

文章编号: 1000-7032(2012)08-0888-07

# 电极对 CuPc/C<sub>60</sub> 双层异质结有机太阳能电池光学性能的影响

李 祥<sup>1</sup>, 文尚胜<sup>1,2</sup>, 贺前华<sup>3</sup>, 季 飞<sup>3</sup>, 姚日晖<sup>1,2,\*</sup>

(1. 华南理工大学 高分子光电材料与器件研究所, 广东 广州 510640;

2. 华南理工大学 发光材料与器件国家重点实验室, 广东 广州 510640;

3. 华南理工大学 电子与信息学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 采用传输矩阵法的光学模型以及 MATLAB 软件模拟了电极对 CuPc/C<sub>60</sub> 双层异质结有机太阳能电池光学性能的影响。模拟结果表明: 当把微腔结构引入到双层异质结电池时, 对于入射电极, 发现活性层的吸光率主要受其反射相移的影响而非其透射率, 并且通过变化入射电极相移调节层到合适厚度可以使活性层吸光率相比于传统器件增加很多; 而当把正负折射率交替的光子晶体引入到电池中作为背电极时, 发现活性层的吸光率和背电极反射率、反射相移都有很大关系, 在获得高反射率的同时可以通过调节背电极厚度从而使活性层在整个吸收光谱内的吸光率大于传统器件。

**关键词:** 双层异质结有机太阳能电池; 吸光率; 传输矩阵法; 电极

中图分类号: TM914.4<sup>+</sup>2 文献标识码: A DOI: 10.3788/fjxb20123308.0888

## Effects of Electrodes on The Optical Performance of CuPc/C<sub>60</sub> Bilayer Heterojunction Organic Solar Cells

LI Xiang<sup>1</sup>, WEN Shang-sheng<sup>1,2</sup>, HE Qian-hua<sup>3</sup>, JI Fei<sup>3</sup>, YAO Ri-hui<sup>1,2,\*</sup>

(1. Institute of Polymer Optoelectronic Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

3. School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

\* Corresponding Author, E-mail: yaorihui@scut.edu.cn

**Abstract:** The effects of electrodes on the optical performance of bilayer heterojunction organic solar cells have been investigated by employing MATLAB and transfer matrix method. The simulations reveal that the absorption of active layer is mainly influenced by phase shift of reflection in top electrode but not the transmittivity when microcavity structure is introduced into bilayer heterojunction organic solar cells. A significant improvement of light absorption has been achieved due to the optical resonance effect by adjusting the thickness of top capping layer. Furthermore, the simulations demonstrate that both reflectivity and reflection phase shift of back electrode play important roles in active layer optical absorption when one-dimensional photon-crystals (1DPCs) composed of positive and negative refractive index materials are introduced into bilayer heterojunction organic solar cells. The optical absorption in new device can be enhanced at a broad wavelength range comparing to traditional device by adjusting the thickness of back electrode when the period of 1DPCs is 10.

收稿日期: 2012-04-19; 修订日期: 2012-06-13

基金项目: 广东省工业科技攻关计划(2007A010500011); 广东省国际科技合作计划(2005B50101005)资助项目

作者简介: 李祥(1989-), 男, 湖北荆门人, 主要从事有机太阳能电池方面的研究。

E-mail: lxscut@163.com

**Key words:** bilayer heterojunction organic solar cells; optical absorption; transfer matrix method; electrode

## 1 引言

和传统的无机硅太阳能电池相比,有机太阳能电池(OSCs)由于具有柔性、易制备、材料来源广泛以及潜在的成本低廉等优势而成为近年来国内外研究的热点<sup>[1-3]</sup>。OSCs的研究对于新能源的开发和利用具有重要的意义和潜在的价值。目前,Gang Li<sup>[4]</sup>等在“Nature Photonics”上报道的聚合物太阳能电池的能量转换效率已经接近9%,而有机小分子太阳能电池的最高能量转换效率为2012年Yanming Sun等<sup>[5]</sup>在“Nature Materials”上报道的6.7%。相比于聚合物太阳能电池,有机小分子太阳能电池的能量转换效率仍然有提升空间,也因此成为目前的一大研究趋势。根据有机小分子太阳能电池的工作原理<sup>[6]</sup>可知,提高活性层对入射光的吸收率是提高其能量转换效率和外量子效率的一个关键因素。在有机太阳能电池中,入射电极的透射率以及背电极的反射率对活性层的吸收影响很大,但是至今还没有关于它们对活性层的影响的相关报道。

常见的有机小分子太阳能电池为双层异质结结构。本文首先参考聚合物太阳能电池,把微腔结构引入到双层异质结太阳能电池中,并基于传输矩阵法的光学模型以及MATLAB软件探讨了微腔电池中入射电极的透射率和活性层的吸光率的关系。然后,通过优化相移调节层到合适的厚度使活性层中的给受体同时发生光学共振,从而较大程度地增加了活性层对入射光的吸收率。背电极的反射率对活性层的吸光率也有很大影响,本文把具有负折射率介质的光子晶体引入到双层异质结电池中以代替传统的背电极金属Ag,并通过调节背电极到合适的厚度使活性层具有了更大的吸光率。本文的研究一方面为进一步提高双层异质结有机电池能量转换效率提供了理论参考和依据,另一方面让我们更深入透彻地了解了电极对太阳能电池光吸收的影响以及相关物理机制。

## 2 理论模型

### 2.1 计算模型

本文所有的计算结果均基于传输矩阵法的光

学模型以及MATLAB软件。传输矩阵法是应用矩阵方法来研究光在分层介质中传播时的分光透射特性、分光反射特性、分光吸收特性等,其依据为非涅耳反射和透射关系式,具有算法简单、相关程序编写容易的优点,已经被广泛应用于有机光电子器件的光学模拟中<sup>[7-8]</sup>。MATLAB软件是一款常用的数学软件,拥有数值计算、矩阵计算、函数图像的生成与处理以及控制系统仿真等强大功能。下面对本文计算中涉及到的重要公式进行简要说明。描述光在相邻界面传播时的界面矩阵为:

$$I_{jk} = \frac{1}{t_{jk}} \begin{bmatrix} 1 & r_{jk} \\ r_{jk} & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中, $r_{jk}$ 、 $t_{jk}$ 分别为菲涅耳反射系数和菲涅耳透射系数。描述光在穿过每层薄膜时的吸收以及相移的层矩阵为:

$$L_j = \begin{bmatrix} e^{-i\xi_j d_j} & 0 \\ 0 & e^{i\xi_j d_j} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中, $\xi_j = (2\pi/\lambda) N_j$ 。  $N_j$ 和  $d_j$ 分别为第  $j$  层膜的光学导纳和厚度。结合界面矩阵与层矩阵,对于整个薄膜,其转移矩阵有:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = \left( \prod_{v=1}^m I_{(v-1)v} L_v \right) \cdot I_{m(m+1)}. \quad (3)$$

则此薄膜的透射率和反射率分别为:

$$T = |t|^2 \frac{n_{m+1}}{n_0} = \left| \frac{1}{S_{11}} \right|^2 \frac{n_{m+1}}{n_0}, \quad R = |r|^2 = \left| \frac{S_{21}}{S_{11}} \right|^2, \quad (4)$$

其中, $t$ 、 $r$ 分别为透射系数与反射系数, $n_{m+1}$ 、 $n_0$ 分别为出射介质与入射介质的折射率。

当入射光子的能量大于活性层中激子产生所需要的能量时就会引起活性层对入射光子的吸收,并在材料内部产生激子。对于波长为 $\lambda$ 的入射光,活性层中某点 $x$ 单位时间内所吸收的光子能量为<sup>[9]</sup>:

$$Q(x) = \frac{2\pi c \varepsilon_0 k n |E(x)|^2}{\lambda}, \quad (5)$$

式中 $c$ 、 $\lambda$ 、 $\varepsilon_0$ 分别为真空中的光速、波长和介电常数; $k$ 和 $n$ 分别为活性层的消光系数和折射率; $E(x)$ 为活性层中某一点的光电场,其具体算法可以参考文献[8]。

根据文献[9],活性层对波长为 $\lambda$ 的入射光的吸收效率可以表示为:

$$A(\lambda) = \frac{1}{I(\lambda)} \int_{x \in \text{活性层}} Q(x) dx, \quad (6)$$

式中  $I(\lambda)$  是波长为  $\lambda$  的入射光强度。

## 2.2 结构模型

传统的双层异质结有机太阳能电池一维几何结构如图 1 所示。其中 ITO 为入射电极,其实验室厚度为 120 nm;背电极为 Ag,厚度一般为 100 nm。对于小分子太阳能电池,由于 PEDOT: PSS 作为空穴传输层可能会影响小分子结晶度,降低器件的相关性能<sup>[10]</sup>,故本文选择目前常用的  $\text{MoO}_3$  作为阳极缓冲层。 $\text{MoO}_3$  不仅可以匹配入射电极和给体之间的能级差,而且可以增加电池并联电阻,从而提高电池的开路电压、短路电流和填充因子<sup>[10]</sup>。由于  $\text{MoO}_3$  厚度对器件电学性能影响重大,故本文将其厚度设置为文献中报道的此种结构的最佳厚度 4 nm<sup>[11]</sup>。Bathocuproine (BCP) 作为常见的阴极缓冲层,其厚度设置为文献中常见的 7 nm。活性层以 Copper phthalocyanine (CuPc) 作为给体, Fullerene ( $\text{C}_{60}$ ) 为受体。由于激子在 CuPc 薄膜中的扩散长度为  $(20 \pm 5)$  nm<sup>[12]</sup>,因此,本文设其厚度为 20 nm。受给体厚度的影响,此时受体  $\text{C}_{60}$  的最佳厚度为 40 nm<sup>[12]</sup>。因此,本文中的双层异质结电池的基本结构 1 为:

Glass / ITO (120 nm) /  $\text{MoO}_3$  (4 nm) / CuPc (20 nm) /  $\text{C}_{60}$  (40 nm) / BCP (7 nm) / Ag (100 nm)。

本文模拟中所涉及到的全部光学参数均来自文献[13-14]。

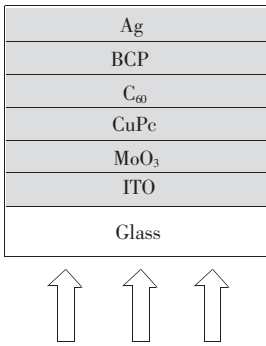


图 1 双层异质结有机太阳能电池传统结构

Fig. 1 Structure for traditional bilayer heterojunction organic solar cells

## 3 结果与讨论

### 3.1 入射电极透射率及结构对电池光学性能的影响

为了增加特定厚度的活性层的光学吸收,相

关研究人员将微腔结构多次引入到聚合物太阳能电池中<sup>[15-16]</sup>。本文首先把微腔结构引入到双层异质结电池中,探讨入射电极对其光学性能的影响。

微腔结构有两个反射镜:背电极 Ag 由于具有较高的反射率作为“全反射镜”;而另一个“半反射镜”则是一层厚度为 10 nm 的 Ag 膜,其代替 ITO 作为入射电极时光学性能和电学性能皆优于 ITO<sup>[15]</sup>。而为了优化整个电池器件的光学性能,通常相关研究者会在入射电极 Ag 上继续增镀一层光学薄膜。目前文献报道的常用的此种功能薄膜有  $\text{MoO}_3$ 、 $\text{Alq}_3$  (tris-8-hydroxy-quinolinato aluminum)、ZnS、 $\text{WO}_3$  等<sup>[17]</sup>,本文选取的是 ZnS。故本文设计的双层异质结微腔电池结构 2 为:

ZnS ( $x$  nm) / Ag (10 nm) /  $\text{MoO}_3$  (4 nm) / CuPc (20 nm) /  $\text{C}_{60}$  (40 nm) / BCP (7 nm) / Ag (100 nm)。

图 2 为入射波长为 400 nm 时 ZnS 厚度与  $\text{C}_{60}$  吸光率(由图 3 可知该波段 CuPc 消光系数小,入射光主要被  $\text{C}_{60}$  吸收)以及与入射电极 ZnS/Ag 的透光率关系。从图 2 可以看到,随着 ZnS 厚度从 0 ~ 22 nm 依次增加,结构 2 中的入射电极 ZnS/Ag 的透光率从 48.69% 先逐渐增加到 60.17%,然后再减少至 51.71%;而  $\text{C}_{60}$  对入射光的吸收率却从 48.44% 一直增加到 86.78%。当入射电极的透射率为 46% 时, $\text{C}_{60}$  的吸光率仍然可以达到 84.98%。由此可以发现:在微腔电池中电极对入射光的透射率对  $\text{C}_{60}$  的吸光率的影响不是很明显,说明在电池结构 2 中活性层的吸光率主要受微腔效应的影响。我们在设计此类电池时,不能简单地仅考虑电极对入射光的透射率的影响。

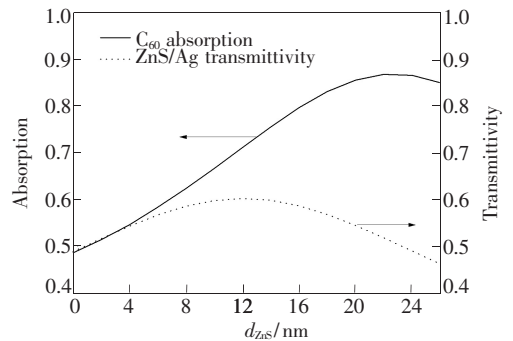


图 2 ZnS 厚度与  $\text{C}_{60}$  吸光率(实线)以及 ZnS/Ag 透射率(点线)的关系

Fig. 2  $\text{C}_{60}$  absorption (solid line) and ZnS/Ag transmittivity (dot line) as a function of the ZnS thickness for a wavelength of 400 nm

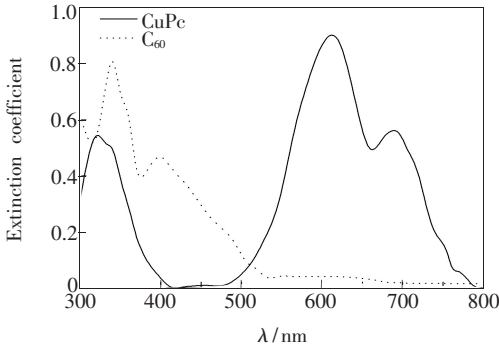


图 3 CuPc 与 C<sub>60</sub> 的消光系数<sup>[13]</sup>

Fig. 3 Extinction coefficients of CuPc film and C<sub>60</sub> film<sup>[13]</sup>

图 4 为 ZnS 厚度为 20 nm(已经优化处理)时电池结构 2 与传统电池结构 1 中活性层的吸收光谱的比较。可以发现相比于传统器件结构 1, 在入射波长为 300 ~ 360 nm 的范围内, 以 Ag/ZnS 为入射电极的器件结构 2 的活性层吸光率有一定程度下降, 在 500 ~ 560 nm 波段范围内也有微弱减小。但是, 由 AM1.5G 太阳能辐射光谱<sup>[18]</sup>可知, 300 ~ 360 nm 波段的光子通量很小, 所以该波段吸光率的下降对活性层吸收太阳光能量的影响很小。在 360 ~ 500 nm 和 560 ~ 740 nm 波段, 电池结构 2 的吸光率均有所增加, 特别是在 360 ~ 460 nm 和 640 ~ 720 nm 波段, 活性层的吸光率平均增加了 10% 左右, 说明都发生了微腔共振作用。通过微腔结构的引入, 双层异质结有机太阳能电池可以在很大程度上提高活性层对太阳能的光学吸收, 从而提高了能量转换效率。发生光学共振的条件可由公式(7)<sup>[15]</sup>表示:

$$\sum_i n_i d_i + \frac{\lambda}{4\pi}(\psi_1 + \psi_2) = \frac{m\lambda}{2}, \quad (7)$$

其中,  $n_i$ 、 $d_i$  分别表示两个反射镜之间各层薄膜的折射率和厚度;  $\psi_1$  和  $\psi_2$  分别代表前后两个电极之间的反射相移;  $m$  则是一个正整数, 代表级数。由公式(7)可知, 要想发生光学共振, 理论上可以通过改变两个电极之间的各功能层厚度来实现, 但这种方法在改变器件光学性能的同时会影响器件的电学性能, 在实际应用中存在很多问题。所以, 我们只能在不影响器件内部电学性能的前提下, 通过调节入射电极的反射相移来实现光学共振。图 2 中 ZnS 厚度的调节, 一方面改变了入射电极的透光率, 更重要的是改变了入射电极的反射相移, 从而影响了器件的微腔共振发生条件。由于双层异质结电池中的活性层厚度受激子的传输距

离限制而比较薄, 所以微腔共振效应不如聚合物太阳能电池那样在某一个波长震荡明显, 但我们仍然可以通过改变相移调节层厚度使给体和受体在它们各自的吸收波长范围内同时发生微共振作用, 从而使活性层的吸光率在整个太阳能辐射光谱内有较大提高。

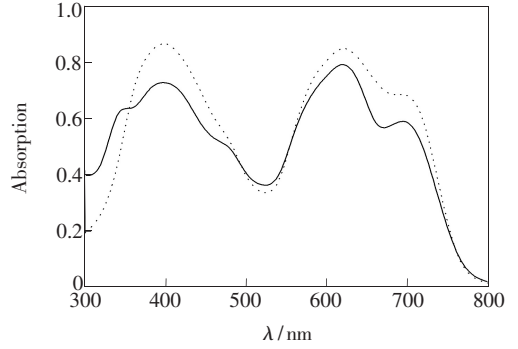


图 4 结构 1 与结构 2 中的活性层吸收光谱, 其中实线代表结构 1, 点线代表结构 2。

Fig. 4 The active layer absorption spectra of two different structures. Solid line is for structure 1, dot line is for structure 2.

### 3.2 背电极反射率以及结构对电池光学性能的影响

有机太阳能电池的背电极可以反射透过活性层而未被吸收的入射光, 从而使活性层对入射光进行二次吸收, 增加光的利用率。但金属镜的反射率普遍不高 ( $\leq 96\%$ ), 而一维光子晶体(1DPCs)却可以通过控制光子禁带达到对某一个波长的光近乎 100% 的反射。常规的 1DPCs 有效反射带宽非常有限, 而具有正负折射交替的 1DPCs 却有很宽的反射带宽, 与常规光子晶体具有明显不同的光学性能<sup>[19]</sup>, 因此具有正负折射率介质的 1DPCs 也被引入到有机发光二极管(OLED)中进行光学模拟计算<sup>[20-21]</sup>。本文设计了以 ITO/1DPCs 为背电极的电池结构 3, 其中 1DPCs 由正负折射率材料交替组成,  $X$  代表其周期:

Glass/ITO<sub>1</sub>(120 nm)/MoO<sub>3</sub>(4 nm)/CuPc(20 nm)/C<sub>60</sub>(40 nm)/BCP(7 nm)/ITO<sub>2</sub>( $x$  nm)/1DPCs( $X$ )。

图 5 为本文设计的具有负折射率介质的 1DPCs 与常规的 1DPCs 反射光谱曲线, 此时取  $X = 10$ 。显然, 新型 1DPCs 在 350 ~ 900 nm 波长范围内的反射率都接近 100%, 而常规 1DPCs 仅在

410 ~ 580 nm 具有很大的反射率。下文中的 1DPCs 均特指正负折射率交替的一维光子晶体。

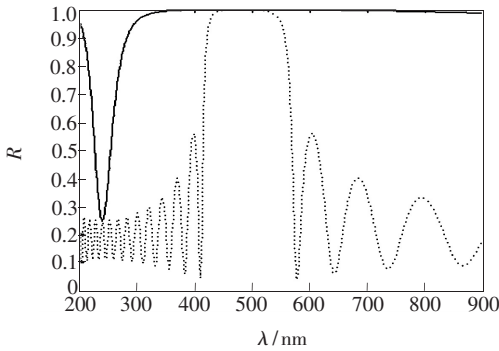


图 5 正负折射率介质交替组成的 1DPCs(实线)与常规 1DPCs(虚线)的反射光谱

Fig. 5 Reflection of the 1DPCs composed of positive and negative refractive index materials (solid line) and traditional 1DPCs (dot line)

图 6 分别为入射波长为 400 nm 时不同周期 1DPCs 所对应的电池结构 3 中的  $C_{60}$  吸光率与背电极  $ITO_2/1DPCs$  反射率的关系,此时  $ITO_2$  厚度保持不变,设为 30 nm。可以看到,随着 1DPCs 周期数的增加,背电极的反射率由 0.45% 依次增加到 98.36%,而  $C_{60}$  的吸光率也由 35.41% 依次增加到 83%,且当 1DPCs 周期数达到一定数值后,其反射率保持不变,此时的  $C_{60}$  吸光率也基本保持不变。而由文献[22]可知,对于 1DPCs,其反射相移不受其周期数影响。所以在反射相移不变时, $C_{60}$  的吸光率主要受背电极反射率的影响。图 7 分别为不同厚度的  $ITO_2$  所对应的  $C_{60}$  吸光率与背电极  $ITO_2/1DPCs$  反射率的关系。由图 7 可知,随着  $ITO_2$  厚度的依次增加,背电极  $ITO_2/1DPCs$  的反射率仅有微量减小,但仍然都保持在 93% 以

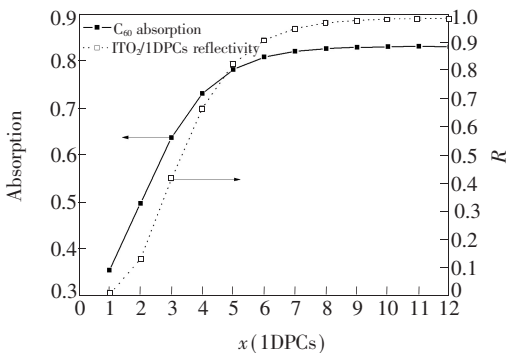


图 6 1DPCs 的周期数与  $C_{60}$  吸光率和背电极  $ITO_2/1DPCs$  反射率之间的关系

Fig. 6  $C_{60}$  absorption (solid line) and  $ITO_2/1DPCs$  reflectivity (dot line) as a function of periodicity of 1DPCs

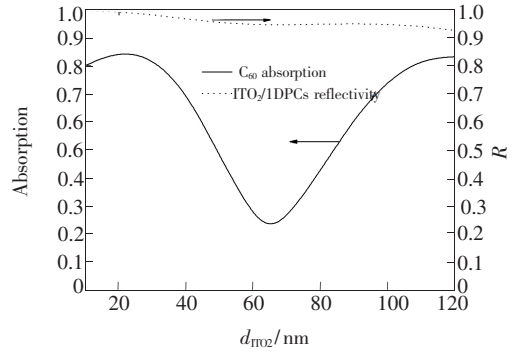


图 7  $ITO_2$  厚度与  $C_{60}$  吸收率和背电极  $ITO_2/1DPCs$  反射率之间的关系

Fig. 7  $C_{60}$  absorption (solid line) and  $ITO_2/1DPCs$  reflectivity (dot line) as a function of the  $ITO_2$  thickness

上;而  $C_{60}$  对入射光的吸收率却由最高值 85.24% 依次下降到 22.8%,然后再上升至 83.2%, $C_{60}$  吸光率和  $ITO_2$  厚度之间呈周期性波动关系。由此可以判断,此种情况下的  $C_{60}$  吸光率主要受反射相移的影响。由以上两方面的分析可知:在有机太阳能电池中,并不是背电极反射率越大,活性层的吸光率就越大,即使在非微腔器件中反射相移也是一个很重要的参考量。

将具有负折射率的光子晶体应用在有机太阳能电池中,一方面能保证在活性层所吸收的入射光波段内的高反射率,另一方面还可以通过调节 ITO 的厚度改变其背电极的反射相移,从而提高活性层对入射光的吸收。图 8 为 1DPCs 周期为 10、ITO 厚度为 30 nm(经优化)时,结构 3 与结构 1 中活性层的吸收光谱的比较。可以明显看到,几乎在整个吸收光谱范围内,结构 3 的活性层对

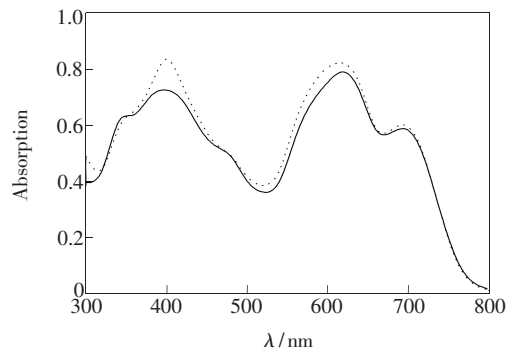


图 8 结构 1(实线)与结构 3(点线)的电池活性层的吸收光谱

Fig. 8 The active layer absorption spectra of two different structures. The solid line is for structure 1, the dot line is for structure 3.

入射光的吸收率都大于结构 1。

## 4 结 论

基于传输矩阵法的光学模型以及 MATLAB 软件,分别研究了入射电极和背电极对双层异质结太阳能电池光学性能的影响。研究结果表明:

(1)当把微腔结构引入到双层异质结电池时,可以通过改变入射电极的相移调节层厚度,使给体和受体在它们的各自吸收波长范围内同时发生微共振,从而使活性层的吸光率有较程度的提高;

(2)在微腔电池中,入射电极的透射率和活性层对入射光的吸收率并不是成简单的对应关

系,活性层的吸光率主要受微腔效应影响;

(3)当把具有负折射率介质的一维光子晶体引入到双层异质结电池中作为背电极时,一方面可以获得一个宽的反射带宽,另一方面还可以通过调节背电极的厚度来改变反射相移,从而使活性层的吸光率几乎在整个吸收波长范围内都大于传统的以 Ag 为背电极的电池结构;

(4)即使在非微腔有机光伏器件中,反射相移也和反射率一样是影响活性层吸光率的一个重要因素。

本文的研究一方面为进一步提高双层异质结有机电池能量转换效率提供了思路和依据,另一方面也让大家能够更深入透彻地了解电极对太阳能电池光吸收的影响以及相关物理机制。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] Hou L T, Wang B, Wang E G. Study of conjugated polymer as electron-acceptor in organic photovoltaic solar cells [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2012, 33(3):322-327 (in Chinese).
- [ 2 ] Yin S G, Yang L Y, Xu X R, *et al.* Enhancement of the performance and stability of polymer photovoltaic cells by cathode buffer layer [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2012, 33(3):233-237 (in Chinese).
- [ 3 ] Dou L T, You J B, Yang J, *et al.* Tandem polymer solar cells featuring a spectrally matched low-bandgap polymer [J]. *Nature Photon.*, 2012, 6(3):180-185.
- [ 4 ] Li G, Zhu R, Yang Y. Polymer solar cells [J]. *Nature Photon.*, 2012, 6(3):153-161.
- [ 5 ] Sun Y M, Welch G C, Leong W L, *et al.* Solution-processed small-molecule solar cells with 6.7% efficiency [J]. *Nature Mater.*, 2012, 11(1):44-48.
- [ 6 ] Peumans P, Yakimov A, Forrest S R. Small molecular weight organic thin-film photodetectors and solar cells [J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, 93(7):3693-3723.
- [ 7 ] Gui Y C, Wen S S, Liu Y M, *et al.* Optical and thermal analysis for polymer light-emitting diode as a flat panel light source [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2011, 32(8):809-815 (in Chinese).
- [ 8 ] Li X, Wen S S, Yao R H. Analysis of optical performance for organic solar cell on Si substrate [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2012, 33(3):286-293 (in Chinese).
- [ 9 ] Persson N M, Arwin H, Inganäs O. Optical optimization of polyfluorene-fullerene blend photodiodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, 97(3):034503-1-5.
- [ 10 ] Zeng W J, Yong K S, Kam Z M, *et al.* Effect of MoO<sub>3</sub> as an interlayer on the performance of organic solar cells based on ZnPc and C<sub>60</sub> [J]. *Synth. Met.*, 2012, 161(23-24):2748-2752.
- [ 11 ] Varnamkhasti M G, Fallah H R, Mostajaboddavati M, *et al.* Comparison of metal oxides as anode buffer layer for small molecule organic photovoltaic cells [J]. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2012, 98:379-384.
- [ 12 ] Yang L G, Chen H Z, Wang M. Optimal film thickness for exciton diffusion length measurement by photocurrent response in organic heterostructures [J]. *Thin Solid Films*, 2008, 516(21):7701-7707.
- [ 13 ] Ghorashi S M B, Behjat A, Ajeian R. The effect of a buffer layer on the performance and optimal encapsulation time of ITO/CuPc/C<sub>60</sub>/buffer/Cu bilayer cells [J]. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2012, 96(1):50-57.
- [ 14 ] Lee Y J, Nichols W T, Kim D G, *et al.* Chemical vapour transport synthesis and optical characterization of MoO<sub>3</sub> thin films [J]. *J. Phys. D*, 2009, 42(11):115419-1-5.
- [ 15 ] Long Y B. Improving optical performance of inverted organic solar cells by microcavity effect [J]. *Appl. Phys. Lett.*,

2009, 95(19):193301-1-3.

- [16] Sergeant N P, Hadipour A, Niesen B, *et al.* Design of transparent anodes for resonant cavity enhanced light harvesting in organic solar cells [J]. *Adv. Mater.*, 2012, 24(6):728-732.
- [17] Chen T, Xie G H, Meng F X, *et al.* Tailoring spatial distribution of the optical field intensity in semitransparent inverted organic solar cells [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2011, 115(25):12611-12615.
- [18] Riede M, Uhrich C, Widmer J, *et al.* Efficient organic tandem solar cells based on small molecules [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2011, 21(16):3019-3028.
- [19] Liu Y D, Su Z S, Zhuang T J, *et al.* Significant enhanced performance of organic solar cells with F<sub>16</sub>CuPc as the anode buffer layer [J]. *Chin. J. Lumin. (发光学报)*, 2011, 32(11):1176-1184 (in Chinese).
- [20] Yan L L, Cai H X, Zhao X X, *et al.* Optical properties of the new MOLEDs [J]. *Chin. J. Lumin. (发光学报)*, 2010, 31(3):337-340 (in Chinese).
- [21] Yan L L, Zhang L W, Cai H X, *et al.* Optical properties of the new MOLED containing negative refractive index dielectric layer [J]. *Acta Optica Sinica (光学学报)*, 2010, 30(6):0631002-1-6 (in Chinese).
- [22] Wu K S, Long X T, Dong J W, *et al.* Phase properties of photonic crystal heterostructure and its applications [J]. *Acta Physica Sinica (物理学报)*, 2008, 57(10):6381-6385 (in Chinese).