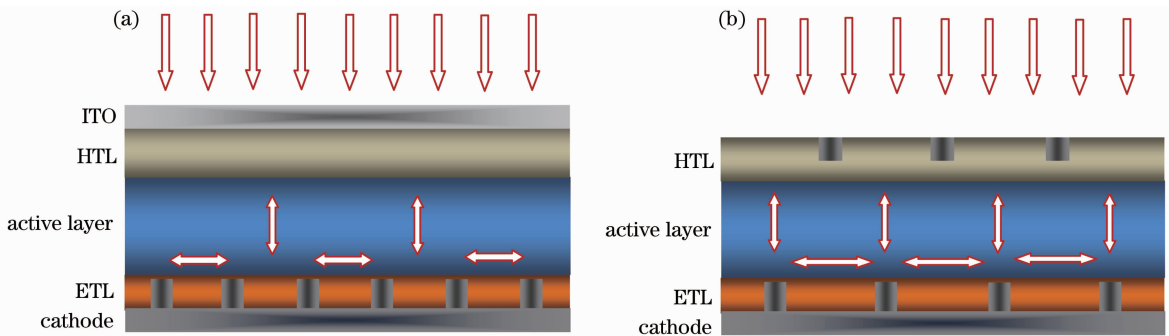


图 2 金属光栅等离子体陷光结构。(a)阴极光栅陷光结构;(b)阳极和阴极光栅陷光结构

Fig. 2 Plasmonic light trapping with metal gratings. (a) Metal cathode grating; (b) metal cathode and anode grating

然而,LSP 和 SPP 的增强吸收发生在特定的共振增强带宽,带宽范围取决于光栅周期、纳米粒子的尺寸、形状和局域介电环境。更不利的是,这些增强效应经常被金属在其他波带处的寄生吸收所抵消<sup>[25]</sup>。因此,等离子太阳能电池要走出实验室进入实用,实现宽带吸收增强是其主要的挑战。

## 3 光子晶体陷光结构

目前的 OSC 活性层大都采用给体和受体混合而成的体异质结薄层结构。体异质结内存在大量的给体-受体微相分离界面,激子扩散至给体-受体界面的机会远大于平面异质结,有利于激子分离为正负自由电荷,分离后的电子和空穴在内建电场的作用下经各自的传输通道迁移,分别被阴极和阳极收集。然而,一般来说,常用的体异质结是一种无序的微相结构,受活性层材料类型和比例、溶剂种类和浓度以及退火条件等多种因素影响较大,重复性较差。此外,由于微相结构中往往存在“死端(Dead end)”<sup>[26]</sup>,即载流子的传输通道发生断裂,电极无法对处于“死端”传输通道的载流子进行收集,这部分载流子就无法形成光电流,影响了器件的短路电流和转换效率。

为克服无序微相结构活性层的不利影响,可采用光子晶体(PC)活性层。光子晶体是一种折射率在空间呈周期性变化的介质结构,周期性变化的给体/受体光子晶体实际上就提供了一种有序界面的微相结构。这种有序微相结构中几乎不存在载流子传输通道的“死端”,激子在给体-受体界面分离的正负电荷能通过各自的连续传输通道迁移至电极,降低了载流子的复合几率。光子晶体在改善器件电学性能的同时还表现出与简单衍射光栅完全不同的性质:具有光子带隙,一些电磁波模式会被禁止,因此能够改变入射光场在器件内部的分布,实现对光波的操纵。例如,光栅背反射器[一维光子晶体<sup>[13,27~29]</sup>,1D PC,图 3(a),其中 PEDOT:

PSS为聚(3,4-乙撑二氧噻吩):聚苯乙烯磺酸盐。]、圆柱阵列背反射器[二维光子晶体<sup>[13,30,31]</sup>, 2D PC, 图 3(b), 其中 P3HT 为聚-3 乙噻吩, PCBM 为富勒烯衍生物。]、圆锥或金字塔阵列背反射器[三维光子晶体<sup>[32]</sup>, 3D PC, 图 3(c)]禁带内的传输模式发生全反射或散射, 减少了光能的透射损失。特别是光子晶体内的慢布洛赫波模式, 由于能有效延长光在活性层内的光程和驻留时间, 增加光吸收概率和激子产生率, 因此受到特别重视<sup>[30,33]</sup>。2012 年, 香港大学的 Chen 等<sup>[32]</sup>提出了一种三维梯度折射率光子晶体[图 3(c)], 理论分析表明, 与二维柱状光子晶体结构相比, 器件的光学阻抗得到了明显改善, 陷光效果进一步提高。总之, 通过有目的地优化设计光子晶体有序界面的线度、周期和折射率匹配等参数, 能改善 OSC 的电学和光学性能, 提高短路电流和转换效率。

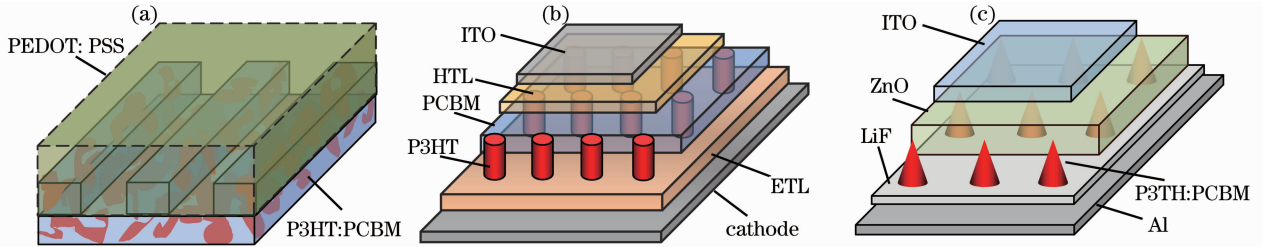


图 3 光子晶体陷光结构。(a)一维光子晶体; (b)二维光子晶体; (c)三维光子晶体

Fig. 3 Trapping light with photonic crystals. (a) 1D PC; (b) 2D PC; (c) 3D PC

#### 4 微光学元件陷光结构

利用微透镜<sup>[9,34]</sup>、微棱镜<sup>[35]</sup>等微光学元件对光线的曲折本领可实现光在 OSC 内的光程倍增, 提高活性层的吸光效率。该结构的折光元件在空间上与活性层分离, 可以减少活性层缺陷对器件电学性能的不利影响。以微透镜阵列陷光结构(图 4)为例<sup>[9,34]</sup>, 微透镜将入射光会聚, 在焦斑处的反射层开一适当孔径的透光小孔或狭缝(若为球面微透镜则开小孔, 若为柱面镜则开狭缝), 通过小孔或狭缝后的光发散至 OSC 内部, 一部分被活性层吸收, 一部分透射到具有高反射率的背电极, 背电极的反射光再次进入活性层并穿透至开孔反射镜产生二次反射, 最终在开孔反射镜和背电极之间形成多次反射, 光能在器件内部损耗殆尽。针对活性层的吸收光谱, 优化设计开孔孔径和反射镜位置等参数, 可使小孔泄漏能量减少, 绝大部分入射光能被约束在器件内部, 活性层吸光效率提高。

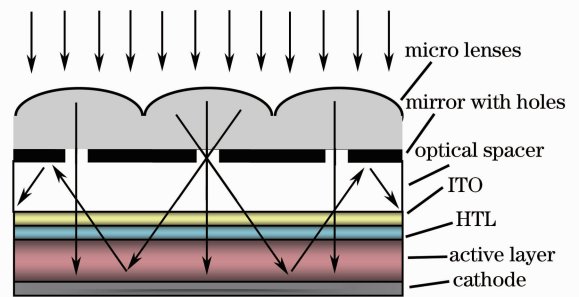


图 4 微透镜阵列陷光结构

Fig. 4 Trapping light with micro lenses array

#### 5 纤维型陷光结构

一般情况下, 平面陷光结构很难将大部分入射光约束和限制在电池内部传输。2007 年, 美国维克森林大学的 Liu 等<sup>[36,37]</sup>将多模光纤的包覆层剥离, 并以此为衬底制作了柔性的光纤型 OSC, 该结构能将入射光限制在纤芯和包覆活性层。如图 5 所示, 阳极为包覆在纤芯上的透明 ITO, 阴极为铝薄膜, 活性层为 P3HT:PCBM(300 nm)。从侧面入射的光波在纤芯内传播时部分穿透 ITO, 耦合进入活性层, 活性层吸收后的剩余光被铝阴极全部反射, 再度进入活性层。他们通过改变纤芯直径和入射光角度, 考察器件性能参数变化规律。实验结果表明, 短路电流  $I_{sc}$  和开路电压  $V_{oc}$  随着纤芯半径的减小而增加, 原因在于大直径纤芯更容易让光沿纤芯传播, 最后从另一端透射出去, 不利于光在纤芯-器件界面的散射;  $I_{sc}$ 、 $V_{oc}$ 、和 PCE 先是随入射角度增加而增大, 然后再减小, 而填充因子(FF)则随角度增加总体呈下降趋势, 即存在一个优化的入射光照角度。

2009 年, 美国 Konarka 公司的 Lee 等<sup>[38,39]</sup>提出了另一种柔性纤维型 OSC 结构。与 Liu 等<sup>[36,37]</sup>提出的

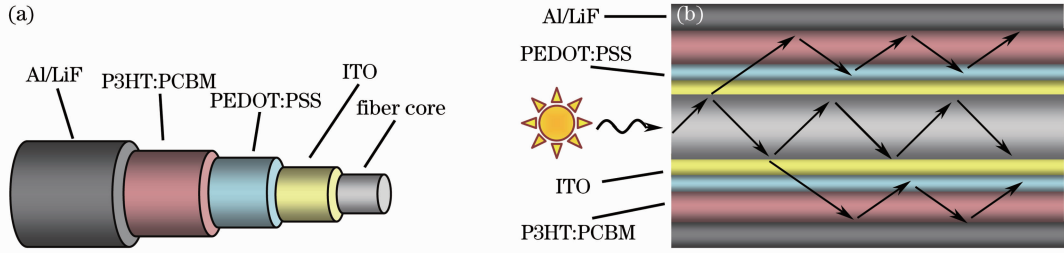


图 5 光纤型陷光结构。(a)光纤型 OSC 结构示意图；(b)光纤型 OSC 陷光原理示意图

Fig. 5 Light trapping structure based on optical fiber. (a) Schematic of fiber-based OSC; (b) schematic of light trapping with fiber-based OSC

阴阳电极为同轴包覆层的纤维型结构不同,该结构的阴阳极为一对具有不同导电系数的柔性不锈钢丝。如图 6 所示,其中较粗的主电极为阴极,直径  $100\ \mu\text{m}$ ,其外依次涂布  $\text{TiO}_x$ /P3HT:PCBM/PEDOT:PSS,次电极为涂布银层的阳极,直径  $50\ \mu\text{m}$ ,次电极以一定的螺距缠绕在主电极上,将二者从透明液体中拉过,液体凝固后形成的圆柱状透明包覆层将主次电极固定。在该结构中,透明包覆层除了固定作用外还有会聚入射光的作用。由于次电极缠绕在主电极上,对涂布在主电极外面的活性层存在遮挡,需要考虑次电极对入射光的遮蔽情况。他们从理论上分析了次电极对主电极全方位  $0^\circ\sim 360^\circ$  的遮蔽情况,发现无论遮蔽与否,透明包覆层都有将入射光会聚到主电极的作用,会聚效果与遮蔽角度、包覆层折射率以及主电极和包覆层的直径比有关。该结构的 OSC 效率在 3% 左右,有望作为光伏纤维电池用于电子织物当中。

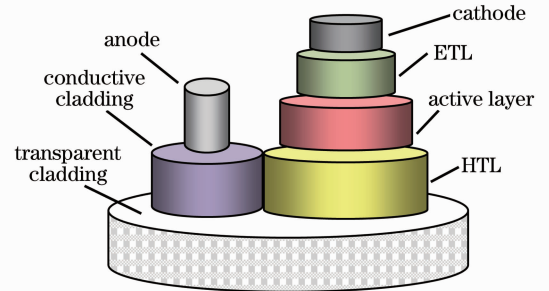


图 6 基于柔性金属电极对的 OSC

Fig. 6 OSC architecture based on double flexible electrodes

## 6 光学隔离层

对于 OSC 薄层结构,入射光和背电极的反射光会产生干涉效应<sup>[40~42]</sup>,导致光强呈驻波分布,如图 7(a) 所示<sup>[40]</sup>。活性层中入射光和 Al 阴极反射光的干涉结果使得活性层-Al 阴极界面光场减弱,成为所谓的“死区(Dead zone)”。由于较大比例的活性层处于光场“死区”,激子产额不足,器件转换效率难以提高。增加活性层厚度改变电池内部的光场分布可以解决干涉效应的负面影响,但这样会导致 OSC 体电阻增大,载流子收集效率降低,光电流和器件填充因子下降,电学性能劣化。另一个更为有效的方法是在活性层-Al 阴极之间增加一层光学隔离层,通过光学隔离层改变器件内部光场分布以增加活性层的吸光效率,如图 7(b) 所示。2006 年,韩国釜山大学 Kim 等<sup>[40]</sup>提出采用基于溶胶-凝胶的溶液处理方法制备  $\text{TiO}_x$  光学隔离层,使得活性层中光场大幅增加,光电流提高了 40%,PCE 也增加了近 50%。事实上,光学隔离层不仅仅能改变电池内部的光场分布,还具有多种改善器件性能的作用。比如,选择特定能级结构的隔离层材料,可使其作为电子

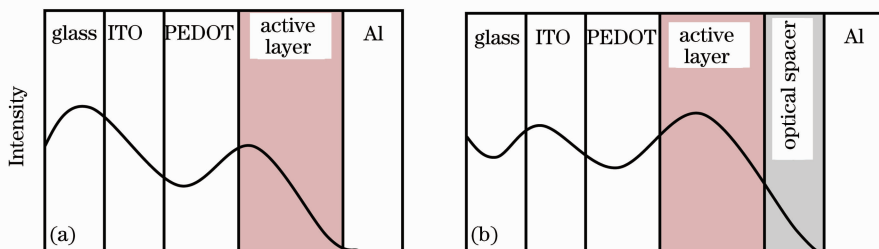


图 7 光学隔离层作用示意图。(a)无光学隔离层；(b)有光学隔离层

Fig. 7 Schematic diagram of optical spacer. (a) Without optical spacer; (b) with optical spacer

传输层和空穴阻挡层,改善阴极对电子的收集和阻止空穴向阴极的传输,此外还可作为电极修饰层改善器件的稳定性和寿命等<sup>[43,44]</sup>。目前,光学隔离层已成为 OSC 结构的标准配置,但是,使用光学隔离层并非一定会带来好的效果,设计中需要考虑多方面因素<sup>[45]</sup>。优秀的光学隔离层应当具有以下特点<sup>[44]</sup>:1) 是良好的电子受体材料,其导带底低于 OSC 受体的最低未占分子轨道(LUMO)能级;2) 具有良好的电子传输特性和空穴阻挡特性;3) 其导带底高于阴极的费米能级;4) 对入射太阳光谱透明。

## 7 结束语

在各种陷光结构中,光学隔离层由于较易制备且具有调节光场和修饰电极等多重作用已成为 OSC 的常规配置;等离子体陷光结构的高度局域与近场增强特性不但能提升活性层的吸光能力,同时还为采用具有较短载流子扩散长度物质制作太阳能电池提供了思路,已成为近年来的研究热点;光子晶体具有优秀的陷光能力也被认为是先进光学管理技术的一个发展方向,但高维度结构的制备难度较大,目前的研究工作主要集中在理论方面;基于柔性金属电极的纤维型 OSC 结构独特,有望应用于电子织物中;其他的卷曲型、V 型等单结 OSC 结构由于其陷光机制比较简单,在此没有特别讨论,详情可参见文献<sup>[46~48]</sup>。

陷光结构的实际效果相当于增加了活性层厚度,提升器件吸光能力而不牺牲其电学性能,但其意义不仅仅在于提高器件的能量转换效率,还在于秉承了下一代太阳能电池的设计理念,采用等离子体、光子晶体等先进光学管理技术操纵入射光场实现对太阳能谱的充分利用,以及拓宽太阳能电池在材料选择和结构设计等方面的思路。目前,在短短几年时间内,单结 OSC 的认证转换效率已经由 4% 左右迅速提高了 9% 以上<sup>[49]</sup>,逼近了 10% 的商业化效率要求。相信在解决了效率和寿命问题后,具有质量轻、准透明等特色且兼具观赏价值的 OSC 更易在光伏建筑集成、电子消费品等领域的竞争中脱颖而出。

## 参 考 文 献

- 1 M. Kaltenbrunner, M. S. White, E. D. Glowacki *et al.*. Ultrathin and lightweight organic solar cells with high flexibility [J]. *Nature Commun.*, 2012, **3**: 770
- 2 M. Manceau, D. Angmo, M. Jorgensen *et al.*. ITO-free flexible polymer solar cells: From small model devices to roll-to-roll processed large modules [J]. *Org. Electron.*, 2011, **12**(4): 566~574
- 3 M. G. Kang, H. J. Park, S. H. Ahn *et al.*. Transparent Cu nanowire mesh electrode on flexible substrates fabricated by transfer printing and its application in organic solar cells [J]. *Sol. Energ. Mat. & Sol. Cell.*, 2010, **94**(6): 1179~1184
- 4 C. C. Chen, L. T. Dou, R. Zhu *et al.*. Visibly transparent polymer solar cells produced by solution processing [J]. *ACS Nano*, 2012, **6**(8): 7185~7190
- 5 G. Li, R. Zhu, Y. Yang. Polymer solar cells [J]. *Nature Photon.*, 2012, **6**(3): 153~161
- 6 D. J. Lipomi, B. C. K. Tee, M. Vosgueritchian *et al.*. Stretchable organic solar cells [J]. *Adv. Mater.*, 2011, **23**(15): 1771~1775
- 7 H. J. Park, T. Xu, J. Y. Lee *et al.*. Photonic color filters integrated with organic solar cells for energy harvesting [J]. *ACS Nano*, 2011, **5**(9): 7055~7060
- 8 S. Lizin, P. S. Van, S. E. De *et al.*. The future of organic photovoltaic solar cells as a direct power source for consumer electronics [J]. *Sol. Energ. Mat. Sol. Cells*, 2012, **103**: 1~10
- 9 S. D. Zilio, K. Tvingstedt, O. Inganäs *et al.*. Fabrication of a light trapping system for organic solar cells [J]. *Microelectron. Engng.*, 2009, **86**(4-6): 1150~1154
- 10 N. C. Lindquist, W. A. Luhman, S. H. Oh *et al.*. Plasmonic nanocavity arrays for enhanced efficiency in organic photovoltaic cells [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(12): 123308
- 11 M. A. Green, S. Pillai. Harnessing plasmonics for solar cells [J]. *Nature Photon.*, 2012, **6**(3): 130~132
- 12 D. H. Ko, J. R. Tumbleston, A. Gadisa *et al.*. Light trapping nano structures in organic photovoltaic cells [J]. *J. Mater. Chem.*, 2011, **21**(41): 16293~16303
- 13 D. Duche, E. Drouard, J. J. Simon *et al.*. Light harvesting in organic solar cells [J]. *Sol. Energ. Mat. & Sol. Cells*, 2011, **95**(S1): 18~25
- 14 Wang Kunxia, Feng Shimeng, Xu Huatian *et al.*. Relation between the multicrystalline silicon surface structure and the pit-trap effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **32**(3): 0324001

- 王坤霞, 冯仕猛, 徐华天 等. 多晶硅不同晶面陷阱坑形貌与陷光效应的关系[J]. 光学学报, 2012, **32**(3): 0324001
- 15 Wu Wenwei, Xu Jiaming, Chen Hongyan. Simulation of optical model based on micro-cones structure of "black silicon" [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603029
- 吴文威, 徐嘉明, 陈宏彦. "黑硅"表面特殊锥状尖峰结构的制备及其光学模型仿真[J]. 中国激光, 2011, **38**(6): 0603029
- 16 Qian Chaofeng, Wang Qingkang, Li Haihua. Design of black silicon with ultra-light-trapping structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1005007
- 钱超峰, 王庆康, 李海华. 超陷光黑硅结构研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(10): 1005007
- 17 H. A. Atwater, A. Polman. Plasmonics for improved photovoltaic devices [J]. *Nature Mater.*, 2010, **9**(3): 205~213
- 18 N. Kalfagiannis, P. G. Karagiannidis, C. Pitsalidis *et al.*. Plasmonic silver nanoparticles for improved organic solar cells [J]. *Sol. Energ. Mat. & Sol. Cells*, 2012, **104**: 165~174
- 19 K. Q. Le, A. Abass, B. Maes *et al.*. Comparing plasmonic and dielectric gratings for absorption enhancement in thin film organic solar cells [J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(1): 39~50
- 20 M. A. Sefunc, A. K. Okyay, D. H. Volkan. Volumetric plasmonic resonator architecture for thin-film solar cell [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, **98**(9): 093117
- 21 H. H. Shen, B. Maes. Combined plasmonic gratings in organic solar cells [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(S6): A1202~A1210
- 22 Y. D. Hou, S. H. Li, S. Ye *et al.*. Using self-assembly technology to fabricate silver particle array for organic photovoltaic devices [J]. *Microelectron. Engng.*, 2012, **98**: 428~432
- 23 A. Abass, H. H. Shen, P. Bienstman *et al.*. Angle insensitive enhancement of organic solar cells using metallic gratings [J]. *J. Appl. Phys.*, 2011, **109**(2): 023111
- 24 V. E. Ferry, L. A. Sweatlock, D. Pacifici *et al.*. Plasmonic nanostructure design for efficient light coupling into solar cells [J]. *Nano Lett.*, 2008, **8**(12): 4391~4397
- 25 X. Chen, B. H. Jia, J. K. Saha *et al.*. Broadband enhancement in thin-film amorphous silicon solar cells enabled by nucleated silver nanoparticles [J]. *Nano Lett.*, 2012, **12**(5): 2187~2192
- 26 S. H. Park, A. Roy, S. Beaupre *et al.*. Bulk heterojunction solar cells with internal quantum efficiency approaching 100% [J]. *Nature Photon.*, 2009, **3**(5): 297~303
- 27 D. H. Ko, J. R. Tumbleston, L. Zhang *et al.*. Photonic crystal geometry for organic solar cells [J]. *Nano Lett.*, 2009, **9**(7): 2742~2746
- 28 M. S. Kim, J. S. Kim, J. C. Cho *et al.*. Flexible conjugated polymer photovoltaic cells with controlled heterojunctions fabricated using nanoimprint lithography [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(12): 123113
- 29 J. R. Tumbleston, D. H. Ko, E. T. Samulski *et al.*. Absorption and quasiguided mode analysis of organic solar cells with photonic crystal photoactive layers [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(9): 7670~7681
- 30 D. Duché, L. Escoubas, J. J. Simon *et al.*. Slow Bloch modes for enhancing the absorption of light in thin films for photovoltaic cells [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(19): 193310
- 31 X. M. He, F. Gao, G. L. Tu *et al.*. Formation of nanopatterned polymer blends in photovoltaic devices [J]. *Nano Lett.*, 2010, **10**(4): 1302~1307
- 32 L. Z. Chen, W. E. I. Sha, W. C. H. Choy. Light harvesting improvement of organic solar cells with self-enhanced active layer designs [J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(7): 8175~8185
- 33 Y. Park, E. Drouard, O. E. Daif. Absorption enhancement using photonic crystals for silicon thin film solar cells [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(16): 14312~14321
- 34 K. Tvingstedt, S. D. Zilio, O. Inganäs *et al.*. Trapping light with micro lenses in thin film organic photovoltaic cells [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(26): 21608~21615
- 35 M. Niggemann, M. Glatthaar, P. Lewer *et al.*. Functional microprism substrate for organic solar cells [J]. *Thin Solid Films*, 2006, **511-512**: 628~633
- 36 J. W. Liu, M. A. G. Namboothiry, D. L. Carroll. Fiber based architectures for organic photovoltaics [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(6): 063501
- 37 J. W. Liu, M. A. G. Namboothiry, D. L. Carroll. Optical geometries for fiber-based organic photovoltaics [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(13): 133515
- 38 M. R. Lee, R. D. Eckert, K. Forberich *et al.*. Solar power wires based on organic photovoltaic materials [J]. *Science*, 2009, **324**(5924): 232~235
- 39 M. R. Lee, R. D. Eckert, K. Forberich *et al.*. Optical and electronic properties of organic photovoltaic wires and fabrics

- [J]. *J. Macromol. Sci. A*, 2009, **46**(12): 1238~1246
- 40 J. Y. Kim, S. H. Kim, H. H. Lee *et al.*. New architecture for high-efficiency polymer photovoltaic cells using solution-based titanium oxide as an optical spacer [J]. *Adv. Mater.*, 2006, **18**(5): 572~576
- 41 Li Xiang, Wen Shangsheng, Yao Rihui *et al.*. Analysis of optical performance on polymer solar cell based on transfer matrix method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(6): 0631002  
李 祥, 文尚胜, 姚日晖 等. 基于传输矩阵法的聚合物太阳能电池光学性能分析[J]. *光学学报*, 2012, **32**(6): 0631002
- 42 Cao Jing, Zhan Zhen, Liu Pengyi. Optical simulation based on P3HT:PCBM bulk-heterojunction solar cells: a comparison of normal and inverted structures of device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(3): 0323004  
曹 婧, 詹 真, 刘彭义. 基于 P3HT:PCBM 体异质结的正置和倒置太阳能电池性能的数值研究[J]. *光学学报*, 2013, **33**(3): 0323004
- 43 M. Graetzel, R. A. J. Janssen, D. B. Mitzi *et al.*. Materials interface engineering for solution processed photovoltaics [J]. *Nature*, 2012, **488**(7411): 304~312
- 44 P. Kumar, S. Chand. Recent progress and future aspects of organic solar cells [J]. *Prog. Photovolt. : Res. Appl.*, 2012, **20**(4): 377~415
- 45 B. V. Andersson, D. M. Huang, A. J. Moulé *et al.*. An optical spacer is no panacea for light collection in organic solar cells [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **94**(4): 043302
- 46 S. D. Yambem, K. S. Liao, S. A. Curran. Enhancing current density using vertically oriented organic photovoltaics [J]. *Sol. Energ. Mat. & Sol. Cells*, 2012, **101**: 227~231
- 47 S. B. Rim, S. B. Zhao, S. R. Scully *et al.*. An effective light trapping configuration for thin film solar cells [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **91**(24): 243501
- 48 W. Cao, J. D. Myers, Y. Zheng *et al.*. Enhancing light harvesting in organic solar cells with pyramidal rear reflectors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, **99**(2): 023306
- 49 Z. C. He, C. M. Zhong, S. J. Su *et al.*. Enhanced power conversion efficiency in polymer solar cells using an inverted device structure [J]. *Nature Photon.*, 2012, **6**(9): 593~595